

ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

นาย มัธยุดิน ดาเต๊ะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-533-260-7

ADAPTIVE LOAD TORQUE OBSERVER FOR A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR

Mr. Mahyudean Dadeh

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2003
ISBN 974-533-260-7**

มัสยูติน คาเด๊ะ : ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

(ADAPTIVE LOAD TORQUE OBSERVER FOR A THREE-PHASE INDUCTION

MOTOR) อ.ที่ปรึกษา : ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธย์, 188 หน้า

ISBN 974-533-260-7

โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลดเป็นการรบกวนภายนอกและเป็นปริมาณทางกายภาพ ปริมาณดังกล่าวต้องใช้อุปกรณ์วัดที่มีราคาแพงในการเข้าถึงเพื่อตรวจสอบหรือป้องกัน วิธีหนึ่งในการลดค่าใช้จ่ายดังกล่าว คือ การสร้างแผนการคำนวณโหลดทอร์กโดยใช้ตัวแปรสถานะ ที่เรียกว่า ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ แทนการใช้งานอุปกรณ์วัดทอร์กข้างต้น อย่างไรก็ตาม ค่าความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ มีผลกระทบต่อการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กและทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณดังกล่าว เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ซึ่งเกิดจากการขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ โดยการสร้างกลไกการปรับตัวหรือการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กในขณะที่ตัวสังเกตทำงาน เพื่อให้การคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในสถานะคงตัวมีค่าใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริงในระบบมากที่สุด จุดเด่นของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลด นอกจากนี้ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวสามารถนำมาใช้งานในระบบมอเตอร์และโหลดที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกอ้างอิงจากพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ จากผลการทดสอบพบว่าตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวที่นำเสนอให้ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในสถานะชั่วครู่ที่มีลักษณะตามรอยการเปลี่ยนแปลงของโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริง และให้ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในสถานะคงตัวใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่าผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่ได้จากตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

MAHYUDEAN DADEH : ADAPTIVE LOAD TORQUE OBSERVER FOR A THREE
PHASE INDUCTION MOTOR THESIS ADVISOR : ANANT OONSIVILAI, Ph.D.
188 PP. ISBN 974-533-260-7

ADAPTIVE OBSERVER/LOAD TORQUE OBSERVER/INDUCTION MOTOR

The load torque normally occurred in motor-load systems is the disturbance and physical quantities. Such the quantities must be measured by a high-cost measuring device to investigate and feed them back. One of the methods to reduce such the cost is implementation of the load torque calculation by using the state-variable called the linear full-order observer to replace a measuring device as mention. However, error between parameters of a linear full-order observer and those of a real system effects to load torque calculation process. To solve such problems as mention, this thesis proposes the adaptive mechanism to update parameters in a load torque observer called the adaptive load torque observer. This observer makes the estimated steady-state load torque equal or closed to the actual one in the system. The adaptive load torque observer is formed by expanding the structure of a linear full-order load torque observer. Fortunately, the proposed adaptive load torque observer can define initial parameters in estimation process. Such parameters are not necessary to equal to true parameters of a motor-load system. Moreover, the proposed adaptive load torque observer can be used in a motor-load system used an induction motor as an actuator having rotor flux orientated mathematical model. From the experiments, the results of the proposed adaptive load torque observer are satisfactory. In transient period of operation, the adaptive load torque observer tracks the variation of actual load torque. In steady-state period, it yields the estimated load torque more accurate than a linear full-order observer does.

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และกำลังใจ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์วิโรจน์ แสงธงทอง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษา และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิชัย สุจิตจร หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ เดชา พวงดาวเรือง ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณวิชัย ศรีสุรักษ์ ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องาน และขอขอบคุณคุณประพล จาระตะกู วิศวกรศูนย์เครื่องมือ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และในการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอขอบคุณบิดา มารดา รวมถึงบุคคลในครอบครัวของผู้เขียนทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และการสนับสนุนทางด้านการศึกษามาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในชีวิต

มัชฌิณ ดาเค๊ะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปแบบวิทยานิพนธ์	4
2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในระบบมอเตอร์และโหลด	5
2.1 บทนำ	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	6
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์และโหลด	13
2.4 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและระบบมอเตอร์และโหลด	15
2.4.1 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	15
2.4.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางกล	19
2.5 ผลการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ	22
2.6 สรุป	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....	26
3.1	บทนำ.....	26
3.2	ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....	27
3.2.1	ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา.....	28
3.2.2	ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับวงเปิด.....	29
3.2.3	ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับวงปิด.....	30
3.2.4	การออกแบบเมตริกซ์เกนของตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....	31
3.3	ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....	32
3.4	การวิเคราะห์ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....	34
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์.....	38
3.5.1	กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริง ของระบบ.....	40
3.5.2	กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริง ของระบบ.....	42
3.6	สรุป.....	46
4	ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว.....	47
4.1	บทนำ.....	47
4.2	การออกแบบตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว.....	49
4.2.1	การขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....	49
4.2.2	การพิจารณาเสถียรภาพโดยใช้ฟังก์ชันเลียปโนฟและกลไกการปรับตัว.....	50
4.2.3	การพิจารณาค่าเกนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว.....	53
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์.....	57
4.3.1	กรณีกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น สัญญาณขั้นบันได.....	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2	กรณีกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น สัญญาณไชนูซอยด์.....	61
4.4	สรุป.....	66
5	วงจรแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล.....	67
5.1	บทนำ.....	67
5.2	โครงสร้างโดยรวมของวงจรแปลงสัญญาณ.....	67
5.3	คุณสมบัติของไอซีที่ใช้.....	68
5.3.1	ไอซี LTC1298.....	68
5.3.2	ไอซี AD7538.....	72
5.4	พอร์ตเครื่องพิมพ์ของพีซี.....	74
5.5	การออกแบบและลักษณะการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณ.....	76
5.5.1	วงจรการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	76
5.5.2	วงจรการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก.....	85
5.6	การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณ.....	91
5.6.1	โมโนโทนิกซิตี.....	91
5.6.2	การทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่.....	91
5.6.3	การทดสอบในสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อก เป็นดิจิทัล.....	98
5.6.4	การทดสอบในสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นแอนะล็อก.....	98
5.7	สรุป.....	100
6	ผลการทดสอบตัวสังเกต์โหลดทอร์ก.....	102
6.1	บทนำ.....	102
6.2	ผลการทดสอบตัวสังเกต์โหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....	102
6.3	ผลการทดสอบตัวสังเกต์โหลดทอร์กแบบปรับตัว.....	110

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4 สรุป.....	119
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	120
7.1 สรุป.....	120
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	122
เอกสารอ้างอิง.....	123
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดข้อมูลต่างๆ ของไอซีที่ใช้สำหรับวงจรแปลงสัญญาณระหว่าง สัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล.....	125
ภาคผนวก ข. รายละเอียดการทดสอบตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดชนิดมาตร วัดความเร็ว.....	158
ภาคผนวก ค. รายละเอียดการสร้างตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและ ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว.....	164
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	177
ประวัติผู้เขียน.....	188

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบ16
2.2	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ได้จากการทดสอบ18
2.3	ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณ19
2.4	ค่าพารามิเตอร์กลางของแบบจำลองระบบมอเตอร์และโหลดที่ได้จากการทดสอบ22
3.1	ค่าพารามิเตอร์กลางของระบบมอเตอร์และโหลดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์31
3.2	ค่าพารามิเตอร์กลางของตัวสังเกตและแบบจำลองระบบมอเตอร์และโหลด ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์39
3.3	ค่าเกนของตัวสังเกตที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์40
3.4	ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ45
3.5	ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ45
4.1	ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์จริง ของระบบมีขนาดมากกว่าค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกต เท่ากับ 20เปอร์เซ็นต์60
5.1	คุณสมบัติที่สำคัญของไอซี LTC129869
5.2	ลอจิกของการเลือกช่องสัญญาณ72
5.3	พิกัดแรงดันสูงสุดของไอซี AD753872
5.4	ลอจิกที่กำหนดโหมดการทำงานของไอซี AD753874
5.5	โครงสร้างของพอร์ตเครื่องพิมพ์ชนิด D แบบ 25 ขา75
5.6	หมายเลขแอดเดรสกลุ่มสัญญาณของพอร์ตเครื่องพิมพ์76
5.7	ผลการทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรแปลงสัญญาณ96
5.8	ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล99
5.9	ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก99

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์.....8
2.2	การแปลงกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สามเฟสเป็นสองเฟส.....8
2.3	เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากฟลักตสแตเตอร์และที่ถูกอ้างอิงจากฟลักตสนามแม่เหล็กโรเตอร์.....10
2.4	การแปลงฟลักตอ้างอิงจากแกนสแตเตอร์เป็นแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์.....10
2.5	โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....12
2.6	ระบบมอเตอร์และโหลดในงานวิทยานิพนธ์นี้.....13
2.7	ระบบขับเคลื่อนโหลดที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน.....13
2.8	วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....15
2.9	การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า.....17
2.10	กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟสที่หนึ่ง.....24
2.11	ผลการจำลองสถานการณ์ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์และโหลด.....24
2.12	ผลการจำลองสถานการณ์กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....25
3.1	โครงสร้างของตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับวงปิด.....31
3.2	โครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ.....35
3.3	ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 20% ของฟลักต (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ).....40
3.4	ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 50% ของฟลักต (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ).....41

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว เมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 100% ของพิกัด (กรณี i_{eq} เป็นสัญญาณขั้นบันได).....	60
4.6 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{a}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริง ของระบบเป็นค่าคงที่)	62
4.7 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริง ของระบบเป็นค่าคงที่)	62
4.8 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเป็นค่าคงที่).....	63
4.9 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{a}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงในทันทีที่วินาที 30).....	64
4.10 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงในทันทีที่วินาที 30).....	64
4.11 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ในทันทีที่วินาที 30).....	65
5.1 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับการแปลงสัญญาณ	68
5.2 โครงสร้างภายในของไอซี LTC129	69
5.3 หลักการทำงานของไอซี LTC1298.....	70
5.4 การลำดับสัญญาณควบคุมอนุกรมที่ขา 5 ของไอซี LTC1298.....	71
5.5 โครงสร้างภายในของไอซี AD7538.....	73
5.6 ตำแหน่งของขาหรือบิตต่างๆ ในพอร์ตเครื่องพิมพ์ชนิด D แบบ 25 ขา.....	76
5.7 ส่วนประกอบของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	77
5.8 วงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์.....	78
5.9 วงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย.....	78
5.10 โครงสร้างของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ผลการทดสอบโมโนโทนิคซี้ด	92
5.12 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่	93
5.13 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์	93
5.14 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์	94
5.15 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 1500 เฮิรตซ์	94
5.16 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 2000 เฮิรตซ์	95
5.17 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 2500 เฮิรตซ์	95
5.18 ผลการตอบสนองทางความถี่ในส่วนของค่าแกน	97
5.19 ผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของมุมเลื่อนเฟส	97
6.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบตัวสังเกตโพลดทอร์ก	103
6.2 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้น ที่มีความชันมาก	106
6.3 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลง ที่มีความชันมาก	106
6.4 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้น ที่มีความชันปานกลาง	107
6.5 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลง ที่มีความชันปานกลาง	107
6.6 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้น ที่มีความชันน้อย	108
6.7 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลง ที่มีความชันน้อย	108
6.8 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได	109
6.9 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโพลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้น ที่มีความชันมากและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร	111

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในระบบควบคุมเซอร์โวแบบวงปิดที่ต้องการความเที่ยงทางตำแหน่งและความเร็ว โหลดทอร์กเป็นการรบกวนภายนอกที่เกิดขึ้นตามปกติ และเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดความผิดพลาดในระบบดังกล่าว เนื่องจากโหลดทอร์กเกิดจากแรงเสียดทาน แรงลมหรือแรงโน้มถ่วง โหลดทอร์กจึงเป็นปริมาณที่มีความยุ่งยากในการวัดและในหลายกรณีโหลดทอร์กเป็นปริมาณที่ไม่สามารถวัดได้หรือไม่สามารถเข้าถึงได้ นั่นคือการออกแบบระบบควบคุมที่นำข้อมูลโหลดทอร์กจริงเข้าชดเชยเพื่อให้มีความเที่ยงทางตำแหน่งและความเร็วเป็นงานที่มีค่าใช้จ่ายสูง หรือเป็นงานที่ไม่สามารถดำเนินการได้ในทางปฏิบัติ แต่เมื่อพิจารณาถึงการลดต้นทุนและแบบจำลองของระบบมอเตอร์และโหลด ตัวสังเกตโหลดทอร์กจะทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก แทนการวัดโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ และตัวสังเกตโหลดทอร์กข้างต้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมเซอร์โวแบบวงปิดเพื่อชดเชยให้มีความเที่ยง

ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับซึ่งมีรูปแบบเป็นสมการปริภูมิสถานะได้ถูกนำมาใช้คำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบแทนที่การวัดตัวตรวจรู้ที่มีราคาแพง แต่เนื่องจากตัวสังเกตโหลดทอร์กดังกล่าวมีค่าพารามิเตอร์ที่คงที่ และความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลด มีผลกระทบต่อตัวเลขโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณ กล่าวคือ ถ้าค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับจะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าไม่ตรงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ อีกทั้งในการใช้งานระบบมอเตอร์และโหลด ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยแวดล้อม ทำให้มีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตซึ่งเป็นค่าคงที่อาจมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ นอกจากนี้ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบมอเตอร์และโหลดจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีราคาแพง มีขั้นตอนที่สลับซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายสูง ต่อมาได้มีผู้คิดค้นตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวซึ่งมีกลไกการปรับตัว (adaptive mechanism) ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อชดเชยความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ แต่งานวิจัยดังกล่าวทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็ก

ไฟฟ้าและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงอาจมีค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบ

ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้มีแนวคิดในการแก้ไขปัญหาคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จริงของระบบโดยการนำเสนอตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ที่เกิดจากการขยายโครงสร้างจากตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นและเพิ่มเติมกลไกการปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์บางค่าของระบบมอเตอร์และโหลดจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ เป็นผลให้ตัวสังเกตคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมากกว่าตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้น และเนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดและพิกัดต่างๆ เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นตัวขับเคลื่อนของระบบมอเตอร์และโหลด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- ออกแบบตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวในโครงสร้างใหม่ที่ต้องการข้อมูลความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เป็นข้อมูลอินพุต ทำให้ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวระหว่างโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณและโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ มีขนาดน้อยกว่าค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวของปริมาณเดียวกันที่เกิดจากตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลด

- เพื่อทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวดังกล่าวเมื่อระบบมอเตอร์และโหลดถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในกรณีที่ค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลด และเปรียบเทียบผลของการทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับในกรณีเดียวกัน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลด เช่น สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดและค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าคงที่ แต่อาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ หรืออาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน ในขณะที่โมเมนต์ความเฉื่อยเป็นค่าพารามิเตอร์ของระบบที่คงที่ตลอดเวลาของการทดสอบ เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ความเฉื่อย คือการเปลี่ยนแปลงชนิดและน้ำหนักของโหลดเชิงกล

- การใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ถูกอ้างอิงจากแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (rotor flux orientated model of induction motor) เพื่อคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าในขั้นตอนการทดลองและบางขั้นตอนของการจำลองสถานการณ์
- พลังงานของโหลดทอร์กเปลี่ยนแปลงช้ามาก ($\dot{T}_L \approx 0$) เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานของระบบมอเตอร์และโหลด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวตามลำดับ เมื่อระบบมอเตอร์และโหลดถูกขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (actuator) ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว มีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลด เพื่อเปรียบเทียบความผิดพลาดระหว่างโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณและโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบของการทดสอบตัวสังเกตทั้งสอง
- การออกแบบตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวในโครงสร้างใหม่ที่เกิดจากการขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและการเลือกกลไกการปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตดังกล่าว เพื่อรักษาเงื่อนไขของเสถียรภาพในการคำนวณตัวแปรสถานะของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวข้างต้นซึ่งมีข้อมูลอินพุตคือความเร็วรอบของระบบและกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์
- การทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวตามลำดับด้วยการจำลองสถานการณ์ และการทดลองเมื่อระบบมอเตอร์และโหลดถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก โดยมีไดนาโมมิเตอร์ทำหน้าที่เป็นโหลดเชิงกล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวสำหรับใช้ในระบบมอเตอร์และโหลดที่ขับเคลื่อนโหลดด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก
- สามารถลดต้นทุนในการจัดซื้อและติดตั้งอุปกรณ์วัดโหลดทอร์กในสถานะคงตัวของระบบมอเตอร์และโหลด
- สามารถเป็นแนวทางสร้างตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวของระบบมอเตอร์และโหลดที่ขับเคลื่อนโหลดด้วยมอเตอร์ชนิดอื่น

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 4 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะชั่วคราว และในสถานะคงตัว พร้อมกับแสดงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

บทที่ 3 กล่าวถึงตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ และการวิเคราะห์การคำนวณตัวเลขโพลทอร์กของตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

บทที่ 4 กล่าวถึงแผนการคำนวณของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว ผลการจำลองสถานการณ์ตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบขั้นบันได และผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงคุณสมบัติการกระตุ้นแบบคงอยู่ (persistent excitation) ของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว

บทที่ 5 กล่าวถึงการสร้างวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีการแยกชัด 13 บิต และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีการแยกชัด 14 บิต

บทที่ 6 กล่าวถึงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบใช้งานตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและผลการทดสอบใช้งานตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. รายละเอียดข้อมูลของไอซีที่ใช้สำหรับวงจรแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล

ภาคผนวก ข. รายละเอียดการทดสอบตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็ว

ภาคผนวก ค. รายละเอียดการสร้างตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว

ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในระบบมอเตอร์และโหลด

2.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบจำลองสถานะคงตัว (steady state model) และแบบจำลองพลวัต (dynamic model) แบบจำลองสถานะคงตัวเป็นแบบจำลองที่อธิบายการทำงานของมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบและโหลดคงที่ และมีกำลังไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์สมดุลกันทั้งสามเฟส ส่วนแบบจำลองพลวัตเป็นแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในสถานะชั่วครู่ (transient state) ที่เกิดขึ้น หรือใช้อธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดขึ้นกับมอเตอร์ทันที เช่น การเพิ่มหรือลดโหลดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ หรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ เป็นต้น เมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคำนวณข้อมูลอินพุตของตัวสังเกตโหลดทอร์ก ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบบจำลองพลวัตเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคำนวณ แต่แบบจำลองชนิดนี้มีความยุ่งยาก เพราะมอเตอร์กระแสสลับโดยทั่วไปมีโครงสร้างทางกายภาพที่สลับซับซ้อนมากกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น (separately excited) อีกทั้งการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux distribution) และการกระจายของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก (magnetomotive force distribution : MMF distribution) มีลักษณะไม่หยุดนิ่งอยู่กับที่เหมือนกับมอเตอร์กระแสตรง อย่างไรก็ตาม ได้มีการนำเสนอแนวคิดที่จะอธิบายพลวัตของมอเตอร์กระแสสลับสามเฟสในรูปแบบอย่างง่าย

Hasse (1969) ได้เสนอแนวคิดการใช้ปริภูมิเวกเตอร์ (vector space) ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์โดยใช้เวกเตอร์แต่ไม่ได้รับความนิยม เพราะวิธีการดังกล่าวต้องการหน่วยประมวลผล (ซีพียู) หรือไมโครโปรเซสเซอร์รุ่นพิเศษที่มีความเร็วสูงมากในการคำนวณสมการคณิตศาสตร์และมีราคาแพง ทำให้มีความยุ่งยากในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม นอกจากนี้แบบจำลองที่กล่าวถึงไม่สามารถแทนการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ทุกกรณี ต่อมา Blaschke (1972) ได้นำเวกเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์หรือแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากฟลักตสเตเตอร์ มานิยามเป็นแกนหรือฟลักอ้างอิงเคลื่อนที่ (moving reference axis) และใช้แกนอ้างอิงนี้ในการสร้างและแยกแกนที่ขนานกับเวกเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์และแกนที่ตั้งฉากกับ

เวกเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ให้เป็นอิสระออกจากกัน จนเกิดแบบจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบใหม่ ที่คล้ายกับแบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น ซึ่งเป็นหลักการสำคัญของแบบจำลองที่ใช้แนวคิดการจัดทิศทางสนาม (field orientation)

เนื้อหาในบทที่ 2 จึงได้อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบมอเตอร์และโหลด พร้อมกับแสดงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองและผลการจำลองสถานการณ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในระบบมอเตอร์และโหลด

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เมื่อพิจารณาหลักการที่ Blaschke (1972) ได้นำเสนอ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า (Leonhard, 1997) ดังนี้

$$T_e(t) = K i_{mR} i_{Sq} \quad (2-1)$$

โดยที่ $K = (2/3)(1 - \cos \theta) L_s$ และเมื่อกำหนดให้ $i_{eq}(t) = i_{mR} i_{Sq}$ จะได้สมการของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบใหม่ กล่าวคือ

$$T_e(t) = K i_{eq} \quad (2-2)$$

โดยที่	T_e	คือ	ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า (N-m)
	K	คือ	ค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า (N-m/A)
	i_{mR}	คือ	ขนาดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (magnetizing current) (A)
	i_{Sq}	คือ	กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ และตั้งฉากกับเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (quadrature current component) (A)
	ω	คือ	ค่าคงที่การรั่วไหลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กในมอเตอร์
	L_s	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำเฉพาะตัวของขดลวดสเตเตอร์ (self inductance) ต่อเฟส (H)
	i_{eq}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า (equivalent current) (A)
	t	คือ	เวลา (sec)

ในส่วนของสมการที่(2-1)จะอธิบายได้ว่าสมการทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเหมือนกับสมการทอร์กของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น กล่าวคือ

ขนาดของกระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (i_{mr}) เปรียบเทียบได้กับปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนาม และกระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็กซึ่งถูกอ้างอิงจากแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (i_{sq}) เปรียบเทียบได้กับกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ ทำให้การคำนวณปริมาณทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เป็นงานที่ดำเนินการได้ เพราะการคำนวณทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ K และกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า i_{eq}

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นข้อมูลอินพุตของตัวสังเกตโพลทอร์ก และเป็นข้อมูลที่ไม่สามารถใช้ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า (current sensor) วัดและเข้าถึงได้โดยตรง เพราะข้อมูลของกระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก และ i_{sq} เป็นปริมาณทางกายภาพสมมุติที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นวิธีหนึ่งที่เข้าถึงปริมาณทางกายภาพดังกล่าวได้ คือ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นตัวประมาณค่า (estimator) ที่มีหน้าที่คำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีที่ตัวขับเคลื่อนระบบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก (squirrel cage) กระแสไฟฟ้าสามเฟสสมดุลถูกป้อนให้กับปลายขั้วไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ และเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถใช้ตัวตรวจรู้วัดที่บริเวณภายนอกของมอเตอร์ได้ ในขณะที่ปลายขั้วไฟฟ้าของขดลวดโรเตอร์ถูกลัดวงจรหรือเชื่อมต่อเข้าด้วยกันภายในมอเตอร์ ทำให้ไม่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าโรเตอร์สามเฟสได้ เป็นผลให้การคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าต้องเริ่มต้นจากกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์หรือเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนหรือฟลักซ์ของสเตเตอร์ (ฟลักซ์หยุดนิ่ง) และอยู่ในรูปของผลรวมนั่นคือ

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + i_{s2}(t)e^{j\gamma} + i_{s3}(t)e^{j2\gamma} \quad (2-3)$$

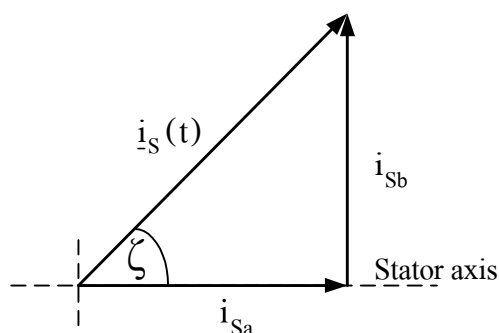
โดยที่ $\gamma = 120^\circ$; $i_{s1}(t)$, $i_{s2}(t)$ และ $i_{s3}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแต่ละเฟสที่สถานะชั่วครู่ และสถานะคงตัวรวมถึง $i_{s1}(t) + i_{s2}(t) + i_{s3}(t) = 0$ ซึ่งมีความหมายว่า กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในแต่ละเฟสเป็นกระแสสมดุล นอกจากนี้เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงและส่วนจินตภาพซึ่งทำมุมตั้งฉากกัน กล่าวคือ

$$i_s(t) = i_s e^{j\zeta(t)} = i_{sa} + j i_{sb} \quad (2-4)$$

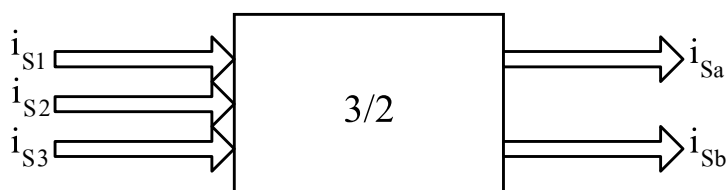
$$i_{sa}(t) = \frac{3}{2} i_{s1}(t) \quad (2-5)$$

$$i_{sb}(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} [i_{s2}(t) - i_{s3}(t)] \quad (2-6)$$

โดยที่ $i_s(t)$ คือขนาดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่สถานะชั่วครู่และสถานะคงตัว $i_{sa}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในทิศทางกับแกนสเตเตอร์ (stator axis) และ $i_{sb}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ตั้งฉากกับแกนสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สมการที่ (2-4) และ (2-5) จะมีความหมายว่า กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่เป็นกระแสลับสามเฟสถูกแปลงเป็นกระแสลับสองเฟสได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงจำนวนเฟสข้างต้นจะลดความสลับซับซ้อนในการคำนวณของตัวประมาณค่าหรือแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์



รูปที่ 2.2 การแปลงกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสเป็นสองเฟส

เนื่องจากเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่กล่าวถึงถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์ และเวกเตอร์ดังกล่าวหมุนหรือเคลื่อนที่ออกจากแกนสเตเตอร์ที่หยุดนิ่งด้วยตำแหน่งเชิงมุม (t) เป็นผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สลับซับซ้อน ดังนั้นจึงมีแนวคิดของการใช้พิกัดหรือแกนสนาม

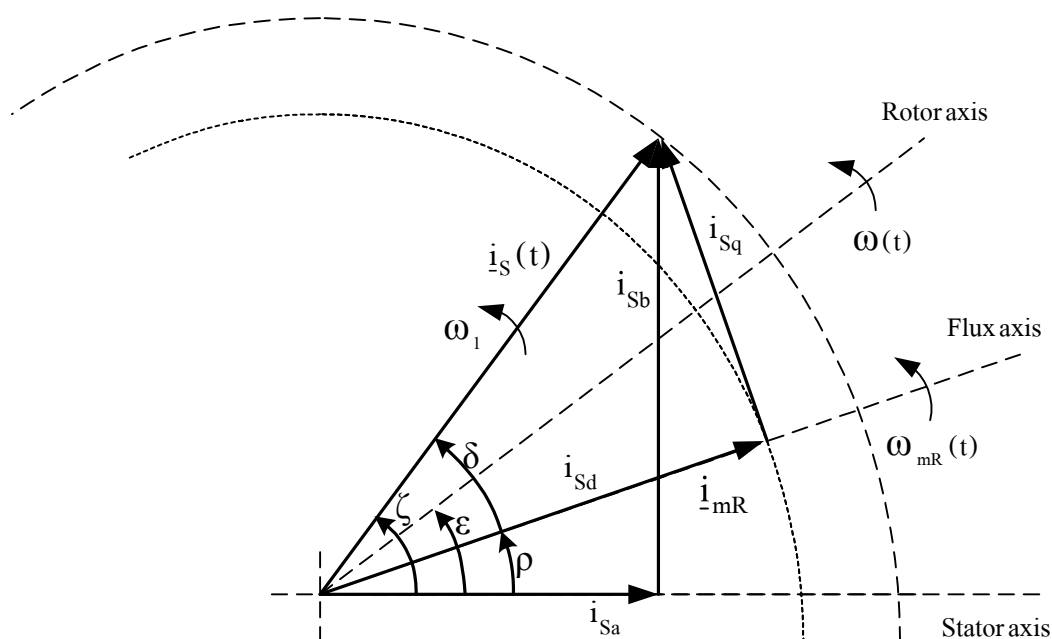
แม่เหล็กโรเตอร์ (แกนของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก) เป็นแกนอ้างอิง (พิกัดอ้างอิงเคลื่อนที่) ของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แทนพิกัดสเตเตอร์เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นหลักการเบื้องต้นของการจัดทิศทางสนาม แนวคิดของการเปลี่ยนแปลงพิกัดหรือแกนอ้างอิงที่พิจารณาเวกเตอร์ข้างต้น จะแสดงได้ในรูปที่ 2.3 และอธิบายได้ดังนี้ เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์มีอัตราเร็วเชิงมุมเท่ากับ $\omega_s(t)$ แกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์หมุนหรือเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมเท่ากับ $\omega_m(t)$ และมีตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\theta(t)$ นั่นคือ เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์จะหมุนหรือเคลื่อนที่ออกจากแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ด้วยตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\theta(t) = \theta(t) - \theta(t)$ ที่สถานะชั่วครู่และสถานะคงตัว รวมถึงการนำ $e^{-j\theta(t)}$ คูณกับเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากพิกัดสเตเตอร์ จะมีความหมายว่า แกนอ้างอิงของเวกเตอร์ที่กล่าวถึง คือ พิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ หรือ $i_s(t)e^{-j\theta(t)}$ เป็นเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ กล่าวคือ

$$i_s(t)e^{-j\theta(t)} = (i_{sa} + ji_{sb})e^{-j\theta(t)} = i_{sd} + ji_{sq} \quad (2-7)$$

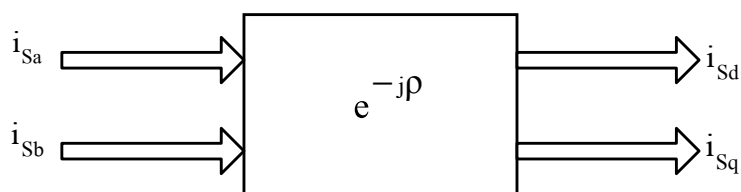
$$i_{sd}(t) = i_{sa} \cos(\theta) + i_{sb} \sin(\theta) \quad (2-8)$$

$$i_{sq}(t) = i_{sb} \cos(\theta) - i_{sa} \sin(\theta) \quad (2-9)$$

โดยที่ $i_{sd}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์และมีทิศทางกับเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (direct current component) และ $i_{sq}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ และตั้งฉากกับเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (quadrature current component) ลักษณะและทิศทางของกระแสไฟฟ้างกล่าวแสดงในรูปที่ 2.3 ในส่วนของการแปลงพิกัดอ้างอิงของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์จากพิกัดสเตเตอร์เป็นพิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ โดยนำ $e^{-j\theta}$ คูณกับกระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ ดังสมการที่ (2-7) ดังนั้น $i_{sd}(t)$ และ $i_{sq}(t)$ จะถูกคำนวณได้จากสมการที่ (2-8) และสมการที่ (2-9) ตามลำดับ โดยที่ θ คือ ตำแหน่งเชิงมุมของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากพิกัดสเตเตอร์ การแปลงพิกัดอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์เป็นแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากฟลักสเตเตอร์
และที่ถูกอ้างอิงจากฟลักสนามแม่เหล็กโรเตอร์



รูปที่ 2.4 การแปลงฟลักอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์เป็นแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์

นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบ i_{sd} และ i_{sq} เป็นกระแสตรงและเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ ในสถานะคงตัว i_{sd} และ i_{sq} จะมีค่าคงที่ เช่นเดียวกัน ในส่วนของการคำนวณขนาดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็กเพื่อใช้เป็นข้อมูลหรือตัวเลขที่คูณเข้ากับกระแสไฟฟ้าส่วนประกอบ i_{sq} ในสมการที่ (2-1) จะพิจารณาได้จากการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ

$$T_R \frac{di_{mR}}{dt} + i_{mR} = i_{sd} \quad (2-10)$$

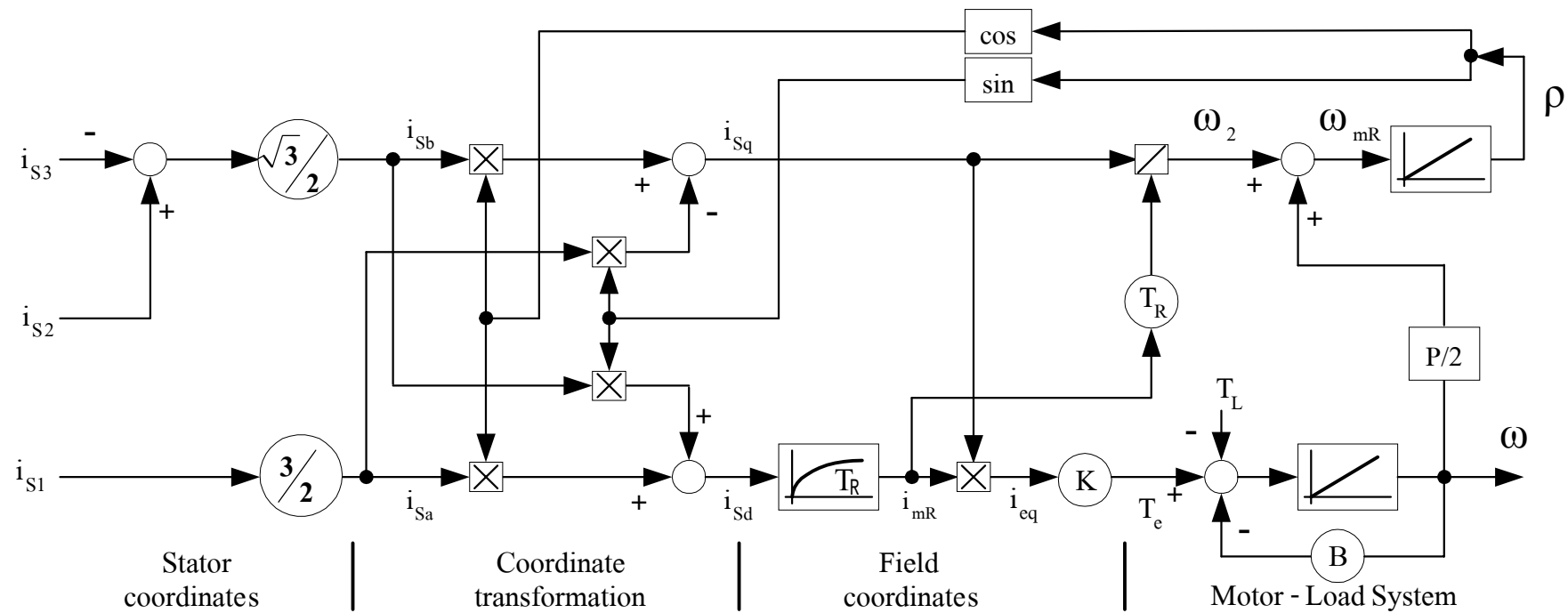
โดยที่ $T_R = L_R / R_R$ คือค่าคงตัวทางเวลาของโรเตอร์ L_R คือค่าความเหนี่ยวนำเฉพาะตัวของขดลวดโรเตอร์ต่อหนึ่งเฟส และ R_R คือค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ต่อหนึ่งเฟส เนื่องจากขนาดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (i_{mR}) เปรียบเทียบได้กับปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามในมอเตอร์กระแสตรงทำให้กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบ i_{sd} เปรียบเทียบได้กับแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสนาม และค่าคงตัวทางเวลาของโรเตอร์ T_R เปรียบเทียบได้กับค่าคงตัวทางเวลาของขดลวดสนาม ในส่วนของการคำนวณตำแหน่งเชิงมุมของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์ (t) ซึ่งเป็นตำแหน่งเชิงมุมของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็กเพื่อใช้เป็นข้อมูลหรือตัวเลขของการเปลี่ยนพิกัดอ้างอิงของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในสมการที่ (2-7) ตำแหน่งเชิงมุมดังกล่าวได้จากการอินทิเกรตอัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ $\omega_{mR}(t)$ ที่ถูกคำนวณเป็นตัวเลขในก่อนหน้านี้ นั่นคือ

$$\omega_{mR}(t) = \omega + \frac{i_{sq}}{T_R i_{mR}} = \omega + \omega_2 \quad (2-11)$$

$$\rho(t) = \int_0^t \omega_{mR}(\tau) d\tau \quad (2-12)$$

โดยที่ $\omega_2 = i_{sq} / T_R i_{mR}$, $\omega = d / dt$ คืออัตราเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนโพลคูณเข้ากับอัตราเร็วเชิงมุมของเพลลาหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เรเดียนต่อวินาที) และ (t) คือ ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนโพลคูณเข้ากับตำแหน่งเชิงมุมของเพลลาหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำ (เรเดียน) เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำดังกล่าวหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ในสภาวะคงตัวเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็กจะมีขนาดคงที่และหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่เช่นเดียวกัน นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกจะถูกแสดงได้ในรูปที่ 2.5 โดยที่ P คือ จำนวนโพลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ข้อดีในการใช้พิกัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์เป็นแกนอ้างอิงของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ คือ กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบ i_{sd} และ i_{sq} เป็นปริมาณที่แยกอิสระออกจากกัน ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกเหมือนกับแบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้นที่ไม่พิจารณาปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ และในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำหรือความเร็วรอบในช่วงที่ไม่มากกว่าความเร็วฐาน การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังกล่าว มีคุณลักษณะที่เหมือนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแตกต่างจากการใช้พิกัดสนามแม่เหล็กสเตเตอร์เป็นแกนอ้างอิงของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ซึ่งให้

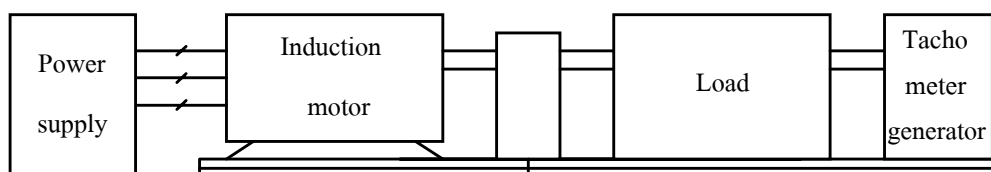


รูปที่ 2.5 โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

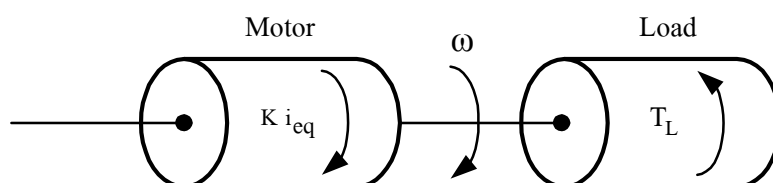
คุณลักษณะของแบบจำลองไม่เหมือนกับการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีที่มีความเร็วรอบต่ำ รวมถึงกระแสไฟฟ้าส่วนประกอบ i_{sd} และ i_{sq} เป็นปริมาณที่สัมพันธ์กัน

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์และโหลด

ระบบมอเตอร์และโหลดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับสามเฟสสมดุล (AC power supply) มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก เครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็ว (tachometer generator) และโหลด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณา มอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนโหลดให้เกิดการหมุน จะได้ว่า มอเตอร์ดังกล่าวสร้าง ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ($K i_{eq}$) ซึ่งเป็นทอร์กที่ใช้ขับเคลื่อนระบบ ในขณะที่โหลดสร้างโหลดทอร์ก (T_L) ซึ่งเป็นทอร์กที่ต้านทานการหมุนของระบบ เมื่อทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดมากกว่าโหลด ทอร์ก ระบบจะหมุนด้วยความเร็วรอบ (ω) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ระบบมอเตอร์และโหลดในงานวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 2.7 ระบบขับเคลื่อนโหลดที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน

กำหนดให้โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ พลาวัตของระบบ ทำให้สมการพลวัตเชิงกลของระบบถูกเขียนเป็น

$$\dot{\omega} = a \omega + b i_{eq} + c T_L ; \quad \omega(0) = \omega_0 \quad (2-13)$$

$$\dot{T}_L \approx 0 \quad (2-14)$$

โดยที่ $a = -B/J$, $b = K/J$ และ $c = -1/J$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์และโหลด

ω คือ ความเร็วรอบเริ่มต้นของระบบ

$\dot{\theta}$ คือ ความเร็วรอบของเพลาหมุนระบบมอเตอร์และโหลด ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะ (rad/sec)

i_{eq} คือ กระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (A)

T_L คือ โหลดทอร์กที่เกิดจากแรงเสียดทาน แรงลม หรือแรงโน้มถ่วงที่ต้านการหมุนของระบบ ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะ (N-m)

B คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบมอเตอร์และโหลด (N-m/rad/sec)

K คือ ค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (N-m/A)

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (kg-m^2)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-13) และ (2-14) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปริมาณอินพุตของระบบ และความเร็วรอบเพลาหมุนเป็นปริมาณเอาต์พุตของระบบ ดังนั้นจึงเขียนพลวัตเชิงกลของระบบให้อยู่ในรูปแบบของสมการปริภูมิสถานะได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & c \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} i_{eq} \quad (2-15)$$

สมการที่ (2-15) อธิบายถึงพลวัตของระบบมอเตอร์และโหลด โดยมีความเร็วรอบและโหลดทอร์กของระบบเป็นตัวแปรสถานะ และมีกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวแปรอินพุต สมการดังกล่าวเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์และโหลด ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในสร้างแผนการคำนวณโหลดทอร์กหรือตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวต่อไปในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นส่วนประกอบของแบบจำลอง จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อมทั้งภายในและภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น จุดการทำงาน การหล่อลื่น และอายุการใช้งาน ฯลฯ แต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในขณะที่ค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อมภายในและภายนอก เช่น ฟลักซ์แม่เหล็ก อุณหภูมิ จุดการทำงาน และอายุการใช้งาน ฯลฯ แต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นเดียวกัน ในส่วนของโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบจะเป็นค่าคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงระยะเวลาการหมุนของระบบ เนื่องจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

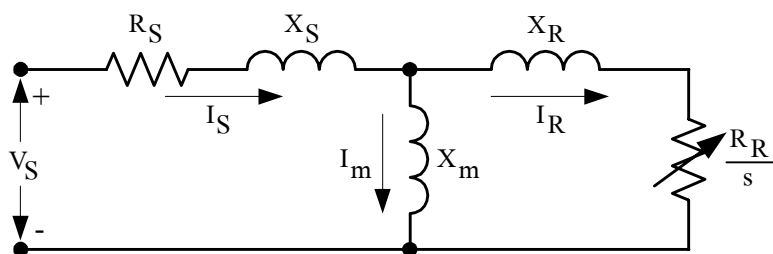
ของระบบจะขึ้นอยู่กับรูปทรง ชนิด หรือน้ำหนักของโหลดก่อนการหมุน ดังนั้นถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของโหลดหรือชนิดของตัวขับเคลื่อน ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบจะมีค่าคงที่ จากที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ดังนี้ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์และโหลด ค่าพารามิเตอร์ที่อาจมีการเปลี่ยนแปลง คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบ และค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ

2.4 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและระบบมอเตอร์และโหลด

การใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและระบบมอเตอร์และโหลด จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำและค่าพารามิเตอร์ทางกลของระบบมอเตอร์และโหลด ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงแบ่งการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน คือ การหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าหรือค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และการหาค่าพารามิเตอร์ทางกลหรือพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์และโหลด วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีขั้นตอนที่ง่ายไม่สลับซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อย และใช้สูตรพื้นฐานในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ข้างต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พิจารณาจากวงจรสมมูลต่อเฟสในสถานะคงตัว ซึ่งแสดงใน รูปที่ 2.8 (Fitzgerald, Kingsley, and Uman, 1990) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวเป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่	V_s	คือ	ค่า RMS ของแรงดันที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับปลายขั้วไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ (V)
	I_s	คือ	ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (A)
	I_R	คือ	ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ (A)
	I_m	คือ	ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าสร้างแม่เหล็ก (A)
	R_s	คือ	ค่าความต้านทานสเตเตอร์ของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (Ω)
	R_R	คือ	ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงถึงสเตเตอร์ต่อเฟส (Ω)
	X_m	คือ	ค่ารีแอ็กแตนซ์ทำแม่เหล็กต่อเฟส (Ω)
	X_s	คือ	ค่ารีแอ็กแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (Ω)
	X_R	คือ	ค่ารีแอ็กแตนซ์รั่วของขดลวดโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงถึงสเตเตอร์ต่อเฟส (Ω)
	s	คือ	ค่าสลิป

วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะคงตัว แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 รายละเอียดของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ มีดังต่อไปนี้

มอเตอร์ ที่ใช้ทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสมดุลงานกรงกระรอก แบบ 4 โพล มีความถี่พิกัดเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ ผลิตโดยบริษัท ELWE สำหรับค่าพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบ

กำลังงาน	370 W
แรงดัน (V)	220/380 V
กระแส (A)	1.1/1.9 A
ความเร็วรอบ	1380 RPM
ทอร์ก	2.54 N-m

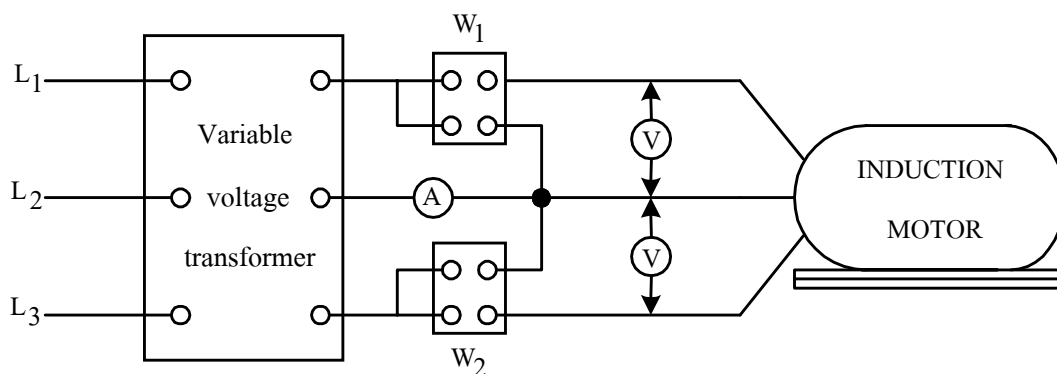
วัตต์มิเตอร์ (W) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนถึงมอเตอร์ และเป็นวัตต์มิเตอร์แบบยูนิเวอร์แซล (universal wattmeter) รุ่น LM1010 ที่มีความแม่นยำ 1.5% ผลิตโดยบริษัท ELEKTRISCH

โวลต์มิเตอร์ (V) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดัน ผลิตโดยบริษัท KAISE ELECTRIC WORKS รุ่น SK-5000F ที่มีความแม่นยำ 2%

แอมป์มิเตอร์ (A) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดกระแส ผลิตโดยบริษัท KAISE ELECTRIC WORKS รุ่น SK-5000A ที่มีความแม่นยำ 2%

หม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ (variable voltage transformer: auto-transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนถึงมอเตอร์ หม้อแปลงดังกล่าวมีขนาดพิกัด 3.3 KVA และปรับเปลี่ยนแรงดันได้ในย่าน 0 - 450 โวลต์ ผลิตโดยบริษัท VOLTAC

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล (no-load test) ซึ่งมีลำดับคือ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าสภาวะเฟสสมดุลที่มีความถี่พิกัดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งไม่มีภาระทางกล ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นค่าสลิปมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ เมื่อพิจารณาวจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะได้ว่า เทอมของ R_r/s มีค่าสูงมาก เป็นผลให้ขดลวดโรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยมาก นั่นคือ ไม่มีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นในขดลวดโรเตอร์หรือมีน้อยมาก ดังนั้นกำลังงานสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วย กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) กำลังงานสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (stator copper losses) และกำลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุน (rotational losses) (Fitzgerald, Kingsley, and Uman, 1990)



รูปที่ 2.9 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการทดสอบขั้วโรเตอร์ (block-rotor test) ซึ่งมีรายละเอียดคือ การจับยึดโรเตอร์หรือเพลามุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่ให้เกิดการหมุนในขณะที่หม้อแปลงปรับเปลี่ยนแรงดันจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกปรับเปลี่ยนให้มีขนาดเพิ่มขึ้น เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่าพิกัด

และเนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีขนาดน้อยกว่า 18.5 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำในการทดสอบยึดโรเตอร์ อาจมีความถี่ที่เท่ากับความถี่ปกติได้ (Fitzgerald, Kingsley, and Uman, 1990) เมื่อโรเตอร์ถูกจับยึดและไม่เกิดการหมุน มอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าสลิปเท่ากับหนึ่ง และไม่มีกำลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุนเกิดขึ้น เป็นผลให้ในขดลวดโรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นกำลังงานสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงประกอบด้วย กำลังงานสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก และกำลังงานสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (rotor copper loss)

ขั้นตอนที่ 4 เป็นวิธีการทดสอบโวลต์แอมป์ (V-I method) หรือการหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส ซึ่งมีลำดับคือ การป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ตกคร่อมปลายขั้วไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ ต่อมาเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวให้มีขนาดมากขึ้น เพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านปลายขั้วไฟฟ้าและขดลวดสเตเตอร์ให้มีขนาดมากขึ้นและมีขนาดที่เท่ากับค่าปกติ จากนั้นวัดและบันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด เพื่อนำมาคำนวณค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส โดยใช้กฎของโอห์ม (Chapman, 1991)

ผลลัพธ์ของการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่พิจารณาจากวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในสถานะคงตัว แสดงได้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ได้จากการทดสอบ

$R_s (\Omega)$	$R_r (\Omega)$	$X_s (\Omega)$	$X_r (\Omega)$	$X_m (\Omega)$
26.83	24.32	21.07	31.61	307.98

ต่อมาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ถูกป้อนจากแหล่งจ่ายกระแสในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว จะถูกคำนวณได้จาก (Leonhard, 1997) ดังสมการต่อไปนี้

$$L_o = X_m / 2 f \quad (2-16)$$

$$s = X_s / 2 f L_o \quad (2-17)$$

$$r = X_r / 2 f L_o \quad (2-18)$$

$$L_s = (1 + s) L_o \quad (2-19)$$

$$L_R = (1 + r) L_o \quad (2-20)$$

$$= 1 - 1/(1 + s)(1 + r) \quad (2-21)$$

$$K = (2/3)(1 -) L_s \quad (2-22)$$

$$T_R = L_R / R_R \quad (2-23)$$

โดยที่	L_o	คือ	ความเหนี่ยวนำร่วม (H)
	L_s	คือ	ความเหนี่ยวนำเฉพาะตัวของขดลวดสเตเตอร์ต่อหนึ่งเฟส (H)
	L_R	คือ	ความเหนี่ยวนำเฉพาะตัวของขดลวดโรเตอร์ต่อหนึ่งเฟส (H)
	T_R	คือ	ค่าคงตัวทางเวลาของโรเตอร์ (sec)
	.	คือ	ค่าคงที่การรั่วไหลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กในมอเตอร์
	s	คือ	ค่าคงที่การรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์
	r	คือ	ค่าคงที่การรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในโรเตอร์
	f	คือ	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณ

L_o (mH)	s	r	.	K (N-m/A)	T_R (sec)
980.3	0.068	0.103	0.151	0.593	0.044

2.4.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางกล

การหาค่าพารามิเตอร์ทางกลในงานวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ คือ ผลรวมของโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและโมเมนต์ความเฉื่อยของไดนาโมมิเตอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวจับเร็วและโหลด ตามลำดับ โดยที่ไม่พิจารณาโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดชนิดซินโครเมตรวัดความเร็ว ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบ ในการคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามเฟสและไดนาโมมิเตอร์ สมมุติให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและไดนาโมมิเตอร์มีรูปทรงหรือรูปร่างเป็นทรงกระบอกตัน ซึ่งจะคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยได้จากสมการที่ (2-24) (Canon, 1967)

$$J = (1/2) m r_o^2 \quad (2-24)$$

โดยที่ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m^2)

m คือ มวลของวัตถุ (kg)

r_o คือ รัศมีรอบนอกของวัตถุ (m)

การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสหรือไดนาโมมิเตอร์ต้องการข้อมูลที่ได้จากการชั่งน้ำหนักของโรเตอร์และการวัดรัศมีรอบนอกของโรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่เคลื่อนที่หรือหมุนได้ภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสหรือไดนาโมมิเตอร์ แต่เนื่องจากอุปกรณ์การทดลองดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียนการสอน รวมถึงการถอดโรเตอร์ออกจากสเตเตอร์เพื่อนำมาชั่งน้ำหนักหรือวัดรัศมีรอบนอก และการประกอบเข้ากลับคืนสู่สภาพเดิม เป็นงานที่มีความยุ่งยากและมีความสลับซับซ้อนมาก เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและไดนาโมมิเตอร์มีอะไหล่ชิ้นส่วนหรือกลไกเชิงกลขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ที่สัมพันธ์กับการวางแนวตรงของเพลาลูกหมุนและโรเตอร์ที่ทำหน้าที่รักษาความสมดุลของขนาดช่องอากาศ (air gap) หรือระยะห่างโดยรอบระหว่างพื้นผิวของสเตเตอร์และพื้นผิวของโรเตอร์ ทำให้ต้องพิจารณาการชั่งน้ำหนักและการวัดรัศมีรอบนอกของโรเตอร์หรือขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงที่มีขนาดใกล้เคียงกับโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้งาน ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงข้างต้นเป็นมอเตอร์ที่มีสภาพชำรุดและไม่สามารถใช้งานได้ นอกจากนี้โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและโรเตอร์ของไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ทดลองมีขนาดใกล้เคียงกัน เป็นผลให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังกล่าว มีโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากันโดยประมาณ นั่นคือโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบมีค่าเท่ากับสองเท่าของโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสหรือสองเท่าของโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์มอเตอร์กระแสตรงที่มีขนาดใกล้เคียงกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้งาน เมื่อนำโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงมาชั่งน้ำหนักและวัดรัศมีรอบนอก จะได้ว่า โรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงมีมวลเท่ากับ 1.40 kg และมีรัศมีรอบนอกเท่ากับ 0.0280 m เป็นผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 0.000548 kg-m^2 ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 0.001096 kg-m^2

สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด เป็นการหาสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบในสถานะคงตัว ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้ ทำการเชื่อมต่อเพลาลูกหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสาม

เฟส ไดนาโมมิเตอร์ และเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็วเข้าด้วยกัน ตามลำดับ เพื่อจัดเตรียมเป็นชุดอุปกรณ์การทดลองโดยที่เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีหน้าที่คำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือทำหน้าที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ถูกป้อนจากแหล่งจ่ายกระแสในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว ในส่วนของวงจรแปลงสัญญาณมีหน้าที่แปลงแรงดันแอนะล็อกที่ได้จากตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็ว เป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งข้อมูลที่ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ ต่อมาป้อนหรือจ่ายแรงดันกระแสสลับสามเฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำและไดนาโมมิเตอร์ เพื่อเดินเครื่อง (start) มอเตอร์ให้เริ่มหมุนและเดินเครื่องไดนาโมมิเตอร์ให้เริ่มต้นสร้างโหลดทอร์ก มอเตอร์เหนี่ยวนำจะขับเคลื่อนโหลดให้หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือในทิศทางเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วรอบที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมในสถานะชั่วคราว และในสถานะคงตัว ระบบมอเตอร์และโหลดหมุนด้วยความเร็วรอบที่มีค่าคงที่ นั่นคือ ในสถานะคงตัว อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบมีค่าเท่ากับศูนย์ พลวัตเชิงกลของระบบในสมการที่ (2-13) จะถูกเขียนเป็น

$$B = \frac{K i_{eq} - T_L}{\omega} \quad (2-25)$$

นอกจากการทำหน้าที่เป็นโหลดหรือการสร้างโหลดทอร์ก ไดนาโมมิเตอร์ยังมีหน้าที่วัดปริมาณโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ถูกป้อนจากแหล่งจ่ายกระแสจะได้รับปริมาณของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟสที่ 1 และเฟสที่ 3 จากตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า และได้รับปริมาณความเร็วรอบเพล่าหมุนของระบบจากเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็ว เพื่อคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส นอกจากนี้การทดสอบ กำหนดให้โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งของการหมุนระบบมอเตอร์และโหลด มีค่าเพิ่มขึ้นและมีขนาดคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการหมุนเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบที่ได้จากการทดสอบมีมากกว่าหนึ่งค่า เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดดังกล่าวมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบมีค่าเท่ากับ 0.000368 N-m/rad/sec

ค่าพารามิเตอร์ a, b และ c ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์และโหลดหรือพลวัตเชิงกลของระบบในสมการที่ (2-13) จะถูกคำนวณเป็นตัวเลขที่แสดงได้ในตารางที่ 2.4 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ a และ b ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณ เป็นค่าเฉลี่ยหรือค่าโดยประมาณของระบบ แต่ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อมทั้งภายใน

ในและภายนอก ซึ่งไม่สัมพันธ์กับเวลา ทำให้ในขณะที่ระบบมอเตอร์และโหลดหมุนค่าพารามิเตอร์ a และ b ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณอาจจะมีค่าไม่เท่ากับหรือไม่ตรงกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ นั่นคือ ค่าพารามิเตอร์ a และ b ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณดังกล่าว เป็นค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ (nominal parameter values) a_0 และ b_0 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ และเป็นค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว

ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์กลางของแบบจำลองระบบมอเตอร์และโหลดที่ได้จากการทดสอบ

a_0	b_0	c
-0.336	540.774	-912.409

2.5 ผลการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ

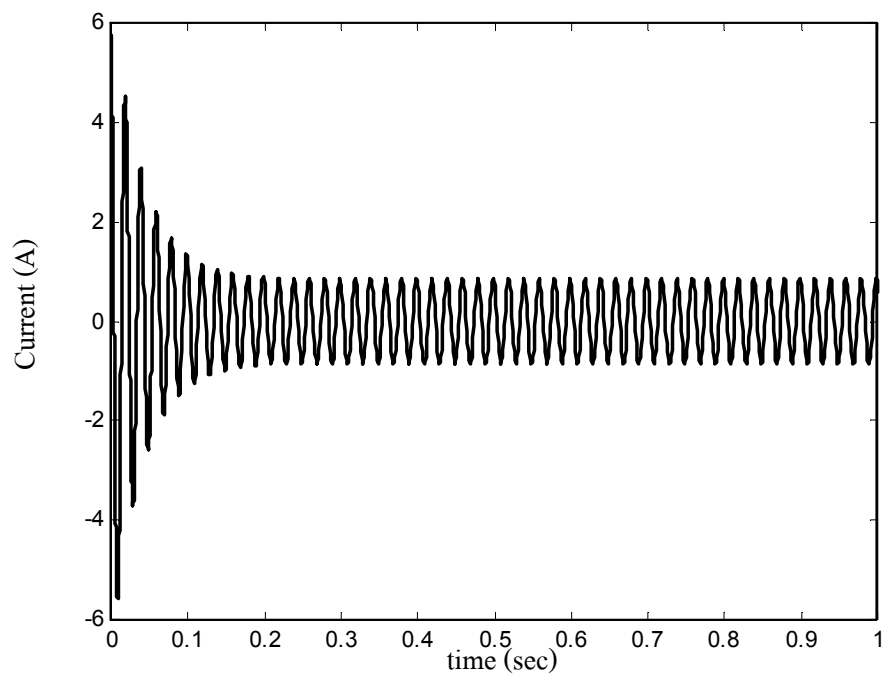
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ถูกป้อนจากแหล่งจ่ายกระแสในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว มีหน้าที่คำนวณปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อป้อนเป็นตัวแปรอินพุตให้กับตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ซึ่งจะได้กล่าวอธิบายในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ดังนั้นการจำลองสถานการณ์เชิงเลขของการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำและความเร็วรอบในการหมุนของแบบจำลองระบบมอเตอร์และโหลดจะถูกดำเนินการตรวจสอบ โดยเริ่มต้นจากการป้อนแรงดันกระแสสลับ 3 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อป้อนเป็นอินพุตให้กับตัวสังเกตโหลดและขับเคลื่อนโหลดให้หมุนจากการหยุดนิ่ง เป็นผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ได้รับกระแสไฟฟ้าสลับจากแหล่งจ่ายและคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อสร้างทอร์กขับเคลื่อนระบบมอเตอร์และโหลดให้เกิดการหมุนด้วยความเร็วรอบที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับปริมาณความเร็วรอบของระบบที่มีค่าเพิ่มขึ้นในสถานะชั่วคราว แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน เมื่อเวลาผ่านไปนานเพียงพอหรือระบบมอเตอร์และโหลดอยู่ในสถานะคงตัว แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ และระบบจะหมุนด้วยความเร็วรอบที่มีค่าคงที่เช่นเดียวกัน

ในการจำลองสถานการณ์การคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับข้อมูลของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟสที่หนึ่ง ดังรูปที่ 2.10 และได้รับข้อมูลกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟสที่สาม ซึ่งมีมุมเลื่อนเฟสเท่ากับ 240 องศา (ถ้าหลัง) เมื่อเทียบกับข้อมูลของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟสที่หนึ่ง รวมถึงได้รับข้อมูลความเร็วรอบจากแบบจำลองของระบบมอเตอร์และโหลด ดังรูปที่ 2.11 ในส่วนของผลการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.12

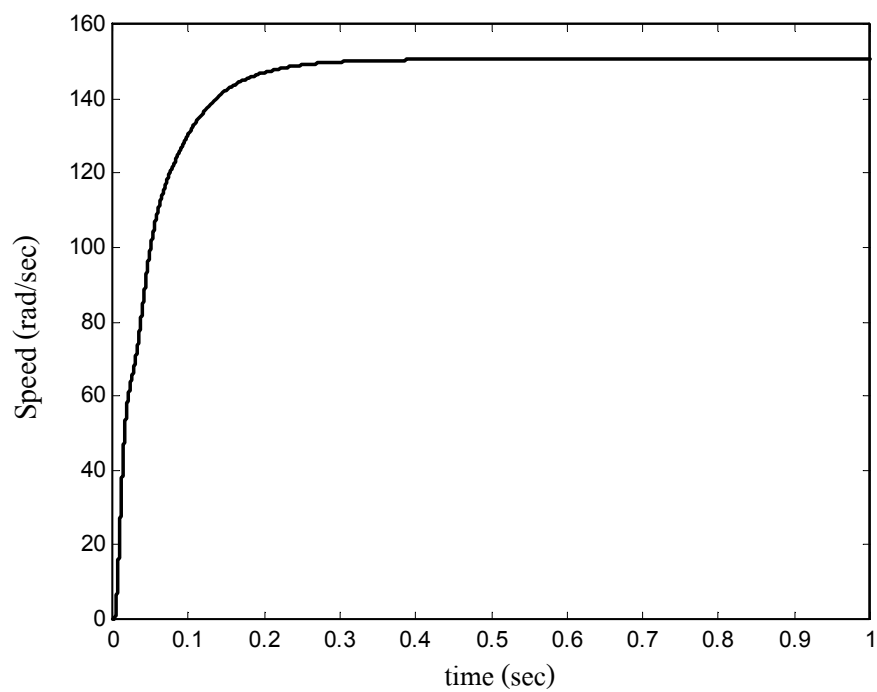
รูปที่ 2.10 มีความหมายว่า ในสถานะชั่วคราว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์สามเฟสที่มีขนาดหรือแอมพลิจูดมาก เพราะในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ภายในมอเตอร์ไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกคร่อม เป็นผลให้ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์เท่านั้น ที่ทำหน้าที่จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้า แต่เมื่อเวลาผ่านไปขดลวดสเตเตอร์เริ่มมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกคร่อม กระแสไฟฟ้าสลับที่ไหลผ่านจึงเริ่มมีแอมพลิจูดที่ลดลง ในสถานะคงตัว ขดลวดสเตเตอร์มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำไขว้ชอยด์ตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นจนถึงแอมพลิจูดคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้กระแสไฟฟ้าสลับที่ไหลผ่านมีแอมพลิจูดที่ลดลงจนเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเหมือนกับกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

ในรูปที่ 2.11 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงความเร็วรอบของระบบมอเตอร์และโหลดในสถานะชั่วคราวจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในสถานะคงตัว ระบบจะหมุนด้วยความเร็วรอบที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในรูปที่ 2.12 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงในสถานะชั่วคราว กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีขนาดมาก และในสถานะคงตัว กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดที่ลดลงถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดอาร์มเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงที่มีขนาดมากในสถานะชั่วคราว และมีขนาดลดลงจนเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งในสถานะคงตัว ตามลำดับ

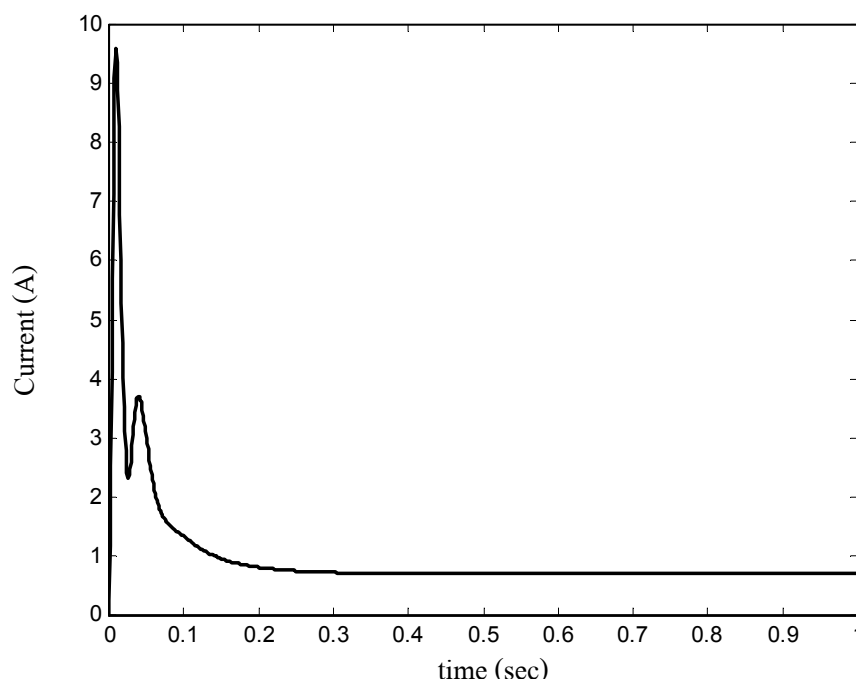
เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ไม่มีภาระทางกลและในขณะที่ยึดโรเตอร์ และค่าพารามิเตอร์ทางกลในแบบจำลองของระบบมอเตอร์และโหลดที่ได้จากการทดสอบระบบมอเตอร์และโหลดและคำนวณโดยใช้สูตรวิเคราะห์ เป็นผลให้การจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 2.11 แสดงถึงความเร็วรอบของระบบในสถานะคงตัวมีค่าเท่ากับ 150.9 rad/sec และรูปที่ 2.12 แสดงถึงการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะคงตัวมีค่าเท่ากับ 0.6 A โดยที่โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีขนาดคงที่เท่ากับ 0.3 N-m



รูปที่ 2.10 กระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟสที่หนึ่ง



รูปที่ 2.11 ผลการจำลองสถานการณ์ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์และโหลด



รูปที่ 2.12 ผลการจำลองสถานการณ์กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.6 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ มีพื้นฐานแนวความคิดจากทฤษฎีการจัดทิศทางสนามทำให้สมการทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส มีรูปแบบเดียวกับสมการทอร์กของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบจำลองดังกล่าวมีหน้าที่คำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อป้อนเป็นตัวแปรอินพุตให้กับตัวสังเกตโพลทอร์ก ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3 และบทที่ 4 จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าในสถานะคงตัว แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้ผลการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าอาร์มเจอร์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น ในส่วนของแบบจำลองของระบบมอเตอร์และโหลดถูกนำไปใช้ในการออกแบบหรือสร้างตัวสังเกตโพลทอร์กแบบเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว นอกจากนี้เนื้อหาในบทที่ 2 กล่าวถึงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์และโหลดโดยอาศัยวิธีการทดสอบและการคำนวณที่ไม่สลับซับซ้อน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ป้อนเป็นค่าพารามิเตอร์กลางของตัวสังเกตในขั้นตอนการทดสอบตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 3

ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

3.1 บทนำ

ในระบบควบคุมแบบวงปิด ตัวแปรสถานะของกระบวนการ (process หรือ plant) จะถูกวัดและป้อนกลับไปยังตัวควบคุมเพื่อใช้เป็นข้อมูลที่จัดแจงการทำงานของตัวควบคุมดังกล่าว และชุดเซตกระบวนการ ซึ่งการป้อนกลับสถานะ (state feedback) ที่กล่าวถึง มีแนวคิดของการวัดและการป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัว แต่ในทางปฏิบัติเมื่อกระบวนการหรือระบบที่ถูกพิจารณาเป็นตัวแปรสถานะบางตัวที่ไม่สามารถวัดได้ เพราะตัวแปรสถานะข้างต้นอาจเป็นปริมาณทางกายภาพที่เกิดขึ้นในตัวขับเคลื่อนหรืออุปกรณ์เครื่องจักรกลสำเร็จรูป ซึ่งไม่สามารถติดตั้งตัวตรวจรู้ (sensor) เพื่อวัดตัวแปรสถานะที่ต้องการภายในอุปกรณ์ได้ หรือบริเวณที่มีตัวแปรสถานะเกิดขึ้นอาจเป็นตำแหน่งที่มีการสัมผัสเทียนเชิงกลหรือมีการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นผลให้สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจรู้อิเล็กทรอนิกส์มีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน นอกจากนี้บริเวณที่ตัวแปรสถานะเกิดขึ้นอาจเป็นบริเวณที่มีการกีดรอนของสารเคมีหรือแก๊สพิษสูง ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้งานตัวตรวจรู้ที่มีการซื้อขายในตลาดของตัวแทนจำหน่ายและบริษัทผู้ผลิตได้ เป็นผลให้การป้อนกลับสถานะเป็นงานที่ไม่สามารถสร้างหรือดำเนินการให้เป็นจริงได้เช่นเดียวกัน เพื่อแก้ไขปัญหาที่กล่าวถึง Luenberger (1964, 1966, 1971) ได้เสนอแผนการคำนวณตัวแปรสถานะในรูปแบบของสมการปริภูมิสถานะ ที่ถูกเรียกว่า ตัวสังเกตสถานะ (state observer) เพื่อแทนที่การใช้งานตัวตรวจรู้ซึ่งมีข้อดีคือ การลงทุนซื้อและการติดตั้งตัวตรวจรู้มีค่าใช้จ่ายที่ลดลง เพราะการใช้งานตัวตรวจรู้จะมีจำนวนที่น้อยลง ในกรณีที่ตัวแปรสถานะเป็นปริมาณทางกายภาพที่เกิดขึ้นภายนอกของอุปกรณ์และมีความยุ่งยากในการวัด เช่น แรงเสียดทาน โหลดทอร์ก ฯลฯ ทำให้ต้องใช้ตัวตรวจรู้ชนิดพิเศษที่มีราคาค่อนข้างสูงในการเข้าถึง เพื่อป้อนกลับสัญญาณที่วัดได้ หรือเพื่อตรวจสอบ (monitor) การเกิดขึ้นของตัวแปรสถานะในระบบ แต่ถ้าต้องการประหยัดค่าใช้จ่าย แนวทางหนึ่ง คือ การใช้งานตัวสังเกตสถานะเพื่อทำหน้าที่แทนตัวตรวจรู้ชนิดพิเศษที่กล่าวถึง นอกจากนี้ข้อดีเพิ่มเติมของการใช้งานตัวสังเกตสถานะ คือ การหาความผิดปกติ (fault) ของระบบที่หยุดการทำงาน เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างตัวสังเกตสถานะ ทำให้ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวสังเกตและความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตสถานะเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ มีผลกระทบต่อดัชนีตัวแปรสถานะที่ได้จากการ

คำนวณ ซึ่งอาจจะมีค่าเท่ากับหรือแตกต่างจากตัวแปรสถานะเดียวกันที่เกิดขึ้นในระบบ รวมถึงมีผลทำให้ระบบควบคุมแบบวงปิดมีการการคำนวณของตัวสังเกตสถานะเพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มเติมจากการจัดแจงการทำงานของตัวควบคุมที่มีอยู่เดิม ในขณะที่จำนวนของตัวตรวจรู้ลดลงเหลือน้อยที่สุดเท่ากับสอง เพื่อวัดและเข้าถึงตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตของระบบ

เมื่อพิจารณาโหนดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลด จะได้ว่า โหนดทอร์กดังกล่าวเป็นการรบกวนภายนอกและเป็นปริมาณทางกายภาพซึ่งต้องใช้ตัวตรวจรู้ที่มีราคาแพงในการเข้าถึงเพื่อการตรวจสอบหรือการป้อนกลับสัญญาณดังกล่าว แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อตัวตรวจรู้ทอร์ก คือ การสร้างแผนการคำนวณโหนดทอร์กที่เป็นตัวแปรสถานะและมีรูปแบบเป็นสมการปริภูมิสถานะ ซึ่งถูกเรียกว่า ตัวสังเกตโหนดทอร์ก แทนที่การใช้งานตัวตรวจรู้ทอร์กที่กล่าวถึง แต่ตัวสังเกตโหนดทอร์กข้างต้นใช้ตัวแปรอินพุตที่เป็นกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์หรือตัวขับเคลื่อน และตัวแปรเอาต์พุตที่เป็นความเร็วรอบหรือตำแหน่งเชิงมุม (ระยะทางเชิงมุม) ของเพลอาหมุนมอเตอร์ในการคำนวณโหนดทอร์ก ทำให้ตัวสังเกตโหนดทอร์กที่กล่าวถึงมีความต้องการตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า และตัวตรวจรู้ความเร็วรอบหรือตำแหน่งเชิงมุม เพื่อเข้าถึงตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต ตามลำดับ ตัวสังเกตโหนดทอร์กเบื้องต้น คือ ตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้น และความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลด มีผลกระทบต่อโหนดทอร์กที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งอาจจะมีค่าเท่ากับหรือแตกต่างจากโหนดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ นอกจากนี้ตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นมีโครงสร้างที่สามารถแบ่งออกเป็นตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ (full-order) และตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบลดอันดับ (reduce-order) เมื่อพิจารณาการคำนวณโหนดทอร์กของตัวสังเกตแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตแบบลดอันดับข้างต้น จะได้ว่าถ้าตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตของระบบมีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน ตัวสังเกตแบบเต็มอันดับให้การคำนวณโหนดทอร์กที่มีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนน้อยกว่าการคำนวณของตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Ogata, 2002)

ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 3 จะอธิบายถึงตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ และวิเคราะห์ความถูกต้องของการคำนวณตัวเลขโหนดทอร์กของตัวสังเกตดังกล่าวในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของระบบ

3.2 ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

วิธีหนึ่งในการคำนวณตัวแปรสถานะ คือ การใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงพลวัตหรือคุณลักษณะของระบบ ทำหน้าที่คำนวณเชิงเลขโดยตรงในรูปแบบของสมการเชิง

อนุพันธ์ แต่เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว มีเทอมของอนุพันธ์ตัวแปรสถานะที่เทียบ กับเวลา ทำให้การคำนวณตัวแปรสถานะจากตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตที่มีการแทรกสอด ของสัญญาณรบกวน เป็นการขยายสัญญาณรบกวนให้มีขนาดเพิ่มขึ้น เพราะการคำนวณเชิงเลขของ เทอมอนุพันธ์ คือ การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงโดยประมาณ ซึ่งเกิดจากความไม่ต่อเนื่อง เป็นผลให้ วิธีการคำนวณตัวแปรสถานะที่กล่าวถึงไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของระบบ ควบคุมแบบวงปิด เมื่อพิจารณาตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ จะได้ว่า ตัวสังเกตสถานะ ข้างต้นคำนวณตัวแปรสถานะทุกตัวโดยที่มีตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตเป็นข้อมูล ในขณะที่ ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบลดอันดับคำนวณตัวแปรสถานะบางตัวที่ไม่สามารถใช้ตัวตรวจรู้เข้า ถึงได้ โดยที่มีตัวแปรอินพุตและตัวแปรสถานะที่สามารถวัดได้เป็นข้อมูล ถ้าข้อมูลหรือสัญญาณที่ ได้จากการวัดมีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน การคำนวณตัวแปรสถานะของตัวสังเกตสถานะ เชิงเส้นแบบลดอันดับจะมีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนมากกว่าการคำนวณของตัวสังเกต สถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ดังนั้นจึงเลือกนำเสนอตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเท่า นั้น

3.2.1 ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา (linear time invariant system)

พิจารณากระบวนการหรือสมการปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา และ ไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตโดยตรง (feed-through)

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(t_0) = x_0 \quad (3-1)$$

$$y = Cx \quad (3-2)$$

โดยที่ t_0 เป็นเวลาเริ่มต้น x_0 เป็นตัวแปรสถานะเริ่มต้นของระบบ $x \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ เป็นตัวแปร สถานะ $u \in \mathcal{R}^{m \times 1}$ เป็นตัวแปรอินพุต $y \in \mathcal{R}^{p \times 1}$ เป็นตัวแปรเอาต์พุต A เป็นเมตริกซ์สถานะที่มี มิติขนาด $n \times n$ B เป็นเมตริกซ์อินพุตที่มีมิติขนาด $n \times m$ และ C เป็นเมตริกซ์เอาต์พุตที่มีมิติขนาด $p \times n$ ซึ่ง A, B, C เป็นเมตริกซ์ที่มีค่าพารามิเตอร์คงที่ n, m, p เป็นจำนวนเต็มบวกหรือจำนวนนับที่มีความหมายถึงอันดับของระบบ จำนวนสัญญาณอินพุต และจำนวนสัญญาณเอาต์พุต ตามลำดับ ตัวสังเกตจะคำนวณตัวแปรสถานะของระบบได้ ก็ต่อเมื่อระบบมีคุณสมบัติความสามารถสังเกตได้ (observability) เท่านั้น คุณสมบัติดังกล่าวสามารถตรวจสอบ ดังนี้

กำหนดให้ เมตริกซ์ความสามารถสังเกตได้ (observability matrix) ซึ่งมีมิติขนาด $(p \times n)$ เป็นดังสมการที่ (3-3)

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

ถ้าระบบในสมการที่ (3-1) และ (3-2) มีขนาดมิติตามที่ระบุไว้ ระบบดังกล่าวมีความสามารถสังเกตได้โดยสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อเมตริกซ์ความสามารถสังเกตได้ไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน (non-singular matrix) หรือ $\text{rank}(\mathbf{V}) = n$

3.2.2 ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับวงเปิด (open-loop state observer)

ถ้าระบบหรือกระบวนการข้างต้นมีคุณสมบัติการสังเกตแล้ว สมการที่ (3-1) และ (3-2) เป็นโครงสร้างของตัวสังเกตสถานะ โดยที่เมตริกซ์ $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ และ $\mathbf{C}$ มีค่าพารามิเตอร์เหมือนกับระบบข้างต้น นั่นคือ

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad \hat{\mathbf{x}}(t_0) = \hat{\mathbf{x}}_0 \quad (3-4)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}} \quad (3-5)$$

โดย $\hat{\mathbf{x}}_0$ คือ ตัวแปรสถานะเริ่มต้นของตัวสังเกต

$\hat{\mathbf{x}}$ คือ ตัวแปรสถานะที่ได้จากการคำนวณ (หรือการประมาณของตัวสังเกต)

$\hat{\mathbf{y}}$ คือ ตัวแปรเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณ

ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับวงเปิดจะมีตัวแปรอินพุตเหมือนกับระบบในสมการที่ (3-1) ในส่วนของความผิดพลาดการคำนวณตัวแปรสถานะ (estimated state error) จะถูกเขียนเป็น

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}} \quad (3-6)$$

โดยที่ $\tilde{\mathbf{x}}(t_0) = \mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0 = \tilde{\mathbf{x}}_0$ เป็นความผิดพลาดเริ่มต้น ดังนั้นผลเฉลยของสมการที่ (3-6) หรือความผิดพลาดของการคำนวณตัวแปรสถานะ จะหาได้จาก

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \exp[\mathbf{A}(t - t_0)] \tilde{\mathbf{x}}_0 \quad (3-7)$$

ถ้าเมตริกซ์ A มีค่าเฉพาะจริง (eigen value) หรือโพลทุกค่าอยู่บนระนาบเอสด้านซ้ายมือ (ส่วนจริงของโพลทุกค่ามีค่าน้อยกว่าศูนย์) และความผิดพลาดเริ่มต้น ($\tilde{x}_0$) อาจจะเท่ากับศูนย์หรือไม่เท่ากับศูนย์แล้ว เมื่อเวลาผ่านไปนานเพียงพอ ($t \rightarrow \infty$) ความผิดพลาดของการคำนวณตัวแปรสถานะจะลู่เข้าหาศูนย์ ($\tilde{x}(t) \rightarrow 0$)

นอกจากนี้ อัตราการลู่เข้าหาศูนย์ของ $\|\tilde{x}(t)\|$ จะสัมพันธ์กับค่าเฉพาะจริงหรือโพลของเมตริกซ์ A นั่นคือ ระบบหรือเมตริกซ์ A มีเสถียรภาพและเป็นเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (asymptotically stable) แต่ถ้าระบบไม่มีเสถียรภาพหรือมีโพลบางค่า (อย่างน้อยหนึ่งค่า) ไม่อยู่บนระนาบเอสด้านซ้ายมือแล้ว ความผิดพลาดเริ่มต้น $\tilde{x}_0$ ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์เท่านั้น จึงจะทำให้เมื่อเวลาผ่านไป $\tilde{x}(t)$ มีค่าเท่ากับศูนย์

3.2.3 ตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับวงปิด (closed-loop state observer)

วิธีการแก้ไขตัวสังเกตสถานะที่กล่าวถึงให้ใช้ได้กับระบบที่มีเสถียรภาพหรือไม่มีเสถียรภาพ และการปรับปรุงอัตราการลู่เข้าหาศูนย์ของ $\|\tilde{x}(t)\|$ คือ การใช้ความผิดพลาดระหว่างตัวแปรเอาต์พุตที่ได้จากการวัดของระบบและตัวแปรเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณ เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างตัวสังเกตสถานะเชิงเส้น ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3.1 กล่าวคือ

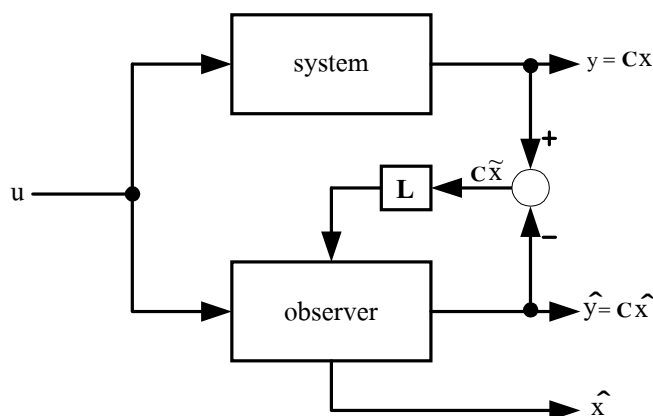
$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (3-8)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (3-9)$$

โดยที่ L เป็นเมตริกซ์เกนที่มีค่าเกนคงที่และมีมิติขนาด $n \cdot p$ และ $y - \hat{y} = C(x - \hat{x})$ เป็นผลต่างระหว่างสมการที่ (3-2) และ (3-9) ดังนั้นความผิดพลาดของการคำนวณตัวแปรสถานะ คือ

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LC)\tilde{x} \quad (3-10)$$

ถ้าระบบที่กล่าวถึงมีความสามารถสังเกตได้โดยสมบูรณ์แล้วจะกำหนดหรือเลือกเมตริกซ์เกน L ที่ทำให้ค่าเฉพาะจริงหรือโพลของเมตริกซ์ $A - LC$ ทุกค่าอยู่บนระนาบเอสด้านซ้ายมือได้ และเมื่อเวลาผ่านไปนานเพียงพอ ความผิดพลาดของการคำนวณตัวแปรสถานะจะลดลงถึงศูนย์ ($\tilde{x}(\infty) \rightarrow 0$) นั่นคือ $\hat{x}(t)$ (ตัวแปรสถานะที่คำนวณได้) จะลู่เข้าหา $x(t)$ (ตัวแปรสถานะของระบบ) โดยที่ตัวแปรสถานะเริ่มต้นของตัวสังเกตอาจจะเท่ากับหรือแตกต่างจากตัวแปรสถานะเริ่มต้นของระบบ ($\tilde{x}_0 = 0$ หรือ $\tilde{x}_0 \neq 0$)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับวงปิด

ถ้าระบบที่กล่าวถึงมีความสามารถสังเกตได้โดยสมบูรณ์แล้ว จะกำหนดหรือเลือกเมตริกซ์เกน L ที่ทำให้ค่าเจาะจงหรือโพลของเมตริกซ์ $A - LC$ ทุกค่าอยู่บนระนาบเอสด้านซ้ายมือได้ และเมื่อเวลาผ่านไปนานเพียงพอ ความผิดพลาดของการคำนวณตัวแปรสถานะจะลดลงถึงศูนย์ ($\tilde{x}(\infty) \rightarrow 0$) นั่นคือ $\hat{x}(t)$ (ตัวแปรสถานะที่คำนวณได้) จะลู่เข้าหา $x(t)$ (ตัวแปรสถานะของระบบ) โดยที่ตัวแปรสถานะเริ่มต้นของตัวสังเกตอาจจะเท่ากับหรือแตกต่างจากตัวแปรสถานะเริ่มต้นของระบบ ($\tilde{x}_0 = 0$ หรือ $\tilde{x}_0 \neq 0$)

3.2.4 การออกแบบเมตริกซ์เกนของตัวสังเกตสถานะเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

วิธีการวางตำแหน่งโพล (pole placement method) เป็นวิธีหนึ่งในการเลือกเมตริกซ์เกน L โดยที่มีขั้นตอนแรก คือ การกำหนดค่าเจาะจงหรือโพลของเมตริกซ์ $A - LC$ ที่อยู่บนระนาบเอส จากนั้นใช้สูตรของเอกเคอร์มาน (Ackerman's formula) ดังนี้

$$L = (A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

โดยที่ (s) คือ พหุนามลักษณะเฉพาะที่ต้องการ (desired characteristic polynomial) ของตัวสังเกตสถานะ หรือของเมตริกซ์ $A - LC$ ซึ่งถูกเขียนเป็น

$$(s) = (s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n) \quad (3-12)$$

โดยที่ $p_1, p_2, \dots, p_n$ คือ ค่าเฉพาะที่เป็นจำนวนจริงหรือเป็นจำนวนเชิงซ้อนคู่สังยุคที่ต้องการ และเกิดจากการเลือกตำแหน่งโพลของตัวสังเกต ซึ่งอาจใช้วิธีการออกแบบทางเดินราก (root-locus design) เพื่อกำหนดตำแหน่งของโพลที่มีลักษณะเด่น (dominant poles) และกำหนดตำแหน่งโพลอื่นๆ ในตำแหน่งที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอสเทียบกับตำแหน่งของโพลที่มีลักษณะเด่นดังกล่าว ถ้าเลือกวางโพลที่มีลักษณะเด่นของตัวสังเกตให้อยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากแกน j ตัวสังเกตจะมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น นั่นคือ อัตราการลู่เข้าหาศูนย์ของ $\|x(t)\|$ มีค่ามาก แต่ในขณะเดียวกัน สัญญาณรบกวนที่แทรกสอดหรือปะปนในตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต จะถูกขยายให้มีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อความถูกต้องในการคำนวณตัวแปรสถานะ เพราะตัวแปรสถานะมีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการวางตำแหน่งโพลจะต้องพิจารณาผลตอบสนองของตัวสังเกตและการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ค่าเฉพาะที่ต้องการหรือตำแหน่งโพลของระบบวงปิดได้มาจากการกำหนดความต้องการผลการตอบสนองของระบบทางโดเมนเวลา ซึ่งได้แก่ เปอร์เซนต์ของค่าพุ่งเกิน (percent overshoot; P.O.) และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time; T_s) เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio; ζ) และความถี่ธรรมชาติ (natural frequency; ω_n) แล้วนำไปเลือกตำแหน่งโพลของระบบวงปิดต่อไป (Ogata, 2002)

3.3 ตัวสังเกตโพลทอรัคเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

สมการที่ (2-13) และ (2-14) ในหัวข้อที่ 2.3 เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือพลวัตการหมุนของระบบมอเตอร์และโหลด เมื่อนำสมการดังกล่าวใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างตัวสังเกตโพลทอรัคเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ (วงปิด) ที่มีหน้าที่คำนวณตัวเลขโพลทอรัคแทนที่การวัดโพลทอรัคของระบบที่เกิดขึ้น (Ko, 1998) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{T}_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & c \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} i_{eq} + \begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \end{bmatrix} \tilde{\omega} \quad (3-14)$$

โดยที่ $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$ คือ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบ $\hat{\omega}$ และ $\hat{T}_L$ คือ ความเร็วรอบและโพลทอรัค ที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตและเป็นตัวแปรสถานะ ตามลำดับ ω คือ ความเร็วรอบของระบบซึ่งเป็นตัวแปรเอาต์พุตของระบบ i_{eq} คือ กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับ

ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งเป็นตัวแปรอินพุตของระบบ ℓ_1 คือ ค่าเกนบวกคงที่ของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบเต็มอันดับ และ ℓ_2 คือ ค่าเกนลบคงที่ของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบเต็มอันดับ

ต่อมาเขียนสมการที่ (3-14) หรือตัวแปรสถานะที่ได้จากการคำนวณให้เป็นสมการพลวัตของความเร็รรอบและโพลทอร์กที่คำนวณได้จากตัวสังเกต ดังนี้

$$\dot{\tilde{\omega}} = a\tilde{\omega} + b i_{eq} + c\hat{T}_L + \ell_1 \tilde{\omega} \quad (3-15)$$

$$\dot{\hat{T}}_L = \ell_2 \tilde{\omega} \quad (3-16)$$

จากนั้นนำสมการที่ (2-13), (2-14), (3-15) และสมการที่ (3-16) มาคำนวณหาสมการของค่าความผิดพลาดระหว่างความเร็รรอบและโพลทอร์กของระบบ กับความเร็รรอบและโพลทอร์กที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ นั่นคือ

$$\dot{\tilde{\omega}} = (a - \ell_1) \tilde{\omega} + c\tilde{T}_L \quad (3-17)$$

$$\dot{\tilde{T}}_L = -\ell_2 \tilde{\omega} \quad (3-18)$$

โดยที่ $\tilde{T}_L = T_L - \hat{T}_L$ คือ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโพลทอร์ก $\tilde{T}_L(0) = T_L$ คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของโพลทอร์ก $\tilde{\omega}(0) = \omega_0 - \hat{\omega}$ คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของความเร็รรอบ เขียนสมการที่ (3-17) และ (3-18) ให้มีสมการค่าความผิดพลาดของการคำนวณที่มีรูปแบบเดียวกับสมการที่ (3-10) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\omega}} \\ \dot{\tilde{T}}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a - \ell_1 & c \\ -\ell_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\omega} \\ \tilde{T}_L \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

สมการที่ (3-19) ถูกใช้ในการกำหนดหรือเลือกตำแหน่งโพลของตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเพื่อคำนวณหาค่าเกน ℓ_1 และ ℓ_2 การเลือกตำแหน่งโพลของตัวสังเกตดังกล่าวจะเหมือนกับการกำหนดตำแหน่งโพลของระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลาอันดับสอง กล่าวคือ

พิจารณาให้กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเป็นสัญญาณขับเคลื่อน และให้โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าคงที่ รวมถึงระบุตัวเลขของเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินและช่วงเวลาที่เข้าที่ของค่าความผิดพลาดการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์กในโดเมนเวลา จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนการหน่วง และความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกต ตามลำดับ เพื่อวางตำแหน่งโพล

การนำตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับไปใช้งาน เกิดจากการอินทิเกรตสมการพลวัตของการคำนวณความเร็วรอบของระบบในสมการที่ (3-15) และสมการพลวัตของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในสมการที่ (3-16) ดังนี้

$$\hat{\omega}(t) = \int_0^t (a \hat{\omega} + b i_{eq} + c \hat{T}_L + \ell_1 \tilde{\omega}) dt + \hat{\omega}(0) \quad (3-20)$$

$$\hat{T}_L(t) = \ell_2 \int_0^t \tilde{\omega} dt + \hat{T}_L(0) \quad (3-21)$$

โดยที่ $\hat{\omega}(0) = \hat{\omega}_0$ และ $\hat{T}_L(0) = 0$ โดยที่ $\hat{\omega}_0$ คือ ความเร็วรอบเริ่มต้นของตัวสังเกต $\hat{T}_L(0)$ คือ โหลดทอร์กเริ่มต้นของตัวสังเกต โครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับประกอบด้วยสมการที่ (3-20) และสมการที่ (3-21) ซึ่งเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.2

3.4 การวิเคราะห์ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

ปัญหาสำคัญที่เป็นสาเหตุให้ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กมีค่าไม่เท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริงในระบบมอเตอร์และโหลด คือ ค่าพารามิเตอร์คงที่ของตัวสังเกตโหลดทอร์กที่ใช้ในการออกแบบค่าเกน มีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ก่อนการเริ่มต้นทำงานและในขณะที่ตัวสังเกตดังกล่าวทำงานพร้อมกับเกิดการหมุนของระบบ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาระบบมอเตอร์และโหลด ก่อนการหมุนและในระหว่างการหมุน จะได้ว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืดของระบบ (B) อาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อมภายในและภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การหล่อลื่น จุดการทำงาน และอายุการใช้งาน ฯลฯ ในขณะที่ค่าคงที่ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือตัวขับเคลื่อน (K) อาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อมภายใน เช่น อุณหภูมิ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า จุดการทำงาน และอายุการใช้งาน ฯลฯ แต่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (J) มีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาของการหมุน ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงชนิด หรือรูปทรงของโหลด หรือน้ำหนักของโหลด มีการเปลี่ยนแปลง

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

เพิ่มขึ้นหรือลดลงก่อนการหมุนของระบบในแต่ละครั้ง โมเมนตัมเฉื่อยของระบบจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ทำให้ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีรูปแบบเป็น $a = a_0 + \Delta a$ และ $b = b_0 + \Delta b$ โดยที่ a_0, b_0 คือ ค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ (nominal parameter) ซึ่งอาจจะได้รับจากข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิต ค่าเฉลี่ยของการทดสอบ การใช้เครื่องมืออุปกรณ์วัด การระบุเอกลักษณ์แบบออฟไลน์ (off-line identification) การใช้สูตรคำนวณ หรือการคำนวณแบบวิเคราะห์ และ $\Delta a, \Delta b$ คือ ความไม่แน่นอน (uncertainty) ของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ก่อนการหมุนและในขณะที่ระบบมอเตอร์และโหลดหมุน

ในการใช้งานตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตจะมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ นั่นคือ

$$\dot{\hat{\omega}} = a_0 \hat{\omega} + b_0 i_{eq} + c \hat{T}_L + \ell_1 \tilde{\omega} \quad (3-22)$$

$$\dot{\hat{T}}_L = \ell_2 \tilde{\omega} \quad (3-23)$$

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีความไม่แน่นอน ดังนั้นสมการของค่าความผิดพลาดความเร็วรอบจึงมีรูปแบบเป็น

$$\dot{\tilde{\omega}} = (a_0 - \ell_1) \tilde{\omega} + c \tilde{T}_L + \Delta a \omega + \Delta b i_{eq} \quad (3-24)$$

การตรวจสอบเสถียรภาพของการทำงานหรือการคำนวณตัวแปรสถานะของตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ จะดำเนินการได้โดยการเลือกฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov function candidate) ดังนี้

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\omega}^2 + \frac{c}{2\ell_2} \tilde{T}_L^2 \quad (3-25)$$

และมีอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่เทียบกับเวลา ดังนี้

$$\dot{V} = \tilde{\omega} \dot{\tilde{\omega}} + \frac{c}{\ell_2} \tilde{T}_L \dot{\tilde{T}}_L \quad (3-26)$$

นำสมการที่ (3-24) แทนในสมการที่ (3-26) และจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$\dot{V} = (a_0 - \ell_1) \tilde{\omega}^2 + \left(\tilde{\omega} - \frac{1}{\ell_2} \dot{\tilde{T}}_L \right) c \tilde{T}_L + (\Delta a \omega + \Delta b i_{eq}) \tilde{\omega} \quad (3-27)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-23) จะได้ว่า เทอมที่สองด้านขวามือของสมการที่ (3-27) มีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ a และ b คือผลต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์จริงของระบบและค่าพารามิเตอร์กลางของตัวสังเกต (ความไม่แน่นอน) ทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีรูปสมการที่ลดลง เป็นดังนี้

$$\dot{V} = (a_0 - \ell_1) \tilde{\omega}^2 + (\Delta a \omega + \Delta b i_{eq}) \tilde{\omega} \quad (3-28)$$

สมการที่ (3-25) มีความหมายว่าฟังก์ชันเลียปูนอฟจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ตลอดช่วงระยะเวลา ($V \geq 0$) เพราะฟังก์ชันเลียปูนอฟดังกล่าว ประกอบไปด้วยเทอมกำลังสองของค่าความผิดพลาดการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์ค รวมถึงค่าคงที่ $c \geq 0$ และ $\ell_2 < 0$ ถ้าในช่วงระยะเวลาใดอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟในสมการที่ (3-28) มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($\dot{V} < 0$) ฟังก์ชันเลียปูนอฟจะมีค่าลดลง เป็นผลให้ขนาดค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์คมีแนวโน้มลดลง ถ้าในช่วงระยะเวลาใด อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\dot{V} = 0$) ฟังก์ชันเลียปูนอฟจะมีค่าคงที่ ทำให้อนุพันธ์ของค่าความผิดพลาดการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์คมีแนวโน้มคงที่เช่นเดียวกัน และถ้าในช่วงระยะเวลาใด อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่ามากกว่าศูนย์ ($\dot{V} > 0$) ฟังก์ชันเลียปูนอฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ขนาดค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์คมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวสังเกตโหลดทอร์คมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความสัมพันธ์กับ a_0 , ℓ_1 , $\tilde{\omega}$, a , b , ω และ i_{eq} เมื่อโหลดทอร์คเริ่มต้นของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับศูนย์และโหลดทอร์คที่เกิดขึ้นในระบบมีขนาดคงที่ i_{eq} มีขนาดคงที่หรืออาจมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างมีขอบเขต (bound) ตลอดช่วงระยะเวลา ทำให้สามารถแบ่งการพิจารณาเสถียรภาพของการทำงานหรือการคำนวณตัวแปรสถานะของตัวสังเกตโหลดทอร์คเชิงเส้นแบบเต็มอันดับได้เป็นสองกรณี ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเลือกค่าเกน ℓ_1 ของตัวสังเกต

กรณีที่ค่าเกน ℓ_1 มีขนาดเล็ก อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่ามากกว่าศูนย์ในบางช่วงระยะเวลาหรือตลอดระยะเวลาทำให้ฟังก์ชันเลียปูนอฟมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม นั่นคือ ความเร็วรอบและ

โหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่แตกต่างจากความเร็วรอบและโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นผลให้การทำงานของตัวสังเกตไม่มีเสถียรภาพในบางช่วงระยะเวลาหรือตลอดระยะเวลา

กรณีที่ค่าเกณฑ์ ℓ_1 มีขนาดใหญ่ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ในบางช่วงระยะเวลาหรือตลอดระยะเวลา ทำให้ฟังก์ชันเลียบูโนฟมีค่าลดลงจากเดิมหรือมีค่าคงที่ นั่นคือ ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มจะเข้าหาความเร็วรอบของเพลาหมุนมอเตอร์และโหลด ในขณะที่โหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่ลู่เข้าหาแต่ไม่เท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นผลให้การทำงานของตัวสังเกตมีเสถียรภาพตลอดระยะเวลา

ถ้ากำหนดให้ i_{eq} เป็นสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดที่ถูกป้อนให้กับระบบมอเตอร์และโหลด ในสถานะคงตัว ระบบจะหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ เนื่องจากค่าเกณฑ์ ℓ_1 ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับมีขนาดใหญ่ เมื่อเวลาผ่านไปนานเพียงพอ ($t \rightarrow \infty$) ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบจะลู่เข้าหาศูนย์ ($\hat{\omega} \rightarrow 0$) เป็นผลให้ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับความเร็วรอบของระบบ นั่นคือ สมการของค่าความผิดพลาดการคำนวณความเร็วรอบในสมการที่ (3-24) จะให้ค่าความผิดพลาดการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตในสถานะคงตัวดังนี้

$$\tilde{T}_L(\infty) = -\frac{1}{c} (\Delta a \omega + \Delta b i_{eq}) \quad (3-29)$$

สมการที่ (3-29) มีความหมายว่า ในสถานะคงตัว ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กไม่สัมพันธ์กับค่าเกณฑ์ ℓ_1 , ℓ_2 และ $\hat{\omega}(0)$ แต่จะขึ้นอยู่กับ c , a , b , ω และ i_{eq} กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กจะเกิดจากความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตและค่าพารามิเตอร์จริงที่เกิดขึ้นในระบบ

3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

เนื่องจากตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับมีหน้าที่คำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลด โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วรอบของเพลาหมุน เป็นข้อมูลในการคำนวณดังกล่าว ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงถึงความถูกต้องของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกต ระบบมอเตอร์และโหลดถูกเลือกให้มีค่าพารามิเตอร์กลางที่เท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางของระบบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Wang

and Chen, 1999) ซึ่งมีรายละเอียดตามตารางที่ 3.1 และ 3.2 ในการจำลองสถานการณ์ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตจะถูกกำหนดให้เท่ากับและไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของระบบ

โปรแกรมที่ใช้จำลองสถานการณ์เพื่อคำนวณตัวเลขโพลทอร์คของตัวสังเกตที่กล่าวถึง คือ โปรแกรม SIMULINK ของ MATLAB 5.3 และการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ กรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ และกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ โดยกำหนดให้ตัวสังเกตโพลทอร์คและระบบมอเตอร์และโพลทอร์คได้รับกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ที่มีขนาดเท่ากับ 100 แอมแปร์ ($i_{eq} = 100A$) นั่นคือ ระบบจะหมุนในทิศทางเดียว ซึ่งอาจจะเป็นทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทิศทางทวนเข็มนาฬิกาในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ในส่วนของการเลือกค่าเกนของตัวสังเกตโพลทอร์คเชิงเส้นแบบเต็มอันดับข้างต้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบถูกสมมุติให้เท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ ถ้าป้อน i_{eq} ที่เป็นสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับระบบและตัวสังเกตในขณะที่โพลทอร์คที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าคงที่ และค่าเริ่มต้นของโพลทอร์คในตัวสังเกตมีค่าเท่ากับศูนย์ ตัวสังเกตจะต้องคำนวณตัวเลขของโพลทอร์คที่มีค่าพุ่งเกินไม่มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของโพลทอร์คที่เกิดขึ้นจริง (P.O. $\leq 2\%$) และมีช่วงเวลาเข้าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 วินาที ($T_s \leq 0.05$ sec) เงื่อนไขดังกล่าวเป็นข้อมูลในการคำนวณหรือกำหนดตำแหน่งการวางโพลของตัวสังเกตในระนาบเอส จากนั้นใช้สูตรของแอกเคอร์มานคำนวณค่าเกนที่ต้องการของตัวสังเกต ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์กลางของระบบมอเตอร์และโพลทอร์คที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

พิกัดโพลทอร์ค (N-m)	โมเมนต์ความเฉื่อย (kg.m ²)	สัมประสิทธิ์ของแรง เสียดทานหนืด (N-m/rad/sec)	ค่าคงที่ของทอร์กทาง แม่เหล็กไฟฟ้า (N-m/A)
1.91	0.014197	0.018929	0.0568

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์กลางของตัวสังเกตและแบบจำลองระบบมอเตอร์และโพลทอร์คที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

a_o	b_o	c_o
-1.3333	4.0008	-70.4374

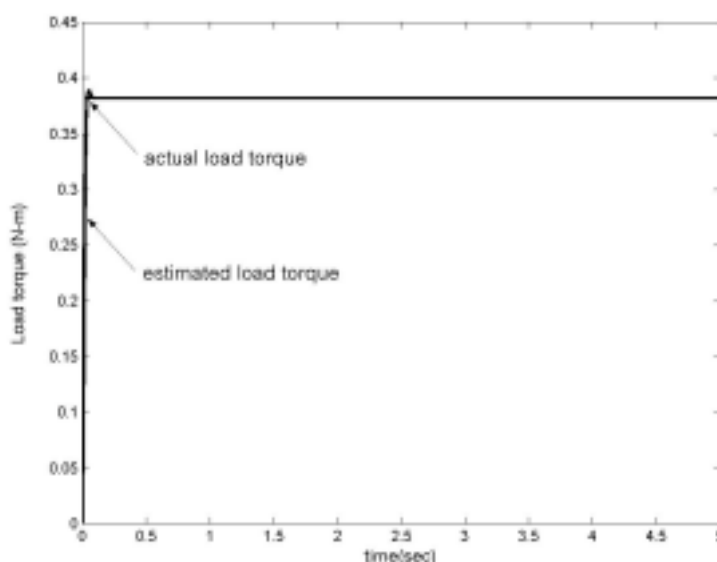
ตารางที่ 3.3 ค่าเกณฑ์ของตัวสังเกตที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ℓ_1	ℓ_2
150	-160

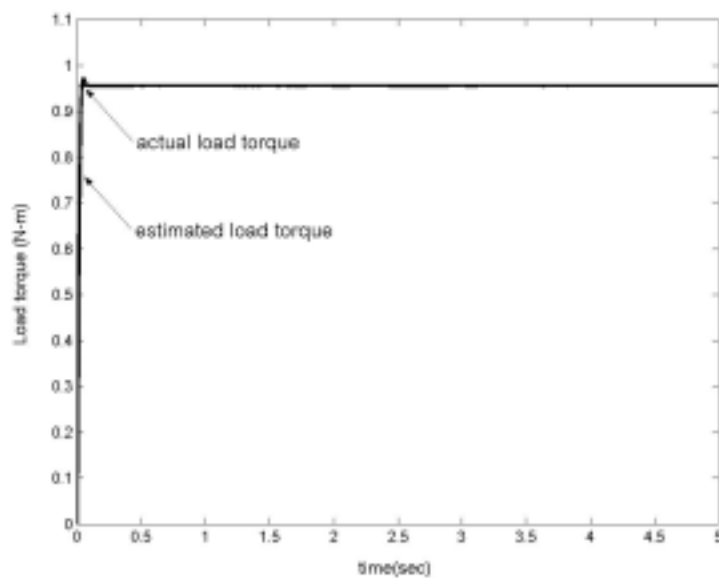
การคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ในขณะที่ระบบมอเตอร์และโหลดหมุน มีผลการจำลองสถานการณ์ ดังนี้

3.5.1 กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ

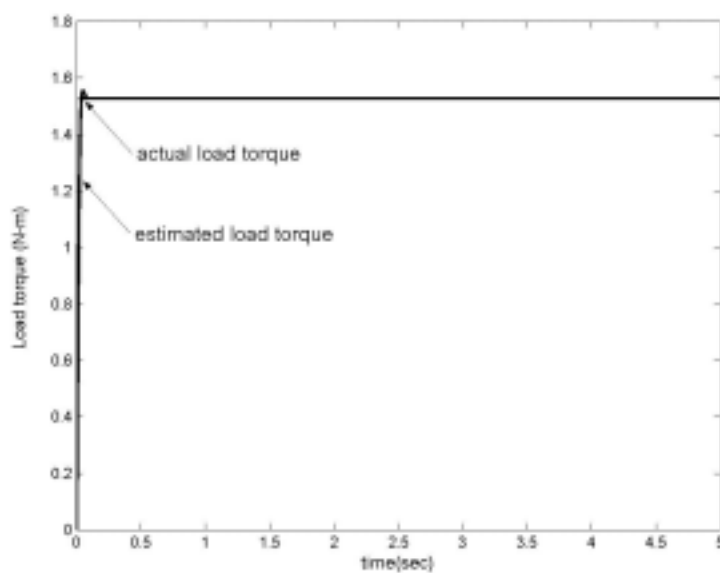
ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางที่คงที่ของระบบตลอดช่วงระยะเวลาของการหมุน กำหนดให้ค่าเริ่มต้นโหลดทอร์กของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับศูนย์ ในแต่ละครั้งที่ระบบหมุนและตัวสังเกตทำงานจะกำหนดให้โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเท่ากับ 20%, 50%, 80% และ 100% ของพิกัด ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.6 ซึ่งในกรณีดังกล่าว เป็นการแสดงผลการทำงานที่ดีของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบ และนำมากำหนดให้เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ



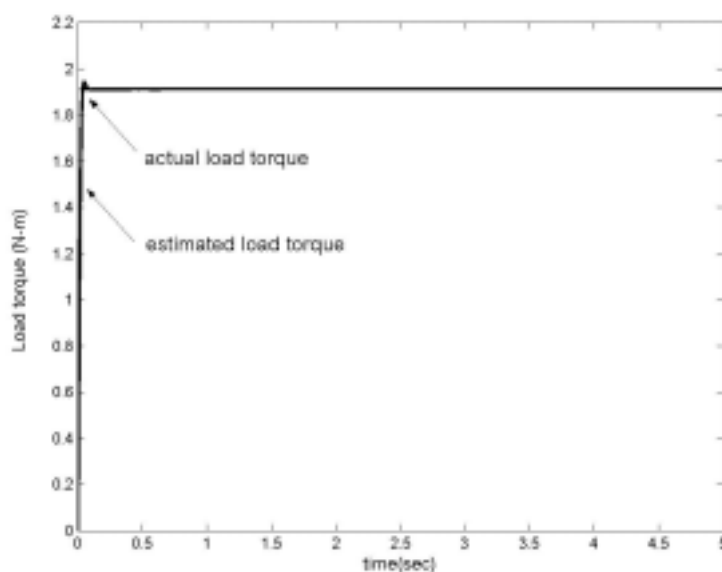
รูปที่ 3.3 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 20% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)



รูปที่ 3.4 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 50% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)



รูปที่ 3.5 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 80% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)

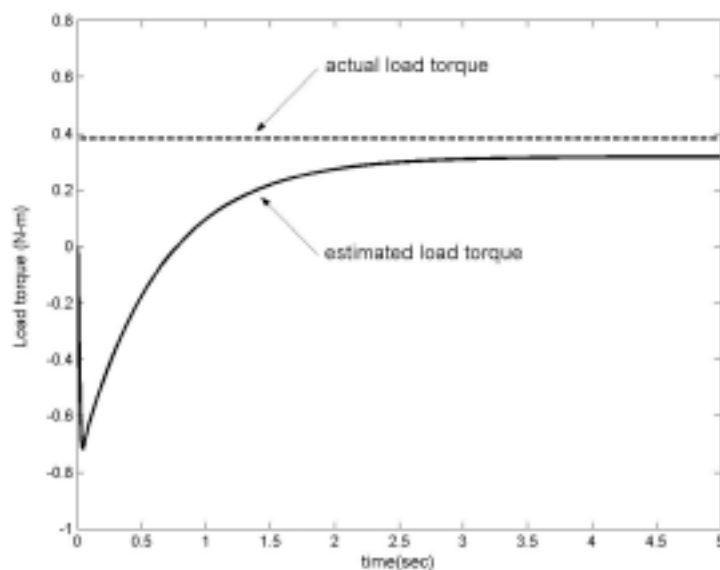


รูปที่ 3.6 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 100% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)

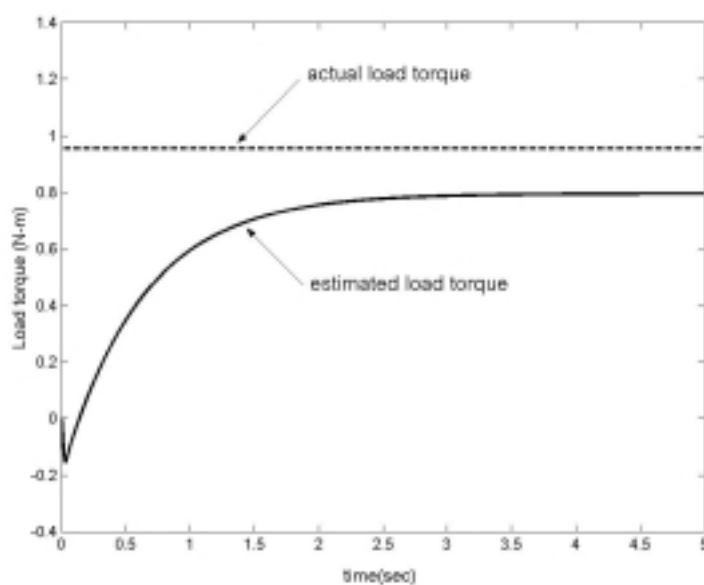
ในรูปที่ 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 และข้อมูลที่เป็นตัวเลขในตารางที่ 3.4 ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงถึงการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตเชิงเส้นแบบเต็มอันดับที่มีค่าเท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลดในสถานะคงตัว นอกจากนี้ผลการคำนวณมีค่าพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่เหมือนกับการระบุที่กล่าวถึงในการเลือกค่าเกนและตำแหน่งการวางโพลของตัวสังเกต

3.5.2 กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ

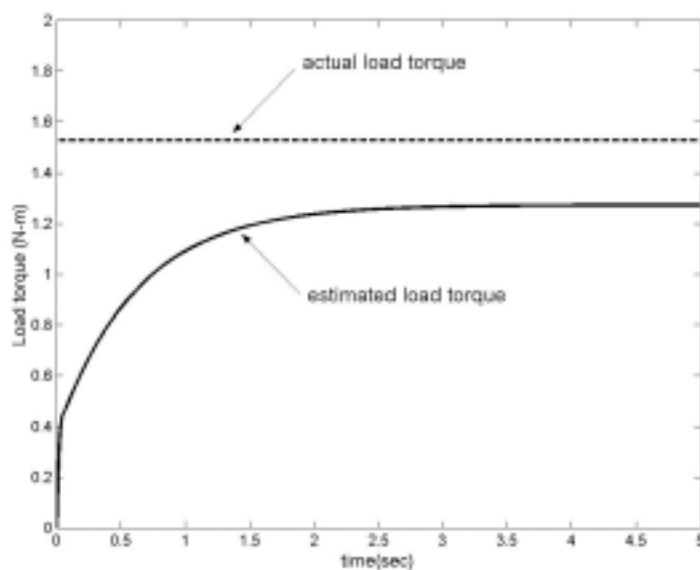
กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางที่คงที่ของระบบ แต่ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบกำหนดให้มีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์กลาง กล่าวคือ ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีค่าเท่ากับ 120 เปอร์เซ็นต์ ของค่าพารามิเตอร์กลาง ($a = 20\%$ และ $b = 20\%$) เป็นผลให้ $a = 1.2 a_0$ และ $b = 1.2 b_0$ ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ c ของระบบมอเตอร์และโหลด พิจารณาให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการหมุน ทำให้ค่าพารามิเตอร์ c ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์ c ของระบบ ค่าเริ่มต้นโหลดทอร์กของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับศูนย์ ในแต่ละครั้งที่ระบบหมุนและตัวสังเกตทำงาน โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเท่ากับ 20%, 50%, 80% และ 100% ของพิกัด ตามลำดับ



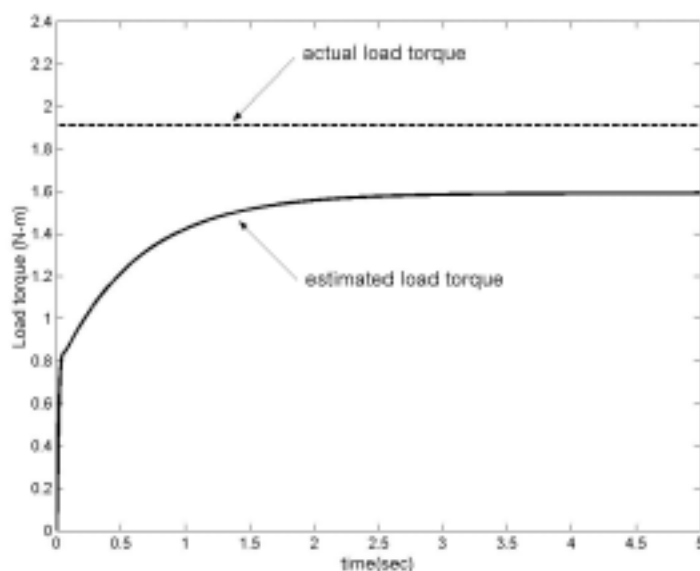
รูปที่ 3.7 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อ โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 20% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่า ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)



รูปที่ 3.8 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อ โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 50% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่า ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)



รูปที่ 3.9 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อ โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 80% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่า ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)



รูปที่ 3.10 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเมื่อ โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 100% ของพิกัด (กรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่า ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ)

ตารางที่ 3.4 ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของ
ตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ

โหลดทอร์กจริงเมื่อ เปรียบเทียบกับพิกัด (เปอร์เซ็นต์)	ตัวเลขโหลดทอร์กจริง (actual load torque) (นิวตัน-เมตร)	ตัวเลขโหลดทอร์ก ที่คำนวณได้ (estimated load torque) (นิวตัน-เมตร)	ค่าความผิดพลาดของการ คำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก ในวินาทีที่ 10 (เปอร์เซ็นต์)
10	0.191	0.191	0.00
20	0.382	0.382	0.00
30	0.573	0.573	0.00
40	0.764	0.764	0.00
50	0.955	0.955	0.00
60	1.146	1.146	0.00
70	1.337	1.337	0.00
80	1.528	1.528	0.00
90	1.719	1.719	0.00
100	1.910	1.910	0.00

ตารางที่ 3.5 ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของ
ตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ

โหลดทอร์กจริงเมื่อ เปรียบเทียบกับพิกัด (เปอร์เซ็นต์)	ตัวเลขโหลดทอร์กจริง (actual load torque) (นิวตัน-เมตร)	ตัวเลขโหลดทอร์ก ที่คำนวณได้ (estimated load torque) (นิวตัน-เมตร)	ค่าความผิดพลาดของการ คำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก ในวินาทีที่ 10 (เปอร์เซ็นต์)
10	0.191	0.159	16.67
20	0.382	0.318	16.67
30	0.573	0.478	16.67
40	0.764	0.637	16.67
50	0.955	0.796	16.67
60	1.146	0.955	16.67
70	1.337	1.114	16.67
80	1.528	1.273	16.67
90	1.719	1.432	16.67
100	1.910	1.592	16.67

ในรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 และข้อมูลที่เป็นตัวเลขในตารางที่ 3.5 ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงถึงการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตเชิงเส้นแบบเต็มอันดับที่มีค่าไม่เท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลดในสถานะคงตัว นั่นคือ ในสถานะคงตัว ตัวสังเกตดังกล่าวมีค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กเท่ากับ 16.67 เปอร์เซ็นต์ของโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อพิจารณากรณีที่ตัวสังเกตมีเสถียรภาพการทำงานในสถานะคงตัว ค่าความผิดพลาดข้างต้นจะไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเกน ℓ_1 และ ℓ_2 ของตัวสังเกต ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าเกน ℓ_1 หรือ ℓ_2 ไม่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดที่กล่าวถึง แต่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในสถานะชั่วคราวเท่านั้น

3.6 สรุป

ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับถูกนำมาใช้คำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ แทนการวัดโหลดทอร์กด้วยเครื่องมือวัดที่มีราคาแพง แต่ความถูกต้องในการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตดังกล่าว จะสัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ และจากผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตในสถานะคงตัว พบว่าถ้าค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ตัวสังเกตโหลดทอร์กจะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าเท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งมีขนาดคงที่ แต่ถ้าค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ตัวสังเกตโหลดทอร์กจะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าไม่เท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบที่กล่าวมาข้างต้น เป็นจุดอ่อนในการใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์จริงของระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อม และการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์จริงที่ถูกต้องของระบบ เป็นงานที่มีความสลับซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง เป็นผลให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการขยายโครงสร้างตัวสังเกตดังกล่าว โดยการเพิ่มกลไกการปรับตัวหรือการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กในขณะที่ตัวสังเกตทำงาน เพื่อให้การคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในสถานะคงตัว มีค่าใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมากที่สุด ซึ่งจะได้รับการอธิบายในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว

4.1 บทนำ

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ Buja, Menis, and Valla (1993) และ Chung, Lee, Ko and Youn (1995) ได้นำเสนอตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเพื่อใช้ในระบบขับเคลื่อนที่มีมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้นและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบไร้แปรงถ่านเป็นตัวขับเคลื่อน ตามลำดับ การออกแบบตัวสังเกตดังกล่าวได้กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางซึ่งถูกสมมุติให้เป็นค่าคงที่ตลอดการทำงาน เนื่องจากในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ อาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือได้รับผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมภายนอกต่างๆ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ อายุการใช้งาน ฯลฯ ทำให้ค่าพารามิเตอร์จริงมีการเปลี่ยนแปลงและเป็นสาเหตุให้ตัวสังเกตโหลดทอร์กคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กได้ไม่ใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ต่อมา Baik, Kim, Kim, Moon, and Youn (1996) ได้นำเสนอตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบเลื่อนไถลเพื่อใช้ในระบบขับเคลื่อนที่มีมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรเป็นตัวขับเคลื่อน ตัวสังเกตโหลดทอร์กข้างต้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด และสามารถชดเชยผลกระทบที่เกิดจากความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในระบบ ทำให้การควบคุมความเร็วรอบมีประสิทธิภาพของผลตอบสนองที่ดี แต่ในระบบควบคุมวงเปิดตัวสังเกตโหลดทอร์กที่กล่าวถึงมีปัญหาเกี่ยวกับการสวิตชิง (switching) เป็นผลทำให้เกิดปัญหาแชตเตอริง (chattering problem) ที่เหมือนกับมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงมากปะปนในโหลดทอร์กที่ถูกคำนวณเป็นตัวเลข หลังจากนั้น Kim, Rhew, and Kim (1997) ได้นำเสนอตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบตัวกรองกาลมานเพื่อใช้ในระบบขับเคลื่อนที่มีมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรเป็นตัวขับเคลื่อน แต่มีข้อบกพร่อง คือ เมื่อค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวสังเกต (ค่าพารามิเตอร์กลาง) มีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบควบคุมวงปิด เช่น ถ้าค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์จริงของระบบจะทำให้ระบบควบคุมวงปิดขาดเสถียรภาพ และถ้าค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ระบบควบคุมวงปิดจะมีผลตอบสนองที่ช้าลงแต่ระบบยังคงมีเสถียรภาพ ในการใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กชนิดนี้จึงต้องทำการออกแบบตัวควบคุมค่าพารามิเตอร์ เพื่อทำหน้าที่ชดเชยการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์จริงที่เกิดขึ้น ตัวควบคุมค่า

พารามิเตอร์ที่กล่าวถึง สามารถแก้ปัญหาได้เฉพาะในระบบควบคุมวงปิด แต่ในระบบควบคุมวงเปิด ถ้าค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางที่ใช้ในตัวสังเกต ตัวสังเกตโพลทอริกแบบตัวกรองคาลมานจะคำนวณตัวเลขโพลทอริกได้ไม่ใกล้เคียงกับโพลทอริกที่เกิดขึ้นจริง

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ มีผลกระทบต่อการคำนวณตัวเลขโพลทอริกของตัวสังเกต ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยที่แก้ไขปัญหาคำนวณผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโพลทอริกที่มีสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ Ko (1998) ได้นำเสนอตัวสังเกตโพลทอริกแบบปรับตัว เพื่อใช้ในระบบขับเคลื่อนที่มีมอเตอร์เชิงโรนัสแม่เหล็กถาวรแบบไร้แปรงถ่านเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งภายในมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการคล้องเส้นแรงแม่เหล็ก (flux linkage) ที่ไม่สัมพันธ์กับเวลา เป็นผลให้ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กับเวลาเช่นเดียวกัน ภายในตัวสังเกตดังกล่าวมีการนำเสนอกลไกการปรับตัว (adaptive mechanism) ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (K/J) ในขณะที่ตัวสังเกตทำการคำนวณตัวเลขโพลทอริก (on-line parameter estimation) โดยที่กลไกการปรับตัวข้างต้นและโครงสร้างของตัวสังเกตต้องการกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วรอบของเพลอาหมุน เป็นข้อมูลที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์และการคำนวณตัวเลขโพลทอริก รวมถึงในการคำนวณตัวแปรสถานะ ทำให้ต้องใช้ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า ตัวตรวจรู้ตำแหน่งเชิงมุม และตัวตรวจรู้ความเร็วรอบเพื่อเข้าถึงปริมาณกระแสไฟฟ้า ตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วรอบของเพลอาหมุน ตามลำดับ เมื่อใช้งานตัวสังเกตโพลทอริกแบบปรับตัวที่กล่าวถึงเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมทางตำแหน่งเชิงมุมแบบวงปิด จากการจำลองสถานการณ์ในสถานะคงตัว ผลตอบสนองของระบบที่เกิดขึ้นจะลู่เข้าหาตำแหน่งเชิงมุมอ้างอิง

การออกแบบตัวสังเกตโพลทอริกแบบปรับตัวในงานวิจัยก่อนหน้านี้ มีแนวคิดว่าเป็นขณะที่มอเตอร์และโพลทอริก ค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวขับเคลื่อนนั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นส่วนที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จึงทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เฉพาะอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาระบบปฏิบัติการจริง จะได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดอาจมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กับเวลาได้เช่นเดียวกัน เป็นผลให้กลไกการปรับตัวของตัวสังเกตโพลทอริกแบบปรับตัวแบบใหม่ที่จะนำเสนอ มีส่วนที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (B/J) ในขณะที่ตัวสังเกตทำการคำนวณตัวเลขโพลทอริก ซึ่งเพิ่มเติมจากส่วนที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ได้นำเสนอ

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ นอกจากนั้นกลไกการปรับตัวและโครงสร้างของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบใหม่ที่จะนำเสนอ ต้องการกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วรอบของระบบ เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลในการประมาณค่าพารามิเตอร์และการคำนวณตัวเลขโพลทอร์ก รวมถึงในการคำนวณตัวแปรสถานะ ทำให้ตัวสังเกตต้องการเพียงตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าและตัวตรวจรู้ความเร็วรอบเท่านั้น ในการเข้าถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบของระบบ ตามลำดับ ทำให้การลงทุนซื้อและการติดตั้งตัวตรวจรู้เพื่อเชื่อมติดเข้ากับระบบมีค่าใช้จ่ายที่ลดลง

บทที่ 4 มีเนื้อหาที่อธิบายถึง การขยายโครงสร้างแบบใหม่ของตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเพื่อให้เป็นตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบและตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวที่ได้รับกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได และผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงคุณสมบัติการกระตุ้นแบบคงอยู่ (persistent excitation) ของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวที่ได้นำเสนอ

4.2 การออกแบบตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว

ปัญหาหนึ่งของการใช้งานตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับมีสาเหตุมาจากการใช้ค่าพารามิเตอร์กลางของระบบซึ่งมีค่าคงที่เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต ซึ่งอาจมีค่าเท่ากับหรือไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบในขณะที่ตัวสังเกตทำงาน นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์กลางของระบบถูกนำไปใช้ในการเลือกค่าเกณฑ์หรือกำหนดตำแหน่งโพลของตัวสังเกตดังกล่าว เป็นสาเหตุให้ตัวเลขโพลทอร์กที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับโพลทอร์กที่เกิดขึ้นจริงในระบบ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์จริงของระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กับเวลาหรือมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อม ดังนั้นในการออกแบบตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวแบบใหม่ จึงมีแนวคิดที่จะขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ รวมถึงพิจารณาเสถียรภาพและเลือกค่าเกณฑ์ของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวที่ได้ออกแบบ

4.2.1 การขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

กำหนดให้โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมอเตอร์และโพลมีค่าคงที่ นอกจากนี้พิจารณาให้การประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ และการประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในขณะที่ตัวสังเกตทำงานหรือคำนวณตัวเลขโพลทอร์ก ดังนั้นตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวแบบใหม่จึงมีโครงสร้างเป็น

$$\dot{\omega} = \hat{a}\hat{\omega} + \hat{b}i_{eq} + c\hat{T}_L + \hat{\ell}_1 \tilde{\omega} \quad (4-1)$$

โดยที่ $\hat{\ell}_1 = -\gamma_1 \hat{a} + \gamma_2 \hat{b}$ คือค่าเกนของตัวสังเกตที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา γ_1, γ_2 คือค่าเกนคงที่ $\hat{a}, \hat{b}$ คือค่าพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณค่าและมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา $\hat{T}_L$ คือ ตัวเลขโหลตทอร์กที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกต โดยสมการของการคำนวณ $\hat{a}, \hat{b}$ และ $\hat{T}_L$ จะได้จากกลไกการปรับตัวซึ่งจะได้กล่าวต่อไป ในส่วนของ $\tilde{\omega}$ คือ พลวัตของการคำนวณความเร็วรอบ $\tilde{\omega}$ คือ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบ และ i_{eq} คือ กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ต่อมาหาผลต่างระหว่างสมการพลวัตความเร็วรอบของระบบมอเตอร์และโหลตในสมการที่ (2-13) และสมการพลวัตความเร็วรอบที่คำนวณได้จากตัวสังเกตโหลตทอร์กแบบปรับตัวในสมการที่ (4-1) ผลต่างที่ได้คือ

$$\dot{\tilde{\omega}} = a\tilde{\omega} - \hat{\ell}_1 \tilde{\omega} + c\tilde{T}_L + \tilde{a}\hat{\omega} + \tilde{b}i_{eq} \quad (4-2)$$

โดยที่ $\tilde{a} = a - \hat{a}$ และ $\tilde{b} = b - \hat{b}$ คือ ค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลตทอร์กแบบปรับตัว จากนั้นแทนค่าเกนของตัวสังเกตโหลตทอร์กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $\hat{\ell}_1 = \gamma_1 \tilde{a} - \gamma_2 \tilde{b} - \gamma_1 a + \gamma_2 b$ ลงในสมการที่ (4-2) และจัดรูปสมการใหม่ กล่าวคือ

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}} = & [(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b] \tilde{\omega} + \tilde{a}(\hat{\omega} - \gamma_1 \tilde{\omega}) \\ & + \tilde{b}(i_{eq} + \gamma_2 \tilde{\omega}) + c\tilde{T}_L \end{aligned} \quad (4-3)$$

สมการที่ (4-3) จะถูกนำไปใช้ในการจัดรูปสมการอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟ ในหัวข้อการพิจารณาเสถียรภาพโดยใช้ฟังก์ชันเลียบูโนฟและกลไกการปรับตัว ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

4.2.2 การพิจารณาเสถียรภาพโดยใช้ฟังก์ชันเลียบูโนฟและกลไกการปรับตัว

เนื่องจากสิ่งสำคัญในการประมาณค่าพารามิเตอร์ให้เปลี่ยนแปลงตามเวลาในขณะที่ตัวสังเกตโหลตทอร์กแบบปรับตัวคำนวณตัวเลขโหลตทอร์กและคำนวณตัวแปรสถานะ คือ ความมีเสถียรภาพในการทำงานของตัวสังเกตดังกล่าว ดังนั้นการจัดแจงกลไกการปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ข้างต้นจึงเริ่มต้นจากการเลือกฟังก์ชันเลียบูโนฟที่มีเทอมของค่าความ

ผิดพลาด ได้แก่ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโพลทอริก และค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ a และ b ดังนี้

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\omega}^2 + \frac{c}{2\ell_2} \tilde{T}_L^2 + \frac{1}{2\alpha_1} \tilde{a}^2 + \frac{1}{2\alpha_2} \tilde{b}^2 \quad (4-4)$$

โดยที่ $V \geq 0$ เป็นฟังก์ชันแบบบวกจำกัด (positive definite function) (Slotine and Li, 1991) α_1, α_2 คือ ค่าเกนบวกคงที่ ค่าพารามิเตอร์ c ของระบบและตัวสังเกตมีค่าน้อยกว่าศูนย์ และ ℓ_2 เป็นค่าเกนที่น้อยกว่าศูนย์ ($c < 0$ และ $\ell_2 < 0$) จะสังเกตได้ว่า สมการที่ (4-4) เป็นฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดในการคำนวณตัวเลขของความถี่รอบ ตัวเลขโพลทอริก และการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโพลทอริกแบบปรับตัว ถ้าฟังก์ชันเลียปโนฟมีค่าลดลงจนเท่ากับศูนย์ ตัวสังเกตโพลทอริกแบบปรับตัวจะประมาณค่าพารามิเตอร์ จำนวนตัวเลขโพลทอริก และจำนวนตัวแปรสถานะ ได้เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริง โพลทอริกที่เกิดขึ้นจริง และตัวแปรสถานะของระบบตามลำดับ ต่อมาหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปโนฟหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันเลียปโนฟที่เทียบกับเวลาและเขียนอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่กล่าวถึงเป็น

$$\dot{V} = \tilde{\omega} \dot{\tilde{\omega}} + \frac{c}{\ell_2} \tilde{T}_L \dot{\tilde{T}}_L + \frac{1}{\alpha_1} \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \frac{1}{\alpha_2} \tilde{b} \dot{\tilde{b}} \quad (4-5)$$

เมื่อนำสมการที่ (4-3) แทนลงในสมการที่ (4-5) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปโนฟเป็น

$$\begin{aligned} \dot{V} = & [(\gamma_1 + 1) a - \gamma_2 b] \tilde{\omega}^2 + [\tilde{\omega} - \frac{1}{\ell_2} \dot{\tilde{T}}_L] c \tilde{T}_L \\ & + [(\hat{\omega} - \gamma_1 \tilde{\omega}) \tilde{\omega} - \frac{1}{\alpha_1} \dot{\tilde{a}}] \tilde{a} \\ & + [(i_{eq} + \gamma_2 \tilde{\omega}) \tilde{\omega} - \frac{1}{\alpha_2} \dot{\tilde{b}}] \tilde{b} \end{aligned} \quad (4-6)$$

โดยที่ $\dot{\tilde{a}}=0$ และ $\dot{\tilde{b}}=0$ ในสมการที่ (4-6) การนิยามกลไกการปรับตัวของตัวสังเกตโพลทอริกแบบปรับตัวแบบใหม่ จะเกิดจากการกำหนดให้เทอมที่สามและเทอมที่สี่ทางด้านขวามือของ

สมการเท่ากับศูนย์ ในส่วนของการคำนวณตัวเลขโพลทอร์คจะมีรูปแบบที่เกิดจากการกำหนดให้เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน กล่าวคือ

$$\dot{a} = \alpha_1 \tilde{\omega} (\tilde{\omega} - \gamma_1 \tilde{\omega}) \quad (4-7)$$

$$\dot{b} = \alpha_2 \tilde{\omega} (i_{eq} + \gamma_2 \tilde{\omega}) \quad (4-8)$$

$$\dot{T}_L = \ell_2 \tilde{\omega} \quad (4-9)$$

เป็นผลให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟ ในสมการที่ (4-6) มีเทอมที่หนึ่งทางด้านขวามือนั้น ดังนี้

$$\dot{V} = [(\gamma_1 + 1) a - \gamma_2 b] \tilde{\omega}^2 \quad (4-10)$$

เงื่อนไขที่ทำให้ตัวสังเกตโพลทอร์คแบบปรับตัวแบบใหม่มีเสถียรภาพ คือ (Slotine and Li, 1991) ซึ่งมีความหมายว่า $(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b < 0$ เท่านั้น กล่าวคือ เมื่อค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบของตัวสังเกตมีขนาดไม่เท่ากับศูนย์จะทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟในสมการที่ (4-10) มีค่าน้อยกว่าศูนย์ เป็นผลให้ฟังก์ชันเลียบูโนฟในสมการที่ (4-4) มีค่าลดลงจากเดิมนั่นคือ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโพลทอร์คและค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต มีแนวโน้มลดลงจนกว่าค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบมีขนาดลดลงเท่ากับศูนย์ ทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผลให้ฟังก์ชันเลียบูโนฟมีค่าลดลงเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือคู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโพลทอร์ค และค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต มีขนาดลดลงเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือคู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งเช่นเดียวกัน ($t \rightarrow \infty$; $\tilde{\omega} \rightarrow 0$; $T_L, \tilde{a}, \tilde{b} \rightarrow$ ค่าคงที่)

การนำตัวสังเกตโพลทอร์คแบบปรับตัวไปใช้งาน เกิดจากการอินทิเกรตสมการพลวัตของการคำนวณความเร็วรอบของระบบในสมการที่ (4-1) การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบในสมการที่ (4-7) และสมการที่ (4-8) และการคำนวณตัวเลขโพลทอร์คที่เกิดขึ้นของระบบในสมการที่ (4-9) กล่าวคือ

$$\hat{\omega}(t) = \int_0^t (\hat{a}\hat{\omega} + \hat{b}i_{eq} + c\hat{T}_L + \hat{\ell}_1\tilde{\omega})dt + \hat{\omega}(0) \quad (4-11)$$

$$\hat{a}(t) = \alpha_1 \int_0^t [\tilde{\omega}(\hat{\omega} - \gamma_1\tilde{\omega})]dt + \hat{a}(0) \quad (4-12)$$

$$\hat{b}(t) = \alpha_2 \int_0^t [\tilde{\omega}(i_{eq} + \gamma_2\tilde{\omega})]dt + \hat{b}(0) \quad (4-13)$$

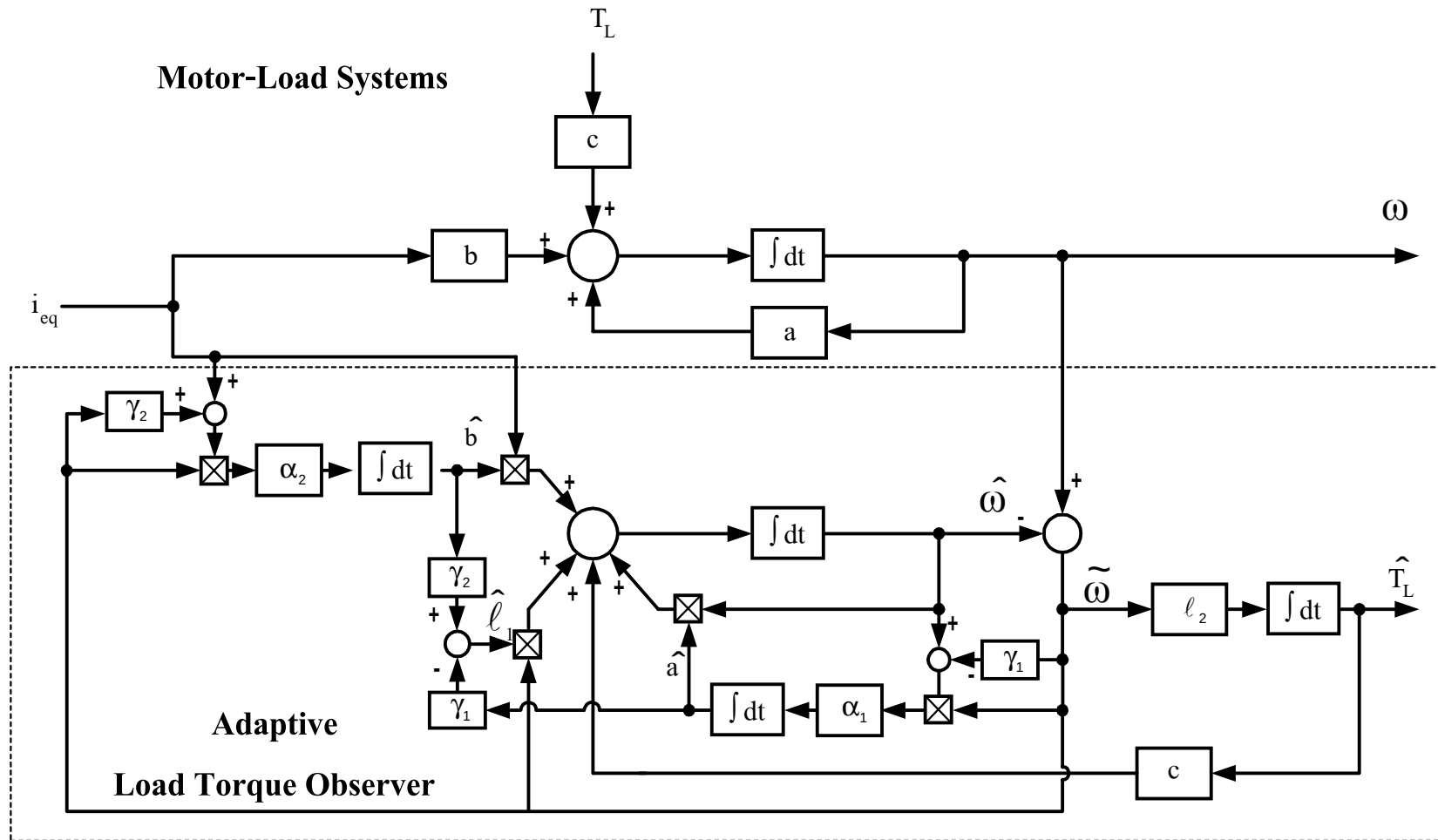
$$\hat{T}_L(t) = \ell_2 \int_0^t \tilde{\omega}dt + \hat{T}_L(0) \quad (4-14)$$

โดยที่ $\hat{a}(0)$ และ $\hat{b}(0)$ คือ ค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\omega}(0)$ และ $\hat{T}_L(0)$ คือ ค่าเริ่มต้นของการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์ก ตามลำดับ โครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวแบบใหม่ ประกอบด้วยสมการที่ (4-11), (4-12), (4-13) และสมการที่ (4-14) ซึ่งเขียนเป็นแผนภาพโครงสร้างของตัวสังเกตได้ในรูปที่ 4.1

4.2.3 การพิจารณาค่าเกินของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว

เนื่องจากการหมุนของระบบมอเตอร์และโหลดสามารถแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีที่ระบบมีการหมุนในทิศทางเดียว ซึ่งอาจเป็นทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทิศทางทวนเข็มนาฬิกาในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และกรณีที่ระบบมีการหมุนในสองทิศทางสลับกัน (ทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทิศทางทวนเข็มนาฬิกา) ดังนั้นการเลือกค่าเกินของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวแบบใหม่ที่ประกอบไปด้วย $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ และ ℓ_2 จึงแบ่งออกได้เป็นสองกรณีเช่นเดียวกัน

ในกรณีที่หนึ่ง ระบบมีการหมุนในทิศทางเดียวและมีกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณขั้นบันได ก่อนการเริ่มต้นหมุนของระบบมอเตอร์และโหลด ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ ($\hat{a}(0) = a_0$ และ $\hat{b}(0) = b_0$) และมีค่าเริ่มต้นของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กเท่ากับศูนย์ ($\hat{T}_L(0) = 0$) เนื่องจากการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก คือ การอินทิเกรตค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบในช่วงระยะเวลาจากเวลาเริ่มต้นถึงเวลาปัจจุบัน หรือการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก คือ การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นถึงเวลาปัจจุบัน ทำให้ค่าเริ่มต้นของการคำนวณความเร็วรอบมีค่าไม่เท่ากับศูนย์หรือมีค่าเท่า



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว

กับตัวเลขค่าหนึ่ง และขนาดค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบต้องมีอัตราการลดลงที่
 ไม่มาก นั่นคือ เทอมของ $(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b$ ต้องมีขนาดไม่มากและมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เป็นผลให้
 อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟมีขนาดไม่มากและมีค่าน้อยกว่าศูนย์ในสถานะชั่วครู่ ทำให้ฟังก์ชัน
 เลียบูโนฟและค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบมีอัตราการลดลงที่ไม่มากเช่นเดียวกัน
 จึงทำให้มีพื้นที่ใต้กราฟในช่วงระยะเวลาที่นานเพียงพอเพื่อการอินทิเกรตคำนวณตัวเลขโหลด
 ทอร์คในส่วนของการเลือกค่าเกน α_1 และ α_2 ถ้าค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของการประมาณค่า
 พารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์คแบบปรับตัว ($\tilde{a}(0)$ และ $\tilde{b}(0)$) มีขนาดน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ
 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ ค่าเกนดังกล่าวจะมีขนาดน้อย แต่ถ้าค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของการ
 ประมาณค่าพารามิเตอร์มีขนาดมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของระบบ ค่าเกนข้างต้นจะมี
 ขนาดมากเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การเลือกค่าเกน ℓ_2 จะสัมพันธ์กับโหลดทอร์คที่เกิดขึ้นในระบบ
 กล่าวคือ ถ้าโหลดทอร์คที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับทอร์คทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อน
 ค่าเกน ℓ_2 จะมีขนาดน้อย แต่ถ้าโหลดทอร์คที่เกิดขึ้นมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับทอร์คทางแม่เหล็ก
 ไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อน ค่าเกน ℓ_2 จะมีขนาดมากเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาระบบมอเตอร์และโหลดที่
 หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ และการทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์คแบบปรับตัวในสถานะคงตัว
 จะได้ว่า ความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับความเร็วรอบของระบบ ทำให้
 สมการพลวัตของค่าความผิดพลาดระหว่างระบบและตัวสังเกตในสมการที่ (4-2) ถูกเขียนใหม่เป็น

$$\tilde{T}_L(\infty) = -\frac{1}{c} [\tilde{a}(\infty) \omega + \tilde{b}(\infty) i_{eq}] \quad (4-15)$$

โดยที่ i_{eq} คือ กระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์คทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณขับเคลื่อนใด
 เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-15) ในสถานะคงตัว ถ้าค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์มี
 ขนาดน้อยมากหรือเกือบเท่ากับศูนย์ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์คจะมีขนาด
 น้อยมากหรือเกือบเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน เป็นผลให้ตัวเลขของโหลดทอร์คที่ได้จากการคำนวณมี
 ค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับโหลดทอร์คที่เกิดขึ้นในระบบ

ในกรณีที่สอง ระบบมีการหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทิศทางทวนเข็มนาฬิกาสลับ
 กัน เพราะกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์คทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบและตัวสังเกตโหลด
 ทอร์ค เป็นสัญญาณไซน์ซอซด์ที่มีหนึ่งความถี่หรือมากกว่าหนึ่งความถี่ ทำให้ระบบและตัวสังเกตดัง
 กล่าวถูกกระตุ้นในทุกโหมดของการทำงาน เนื่องจากตัวสังเกตโหลดทอร์คแบบปรับตัวประกอบ
 ไปด้วยกลไกการปรับตัวและโครงสร้างที่มีคุณสมบัติการกระตุ้นคงอยู่ ตัวสังเกตข้างต้นจะคำนวณ

ตัวเลขโพลทอร์คที่มีค่าเท่ากับโพลทอร์คที่เกิดขึ้นในระบบ และประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบในสถานะคงตัว ก่อนการเริ่มต้นหมุนของระบบมอเตอร์และโหลด และก่อนการเริ่มต้นทำงานของตัวสังเกตโพลทอร์คแบบปรับตัว ตัวสังเกตที่กล่าวถึงมีค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์เท่ากับศูนย์ ($\hat{a}(0)=0$ และ $\hat{b}(0)=0$) และมีค่าเริ่มต้นของการคำนวณความเร็วรอบเท่ากับศูนย์ ($\hat{\omega}(0)=0$) รวมถึงมีค่าเริ่มต้นของการคำนวณตัวเลขโพลทอร์คเท่ากับศูนย์ ($\hat{T}_L(0)=0$) ในขณะที่โพลทอร์คที่เกิดขึ้นในระบบมีขนาดคงที่ การกำหนดให้เทอม $(\gamma_1+1)a - \gamma_2 b$ มีขนาดไม่มากและมีค่าน้อยกว่าศูนย์ คือ แนวทางหนึ่งของการเลือกค่าเกน γ_1 และ γ_2 ซึ่งเกิดจากความต้องการขนาดค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบ ที่มีอัตราการลดลงไม่มาก ทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟมีขนาดไม่มากและมีค่าน้อยกว่าศูนย์ในสถานะชั่วคราว เป็นผลให้ฟังก์ชันเลียบูโนฟมีอัตราการลดลงที่ไม่มากเช่นเดียวกัน นั่นคือ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบมีพื้นที่ใต้กราฟในช่วงระยะเวลาที่นานเพียงพอเพื่อการอินทิเกรตคำนวณตัวเลขโพลทอร์ค และประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต ในส่วนของการเลือกค่าเกน α_1 , α_2 และ ℓ_2 ค่าเกนของตัวสังเกตชุดนี้ จะสัมพันธ์กับระยะเวลาในสถานะชั่วคราวของการประมาณค่าพารามิเตอร์และช่วงเวลาเข้าที่ของโพลทอร์คที่ได้จากการคำนวณ กล่าวคือ กำหนดให้ความถี่ของสัญญาณไขวญซอด์ในกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์คทางแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าค่าเกน α_1 , α_2 และ ℓ_2 มีขนาดมาก การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตจะมีสถานะชั่วคราวที่สั้นลงหรือเร็วขึ้น และโพลทอร์คที่ได้จากการคำนวณจะมีช่วงเวลาเข้าที่ที่สั้นลงหรือเร็วขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ถ้าค่าเกน α_1 , α_2 และ ℓ_2 มีขนาดลดลง การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตจะมีสถานะชั่วคราวที่สั้นลงหรือเร็วขึ้น และโพลทอร์คที่ได้จากการคำนวณจะมีช่วงเวลาเข้าที่ที่สั้นลงหรือเร็วขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การเลือกค่าเกน α_1 , α_2 และ ℓ_2 จะสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณไขวญซอด์ของกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์คทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้กับระบบและตัวสังเกตโพลทอร์ค กล่าวคือ กำหนดให้ระยะเวลาในสถานะชั่วคราวของการประมาณค่าพารามิเตอร์และช่วงเวลาเข้าที่ของโพลทอร์คที่ได้จากการคำนวณไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าความถี่ของสัญญาณไขวญซอด์มีค่าเพิ่มขึ้นค่าเกน α_1 , α_2 และ ℓ_2 ของตัวสังเกตจะมีขนาดลดลง แต่ถ้าความถี่ของสัญญาณไขวญซอด์มีค่าลดลง ค่าเกน α_1 , α_2 และ ℓ_2 จะมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อระบบมอเตอร์และโหลดหมุนในสองทิศทางสลับกัน และตัวสังเกตโพลทอร์คแบบปรับตัวมีการทำงาน หลังจากเวลาผ่านไปนานเพียงพอ ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบและค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์จะเข้าสู่หาศูนย์ เป็นผลให้ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโพลทอร์คเข้าสู่หาศูนย์เช่นเดียวกัน ($t \rightarrow \infty$; $\tilde{\omega}, \tilde{a}, \tilde{b} \rightarrow 0$; $\tilde{T}_L \rightarrow 0$)

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

จุดประสงค์ของการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว คือ การแสดงผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่ได้จากตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวเพื่อเปรียบเทียบกับตัวเลขโหลดทอร์กที่ได้จากตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ในกรณีกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณขั้นบันไดและค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบซึ่งได้นำเสนอในบทที่ 3 ในส่วนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์ยังได้แสดงผลเพิ่มเติมของคุณสมบัติการกระตุ้นคงอยู่ของกลไกการปรับตัวและโครงสร้างในตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวในกรณีที่กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไซน์ซอว์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีที่ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมอเตอร์และโหลดมีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการทำงานของตัวสังเกต และกรณีที่ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ตัวสังเกตทำงานในสถานะคงตัว

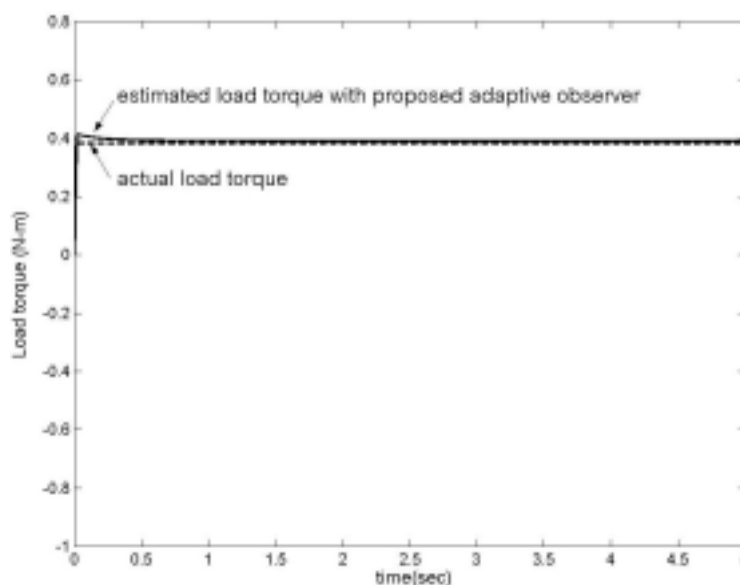
4.3.1 กรณีกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณขั้นบันได

ในการจำลองสถานการณ์ของการทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวและตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของตัวเลขโหลดทอร์ก กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เป็นสัญญาณขั้นบันไดที่มีขนาดเท่ากับ 100 แอมแปร์ ($i_{eq} = 100A$) โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีขนาดคงที่ ความเร็วรอบเริ่มต้นของระบบมอเตอร์และโหลดมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีขนาดมากกว่าค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว เท่ากับ 20 เปอร์เซนต์ ($a = 1.2\hat{a}(0)$ และ $b = 1.2\hat{b}(0)$) โดยที่ค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว คือ ค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ ($\hat{a}(0) = a_0$ และ $\hat{b}(0) = b_0$) นั่นหมายความว่า ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีขนาดมากกว่าค่าพารามิเตอร์คงที่ซึ่งถูกใช้ในตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเท่ากับ 20 เปอร์เซนต์ ($a = 1.2a_0$ และ $b = 1.2b_0$) แต่ค่าพารามิเตอร์ c ของระบบ และค่าพารามิเตอร์ c ของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ ค่าเริ่มต้นของการคำนวณความเร็วรอบในตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและแบบปรับตัวมีค่าไม่เท่ากับศูนย์และมีค่าเท่ากับตัวเลขค่าหนึ่ง แต่ค่าเริ่มต้นของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในตัวสังเกตข้างต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ในแต่ละครั้งของการหมุนของระบบมอเตอร์และโหลดและการทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเท่ากับ 20%, 50%, 80% และ 100% ของพิกัด ตามลำดับ ในการเลือกค่าเกณฑ์ของตัวสังเกต

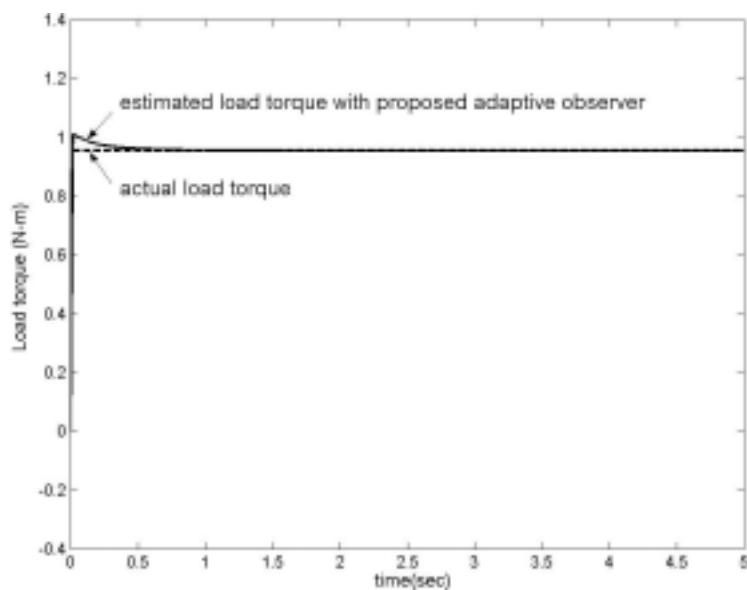
โหลดทอร์กแบบปรับตัว ค่าเกน $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1$ และ α_2 จะมีค่าเท่ากับ 2000, 2000, 4.5 และ 500 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเกน l_2 ที่เหมาะสมจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ กล่าวคือ ค่าเกน l_2 จะมีค่าเท่ากับ -412, -463, -510 และ -560 ซึ่งตรงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบที่มีค่าเท่ากับ 20%, 50%, 80% และ 100% ของพิกัด ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5

เมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเท่ากับ 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% และ 100% ของพิกัด ในแต่ละครั้งของการหมุนของระบบมอเตอร์และโหลดและการทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ค่าเกน l_2 ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ -64, -187, -245, -303, -355, -412, -463, -510 และ -560 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเกน $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1$ และ α_2 มีค่าเท่ากับ 2000, 2000, 4.5 และ 500 ตามลำดับ ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตดังกล่าวในสถานะคงตัว แสดงได้ในตารางที่ 4.1

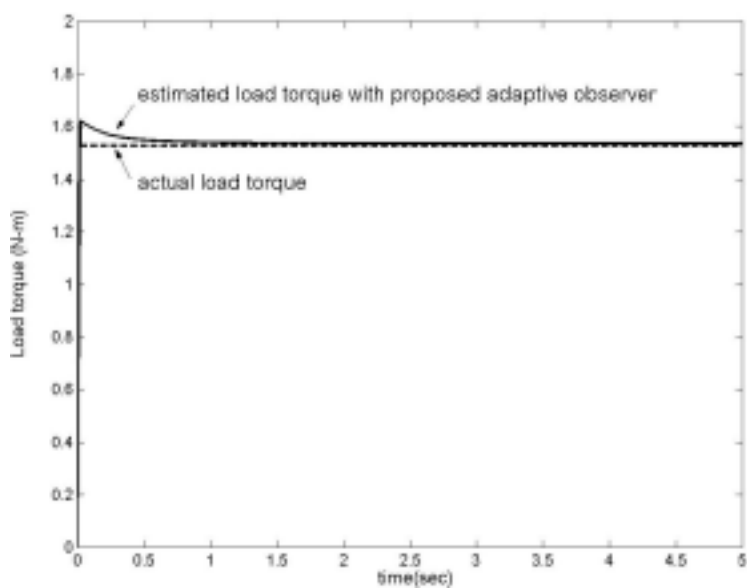
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 และข้อมูลตัวเลขในตารางที่ 4.1 ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว แสดงถึงการคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์กที่มีขนาดของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวน้อยกว่าการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกต



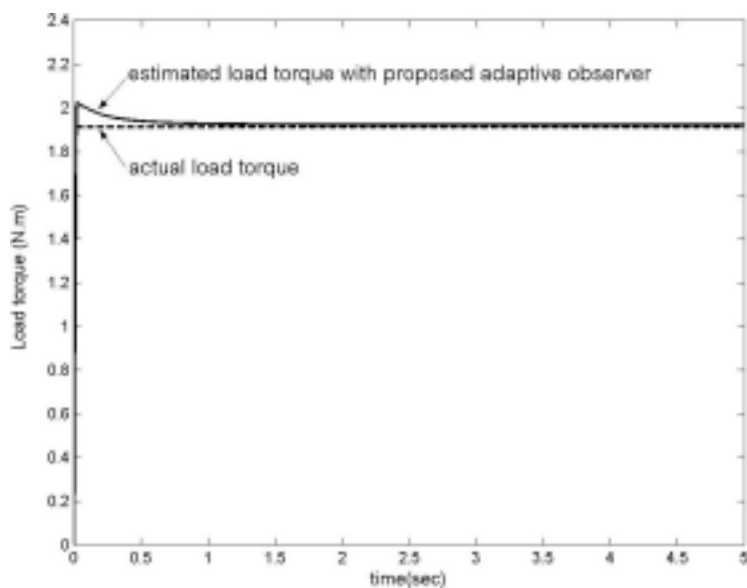
รูปที่ 4.2 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 20% ของพิกัด (กรณี i_{eq} เป็นสัญญาณขั้นบันได)



รูปที่ 4.3 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 50% ของพิกัด (กรณี i_{eq} เป็นสัญญาณขั้นบันได)



รูปที่ 4.4 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 80% ของพิกัด (กรณี i_{eq} เป็นสัญญาณขั้นบันได)



รูปที่ 4.5 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวเมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 100% ของพิกัด (กรณี i_{eq} เป็นสัญญาณขั้นบันได)

ตารางที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีขนาดมากกว่าค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

โหลดทอร์กจริงเมื่อเปรียบเทียบกับพิกัด (เปอร์เซ็นต์)	ตัวเลขโหลดทอร์กจริง (actual load torque) (นิวตัน-เมตร)	ตัวเลขโหลดทอร์กที่คำนวณได้ (estimated load torque) (นิวตัน-เมตร)	ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในวินาทีที่ 10 (เปอร์เซ็นต์)
10	0.191	0.1906	0.19
20	0.382	0.3803	0.44
30	0.573	0.5691	0.57
40	0.764	0.7606	0.44
50	0.955	0.9533	0.17
60	1.146	1.1365	0.83
70	1.337	1.3344	0.19
80	1.528	1.5236	0.28
90	1.719	1.7043	0.86
100	1.910	1.9002	0.51

โหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ โดยที่ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ และตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ มีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเช่นเดียวกัน รวมถึงระบบมอเตอร์และโหลดมีการหมุนในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง นอกจากนี้ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก ที่มีค่าพุ่งเกินในสถานะชั่วคราวที่เป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในส่วนของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ผลการจำลองสถานการณ์การคำนวณจะถูกแสดงในบทที่ 3

4.3.2 กรณีกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไขว้ขอยด์

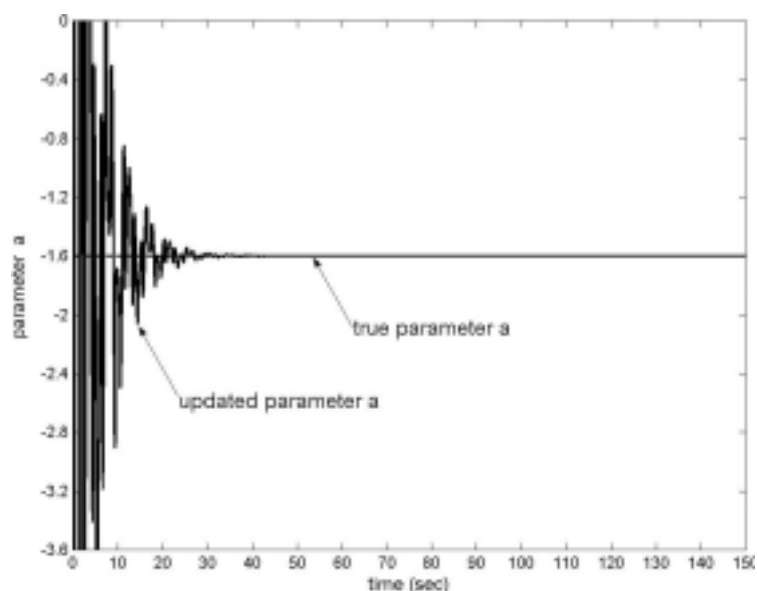
การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวเพื่อแสดงคุณสมบัติการกระตุ้นคงอยู่ของกลไกการปรับตัวและโครงสร้างของตัวสังเกตดังกล่าว จะถูกแบ่งออกเป็นสองกรณีย่อยดังนี้

ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเป็นค่าคงที่

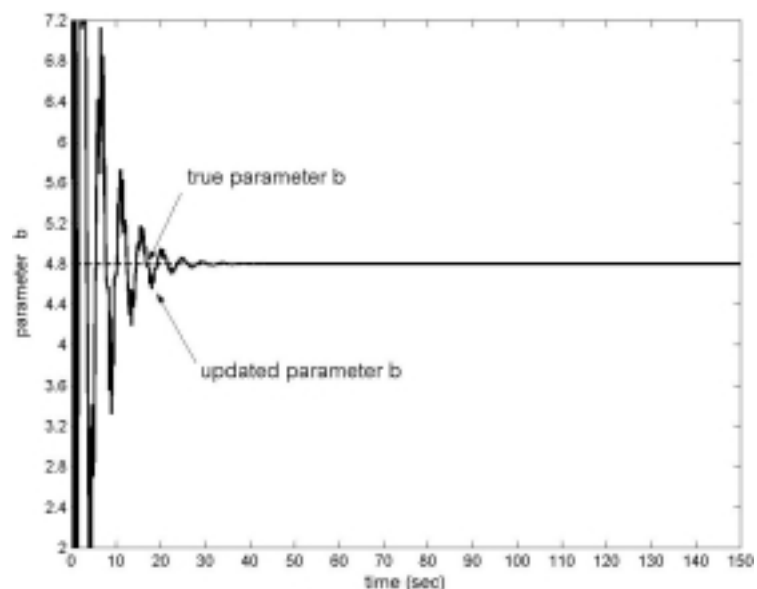
ในขณะที่ระบบมอเตอร์และโหลดหมุนในสองทิศทางสลับกัน (หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาและทิศทวนเข็มนาฬิกา) กำหนดให้ระบบมีค่าพารามิเตอร์จริงมีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการทำงาน และมีขนาดมากกว่าค่าพารามิเตอร์กลางของระบบเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ($a = 1.2a_0$ และ $b = 1.2b_0$) แต่ค่าพารามิเตอร์ c ของระบบ และค่าพารามิเตอร์ c ของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางของระบบ กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เป็นสัญญาณไขว้ขอยด์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 100 แอมแปร์ และมีความถี่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์ โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีขนาดคงที่ และมีค่าเท่ากับฟัด (T_L = 1.91 N-m) ความเร็วรอบเริ่มต้นของระบบมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าเริ่มต้นของการคำนวณความเร็วรอบและค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ รวมถึงค่าเริ่มต้นของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในตัวสังเกต มีค่าเท่ากับศูนย์ ($\hat{a}(0)$, $\hat{b}(0)$, $\hat{c}(0)$, $\hat{T}_L(0) = 0$) นอกจากนี้ค่าเกน $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ และ ℓ_2 ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 100, 100, 100, 100 และ -500 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6, 4.7 และรูปที่ 4.8 จะได้ว่า ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวให้ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าลู่เข้าหาโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ และให้ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าลู่เข้าหาพารามิเตอร์จริงของระบบในสถานะคงตัว ($t \rightarrow \infty$, $\hat{a} \rightarrow a$, $\hat{b} \rightarrow b$ และ $\hat{T}_L \rightarrow T_L$) ซึ่งเกิดจากกลไกการปรับตัวและโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กข้างต้นมีคุณสมบัติการกระตุ้นคงอยู่ ในสถานะชั่วคราวของการทำงานของตัวสังเกตที่กล่าวถึง ตัวเลขโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณมีการแกว่งกวัด (oscillation) โดยรอบของโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบและค่าพารามิเตอร์

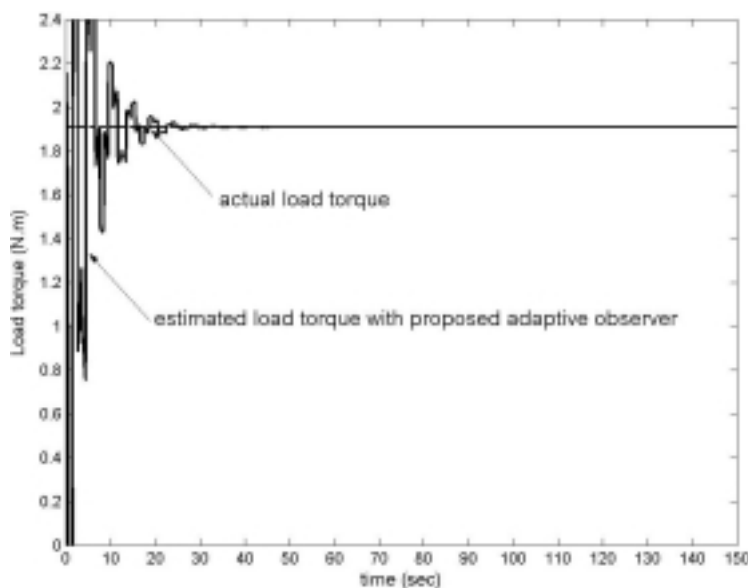
จริงของระบบ ตามลำดับ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณในตัวสังเกตในสถานะชั่วครู่ยังมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ โดยมีค่าเริ่มต้นการประมาณค่าพารามิเตอร์เท่ากับศูนย์



รูปที่ 4.6 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{a}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเป็นค่าคงที่)

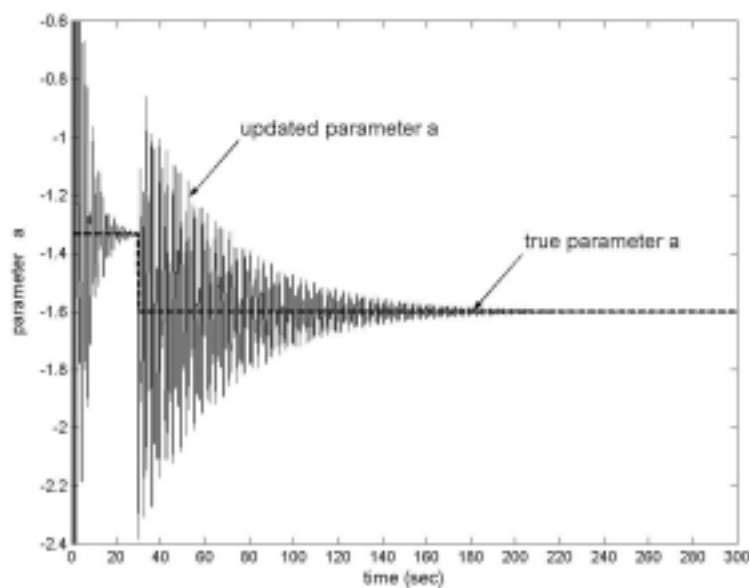


รูปที่ 4.7 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเป็นค่าคงที่)

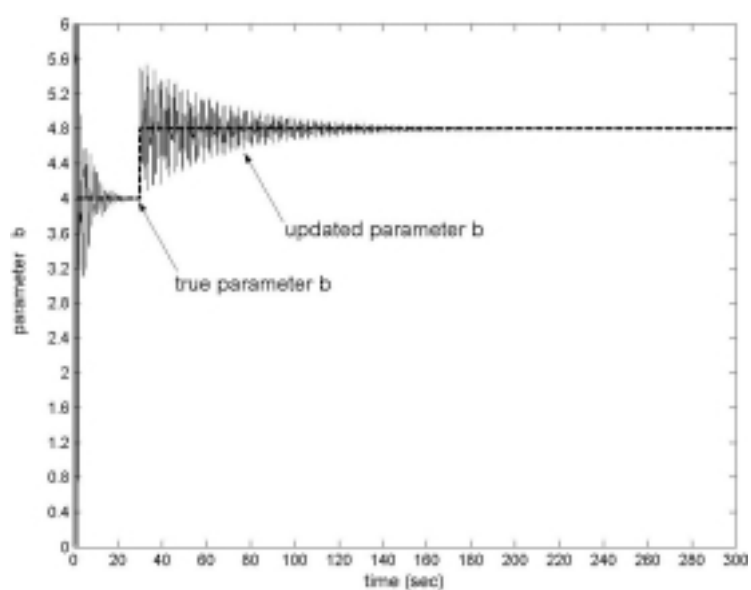


รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเป็นค่าคงที่)

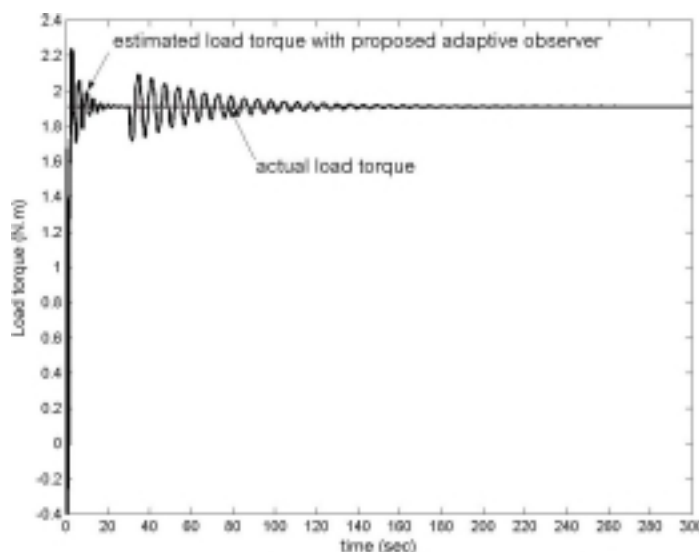
กำหนดให้ก่อนการเริ่มต้นหมุนของระบบมอเตอร์และโหลดและก่อนการทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ระบบดังกล่าวมีค่าพารามิเตอร์จริงที่เท่ากับค่าพารามิเตอร์กลาง เมื่อกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ซอซด์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 200 แอมแปร์ และมีความถี่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์ ถูกป้อนให้กับระบบข้างต้น มอเตอร์จะขับเคลื่อนโหลดให้หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาและทิศทวนเข็มนาฬิกาสลับกัน ถ้าระบบที่กล่าวถึงได้รับผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมภายในและภายนอก ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลง หรือมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในวินาทีที่ 30 ของการหมุน กล่าวคือ $\Delta a = 20\%$, $\Delta b = 20\%$ และ $a = 1.2a_0$, $b = 1.2b_0$ ในวินาทีที่ 30 แอมพลิจูดของความเร็วรอบของระบบในสองทิศทางที่สลับกันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเดิม แต่โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมีขนาดคงที่และมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ในส่วนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณมีค่าเท่ากับศูนย์ รวมถึงค่าเริ่มต้นของความเร็วรอบและโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ตัวสังเกตโหลดทอร์กที่กล่าวถึงมีค่าเกินเท่ากับค่าเกณฑ์ใช้ในตัวสังเกตกรณีที่ค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลา การเลือกกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไซน์ซอซด์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 200 แอมแปร์ จะช่วยทำให้ระยะเวลารวมของการจำลองสถานการณ์ลดลง



รูปที่ 4.9 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{a}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงในทันทีที่วินาที 30)



รูปที่ 4.10 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}$ ในตัวสังเกต (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงในทันทีที่วินาที 30)



รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก (กรณีค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในทันทีที่วินาที 30)

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9, 4.10 และรูปที่ 4.11 จะได้ว่า ในสถานะคงตัว ถ้าค่าพารามิเตอร์ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงในทันที ในสถานะชั่วครู่ที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวจะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กและประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีการกวัดแกว่งโดยรอบโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ตามลำดับ แต่หลังจากเวลาผ่านไปนานเพียงพอตัวสังเกตจะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กและประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าเท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ตามลำดับ อีกครั้งหนึ่ง

ก่อนการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์จริงของระบบในสถานะคงตัว ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีการทำงานที่มีเสถียรภาพ หรือมีฟังก์ชันเลียบูโนฟและอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟที่เท่ากับศูนย์แต่ในขณะที่ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในทันที หรือในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวจะมีการทำงานที่ไม่สามารถถูกระบุได้ว่ามีเสถียรภาพหรือไม่เสถียรภาพ กล่าวคือ ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ดังกล่าว อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟมีค่ามากกว่าศูนย์ ($\dot{V} > 0$) เพราะอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟจะประกอบไปด้วยเทอมของ $(1/\alpha_1)\dot{\hat{a}}$ และ $(1/\alpha_2)\dot{\hat{b}}$ ซึ่งเพิ่มเติมจากเทอมของ $[(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b]\dot{\omega}^2$ เป็นผลให้ฟังก์ชันเลียบูโนฟมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ ($V > 0$) นั่นคือ ขนาดค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์ก รวมถึงขนาดค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์เช่นเดียวกัน ต่อมาระบบมอเตอร์และโหลดมีค่าพารามิเตอร์ที่คงที่อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากตัวสังเกตโหลดทอร์กข้างต้นมีคุณสมบัติการกระตุ้นคงอยู่ เมื่อระบบและตัวสังเกตโหลดทอร์กได้รับ i_{cq} เป็น

สัญญาณไขว้ชอยด์ ทำให้ระบบถูกกระตุ้นในทุกโหมดการทำงาน ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปตัวสังเกตโหลดทอร์กที่กล่าวถึง มีการทำงานที่มีเสถียรภาพอีกครั้งหนึ่ง เป็นผลให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูโนฟมีเทอมของ $[(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b]\tilde{\omega}^2$ เพียงเทอมเดียวหรือไม่มีเทอมของ $(1/\alpha_1)\dot{a}\tilde{\omega}$ และ $(1/\alpha_2)\dot{b}\tilde{\omega}$ จึงทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูโนฟมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($\dot{V} < 0$) นั่นคือ ฟังก์ชันเลียปูโนฟมีค่าลดลงจากเดิม เป็นผลให้ขนาดค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบและโหลดทอร์ก รวมถึงขนาดค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตมีแนวโน้มลดลงในลักษณะต่อเนื่องหลังจากเวลาผ่านไปนานเพียงพอ ขนาดค่าความผิดพลาดของการคำนวณและการประมาณจะมีค่าเข้าสู่หาศูนย์อีกครั้งหนึ่ง

4.4 สรุป

การขยายโครงสร้างตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับให้มีกลไกการปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกต ทำให้ตัวสังเกตโหลดทอร์กที่ได้มีโครงสร้างที่แตกต่างจากเดิมและเป็นตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวที่มีเสถียรภาพของกลไกการปรับตัวและการคำนวณตัวแปรสถานะ การจำลองสถานการณ์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวในกรณีที่กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณขั้นบันได แสดงให้เห็นผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ มากกว่าผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ โดยที่ค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ และถ้าป้อนกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณไขว้ชอยด์ให้กับระบบและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ในสถานะคงตัว ตัวสังเกตโหลดทอร์กข้างต้นจะให้ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กและผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ ที่มีค่าเท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ตามลำดับ โดยที่ค่าเริ่มต้นของการคำนวณตัวแปรสถานะและค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ จากที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ว่า การใช้แกนตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวในกรณีที่ระบบมอเตอร์และโหลดหมุนในทิศทางเดียว ค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์อาจเป็นตัวเลขที่ได้จากการทดสอบระบบอย่างง่าย หรือการคำนวณโดยใช้สูตรพื้นฐานที่ไม่มีควมสลับซับซ้อนทางเทคนิค ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอาจมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ นอกจากนี้ตัวสังเกตดังกล่าวต้องการเพียงตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์และตัวตรวจรู้ความเร็วรอบเพลลาหมุนของมอเตอร์เท่านั้น ซึ่งทำให้การวัดโหลดทอร์กโดยใช้ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวสามารถลดต้นทุนในการจัดซื้อและการติดตั้ง

บทที่ 5

วงจรแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล

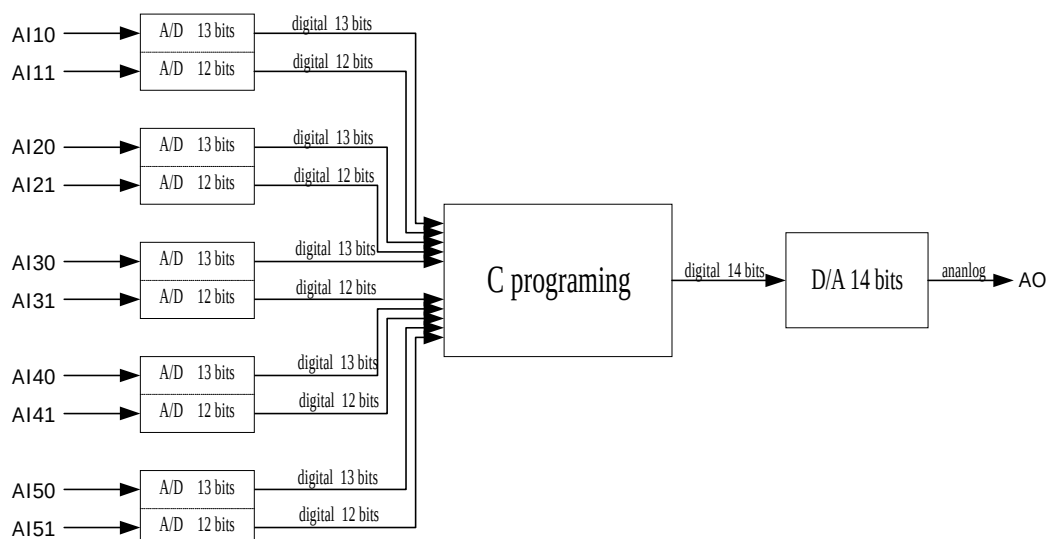
5.1 บทนำ

เนื่องจากงานด้านระบบควบคุมในปัจจุบัน ส่วนใหญ่เป็นการควบคุมแบบดิจิทัล แต่ระบบทางกายภาพหรืออุปกรณ์ภายนอกมีพลวัตแบบแอนะล็อก ทำให้ต้องมีชุดเชื่อมต่อ (interface) กับอุปกรณ์ภายนอกที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณแอนะล็อก ชุดเชื่อมต่อที่กล่าวถึงนี้ คือ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลและแอนะล็อก โดยวงจรแปลงสัญญาณที่กำหนดในประเทศไทยส่วนใหญ่มีการแยกชัด (resolution) จำกัดในระดับ 8-10 บิต ถ้างานควบคุมหรืองานประมวลผลมีความต้องการเข้าถึงข้อมูลที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นของระบบทางกายภาพ เพื่อใช้ในงานคำนวณหรืองานประมาณค่า ชุดเชื่อมต่อหรือวงจรแปลงสัญญาณข้างต้นอาจจะมีการแยกชัดเพิ่มขึ้นในระดับ 12 บิต หรือ 16 บิต ทำให้ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศในราคาที่แพงมาก เพื่อลดต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น จึงมีแนวคิดในการสร้างวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณแอนะล็อกจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและไอซีที่หาซื้อได้ภายในประเทศ ดังนั้นในบทที่ 5 จะนำเสนอวิธีการออกแบบและผลการทดสอบของวงจรแปลงสัญญาณที่ถูกสร้าง

5.2 โครงสร้างโดยรวมของวงจรแปลงสัญญาณ

วงจรแปลงสัญญาณที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบ 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ส่วนที่หนึ่ง คือ วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีการแยกชัด 13 บิต และ 12 บิต ซึ่งตรงกับช่องสัญญาณอินพุตที่ 0 และช่องสัญญาณอินพุตที่ 1 ตามลำดับ และส่วนที่สอง คือ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีการแยกชัด 14 บิต เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะถูกโปรแกรมด้วยภาษาซีทำหน้าที่ควบคุมการทำงานในแต่ละส่วน กล่าวคือ รับข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการแปลงข้อมูลแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของวงจรส่วนที่หนึ่ง โดยข้อมูลดิจิทัลดังกล่าวถูกส่งถึงเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ (printer port) เพื่อประมวลผล ต่อมาเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะทำการส่งข้อมูลดิจิทัลเอาต์พุตที่ได้จากการประมวลผลผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ นอกจากนี้คำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมหรือการกำหนดสถานะการทำงานของไอซีจะถูกส่งออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มี 2 ช่องสัญญาณ จะได้ว่า วงจรประกอบด้วย

ช่องสัญญาณอินพุตที่ 0 ซึ่งมีหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกอินพุตที่มีค่าแรงดันในช่วง $-5V$ ถึง $+5V$ และช่องสัญญาณอินพุตที่ 1 ซึ่งมีหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกอินพุตที่มีค่าแรงดันในช่วง $0V$ ถึง $5V$ เท่านั้น (ใช้สำหรับงานที่มีเฉพาะแรงดันค่าบวก) ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้งานเฉพาะช่องสัญญาณอินพุตที่ 0 เท่านั้น



รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับการแปลงสัญญาณ

เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณทั้ง 2 ส่วน ดำเนินการโดยใช้ไอซีเป็นอุปกรณ์หลัก ซึ่งอยู่ในรูปของไอซีที่ต่างเบอร์กันต้องทำงานร่วมกัน ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานไอซีมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ควรศึกษาคุณสมบัติของไอซีที่ใช้งานอย่างละเอียด ซึ่งอธิบายในหัวข้อต่อไป

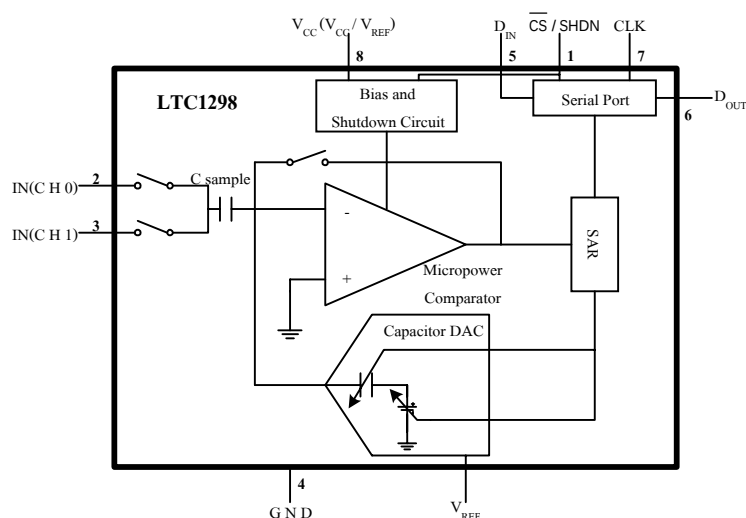
5.3 คุณสมบัติของไอซีที่ใช้

5.3.1 ไอซี LTC1298

ไอซี LTC1298 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก.) โดยวิธีการประมาณค่าแบบต่อเนื่อง (successive approximation) ที่มีการแยกชัด 12 บิต จำนวน 2 ช่องสัญญาณ คุณสมบัติของไอซี LTC1298 แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และโครงสร้างภายในของไอซีแสดงในรูปที่ 5.2 จะช่วยให้เข้าใจกระบวนการทำงานของไอซี และสามารถใช้งานไอซีได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติที่สำคัญของไอซี LTC1298

คุณสมบัติ	ย่านการทำงาน
เวลาในการแปลงสัญญาณ	0.06 มิลลิวินาที
อัตราการชักตัวอย่าง	11.1 กิโลเฮิร์ตซ์
จำนวนช่องสัญญาณแอนะล็อกอินพุต	2 ช่องการทำงาน
ค่าความคลาดเคลื่อน	+/- 2 LSB
แรงดันของแอนะล็อกอินพุต	-0.05 โวลต์ ถึง +5.05 โวลต์



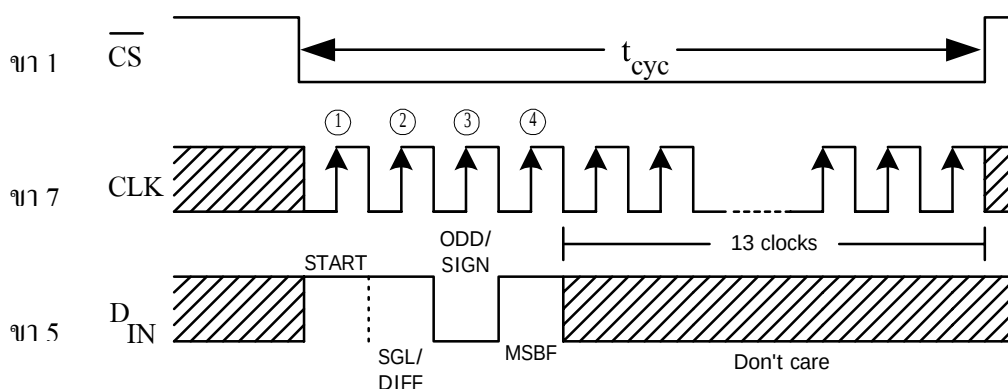
รูปที่ 5.2 โครงสร้างภายในของไอซี LTC1298

เมื่อพิจารณาการจัดเจนหน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆ ในไอซี LTC1298 จะมีการกำหนดไว้ได้ดังนี้

- ขา 1 (CS/SHDN) เป็นขาสัญญาณเพื่อเลือกโหมดการทำงานของไอซี ถ้าป้อนลอจิกศูนย์ ไอซีจะอยู่ในโหมดที่สามารถใช้งานไอซีได้ตามวัตถุประสงค์ และเมื่อป้อนลอจิกหนึ่ง ไอซีจะอยู่ในโหมดปิดการทำงาน
- ขา 2 (CH0) เป็นขาสัญญาณแอนะล็อกอินพุตของช่องสัญญาณ 0
- ขา 3 (CH1) เป็นขาสัญญาณแอนะล็อกอินพุตของช่องสัญญาณ 1
- ขา 4 (GND) เป็นขาสัญญาณอ้างอิงของแอนะล็อกอินพุต ซึ่งขานี้ควรเชื่อมต่อกับสัญญาณอ้างอิงของแอนะล็อกอินพุตโดยตรง

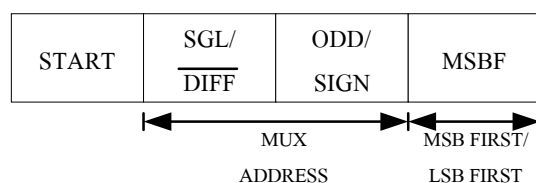
- ขา 5 (D_{IN}) เป็นขาสัญญาณควบคุมแบบอนุกรม สำหรับกำหนดมัลติเพล็กซ์แอดเดรส (multiplexer address) เพื่อใช้ในการเลือกช่องสัญญาณของสัญญาณแอนะล็อก อินพุตที่ต้องการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล
- ขา 6 (D_{OUT}) เป็นขาสัญญาณข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม ที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อก อินพุต
- ขา 7 (CLK) เป็นขาสัญญาณนาฬิกาอินพุต ซึ่งเป็นสัญญาณกำหนดจังหวะในการอ่านหรือเขียนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับไอซี LTC1298 และเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการแปลงสัญญาณข้อมูลแอนะล็อกเป็นดิจิทัลอีกด้วย โดยที่การอ่านหรือเขียนข้อมูลของไอซีจะทำงานที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาอินพุตเสมอ
- ขา 8 (V_{CC}/V_{REF}) เป็นขาแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงและขานี้เป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิงในการแปลงข้อมูลแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี ถ้าเกิดสัญญาณรบกวนมากหรือแรงดันไฟเลี้ยงไม่คงที่ จะทำให้การแปลงข้อมูลของไอซีผิดพลาดได้ เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการกำจัดหรือป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นโดยทำการต่อบายพาสส์ลงกราวด์ของสัญญาณแอนะล็อก

ในการใช้งานไอซี LTC1298 เพื่อรับข้อมูลหรือส่งข้อมูลให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ขาที่ 1, 5 และ 7 ของไอซีจะได้รับสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณลอจิกซึ่งถูกโปรแกรมด้วยภาษาซีจากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล สัญญาณควบคุมดังกล่าวเป็นสัญญาณที่ทำหน้าที่กำหนดสภาวะการทำงานในการอ่านหรือเขียนข้อมูลของไอซี LTC1298 โดยที่การอ่านข้อมูลของไอซีจะเกิดขึ้นที่ช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา (CLK) และการเขียนข้อมูลของไอซีจะเกิดขึ้นที่ช่วงขอบขาลงของสัญญาณนาฬิกา ในส่วนของการกำหนดสภาวะทำงานของไอซี LTC1298 มีลำดับเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 5.3 หลักการทำงานของไอซี LTC1298

ขั้นตอนที่ 1: เป็นขั้นตอนเริ่มต้นการทำงาน (Start Bits) เพื่อกำหนดสถานะเริ่มต้นการทำงานของไอซี LTC1298 จากรูปที่ 5.3 ในขณะที่ขา 1 ($\overline{CS}$) ได้รับสัญญาณลอจิก 1 ไอซีจะอยู่ในโหมดหยุดการทำงาน เนื่องจากคุณสมบัติของขาที่ 1 คือ ไอซีจะอยู่ในโหมดหยุดการทำงานเมื่อได้รับสัญญาณลอจิก 1 และจะอยู่ในโหมดการทำงานหรือพร้อมใช้งานเมื่อได้รับสัญญาณลอจิก 0 (active low) ต่อมาป้อนสัญญาณนาฬิกาครั้งที่ 1 เข้าที่ขา 7 (CLK) ช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาจะให้จังหวะการทำงานที่ 1 ของไอซี และในงานวิทยานิพนธ์นี้ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะทำการอ่านข้อมูลจากไอซีดังกล่าวเท่านั้น ซึ่งมีการทำงานในช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาเสมอ เมื่อพิจารณาไอซีที่อยู่ในโหมดพร้อมทำงานหรือขาที่ 1 มีลอจิกเปลี่ยนแปลงเป็น 0 และได้รับสัญญาณนาฬิกาครั้งที่ 1 (จังหวะการทำงานที่ 1) พร้อมกับสัญญาณควบคุมที่ขา 5 (D_{IN}) มีลอจิกเป็น 1 จะได้ว่า ไอซีเริ่มต้นการทำงาน (START) ส่งข้อมูลให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อช่วยต่อการทำความเข้าใจรายละเอียดเพิ่มเติมในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.4 การลำดับสัญญาณควบคุมอนุกรมที่ขา 5 ของไอซี LTC1298

ขั้นตอนที่ 2: เป็นขั้นตอนเลือกช่องสัญญาณแอนะล็อกอินพุตที่ต้องการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยขั้นตอนนี้สัญญาณควบคุมที่ขาที่ 5 (D_{IN}) ซึ่งเป็นขาสัญญาณข้อมูลดิจิทัลอินพุตแบบอนุกรมจะเป็นตัวกำหนดมัลติเพล็กซ์แอดเดรส (multiplexer address) เพื่อใช้ในการเลือกช่องสัญญาณของสัญญาณแอนะล็อกอินพุต จากรูปที่ 5.4 ลำดับข้อมูลอินพุตที่ขาที่ 5 จะมีความหมายดังนี้ จังหวะการทำงานที่ 1 คือ การกำหนดการเริ่มต้นการทำงานของไอซี จังหวะการทำงานที่ 2 คือ การเลือกโหมดช่องสัญญาณเดี่ยว (single-ended MUX mode) หรือช่องสัญญาณเปรียบเทียบ (differential MUX mode) จังหวะการทำงานที่ 3 คือ การกำหนดช่องสัญญาณเมื่อไอซีอยู่ในโหมดการเลือกช่องสัญญาณเดี่ยวหรือเป็นการกำหนดสัญญาณอ้างอิงเปรียบเทียบเมื่อไอซีอยู่ในโหมดการเลือกช่องสัญญาณเปรียบเทียบ สำหรับข้อมูลในการเลือกช่องสัญญาณดังกล่าวได้แสดงตามตารางที่ 5.2 สามารถอธิบายตัวอย่างการป้อนลอจิกสัญญาณควบคุมที่ขาที่ 5 (D_{IN}) ดังนี้ กรณีต้องการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของช่องสัญญาณที่ 0 ลอจิกสัญญาณควบคุมจะต้องเป็น 1, 1 และ 0 ที่จังหวะการทำงานที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ลอจิกของการเลือกช่องสัญญาณ

MODE	MUX ADDRESS		CHANNEL		GND
	SGL / $\overline{\text{DIFF}}$	ODD / SIGN	CH0	CH1	
SINGLE-ENDED	1	0	+	ไม่ใช่	-
MUX MODE	1	1	ไม่ใช่	+	-
DIFFERENTIAL	0	0	+	-	ไม่ใช่
MUX MODE	0	1	-	+	ไม่ใช่

หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึง จุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงหรือศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวก

เครื่องหมาย - หมายถึง จุดที่มีศักย์ไฟฟ้าน้อยหรือจุดอ้างอิง

ขั้นตอนที่ 3: เป็นขั้นตอนการเลือกโหมดของวิธีการเรียงลำดับข้อมูลของสัญญาณดิจิทัลที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกอินพุตของไอซี LTC1298 ซึ่งถูกกำหนดโดยลอจิกของสัญญาณควบคุมที่ขา 5 ในจังหวะการทำงานที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำการป้อนสัญญาณควบคุมที่ขา 5 ในจังหวะการทำงานที่ 4 มีลอจิกเป็น 1 เพื่อเลือกโหมดที่ขา 6 (D_{OUT}) เป็น MSBF (Most Significant Bit First) ซึ่งกำหนดลำดับแรกของการส่งข้อมูลดิจิทัลที่ขา 6 แบบอนุกรมให้เป็นบิตนัยสำคัญสูงสุด ในส่วนรายละเอียดของโหมด MSBF ดูได้จากภาคผนวก ก.

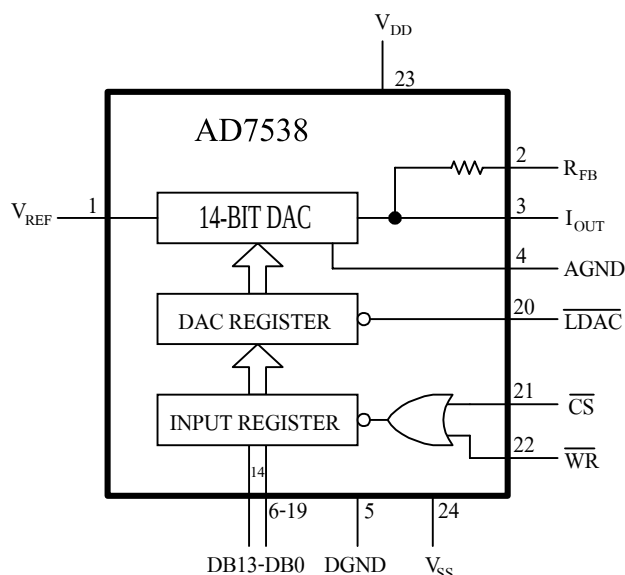
5.3.2 ไอซี AD7538

ตารางที่ 5.3 พิกัดแรงดันสูงสุดของไอซี AD7538

คุณสมบัติ	ย่านการทำงาน
ค่าแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของไอซี (V_{DD})	-0.3 โวลต์ ถึง +17 โวลต์
ค่าแรงดันอินพุตของสัญญาณดิจิทัล	-0.3 โวลต์ ถึง V_{DD}
ค่าแรงดันอ้างอิง (V_{REF})	± 25 โวลต์
ค่าแรงดันของสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุต	-0.3 โวลต์ ถึง V_{DD}
ค่าแรงดันเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณกราวด์ของแอนะล็อก (AGND) กับดิจิทัล (DGND)	-0.3 โวลต์ ถึง V_{DD}

ไอซี AD7538 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีการแยกชุด 14 บิต ในการใช้งานไอซีดังกล่าวผู้ออกแบบควรคำนึงถึงแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดที่ไอซี

สามารถใช้งานได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 นอกจากนี้โครงสร้างภายในของไอซี AD7538 แสดงไว้ในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 โครงสร้างภายในของไอซี AD7538

- | | |
|-----------|---|
| ข 1 | (V_{REF}) เป็นขาแรงดันอ้างอิงของไอซีที่ใช้ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก |
| ข 2 | (R_{FB}) เป็นขาที่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานป้อนกลับของวงจรขยายสัญญาณภายนอกกับไอซี AD7538 |
| ข 3 | (I_{OUT}) เป็นขาสัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิทัลของไอซี AD7538 (กระแสเอาต์พุต) |
| ข 4 | (AGND) เป็นขาราวด์ของสัญญาณแอนะล็อก |
| ข 5 | (DGND) เป็นขาราวด์ของสัญญาณดิจิทัล |
| ข 6 – 19 | (DB13 – DB0) เป็นขาข้อมูลดิจิทัลตั้งแต่บิตที่ 14 ถึง บิตที่ 1 ตามลำดับ |
| ข 20 - 22 | ($\overline{LDAC}$, $\overline{CS}$, $\overline{WR}$) เป็นขาสัญญาณกำหนดโหมดการทำงานของไอซี |
| ข 23 | (V_{DD}) เป็นขาที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของไอซี AD7538 |
| ข 24 | (V_{SS}) เป็นขาที่เชื่อมต่อกับแรงดันค่าลบเพื่อลดการรบกวนของระบบ ในกรณีใช้งานที่สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง |

การใช้งานไอซี AD7538 เพื่อทำการแปลงสัญญาณดิจิทัล 14 บิต เป็นสัญญาณแอนะล็อก สามารถกำหนดโหมดการทำงานของไอซีโดยการป้อนสัญญาณควบคุมขาที่ 20 ($\overline{\text{LDAC}}$) ขาที่ 21 ($\overline{\text{CS}}$) และขาที่ 22 ($\overline{\text{WR}}$) ซึ่งเป็นขาสัญญาณที่ควบคุมโหมดการทำงาน เมื่อขาที่ 22 ได้รับสัญญาณลอจิกศูนย์จะสามารถแบ่งโหมดการทำงานของไอซี AD7538 ออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการรับสัญญาณดิจิทัล 14 บิต ที่ป้อนเข้าขาที่ 6-19 และโหมดการแปลงสัญญาณ โดยการส่งสัญญาณดิจิทัลที่รับเข้ามาผ่านอินพุตรีจิสเตอร์ (input register) ดีเอซีรีจิสเตอร์ (DAC register) และ 14-บิต ดีเอซี (14-Bit DAC) เพื่อทำการแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุต (ขาที่ 3) รูปที่ 5.5 ประกอบความเข้าใจ การกำหนดสัญญาณควบคุมโหมดการทำงานแสดงไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ลอจิกที่กำหนดโหมดการทำงานของไอซี AD7538

$\overline{\text{LDAC}}$	$\overline{\text{CS}}$	$\overline{\text{WR}}$	โหมดการทำงาน
0	1	0	รับสัญญาณ
0	0	0	แปลงสัญญาณ

5.4 พอร์ตเครื่องพิมพ์ของพีซี

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ถูกโปรแกรมด้วยภาษาซีทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของไอซีในวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล รวมถึงทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อก เนื่องจากการควบคุมการทำงานดังกล่าว และการรับส่งข้อมูลระหว่างวงจรแปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้ใช้พอร์ตเครื่องพิมพ์ในการติดต่อ ทำให้ผู้ออกแบบหรือผู้สร้างต้องรู้โครงสร้างของพอร์ตเครื่องพิมพ์ พอร์ตเครื่องพิมพ์เป็นพอร์ตชนิด D แบบ 25 ขา ในข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 1284 ซึ่งชื่อขาและลักษณะของแต่ละขาได้แสดงในตารางที่ 5.5 ในส่วนของหมายเลขแอดเดรสต่างๆ ที่ใช้แบ่งพอร์ตเครื่องพิมพ์ออกเป็นกลุ่มสัญญาณข้อมูล กลุ่มสัญญาณสถานะ และกลุ่มสัญญาณควบคุม ได้แสดงในตารางที่ 5.6 นอกจากนี้ตำแหน่งขาของแต่ละขาที่เป็นตำแหน่งบิตของพอร์ตเครื่องพิมพ์ แสดงไว้ในรูปที่ 5.6

ในตารางที่ 5.5 เมื่อพิจารณาลักษณะหรือหน้าที่ของขาต่างๆ ในพอร์ตเครื่องพิมพ์จะจัดแบ่งขาต่างๆ ดังกล่าวออกเป็น 3 กลุ่มสัญญาณดังนี้

กลุ่มสัญญาณข้อมูล : ประกอบด้วยขา Data0 ถึงขา Data7 ในตำแหน่งที่ 2 ถึงที่ 9 ตามลำดับ

กลุ่มสัญญาณควบคุม : ประกอบด้วยขา $\overline{\text{Strobe}}$, $\overline{\text{Auto Feed}}$, $\overline{\text{Initialize Printer}}$ และขา

$\overline{\text{Select Input}}$ ในตำแหน่งที่ 1, 14, 16 และ 17 ตามลำดับ

กลุ่มสัญญาณสถานะ : ประกอบด้วยขา $\overline{\text{Error}}$, Select Paper, Empty, $\overline{\text{ACK}}$ และขา Busy ในตำแหน่งที่ 15 13, 12, 10 และ 11 ตามลำดับ

โดยที่ขา D0, C0 และขา S0 เป็นบิตต่ำสุดของกลุ่มสัญญาณข้อมูล, กลุ่มสัญญาณควบคุม และกลุ่มสัญญาณสถานะ ตามลำดับ

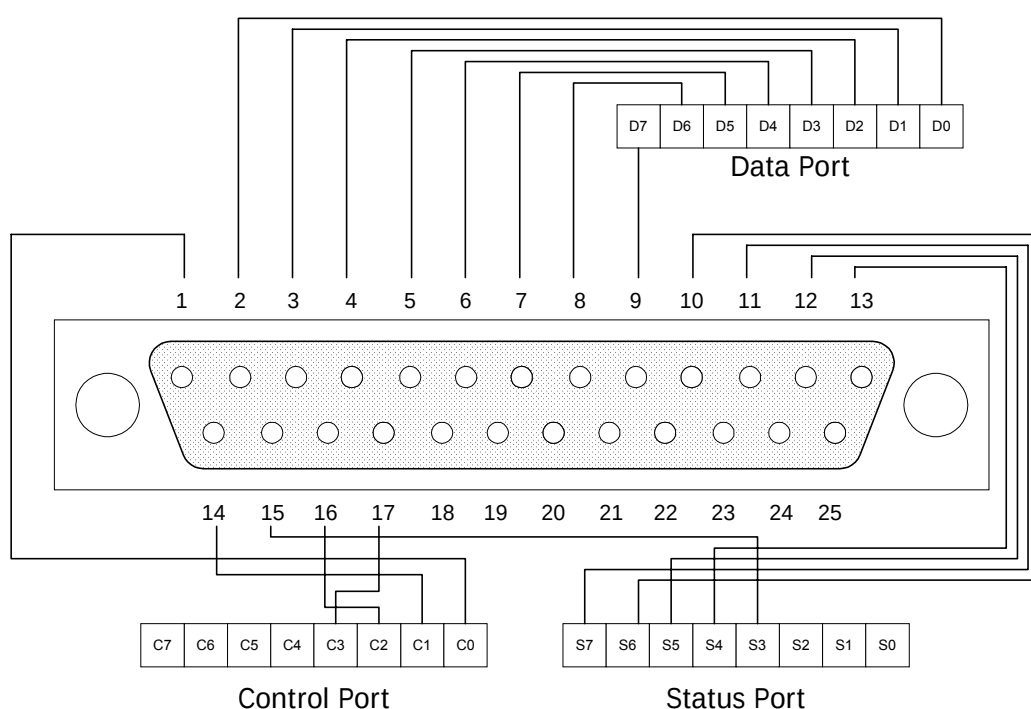
ตารางที่ 5.5 โครงสร้างของพอร์ตเครื่องพิมพ์ชนิด D แบบ 25 ขา

ตำแหน่งขา	ชื่อเต็มของขา	ทิศทางของสัญญาณ	ชื่อย่อของขาหรือบิต
1	$\overline{\text{Strobe}}$	เอาต์พุต	C0
2	Data0	เอาต์พุต	D0
3	Data1	เอาต์พุต	D1
4	Data2	เอาต์พุต	D2
5	Data3	เอาต์พุต	D3
6	Data4	เอาต์พุต	D4
7	Data5	เอาต์พุต	D5
8	Data6	เอาต์พุต	D6
9	Data7	เอาต์พุต	D7
10	$\overline{\text{ACK}}$	อินพุต	S6
11	Busy	อินพุต	S7
12	Paper Empty	อินพุต	S5
13	Select	อินพุต	S4
14	$\overline{\text{Auto Feed}}$	เอาต์พุต	C1
15	$\overline{\text{Error}}$	อินพุต	S3
16	$\overline{\text{Initialize Printer}}$	เอาต์พุต	C2
17	$\overline{\text{Select Input}}$	เอาต์พุต	C3
18-25	Ground		

หมายเหตุ อ้างอิงจาก การเขียนโปรแกรมสำหรับ Applications ด้วย C/C++ (หน้า 654), เจนวิทย์ เหลืองอร่าม และ ปิยวิทย์ เหลืองอร่าม, 2543, กรุงเทพมหานคร : บริษัท ชรรมสาร จำกัด.

ตารางที่ 5.6 หมายเลขแอดเดรสกลุ่มสัญญาณของพอร์ตเครื่องพิมพ์

ชื่อพอร์ตเครื่องพิมพ์	แอดเดรส		
	กลุ่มสัญญาณข้อมูล	กลุ่มสัญญาณสถานะ	กลุ่มสัญญาณควบคุม
LPT1	0x0378	0x0379	0x037a
LPT2	0x0278	0x0279	0x027a



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งของขาหรือบิตต่างๆ ในพอร์ตเครื่องพิมพ์ชนิด D แบบ 25 ขา

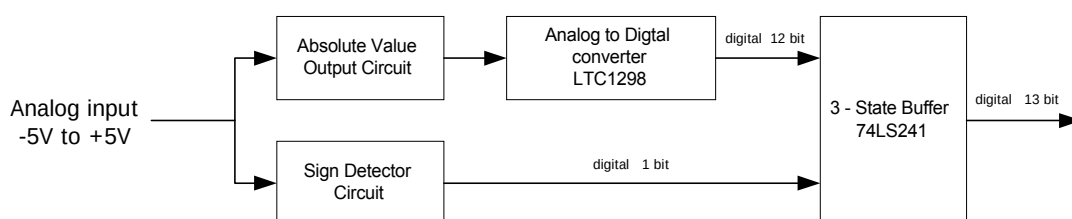
5.5 การออกแบบและลักษณะการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณ

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัลที่ถูกสร้างขึ้นประกอบด้วย วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก รายละเอียดของวงจรแปลงสัญญาณดังกล่าว รวมถึงโปรแกรมภาษาซีที่ใช้รับส่งข้อมูลระหว่างวงจรแปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลพร้อมกับควบคุมการทำงานของไอซีจะถูกนำเสนอ ดังนี้

5.5.1 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ไอซี LTC1298 เป็นไอซีหลักในวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล กล่าวคือ ทำหน้าที่แปลงแรงดันแอนะล็อกเฉพาะค่าบวกในช่วง 0 ถึง +5 โวลต์ เป็นสัญญาณดิจิทัลที่มี

การแยกชุด 12 บิต แต่เนื่องจากอุปกรณ์ภายนอกผลิตแรงดันแอนะล็อกที่มีทั้งค่าบวกและค่าลบ พร้อมทั้งป้อนแรงดันดังกล่าวให้วงจรแปลงสัญญาณ ดังนั้นจึงทำให้ต้องสร้างวงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์ (absolute value output circuit) ที่เชื่อมต่อกับช่องสัญญาณที่ 0 ของไอซี LTC1298 และสร้างวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย (sign detector circuit) เพิ่มเติมเพื่อเข้าถึงแรงดันแอนะล็อกที่มีค่าบวกและค่าลบก่อนการแปลงสัญญาณ เป็นผลให้สัญญาณดิจิทัลที่ได้จากการแปลงมีขนาดเป็น 13 บิต โดยบิตแรกของข้อมูลแทนเครื่องหมายบวกหรือลบของแรงดันแอนะล็อก และ 12 บิตที่เหลือแทนขนาดของแรงดันแอนะล็อก ดังนั้นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะเข้าถึงแรงดันในช่วง -5 โวลต์ ถึง $+5$ โวลต์ได้ ส่วนประกอบของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ส่วนประกอบของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ในส่วนของวงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์และวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

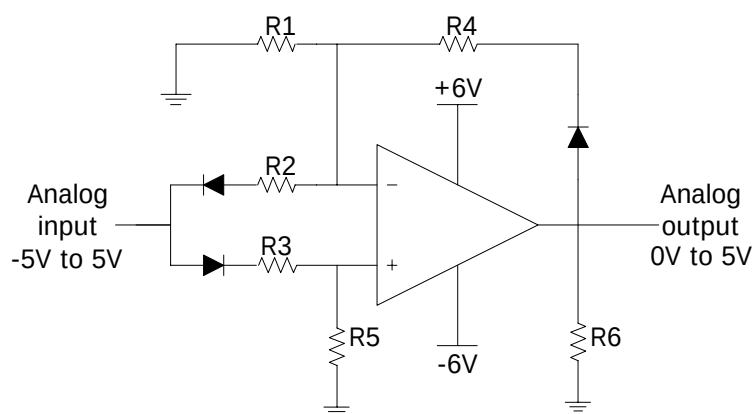
วงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์

วงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันแอนะล็อกที่มีค่าลบในช่วง -5 ถึง 0 โวลต์ เป็นแรงดันแอนะล็อกที่มีค่าบวกที่ตรงกันข้าม ในช่วง 0 ถึง $+5$ โวลต์ แต่ถ้าวงจรดังกล่าวได้รับแรงดันแอนะล็อกที่มีค่าบวกจะไม่มีการแปลงแรงดันเกิดขึ้น จากนั้นป้อนแรงดันที่ได้ให้กับช่องสัญญาณที่ 0 ของไอซี LTC1298 เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลต่อไป วงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.8

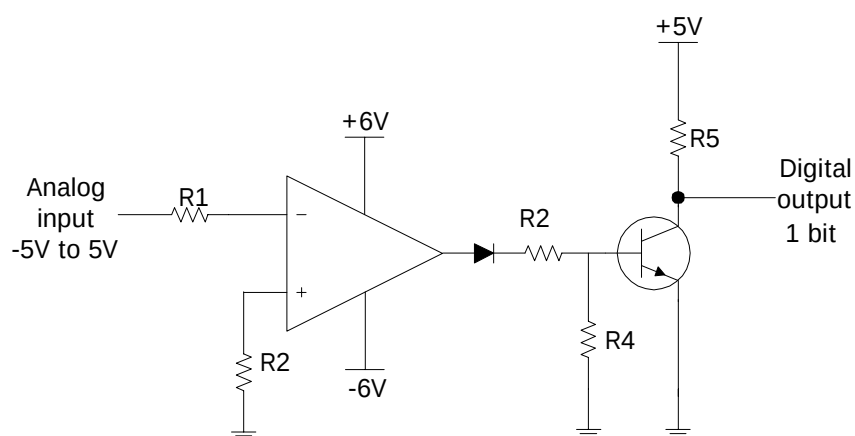
วงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย

วงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมายเป็นวงจรที่ทำหน้าที่เข้าถึงแรงดันแอนะล็อกและตรวจสอบเครื่องหมายบวกลบของแรงดันแอนะล็อกดังกล่าว ซึ่งเป็นแรงดันเดียวกับที่ป้อนให้วงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์ วงจรย่อยนี้ให้ผลลัพธ์ของการตรวจสอบเครื่องหมายบวกลบเป็นสัญญาณลอจิกหรือสัญญาณดิจิทัลขนาด 1 บิต กล่าวคือ ถ้าแรงดันแอนะล็อกมีค่ามากกว่าศูนย์ (เครื่องหมายบวก)

สัญญาณที่ได้มีลอจิกเป็นหนึ่ง แต่ถ้าแรงดันแอนะล็อกมีค่าน้อยกว่าศูนย์ (เครื่องหมายลบ) สัญญาณที่ได้มีลอจิกเป็นศูนย์ รายละเอียดของวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมายแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 วงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์



รูปที่ 5.9 วงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่กล่าวถึง มีช่องสัญญาณแอนะล็อกอินพุตเป็นจำนวนทั้งหมด 10 ช่อง ซึ่งประกอบด้วย ช่องสัญญาณที่รับแรงดันแอนะล็อกในช่วง 0 ถึง +5 โวลต์ จำนวน 5 ช่อง เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล (ช่องสัญญาณที่ 1 ของไอซี LTC1298) และช่องสัญญาณที่รับแรงดันแอนะล็อกในช่วง -5 โวลต์ ถึง +5 โวลต์ จำนวน 5 ช่อง (วงจรย่อย

เอาต์พุตค่าสัมบูรณ์ วงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย และช่องสัญญาณที่ 0 ของไอซี LTC1298) เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเช่นเดียวกัน

เนื่องจากไอซี LTC1298 มีช่องสัญญาณที่ 0 จำนวน 1 ช่อง และมีช่องสัญญาณที่ 1 จำนวน 1 ช่อง ทำให้ต้องใช้ไอซี LTC1298 จำนวน 5 ตัว ใช้วงจรย่อยเอาต์พุตค่าสัมบูรณ์ จำนวน 5 วงจร และใช้วงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย จำนวน 5 วงจร เช่นเดียวกัน การเชื่อมต่อระหว่างวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และพอร์ตเครื่องพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการรับส่งข้อมูล ถูกจัดแจงให้ไอซี 74LS241 (3-state buffer) เชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและพอร์ตเครื่องพิมพ์ดังกล่าว เนื่องจากกำหนดให้ขาสัญญาณสถานะ S3, S4, S5, S6 และ S7 ของพอร์ตเครื่องพิมพ์ มีหน้าที่รับบิตที่มีลอจิกแทนเครื่องหมายบวกหรือลบของแรงดันแอนะล็อกจากวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมาย และรับข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงแรงดันแอนะล็อกของช่องสัญญาณที่ 0 ในไอซี LTC1298 ตัวที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ เป็นผลให้ต้องมีไอซีที่ทำหน้าที่เลือกกระหว่างสัญญาณที่แทนเครื่องหมายบวกลบหรือสัญญาณดิจิทัลอนุกรมอย่างใดอย่างหนึ่งในแต่ละช่วงเวลา เพื่อส่งลอจิกหรือข้อมูลที่ไปถึงขาสัญญาณสถานะของพอร์ตเครื่องพิมพ์ นอกจากนี้ไอซีที่กล่าวถึง ต้องมีจำนวนช่องสัญญาณที่สอดคล้องกับจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งานของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล กล่าวคือ ไอซี 74LS241 มีช่องสัญญาณที่ทำหน้าที่รับข้อมูล จำนวน 8 ช่อง และมีช่องสัญญาณที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูล จำนวน 4 ช่อง เป็นผลให้ต้องใช้ไอซี 74LS241 จำนวน 2 ตัว การเชื่อมต่อระหว่างไอซี LTC1298 และไอซี 74LS241 มีรายละเอียดดังนี้ขา 6 (D_{OUT}) ซึ่งเป็นขาที่ใช้ส่งข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงแรงดันแอนะล็อกของไอซี LTC1298 ตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 2(1A1), ขา 4(1A2), ขา 6(1A3) และ ขา 8(1A4) ของไอซีเบอร์ 74LS241 ตัวที่ 1 ตามลำดับ ในขณะที่ขา 6 ของไอซี LTC1298 ตัวที่ 5 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 2(1A1) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 2 ในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมายของช่องสัญญาณ 5 ช่อง และไอซี 74LS241 อธิบายดังนี้ ขาเอาต์พุตของวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมายในวงจรที่ 1, 2, 3 และ 4 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับ ขา 11(2A1), ขา 13(2A2), ขา 15(2A3) และขา 17(2A4) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 1 ตามลำดับ ในขณะที่ขาเอาต์พุตของวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมายในวงจรที่ 5 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 11(2A1) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 2 เมื่อพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตเครื่องพิมพ์และไอซี 74LS241 จะมีรายละเอียดดังนี้ ขาสัญญาณสถานะ S3 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 9(2Y1) และขา 18(1Y1) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 1 ขาสัญญาณสถานะ S4 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 7(2Y2) และขา 16(1Y2) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 1 ขาสัญญาณสถานะ S5 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 5(2Y3) และขา 14(1Y3) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 1 ขาสัญญาณสถานะ S6 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 3(2Y4) และขา 12(1Y4) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 1 และขา

สัญญาณสถานะ S7 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 9(2Y1) และขา 18 (1Y1) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 2 พร้อมกับขาสัญญาณควบคุม Auto Feed ของพอร์ตเครื่องพิมพ์ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 1 ($\overline{1G}$) และขา 19 ($\overline{1G}$) ของไอซี 74LS241 ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและพอร์ตเครื่องพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม ได้มีการจัดแจงให้เชื่อมต่อถึงกันโดยตรง กล่าวคือ ขา 1(CS), ขา 7(CLK), ขา 7(CLK) และขา 5(D_{IN}) ของไอซี LTC1298 ตัวที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขาสัญญาณควบคุม C3, C2 และขาสัญญาณข้อมูล D0 ตามลำดับ

การเข้าถึงข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการแปลงของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในแต่ละรอบของการรับข้อมูล อธิบายได้ว่า ในขั้นตอนแรกเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้รับบิตที่แทนเครื่องหมายบวกหรือลบของแรงดันแอนะล็อกในช่องสัญญาณ 5 ช่อง นั่นคือ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะเข้าถึงและเก็บบิตที่แทนเครื่องหมายบวกหรือลบเป็นจำนวน 5 บิต แยกออกจากกัน พร้อมกับกำหนดให้บิตที่แทนเครื่องหมายดังกล่าว เป็นบิตที่ 13 ของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณที่ตรงกัน ต่อมาเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลส่งสัญญาณควบคุมอนุกรมให้กับไอซี LTC1298 ทุกตัว เพื่อเลือกช่องสัญญาณและกำหนดลำดับบิตของข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงขนาดของแรงดันแอนะล็อกในช่องสัญญาณ 5 ช่อง จากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะรับและเก็บบิตนัยสำคัญสูงสุดของข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงขนาดของแรงดันแอนะล็อกในช่องสัญญาณ 5 ช่องเป็นจำนวน 5 บิต แยกออกจากกัน พร้อมกับกำหนดให้เป็นบิตที่ 12 ของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณที่ตรงกัน หลังจากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะเข้าถึงและเก็บบิตนัยสำคัญรองลงมาของข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงในช่องสัญญาณ 5 ช่อง เป็นจำนวน 5 บิต แยกออกจากกัน พร้อมกับกำหนดให้เป็นบิตที่ 11 ของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณที่ตรงกัน การรับข้อมูลดิจิทัลของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะเกิดการวนซ้ำของการเข้าถึงและการเก็บบิตนัยสำคัญที่ต่ำกว่าของข้อมูลในช่องสัญญาณ 5 ช่องจนถึงบิตนัยสำคัญต่ำสุด และขั้นตอนสุดท้ายนำบิตที่แทนเครื่องหมายบวกลบและบิตทุกบิตที่เป็นข้อมูลดิจิทัลในแต่ละช่องสัญญาณมาประกอบเข้าด้วยกัน พร้อมกับตรวจสอบลอจิกของบิตที่ 13 และเปลี่ยนบิตที่ 13 ของข้อมูลเป็นเครื่องหมายบวกหรือลบที่สัมพันธ์กับลอจิกที่กล่าวถึง

//รายละเอียดของโปรแกรมภาษาซี ที่ใช้ควบคุมและสั่งงานในโหมด A/D converter

//โดยนายมัษฎ์ดิน คาเด๊ะ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 6 พ.ค. 2545

#include <stdio.h>

/*ระบุไลบรารีที่มีคำสั่งที่ต้องการใช้งาน*/

#include <dos.h>

#include <conio.h>

```

#define LPT=0x0378;          /*กำหนดให้ค่า LPT มีหมายเลขแอดเดรสเท่ากับ 0x378*/

int X_Data,ii;              /*กำหนด X_Data และ ii เป็นตัวแปรชนิดจำนวนเต็มที่มีเครื่องหมายบวกหรือลบ*/

int Analog[5];              /*กำหนดให้ตัวแปร Analog เป็นอาร์เรย์ขนาด 5 ตัวเลขของจำนวนเต็ม*/

void A_Inport(int Channel,int Analog[5]); /*ฟังก์ชันต้นแบบของ A_Inport เป็นฟังก์ชันที่ไม่มีการส่งค่ากลับ*/

/*ถ้าเลือก Channel = 0 หมายถึง เลือกช่องสัญญาณที่ 0 ของไอซี LTC1298 แต่ถ้าเลือก Channel = 1 หมายถึง เลือกช่องสัญญาณที่ 1 ของไอซี LTC1298*/

void A_Inport(int Channel,int A_Data[5])
{
    int ii,jj,data,data_t;    /*กำหนดให้ ii,jj,data และ data_t เป็นตัวแปรชนิดจำนวนเต็มที่มีเครื่องหมายบวกหรือลบ*/

    for (jj=0; jj<5; jj++) A_Data[jj] = 0 ; /*กำหนดให้ตัวแปรที่ใช้เก็บบิตที่แทนเครื่องหมายบวกหรือลบและบิตทุกบิตของข้อมูลดิจิทัลอนุกรมในช่องสัญญาณ 5 ช่อง เท่ากับศูนย์*/

    outportb(LPT+2,0x06);     /*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์ผ่านขา C3 และลอจิกหนึ่งผ่านขา C1 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมเพื่อไม่ติดต่อกับไอซี LTC1298 ทุกตัวและเลือกรับบิตที่แทนเครื่องหมายบวกหรือลบของแรงดันแอนะล็อกจากไอซี 74LS241*/

    data = inportb(LPT+1)^0x80; /*รับบิตที่แทนเครื่องหมายบวกหรือลบของแรงดันแอนะล็อกในช่องสัญญาณ 5 ช่อง เป็นจำนวน 5 บิตพร้อมกันโดยผ่านกลุ่มสัญญาณสถานะของพอร์ตเครื่องพิมพ์*/

    for (jj=0; jj<5; jj++)

```

```

{ data_t = (data>>(7-ij))&0x01;
  A_Data[ij] = A_Data[ij] | (data_t << 12);}
//LTC1298's data transfer sequence
  outportb(LPT+2,0x0c);
  outportb(LPT+0,0x01);
  outportb(LPT+2,0x08);
  outportb(LPT+2,0x0c);
  outportb(LPT+0,0x01);
  outportb(LPT+2,0x08);
  outportb(LPT+2,0x0c);
  outportb(LPT+2,0x0c);

```

/*แยกบิตที่แทนเครื่องหมายบวกหรือลบเป็นจำนวน 5 บิต และเก็บไว้ในตัวแปรอะเรย์ A_Data ที่มีอันดับตรงกับช่องสัญญาณแรงดันแอนะล็อกโดยที่เก็บไว้ในบิตนัยสำคัญสูงสุดคือบิตที่ 13*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกหนึ่งผ่านขา C3 และ C2 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมเพื่อติดต่อและเริ่มต้นการให้จังหวะสัญญาณนาฬิกาไปถึงไอซี LTC1298 ทุกตัว พร้อมกับส่งสัญญาณลอจิกศูนย์ผ่านขา C1 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมถึงไอซี 74LS241 เพื่อเลือกรับข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงในช่องสัญญาณ 5 ช่อง*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกหนึ่งผ่านขา D0 ของกลุ่มสัญญาณข้อมูลถึงขา D_{IN} ของไอซี LTC1298 แต่ละตัว*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์ผ่านขา C2 เพื่อให้จังหวะสัญญาณนาฬิกาถึงไอซี LTC1298*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกหนึ่งผ่านขา C2 เพื่อเริ่มต้นการส่งสัญญาณควบคุมอนุกรม*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกหนึ่งผ่านขา D0 ของกลุ่มสัญญาณข้อมูลถึงขา D_{IN} ของไอซี LTC1298 แต่ละตัว*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์และลอจิกหนึ่งผ่านขา C2 เพื่อเป็นจังหวะสัญญาณนาฬิกาและกำหนดให้ไอซี LTC1298 แต่ละตัวมีการทำงานแบบช่องสัญญาณเดียว*/

```

outportb(LPT+0,Channel);

outportb(LPT+2,0x08);
outportb(LPT+2,0x0c);

outportb(LPT+0,0x01);

outportb(LPT+2,0x08);
outportb(LPT+2,0x0c);

for(ii=12;ii>0;ii--)
{
    outportb(LPT+2,0x08);
    outportb(LPT+2,0x0c);

    data = inportb(LPT+1) ^ 0x80;

```

/*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์หรือลอจิกหนึ่งผ่านขา D0 ของกลุ่มสัญญาณข้อมูล*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์และลอจิกหนึ่งผ่านขา C2 ของกลุ่มสัญญาณควบคุม เพื่อเป็นจังหวะสัญญาณนาฬิกาและเลือกช่องสัญญาณของ ไอซี LTC1298 แต่ละตัวที่จะส่งข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงขนาดของแรงดัน แอนะล็อกถึงเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์หรือลอจิกหนึ่งผ่านขา D0 ของกลุ่มสัญญาณข้อมูล*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์และลอจิกหนึ่งผ่านขา C2 ของกลุ่มสัญญาณควบคุม เพื่อให้จังหวะสัญญาณนาฬิกาและกำหนดให้ไอซี LTC1298 แต่ละตัว ส่งบิตนัยสำคัญสูงสุดของข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงเป็นบิตแรก วนลูปเพื่อรับข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงในช่องสัญญาณ 5 ช่อง ช่องสัญญาณ ละ 12 บิต*/

/*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์และลอจิกหนึ่งตาม ลำดับผ่านขา C2 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมเพื่อให้จังหวะสัญญาณนาฬิกาและกำหนดให้ไอซี LTC1298 แต่ละตัวส่งข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการแปลงในบิตนัยสำคัญรองลงมาโดย ที่การส่งบิตแรกเป็นบิตนัยสำคัญสูงสุด*/

/*รับบิตของข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้จากการ แปลงในช่องสัญญาณ 5 ช่อง เป็นจำนวน 5 บิต

พร้อมกัน โดยผ่านกลุ่มสัญญาณสถานะของ
พอร์ตเครื่องพิมพ์*/

```

for (jj=0; jj<5; jj++)
{
    data_t = (data >>(7-jj)) & 0x01;
    A_Data[jj] = A_Data[jj] | (data_t << (ii-1)); } /*แยกบิตของข้อมูลดิจิทัลอนุกรมที่ได้รับ 5
    บิต ออกจากกันและเก็บไว้ในตัวแปรอะเรย์
    A_Data ที่มีอันดับตรงกับช่องสัญญาณแรงดัน
    แอนะล็อกโดยที่เก็บไว้ในบิตนัยสำคัญของลง
    มาตามลำดับ และตรงกับบิตนัยสำคัญของบิต
    ข้อมูลดิจิทัลอนุกรมดังกล่าว*/

} outportb(LPT+2, 0x00); /*ส่งสัญญาณลอจิกศูนย์ผ่านขา C2 และ C3
    ของกลุ่มสัญญาณควบคุมถึงไอซี LTC1298
    ทุกตัว เพื่อระบุว่าไม่ติดต่อและสิ้นสุดการรับ
    ข้อมูลดิจิทัลอนุกรมในช่องสัญญาณ 5 ช่อง
    */

for (jj=0; jj<5; jj++)
{
    data_t = A_Data[jj] & 0x1000;
    A_Data[jj] = A_Data[jj] & 0x0fff; /*ตรวจสอบบิตที่ 13 ของตัวแปรอะเรย์
    A_Data ในแต่ละอันดับ*/

    if (data_t == 0x1000)
        A_Data[jj] = (-1*(A_Data[jj] << 1)) | 0x2000; /*ถ้าบิตที่ 13 มีลอจิกเป็นหนึ่ง ให้เปลี่ยนลอ
        else      A_Data[jj] = A_Data[jj] << 1; } จิกของบิตที่ 13 และนำตัวเลข (-1) คูณกับตัว
        เลขในตัวแปรอะเรย์ A_Data ที่มีอันดับตรงกัน
        แต่ถ้าบิตที่ 13 มีลอจิกเป็นศูนย์ ไม่ต้องเปลี่ยน
        แปลงตัวเลขในตัวแปรอะเรย์ A_Data ที่มี
        อันดับตรงกัน และในกรณีที่มีการส่งตัวเลขที่
        ได้ถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลขนาด 14 บิต
        เป็นสัญญาณแอนะล็อกในขั้นตอนต่อไป ควร
        เลื่อนตัวเลขข้างต้นไปทางด้านซ้ายมือ 1 บิต
        ก่อนการส่งตัวเลขเพื่อให้ตัวเลขที่กล่าวถึงมี

```

ขนาดเป็น 14 บิต*/

}

5.5.2 วงจรการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ไอซี AD7538 ไอซี 74LS245 และไอซี 74LS377 อย่างละหนึ่งตัว ซึ่งมีการทำงานสัมพันธ์กัน โดยที่ ไอซี AD7538 เป็นไอซีหลักที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลขนาด 14 บิต เป็นแรงดันแอนะล็อก และเป็นไอซีที่มีช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุต จำนวน 1 ช่องสัญญาณ เมื่อพิจารณาถึงการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลดิจิทัล จะได้ว่า ไอซี 74LS245 ที่เป็นตัวรับส่งข้อมูล และไอซี 74LS377 ที่เป็นฟลิปฟล็อปแบบดี มีตำแหน่งกัณกลางระหว่างพอร์ตเครื่องพิมพ์และไอซี AD7538 กล่าวคือ ขา 2(A1), ขา 3(A2), ขา 4(A3) ขา 5(A4) ขา 6(A5) ขา 7(A6) ขา 8(A7) และขา 9(A8) ของไอซี 74LS245 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับ ขา D7, ขา D6, ขา D5, ขา D4, ขา D3, ขา D2, ขา D1 และ ขา D0 ของกลุ่มสัญญาณข้อมูลในพอร์ตเครื่องพิมพ์ ตามลำดับ ในขณะที่ขา 16(B3), ขา 15 (B4), ขา 14(B5), ขา 13(B6), ขา 12(B7) และขา 11(B8) ของไอซี 74LS245 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 7 (D3), ขา 8(D4), ขา 13(D5), ขา 14(D6), ขา 17(D7) และขา 18(D8) ของไอซี 74LS377 ตามลำดับ พร้อมกับขา 6(Q3), ขา 9(Q4), ขา 12(Q5), ขา 15(Q6), ขา 16(Q7), ขา 19(Q8) ของไอซี 74LS377 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับ ขา 6(DB13), ขา 7(DB12), ขา 8(DB11), ขา 9(DB10) และขา 11(DB8) ของไอซี AD7538 รวมถึงขา 18(B1), ขา 17(B2), ขา 16(B3), ขา 15(B4), ขา 14(B5), ขา 13(B6), ขา 12(B7) และ ขา 11(B8) ของไอซี 74LS245 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 12(DB7), ขา 13(DB6), ขา 14(DB5), ขา 15(DB4), ขา 16(DB3), ขา 17(DB2), ขา 18(DB1) และขา 19(DB0) ของไอซี AD7538 ตามลำดับ ในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกโดยผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณควบคุม จะอธิบายได้ว่า ขา C1 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์ ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 11(CLK) ของไอซี 74LS377 ในขณะที่ขา C0 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา 20(LDAC), ขา 21(CS) และขา 22(WR) ของไอซี AD7538 นอกจากนี้ขา 1(DIR) และขา 19(OE) ของไอซี 74LS245 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับไฟเลี้ยง +5 โวลต์ หรือลอจิกหนึ่ง และกราวด์หรือลอจิกศูนย์ ตามลำดับ เพื่อกำหนดให้ข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต มีทิศทางการไหลของสัญญาณจากช่อง A ถึงช่อง B ในทิศทางเดียว พร้อมกับขา 1 (CLR) ของไอซี 74LS377 ถูกเชื่อมต่อถึงกราวด์หรือลอจิกศูนย์เพื่อไม่ให้เกิดการรีเซ็ตเอาต์พุตของฟลิปฟล็อปทุกตัวในไอซีดังกล่าว เมื่อพิจารณาการจัดแรงแไอซี AD7538 ซึ่งมี

การทำงานขึ้นอยู่กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอก เช่น ออปแอมป์ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ที่ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นวงจรย่อย และถูกเชื่อมต่อถึงไอซีหลักข้างต้น จะได้ว่า วงจรย่อยและไอซีนี้สร้างและจ่ายแรงดันแอนะล็อกในช่วง -5 โวลต์ ถึง +5 โวลต์ ที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิจิทัล ขนาด 14 บิต โดยที่ข้อมูลดิจิทัล ที่กล่าวถึงเป็นตัวเลขฐานสองแบบทวูคอมพลีเมนต์ (bipolar operation: twos complement code) ที่เกิดจากการเปลี่ยนตัวเลขฐานสองแบบออฟเซตอีกทอดหนึ่ง (offset binary code)

เนื่องจากข้อมูลดิจิทัลที่เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลส่งถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกมีขนาด 14 บิต แต่กลุ่มสัญญาณข้อมูลของพอร์ตเครื่องพิมพ์มีขนาด 8 บิต ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลส่งข้อมูลดิจิทัลที่มีขนาดมากที่สุดออกทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ได้ ครั้งละ 8 บิต (ขา D0 ถึง ขา D7) นั่นคือ ก่อนการส่งข้อมูลดิจิทัลในแต่ละชุดเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลดังกล่าว ต้องแยกข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต ออกเป็นข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงขนาด 6 บิต และข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญต่ำขนาด 8 บิต จากนั้นจึงส่งข้อมูลดิจิทัลข้างต้น ออกผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์เป็นจำนวน 2 ครั้งในหนึ่งชุด โดยที่ครั้งแรกของการส่ง เป็นข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงขนาด 6 บิต และครั้งที่สองของการส่ง เป็นข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญต่ำ ขนาด 8 บิต ในขณะที่มีการส่งข้อมูลดิจิทัลหนึ่งชุดที่กล่าวถึง ไอซี 74LS245 ไอซี 74LS377 ไอซี AD7538 และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีการทำงานที่สัมพันธ์กันในรายละเอียดดังนี้ เมื่อข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงขนาด 6 บิต ถูกส่งออกแบบขนานผ่านทางกลุ่มสัญญาณข้อมูลของพอร์ตเครื่องพิมพ์ ขา A3, ขา A4, ขา A5, ขา A6, ขา A7 และขา A8 ของไอซี 74LS245 จะได้รับข้อมูลดิจิทัลบิตที่ 14, บิตที่ 13, บิตที่ 12, บิตที่ 11, บิตที่ 10 และ บิตที่ 9 ตามลำดับ ต่อมาข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงนี้จะถูกส่งผ่านถึงขา B3, ขา B4, ขา B5, ขา B6, ขา B7 และขา B8 ของไอซี 74LS245 ตัวเดียวกันในทันที เป็นผลให้ขา D3, ขา D4, ขา D5, ขา D6, ขา D7 และขา D8 ของไอซี 74LS377 ได้รับข้อมูลดิจิทัลบิตที่ 14, บิตที่ 13, บิตที่ 12, บิตที่ 11, บิตที่ 10 และบิตที่ 9 ตามลำดับ จากนั้นขา CLK ของไอซี 74LS377 นี้ ได้รับสัญญาณควบคุมที่มีลอจิกเป็นศูนย์ภายในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (มีการเปลี่ยนแปลงของลอจิกจากหนึ่งเป็นศูนย์และจากศูนย์เป็นหนึ่ง) จากขา C1 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์ ทำให้ข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูง ถูกส่งผ่านถึงขา Q3, ขา Q4, ขา Q5, ขา Q6, ขา Q7 และขา Q8 ของไอซี 74LS377 ตัวเดียวกัน เป็นผลให้ขา DB13, ขา DB12, ขา DB11, ขา DB10, ขา DB9 และขา DB8 ของไอซี AD7538 ได้รับข้อมูลดิจิทัลบิตที่ 14, บิตที่ 13, บิตที่ 12, บิตที่ 11, บิตที่ 10 และบิตที่ 9 ตามลำดับ ในขณะที่ขา Q3 ถึงขา Q8 ของไอซี 74LS377 มีหน้าที่ทักค่าข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงขนาด 6 บิต ไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่ไอซี AD7538 ได้รับข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญต่ำ

ขนาด 8 บิต และไอซี AD7538 แปลงข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต เป็นแรงดันแอนะล็อกในช่วง -5 โวลต์ ถึง $+5$ โวลต์

หลังจากไอซี AD7538 ได้รับข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงขนาด 6 บิต ข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญต่ำขนาด 8 บิตจะถูกส่งออกแบบขนานผ่านทางกลุ่มสัญญาณข้อมูลของพอร์ตเครื่องพิมพ์ ทำให้ขา A1, ขา A2, ขา A3, ขา A4, ขา A5, ขา A6, ขา A7 และขา A8 ของไอซี 74LS245 ได้รับข้อมูลดิจิทัลบิตที่ 8, บิตที่ 7, บิตที่ 6, บิตที่ 5, บิตที่ 4, บิตที่ 3, บิตที่ 2 และบิตที่ 1 ตามลำดับ ต่อมาข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญต่ำนี้จะถูกส่งผ่านถึงขา B1, ขา B2, ขา B3, ขา B4, ขา B5, ขา B6, ขา B7 และขา B8 ของไอซี 74LS245 ตัวเดียวกันในทันที เป็นผลให้ขา DB7, ขา DB6, ขา DB5, ขา DB4, ขา DB3, ขา DB2, ขา DB1 และขา DB0 ของไอซี AD7538 ได้รับข้อมูลดิจิทัลบิตที่ 8, บิตที่ 7, บิตที่ 6, บิตที่ 5, บิตที่ 4, บิตที่ 3, บิตที่ 2 และบิตที่ 1 ตามลำดับ ในขณะที่ขา D3, ขา D4, ขา D5, ขา D6, ขา D7 และขา D8 ของไอซี 74LS377 ได้รับข้อมูลดิจิทัลบิตที่ 6, บิตที่ 5, บิตที่ 4, บิตที่ 3, บิตที่ 2 และบิตที่ 1 ตามลำดับ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลอจิกของข้อมูลดิจิทัลในขา Q3, ขา Q4, ขา Q5, ขา Q6, ขา Q7 และขา Q8 ของไอซี 74LS377 ตัวเดียวกัน เพราะในช่วงระยะเวลานี้ขา CLK ของไอซี 74LS377 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลอจิกของสัญญาณควบคุม ต่อมา ขา $\overline{LDAC}$, ขา $\overline{CS}$ และขา $\overline{WR}$ ของไอซี AD7538 ได้รับสัญญาณควบคุมที่มีลอจิกเป็นศูนย์ภายในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (มีการเปลี่ยนแปลงของลอจิกจากหนึ่งเป็นศูนย์และจากศูนย์เป็นหนึ่ง) จากขา C0 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์ เป็นผลให้ข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต ถูกส่งผ่านถึงรีจิสเตอร์ภายในไอซี AD7538 และถูกแปลงเป็นแรงดันแอนะล็อกที่ตรงกันในช่วง -5 โวลต์ ถึง $+5$ โวลต์ ซึ่งการแปลงข้อมูลดิจิทัลที่กล่าวถึง เป็นขั้นตอนสิ้นสุดของข้อมูลแต่ละชุดออกเป็นสองส่วน เพื่อส่งผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ บิตนัยสำคัญสูงสุดของข้อมูลดิจิทัลจะถูกเปลี่ยนเป็นลอจิกตรงกันข้าม นั่นคือ เปลี่ยนจากลอจิกหนึ่งเป็นลอจิกศูนย์หรือเปลี่ยนจากลอจิกศูนย์เป็นลอจิกหนึ่ง ทำให้ข้อมูลดิจิทัลที่เป็นตัวเลขฐานสองแบบออฟเซต เปลี่ยนเป็นตัวเลขฐานสองแบบทวูคอมพลีเมนต์

เมื่อพิจารณาการส่งสัญญาณควบคุมออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโดยผ่านขา C0 หรือขา C1 ของกลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์ จะได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงลอจิกของสัญญาณควบคุม เป็นลอจิกตรงกันข้ามในระหว่างผ่านขา C0 หรือขา C1 ดังกล่าว นั่นคือ เปลี่ยนจากลอจิกหนึ่งเป็นลอจิกศูนย์หรือเปลี่ยนจากลอจิกศูนย์เป็นลอจิกหนึ่ง ดังนั้นถ้าต้องการส่งสัญญาณควบคุมที่ออกจากขา C0 หรือขา C1 ซึ่งมีลอจิกเป็นศูนย์ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะกำหนดให้ บิต C0 หรือบิต C1 ของรีจิสเตอร์กลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์มีลอจิกเป็นหนึ่ง

//รายละเอียดของโปรแกรมภาษาซี ที่ใช้ควบคุมและสั่งงานในโหมด D/A converter

//โดยนายมัชฌูติน คาเด๊ะ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 6 พ.ค. 2545

```
Void A_Outport(int data16)
```

```
{ outportb(LPT+2,0x00);
```

```
outportb(LPT+0,(data16>>8)^0x20);
```

```
outportb(LPT+2,0x02);
```

```
outportb(LPT+2,0x00);
```

/*กำหนดให้ฟังก์ชัน A_Outport เป็นฟังก์ชันแบบไม่มีการส่งค่ากลับคืน*/

/*เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกำหนดให้บิต C1 และ C0 ของรีจิสเตอร์กลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์มีลอจิกศูนย์เพื่อส่งสัญญาณควบคุมที่มีลอจิกเป็นหนึ่งผ่านขา C1 และ C0 ถึงไอซี 74LS377 และไอซี AD7538 ตามลำดับ เป็นผลให้ในช่วงระยะเวลานี้ไอซีทั้งสองไม่การทำงาน*/

/*ก่อนการส่งข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต ออกผ่านทางกลุ่มสัญญาณข้อมูลในพอร์ตเครื่องพิมพ์ เพื่อแปลงเป็นแรงดันแอนะล็อกเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะเปลี่ยนข้อมูลดิจิทัลที่เป็นตัวเลขฐานสองแบบออฟเซตเป็นตัวเลขฐานสองแบบทวูคอมพลีเมนต์ ต่อมาจึงแยกข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต ที่ได้ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงขนาด 6 บิต ที่ประกอบไปด้วย บิตที่ 9 ถึง บิตที่ 14 ของข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต และส่วนที่สองคือ ข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญต่ำขนาด 8 บิต ที่ประกอบไปด้วยบิตที่ 1 ถึงบิตที่ 8 ของข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต จากนั้นส่งข้อมูลดิจิทัลนัยสำคัญสูงออกผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ ถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก*/

/*เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกำหนดให้บิต C1 ของรีจิสเตอร์กลุ่มสัญญาณควบคุมในพอร์ตเครื่องพิมพ์มีลอจิกเป็นหนึ่งภายในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เพื่อส่งสัญญาณควบคุมที่มี

```

    ลอจิกเป็นศูนย์ผ่านขา C1 ภายในช่วงระยะ
    เวลาสั้นๆ เช่นเดียวกัน ถึงขา CLK ของไอซี
    74LS377 ทำให้ไอซีดังกล่าว มีการคงค่าข้อมูล
    ดิจิตอลนัยสำคัญสูง เป็นผลให้ไอซี AD7538
    ได้รับบิตที่ 9 ถึงบิตที่ 14 ของข้อมูลดิจิตอล
    ขนาด 14 บิต*/

    outportb(LPT+0,data16);

    /*เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลส่งข้อมูล
    ดิจิตอลนัยสำคัญต่ำออกผ่านทางพอร์ตเครื่อง
    พิมพ์ถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็น
    สัญญาณแอนะล็อก ทำให้ไอซี AD7538 ได้รับ
    บิตที่ 1 ถึงบิตที่ 8 ของข้อมูลดิจิตอลขนาด 14
    บิต นั่นคือ ในช่วงเวลานี้ไอซีดังกล่าว ได้รับ
    ข้อมูลดิจิตอลครบทุกบิต*/

    outportb(LPT+2,0x01);

    /*เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกำหนดให้บิต
    C0 ของรีจิสเตอร์กลุ่มสัญญาณควบคุมใน
    พอร์ตเครื่องพิมพ์มีลอจิกเป็นหนึ่งภายในช่วง
    ระยะเวลานั้นๆ เพื่อส่งสัญญาณควบคุมที่มี
    ลอจิกเป็นศูนย์ผ่านขา C0 ภายในช่วงระยะ
    เวลาสั้นๆ เช่นเดียวกัน ถึงขา  $\overline{LDAC}$ , ขา  $\overline{CS}$ 
    และ  $\overline{WR}$  ของไอซี AD7538 ทำให้ไอซีดัง
    กล่าว ได้รับการติดต่อจากเครื่องคอมพิวเตอร์
    ส่วนบุคคลและแปลงข้อมูลดิจิตอลที่ได้รับเป็น
    แรงดันแอนะล็อกที่ตรงกัน*/

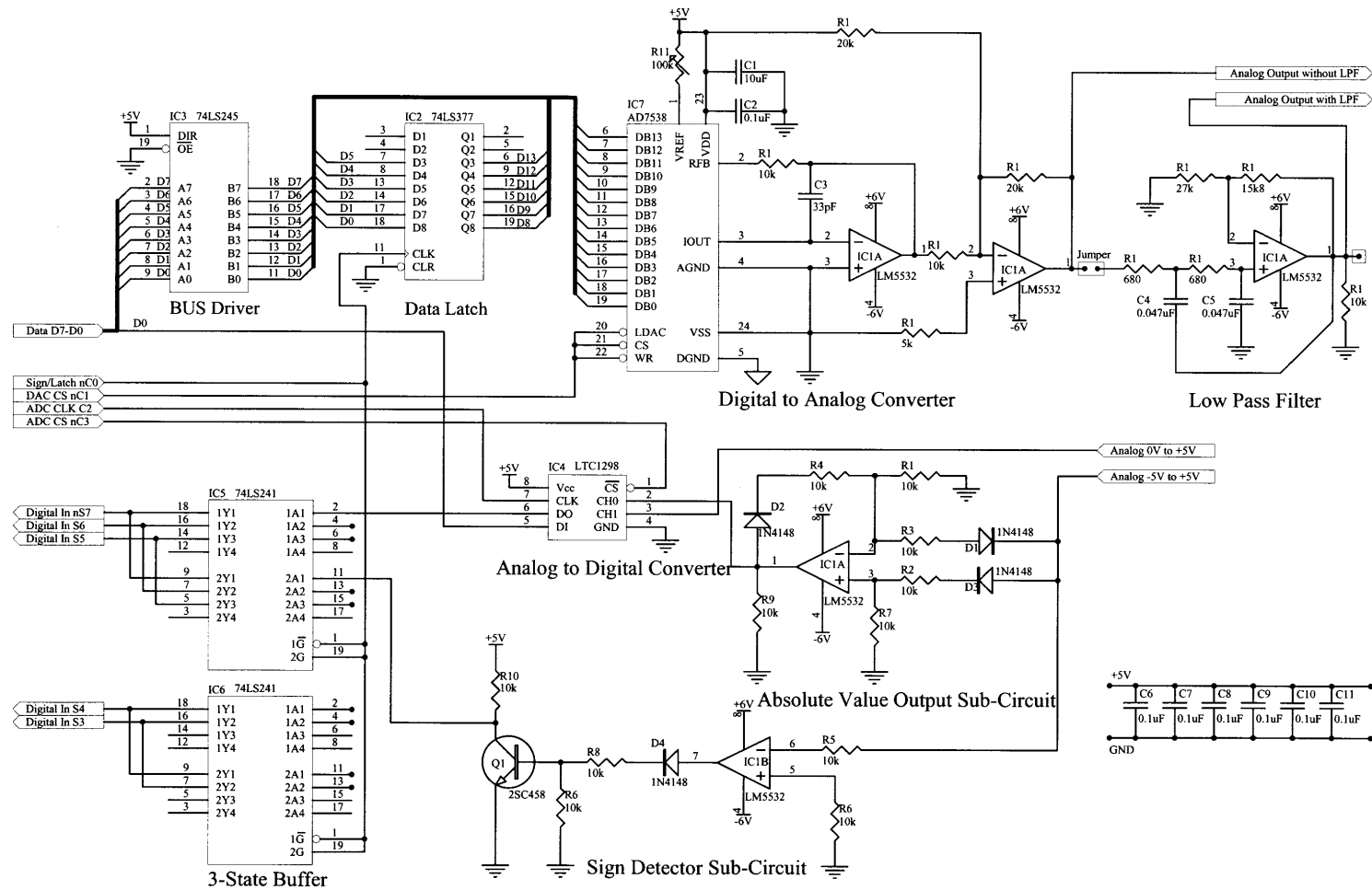
    outportb(LPT+2,0x00);

    /*ส่งสัญญาณรีเซ็ตเพื่อรอรับการทำงานในการ
    วนลูปรี่ใหม่*/

    }

```

โครงสร้างโดยรวมของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกได้จากรูปที่ 5.10 ในส่วนของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำถูกสร้างขึ้นทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนให้กับสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุต แต่ในงานวิทยานิพนธ์นี้วงจรดังกล่าวไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากอาจทำให้เกิดช่วงเวลาประวิงของสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.10 โครงสร้างของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

5.6 การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณ

เนื่องจากผู้ออกแบบต้องการทราบขีดความสามารถหรือคุณภาพของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณแอนะล็อกที่ถูกสร้างขึ้นเป็นต้นแบบ ขั้นตอนต่อไปหลังจากการสร้างวงจรดังกล่าว คือ การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณข้างต้นก่อนนำไปใช้งานจริง การทดสอบที่กล่าวถึงประกอบด้วย การทดสอบโมโนโทนิกซิตี (monotonicity test) การทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่ (frequency response test) การทดสอบสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และการทดสอบสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก รายละเอียดและผลการทดสอบ อธิบายได้ดังนี้

5.6.1 โมโนโทนิกซิตี (Monotonicity)

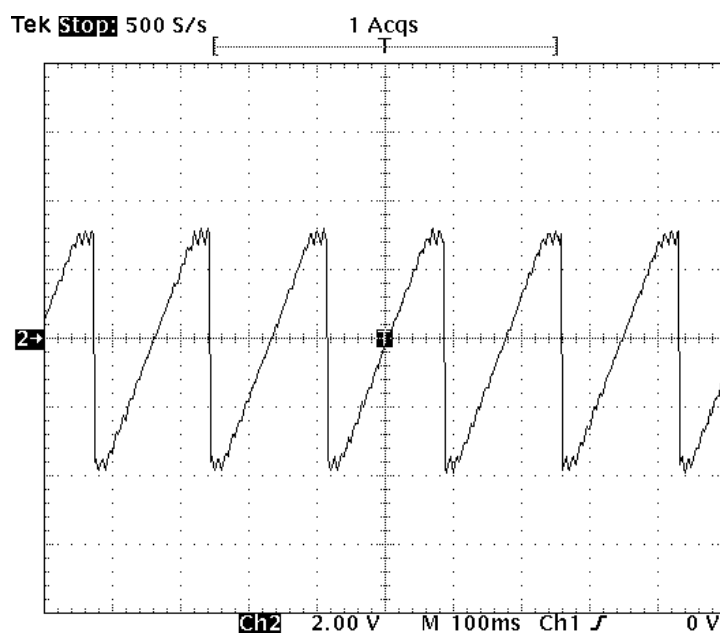
การทดสอบโมโนโทนิกซิตี เป็นขั้นตอนหนึ่งที่ใช้ทดสอบวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก จะกำหนดให้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเรียงลำดับข้อมูลดิจิทัลที่เป็นตัวเลขฐานสองแบบทวูคอมพลิเมนต์โดยเริ่มต้นจากตัวเลข 2000H ถึง 3FFFH และเริ่มต้นจากตัวเลข 0000H ถึง 1FFFH อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งตัวเลขของนัยสำคัญต่ำสุด ต่อมาเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลส่งข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการเรียงลำดับออกผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณแอนะล็อกอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับ เช่นเดียวกัน โดยเว้นระยะของการส่งในแต่ละครั้งเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ ทำให้ช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตมีแรงดันแอนะล็อกที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิจิทัลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นขั้นบันไดหรือเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงที่มีความชัน เมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลส่งข้อมูลดิจิทัลครบทุกตัวเลข เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลดังกล่าวจะส่งข้อมูลดิจิทัลของเดิมนซ้ำใหม่โดยไม่มีการสิ้นสุด จากนั้นนำโพรบวัดสัญญาณของออสซิลโลสโคปเชื่อมต่อเข้ากับช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ ออสซิลโลสโคปจึงได้รับแรงดันแอนะล็อกนี้ และทำการบันทึกผลได้ดังรูปที่ 5.11

ในรูปที่ 5.11 แรงดันแอนะล็อกที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิจิทัลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงหรือเชิงเส้นโดยที่มีแรงดันต่ำสุดเท่ากับ -3.90 โวลต์ และมีแรงดันสูงสุดเท่ากับ $+3.20$ โวลต์ เมื่อพิจารณาสัญญาณหรือแรงดันบางส่วนที่มีลักษณะเกือบคงที่ (บริเวณของแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุด) จะได้ว่ามีสาเหตุเกิดจากการอิมิตัวของไอซี AD7538 ในวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

5.6.2 การทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่

การทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายหรือค่าเกน(Gain)และมุมเลื่อนเฟส (phase shift) การทดสอบดังกล่าวมีแนวทางการเตรียมอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ต่อมาป้อนแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์กระแสสลับที่มีความถี่ตั้งแต่ $100 - 2500$ เฮิรตซ์

โดยเพิ่มความถี่ของแรงดันครั้งละ 100 เฮิรตซ์ ถึงช่องสัญญาณที่ 0 ของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นวงจรแปลงสัญญาณข้างต้น ส่วนข้อมูลดิจิทัลให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ เมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้รับข้อมูล



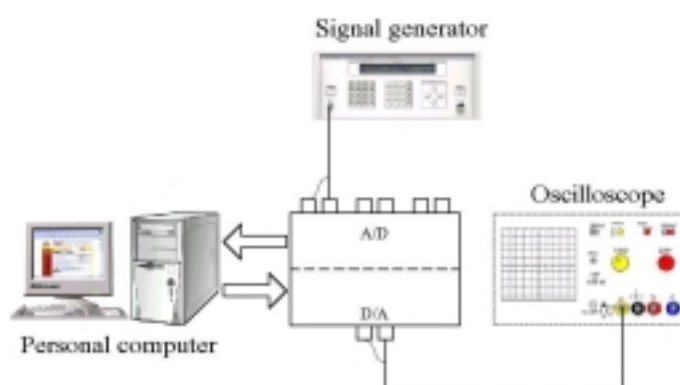
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบโมโนโทนิคซี้

ดิจิทัลที่กล่าวถึง เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะส่งข้อมูลดิจิทัลที่ได้ในทันที ออกผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์เช่นเดียวกันถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก ทำให้ช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตมีแรงดันแอนะล็อกที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิจิทัล เนื่องจากโพรบวัดสัญญาณของออสซิลโลสโคปเชื่อมต่อเข้ากับช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณออสซิลโลสโคปจึงได้รับแรงดันแอนะล็อกนี้ และบันทึกผลได้ดังที่แสดงในรูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.17 ในส่วนของผลการทดสอบที่ได้จากการเพิ่มความถี่ในแต่ละครั้ง ผลลัพธ์นี้ถูกแสดงเป็นตัวเลขในตารางที่ 5.7 นอกจากนี้ค่าเกนและมุมเลื่อนเฟส (ถ้าหลัง) ในหน่วยของศา จะคำนวณได้ดังสมการที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

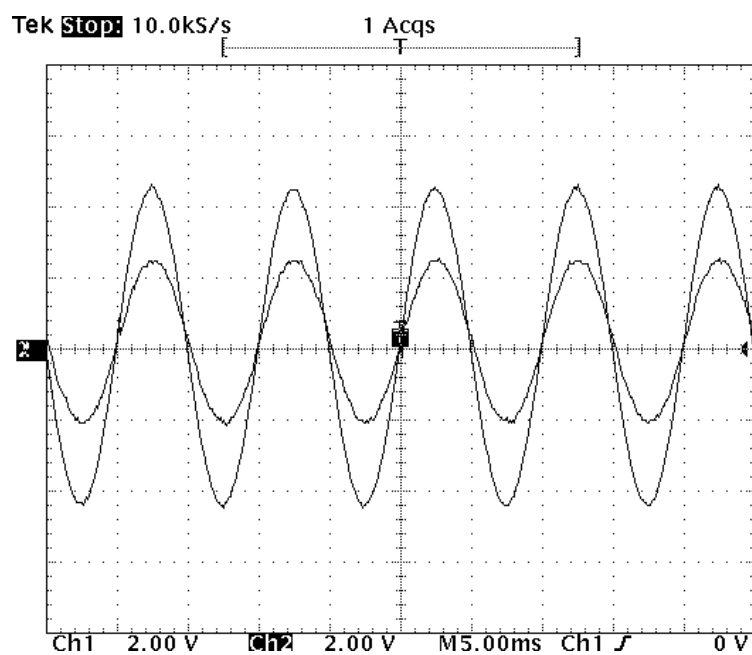
$$\text{Gain(dB)} = 20\log\left(\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}\right) \quad (5-1)$$

$$\text{Phase shift} = \left(\frac{\Delta T}{T} \right) 360^\circ \quad (5-2)$$

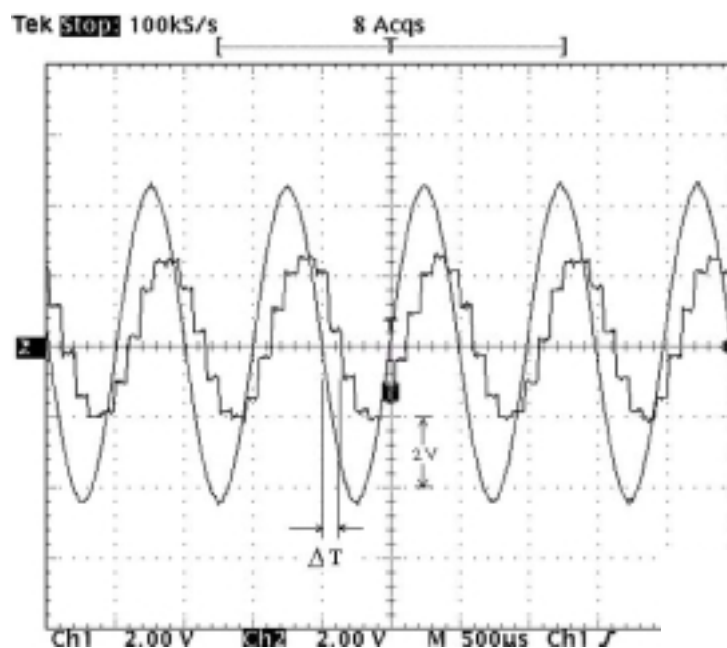
โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์กระแสสลับ
 V_{out} คือ แรงดันแอนะล็อกเอาต์พุตที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิจิทัล
 ΔT คือ มุมเลื่อนเฟส (ล่าหลัง) ในหน่วยของเวลา
 T คือ คาบระยะเวลาของแรงดันอินพุตหรือแรงดันแอนะล็อกเอาต์พุต



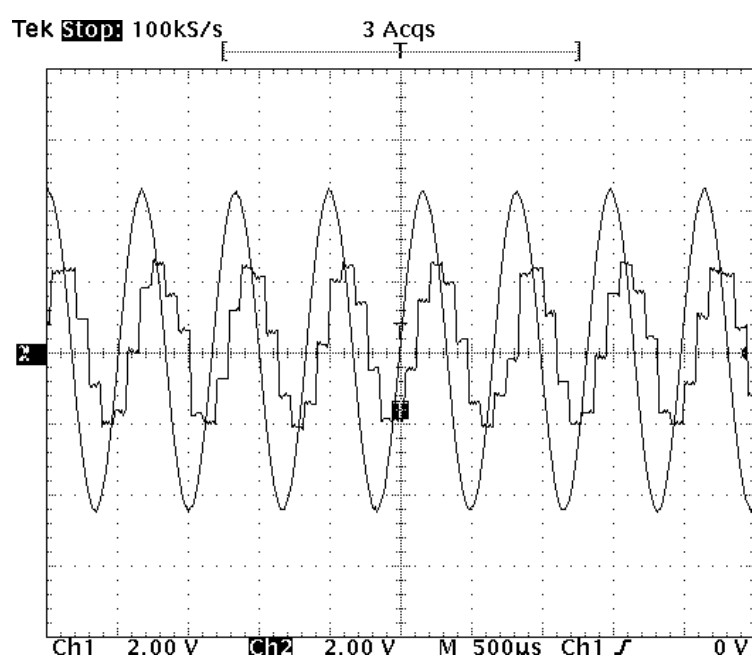
รูปที่ 5.12 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่



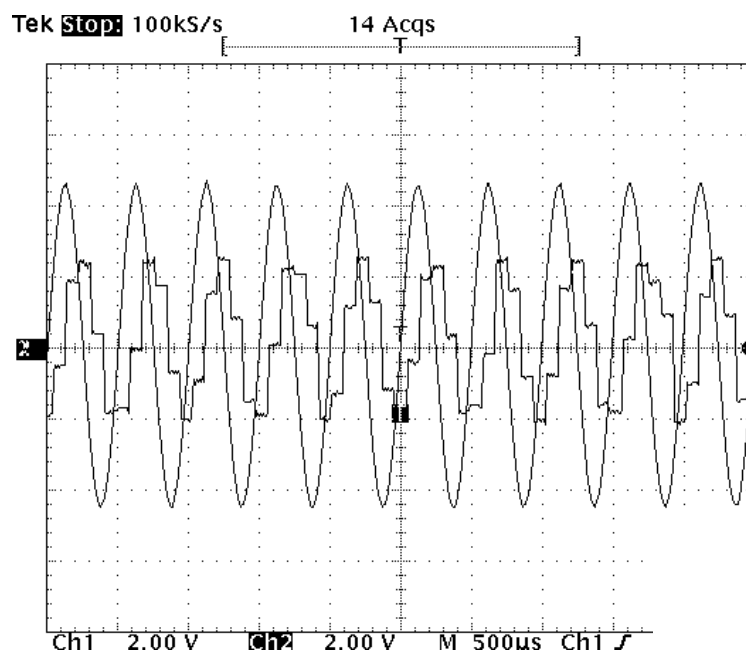
รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์



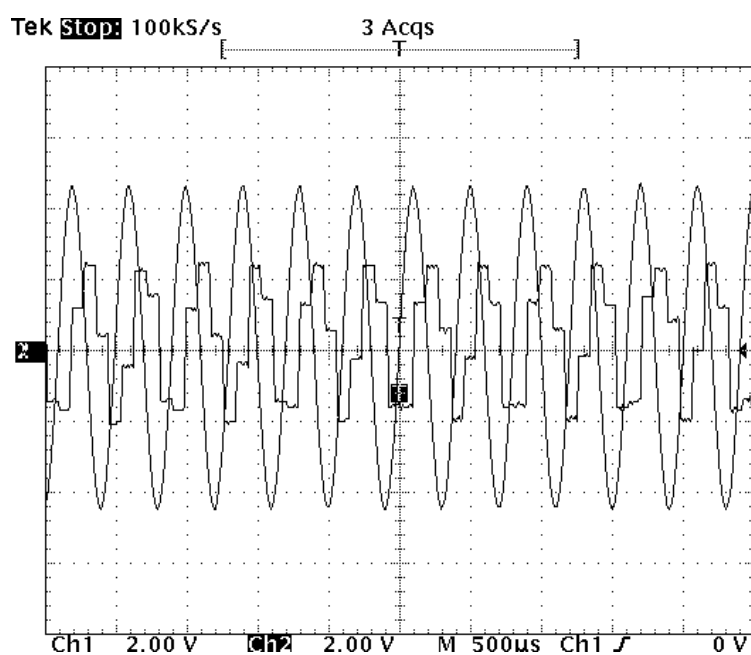
รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์



รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 1500 เฮิรตซ์



รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 2000 เฮิร์ตซ์

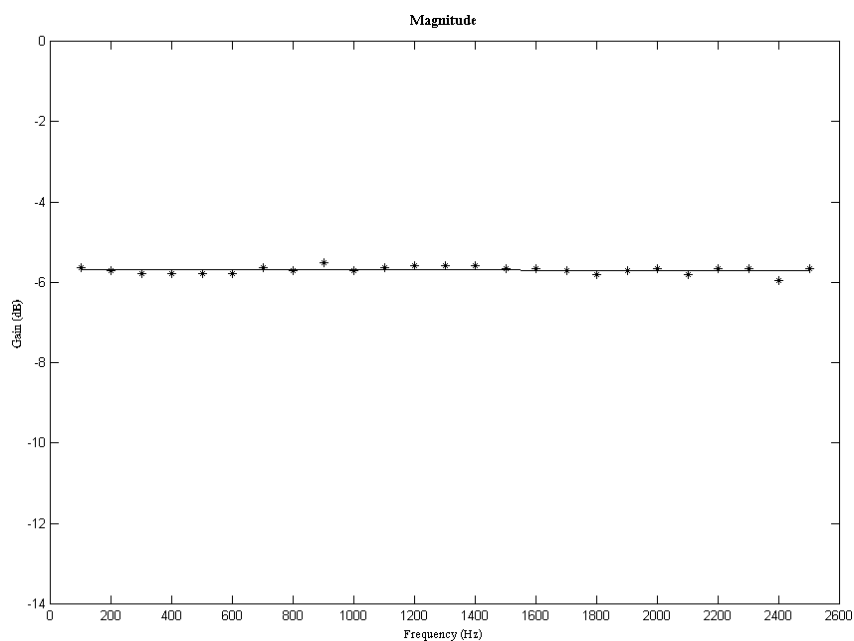


รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ที่ความถี่ 2500 เฮิร์ตซ์

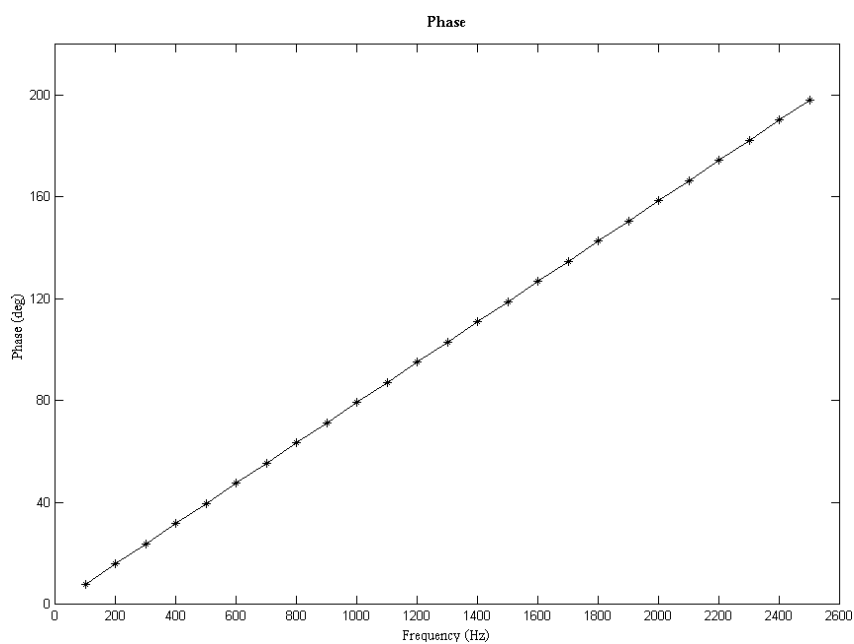
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบหาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรแปลงสัญญาณ

ความถี่ (Hz)	คาบ (ms)	แอมพลิจูด อินพุต (pk-pk)	แอมพลิจูด เอาต์พุต (pk-pk)	ค่าเกน (dB)	ΔT (μs)	มุมเลื่อนเฟส (degree)
100	10.00	9.04	4.72	-5.64	220	7.92
200	5.00	9.12	4.72	-5.72	220	15.84
300	3.33	9.04	4.64	-5.79	220	23.76
400	2.50	9.04	4.64	-5.79	220	31.68
500	2.00	9.04	4.64	-5.79	220	39.60
600	1.67	9.04	4.64	-5.79	220	47.52
700	1.43	9.04	4.72	-5.64	220	55.44
800	1.25	9.12	4.72	-5.72	220	63.36
900	1.11	9.04	4.8	-5.50	220	71.28
1000	1.00	9.12	4.72	-5.72	220	79.20
1100	0.91	9.04	4.72	-5.64	220	87.12
1200	0.83	9.12	4.8	-5.58	220	95.04
1300	0.77	9.12	4.8	-5.58	220	102.96
1400	0.71	9.12	4.8	-5.58	220	110.88
1500	0.67	9.2	4.8	-5.65	220	118.80
1600	0.63	9.2	4.8	-5.65	220	126.72
1700	0.59	9.12	4.72	-5.72	220	134.64
1800	0.56	9.2	4.72	-5.80	220	142.56
1900	0.53	9.12	4.72	-5.72	220	150.48
2000	0.50	9.2	4.8	-5.65	220	158.40
2100	0.48	9.2	4.72	-5.80	220	166.32
2200	0.45	9.2	4.8	-5.65	220	174.24
2300	0.43	9.2	4.8	-5.65	220	182.16
2400	0.42	9.2	4.64	-5.95	220	190.08
2500	0.40	9.2	4.8	-5.65	220	198.00

ต่อมานำข้อมูลในตารางที่ 5.7 เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกนและความถี่ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลื่อนเฟสในหน่วยองศาและความถี่ แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 และ 5.19



รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองทางความถี่ในส่วนของค่าเกน



รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองทางความถี่ในส่วนของมุมเลื่อนเฟส

เมื่อพิจารณาการทดสอบผลตอบแทนทางความถี่ของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณแอนะล็อกจะอธิบายได้ดังนี้ วงจรแปลงสัญญาณดังกล่าวมีค่าเกนเท่ากับ -6 dB โดยประมาณตลอดทุกย่านความถี่ และมุลื่นเฟส (ล่าช้า) มีความสัมพันธ์ที่แปรผันโดยตรงกับความถี่ของแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์กระแสสลับ กล่าวคือ เมื่อแรงดันอินพุตมีความถี่เพิ่มขึ้น มุลื่นเฟสจะมีขนาดเพิ่มขึ้น ถ้าแรงดันอินพุตข้างต้นมีความถี่เท่ากับ 100 เฮิรตซ์ มุลื่นเฟสของแรงดันแอนะล็อกเอาต์พุตจะมีค่าน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 7.92 องศา และถ้าแรงดันอินพุตมีความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 2500 เฮิรตซ์ มุลื่นเฟสของแรงดันแอนะล็อกที่ได้จากการแปลงจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 198 องศา

5.6.3 การทดสอบในสถานะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ทำงานในสถานะคงตัว จะใช้วิธีการป้อนแรงดันแอนะล็อกอินพุตที่มีขนาดคงที่ (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ซึ่งอาจจะเป็นค่าบวกหรือค่าลบหรือค่าศูนย์ ให้กับวงจรย่อยตรวจวัดเครื่องหมายและช่องสัญญาณที่ศูนย์ของวงจรแปลงสัญญาณดังกล่าว จากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะได้รับบิตที่แทนเครื่องหมายบวกหรือลบของแรงดันแอนะล็อกและได้รับข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการแปลงขนาดของแรงดันแอนะล็อกผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ ต่อมาเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลบันทึกข้อมูลดิจิทัลขนาด 13 บิต เป็นตัวเลขฐานสองแบบทอคอมพลิเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 5.8

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในสถานะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลข้างต้น จะได้ว่า วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ถูกสร้างขึ้นมีความสามารถเข้าถึงและแปลงแรงดันแอนะล็อกที่เป็นแรงดันกระแสตรงในช่วง -4.9 โวลต์ ถึง $+4.9$ โวลต์ เป็นข้อมูลดิจิทัลได้ แต่ในทางปฏิบัติแรงดันแอนะล็อกอินพุตที่เป็นแรงดันกระแสตรงและถูกป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณที่กล่าวถึง อาจจะมีค่าอยู่ในช่วง -4.75 โวลต์ ถึง $+4.75$ โวลต์ เพื่อป้องกันการอิ่มตัวในการแปลงสัญญาณ

5.6.4 การทดสอบในสถานะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่ทำงานในสถานะคงตัว จะกำหนดให้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลส่งข้อมูลดิจิทัลที่เป็นตัวเลขฐานสองแบบทอคอมพลิเมนต์ขนาด 14 บิต ออกผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ถึงวงจรแปลงสัญญาณดังกล่าว เป็นผลให้ช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตมีแรงดันแอนะล็อกที่เป็นแรงดันกระแสตรงที่มีขนาดคงที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นค่าบวกหรือค่าลบหรือค่าศูนย์ ต่อมานำดิจิทัลมัลติมิเตอร์วัดแรงดันกระแสตรงข้างต้น และบันทึกเป็นตัวเลขที่มีจุดทศนิยมสามตำแหน่งดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

แรงดันแอนะล็อกอินพุต (โวลต์)	ข้อมูลดิจิทัลขนาด 13 บิต			
4.900	0	1111	1111	1111
4.375	0	0111	0100	0011
3.750	0	0110	0100	0111
3.125	0	0101	0011	1011
2.500	0	0011	1111	1001
1.875	0	0011	0000	1000
1.250	0	0001	1111	0011
0.625	0	0001	0000	1100
0.000	0	0000	0000	0000
-0.625	1	1111	0001	0110
-1.250	1	1101	1111	0000
-1.875	1	1100	1010	1101
-2.500	1	1011	1010	0010
-3.125	1	1010	1100	1011
-3.750	1	1001	0111	1101
-4.375	1	1000	1100	0100
-4.900	1	1000	0000	0001

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

ข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต				แรงดันแอนะล็อกเอาต์พุต (โวลต์)
01	1111	0000	0000	3.636
01	0101	0000	0000	3.268
01	0000	1111	0000	2.688
01	0000	0000	1111	2.544
01	0000	0000	0000	2.508
00	1111	0000	0000	2.366
00	0111	0000	0000	1.063

ตารางที่ 5.9 (ต่อ)

ข้อมูลดิจิทัลขนาด 14 บิต				แรงดันแอนะล็อกเอาต์พุต (โวลต์)
00	0011	0000	0000	0.454
00	0000	1111	0000	0.140
00	0000	0011	0000	0.026
00	0000	0000	0000	0.000
11	1111	1111	1111	-0.0034
11	1111	1111	0000	-0.012
11	1111	0000	0000	-0.1512
11	1100	0000	0000	-0.520
11	0111	0000	0000	-1.268
11	0000	1111	0000	-2.188
10	1111	0000	0000	-2.480
10	1100	0000	0000	-2.900
10	0111	0000	0000	-3.632
10	0000	0000	0000	-3.860

5.7 สรุป

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัลที่ถูกสร้างขึ้นเป็นต้นแบบสามารถแบ่งออกเป็น วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีการแยกชัด 13 บิต (13 bit A/D converter) จำนวน 5 ช่องสัญญาณ และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีการแยกชัด 14 บิต (14 bit D/A converter) จำนวน 1 ช่องสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยที่โปรแกรมภาษาซีจะควบคุมการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและวงจรแปลงสัญญาณข้างต้น ในส่วนของการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณที่กล่าวถึง สามารถระบุข้อมูลจำเพาะได้ดังนี้ วงจรแปลงสัญญาณนี้มีแบนด์วิดท์ความถี่ของแรงดันกระแสสลับอินพุตเท่ากับ 2500 เฮิรตซ์ แต่ในทางปฏิบัติแรงดันกระแสสลับอินพุตไม่ควรมีความถี่มากกว่า 1000 เฮิรตซ์ เพราะแรงดันแอนะล็อกเอาต์พุตที่ได้เริ่มมีการบิดเบือนของรูปคลื่น กล่าวคือ ถ้าแรงดันกระแสสลับอินพุตมีความถี่อยู่ในช่วง 1000 เฮิรตซ์ ถึง 2500 เฮิรตซ์ แรงดันแอนะล็อกเอาต์พุตจะมีการบิดเบือนของรูปคลื่นมากขึ้นในขณะที่ความถี่เพิ่ม

ขึ้น และวงจรแปลงสัญญาณมีความสามารถเข้าถึงและแปลงแรงดันแอนะล็อกอินพุตที่เป็นแรงดัน กระแสตรงในช่วง -4.75 โวลต์ถึง $+4.75$ โวลต์ เป็นข้อมูลดิจิทัลได้ รวมถึงมีความสามารถแปลง ข้อมูลดิจิทัลที่มีตัวเลขคงที่เป็นแรงดันแอนะล็อกเอาต์พุตที่เป็นแรงดันกระแสตรงในช่วง -3.86 โวลต์ ถึง $+3.636$ โวลต์ได้ และมีความสามารถแปลงข้อมูลดิจิทัลที่มีตัวเลขไม่คงที่เป็นแรงดัน แอนะล็อกเอาต์พุตที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง -3.90 โวลต์ ถึง $+3.20$ โวลต์ ได้ นอกจากนี้ถ้าแรงดัน กระแสกลับอินพุตมีความถี่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 100 ถึง 2500 เฮิรตซ์ วงจรแปลงสัญญาณนี้จะมี ค่าเกนเกือบคงที่และเท่ากับ -6 dB โดยประมาณและมีมุมการเลื่อนเฟสแบบล้าหลังอยู่ในช่วง 7.92 องศา ถึง 198 องศา ที่สัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรงกับความถี่ของแรงดันอินพุต

บทที่ 6

ผลการทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์ก

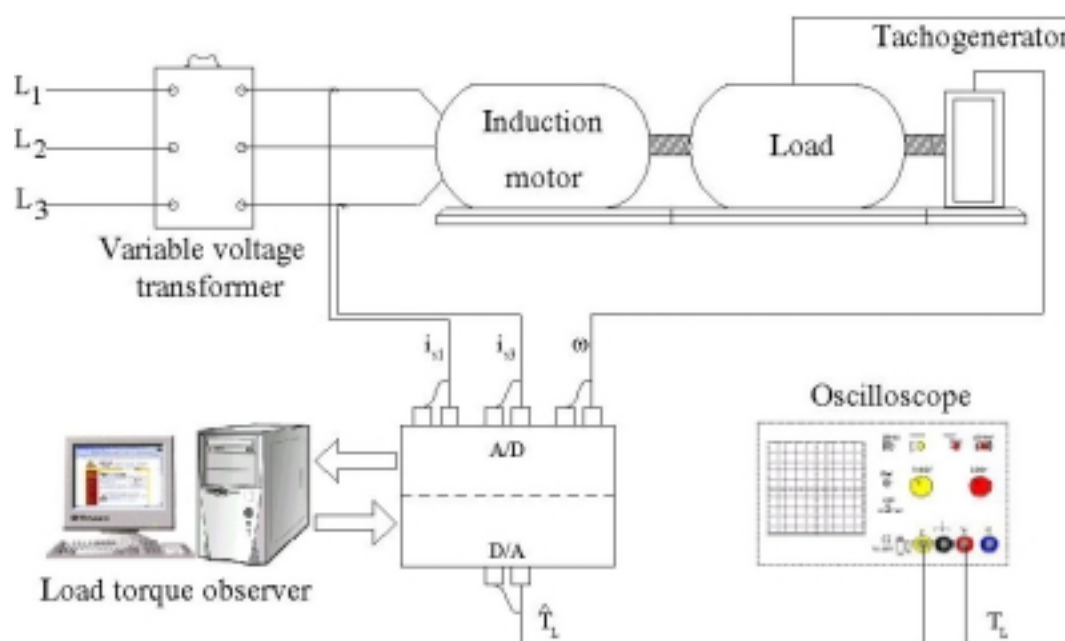
6.1 บทนำ

ในงานวิทยานิพนธ์นี้การสร้างตัวสังเกตโหลดทอร์ก คือ การโปรแกรมเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลให้ทำหน้าที่เป็นตัวสังเกตโหลดทอร์ก โดยที่เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลดังกล่าวได้รับสัญญาณดิจิทัลของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟสที่ 1 และเฟสที่ 3 และได้รับสัญญาณดิจิทัลของความเร็วรอบของระบบ ซึ่งข้อมูลทั้งหมดถูกส่งมาจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ เพื่อนำมาคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลด ในการทดลองใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองดังนี้ หม้อแปลงปรับเปลี่ยนแรงดัน มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก ไดนาโมมิเตอร์ที่มีหน้าที่สร้างโหลดทอร์ก ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า เครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็ว และวงจรแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล นอกจากนี้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลข้างต้นมีหน้าที่เพิ่มเติม คือ คำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นตัวแปรอินพุตป้อนให้กับตัวสังเกตโหลดทอร์ก เนื่องจากตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีโครงสร้างที่เกิดจากการจัดแจงหรือการขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ เป็นผลให้ในบทที่ 6 มีเนื้อหาผลการทดสอบการทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ

6.2 ผลการทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

วิธีการทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กในงานวิทยานิพนธ์นี้ มีขั้นตอนที่เริ่มต้นจากการเชื่อมต่อเพลลาหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำและเพลลาหมุนของไดนาโมมิเตอร์ที่มีหน้าที่เป็นโหลดเข้าด้วยกัน และการเชื่อมต่อเพลลาหมุนของไดนาโมมิเตอร์และเพลลาหมุนของเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็วเข้าด้วยกัน รวมถึงการเชื่อมต่อหม้อแปลงปรับเปลี่ยนแรงดันและปลายขั้วไฟฟ้าสามเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้าด้วยกันเพื่อจัดแจงเป็นระบบมอเตอร์และโหลด นอกจากนี้ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า วงจรแปลงสัญญาณ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ออสซิลโลสโคป และระบบมอเตอร์และโหลด จะถูกเชื่อมต่อรวมกันเป็นชุดอุปกรณ์การทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.1 โดยที่ตัว

ตรวจรู้กระแสไฟฟ้ามีหน้าที่วัดและเข้าถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟสที่ 1 และเฟสที่ 3 ในขณะที่เครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็วมีหน้าที่วัดและเข้าถึงปริมาณความเร็วรอบเพลาหมุนของระบบ ต่อมาป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (ไซนูซอยด์) สามเฟสสมดุลที่มีค่าเท่ากับพิกัดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกที่ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนหรือสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขับเคลื่อนโหลดและเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็วให้เกิดการหมุน ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็วจะเข้าถึงปริมาณที่วัดได้ จากนั้นทำการส่งข้อมูลหรือแรงดันแอนะล็อกให้กับวงจรแปลงสัญญาณเพื่อแปลงแรงดันแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และ



รูปที่ 6.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์ก

ส่งถึงเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ เมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ดังกล่าวได้รับสัญญาณดิจิทัลของกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟสที่ 1 และเฟสที่ 3 และได้รับสัญญาณดิจิทัลของความเร็วรอบของระบบ เครื่องคอมพิวเตอร์ข้างต้นที่มีส่วนหนึ่งของโปรแกรมทำหน้าที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สมดุลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ และส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่มีหน้าที่เป็นตัวสังเกตโหลดทอร์ก จะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ จากนั้นจึงส่งสัญญาณดิจิทัลของตัวเลขโหลดทอร์กไปยังวงจรแปลงสัญญาณ เพื่อแปลงเป็นแรงดันแอนะล็อกของตัวเลขโหลดทอร์ก โพรบของออสซิลโลสโคปจึงได้รับแรงดันแอนะล็อกนี้จากช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ ทำให้

ออสซิลโลสโคปสามารถแสดงรูปคลื่นของตัวเลขโพลทอรัคที่คำนวณได้ พร้อมกับแสดงรูปคลื่นของโพลทอรัคที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งวัดได้จากไดนาโมมิเตอร์โดยใช้โพรบในอีกช่องสัญญาณหนึ่งในส่วนของอุปกรณ์การทดลองที่ใช้งานมีรายละเอียดดังนี้

ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ผลิตโดยบริษัท TEKTRONIX รุ่น TDS420A มีหน้าที่แสดงและเปรียบเทียบระหว่างตัวเลขโพลทอรัคที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตและโพลทอรัคที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งวัดได้จากไดนาโมมิเตอร์

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer) ผลิตโดยบริษัท Acer และมีซีพียูเป็น 80486DX4-100 ที่มีความถี่ของสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 100 MHz รวมถึงมีหน่วยความจำ 10 MB ทำหน้าที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและตัวสังเกตโพลทอรัค เพื่อคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและตัวเลขโพลทอรัค ตามลำดับ

ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ผลิตโดยบริษัท ELWE มีพิสัยกำลังงานเท่ากับ 300 วัตต์ ทำหน้าที่เป็นโพลทอรัคของระบบหรือสร้างโพลทอรัคที่เกิดขึ้นในระบบ และทำหน้าที่วัดโพลทอรัคที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อเปรียบเทียบกับตัวเลขโพลทอรัคที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกต ในส่วนของชุดควบคุม (controller unit) ของไดนาโมมิเตอร์มีฟังก์ชันในการกำหนดลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบลาดเอียงหรือแบบขั้นบันไดของโพลทอรัคที่เกิดขึ้นในระบบ

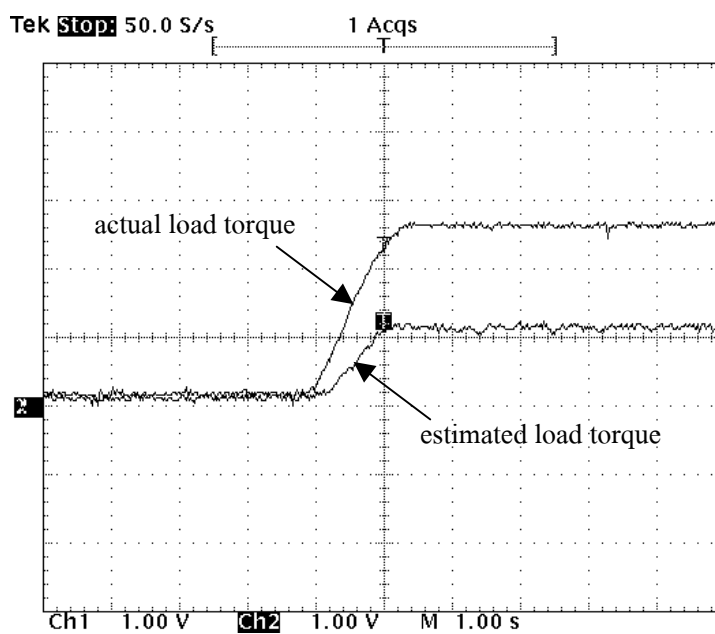
เนื่องจากในทางปฏิบัติ แรงดันหรือสัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็ว มีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนในขนาดที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของสัญญาณแอนะล็อกดังกล่าว เป็นผลให้สัญญาณดิจิทัลของความถี่รอบของระบบที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อก มีการแทรกสอดของสัญญาณรบกวนในขนาดที่มากขึ้นเช่นกัน ถ้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและตัวสังเกตโพลทอรัคแบบปรับตัว ได้รับสัญญาณที่มีการปะปนของสัญญาณรบกวนข้างต้น ตัวเลขโพลทอรัคที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าไม่ใกล้เคียงกับโพลทอรัคที่เกิดขึ้นในระบบในสถานะคงตัว เพราะแบบจำลองและตัวสังเกตโพลทอรัคที่กล่าวถึง จะคำนวณและประมาณสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ พร้อมกับการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ ตัวแปรสถานะ และการประมาณค่าพารามิเตอร์ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น วงจรกรองบัตเทอร์เวิร์ท (Butterworth filter) อันดับสองแบบดิจิทัล (รายละเอียดของวงจรกรองถูกอธิบายในภาคผนวก ค.) ถูกใช้ในการลดทอนขนาดของสัญญาณรบกวนที่แทรกสอดหรือปะปนในข้อมูลของความเร็วรอบของระบบที่ป้อนให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ ข้อดีของวงจรกรองบัตเทอร์เวิร์ท คือ ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าเกินที่คงที่ในช่วงกว้างของความถี่ที่เกือบเท่ากับความถี่แบนด์วิดท์และไม่มีค่าเรโซแนนซ์ ซึ่งหมายความว่า ถ้าสัญญาณของความเร็วรอบมีความถี่ที่น้อยกว่าความถี่ตัด (cutoff

frequency) แต่ไม่ใกล้เคียงหรือไม่เท่ากับความถี่ตัด จะสามารถสามารถหาค่าของความเร็วรอบด้วยค่าเกณฑ์ที่เป็นผลให้ขนาดของความเร็วรอบไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม ส่วนข้อเสียของวงจรกรองพัลส์เทอร์เวิร์ท คือ สัญญาณของความเร็วรอบที่ผ่านตัวกรองชนิดนี้ จะมีมุมเลื่อนเฟสหรือช่วงเวลาประวิง (delay time) ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม นอกจากนี้ในการทดลองใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว สัญญาณของความเร็วรอบจะถูกส่งผ่านวงจรกรองพัลส์เทอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิทัล ก่อนทำการป้อนให้กับแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำและตัวสังเกตโหลดทอร์ก

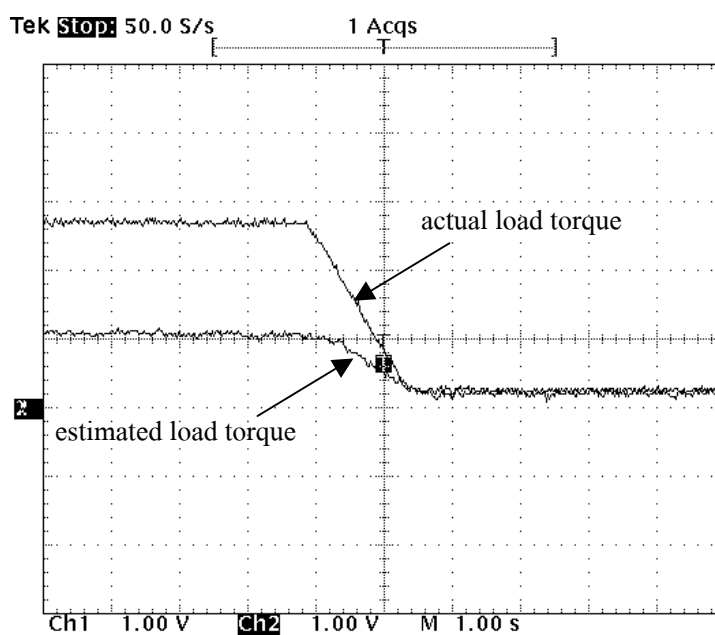
การเลือกค่าเกณฑ์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับเกิดจากความต้องการให้ตัวสังเกตคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าพุ่งเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ (P.O. : 10%) และเวลาการเข้าสู่สถานะคงตัวที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 วินาที (T_s : 0.05 sec) ต่อมาคำนวณโพลและค่าเกณฑ์ของตัวสังเกต ตามลำดับ เป็นผลให้ $\ell_1 = 160.00$ และ $\ell_2 = -20.07$ นอกจากนี้กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในตัวสังเกตมีค่าเท่ากับศูนย์

ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับจะถูกกำหนดให้ มีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์กลางซึ่งได้จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์และโหลด ด้วยวิธีการที่ง่าย ไม่สลับซับซ้อน อีกทั้งสามารถใช้อุปกรณ์และเครื่องวัดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังนั้นค่าพารามิเตอร์กลางอาจมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ และทำให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับอาจมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเช่นเดียวกัน ค่าความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบเป็นสาเหตุที่ทำให้ตัวสังเกตดังกล่าว คำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าไม่ตรงกับหรือไม่ใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ

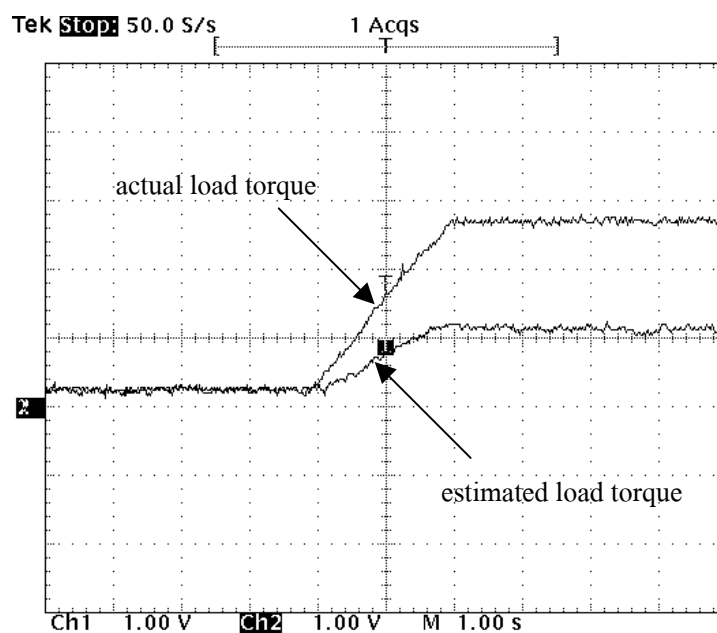
ในการทดสอบใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ สัญญาณโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลดถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ โหลดทอร์กที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณลาดเอียงและสัญญาณขั้นบันได โดยที่สัญญาณโหลดทอร์กทั้งสองประเภทมีขนาดสูงสุดของสัญญาณเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ และมีขนาดต่ำสุดเท่ากับ 0.10 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ การพิจารณาโหลดทอร์กที่เป็นสัญญาณลาดเอียงจะแบ่งตามระดับความชันของสัญญาณได้ 3 ระดับ คือ ความชันมาก ความชันปานกลาง และความชันน้อย ดังรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.7 ในส่วนของโหลดทอร์กที่เป็นสัญญาณขั้นบันได เนื่องจากไดนาโมมิเตอร์ที่ทำหน้าที่สร้างโหลดเชิงกลไม่สามารถสร้างสัญญาณโหลดทอร์กที่มีลักษณะการเปลี่ยนอย่างกะทันหัน หรือมีลักษณะเป็นสัญญาณขั้นบันไดในอุดมคติ ทำให้ในการทดสอบโหลดทอร์กที่เป็นสัญญาณขั้นบันได จะใช้โหลดทอร์กที่เป็นสัญญาณลาดเอียงที่มีความชันสูงมากแทน แสดงดังรูปที่ 6.8



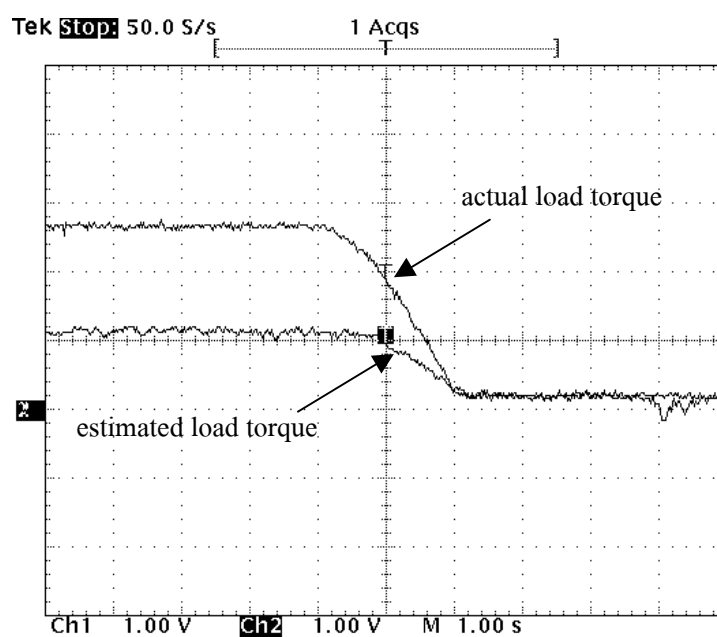
รูปที่ 6.2 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันมาก



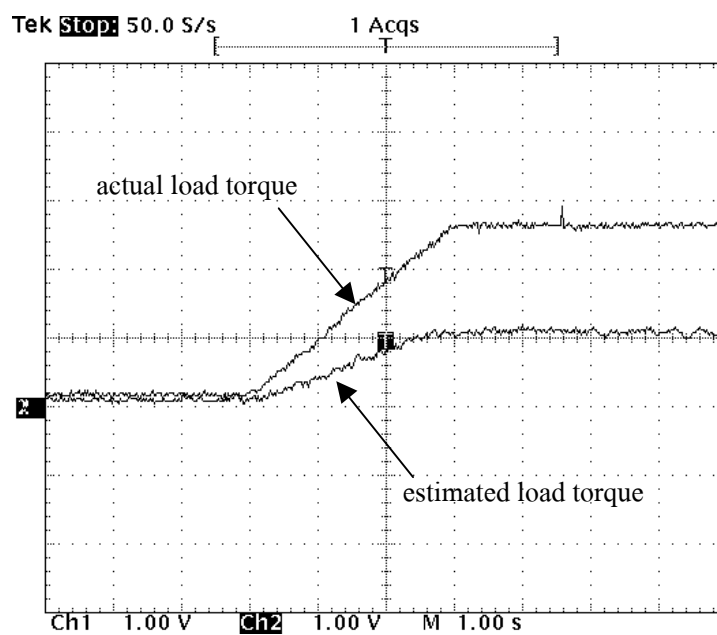
รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันมาก



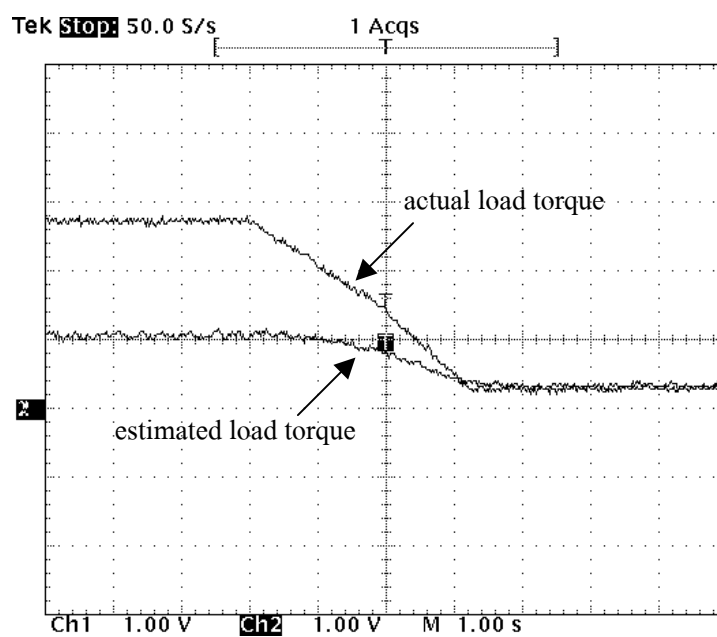
รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันปานกลาง



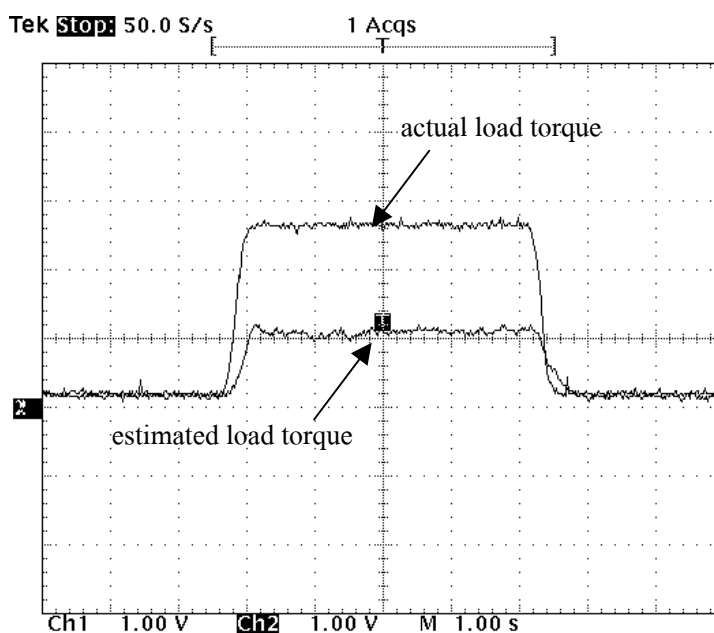
รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันปานกลาง



รูปที่ 6.6 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันน้อย



รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันน้อย



รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได

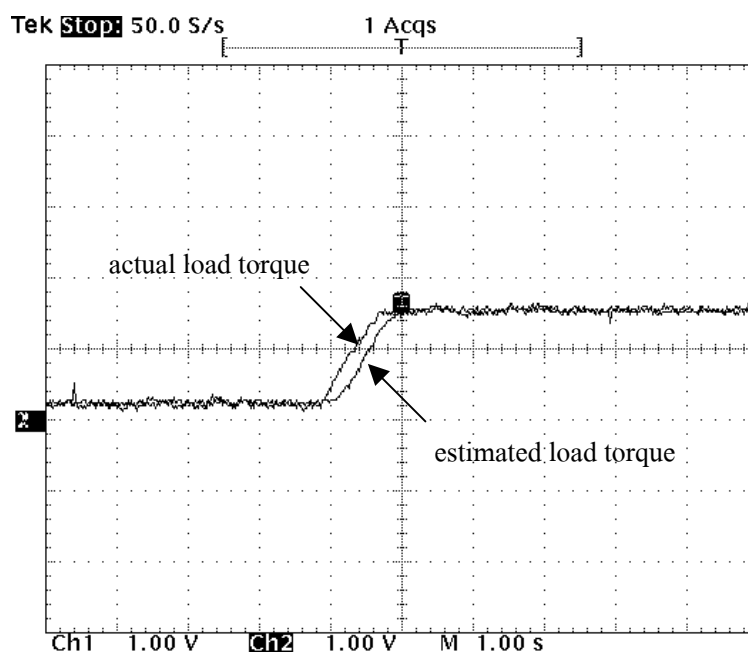
รูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.8 เป็นผลการเปรียบเทียบระหว่างโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบที่ได้จากการวัดโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ ผลการทดสอบแสดงถึงการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับมีค่าไม่ตรงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ของตัวสังเกตที่กล่าวถึงในบทที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตและค่าพารามิเตอร์ของระบบมีค่าแตกต่างกัน ตัวสังเกตจะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่ไม่ใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นอธิบายผลการทดสอบข้างต้นได้ว่า ค่าความผิดพลาดการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตมีสาเหตุจากค่าความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตและค่าพารามิเตอร์จริงของระบบในขณะที่เกิดการหมุน ในส่วนของการใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับจึงอาจกล่าวได้ว่า ถ้าต้องการใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับที่ให้ผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีค่าใกล้เคียงกับหรือตรงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบมอเตอร์และโหลด ซึ่งอาจทำให้ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบมีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์และโหลดบางค่าอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น อายุการใช้งาน ฯลฯ ทำให้ต้องทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบมากกว่าหนึ่งครั้งตลอดการใช้งานตัวสังเกตดังกล่าวในระบบมอเตอร์และโหลด หรือในระบบควบคุมวงปิด

6.3 ผลการทดสอบตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว

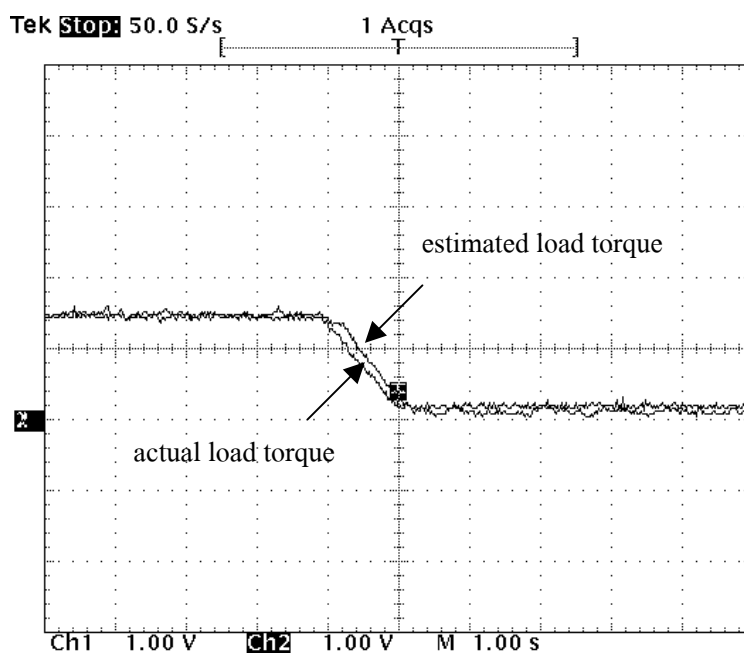
การทดลองใช้งานตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวมีรายละเอียดการเชื่อมต่ออุปกรณ์การทดลองเช่นเดียวกับการทดลองใช้งานตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับที่กล่าวถึง แต่มีความแตกต่างในส่วนของโปรแกรมที่ทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโพลทอร์ก กล่าวคือ ส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่ทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโพลทอร์กจะถูกโปรแกรมเป็นตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวแทนที่การโปรแกรมเป็นตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ นอกจากนี้ตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวมีค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบซึ่งได้จากการทดสอบ และกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของการคำนวณตัวเลขโพลทอร์กในตัวสังเกตมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าเกณฑ์ของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ และ ℓ_2 ถูกเลือกให้มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.1, 100, 100 และ -100 ตามลำดับ

ในการทดสอบตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว ได้แบ่งชนิดของสัญญาณโพลทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลดออกเป็น 2 ประเภท คือ โพลทอร์กที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณลาดเอียงและสัญญาณขึ้นบันได การพิจารณาขนาดสูงสุดของสัญญาณโพลทอร์กทั้งสองประเภทจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่สัญญาณโพลทอร์กมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร และกรณีที่สัญญาณโพลทอร์กมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร ตามลำดับ โดยที่ทั้งสองกรณีมีขนาดของสัญญาณโพลทอร์กต่ำสุดเท่ากับ 0.1 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ สำหรับโพลทอร์กที่เป็นสัญญาณลาดเอียงจะแบ่งการพิจารณาตามระดับความชันของสัญญาณออกเป็น 3 ระดับ คือ ความชันมาก ความชันปานกลาง และความชันน้อย โดยที่ระดับความชันของสัญญาณดังกล่าวเกิดจากการเปรียบเทียบกับสัญญาณโพลทอร์กที่มีขนาดสูงสุดค่าเดียวกันเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าสัญญาณลาดเอียงที่มีความชันมากและมีสัญญาณโพลทอร์กขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร อาจมีความชันน้อยกว่าหรือมากกว่า สัญญาณลาดเอียงที่มีความชันมาก แต่มีสัญญาณโพลทอร์กขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร

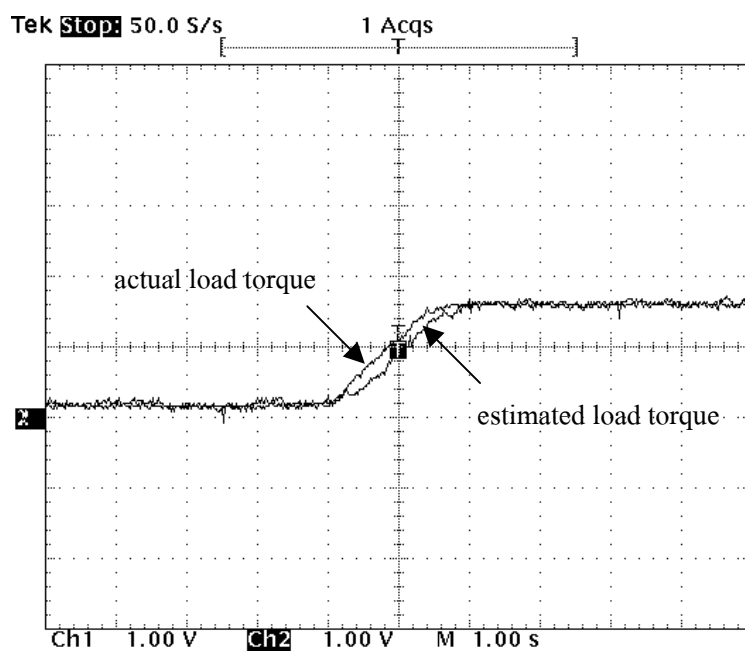
ในรูปที่ 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14 และรูปที่ 6.15 ซึ่งเป็นกรณีที่สัญญาณโพลทอร์กมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ เมื่อสัญญาณโพลทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นและขาลงที่มีความชันมาก ความชันปานกลาง และความชันน้อย ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงถึงการคำนวณตัวเลขโพลทอร์กของตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวที่มีค่าใกล้เคียงกับหรือมีลักษณะตามรอย (track) โพลทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์และโหลด ในสถานะชั่วคราว ตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวมีช่วงเวลาประวิงในการคำนวณตัวเลขโพลทอร์ก



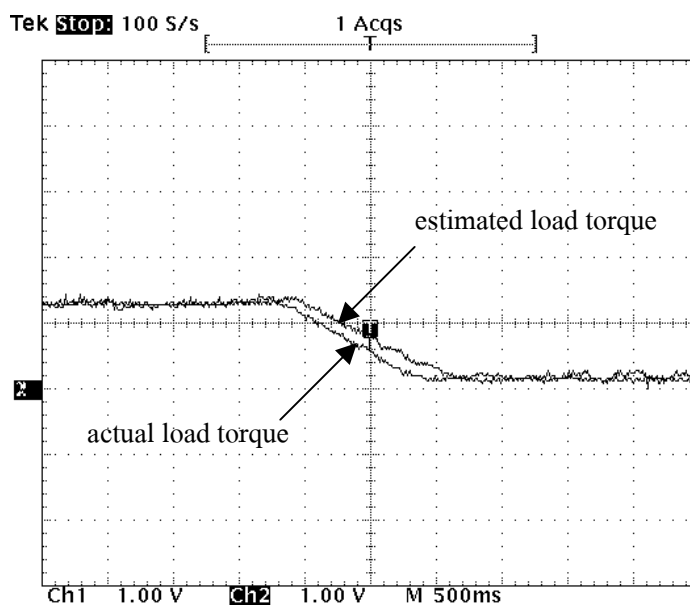
รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันมากและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร



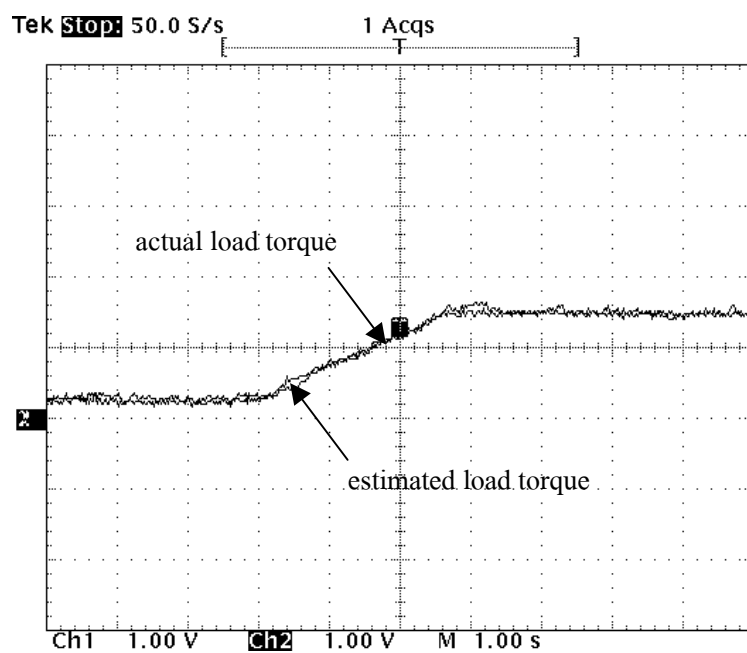
รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันมากและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร



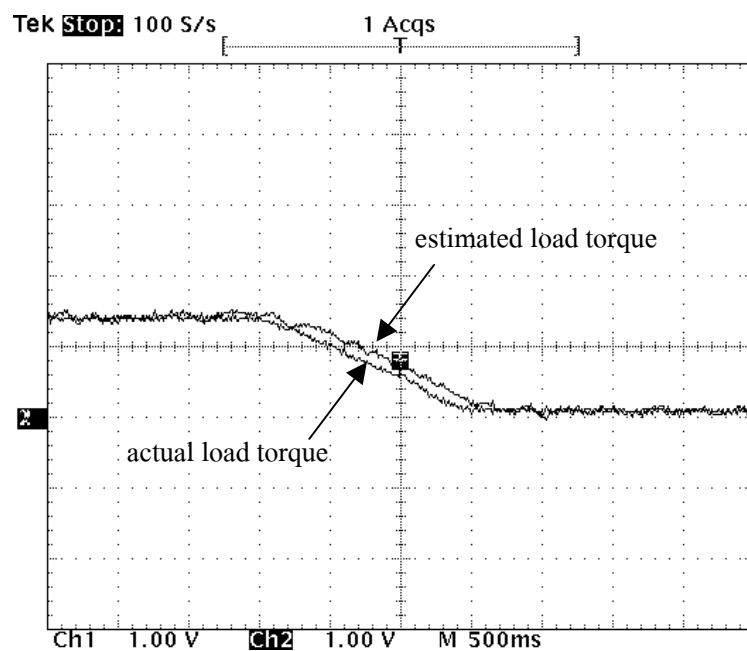
รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันปานกลางและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร



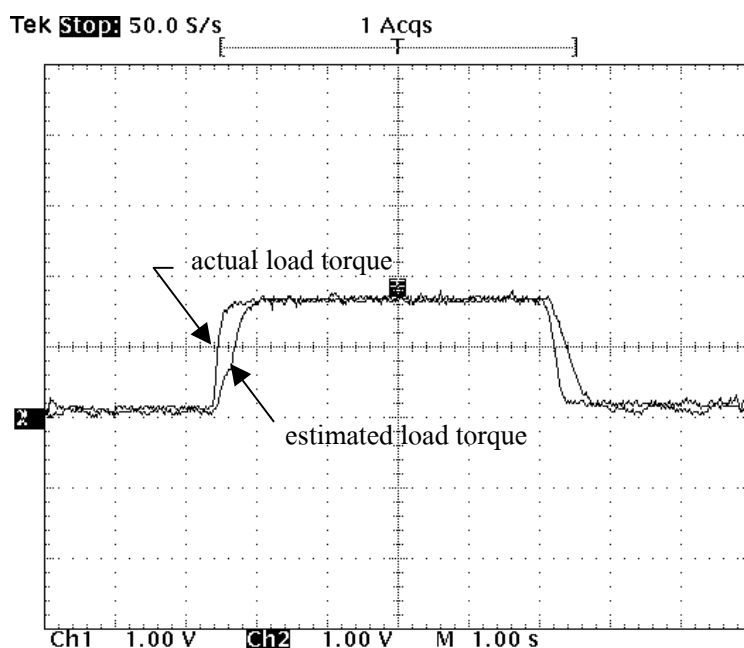
รูปที่ 6.12 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันปานกลางและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร



รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันน้อย และมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร



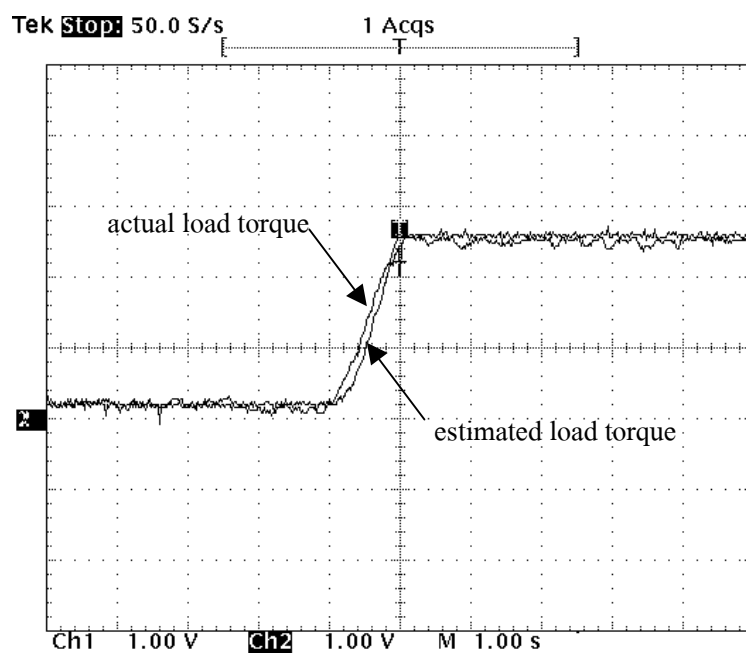
รูปที่ 6.14 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันน้อย และมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร



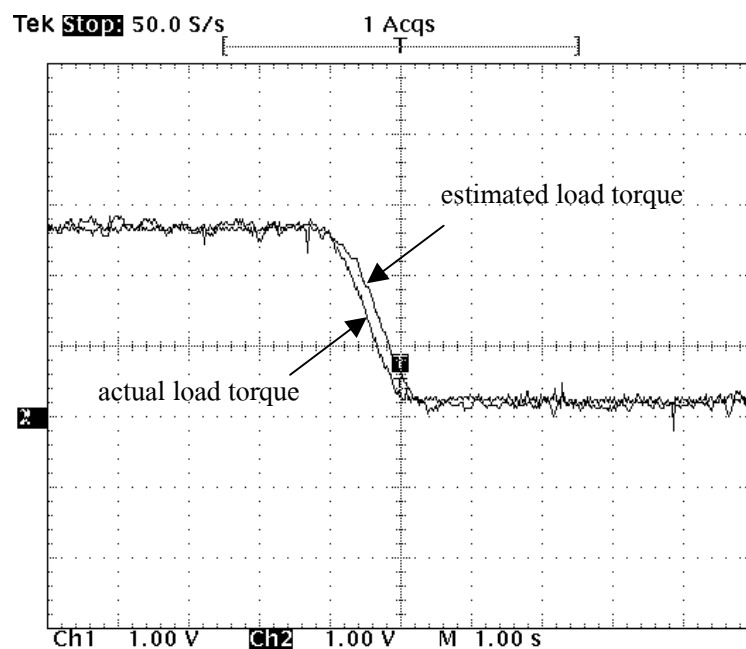
รูปที่ 6.15 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณขั้นบันไดและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตร

ในรูปที่ 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 และรูปที่ 6.22 ซึ่งเป็นกรณีที่สัญญาณโหลดทอร์กมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีลักษณะตามรอยและมีค่าใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีที่สัญญาณโหลดทอร์กมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.27 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ

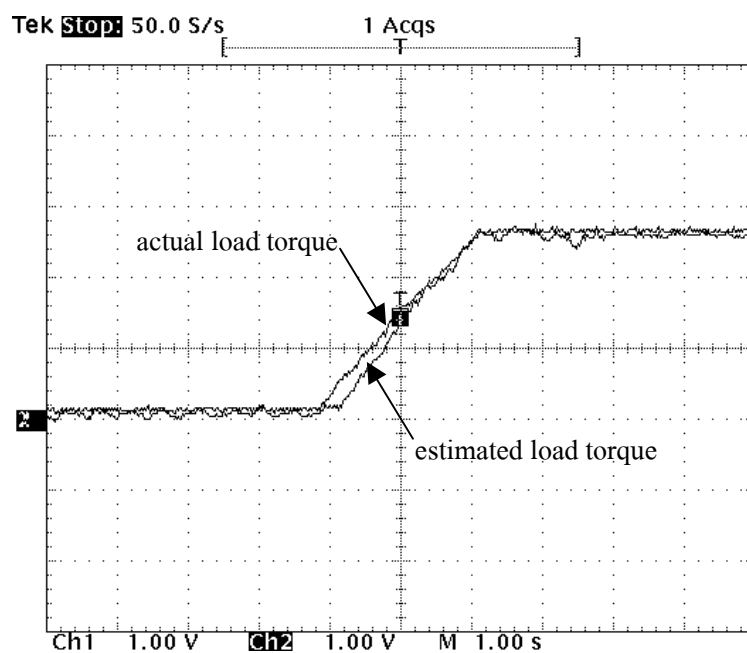
ในรูปที่ 6.22 เมื่อโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบเป็นสัญญาณขั้นบันได ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวจะคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่มีช่วงเวลาประวิงเท่ากับ 0.2 วินาที ($t_d = 0.2 \text{ sec}$) ช่วงเวลาประวิงดังกล่าวประกอบด้วย ช่วงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นใน 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก ขั้นตอนการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกต และขั้นตอนการกรองสัญญาณความเร็วรอบของวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิทัล เมื่อวิเคราะห์ช่วงเวลาประวิงที่อาจเกิดจากขั้นตอนการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก จะได้ว่า ในข้อมูลของตารางที่ 5.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรแปลงสัญญาณที่สร้างขึ้นจะแสดงถึงผลรวมของช่วงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและขั้นตอนการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีค่าเท่ากับ 220 ไมโครวินาที ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาประวิงของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กดังแสดงในรูปที่ 6.22 ดังนั้นช่วงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจะมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการคำนวณตัวเลข



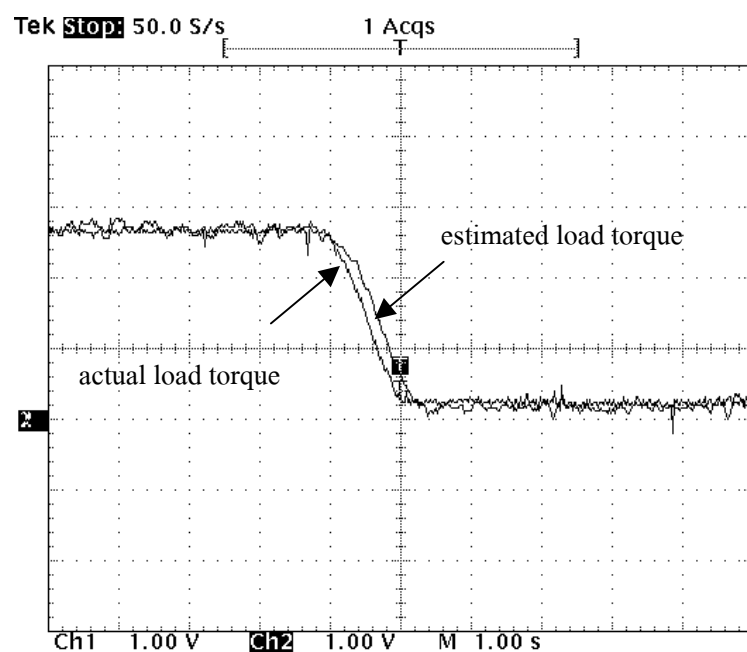
รูปที่ 6.16 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์คเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันมาก และมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร



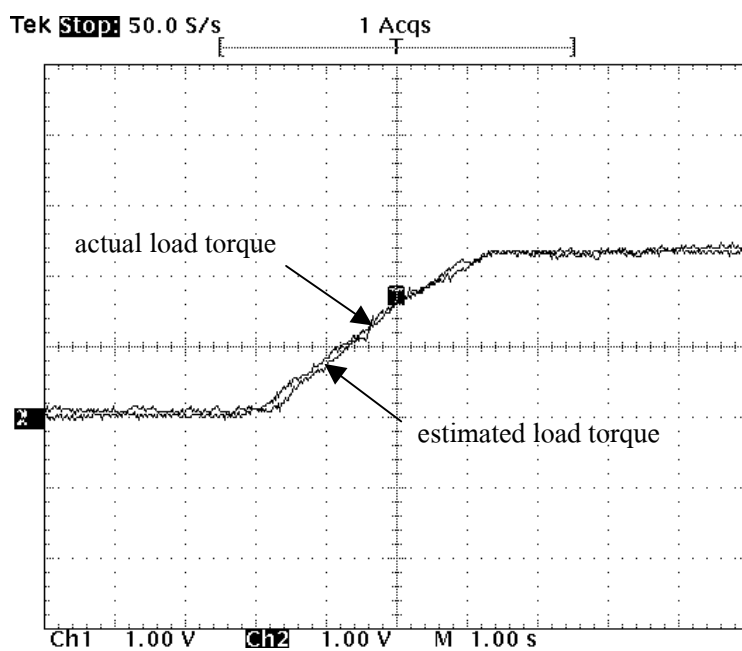
รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์คเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันมาก และมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร



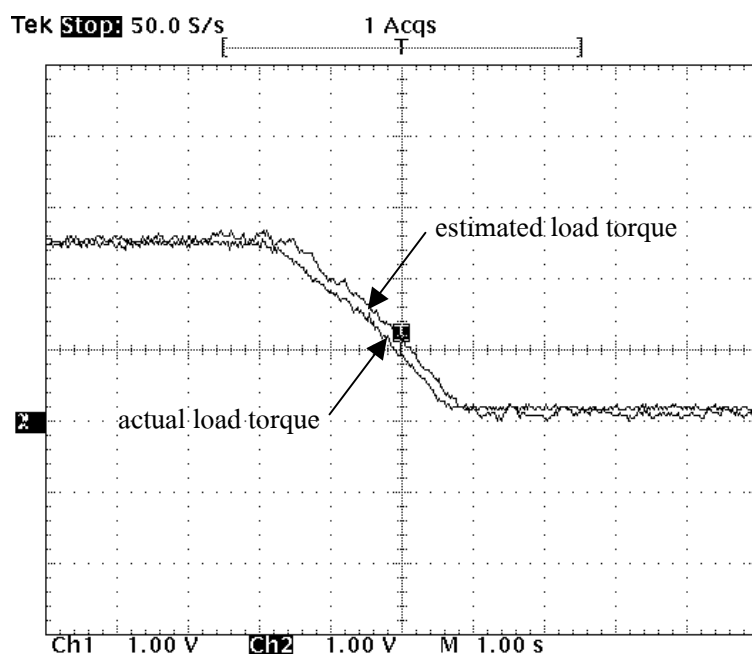
รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันปานกลางและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร



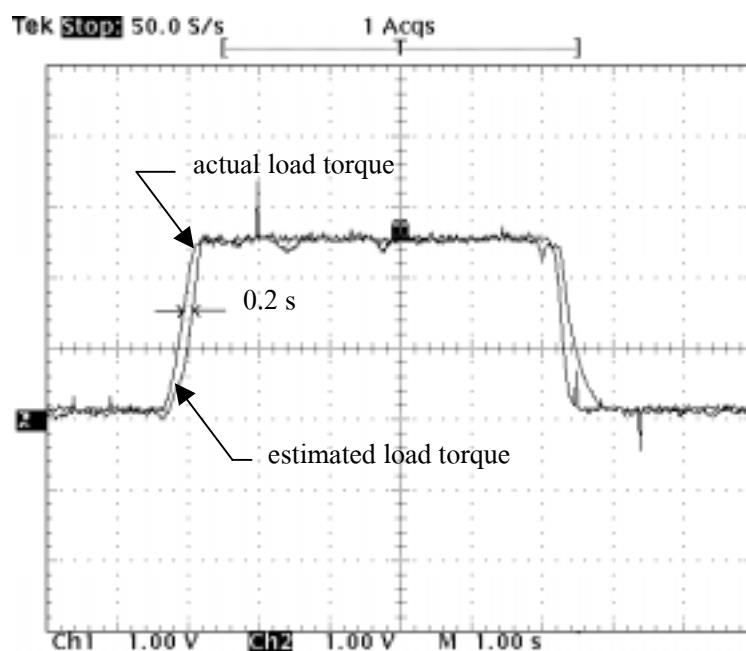
รูปที่ 6.19 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันปานกลางและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร



รูปที่ 6.20 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาขึ้นที่มีความชันน้อย และมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร



รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณลาดเอียงขาลงที่มีความชันน้อย และมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร



รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบตัวสังเกตเมื่อโหลดทอร์กเป็นสัญญาณขั้นบันไดและมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.54 นิวตัน-เมตร

โหลดทอร์กของตัวสังเกต และในขั้นตอนการกรองสัญญาณความเร็วรอบระบบของวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ท ในส่วนของช่วงเวลาที่ประวิงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการคำนวณของตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกต อธิบายได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-2) จะได้ว่า ค่าความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบและค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต ดังนั้นเมื่อระบบที่อยู่ในสถานะคงตัว ถูกรบกวนจากสิ่งรบกวนนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลดทอร์ก ฯลฯ และทำให้ความเร็วรอบของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเดิม เป็นผลให้ค่าความเร็วรอบที่คำนวณได้จากตัวสังเกตในขณะนั้น มีค่าไม่เท่ากับความเร็วรอบของระบบ และถ้าอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียบูโนฟในสมการที่ (4-6) มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบของระบบที่ได้จากตัวสังเกตมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ตัวสังเกตต้องใช้เวลาในการคำนวณเพื่อให้ค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบลดลงสู่ศูนย์ ซึ่งกล่าวได้ว่า ระยะเวลาบางช่วงของเวลาประวิงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกต เกิดจากระยะเวลาที่ตัวสังเกตใช้ในการคำนวณความเร็วรอบให้มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงความเร็วรอบของระบบ ในส่วนของขั้นตอนการกรองสัญญาณความเร็วรอบระบบของวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ท ทำให้เกิดช่วงเวลาที่ประวิง เนื่องจากสัญญาณความเร็วรอบที่ผ่านวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทจะมีช่วงเวลาที่ประวิงเพิ่มขึ้นจากเดิมค่าหนึ่ง

และเมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้ข้อมูลดังกล่าวในการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ค่าที่ได้มีช่วงเวลาประวิงเกิดเพิ่มขึ้นแน่นอน จากนั้นกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกป้อนให้กับตัวสังเกตโพลทอร์กเพื่อใช้เป็นข้อมูลการคำนวณตัวเลขโพลทอร์ก เป็นผลให้ตัวเลขโพลทอร์กที่คำนวณได้มีช่วงเวลาประวิงเกิดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

6.4 สรุป

จากผลการทดสอบตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ พบว่าตัวสังเกตดังกล่าวให้ผลการคำนวณตัวเลขโพลทอร์กที่ไม่ใกล้เคียงกับโพลทอร์กที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวสังเกตดังกล่าวจึงไม่เหมาะกับงานที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์จริงที่ถูกต้องของระบบ จากผลการทดสอบตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัว ในสถานะชั่วคราว ตัวสังเกตดังกล่าวให้ผลการคำนวณตัวเลขโพลทอร์กที่มีลักษณะตามรอยโพลทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ และในสถานะคงตัว ให้ผลการคำนวณตัวเลขโพลทอร์กใกล้เคียงกับโพลทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นตัวสังเกตโพลทอร์กแบบปรับตัวจึงเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อทำการคำนวณตัวเลขโพลทอร์ก โดยที่ตัวสังเกตโพลทอร์กดังกล่าวไม่ต้องการค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีความถูกต้องตรงกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบหรือค่าเริ่มต้นดังกล่าว อาจได้จากวิธีการทดสอบอย่างง่าย เพราะตัวสังเกตมีกลไกการปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบตลอดเวลาการทำงาน นอกจากนี้ตัวสังเกตดังกล่าวต้องการเพียงตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า เครื่องกำเนิดเครื่องชนิดมาตรวัดความเร็ว และหน่วยประมวลผลเท่านั้น ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อและติดตั้ง น้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการใช้งานอุปกรณ์วัดทอร์ก

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการออกแบบ และสร้างตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวที่เกิดจากการขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ โดยโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวแบบใหม่นี้ ต้องการข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วรอบของระบบเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์และคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์ก รวมถึงคำนวณตัวแปรสถานะของระบบ ในบทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาดังนี้ ในการวัดโหลดทอร์กจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดที่มีราคาแพง และตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับที่ทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก แทนการใช้อุปกรณ์วัดโหลดทอร์กมีจุดอ่อนในการใช้งาน คือ ตัวสังเกตจะให้ผลคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กในสถานะคงตัวที่มีค่าตรงกับหรือใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ก็ต่อเมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ซึ่งวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์จริงที่ถูกต้องของระบบเป็นงานที่มีค่าใช้จ่ายสูงและมีความซับซ้อน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์และโหลด พบว่าค่าพารามิเตอร์บางตัวของระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อมซึ่งไม่สัมพันธ์กับเวลา เป็นผลให้การใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับมีความผิดพลาดของการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กเพิ่มขึ้น

ในบทที่ 2 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ทำหน้าที่คำนวณกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับตัวสังเกตโหลดทอร์กใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก โดยแบบจำลองดังกล่าวมีแนวคิดจากการจัดทิศทางสนาม ซึ่งทำให้สมการทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีรูปแบบเดียวกับสมการทอร์กของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น ผลการจำลองสถานการณ์แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในระบบมอเตอร์และโหลด พบว่าแบบจำลองดังกล่าวให้ผลการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะคงตัว เป็นค่าคงที่ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการจัดทิศทางสนามข้างต้น นอกจากนี้เนื้อหาในบทที่ 2 ได้แสดงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์กลางของระบบมอเตอร์และโหลดที่มีขั้นตอนและสูตรคำนวณที่ไม่สลับซับซ้อน ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวอาจมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ เนื่องจากการใช้งานตัวสังเกตโหลด

ทอร์กแบบปรับตัวที่นำเสนอไม่จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์กลางที่ได้จากการทดสอบจะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าในตัวสังเกตโหนดทอร์กแบบปรับตัว

โครงสร้างของตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบได้รับการอธิบายในบทที่ 3 ผลการจำลองดังกล่าว พบว่าตัวเลขโหนดทอร์กที่คำนวณได้จากตัวสังเกต มีค่าไม่เท่ากับโหนดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ กรณีดังกล่าวเป็นจุดอ่อนในการใช้งานตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ดังนั้นในบทที่ 4 การขยายโครงสร้างตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับโดยเพิ่มกลไกการปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวสังเกตตลอดระยะเวลาการทำงานของตัวสังเกต ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณขั้นบันได พบว่าตัวเลขโหนดทอร์กที่ได้จากคำนวณของตัวสังเกตโหนดทอร์กแบบปรับตัวมีค่าใกล้เคียงกับโหนดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ ถึงแม้ว่าค่าเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์มีค่าไม่เท่ากับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ เป็นผลให้วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์กลางของระบบเพื่อเป็นค่าเริ่มต้นดังกล่าว มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายน้อย นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์จะแสดงผลเพิ่มเติมของคุณสมบัติการกระตุ้นคงอยู่ของกลไกการปรับตัวและโครงสร้างในตัวสังเกตโหนดทอร์กแบบปรับตัวในกรณีที่กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไซน์ซอว์ รวมถึงได้อธิบายแนวทางในการพิจารณาเลือกค่าเกณฑ์ของตัวสังเกตโหนดทอร์กแบบปรับตัวทั้งในกรณีที่ระบบมีการหมุนในทิศทางเดียวและหมุนในสองทิศทางสลับกัน

ตัวสังเกตโหนดทอร์กจะประกอบด้วย ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ เครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็ว เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (หน่วยประมวลผล) และวงจรแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล ซึ่งทำหน้าที่เป็นชุดเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณแอนะล็อกภายนอกกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 5 แสดงแนวทางและรายละเอียดการสร้างวงจรแปลงสัญญาณ พร้อมกับแสดงผลการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณดังกล่าว โดยที่วงจรแปลงสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นประกอบด้วย วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีการแยกชัด 13 บิต จำนวน 5 ช่องสัญญาณ และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีการแยกชัด 14 บิต จำนวน 1 ช่องสัญญาณ ผลการทดสอบ พบว่าวงจรแปลงสัญญาณดังกล่าวมีค่าเกินเก็บบทที่โดยประมาณ และมีมุมการเลื่อนเฟสแบบล่าช้าหลังที่สัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรงกับความถี่ของแรงดันอินพุต นอกจากนี้ค่าเกณฑ์ของวงจรแปลงสัญญาณสามารถปรับหรือลด หรือให้มีค่าเท่ากับ 0 เดซิเบลได้

ผลการทดสอบการทำงานของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว ได้นำเสนอในบทที่ 6 ของวิทยานิพนธ์ ในการทดสอบใช้เครื่องไดนาโมมิเตอร์ทำหน้าที่เป็นโหลดเชิงกลของระบบมอเตอร์และโหลดและทำหน้าที่วัดโหลดทอร์กจริงที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับโหลดทอร์กที่คำนวณได้จากตัวสังเกต และกำหนดให้สัญญาณโหลดทอร์กที่ถูกป้อนให้กับระบบมอเตอร์และโหลดและตัวสังเกตมี 2 ลักษณะ คือ โหลดทอร์กที่มีลักษณะเป็นสัญญาณลาดเอียงและสัญญาณขั้นบันได จากผลการทดสอบ พบว่าในสถานะคงตัว ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับมีผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่ไม่เท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวสังเกตในบทที่ 3 กรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าไม่เท่ากับหรือแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ในส่วนของผลการทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวพบว่า ในสถานะคงตัว ตัวสังเกตมีผลการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กใกล้เคียงกับหรือมีลักษณะตามรอยโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบมากกว่าผลคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กที่ได้จากตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ กล่าวคือ การคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวมีขนาดของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวน้อยกว่าการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 4 เช่นเดียวกัน

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับปรุงช่วงเวลาประวิงในการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์กของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวให้มีค่าน้อยกว่า 0.2 วินาที
2. ควรศึกษาและวิเคราะห์หาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสัญญาณตัวเลขโหลดทอร์กที่คำนวณได้จากตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว โดยที่วิธีการลดทอนดังกล่าวต้องทำให้สัญญาณของตัวเลขโหลดทอร์กมีช่วงเวลาประวิงที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ช่วงเวลาประวิงของสัญญาณตัวเลขโหลดทอร์กโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมน้อยที่สุด
3. การสร้างหรือใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และแผนการคำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก อาจใช้หน่วยประมวลผลที่เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือไมโครโปรเซสเซอร์ แทนการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อลดขนาดและพื้นที่ รวมถึงลดราคาค่าใช้จ่ายในการใช้งานของตัวสังเกตโหลดทอร์กดังกล่าว
4. ควรศึกษาและพัฒนาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดเสถียรภาพในระบบควบคุมแบบวงปิด ซึ่งอาจเป็นระบบควบคุมทางตำแหน่งหรือทางความเร็ว ในกรณีที่นำตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวไปใช้งานในระบบควบคุมแบบวงปิดแทนการใช้งานอุปกรณ์วัดทอร์ก

เอกสารอ้างอิง

- เจนวิทย์ เหลืองอร่าม และ ปิยวิทย์ เหลืองอร่าม. (2543). การเขียนโปรแกรมสำหรับ Applications ด้วย C/C++. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- วิโรจน์ แสงธทอง. (2542). การออกแบบตัวควบคุมพีดีแบบปรับค่าได้สำหรับระบบแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Baik, I.C., Kim, K.H., Kim, H.S., Moon, G.W., and Youn, M.J. (1996). Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding control with sliding load torque observer. **Proc. PESC 96 Conf. Power Electronics Specialists.** 2: 1242-1247.
- Buja, G.S., Menis, R., Valla, M.I. (1993). Disturbance torque estimation in a sensorless DC drive. **Proc. IECON 93 Int. Conf. Industrial Electronics, Control, and Instrumentation.** 2: 977-982.
- Cannon, R.H. (1967). **Dynamics of Physical Systems.** McGraw-Hill.
- Chapman, S.J. (1991). **Electric machinery fundamentals.** McGraw-Hill.
- Chen, C.T. (2001). **Digital Signal Processing.** Oxford University Press.
- Chung, S.K., Lee, Ko, J.H., J.S., and Youn, M.J. (1995). Robust speed control of brushless direct-drive motor using integral variable structure control with sliding mode observer. **Proc. IEE Conf. Electric Power Application.** 142(6): 361-370.
- Fitzgerald, A.E., Kingsley, C., and Umans, S.D. (1990). **Electric Machinery.** McGraw-Hill.
- Kim, C.K., Rhew, H.W., and Kim, Y.H. (1997). Robust speed control of PMSM using Kalman filter load torque observers. **Proc. IECON 97 Int. Conf. Industrial Electronics, Control and Instrumentation.** 2: 918-924.
- Ko, J.S. (1998). Asymptotically stable adaptive load torque observer for precision position control of BLDC motor. **Proc. IEE Conf. Electric Power Application.** 145(4): 383-386
- Leonhard, W. (1997). **Control of Electrical Drives.** Springer.
- Ogata, K. (1997). **Modern Control Engineering.** Prentice-Hall.

Slotine, J.J.E., and Li, W. (1991). **Applied Nonlinear Control**. Prentice-Hall.

Wang, W.J., and Chen, J.Y. (1999). A new sliding mode position controller with adaptive load torque estimator for an induction motor. **IEEE Trans. Energy Conversion**. 14(3): 413-418.

- Abrahamsen, F., Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., and Thogersen, P.B. (2000). Efficiency optimized control of medium-size induction motor drives. **Proc. IEEE Conf. Industry Applications**. 3: 1489-1496.
- Baghzouz, Y., and Tan, O.T. (1989). Optimal efficiency speed control of induction motors by variable rotor impedance. **IEEE Trans. Energy Conversion**. 4(2): 216-223.
- Chen, S., and Yeh, S-N. (1992). Optimal efficiency analysis of induction motors fed by variable-voltage and variable-frequency source. **IEEE Trans. Energy Conversion**. 7 (3): 537-543.
- Fransua, A., and Magureanu, R. (1984). **Electrical Machines and Drive Systems**. Technical Press.
- Kinnares, V., and Potivejkul, S. (1998). Modified harmonic loss model in PWM fed induction machines. **Proc. IEEE Conf. Asia Pacific**. (pp 535-538).
- Kioskeridis, I., and Margaris, N. (1996). Loss minimization in induction motor adjustable-speed drives. **IEEE Trans. Industrial Electronic**. 43(1): 226-231.
- Kueck, J.D. (1998). Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition. **Proc. IEEE Conf. Pulp and Paper Industry Technical**. (pp 67-72).
- Kusko, A., and Galler, D. (1983). Control means for minimization of losses in AC and DC motor drives. **IEEE Trans. Industry Applications**. 19(4): 561-570.
- Pillay, P., Nolan, R., and Haque, T. (1997). Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations. **IEEE Trans. Industry Applications**. 33(5): 1273-1282.
- Sousa, G.C.D., Bose, B.K., Cleland, J., Spiegel, R.J., and Chappell, P.J. (1992). Loss modeling of converter induction machine system for variable speed drive. **Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation**. 1: 114-120.

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดข้อมูลต่างๆ ของไอซีที่ใช้สำหรับวงจรแปลงสัญญาณ
ระหว่างสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล

ไอซี LTC1298



LTC1286/LTC1298

Micropower Sampling 12-Bit A/D Converters In S0-8 Packages

FEATURES

- 12-Bit Resolution
- 8-Pin SOIC Plastic Package
- Low Cost
- Low Supply Current: 250 μ A Typ.
- Auto Shutdown to 1nA Typ.
- Guaranteed $\pm 3/4$ LSB Max DNL
- Single Supply 5V to 9V Operation
- On-Chip Sample-and-Hold
- 60 μ s Conversion Time
- Sampling Rates:
 - 12.5 ksp/s (LTC1286)
 - 11.1 ksp/s (LTC1298)
- I/O Compatible with SPI, Microwire, etc.
- Differential Inputs (LTC1286)
- 2-Channel MUX (LTC1298)
- 3V Versions Available: LTC1285/LTC1288

APPLICATIONS

- Battery-Operated Systems
- Remote Data Acquisition
- Battery Monitoring
- Handheld Terminal Interface
- Temperature Measurement
- Isolated Data Acquisition

DESCRIPTION

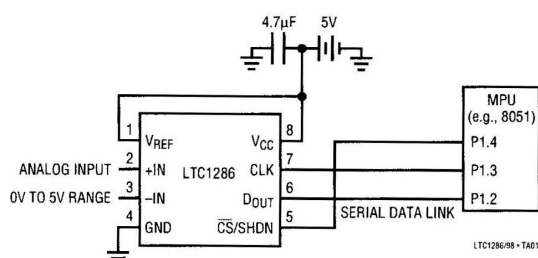
The LTC1286/LTC1298 are micropower, 12-bit, successive approximation sampling A/D converters. They typically draw only 250 μ A of supply current when converting and automatically power down to a typical supply current of 1nA whenever they are not performing conversions. They are packaged in 8-pin SO packages and operate on 5V to 9V supplies. These 12-bit, switched-capacitor, successive approximation ADCs include sample-and-holds. The LTC1286 has a single differential analog input. The LTC1298 offers a software selectable 2-channel MUX.

On-chip serial ports allow efficient data transfer to a wide range of microprocessors and microcontrollers over three wires. This, coupled with micropower consumption, makes remote location possible and facilitates transmitting data through isolation barriers.

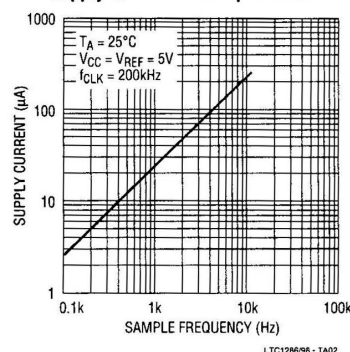
These circuits can be used in ratiometric applications or with an external reference. The high impedance analog inputs and the ability to operate with reduced spans (to 1.5V full scale) allow direct connection to sensors and transducers in many applications, eliminating the need for gain stages.

TYPICAL APPLICATIONS

25 μ W, S0-8 Package, 12-Bit ADC
Samples at 200Hz and Runs Off a 5V Supply



Supply Current vs Sample Rate



LTC1286/LTC1298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Notes 1 and 2)

Supply Voltage (V_{CC}) to GND	12V	Power Dissipation	500mW
Voltage		Operating Temperature Range	
Analog and Reference	-0.3V to $V_{CC} + 0.3V$	LTC1286C/LTC1298C	0°C to 70°C
Digital Inputs	-0.3V to 12V	LTC1286I/LTC1298I	-40°C to 85°C
Digital Output	-0.3V to $V_{CC} + 0.3V$	Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
		Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	300°C

PACKAGE/ORDER INFORMATION

	ORDER PART NUMBER		ORDER PART NUMBER
	LTC1286CN8 LTC1286IN8		LTC1286CS8 LTC1286IS8
	ORDER PART NUMBER		ORDER PART NUMBER
	LTC1298CN8 LTC1298IN8		LTC1298CS8 LTC1298IS8
		PART MARKING	
		1286C 1286I	
		1298C 1298I	

Consult factory for military grade parts.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
V_{CC}	Supply Voltage (Note 3)	LTC1286	4.5		9.0	V
		LTC1298	4.5		5.5	V
f_{CLK}	Clock Frequency	$V_{CC} = 5V$	(Note 4)	200		kHz
t_{CYC}	Total Cycle Time	LTC1286, $f_{CLK} = 200kHz$	80			μs
		LTC1298, $f_{CLK} = 200kHz$	90			μs
t_{hDI}	Hold Time, D_{IN} After $CLK\uparrow$	$V_{CC} = 5V$	150			ns
t_{suCS}	Setup Time $\overline{CS}\downarrow$ Before First $CLK\uparrow$ (See Operating Sequence)	LTC1286, $V_{CC} = 5V$	2			μs
		LTC1298, $V_{CC} = 5V$	2			μs
t_{suDI}	Setup Time, D_{IN} Stable Before $CLK\uparrow$	$V_{CC} = 5V$	400			ns
t_{WHCLK}	CLK High Time	$V_{CC} = 5V$	2			μs
t_{WLCLK}	CLK Low Time	$V_{CC} = 5V$	2			μs
t_{WHCS}	$\overline{CS}$ High Time Between Data Transfer Cycles	$V_{CC} = 5V$	2			μs
t_{WLCS}	$\overline{CS}$ Low Time During Data Transfer	LTC1286, $f_{CLK} = 200kHz$	75			μs
		LTC1298, $f_{CLK} = 200kHz$	85			μs

LTC1286/LTC1298

CONVERTER AND MULTIPLEXER CHARACTERISTICS (Note 5)

PARAMETER	CONDITIONS		LTC1286			LTC1298			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Resolution (No Missing Codes)		●	12			12			Bits
Integral Linearity Error	(Note 6)	●		±3/4	±2		±3/4	±2	LSB
Differential Linearity Error		●		±1/4	±3/4		±1/4	±3/4	LSB
Offset Error		●		3/4	±3		3/4	±3	LSB
Gain Error		●		±2	±8		±2	±8	LSB
Analog Input Range	(Note 7 and 8)	●	–0.05V to $V_{CC} + 0.05V$						V
REF Input Range (LTC1286) (Notes 7, 8, and 9)	$4.5 \leq V_{CC} \leq 5.5V$		1.5V to $V_{CC} + 0.05V$						V
	$5.5V < V_{CC} \leq 9V$		1.5V to 5.55V						V
Analog Input Leakage Current (Note 10)		●		±1			±1		μA

DIGITAL AND DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Note 5)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
V_{IH}	High Level Input Voltage	$V_{CC} = 5.25V$	●	2			V
V_{IL}	Low Level Input Voltage	$V_{CC} = 4.75V$	●			0.8	V
I_{IH}	High Level Input Current	$V_{IN} = V_{CC}$	●			2.5	μA
I_{IL}	Low Level Input Current	$V_{IN} = 0V$	●			–2.5	μA
V_{OH}	High Level Output Voltage	$V_{CC} = 4.75V, I_O = 10\mu A$	●	4.0	4.64		V
		$V_{CC} = 4.75V, I_O = 360\mu A$	●	2.4	4.62		V
V_{OL}	Low Level Output Voltage	$V_{CC} = 4.75V, I_O = 1.6mA$	●			0.4	V
I_{OZ}	Hi-Z Output Leakage	$\overline{CS} = High$	●			±3	μA
I_{SOURCE}	Output Source Current	$V_{OUT} = 0V$			–25		mA
I_{SINK}	Output Sink Current	$V_{OUT} = V_{CC}$			45		mA
R_{REF}	Reference Input Resistance (LTC1286)	$\overline{CS} = V_{CC}$			5000		MΩ
		$\overline{CS} = GND$			55		kΩ
I_{REF}	Reference Current (LTC1286)	$\overline{CS} = V_{CC}$	●		0.001	2.5	μA
		$t_{CYC} \geq 640\mu s, f_{CLK} \leq 25kHz$	●		90	140	μA
		$t_{CYC} = 80\mu s, f_{CLK} = 200kHz$	●		90	140	μA
I_{CC}	Supply Current	$\overline{CS} = V_{CC}$	●		0.001	±3.0	μA
		LTC1286, $t_{CYC} \geq 640\mu s, f_{CLK} \leq 25kHz$	●		200	400	μA
		LTC1286, $t_{CYC} = 80\mu s, f_{CLK} = 200kHz$	●		250	500	μA
		LTC1298, $t_{CYC} \geq 720\mu s, f_{CLK} \leq 25kHz$	●		290	490	μA
		LTC1298, $t_{CYC} = 90\mu s, f_{CLK} = 200kHz$	●		340	640	μA

DYNAMIC ACCURACY $f_{SAMPL} = 12.5kHz$ (LTC1286), $f_{SAMPL} = 11.1kHz$ (LTC1298) (Note 5)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
S/(N + D)	Signal-to-Noise Plus Distortion Ratio	1kHz/7kHz Input Signal		71/68		dB
THD	Total Harmonic Distortion (Up to 5th Harmonic)	1kHz/7kHz Input Signal		–84/–80		dB
SFDR	Spurious-Free Dynamic Range	1kHz/7kHz Input Signal		90/86		dB
	Peak Harmonic or Spurious Noise	1kHz/7kHz Input Signal		–90/–86		dB

LTC1286/LTC1298

AC CHARACTERISTICS (Note 5)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
t_{SMPL}	Analog Input Sample Time	See Operating Sequence		1.5		CLK Cycles
$f_{\text{SMPL(MAX)}}$	Maximum Sampling Frequency	LTC1286 LTC1298	● ●	12.5 11.1		kHz kHz
t_{CONV}	Conversion Time	See Operating Sequence		12		CLK Cycles
t_{dDO}	Delay Time, $\text{CLK}\downarrow$ to D_{OUT} Data Valid	See Test Circuits	●	250	600	ns
t_{dis}	Delay Time, $\text{CS}\uparrow$ to D_{OUT} Hi-Z	See Test Circuits	●	135	300	ns
t_{en}	Delay Time, $\text{CLK}\downarrow$ to D_{OUT} Enable	See Test Circuits	●	75	200	ns
t_{hDO}	Time Output Data Remains Valid After $\text{CLK}\downarrow$	$C_{\text{LOAD}} = 100\text{pF}$		230		ns
t_f	D_{OUT} Fall Time	See Test Circuits	●	20	75	ns
t_r	D_{OUT} Rise Time	See Test Circuits	●	20	75	ns
C_{IN}	Input Capacitance	Analog Inputs, On Channel Analog Inputs, Off Channel Digital Input		20 5 5		pF pF pF

The ● denotes specifications which apply over the full operating temperature range.

Note 1: Absolute maximum ratings are those values beyond which the life of a device may be impaired.

Note 2: All voltage values are with respect to GND.

Note 3: These devices are specified at 5V. For 3V specified devices, see LTC1285 and LTC1288.

Note 4: Increased leakage currents at elevated temperatures cause the S/H to droop, therefore it is recommended that $f_{\text{CLK}} \geq 120\text{kHz}$ at 85°C , $f_{\text{CLK}} \geq 75\text{kHz}$ at 70° and $f_{\text{CLK}} \geq 1\text{kHz}$ at 25°C .

Note 5: $V_{\text{CC}} = 5\text{V}$, $V_{\text{REF}} = 5\text{V}$ and $\text{CLK} = 200\text{kHz}$ unless otherwise specified.

Note 6: Linearity error is specified between the actual end points of the A/D transfer curve.

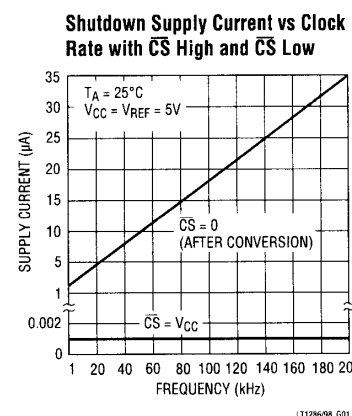
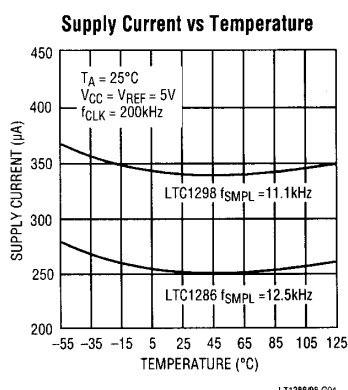
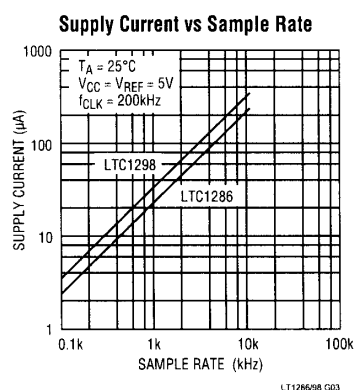
Note 7: Two on-chip diodes are tied to each reference and analog input which will conduct for reference or analog input voltages one diode drop below GND or one diode drop above V_{CC} . This spec allows 50mV forward bias of either diode for $4.5\text{V} \leq V_{\text{CC}} \leq 5.5\text{V}$. This means that as long as the reference or analog input does not exceed the supply voltage by more than 50mV the output code will be correct. To achieve an absolute 0V to 5V input voltage range will therefore require a minimum supply voltage of 4.950V over initial tolerance, temperature variations and loading. For $5.5\text{V} < V_{\text{CC}} \leq 9\text{V}$, reference and analog input range cannot exceed 5.55V. If reference and analog input range are greater than 5.55V, the output code will not be guaranteed to be correct.

Note 8: The supply voltage range for the LTC1286 is from 4.5V to 9V, but the supply voltage range for the LTC1298 is only from 4.5V to 5.5V.

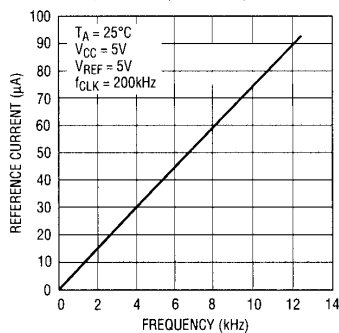
Note 9: Recommended operating conditions

Note 10: Channel leakage current is measured after the channel selection.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

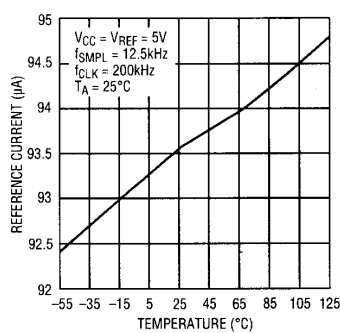


TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

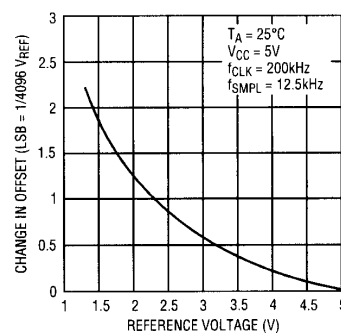
Reference Current vs
Sample Rate (LTC1286)

LT1286/98 G06

Reference Current vs Temperature

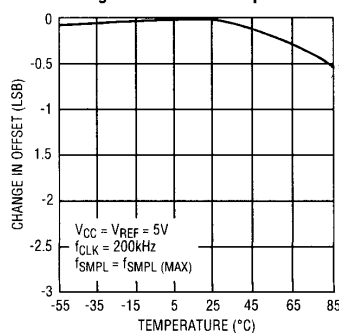


LT1286/98 G07

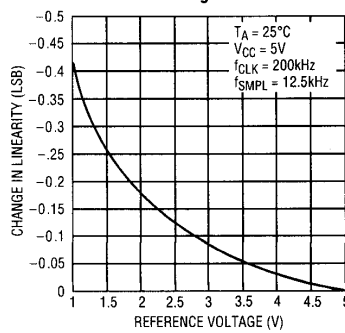
Change in Offset vs
Reference Voltage

LT1286/98 G08

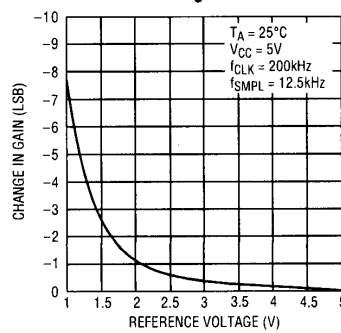
Change in Offset vs Temperature



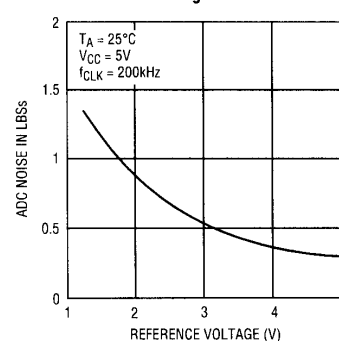
LT1286/98 G09

Change in Linearity vs
Reference Voltage

LT1286/98 G10

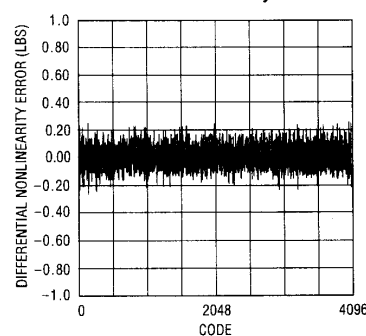
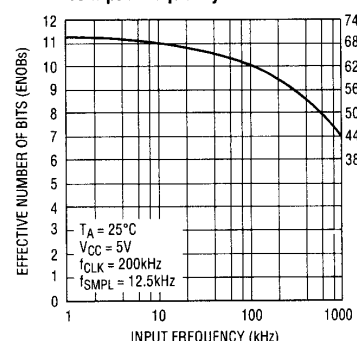
Change in Gain vs
Reference Voltage

LT1286/98 G11

Peak-to-Peak ADC Noise vs
Reference Voltage

LT1286/98 G15

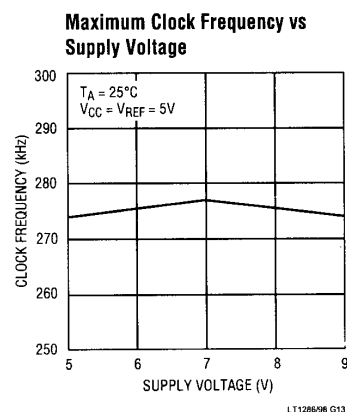
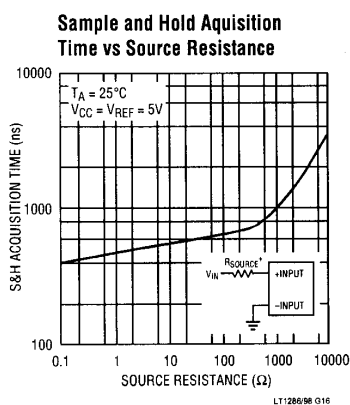
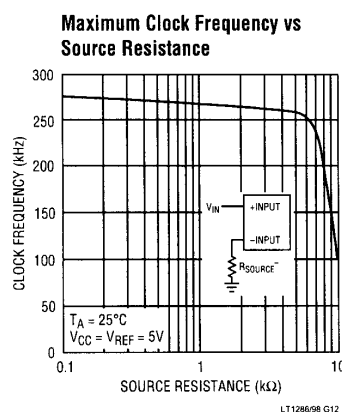
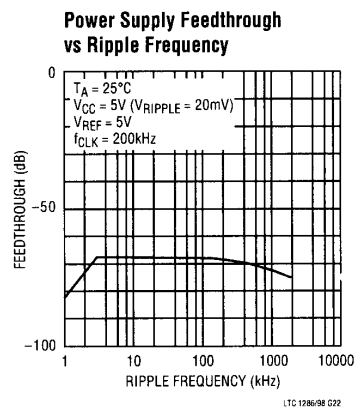
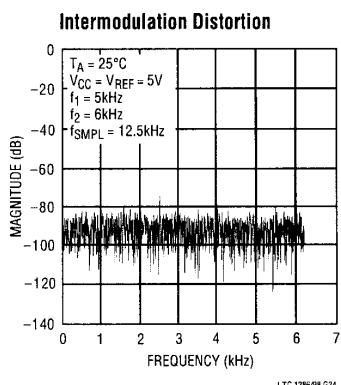
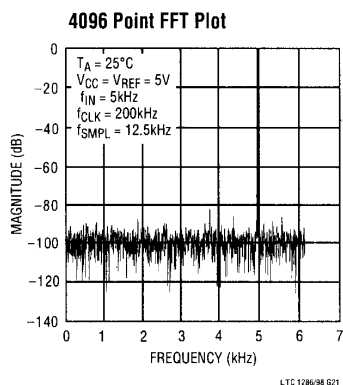
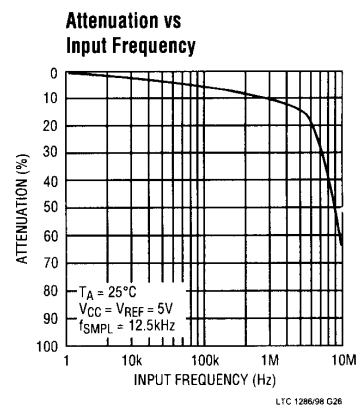
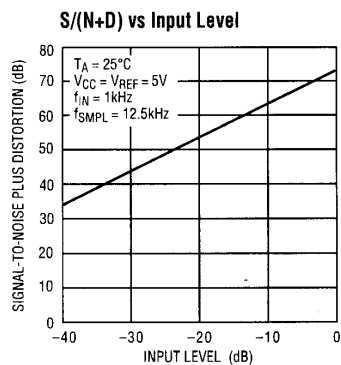
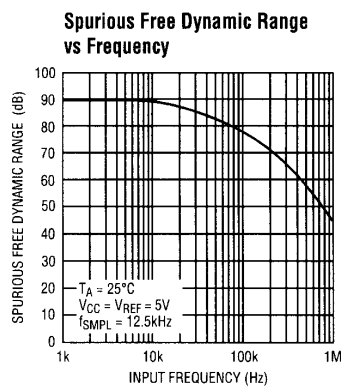
Differential Nonlinearity vs Code

Effective Bits and S/(N + D)
vs Input Frequency

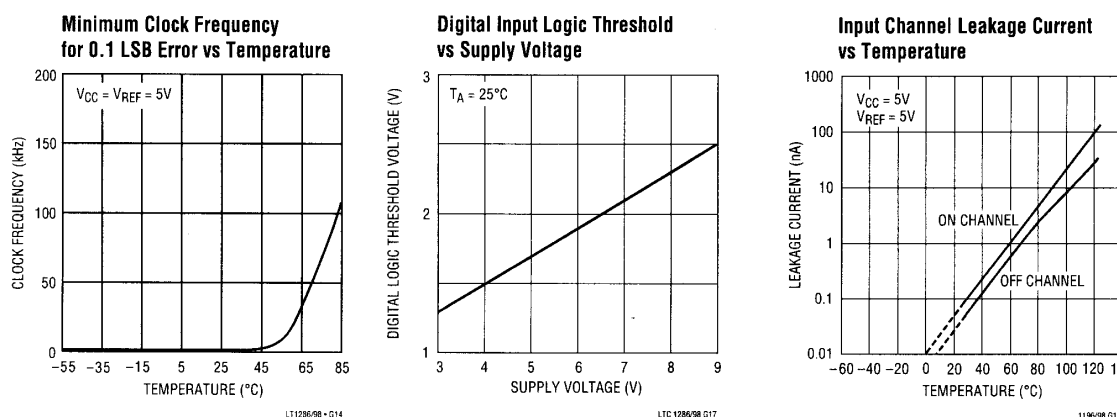
LTC 1286/98 G20

LTC1286/LTC1298

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



PIN FUNCTIONS

LTC1286

V_{REF} (Pin 1): Reference Input. The reference input defines the span of the A/D converter.

IN⁺ (Pin 2): Positive Analog Input.

IN⁻ (Pin 3): Negative Analog Input.

GND (Pin 4): Analog Ground. GND should be tied directly to an analog ground plane.

$\overline{CS}/SHDN$ (Pin 5): Chip Select Input. A logic low on this input enables the LTC1286. A logic high on this input disables and powers down the LTC1286.

D_{OUT} (Pin 6): Digital Data Output. The A/D conversion result is shifted out of this output.

CLK (Pin 7): Shift Clock. This clock synchronizes the serial data transfer and determines conversion speed.

V_{CC} (Pin 8): Power Supply Voltage. This pin provides power to the A/D converter. It must be kept free of noise and ripple by bypassing directly to the analog ground plane.

LTC1298

$\overline{CS}/SHDN$ (Pin 1): Chip Select Input. A logic low on this input enables the LTC1298. A logic high on this input disables and powers down the LTC1298.

CH0 (Pin 2): Analog Input.

CH1 (Pin 3): Analog Input.

GND (Pin 4): Analog Ground. GND should be tied directly to an analog ground plane.

D_{IN} (Pin 5): Digital Data Input. The multiplexer address is shifted into this input.

D_{OUT} (Pin 6): Digital Data Output. The A/D conversion result is shifted out of this output.

CLK (Pin 7): Shift Clock. This clock synchronizes the serial data transfer and determines conversion speed.

V_{CC}/V_{REF} (Pin 8): Power Supply and Reference Voltage. This pin provides power and defines the span of the A/D converter. It must be kept free of noise and ripple by bypassing directly to the analog ground plane.

ไอซี AD7538



LC²MOS
μP-Compatible 14-Bit DAC

AD7538

FEATURES

All Grades 14-Bit Monotonic Over the Full Temperature Range

Low Cost 14-Bit Upgrade for 12-Bit Systems

14-Bit Parallel Load with Double Buffered Inputs

Small 24-Pin, 0.3" DIP and SOIC

Low Output Leakage (<20 nA) Over the Full Temperature Range

APPLICATIONS

Microprocessor Based Control Systems

Digital Audio

Precision Servo Control

Control and Measurement in High Temperature Environments

GENERAL DESCRIPTION

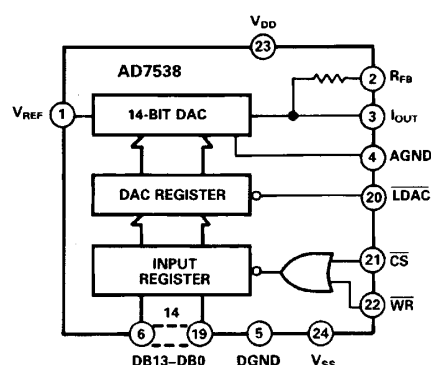
The AD7538 is a 14-bit monolithic CMOS D/A converter which uses laser trimmed thin-film resistors to achieve excellent linearity.

The DAC is loaded by a single 14-bit wide word using standard Chip Select and Memory Write Logic. Double buffering, which is optional using $\overline{\text{LDAC}}$, allows simultaneous update in a system containing multiple AD7538s.

A novel low leakage configuration (U.S. Patent No. 4,590,456) enables the AD7538 to exhibit excellent output leakage current characteristics over the specified temperature range.

The AD7538 is manufactured using the Linear Compatible CMOS (LC²MOS) process. It is speed compatible with most microprocessors and accepts TTL or CMOS logic level inputs.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT HIGHLIGHTS

- Guaranteed Monotonicity**
The AD7538 is guaranteed monotonic to 14-bits over the full temperature range for all grades.
- Low Cost**
The AD7538, with its 14-bit dynamic range, affords a low cost solution for 12-bit system upgrades.
- Small Package Size**
The AD7538 is packaged in a small 24-pin, 0.3" DIP and a 24-pin SOIC.
- Low Output Leakage**
By tying V_{SS} (Pin 24) to a negative voltage, it is possible to achieve a low output leakage current at high temperatures.
- Wide Power Supply Tolerance**
The device operates on a +12 V to +15 V V_{DD} , with a $\pm 5\%$ tolerance on this nominal figure. All specifications are guaranteed over this range.

REV. A

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 617/329-4700 Fax: 617/326-8703

AD7538—SPECIFICATIONS¹ ($V_{DD} = +11.4\text{ V}$ to $+15.75\text{ V}$ ², $V_{REF} = +10\text{ V}$; $V_{PIN3} = V_{PIN4} = 0\text{ V}$, $V_{SS} = -300\text{ mV}$. All specifications T_{MIN} to T_{MAX} unless otherwise noted.)

Parameter	J, K Versions	A, B Versions	S Version	T Version	Units	Test Conditions/Comments
ACCURACY						
Resolution	14	14	14	14	Bits	
Relative Accuracy	± 2	± 1	± 2	± 1	LSB max	All Grades Guaranteed Monotonic Over Temperature.
Differential Nonlinearity	± 1	± 1	± 1	± 1	LSB max	Measured Using Internal R_{FB} DAC Registers Loaded with All 1s.
Full-Scale Error						
+25°C	± 4	± 4	± 4	± 4	LSB max	
T_{MIN} to T_{MAX}	± 8	± 5	± 10	± 6	LSB max	
Gain Temperature Coefficient ³ : $\Delta\text{Gain}/\Delta\text{Temperature}$	± 2	± 2	± 2	± 2	ppm/°C typ	
Output Leakage Current I_{OUT} (Pin 3)						
+25°C	± 5	± 5	± 5	± 5	nA max	All Digital Inputs 0 V
T_{MIN} to T_{MAX}	± 10	± 10	± 20	± 20	nA max	$V_{SS} = -300\text{ mV}$
T_{MIN} to T_{MAX}	± 25	± 25	± 150	± 150	nA max	$V_{SS} = 0\text{ V}$
REFERENCE INPUT						
Input Resistance, Pin 1	3.5	3.5	3.5	3.5	k Ω min	Typical Input Resistance = 6 k Ω
	10	10	10	10	k Ω max	
DIGITAL INPUTS						
V_{IH} (Input High Voltage)	2.4	2.4	2.4	2.4	V min	
V_{IL} (Input Low Voltage)	0.8	0.8	0.8	0.8	V max	
I_{IN} (Input Current)						
+25°C	± 1	± 1	± 1	± 1	μA max	$V_{IN} = 0\text{ V}$ or V_{DD}
T_{MIN} to T_{MAX}	± 10	± 10	± 10	± 10	μA max	
C_{IN} (Input Capacitance) ³	7	7	7	7	pF max	
POWER SUPPLY						
V_{DD} Range	11.4/15.75	11.4/15.75	11.4/15.75	11.4/15.75	V min/V max	Specification Guaranteed Over This Range
V_{SS} Range	-200/-500	-200/-500	-200/-500	-200/-500	mV min/mV max	All Digital Inputs V_{IL} or V_{IH}
I_{DD}	4	4	4	4	mA max	All Digital Inputs 0 V or V_{DD}
	500	500	500	500	μA max	

These characteristics are included for Design Guidance only and are not subject to test. ($V_{DD} = +11.4\text{ V}$ to $+15.75\text{ V}$, $V_{REF} = +10\text{ V}$, $V_{PIN3} = V_{PIN4} = 0\text{ V}$, $V_{SS} = 0\text{ V}$ or -300 mV , Output Amplifier is AD711 except where noted.)

AC PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Parameter	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{MIN}, T_{MAX}$		Units	Test Conditions/Comments
Output Current Settling Time	1.5		μs max	To 0.003% of Full-Scale Range. I_{OUT} Load = 100 Ω , $C_{EXT} = 13\text{ pF}$. DAC Register Alternately Loaded with All 1s and All 0s. Typical Value of Settling Time Is 0.8 μs .
Digital to Analog Glitch Impulse	20		nV-sec typ	Measured with $V_{REF} = 0\text{ V}$. I_{OUT} Load = 100 Ω , $C_{EXT} = 13\text{ pF}$. DAC Register Alternately Loaded with All 1s and All 0s.
Multiplying Feedthrough Error	3	5	mV p-p typ	$V_{REF} = \pm 10\text{ V}$, 10 kHz Sine Wave DAC Register Loaded with All 0s.
Power Supply Rejection $\Delta\text{Gain}/\Delta V_{DD}$	± 0.01	± 0.02	% per % max	$\Delta V_{DD} = \pm 5\%$
Output Capacitance C_{OUT} (Pin 3)	260	260	pF max	DAC Register Loaded with All 1s
C_{OUT} (Pin 3)	130	130	pF max	DAC Register Loaded with All 0s
Output Noise Voltage Density (10 Hz–100 kHz)	15		nV $\sqrt{\text{Hz}}$ typ	Measured Between R_{FB} and I_{OUT}

NOTES

Temperature range as follows: J, K Versions: 0°C to $+70^\circ\text{C}$
A, B Versions: -25°C to $+85^\circ\text{C}$
S, T Versions: -55°C to $+125^\circ\text{C}$

²Specifications are guaranteed for a V_{DD} of $+11.4\text{ V}$ to $+15.75\text{ V}$. At $V_{DD} = 5\text{ V}$, the device is fully functional with degraded specifications.

³Sample tested to ensure compliance.

Specifications subject to change without notice.

AD7538

TIMING CHARACTERISTICS¹ ($V_{DD} = +11.4 \text{ V to } +15.75 \text{ V}$, $V_{REF} = +10 \text{ V}$, $V_{PIN3} = V_{PIN4} = 0 \text{ V}$, $V_{SS} = 0 \text{ V or } -300 \text{ mV}$.
All specifications T_{MIN} to T_{MAX} unless otherwise noted. See Figure 1 for Timing Diagram.)

Parameter	Limit at $T_A = +25^\circ\text{C}$	Limit at $T_A = 0^\circ\text{C to } +70^\circ\text{C}$ $T_A = -25^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	Limit at $T_A = -55^\circ\text{C to } +125^\circ\text{C}$	Units	Test Conditions/Comments
t_1	0	0	0	ns min	$\overline{\text{CS}}$ to $\overline{\text{WR}}$ Setup Time
t_2	0	0	0	ns min	$\overline{\text{CS}}$ to $\overline{\text{WR}}$ Hold Time
t_3	170	200	240	ns min	LDAC Pulse Width
t_4	170	200	240	ns min	Write Pulse Width
t_5	140	160	180	ns min	Data Setup Time
t_6	20	20	30	ns min	Data Hold Time

NOTES

¹Temperature range as follows: J, K Versions: $0^\circ\text{C to } +70^\circ\text{C}$
A, B Versions: $-25^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$
S, T Versions: $-55^\circ\text{C to } +125^\circ\text{C}$

Specifications subject to change without notice.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

($T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise stated)

V_{DD} (Pin 23) to DGND $-0.3 \text{ V, } +17 \text{ V}$
 V_{SS} (Pin 24) to AGND $-15 \text{ V, } +0.3 \text{ V}$
 V_{REF} (Pin 1) to AGND $\pm 25 \text{ V}$
 V_{RFB} (Pin 2) to AGND $\pm 25 \text{ V}$
 Digital Input Voltage (Pins 6–22)
 to DGND $-0.3 \text{ V, } V_{DD} + 0.3 \text{ V}$
 V_{PIN3} to DGND $-0.3 \text{ V, } V_{DD} + 0.3 \text{ V}$
 AGND to DGND $-0.3 \text{ V, } V_{DD} + 0.3 \text{ V}$
 Power Dissipation (Any Package)
 To $+75^\circ\text{C}$ 1000 mW
 Derates Above $+75^\circ\text{C}$ $10 \text{ mW}/^\circ\text{C}$

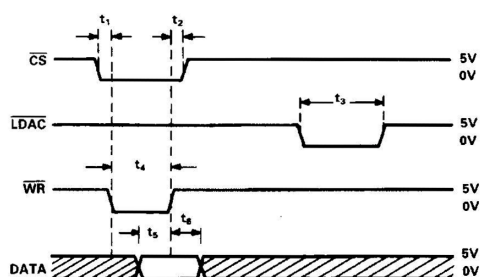
Operating Temperature Range

Commercial (J, K Versions) $0^\circ\text{C to } +70^\circ\text{C}$
 Industrial (A, B Versions) $-25^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$
 Extended (S, T Versions) $-55^\circ\text{C to } +125^\circ\text{C}$
 Storage Temperature $-65^\circ\text{C to } +150^\circ\text{C}$
 Lead Temperature (Soldering, 10 sec) $+300^\circ\text{C}$

*Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the AD7538 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



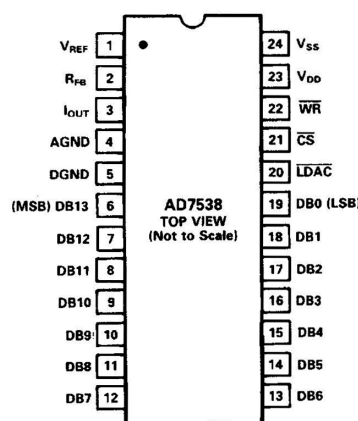
NOTES

1. ALL INPUT SIGNAL RISE AND FALL TIMES MEASURES FROM 10% TO 90% OF $+5 \text{ V}$. $t_r = t_f = 20 \text{ ns}$.

2. TIMING MEASUREMENT REFERENCE LEVEL IS $\frac{V_{HI} + V_{LI}}{2}$

3. IF LDAC IS ACTIVATED PRIOR TO THE RISING EDGE OF WR, THEN IT MUST STAY LOW FOR t_3 or LONGER AFTER WR GOES HIGH.

Figure 1. Timing Diagram

PIN CONFIGURATION
DIP, SOIC


AD7538

TERMINOLOGY

RELATIVE ACCURACY

Relative accuracy or endpoint nonlinearity is a measure of the maximum deviation from a straight line passing through the endpoints of the DAC transfer function. It is measured after adjusting for zero error and full-scale error and is normally expressed in Least Significant Bits or as a percentage of full-scale reading.

DIFFERENTIAL NONLINEARITY

Differential nonlinearity is the difference between the measured change and the ideal 1 LSB change between any two adjacent codes. A specified differential nonlinearity of ± 1 LSB max over the operating temperature range ensures monotonicity.

GAIN ERROR

Gain error is a measure of the output error between an ideal DAC and the actual device output. It is measured with all 1s in the DAC after offset error has been adjusted out and is expressed

in Least Significant Bits. Gain error is adjustable to zero with an external potentiometer.

DIGITAL-TO-ANALOG GLITCH IMPULSE

The amount of charge injected from the digital inputs to the analog output when the inputs change state is called Digital-to-Analog Glitch Impulse. This is normally specified as the area of the glitch in either pA-secs or nV-secs depending upon whether the glitch is measured as a current or voltage. It is measured with $V_{REF} = AGND$.

OUTPUT CAPACITANCE

This is the capacitance from I_{OUT} to AGND.

OUTPUT LEAKAGE CURRENT

Output Leakage Current is current which appears at I_{OUT} with the DAC register loaded to all 0s.

MULTIPLYING FEEDTHROUGH ERROR

This is the ac error due to capacitive feedthrough from V_{REF} terminal to I_{OUT} with DAC register loaded to all zeros.

ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Relative Accuracy	Full-Scale Error	Package Option*
AD7538JN	0°C to +70°C	± 2 LSB	± 8 LSB	N-24
AD7538KN	0°C to +70°C	± 1 LSB	± 4 LSB	N-24
AD7538JR	0°C to +70°C	± 2 LSB	± 8 LSB	R-24
AD7538KR	0°C to +70°C	± 1 LSB	± 4 LSB	R-24
AD7538AQ	-25°C to +85°C	± 2 LSB	± 8 LSB	Q-24
AD7538BQ	-25°C to +85°C	± 1 LSB	± 4 LSB	Q-24
AD7538SQ	-55°C to +125°C	± 2 LSB	± 8 LSB	Q-24
AD7538TQ	-55°C to +125°C	± 1 LSB	± 4 LSB	Q-24

*N = Plastic DIP; Q = Cerdip; R = SOIC.

PIN FUNCTION DESCRIPTION

Pin	Mnemonic	Description																									
1	V _{REF}	Voltage Reference.																									
2	R _{FB}	Feedback Resistor. Used to close the loop around an external op amp.																									
3	I _{OUT}	Current Output Terminal.																									
4	AGND	Analog Ground																									
5	DGND	Digital Ground																									
6-19	DB13-DB0	Data Inputs. Bit 13 (MSB) to Bit 0 (LSB).																									
20	<u>LDAC</u>	Chip Select Input. Active LOW.																									
21	<u>CS</u>	Asynchronous Load DAC Input. Active LOW.																									
22	<u>WR</u>	Write Input. Active LOW.																									
<table><tr><th>CS</th><th>LDAC</th><th>WR</th><th>OPERATION</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>Load Input Register.</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>X</td><td>Load DAC Register from Input Register.</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>Input and DAC Registers are Transparent.</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>X</td><td>No Operation.</td></tr><tr><td>X</td><td>1</td><td>1</td><td>No Operation.</td></tr></table>				CS	LDAC	WR	OPERATION	0	1	0	Load Input Register.	1	0	X	Load DAC Register from Input Register.	0	0	0	Input and DAC Registers are Transparent.	1	1	X	No Operation.	X	1	1	No Operation.
CS	LDAC	WR	OPERATION																								
0	1	0	Load Input Register.																								
1	0	X	Load DAC Register from Input Register.																								
0	0	0	Input and DAC Registers are Transparent.																								
1	1	X	No Operation.																								
X	1	1	No Operation.																								
NOTE: X Don't Care.																											
23	V _{DD}	+12 V to +15 V supply input.																									
24	V _{SS}	Bias pin for High Temperature Low Leakage configuration. To implement low leakage system, the pin should be at a negative voltage. See Figures 4 and 5 for recommended circuitry.																									

AD7538

D/A SECTION

Figure 2 shows a simplified circuit diagram for the AD7538 D/A section. The three MSBs of the 14-bit Data Word are decoded to drive the seven switches A-G. The 11 LSBs of the Data Word consist of an R-2R ladder operated in a current steering configuration.

The R-2R ladder current is 1/8 of the total reference input current. 7/8 I flows in the parallel ladder structure. Switches A-G steer equally weighted currents between I_{OUT} and AGND. Since the input resistance at V_{REF} is constant, it may be driven by a voltage source or a current source of positive or negative polarity.

CIRCUIT INFORMATION

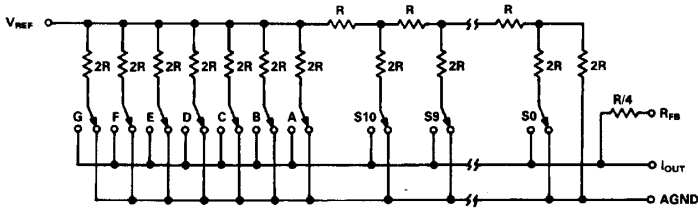


Figure 2. Simplified Circuit Diagram for the AD7538 D/A Section

EQUIVALENT CIRCUIT ANALYSIS

Figure 3 shows an equivalent circuit for the analog section of the AD7538 D/A converter. The current source I_{LEAKAGE} is composed of surface and junction leakages. The resistor R_O denotes the equivalent output resistance of the DAC which varies with input code. C_{OUT} is the capacitance due to the current steering switches and varies from about 90 pF to 180 pF (typical values) depending upon the digital input. g(V_{REF}, N) is the Thevenin equivalent voltage generator due to the reference input voltage, V_{REF}, and the transfer function of the DAC ladder, N.

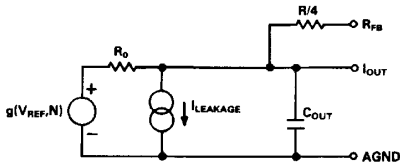


Figure 3. AD7538 Equivalent Analog Output Circuit

DIGITAL SECTION

The digital inputs are designed to be both TTL and 5 V CMOS compatible. All logic inputs are static protected MOS gates with typical input currents of less than 1 nA. To minimize power supply currents, it is recommended that the digital input voltages be driven as close as possible to 0 V and 5 V logic levels.

UNIPOLAR BINARY OPERATION (2-QUADRANT MULTIPLICATION)

Figure 4 shows the circuit diagram for unipolar binary operation. With an ac input, the circuit performs 2 quadrant multiplication. The code table for Figure 4 is given in Table I.

Capacitor C1 provides phase compensation and helps prevent overshoot and ringing when high-speed op amps are used.

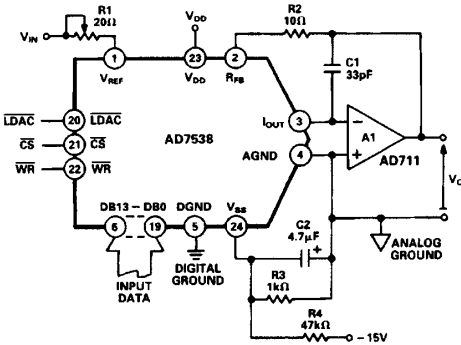


Figure 4. Unipolar Binary Operation

Table I. Unipolar Binary Code Table for AD7538

Binary Number In DAC Register	Analog Output, V _{OUT}
MSB LSB	
11 1111 1111 1111	$-V_{IN} \left(\frac{16383}{16384} \right)$
10 0000 0000 0000	$-V_{IN} \left(\frac{8192}{16384} \right) = -1/2 V_{IN}$
00 0000 0000 0001	$-V_{IN} \left(\frac{1}{16384} \right)$
00 0000 0000 0000	0 V

AD7538

For zero offset adjustment, the DAC register is loaded with all 0s and amplifier offset (V_{OS}) adjusted so that V_{OUT} is 0 V. Adjusting V_{OUT} to 0 V is not necessary in many applications, but it is recommended that V_{OS} be no greater than $(25 \times 10^{-6}) (V_{REF})$ to maintain specified DAC accuracy (see Applications Hints).

Full-scale trimming is accomplished by loading the DAC register with all 1s and adjusting R1 so that $V_{OUTA} = -V_{IN}$ (16383/16384). For high temperature operation, resistors and potentiometers should have a low Temperature Coefficient. In many applications, because of the excellent Gain T.C. and Gain Error specifications of the AD7538, Gain Error trimming is not necessary. In fixed reference applications, full scale can also be adjusted by omitting R1 and R2 and trimming the reference voltage magnitude.

BIPOLAR OPERATION (4-QUADRANT MULTIPLICATION)

The recommended circuit diagram for bipolar operation is shown in Figure 5. Offset binary coding is used. The code table for Figure 5 is given in Table II.

With the DAC loaded to 10 0000 0000 0000, adjust R1 for $V_O = 0$ V. Alternatively, one can omit R1 and R2 and adjust the ratio of R5 and R6 for $V_O = 0$ V. Full-scale trimming can be accomplished by adjusting the amplitude of V_{IN} or by varying the value of R7.

The values given for R1, R2 are the minimum necessary to calibrate the system for resistors, R5, R6, R7 ratio matched to 0.1%. System linearity error is independent of resistor ratio matching and is affected by DAC linearity error only.

When operating over a wide temperature range, it is important that the resistors be of the same type so that their temperature coefficients match.

For further information see "CMOS DAC Application Guide", 3rd Edition, Publication Number G872b-8-1/89 available from Analog Devices.

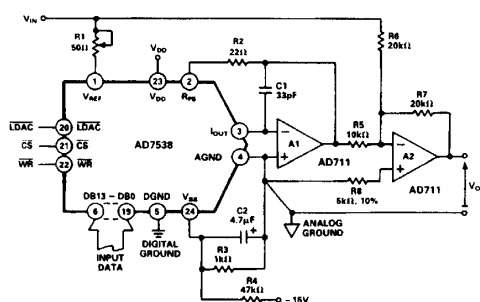


Figure 5. Bipolar Operation

LOW LEAKAGE CONFIGURATION

For CMOS Multiplying D/A converters, as the device is operated at higher temperatures, the output leakage current increases. For a 14-bit resolution system, this can be a significant source of error. The AD7538 features a leakage reduction configuration (U.S. Patent No. 4,590,456) to keep the leakage current low over an extended temperature range. One may operate the device with or without this configuration. If V_{SS} (Pin 24) is tied to AGND then the DAC will exhibit normal output leakage current at high temperatures. To use the low leakage facility,

Table II. Bipolar Code Table for Offset Binary Circuit of Figure 5.

Binary Number In DAC Register MSB LSB	Analog Output V_{OUT}
11 1111 1111 1111	$+V_{IN} \left(\frac{8191}{8192} \right)$
10 0000 0000 0001	$+V_{IN} \left(\frac{1}{8192} \right)$
10 0000 0000 0000	0 V
01 1111 1111 1111	$-V_{IN} \left(\frac{1}{8192} \right)$
00 0000 0000 0000	$-V_{IN} \left(\frac{8191}{8192} \right)$

V_{SS} should be tied to a voltage of approximately -0.3 V as in Figures 4 and 5. A simple resistor divider (R3, R4) produces approximately -300 mV from -15 V. The capacitor C2 in parallel with R3 is an integral part of the low leakage configuration and must be 4.7 μ F or greater. Figure 6 is a plot of leakage current versus temperature for both conditions. It clearly shows the improvement gained by using the low leakage configuration.

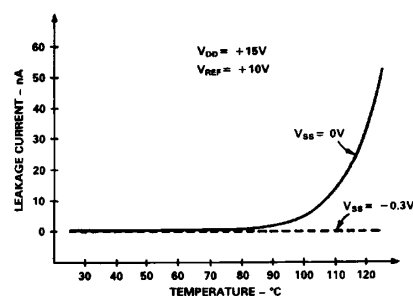


Figure 6. Graph of Typical Leakage Current vs. Temperature for AD7538

PROGRAMMABLE GAIN AMPLIFIER

The circuit shown in Figure 7 provides a programmable gain amplifier (PGA). In it the DAC behaves as a programmable resistance and thus allows the circuit gain to be digitally controlled.

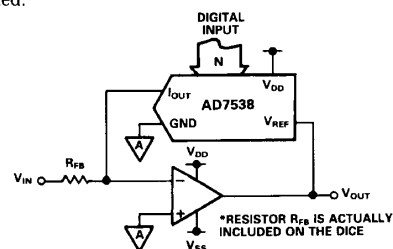


Figure 7. Programmable Gain Amplifier (PGA)

AD7538

The transfer function of Figure 7 is:

$$\text{Gain} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_{EQ}}{R_{FB}} \quad (1)$$

R_{EQ} is the equivalent transfer impedance of the DAC from the V_{REF} pin to the I_{OUT} pin and can be expressed as

$$R_{EQ} = \frac{2^n R_{IN}}{N} \quad (2)$$

Where: n is the resolution of the DAC

N is the DAC input code in decimal

R_{IN} is the constant input impedance of the DAC ($R_{IN} = R_{LAD}$)

Substituting this expression into Equation 1 and assuming zero gain error for the DAC ($R_{IN} = R_{FB}$) the transfer function simplifies to

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{2^n}{N} \quad (3)$$

The ratio $N/2^n$ is commonly represented by the term D and, as such, is the fractional representation of the digital input word.

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{2^n}{N} = -\frac{1}{D} \quad (4)$$

Equation 4 indicates that the gain of the circuit can be varied from 16,384 down to unity (actually 16,384/16,383) in 16,383 steps. The all 0s code is never applied. This avoids an open-loop condition thereby saturating the amplifier. With the all 0s code excluded there remains $2^n - 1$ possible input codes allowing a choice of $2^n - 1$ output levels. In dB terms the dynamic range is

$$20 \log_{10} \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 20 \log_{10} (2^n - 1) = 84 \text{ dB.}$$

APPLICATION HINTS

Output Offset: CMOS D/A converters in circuits such as Figures 4 and 5 exhibit a code dependent output resistance which in turn can cause a code dependent error voltage at the output of the amplifier. The maximum amplitude of this error, which adds to the D/A converter nonlinearity, depends on V_{OS} , where V_{OS} is the amplifier input offset voltage. To maintain specified accuracy with V_{REF} at 10 V, it is recommended that V_{OS} be no greater than 0.25 mV, or $(25 \times 10^{-6}) (V_{REF})$, over the temperature range of operation. The AD711 is a suitable op amp. The op amp has a wide bandwidth and high slew rate and is recommended for ac and other applications requiring fast settling.

General Ground Management: Since the AD7538 is specified for high accuracy, it is important to use a proper grounding technique. AC or transient voltages between AGND and DGND can cause noise injection into the analog output. The simplest method of ensuring that voltages at AGND and DGND are equal is to tie AGND and DGND together at the AD7538. In more complex systems where the AGND and DGND intertie is on the backplane, it is recommended that two diodes be connected in inverse parallel between the AD7538 AGND and DGND pins (1N914 or equivalent).

MICROPROCESSOR INTERFACING

The AD7538 is designed for easy interfacing to 16-bit microprocessors and can be treated as a memory mapped peripheral. This reduces the amount of external logic needed for interfacing to a minimal.

AD7538-8086 INTERFACE

Figure 8 shows the 8086 processor interface to a single device. In this setup the double buffering feature (using LDAC) of the DAC is not used. The 14-bit word is written to the DAC in one MOV instruction and the analog output responds immediately.

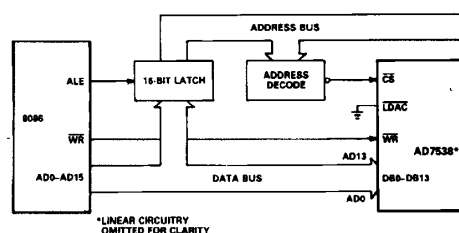


Figure 8. AD7538-8086 Interface Circuit

In a multiple DAC system the double buffering of the AD7538 allows the user to simultaneously update all DACs. In Figure 9, a 14-bit word is loaded to the Input Registers of each of the DACs in sequence. Then, with one instruction to the appropriate address, CS4 (i.e., LDAC) is brought low, updating all the DACs simultaneously.

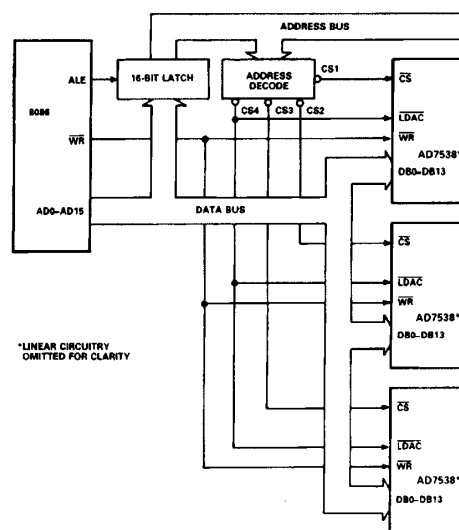


Figure 9. AD7538-8086 Interface: Multiple DAC System

AD7538

AD7538-MC68000 INTERFACE

Figure 10 shows the MC68000 processor interface to a single device. In this setup the double buffering feature of the DAC is not used and the appropriate data is written into the DAC in one MOVE instruction.

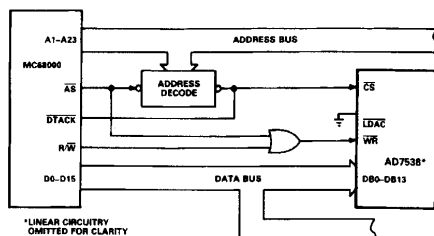


Figure 10. AD7538-MC68000 Interface

DIGITAL FEEDTHROUGH

The digital inputs to the AD7538 are directly connected to the

microprocessor bus in the preceding interface configurations. These inputs will be constantly changing even when the device is not selected. The high frequency logic activity on the bus can feed through the DAC package capacitance to show up as noise on the analog output. To minimize this Digital Feedthrough isolate the DAC from the noise source. Figure 11 shows an interface circuit which uses this technique. All data inputs are latched from the bus by the CS signal. One may also use other means, such as peripheral interface devices, to reduce the Digital Feedthrough.

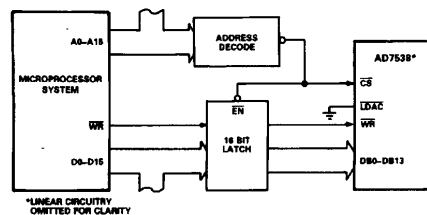
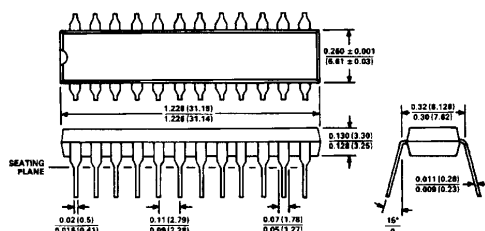


Figure 11. AD7538 Interface Circuit Using Latches to Minimize Digital Feedthrough

OUTLINE DIMENSIONS

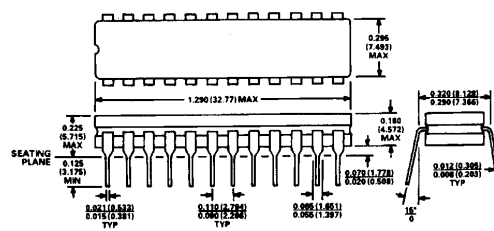
Dimensions shown in inches and (mm).

24-Pin Plastic Suffix (N)



- NOTES
1. LEAD NO. 1 IDENTIFIED BY DOT OR NOTCH.
 2. PLASTIC LEADS WILL BE EITHER SOLDER DIPPED OR TIN LEAD PLATED IN ACCORDANCE WITH MIL-M-38510 REQUIREMENTS.

24-Pin Cerdip (Suffix Q)



- NOTES
1. LEAD NO. 1 IDENTIFIED BY DOT OR NOTCH.
 2. CERDIP LEADS WILL BE EITHER TIN PLATED OR SOLDER DIPPED IN ACCORDANCE WITH MIL-M-38510 REQUIREMENTS.

C1054-9-5687

PRINTED IN U.S.A.

ไอซี 74LS241

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

August 1986
Revised March 2000

DM74LS240 • DM74LS241

Octal 3-STATE Buffer/Line Driver/Line Receiver

General Description

These buffers/line drivers are designed to improve both the performance and PC board density of 3-STATE buffers/drivers employed as memory-address drivers, clock drivers, and bus-oriented transmitters/receivers. Featuring 400 mV of hysteresis at each low current PNP data line input, they provide improved noise rejection and high fanout outputs and can be used to drive terminated lines down to 133Ω.

Features

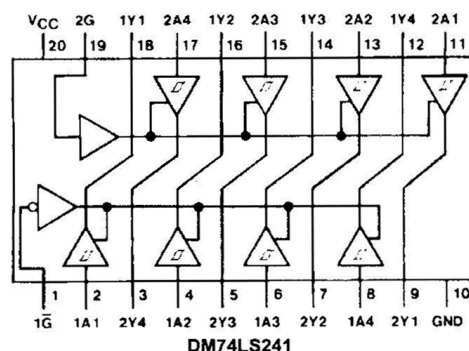
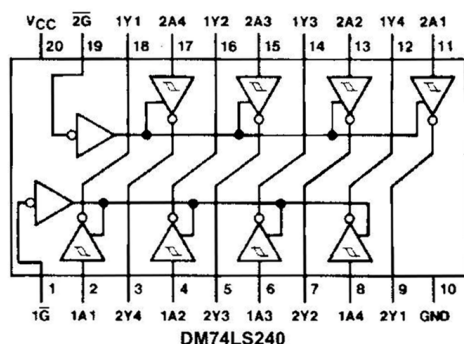
- 3-STATE outputs drive bus lines directly
- PNP inputs reduce DC loading on bus lines
- Hysteresis at data inputs improves noise margins
- Typical I_{OL} (sink current)
24 mA
- Typical I_{OH} (source current)
-15 mA
- Typical propagation delay times
Inverting 10.5 ns
Noninverting 12 ns
- Typical enable/disable time 18 ns
- Typical power dissipation (enabled)
Inverting 130 mW
Noninverting 135 mW

Ordering Code:

Order Number	Package Number	Package Description
DM74LS240WM	M20B	20-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-013, 0.300 Wide
DM74LS240SJ	M20D	20-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
DM74LS240N	N20A	20-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide
DM74LS241WM	M20B	20-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-013, 0.300 Wide
DM74LS241N	N20A	20-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide

Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

Connection Diagrams



DM74LS240 • DM74LS241 Octal 3-STATE Buffer/Line Driver/Line Receiver

Function Tables

DM74LS240

Inputs		Output
$\overline{G}$	A	Y
L	L	H
L	H	L
H	X	Z

DM74LS241

Inputs				Outputs	
G	$\overline{G}$	1A	2A	1Y	2Y
X	L	L	X	L	
X	L	H	X	H	
X	H	X	X	Z	
H	X	X	L		L
H	X	X	H		H
L	X	X	X		Z

L = LOW Logic Level
 H = HIGH Logic Level
 X = Either LOW or HIGH Logic Level
 Z = High Impedance

Function Tables

DM74LS240

Inputs		Output
$\overline{G}$	A	Y
L	L	H
L	H	L
H	X	Z

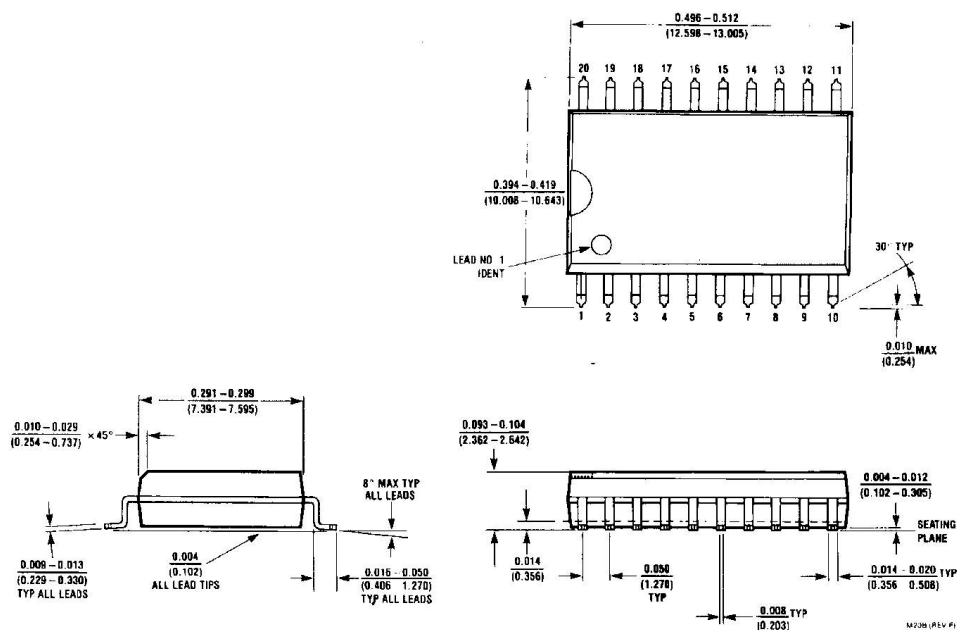
DM74LS241

Inputs				Outputs	
G	$\overline{G}$	1A	2A	1Y	2Y
X	L	L	X	L	
X	L	H	X	H	
X	H	X	X	Z	
H	X	X	L		L
H	X	X	H		H
L	X	X	X		Z

L = LOW Logic Level
 H = HIGH Logic Level
 X = Either LOW or HIGH Logic Level
 Z = High Impedance

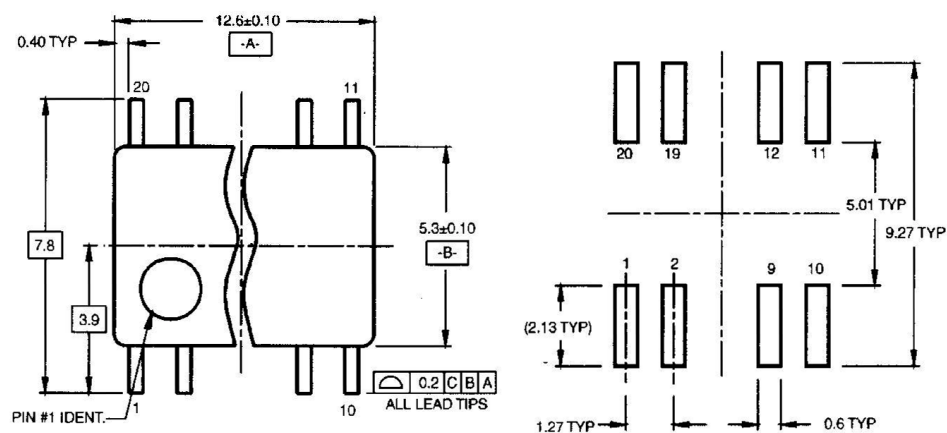
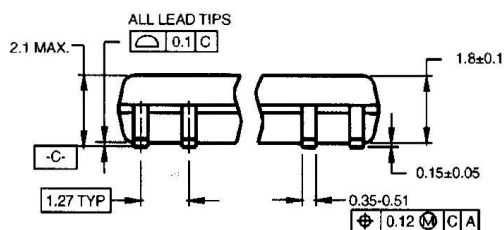
Switching Characteristicsat $V_{CC} = 5V$ and $T_A = 25^\circ C$

Symbol	Parameter	Conditions	Max	Units
t_{PLH}	Propagation Delay Time LOW-to-HIGH Level Output	$C_L = 45 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 14	ns
			DM74LS241 18	
t_{PHL}	Propagation Delay Time HIGH-to-LOW Level Output	$C_L = 45 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 18	ns
			DM74LS241 18	
t_{PZL}	Output Enable Time to LOW Level	$C_L = 45 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 30	ns
			DM74LS241 30	
t_{PZH}	Output Enable Time to HIGH Level	$C_L = 45 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 23	ns
			DM74LS241 23	
t_{PLZ}	Output Disable Time from LOW Level	$C_L = 5 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 25	ns
			DM74LS241 25	
t_{PHZ}	Output Disable Time from HIGH Level	$C_L = 5 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 18	ns
			DM74LS241 18	
t_{PLH}	Propagation Delay Time LOW-to-HIGH Level Output	$C_L = 150 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 18	ns
			DM74LS241 21	
t_{PHL}	Propagation Delay Time HIGH-to-LOW Level Output	$C_L = 150 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 22	ns
			DM74LS241 22	
t_{PZL}	Output Enable Time to LOW Level	$C_L = 150 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 33	ns
			DM74LS241 33	
t_{PZH}	Output Enable Time to HIGH Level	$C_L = 150 \text{ pF}$ $R_L = 667\Omega$	DM74LS240 26	ns
			DM74LS241 26	

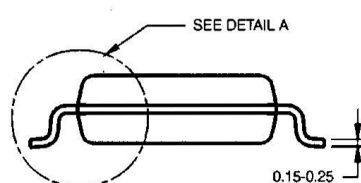
Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted


20-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-013, 0.300 Wide
Package Number M20B

DM74LS240 • DM74LS241

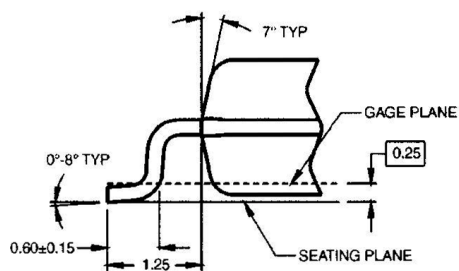
Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)**LAND PATTERN RECOMMENDATION**

DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

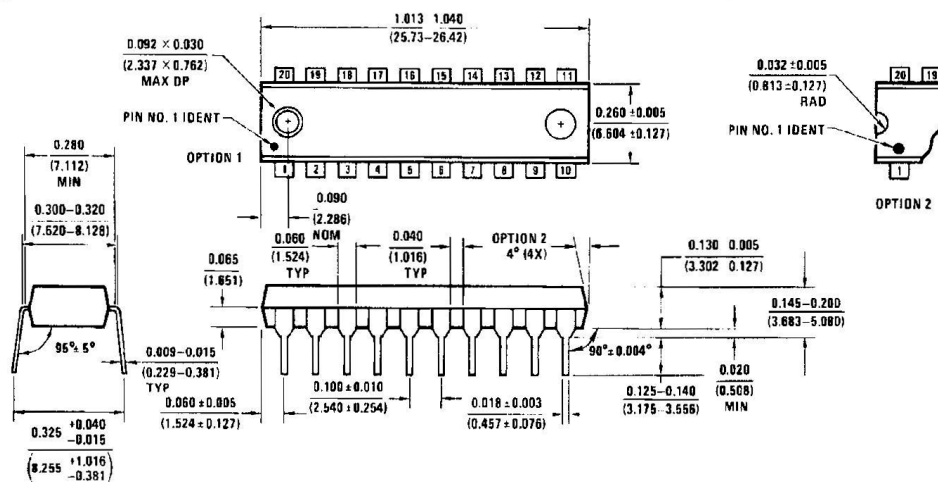
**NOTES:**

- A. CONFORMS TO EIAJ EDR-7320 REGISTRATION, ESTABLISHED IN DECEMBER, 1998.
- B. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
- C. DIMENSIONS ARE EXCLUSIVE OF BURRS, MOLD FLASH, AND TIE BAR EXTRUSIONS.

M20DRRevB1

**DETAIL A**

20-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
Package Description M20D

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)

**20-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide
Package Number N20A**

Fairchild does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and Fairchild reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

www.fairchildsemi.com

74LS245

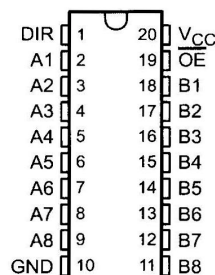
SN54LS245, SN74LS245 OCTAL BUS TRANSCEIVERS WITH 3-STATE OUTPUTS

SDLS146A – OCTOBER 1976 – REVISED FEBRUARY 2002

- 3-State Outputs Drive Bus Lines Directly
- PNP Inputs Reduce dc Loading on Bus Lines
- Hysteresis at Bus Inputs Improves Noise Margins
- Typical Propagation Delay Times Port to Port, 8 ns

TYPE	I _{OL} (SINK CURRENT)	I _{OH} (SOURCE CURRENT)
SN54LS245	12 mA	–12 mA
SN74LS245	24 mA	–15 mA

SN54LS245 . . . J OR W PACKAGE
SN74LS245 . . . DB, DW, N, OR NS PACKAGE
(TOP VIEW)

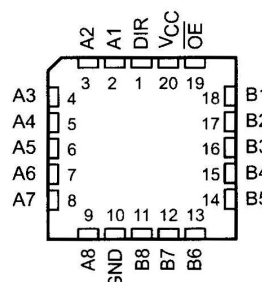


description

These octal bus transceivers are designed for asynchronous two-way communication between data buses. The control-function implementation minimizes external timing requirements.

The devices allow data transmission from the A bus to the B bus or from the B bus to the A bus, depending on the logic level at the direction-control (DIR) input. The output-enable ($\overline{OE}$) input can disable the device so that the buses are effectively isolated.

SN54LS245 . . . FK PACKAGE
(TOP VIEW)



ORDERING INFORMATION

T _A	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	PDIP – N	Tube	SN74LS245N	SN74LS245N
	SOIC – DW	Tube	SN74LS245DW	LS245
		Tape and reel	SN74LS245DWR	
	SOP – NS	Tape and reel	SN74LS245NSR	74LS245
–55°C to 125°C	SSOP – DB	Tape and reel	SN74LS245DBR	LS245
	CDIP – J	Tube	SN54LS245J	SN54LS245J
		Tube	SNJ54LS245J	SNJ54LS245J
	CFP – W	Tube	SNJ54LS245W	SNJ54LS245W
	LCCC – FK	Tube	SN54LS245FK	SN54LS245FK

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2002, Texas Instruments Incorporated
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

SN54LS245, SN74LS245 **OCTAL BUS TRANSCEIVERS** **WITH 3-STATE OUTPUTS**

SDLS146A – OCTOBER 1976 – REVISED FEBRUARY 2002

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)[†]

Supply voltage, V_{CC}	7 V
Input voltage, V_I (see Note 1)	7 V
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Note 2):	
DB package	70°C/W
DW package	58°C/W
N package	69°C/W
NS package	60°C/W
Storage temperature range, T_{stg}	–65°C to 150°C

[†] Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTES: 1. All voltage values are with respect to GND.

2. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

recommended operating conditions

		SN54LS245			SN74LS245			UNIT
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
V_{CC}	Supply voltage	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
I_{OH}	High-level output current			–12			–15	mA
I_{OL}	Low-level output current			12			24	mA
T_A	Operating free-air temperature	–55		125	0		70	°C



TEXAS
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

SN54LS245, SN74LS245 **OCTAL BUS TRANSCEIVERS** **WITH 3-STATE OUTPUTS**

SDLS146A – OCTOBER 1976 – REVISED FEBRUARY 2002

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	SN54LS245			SN74LS245			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	MIN	TYP‡	MAX	
V_{IH} High-level input voltage		2			2			V
V_{IL} Low-level input voltage				0.7			0.8	V
V_{IK} Input clamp voltage	$V_{CC} = \text{MIN}, I_I = -18 \text{ mA}$			-1.5			-1.5	V
Hysteresis ($V_{T+} - V_{T-}$)	A or B $V_{CC} = \text{MIN}$	0.2	0.4		0.2	0.4		V
V_{OH} High-level output voltage	$V_{CC} = \text{MIN}, V_{IH} = 2 \text{ V}, V_{IL} = V_{IL(\text{max})}$ $I_{OH} = -3 \text{ mA}$	2.4	3.4		2.4	3.4		V
	$I_{OH} = \text{MAX}$	2			2			
V_{OL} Low-level output voltage	$V_{CC} = \text{MIN}, V_{IH} = 2 \text{ V}, V_{IL} = V_{IL(\text{max})}$ $I_{OL} = 12 \text{ mA}$			0.4			0.4	V
	$I_{OL} = 24 \text{ mA}$						0.5	
I_{OZH} Off-state output current, high-level voltage applied	$V_{CC} = \text{MAX}, OE \text{ at } 2 \text{ V}, V_O = 2.7 \text{ V}$			20			20	μA
I_{OZL} Off-state output current, low-level voltage applied	$V_{CC} = \text{MAX}, OE \text{ at } 2 \text{ V}, V_O = 0.4 \text{ V}$			-200			-200	μA
I_I Input current at maximum input voltage	A or B $V_{CC} = \text{MAX}$			0.1			0.1	mA
	DIR or $\overline{OE}$ $V_I = 7 \text{ V}$			0.1			0.1	
I_{IH} High-level input current	$V_{CC} = \text{MAX}, V_{IH} = 2.7 \text{ V}$			20			20	μA
I_{IL} Low-level input current	$V_{CC} = \text{MAX}, V_{IL} = 0.4 \text{ V}$			-0.2			-0.2	mA
I_{OS} Short-circuit output current§	$V_{CC} = \text{MAX}$	-40		-225	40		-225	mA
I_{CC} Supply current	Total, outputs high $V_{CC} = \text{MAX}$ Outputs open	48		70	48		70	mA
	Total, outputs low	62		90	62		90	
	Outputs at high Z	64		95	64		95	

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate values specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values are at $V_{CC} = 5 \text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$.

§ Not more than one output should be shorted at a time, and duration of the short circuit should not exceed one second.

switching characteristics, $V_{CC} = 5 \text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$ (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_{PLH} Propagation delay time, low- to high-level output	$C_L = 45 \text{ pF}, R_L = 667 \Omega$		8	12	ns
t_{PHL} Propagation delay time, high- to low-level output			8	12	
t_{PZL} Output enable time to low level	$C_L = 45 \text{ pF}, R_L = 667 \Omega$		27	40	ns
t_{PZH} Output enable time to high level			25	40	
t_{PLZ} Output disable time from low level	$C_L = 5 \text{ pF}, R_L = 667 \Omega$		15	25	ns
t_{PHZ} Output disable time from high level			15	28	

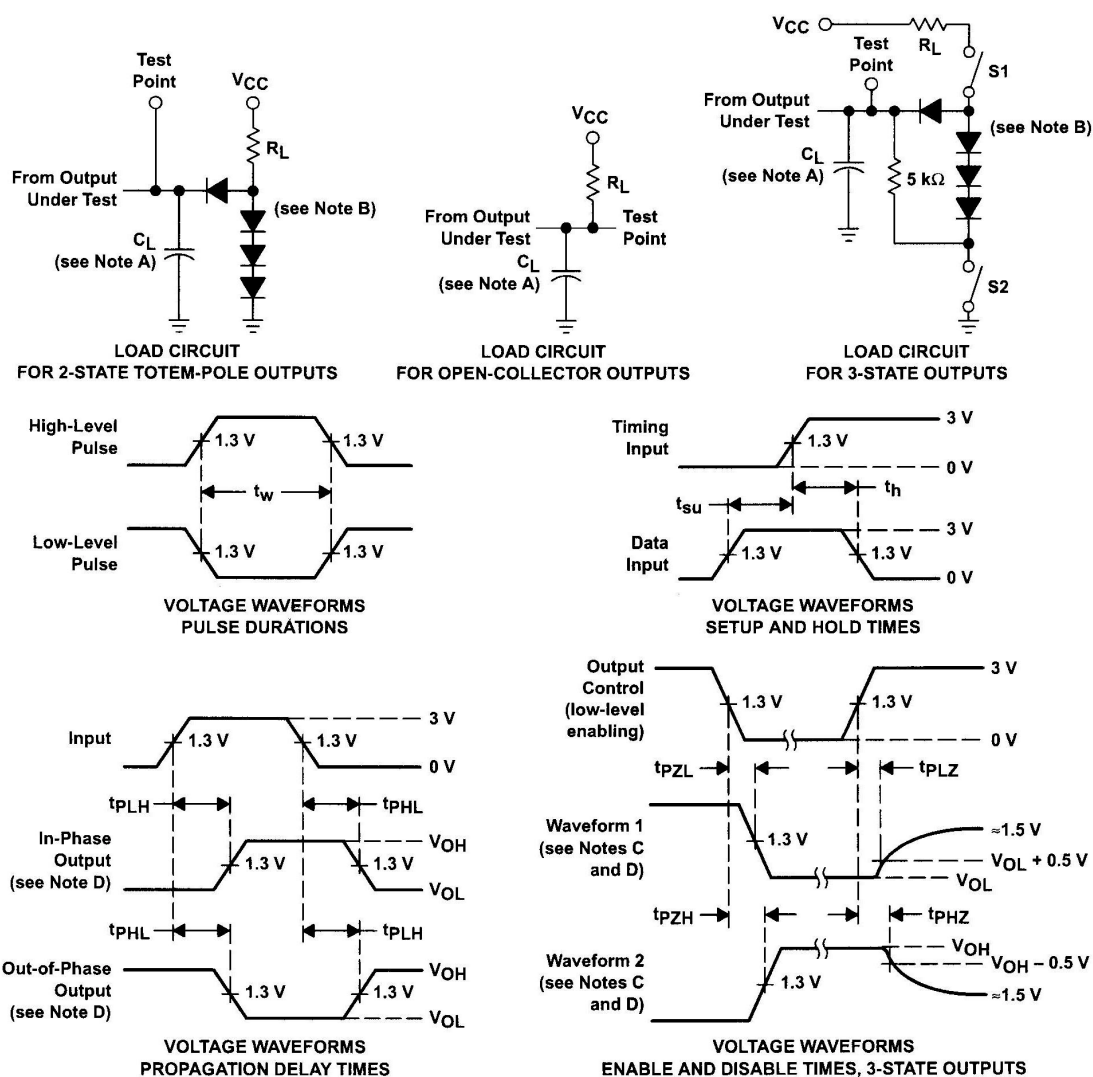


POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

SN54LS245, SN74LS245 OCTAL BUS TRANSCEIVERS WITH 3-STATE OUTPUTS

SDLS146A – OCTOBER 1976 – REVISED FEBRUARY 2002

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION SERIES 54LS/74LS DEVICES



- NOTES: A. C_L includes probe and jig capacitance.
 B. All diodes are 1N3064 or equivalent.
 C. Waveform 1 is for an output with internal conditions such that the output is low except when disabled by the output control. Waveform 2 is for an output with internal conditions such that the output is high except when disabled by the output control.
 D. S1 and S2 are closed for t_{PLH} , t_{PHL} , t_{PHZ} , and t_{PZL} ; S1 is open and S2 is closed for t_{PZH} ; S1 is closed and S2 is open for t_{PZL} .
 E. Phase relationships between inputs and outputs have been chosen arbitrarily for these examples.
 F. All input pulses are supplied by generators having the following characteristics: $PRR \leq 1$ MHz, $Z_O = 50 \Omega$, $t_r \leq 1.5$ ns, $t_f \leq 2.6$ ns.
 G. The outputs are measured one at a time with one input transition per measurement.

Figure 1. Load Circuits and Voltage Waveforms



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

ไอซี 74LS377



OCTAL D FLIP-FLOP WITH ENABLE; HEX D FLIP-FLOP WITH ENABLE; 4-BIT D FLIP-FLOP WITH ENABLE

The SN54/74LS377 is an 8-bit register built using advanced Low Power Schottky technology. This register consists of eight D-type flip-flops with a buffered common clock and a buffered common clock enable.

The SN54/74LS378 is a 6-Bit Register with a buffered common enable. This device is similar to the SN54/74LS174, but with common Enable rather than common Master Reset.

The SN54/74LS379 is a 4-Bit Register with buffered common Enable. This device is similar to the SN54/74LS175 but features the common Enable rather than common Master Reset.

- 8-Bit High Speed Parallel Registers
- Positive Edge-Triggered D-Type Flip Flops
- Fully Buffered Common Clock and Enable Inputs
- True and Complement Outputs
- Input Clamp Diodes Limit High Speed Termination Effects

PIN NAMES

$\bar{E}$	Enable (Active LOW) Input
D_0-D_3	Data Inputs
CP	Clock (Active HIGH Going Edge) Input
Q_0-Q_3	True Outputs (Note b)
$\bar{Q}_0-\bar{Q}_3$	Complemented Outputs (Note b)

NOTES:

a) 1 TTL Unit Load (U.L.) = 40 μ A HIGH/1.6 mA LOW.

b) The Output LOW drive factor is 2.5 U.L. for Military (54) and 5 U.L. for Commercial (74) Temperature Ranges.

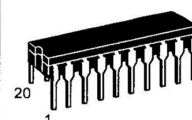
LOADING (Note a)

	HIGH	LOW
$\bar{E}$	0.5 U.L.	0.25 U.L.
D_0-D_3	0.5 U.L.	0.25 U.L.
CP	0.5 U.L.	0.25 U.L.
Q_0-Q_3	10 U.L.	5 (2.5) U.L.
$\bar{Q}_0-\bar{Q}_3$	10 U.L.	5 (2.5) U.L.

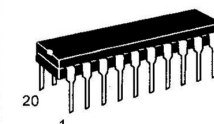
SN54/74LS377 SN54/74LS378 SN54/74LS379

OCTAL D FLIP-FLOP WITH ENABLE; HEX D FLIP-FLOP WITH ENABLE; 4-BIT D FLIP-FLOP WITH ENABLE

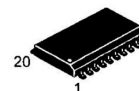
LOW POWER SCHOTTKY



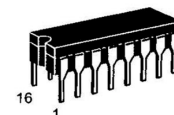
J SUFFIX
CERAMIC
CASE 732-03



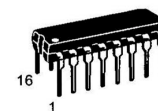
N SUFFIX
PLASTIC
CASE 738-03



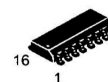
DW SUFFIX
SOIC
CASE 751D-03



J SUFFIX
CERAMIC
CASE 620-09



N SUFFIX
PLASTIC
CASE 648-08



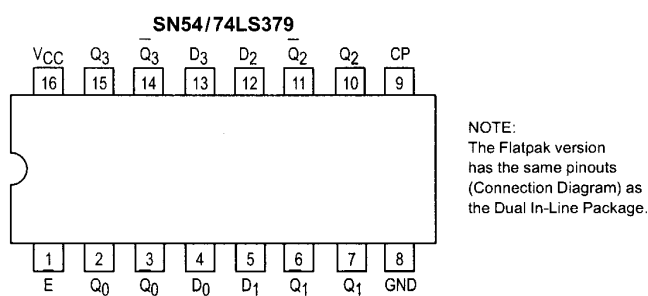
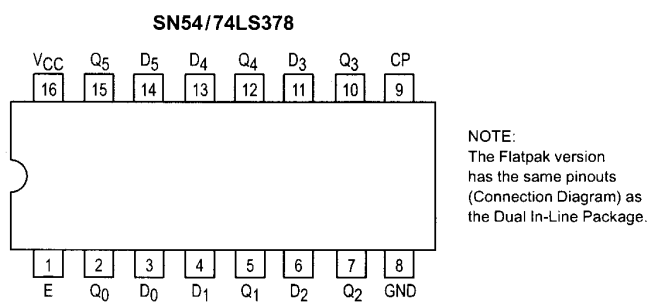
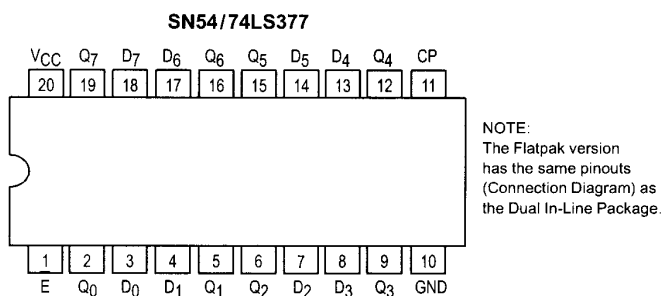
D SUFFIX
SOIC
CASE 751B-03

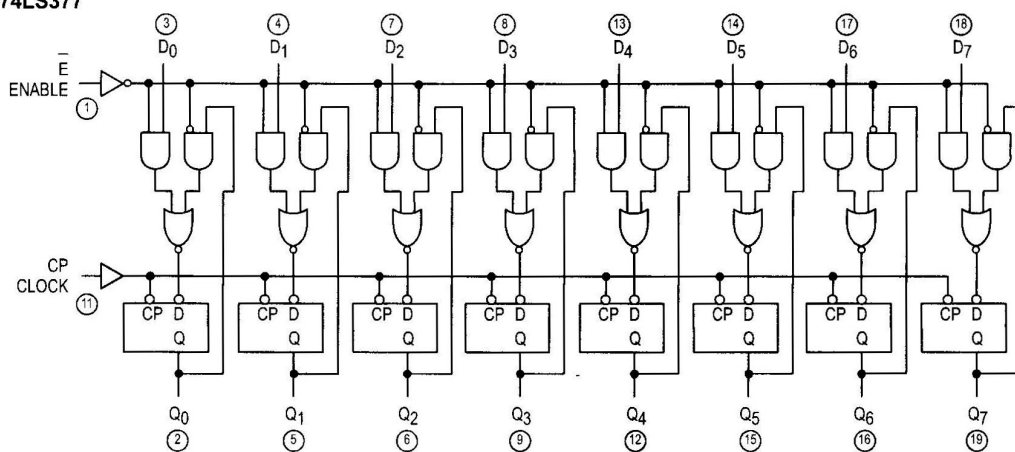
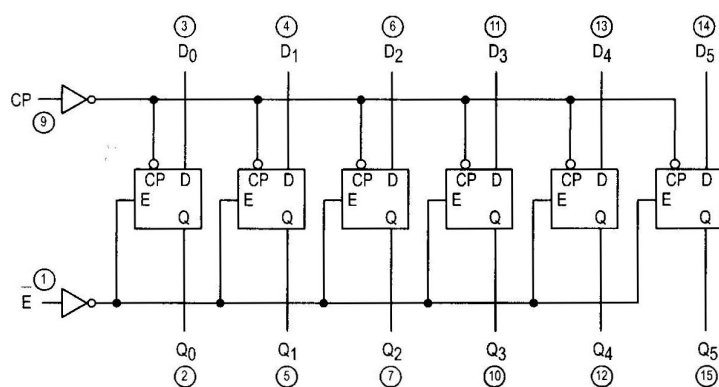
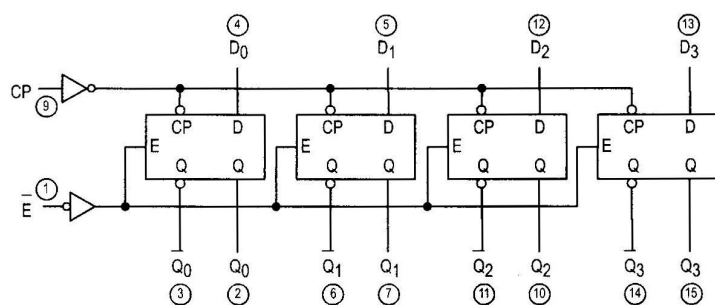
ORDERING INFORMATION

SN54LSXXXJ	Ceramic
SN74LSXXXN	Plastic
SN74LSXXXDW	SOIC
SN74LSXXXD	SOIC

SN54/74LS377 • SN54/74LS378 • SN54/74LS379

CONNECTION DIAGRAM DIPS (TOP VIEW)



SN54/74LS377 • SN54/74LS378 • SN54/74LS379
LOGIC DIAGRAMS
SN54/74LS377

SN54/74LS378

SN54/74LS379


SN54/74LS377 • SN54/74LS378 • SN54/74LS379

GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter		Min	Typ	Max	Unit
V _{CC}	Supply Voltage	54 74	4.5 4.75	5.0 5.0	5.5 5.25	V
T _A	Operating Ambient Temperature Range	54 74	−55 0	25 25	125 70	°C
I _{OH}	Output Current — High	54, 74			−0.4	mA
I _{OL}	Output Current — Low	54 74			4.0 8.0	mA

DC CHARACTERISTICS OVER OPERATING TEMPERATURE RANGE (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Limits			Unit	Test Conditions
		Min	Typ	Max		
V _{IH}	Input HIGH Voltage	2.0			V	Guaranteed Input HIGH Voltage for All Inputs
V _{IL}	Input LOW Voltage	54		0.7	V	Guaranteed Input LOW Voltage for All Inputs
		74		0.8		
V _{IK}	Input Clamp Diode Voltage		−0.65	−1.5	V	V _{CC} = MIN, I _{IN} = −18 mA
V _{OH}	Output HIGH Voltage	54	2.5	3.5	V	V _{CC} = MIN, I _{OH} = MAX, V _{IN} = V _{IH} or V _{IL} per Truth Table
		74	2.7	3.5	V	
V _{OL}	Output LOW Voltage	54, 74	0.25	0.4	V	I _{OL} = 4.0 mA
		74	0.35	0.5	V	I _{OL} = 8.0 mA
I _{IH}	Input HIGH Current			20	μA	V _{CC} = MAX, V _{IN} = 2.7 V
				0.1	mA	V _{CC} = MAX, V _{IN} = 7.0 V
I _{IL}	Input LOW Current			−0.4	mA	V _{CC} = MAX, V _{IN} = 0.4 V
I _{OS}	Short Circuit Current (Note 1)	−20		−100	mA	V _{CC} = MAX
I _{CC}	Power Supply Current	LS377		28	mA	V _{CC} = MAX, NOTE 1
		LS378		22		
		LS379		15		

NOTE: With all inputs open and GND applied to all data and enable inputs, I_{CC} is measured after a momentary GND, then 4.5 V is applied to clock.

Note 1: Not more than one output should be shorted at a time, nor for more than 1 second.

AC CHARACTERISTICS (T_A = 25°C, V_{CC} = 5.0 V)

Symbol	Parameter	Limits			Unit	Test Conditions
		Min	Typ	Max		
f _{MAX}	Maximum Clock Frequency	30	40		MHz	V _{CC} = 5.0 V C _L = 15 pF
t _{PLH}	Propagation Delay, Clock to Output		17	27	ns	
t _{PHL}			18	27		

AC SETUP REQUIREMENTS (T_A = 25°C, V_{CC} = 5.0 V)

Symbol	Parameter		Limits			Unit	Test Conditions
			Min	Typ	Max		
t _W	Any Pulse Width		20			ns	V _{CC} = 5.0 V
t _s	Data Setup Time		20			ns	
t _s	Enable Setup Time	Inactive — State	10			ns	
		Active — State	25			ns	
t _h	Any Hold Time		5.0			ns	

DEFINITION OF TERMS

SETUP TIME (t_s) — is defined as the minimum time required for the correct logic level to be present at the logic input prior to the clock transition from LOW-to-HIGH in order to be recognized and transferred to the outputs.

HOLD TIME (t_h) — is defined as the minimum time following

the clock transition from LOW-to-HIGH that the logic level must be maintained at the input in order to ensure continued recognition. A negative HOLD TIME indicates that the correct logic level may be released prior to the clock transition from LOW-to-HIGH and still be recognized.

SN54/74LS377 • SN54/74LS378 • SN54/74LS379

TRUTH TABLE

E	CP	D_n	Q_n	Q_n
H		X	No Change	No Change
L		H	H	L
L		L	L	H

L = LOW Voltage Level
H = HIGH Voltage Level
X = Immaterial

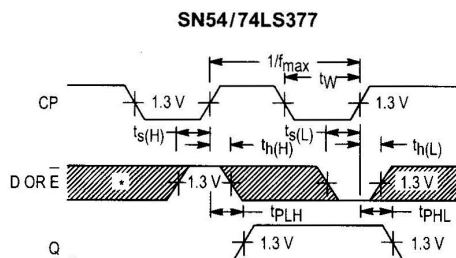
AC WAVEFORMS


Figure 1. Clock to Output Delays Clock Pulse Width, Frequency, Setup and Hold Times Data or Enable to Clock

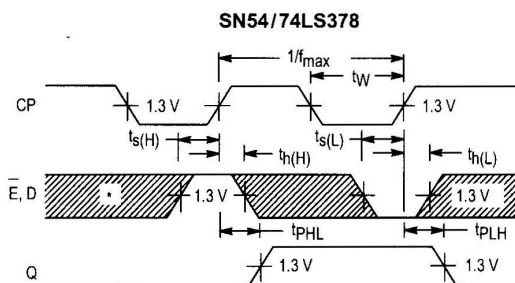
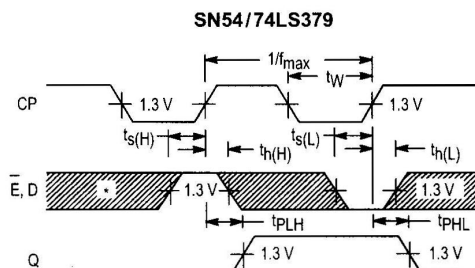


Figure 2. Clock to Output Delays Clock Pulse Width, Frequency, Setup and Hold Times Data or Enable to Clock



*The shaded areas indicate when the input is permitted to change for predictable output performance.

Figure 3. Clock to Output Delays Clock Pulse Width, Frequency, Setup and Hold Times Data, Enable to Clock

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดการทดสอบ

ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็ว

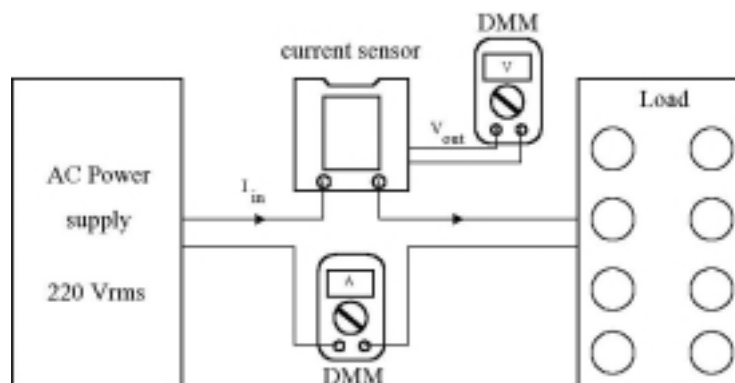
ข.1 การทดสอบตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า จำนวน 2 ตัว เพื่อแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าสแตเตอร์เฟสที่หนึ่งและเฟสที่สาม เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณช่องสัญญาณที่หนึ่งและช่องสัญญาณที่สอง ตามลำดับ เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณต้องการอินพุตที่เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าที่ถูกเลือกใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ผลิตโดยบริษัท KOHSHIN รุ่น HC-PSG50V4B15 มีคุณสมบัติดังนี้ แรงดันไฟเลี้ยง ± 15 โวลต์ มีความผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์ พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 10 แอมแปร์ และมีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า

ในส่วนของการทดสอบตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้ามีวิธีการดำเนินงาน ดังนี้ ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์อาร์เอ็มเอส ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เข้าที่ขั้วต่อของโหลด ซึ่งเป็นชุดของหลอดไฟ โดยหลอดไฟแต่ละดวงประกอบด้วยสวิตช์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน ตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้าจะถูกเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและโหลด ดังแสดงในรูปที่ ข.2 หลังจากเปิดสวิตช์ควบคุมหลอดไฟดวงที่หนึ่งทำงาน (สว่าง) จึงทำการวัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า จากนั้นเปิดสวิตช์ควบคุมหลอดไฟให้ทำงานเพิ่มครั้งละหนึ่งดวง จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าอินพุตของตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 10 แอมแปร์ ดำเนินการทดสอบซ้ำอีกครั้ง ผลการทดสอบทั้งหมดถูกแสดงไว้ในตารางที่ ข.1



รูปที่ ข.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า

หลอดที่	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ค่าเฉลี่ย	
	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$
1	0	0	0	0	0	0
2	0.48	1.2	0.48	1.2	0.48	1.2
3	0.96	2.4	0.96	2.4	0.96	2.4
4	1.464	3.66	1.48	3.68	1.472	3.67
5	1.66	4.12	1.66	4.2	1.66	4.16
6	1.98	4.88	1.98	4.92	1.98	4.9
7	2.26	5.64	2.28	5.68	2.27	5.66
8	2.56	6.4	2.6	6.48	2.58	6.44
9	2.8	7.2	2.9	7.24	2.85	7.22
10	3.2	7.88	3.22	8	3.21	7.94
11	3.5	8.68	3.5	8.76	3.5	8.72
12	3.68	9.16	3.72	9.24	3.7	9.2
13	3.88	9.6	3.9	9.68	3.89	9.64
14	4.04	10.08	4.1	10.16	4.07	10.12

หมายเหตุ: V_{out} หมายถึง แรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า (โวลต์)

I_{in} หมายถึง กระแสไฟฟ้าอินพุตของตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

จากตารางที่ ข.1 ข้อมูลค่าเฉลี่ยจะถูกนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} และ I_{out} ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้น โดยใช้ฟังก์ชัน polyfit ซึ่งเป็นกล่องเครื่องมือในโปรแกรม MATLAB ช่วยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของสมการเชิงเส้น $y = ax + b$ โดยที่ตัวแปร y และ x แทนชุดข้อมูลของ V_{out} และ I_{out} ตามลำดับ

ผลจากการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} และ I_{out} ที่อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น มีดังนี้

$$y = 2.4933 x + 0.0002 \quad (\text{ข-1})$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (ข-1) จะได้ว่า ค่าของสัมประสิทธิ์ b มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าของสัมประสิทธิ์ a ดังนั้นจึงสามารถประมาณให้ค่าสัมประสิทธิ์ b มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} และ I_{out} อยู่ในรูปแบบใหม่ คือ

$$V_{out}/I_{out} = 2.4933 \quad (\text{ข-2})$$

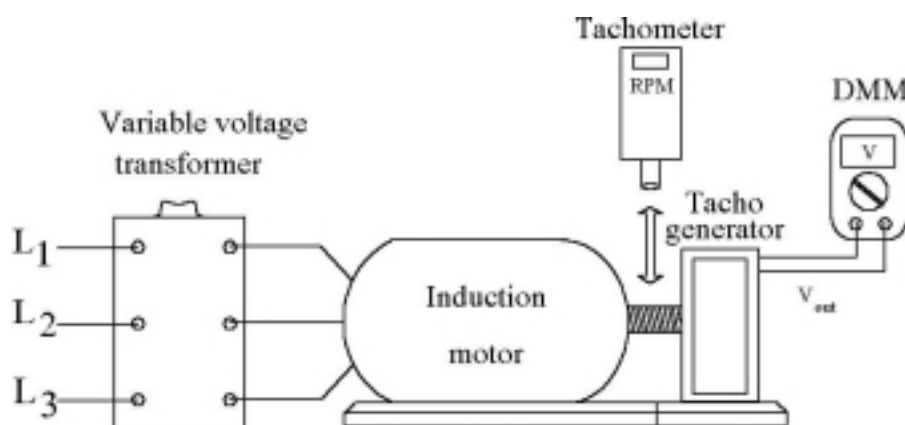
ในการเขียนโปรแกรมภาษาซีของตัวสังเกตโหลดทอร์ก ส่วนกลับของค่าเกณฑ์ตรวจรู้กระแสไฟฟ้าในสมการที่ (ข-2) จะถูกคูณกับข้อมูลที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากหน่วยโวลต์เป็นหน่วยแอมแปร์

ข.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็ว

เครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็วทำหน้าที่แปลงข้อมูลความเร็วรอบของระบบมอเตอร์และโหลด เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณในช่องสัญญาณที่ 3 เครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็วที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ผลิตโดยบริษัท ELWE มีอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 20 โวลต์ / 1000 รอบต่อนาที แต่จากผลการทดสอบโดยการจัดเตรียมอุปกรณ์ ดังรูปที่ ข.3 และข้อมูลที่บันทึกในตารางที่ ข.2 พบว่า ค่าที่ระบุจากบริษัทผู้ผลิตมีความคลาดเคลื่อน

ในรูปที่ ข.3 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ค่าพิกัดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในสถานะไร้โหลดทำการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยมาตรวัดความเร็ว (tachometer) บันทึกค่าที่อ่านได้ ทำการวัดความเร็วรอบซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบ วัดแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดชนิดมาตรวัดความเร็วด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จากนั้นปรับลดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับมอเตอร์จำนวน 10 ค่า โดยที่แต่ละค่าของแรงดันไฟฟ้าต้องทำให้ความ

เร็วรอบของมอเตอร์ลดลงและอยู่ในช่วง 1000 - 1500 รอบต่อนาที ซึ่งย่านการใช้งานของมอเตอร์
เหนี่ยวนำจะอยู่ในช่วงดังกล่าว ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ข.2



รูปที่ ข.3 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็ว

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็ว

ค่าที่	Speed (RPM)				V_{out} (V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	1498.8	1498.9	1497.6	1498.4	32.53
2	1473.8	1474.3	1473.7	1473.9	32.00
3	1427.5	1427.8	1428.1	1427.8	31.00
4	1381.3	1382.2	1381.5	1381.7	30.00
5	1336.3	1335.8	1335.3	1335.8	29.00
6	1291.7	1291.1	1289.7	1290.8	28.00
7	1257.8	1255.0	1255.6	1256.1	27.32
8	1212.2	1211.2	1211.0	1211.5	26.30
9	1151.1	1150.0	1153.2	1151.4	25.00
10	1109.2	1111.9	1115.0	1112.0	24.21
11	1059.7	1059.2	1058.2	1059.0	23.00
12	1013.8	1013.5	1013.0	1013.4	22

หมายเหตุ: Speed หมายถึง ความเร็วรอบเพลามหุนของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

V_{out} หมายถึง แรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็ว (โวลต์)

ในตารางที่ ข.3 นำข้อมูลแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็วและค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบของมอเตอร์ มาคำนวณหาอัตราส่วนเฉลี่ยระหว่างแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็วกับความเร็วรอบของมอเตอร์ ได้ดังนี้

$$\frac{\text{แรงดันเอาต์พุต}}{\text{ความเร็วรอบ}} = 21.72 \text{ โวลต์} / 1000 \text{ รอบต่อวินาที} \quad (\text{ข-3})$$

ในการเขียนโปรแกรมภาษาซีของตัวสังเกตโพลดทอร์ก ส่วนกลับของค่าแกนเครื่องกำเนิดชนิดมาตรฐานวัดความเร็วในสมการที่ (ข-3) ที่มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเรเดียนต่อวินาที จะถูกคูณกับข้อมูลที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อแปลงเป็นปริมาณความเร็วรอบที่วัดได้จากหน่วยโวลต์เป็นหน่วยเรเดียนต่อวินาที

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดการสร้างตัวสังเกตโหลดทอรัคเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ
และตัวสังเกตโหลดทอรัคแบบปรับตัว

การสร้างตัวสังเกตโหนดทอร์ก

การสร้างตัวสังเกตโหนดทอร์กในวิทยานิพนธ์นี้ คือ การโปรแกรมเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลด้วยโปรแกรมภาษาซีเพื่อทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโหนดทอร์ก โดยที่โปรแกรมดังกล่าวจะถูกกำหนดให้ทำงานด้วยคาบการสุ่มที่คงที่ นั่นคือ การกำหนดให้โปรแกรมที่ทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโหนดทอร์กทำหน้าที่เป็นโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ทางด้านเวลา (clock tick interrupt service routine หรือ user's interrupt for timer) ดังนั้นเมื่อคอมพิวเตอร์เกิดการอินเตอร์รัพต์ทางด้านเวลา ซึ่งเป็นอินเตอร์รัพต์ที่มีลำดับความสำคัญของการเกิดมากที่สุดและเกิดด้วยอัตราคงที่ตลอดเวลา ตัวสังเกตโหนดทอร์กที่อยู่ในรูปของโปรแกรมจะถูกเรียกให้ทำงานด้วยอัตราคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาของการทำหน้าที่เป็นตัวสังเกตโหนดทอร์ก (วิโรจน์ แสงธทอง, 2542) ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เลือกคาบการสุ่มที่คงที่เท่ากับ 0.001 วินาที รายละเอียดโปรแกรมตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับและตัวสังเกตโหนดทอร์กแบบปรับตัวเฉพาะส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณโหนดทอร์ก มีดังนี้

ค.1 โปรแกรมตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

โปรแกรมตัวสังเกตโหนดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณโหนดทอร์กมีลำดับการทำงาน ดังนี้ โปรแกรมตัวสังเกตจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ถูกส่งมาจากช่องสัญญาณที่หนึ่ง สอง และสาม ของวงจรแปลงสัญญาณ นำมาแปลงเป็นตัวเลขของสัญญาณกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟสที่หนึ่ง (i_{s1}) กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เฟสที่สาม (i_{s3}) และความเร็วรอบของระบบ (ω) ตามลำดับ ต่อมานำสัญญาณ ω ผ่านวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิทัล เพื่อลดทอนการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน โดยออกแบบให้วงจรกรองดังกล่าวมีความถี่ตัด (cutoff frequency) เท่ากับ 5 เฮิรตซ์ จากนั้นนำข้อมูลของสัญญาณทั้งสามซึ่งประกอบด้วย i_{s1} , i_{s3} และ ω ที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ จำนวนค่ากระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในทิศขนานกับแกนสเตเตอร์ (i_{sa}) กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ตั้งฉากกับแกนสเตเตอร์ (i_{sb}) กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากฟลักตสนามแม่เหล็กโรเตอร์และมีทิศขนานกับเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (i_{sd}) กระแสไฟฟ้าส่วนประกอบของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากฟลักตสนามแม่เหล็กโรเตอร์ และตั้งฉากกับเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (i_{sq}) และ ขนาดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก (i_{mR}) โดยใช้สมการที่ (2-5), (2-6), (2-8), (2-9) และ (2-10) ตามลำดับ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า (i_{eq}) จำนวนได้จากผลคูณระหว่าง i_{mR} กับ i_{sq} ในส่วนของค่าอัตราเร็วเชิงมุม (ω_{mR}) และตำแหน่งเชิงมุม (p) ของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์

คำนวณได้จากสมการที่ (2-11) และ (2-12) ตามลำดับ การคำนวณที่กล่าวถึงเกิดขึ้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมตัวสังเกตโพลทอร์กในส่วนของการเร็วรอบ ($\hat{\omega}$) และตัวเลขโพลทอร์ก ($\hat{T}_L$) ที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตจะคำนวณได้จากสมการที่ (3-20) และ (3-21) ตามลำดับ ในลำดับสุดท้าย $\hat{T}_L$ ที่คำนวณได้จะถูกส่งผ่านถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก เพื่อเปลี่ยนข้อมูลดิจิทัลเป็นแรงดันแอนะล็อก ส่งออกทางช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณและทำการวัดด้วยออสซิลโลสโคป ลำดับขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรมตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับได้ถูกอธิบายไว้ในแผนรูปที่ ค.1

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ วิธีการหาผลเฉลี่ยของสมการที่ (2-12), (3-20) และ (3-21) ที่อยู่ในรูปของการอินทิเกรตจะการใช้การหาค่าอินทิกรัลโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule) ซึ่งเป็นหนึ่งในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ง่ายในการประยุกต์ใช้งาน ยกตัวอย่างการหาค่าอินทิกรัลในสมการที่ (ค-1) โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู ดังนี้

$$y = \int_{t_{k-1}}^{t_k} x \, dt \quad (\text{ค-1})$$

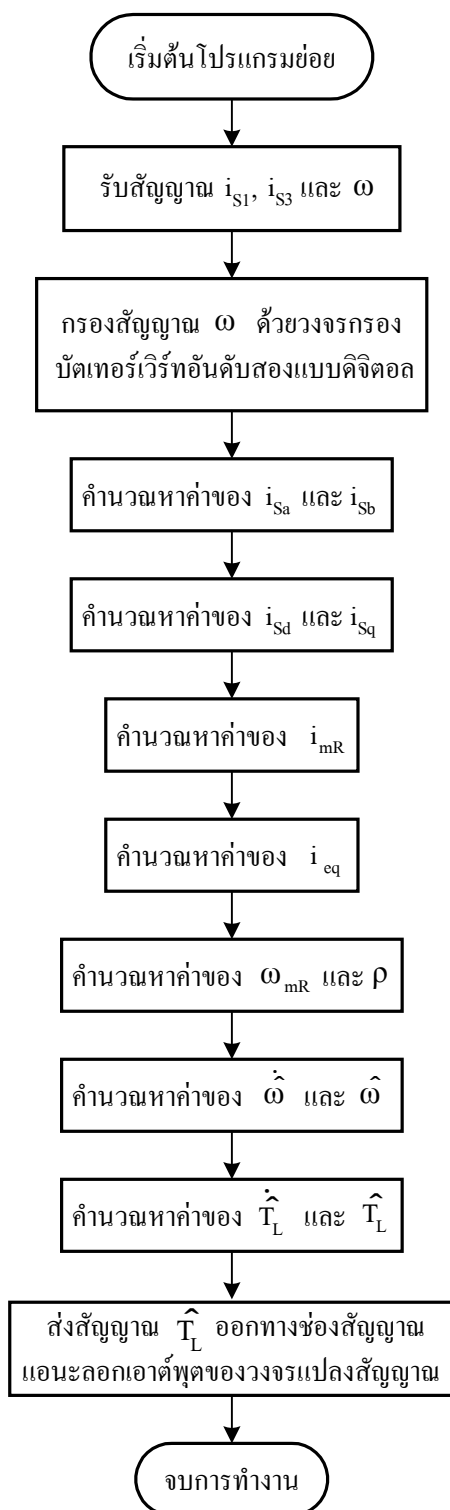
จะได้

$$y_k = y_{k-1} + \frac{h}{2} [x_k + x_{k-1}] \quad (\text{ค-2})$$

โดยที่ $h = t_k - t_{k-1}$ คือระยะเวลาคาบการสุ่ม ตัวห้อย 'k' หมายถึงข้อมูลในเวลาปัจจุบัน และตัวห้อย 'k-1' หมายถึงข้อมูลในเวลาที่ผ่านมา ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมตัวสังเกตโพลทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับด้วยภาษาซี การหาค่าอินทิกรัลจะมีรูปแบบดังสมการที่ (ค-2)

ในส่วนของวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสอง (Chen, 2001) ที่ใช้กรองสัญญาณความเร็วรอบที่ได้จากเครื่องกำเนิดซินโครเมตรวัดความเร็ว มีความถี่ตัดเท่ากับ 5 Hz และมีฟังก์ชันการถ่ายโอนคือ

$$TF = \frac{9870}{s^2 + 444.2s + 9870} \quad (\text{ค-3})$$



รูปที่ ค.1 แผนภูมิการคำนวณของโปรแกรมตัวสั่งเกตโพลคอร์ทกึ่งเส้นแบบเต็มอันดับ

ฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (ค-3) มีโพลอยู่ที่ตำแหน่ง -420.77 และ -23.46 โดยในขั้นตอนการแปลงวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวเป็นวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิตอลได้อาศัยโปรแกรม MATLAB ทำให้การสร้างวงจรกรองแบบดิจิตอลดังกล่าว มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

โปรแกรมภาษาซีของตัวสังเกตโพลทอรัคเชิงเส้นแบบเต็มอันดับส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโพลทอรัค มีรายละเอียดดังนี้

#####

โปรแกรมภาษาซีที่ทำหน้าที่คำนวณโพลทอรัคในตัวสังเกตโพลทอรัคเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

โดย นายมัชฌูติน ดาเต๊ะ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2545

#####

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#define SAMP_TME 0.001 /*กำหนดคาบการสุ่มครั้งที่*/
#define L1 (float)160.00 /*ค่าเกนของตัวสังเกตโพลทอรัคแบบเต็มอันดับ*/
#define L2 (float)-20.0719 /*ค่าเกนของตัวสังเกตโพลทอรัคแบบเต็มอันดับ*/
#define PAIR 2
#define PI (double)3.14159265358979
#define K (double)0.59268874666667 /*ค่าคงที่ของทอรัคทางแม่เหล็กไฟฟ้า*/
#define B (double)0.000368 /*สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบ*/
#define J (double)0.001096 /*โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ*/
#define Tr (double)0.0444 /*ค่าคงตัวทางเวลาของโรเตอร์*/
#define msensor (double)2.63791127198200 /*ตัวคูณเพื่อแปลงเป็นตัวสัญญาณกระแสไฟฟ้า*/
#define mtacho (double)34.95080045872157 /*ตัวคูณเพื่อแปลงเป็นสัญญาณความเร็วรอบ*/
void A_Outport(int Data16); /*ฟังก์ชัน A_Outport(int) ทำหน้าที่แปลงข้อมูลตัวเลข
ฐานสองเป็นสัญญาณแอนะล็อกออกทางช่อง
สัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ
*/
void A_Inport(int Channel,int T_Analog[5]); /*ฟังก์ชัน A_Outport(int) ทำหน้าที่รับข้อมูลตัวเลข
จากช่องสัญญาณอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณ*/
double Dec_Data(int data16); /*ฟังก์ชัน Dec_Data(int) ทำหน้าที่แปลงตัวเลขฐาน
สองเป็นตัวเลขฐานสิบ*/

int Analog[5];
double is1,is3;
```

```

double    t[PAIR];
double    ao=(-B/J);
double    bo=K/J;
double    co=-(1.0/J);
double    isa, isb, isd, isq,ieq;
double    dimR[PAIR];
double    imR[PAIR];

double    wmR[PAIR];

double    p[PAIR];
double    w_dot[PAIR];
double    w[PAIR];
double    werror[PAIR];
double    TL_pad_dot[PAIR];

double    TL_pad[3];
double    Speed_smooth[3];

double    Speed[PAIR];
double    azord2[]={1.0,-1.955585, 0.956550};
double    bzord2[]={0.0, 0.000965};

void       interrupt user_routine(void)

{
    A_Inport(0,Analog);

    is1 =msensor*Dec_Data(Analog[1]);

```

/*กำหนดค่าพารามิเตอร์กลาง a */

/*กำหนดค่าพารามิเตอร์กลาง b */

/*กำหนดค่าพารามิเตอร์กลาง c */

/*ค่าอนุพันธ์ของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก*/

/*กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า*/

/*อัตราเร็วเชิงมุมของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์*/

/*ตำแหน่งเชิงมุม (p) ของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์*/

/*ค่าอนุพันธ์ของความเร็วรอบที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าความเร็วรอบที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบ*/

/*ค่าอนุพันธ์ของตัวเลขโหลดทอร์กที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ตัวเลขโหลดทอร์กที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าความเร็วรอบจริงของระบบที่ผ่านการกรองด้วยวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิตอล*/

/*ค่าความเร็วรอบจริงของระบบ*/

/*ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิตอล*/

/*ฟังก์ชันของโปรแกรมย่อยของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโหลด*/

/*รับข้อมูลตัวเลขจากช่องสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณ*/

/*คูณส่วนกลับของค่าแกนของตัวตรวจรู้กระแสไฟฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟสที่หนึ่ง */

```

is3 =msensor*Dec_Data(Analog[2]);
is3 =msensor*Dec_Data(Analog[2]);

Speed[0] =mtacho*Dec_Data(Analog[3]);

Speed_smooth[0]=bzord2[1]*Speed[1]-azord2[1]
                *Speed_smooth[1]-azord2[2]*Speed_smooth[2];

t[0]=t[1] + SAMP_TME;
isa=(1.5)*is1;
isb=(-0.5)*sqrt(3)*(is1+2.0*is3);
isd=isa*cos(p[1])+isb*sin(p[1]);
isq=isb*cos(p[1])-isa*sin(p[1]);
dimR[0]=isd-imR[1];

imR[0]=imR[1]+SAMP_TME*(dimR[0]+dimR[1])
        /(2.0*Tr);
ieq= imR[0]*isq;
wmR[0] = 2.0*Speed_smooth[0]+isq/(Tr*imR[0]);
p[0] = p[1]+0.5*SAMP_TME*(wmR[0]+wmR[1]);
w_dot[0]=ao*w[1]+bo*ieq+co*TL_pad[1]+L1*werror[1];
w[0]=w[1]+0.5*SAMP_TME*(w_dot[0]+w_dot[1]);
TL_pad_dot[0]=L2*werror[1];
TL_pad[0]=TL_pad[1]+0.5*SAMP_TME
            *(TL_pad_dot[0]+TL_pad_dot[1]);
A_Outport((int)(TL_pad[0]*8191.0/4.5));

t[1]=t[0];
dimR[1]=dimR[0];

```

/*คูณส่วนกลับของค่าแกนของเครื่องกำเนิดชนิด
มาตรวัดความเร็ว เพื่อเป็นข้อมูลของสัญญาณกระแส
ไฟฟ้าเฟสที่สาม*/

/*คูณส่วนกลับของค่าแกนของเครื่องกำเนิดชนิด
มาตรวัดความเร็ว เพื่อเป็นข้อมูลของสัญญาณ
ความเร็วรอบของระบบ*/

/*ทำการกรองข้อมูลของสัญญาณความเร็วรอบด้วย
วงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิทัล*/

/*คำนวณค่า i_{sa} */

/*คำนวณค่า i_{sb} */

/*คำนวณค่า i_{sd} */

/*คำนวณค่า i_{sq} */

/*คำนวณค่าอนุพันธ์ของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำ
แม่เหล็ก*/

/*คำนวณค่า i_{mR} */

/*คำนวณค่า i_{eq} */

/*คำนวณค่า ω_{mR} */

/*คำนวณค่า ρ */

/*คำนวณค่า $\hat{\omega}$ */

/*คำนวณค่า $\hat{\omega}$ */

/*คำนวณค่า $\hat{T}_L$ */

/*คำนวณค่า $\hat{T}_L$ */

/*แปลงตัวเลขโพลทอรัคที่คำนวณได้เป็นสัญญาณ
แอนะล็อกออกทางช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุต
ของวงจรแปลงสัญญาณ*/

/*ลำดับสุดท้ายเป็นการเก็บบันทึกข้อมูลของค่าต่างๆ
ในเวลาปัจจุบันแทนที่ข้อมูลในเวลาที่ผ่านมา(อดีต)
เพื่อใช้เป็นข้อมูลการคำนวณในรอบถัดไป*/

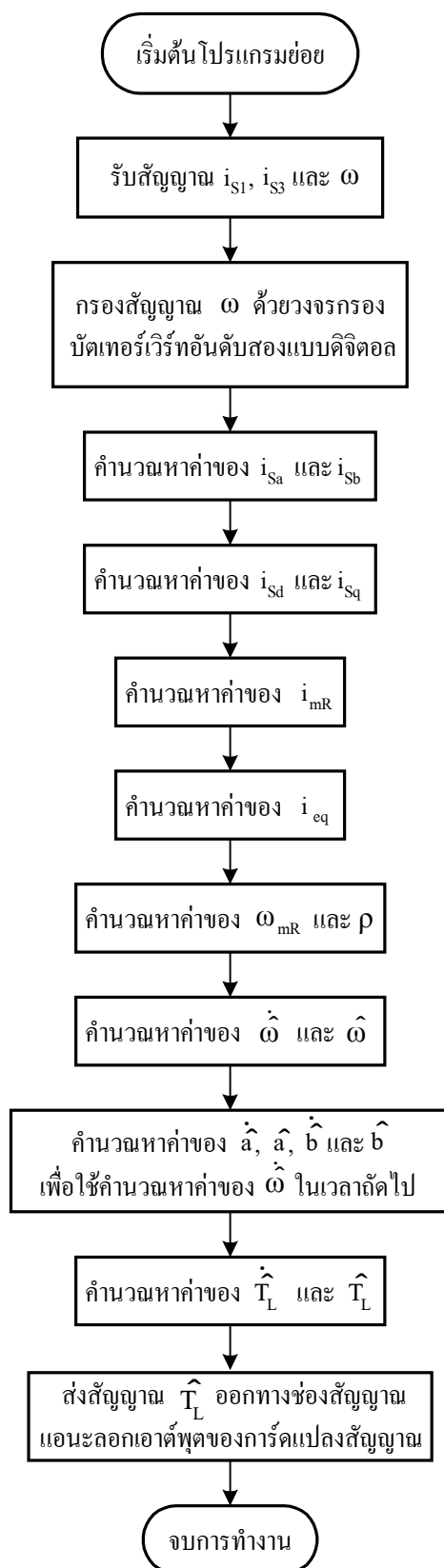

```

imR[1]=imR[0];
wmR[1]=wmR[0];
p[1]=p[0];
w_dot[1]=w_dot[0];
w[1]=w[0];
werror[1]=Speed_smooth[0]-w[0];
TL_pad[2]=TL_pad[1];
TL_pad[1]=TL_pad[0];
Speed[1]=Speed[0];
Speed_smooth[2]=Speed_smooth[1];
Speed_smooth[1]=Speed_smooth[0];
}

```

ค.2 การสร้างตัวสังเกตโพลิตอร์กแบบปรับตัว

โปรแกรมตัวสังเกตโพลิตอร์กแบบปรับตัวส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณโพลิตอร์กมีลำดับการทำงาน ดังนี้ ตัวสังเกตจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ถูกส่งมาจากช่องสัญญาณที่หนึ่ง สอง และสามของวงจรแปลงสัญญาณ นำมาแปลงเป็นตัวเลขของสัญญาณ i_{s1} , i_{s3} และ ω ตามลำดับ นำสัญญาณ ω ผ่านวงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิทัล โดยที่วงจรกรองดังกล่าวมีความถี่ตัดเท่ากับ 5 เฮิรตซ์ จากนั้นนำข้อมูลของสัญญาณทั้งสามซึ่งประกอบด้วย i_{s1} , i_{s3} และ ω ที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ คำนวณค่า i_{sa} , i_{sb} , i_{sd} , i_{sq} และ i_{mr} โดยใช้สมการที่ (2-5), (2-6), (2-8), (2-9) และ (2-10) ตามลำดับ การคำนวณค่า i_{eq} คำนวณได้จากผลคูณระหว่าง i_{mr} กับ i_{sq} สำหรับค่า ω_{mr} และ p คำนวณได้จากสมการที่ (2-11) และ (2-12) ตามลำดับ การคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นอยู่ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในส่วนของการคำนวณในตัวสังเกตโพลิตอร์กแบบปรับตัวที่เพิ่มเติมจากแผนการคำนวณของตัวสังเกตโพลิตอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ คือ การคำนวณหาค่าการประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (a) และการประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (b) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4-12) และ (4-13) ตามลำดับ จากนั้นทำการคำนวณ $\hat{\omega}$ และ $\hat{\tau}_L$ โดยใช้สมการที่ (4-11) และ (4-14) ตามลำดับ ในลำดับสุดท้ายจะนำค่า $\hat{\tau}_L$ ที่คำนวณได้แปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกออกจากช่องสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณเพื่อทำการวัดด้วยออสซิลโลสโคป ลำดับขั้นตอนการคำนวณในตัวสังเกตโพลิตอร์กแบบปรับตัวถูกอธิบายในแผนรูปที่ ค.2 เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการเข้าใจ



รูปที่ ค.2 แผนภูมิการคำนวณของโปรแกรมตัวสั่งเกตโพลคตอร์คแบบปรับตัว

ในส่วนของการหาค่าอินทิกรัลต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวจะใช้วิธีการเดียวกับที่ใช้ในตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับ

โปรแกรมภาษาซีของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณตัวเลขโหลดทอร์ก มีรายละเอียดดังนี้

#####

โปรแกรมภาษาซีที่ทำหน้าที่คำนวณโหลดทอร์กในตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว

โดย นายมัชฌูดิน ดาเด๊ะ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2545

#####

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#define SAMP_TME 0.001 /*กำหนดคาบการสุ่มครั้งที่*/
#define PAIR 2
#define alpha1 (double)0.1 /*ค่าเกนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว*/
#define alpha2 (double)0.1 /*ค่าเกนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว*/
#define gamma1 (double)1 /*ค่าเกนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว*/
#define gamma2 (double)1 /*ค่าเกนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว*/
#define L2 (double)-100.00 /*ค่าเกนของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว*/
#define PI (double)3.14159265358979
#define K (double)0.59268874666667 /*ค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า*/
#define B (double)0.000368 /*สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดของระบบ*/
#define J (double)0.001096 /*โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ*/
#define Tr (double)0.0444 /*ค่าคงตัวทางเวลาของโรเตอร์*/
#define msensor (double)2.63791127198200 /*ตัวคูณเพื่อแปลงเป็นตัวสัญญาณกระแสไฟฟ้า*/
#define mtacho (double)34.95080045872157 /*ตัวคูณเพื่อแปลงเป็นสัญญาณความเร็วรอบ*/
void A_Outport(int Data16); /*ฟังก์ชัน A_Outport(int) ทำหน้าที่แปลงข้อมูลตัวเลข
ฐานสองเป็นสัญญาณแอนะล็อกออกทางช่อง
สัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ
*/
void A_Inport(int Channel,int T_Analog[5]); /*ฟังก์ชัน A_Outport(int) ทำหน้าที่รับข้อมูลตัวเลข
จากช่องสัญญาณอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณ*/
double Dec_Data(int data16); /*ฟังก์ชัน Dec_Data(int) ทำหน้าที่แปลงตัวเลขฐาน
สองเป็นตัวเลขฐานสิบ*/
int Analog[5];
```

```

double    is1,is2,is3;
double    t[PAIR];
double    ao = -(B/J);
double    bo = K/J;
double    c = -(1.0/J);
double    isa, isb, isd, isq;
double    dimR[PAIR];
double    imR[PAIR];
double    wmR[PAIR];

double    p[PAIR];
double    w_dot[PAIR];
double    w[PAIR];
double    werror[PAIR];
double    TL_pad_dot[PAIR];

double    apad_dot[PAIR];
double    apad[PAIR];

double    bpad_dot[PAIR];
double    bpad[PAIR];

double    ieq;
double    TL_pad[3];
double    Speed[3];
double    Speed_smooth[3];

double    azord2[]={1.0,-1.955585, 0.956550};
double    bzord2[]={0.0, 0.000965};

void interrupt user_routine(void)

```

/*กำหนดค่าเริ่มต้นการประมาณค่าพารามิเตอร์ a */
/*กำหนดค่าเริ่มต้นการประมาณค่าพารามิเตอร์ b */
/*กำหนดค่าพารามิเตอร์กลางของ c */

/*คำนวณพื้นที่ของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำแม่เหล็ก*/
/*กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า*/
/*อัตราเร็วเชิงมุมของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์*/

/*ตำแหน่งเชิงมุม (p) ของแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากแกนสเตเตอร์*/

/*คำนวณพื้นที่ของความเร็วรอบที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าความเร็วรอบที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าความผิดพลาดของการคำนวณความเร็วรอบ*/

/*คำนวณพื้นที่ของตัวเลขโหลดทอร์กที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ*/

/*กระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า*/
/*ตัวเลขโหลดทอร์กที่ตัวสังเกตคำนวณได้*/

/*ค่าความเร็วรอบจริงของระบบ*/

/*ค่าความเร็วรอบจริงของระบบที่ผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์แบบบัตเทอร์เวิร์ทอันดับสอง*/

/*ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของวงจรกรองบัตเทอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิทัล*/

/*ฟังก์ชันของโปรแกรมย่อยของตัวสังเกตโหลด

```

{
A_Inport(0,Analog);

is1=msensor*Dec_Data(Analog[1]);

is3=msensor*Dec_Data(Analog[2]);

Speed[0]=mtacho*Dec_Data(Analog[3]);

Speed_smooth[0] =bzord2[1]*Speed[1]-azord2[1]
    *Speed_smooth[1]-azord2[2]*Speed_smooth[2];

t[0]=t[1] + SAMP_TME;

isa=(1.5)*is1;

isb=(-0.5)*sqrt(3)*(is1+2.0*is3);

isd=isa*cos(p[1])+isb*sin(p[1]);

isq=isb*cos(p[1])-isa*sin(p[1]);

dimR[0]=isd-imR[1];

imR[0]=imR[1]+SAMP_TME*(dimR[0]+dimR[1])
    /(2.0*Tr);

ieq= imR[0]*isq;

wmR[0] = 2.0*Speed_smooth[0]+isq/(Tr*imR[0]);

p[0] = p[1]+0.5*SAMP_TME*(wmR[0]+wmR[1]);

w_dot[0]=apad[1]*w[1]+bpad[1]*ieq+TL_pad[1]*co
    +(gamma2*bpad[1]-gamma1*apad[1])*werror[1];

w[0]=w[1]+0.5*SAMP_TME*(w_dot[0]+w_dot[1]);

apad_dot[0]=alpha1*(w[1]-gamma1*werror[1])
    *werror[1];

```

ทอร์กเชิงเส้นแบบเต็มอันดับส่วนที่ทำหน้าที่
 คำนวณตัวเลขโหลด*/

/*รับข้อมูลตัวเลขจากช่องสัญญาณของวงจรแปลง
 สัญญาณ*/

/*คูณส่วนกลับของค่าแกนของตัวตรวจรู้กระแส
 ไฟฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส
 ที่หนึ่ง */

/*คูณส่วนกลับของค่าแกนของเครื่องกำเนิดชนิด
 มาตรฐานวัดความเร็ว เพื่อเป็นข้อมูลของสัญญาณกระแส
 ไฟฟ้าเฟสที่สาม*/

/*คูณส่วนกลับของค่าแกนของเครื่องกำเนิดชนิด
 มาตรฐานวัดความเร็ว เพื่อเป็นข้อมูลของสัญญาณ
 ความเร็วรอบของระบบ*/

/*ทำการกรองข้อมูลของสัญญาณความเร็วรอบด้วย
 วงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ทอันดับสองแบบดิจิทัล*/

/*คำนวณค่า i_{Sa} */

/*คำนวณค่า i_{Sb} */

/*คำนวณค่า i_{Sd} */

/*คำนวณค่า i_{Sq} */

/*คำนวณค่าอนุพันธ์ของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าทำ
 แม่เหล็ก*/

/*คำนวณค่า i_{mR} */

/*คำนวณค่า i_{eq} */

/*คำนวณค่า ω_{mR} */

/*คำนวณค่า p */

/*คำนวณค่า $\dot{\omega}$ */

/*คำนวณค่า $\dot{\omega}$ */

/*คำนวณค่า $\dot{\alpha}$ */

```

apad[0]=apad[1]+0.5*SAMP_TME
    *(apad_dot[0]+apad_dot[1]);
bpad_dot[0]=alpha2*(ieq+gamma2*werror[1])
    *werror[1];
bpad[0]=bpad[1]+0.5*SAMP_TME
    *(bpad_dot[0]+bpad_dot[1]);
TL_pad_dot[0]=L2*werror[1];
TL_pad[0]=TL_pad[1]+0.5*SAMP_TME
    *(TL_pad_dot[0]+TL_pad_dot[1]);
A_Outport((int)(TL_pad[0]*8191.0/4.5));

t[1]=t[0];
dimR[1]=dimR[0];
imR[1]=imR[0];
wmR[1]=wmR[0];
p[1]=p[0];
w_dot[1]=w_dot[0];
w[1]=w[0];
werror[1]=Speed_smooth[0]-w[0];
apad_dot[1]=apad_dot[0];
apad[1]=apad[0];
bpad_dot[1]=bpad_dot[0];
bpad[1]=bpad[0];
TL_pad[1]=TL_pad[0];
Speed[1]=Speed[0];
Speed_smooth[2]=Speed_smooth[1];
Speed_smooth[1]=Speed_smooth[0];
}

```

/*คำนวณค่า $\hat{a}$ */

/*คำนวณค่า $\hat{b}$ */

/*คำนวณค่า $\hat{b}$ */

/*คำนวณค่า $\hat{\Gamma}_L$ */

/*คำนวณค่า $\hat{\Gamma}_L$ */

/*คูณตัวเลขโหลดทอรั้กที่คำนวณได้ด้วยส่วนกลับ
ของค่าแกนของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็น
สัญญาณแอนะล็อกและส่งออกออกทางช่องสัญญาณ
แอนะล็อกเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ*/

/*ลำดับสุดท้ายเป็นการเก็บบันทึกข้อมูลของค่าต่างๆ
ในเวลาปัจจุบันแทนที่ข้อมูลในเวลาที่ผ่านมา(อดีต)
เพื่อใช้เป็นข้อมูลการคำนวณในรอบถัดไป*/

ภาคผนวก ง.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวสำหรับระบบเซอร์โว”, การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 18-19 กรกฎาคม 2545
2. “Adaptive Load Torque Observer for Motor-Load Systems”, Proc. The International Conference on Robotics, Vision, Information and Signal Processing. pp.316-322, January 22-24, 2003.

ชื่อบทความ :	ตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวสำหรับระบบเซอร์โว
	Adaptive Load Torque Observer for Servo Systems
กลุ่มสาขาวิจัย :	วิศวกรรมศาสตร์
ผู้แต่ง :	มัธยมติน ตาเค๊ะ วิโรจน์ แสงธทอง และ อนันท์ อุ่นศิริไธย์
สถาบันการศึกษา :	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ :	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
อีเมล :	cewirote@ccs.sut.ac.th โทรศัพท์ : 0-4422-4400 โทรสาร : 0-4422-4220

บทนำ

ในระบบควบคุมเซอร์โวที่ต้องการความเที่ยงทางตำแหน่งและความเร็ว โหลดทอร์กเป็นการรบกวนภายนอกที่เกิดขึ้นตามปกติ และเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดความผิดพลาดในระบบดังกล่าว เมื่อพิจารณาถึงการลดต้นทุนและแบบจำลองของระบบเซอร์โว ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นจะทำหน้าที่ประมาณหรือคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์กซึ่งแทนที่การวัดโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริง [1] และตัวสังเกตโหลดทอร์กข้างต้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมเซอร์โวเพื่อชดเชยให้มีความเที่ยง เมื่อใช้สำคัญของการคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์กให้ตรงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริงคือค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตต้องเป็นตัวเดียวกับค่าพารามิเตอร์ของระบบเซอร์โว เนื่องจากในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์ของระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยสิ่งแวดล้อม เป็นผลให้ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์กได้ไม่ตรงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริง เมื่อพิจารณาถึงแนวคิดของการแก้ไขปัญหาข้างต้น แนวคิดของแผนการปรับตัวหรือการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กในขณะตัวสังเกตทำงานเพื่อให้การคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์กมีผลลัพธ์ที่ตรงกับหรือใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริง เป็นวิธีหนึ่งที่เกิดจากการเพิ่มหรือขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้น [2] จุดเด่นของตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัว คือการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวสังเกตไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่าพารามิเตอร์ของระบบเซอร์โว ในบทความนี้จะนำเสนอตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวในโครงสร้างใหม่ที่ต้องการข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและข้อมูลความเร็วของระบบเป็นข้อมูลอินพุตเพื่อคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์ก พร้อมกับแสดงผลการเลียนแบบโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริงในระบบเซอร์โวในกรณีที่ทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้น และตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวตามลำดับ

ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้หรืออุปกรณ์และวิธีการ

เมื่อตัวขับเคลื่อนในระบบเซอร์โวสร้างทอร์กเพื่อขับเคลื่อนโหลดให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการหมุน ระบบดังกล่าวจะมีพลวัตเป็น $\dot{\omega} = a\omega + b\ddot{\theta}_L + cT_L$ (1) โดยที่ ω คือความเร็วของระบบ, i_L คือกระแสไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อน T_L คือโหลดทอร์กที่เกิดจากแรงลม และแรงเสียดทานที่ต้านทานการหมุนของระบบ ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงช้ามากเมื่อเทียบกับพลวัตของระบบ นั่นคือ $\dot{T}_L \approx 0$ นอกจากนี้ $a = -B/J$, $b = K_t/J$ และ $c = -1/J$ โดยที่ B คือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด, K_t คือค่าคงที่ระหว่างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สัมพันธ์ และ J คือโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ ในระหว่างการเคลื่อนที่หรือการหมุนของระบบเซอร์โว ค่าพารามิเตอร์ B อาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และอายุการใช้งาน ฯลฯ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ K_t อาจจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิและปริมาณทางกายภาพอื่นที่เกี่ยวข้องกับการสร้างทอร์กทางแม่เหล็กของตัวขับเคลื่อน เช่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (เมื่อตัวขับเคลื่อนคือมอเตอร์) ฯลฯ แต่ค่าพารามิเตอร์ J จะมีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการหมุนของระบบเซอร์โว เมื่อใช้ของการเปลี่ยนแปลงค่า J คือการเปลี่ยนชนิดของโหลดหรือการเพิ่ม (การลด) น้ำหนักของโหลดก่อนการหมุนของระบบเซอร์โว ด้วยสาเหตุที่ค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อมและอายุการใช้งาน จึงเป็นผลให้ตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์กได้ไม่ตรงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริงหรือเกิดความผิดพลาด เพื่อลดทอนความผิดพลาดดังกล่าว การขยายโครงสร้างของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นโดยการเพิ่มส่วนที่มีการปรับเปลี่ยนหรือการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กในขณะตัวสังเกตทำงาน คือแนวทางหนึ่งที่เกิดจากการพิจารณาแผนการปรับตัวและมีสมการเป็น $\dot{\hat{\omega}} = \hat{a}\hat{\omega} + \hat{b}\hat{\ddot{\theta}}_L + \hat{c}\hat{T}_L + \hat{e}_1\tilde{\omega}$ (2) โดยที่ $\hat{e}_1 = -\gamma_1\hat{a} + \gamma_2\hat{b}$ คือค่าเกนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา, $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$ คือค่าผิดพลาดของความเร็ว, $\hat{a}$, $\hat{b}$, $\hat{c}$ คือตัวแปรสถานะของความเร็วและโหลดทอร์กตามลำดับที่ถูกคำนวณจากตัวสังเกต γ_1, γ_2 คือค่าเกนคั้งที่ และ $\hat{a}, \hat{b}$ คือค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตที่ถูกประมาณหรือถูกปรับเปลี่ยนตามเวลา ต่อมาหาผลต่างระหว่างสมการที่ (1) กับ (2) จะได้

$$\dot{\tilde{\omega}} = (\gamma_1 + 1)\hat{a} - \gamma_2\hat{b}\tilde{\omega} + \hat{a}[\tilde{\omega} - \gamma_1\tilde{\omega}] + \hat{b}[\hat{\ddot{\theta}}_L + \gamma_2\tilde{\omega}] + c\tilde{T}_L \quad \dots\dots\dots(3)$$

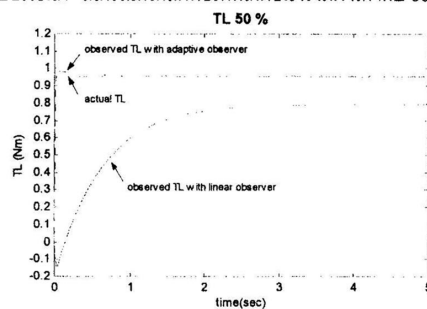
โดยที่ $\tilde{T}_L = T_L - \hat{T}_L$ คือค่าผิดพลาดระหว่างโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริงและโหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณ และ $\hat{a} = a - \hat{a}$, $\hat{b} = b - \hat{b}$ คือค่าผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ จากนั้นหาสมการที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนหรือประมาณค่า $\hat{a}$, $\hat{b}$ และคำนวณ $\hat{T}_L$ โดยการเลือกฟังก์ชันเลียนแบบ

$$\begin{aligned} \text{ดังนี้} \quad \dot{v} &= \frac{1}{2}\ddot{\omega}^2 + \frac{c}{2\ell_2}\ddot{\tau}_i^2 + \frac{1}{2\alpha_1}\ddot{a}^2 + \frac{1}{2\alpha_2}\ddot{b}^2 > 0 \quad \dots\dots\dots(4) \\ \text{จะได้} \quad \dot{v} &= [(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b]\ddot{\omega}^2 \quad \dots\dots\dots(5) \\ \text{เมื่อกำหนดให้} \quad \dot{\hat{a}} &= \alpha_1\ddot{\omega}(\dot{\omega} - \gamma_1\ddot{\omega}) \quad \dots\dots\dots(6) \\ &\quad \dot{\hat{b}} = \alpha_2\ddot{\omega}(\dot{\omega} + \gamma_2\ddot{\omega}) \quad \dots\dots\dots(7) \\ &\quad \dot{\hat{\tau}}_i = \ell_2\ddot{\omega} \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

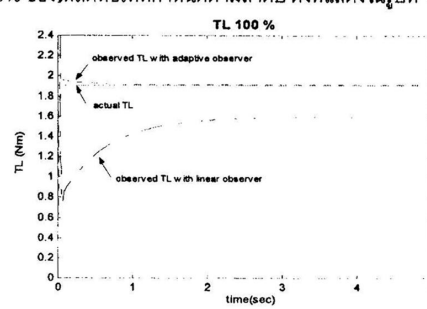
โดยที่ α_1, α_2 คือค่าเกนบวกคงที่ และ ℓ_2 คือค่าเกนลบคงที่ สำหรับเงื่อนไขที่ทำให้สมการที่ (3) มีเสถียรภาพ คือ $(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b < 0$ ซึ่งจะทำให้ $\dot{v} \leq 0$ นั้นหมายความว่า ค่าเริ่มต้น $\hat{a}(0)$ และ $\hat{b}(0)$ ไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่าพารามิเตอร์ของระบบเซอร์โว a และ b ตามลำดับ [3] ในส่วนของตัวแปรสถานะเริ่มต้น $\dot{\omega}(0)$ จะมีค่าเป็นตัวเลขใดๆ แต่ $\hat{\tau}_i(0)$ จะถูกเลือกให้เท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ $\hat{\tau}_i$ ในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะคงตัวจะมีความสัมพันธ์กับการปรับค่าเกน $\alpha_1, \alpha_2, \ell_2, \gamma_1$, และ γ_2 ในแต่ละครั้งของการใช้งานแผนการปรับตัวข้างต้นหรือตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวที่นำเสนอซึ่งประกอบด้วยสมการที่ (2), (6), (7) และ(8)

ผลการวิจัย

การเลือกแบบการทดสอบตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นและตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณตัวเลขของโหลดทอร์ก เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต a, b หรือ $\hat{a}(0), \hat{b}(0)$ มีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ของระบบ a, b เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่โหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเท่ากับ 50% และ 100% ของโหลดทอร์กที่กำหนดตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 ผลการสังเกตกรณีโหลดทอร์ก 50 %



รูปที่ 2 ผลการสังเกตกรณีโหลดทอร์ก 100 %

อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตโหลดทอร์กเชิงเส้นมีค่าแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของระบบ โหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตเชิงเส้นดังกล่าวมีตัวเลขไม่เท่ากับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริง แต่เมื่อใช้งานตัวสังเกตโหลดทอร์กแบบปรับตัวโดยที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตมีค่าแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ของระบบเช่นเดียวกัน โหลดทอร์กที่ได้จากการคำนวณของตัวสังเกตแบบปรับตัวข้างต้นมีตัวเลขตรงกับหรือใกล้เคียงกับโหลดทอร์กที่เกิดขึ้นจริง นอกจากนี้ตัวสังเกตโหลดทอร์กดังกล่าวต้องการเพียงข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่สมมูลกับทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วของระบบเท่านั้นเพื่อเป็นอินพุต ซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้งานในระบบเซอร์โวที่มีตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ใดๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

1. Chen, C. (1984). *Linear system theory and design*. New York: Oxford University Press.
2. Ko, J.S. (1998). *Asymptotically stable adaptive load torque observer for precision position control of BLDC motor*. IEE Proc.-Electrical Power Application. 145(4): 383-386
3. Narendra, K.S., and Annaswamy, A.M. (1989). *Stable adaptive systems*. USA: Prentice-Hall.

Adaptive Load Torque Observer for Motor-Load Systems

Mahyudean Dadeh¹, Wirote Sangtungong², Anant Oonsivilai³

*Control and Automation Research Group, School of Electrical Engineering,
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology*

111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand

¹Tel: +66-44-223-384, Fax: +66-44-224-220, E-mail: abear63@hotmail.com

²Tel: +66-44-224-395, Fax: +66-44-224-220, E-mail: cewirote@ccs.sut.ac.th

³Tel: +66-44-224-4468, Fax: +66-44-225-857, E-mail: anant@ccs.sut.ac.th

Abstract

This paper brings in the novel adaptive load torque observer for any motor-load systems whose load torque is nearly constant or changes very sluggish as compared with the system dynamics. The structure of the proposed observer is arranged under the assumption on both motor torque constant's and viscous friction coefficient's variation from their nominal value. To attain modified adaptive scheme for supporting such assumption, Lyapunov function are chosen and stability condition is carried out. Besides, the proposed observer requires only the angular speed and equivalent current as input data. Finally, simulation results are treated for verification.

Keywords:

adaptive observer, load torque observer, motor-load systems

Introduction

Few chief aims of invention around any state observers are served firstly to be in place of the usage of costly measurement devices for detecting some state variables, secondly to elude the application with sensors in the environment that be too noisy and thirdly to judge state components corresponding to inaccessible internal or external variables which cannot be measured [1]. In given motor-load systems, load torque is both an unknown, almost inaccessible input and a external disturbance. By this cause, the majority of high-performance servo control systems with load torque measurements to feed forward, would become quite impossible and impractical configurations. Or otherwise, if these servo control systems were consummately implemented, they would involve great expenditure on advanced torque sensors or transducers. To allay the afore-outlined obstacles, a motor-load dynamic model and its load torque as a state variable were taken into account for forming the linear full-order load torque observer that estimated the load torque in lieu of measuring the actual one [2]. Afterwards, from the outcome of progress about more novel and faster processor chips, other types of load torque observers were devised in features that be dedicated towards more intricate computations. They have been separately called to Kalman filter and sliding-

mode load torque observers [3,4]. All types of them kept a prevalent attribute to assist the closed-loop servo control systems to have robustness in responses against external load torque when one of them was included in the systems. Nevertheless, while these servo control systems were started and went on running, some real system parameters frequently deviated from the nominal parameters of load torque observers. Perhaps this motive reflected upon the estimated load torque to deflect from the actual one in steady-state period.

On another avenue, the adaptive load torque observer was created under the assumption on merely motor torque constant's deviation from the nominal value. Its construction was composed of the constitution of the linear full-order load torque observer and adaptive mechanism which solely contain part of on-line updating the motor torque constant's parameter. Unluckily, in the true system the viscous friction coefficient also deviated from its nominal value. Without part of on-line updating the viscous friction coefficient's parameter, the estimated load torque was feasible to deflect from the actual one in steady state period too. Furthermore, this adaptive load torque observer demanded the angular position, speed and the equivalent current in proportion to developed torque for earning input data onto calculations [5].

This article reports the novel adaptive load torque observer inside extended structure that consists of the linear full-order observer and modified adaptive scheme which comprises both parts of on-line updating the motor torque constant's and viscous friction coefficient's parameters [6]. Beneath the novel or proposed adaptive load torque one pending rotation, the estimated load torque nearly grow identical to the actual one through steady-state period. Over and above, only both the angular speed and the equivalent current in proportion to developed torque are desired as input data towards further calculations by the proposed load torque observer.

To verify theoretical performance of the proposed adaptive load torque observer, simulation tasks would be treated in contrast between the two estimated load torque errors which be procured from the proposed observer and the linear full-order one. These demonstrations provide the initial updated parameters and the observer parameters to be unlike with the true ones of system. Extremely, assessment and discussion around the proposed observer will be strictly explained and summarized.

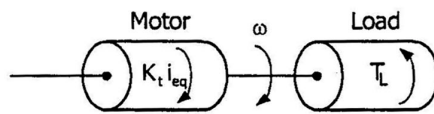


Figure 1 – Equivalent motor-load system

Approach and Methods

Motor-Load System Modeling

According to any electromechanical system, an electric actuator: herein dc motor or ac motor is coupled with a load for driving in manufacturing processes such as machine tools, plant automation, conveyors, blowers, mixers, agitators, etc. and in other applications about daily life such as pumps, fans, compressors, elevators, hoists, tractions, etc. Of course, these processes and applications constitute a load on the electrical drive. When the motor-load (Fig 1.) in aforementioned system is started and then rotates relatively along requirement of mechanical work, its dynamics is described by the following eqn.

$$\dot{\omega} = a\omega + b i_{eq} + c T_L \quad (1)$$

where ω is the angular speed (rad/sec); i_{eq} is the equivalent current in proportion to developed torque of the motor (A); T_L is the load torque (N.m) affected by friction (windage or gravity) and its effect resists rotation of system and its variation is very slow as compared with dynamics of one during a short period of time i.e. $\dot{T}_L \approx 0$. In addition, $a = -B/J$, $b = K_t/J$ and $c = -1/J$ where B is the viscous friction coefficient (N.m.s/rad); K_t is the torque constant (N.m/A) and J is the moment of inertia (kg.m²). Under constant load's mode of operation and pending rotation of the one, B generally varies due to various factors such as temperature, humidity, wear and operating point while K_t commonly also varies with heating, flux linkage, lifetime and same operating point. But J seems constant through each an occasion of rotation. Due to load changes, burden

or payload alteration before begins to rotate, these situations lead to J 's variation.

The Linear Load Torque Observer

Concerning precision velocity and position control systems, a load torque is external disturbances as unknown input that occur inherently and become a reason of error responses. Since in several circumstances a load torque is normally difficult to measure and often inaccessible; besides, data acquisition techniques for sensing such quantity have employed some expensive or special sensors, the scheme which desires an actual load torque to directly compensate for purpose of accuracy is not practical. However as cost saving is necessary and system model is considered mainly, a load torque estimation method instead of measurements is achieved by linear full-order state observer (Fig 2.) that be a part of control systems and given below.

$$\dot{\tilde{\omega}} = a\tilde{\omega} + b i_{eq} + c \tilde{T}_L + \ell_1 \tilde{\omega} \quad (2)$$

$$\dot{\tilde{T}_L} = \ell_2 \tilde{\omega} \quad (3)$$

where $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$ is the speed estimation error; $\hat{\omega}$, $\hat{T}_L$ are the estimated speed and load torque, respectively; ℓ_1, ℓ_2 are the constant positive and negative gains, respectively. In eqns. (2) and (3), $\tilde{T}_L$ and integrating on $d\tilde{T}_L/dt$ with respect to time are regarded as a state variable and an output of the observer, respectively. From eqns. (1) to (3), the error dynamics of the conventional observer is derived as

$$\dot{\tilde{\omega}} = (a - \ell_1) \tilde{\omega} + c \tilde{T}_L \quad (4)$$

$$\dot{\tilde{T}_L} = -\ell_2 \tilde{\omega} \quad (5)$$

where $\tilde{T}_L = T_L - \hat{T}_L$ is the load torque estimation error. The eqns. (4) and (5) point out that as the observer parameters are exactly equal with the relevant system parameters, the estimated load torque in steady-state period is corresponding to the actual one. Unfortunately, diverse factors, variant operating conditions and lifespan in real

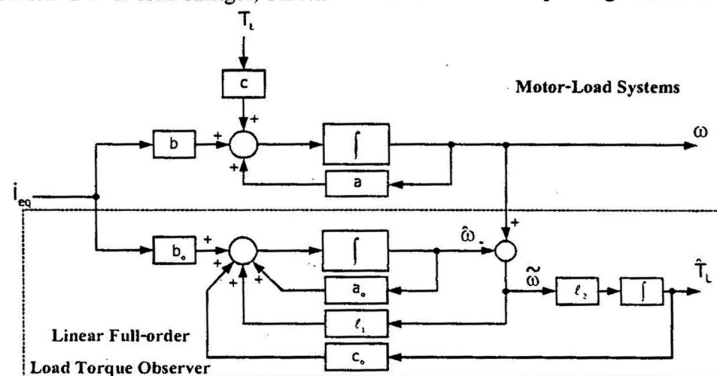


Figure 2 – Block diagram of linear full-order load torque observer

events make the system parameters reasonably alterable. This illustrates that $a = a_0 + \Delta a$ and $b = b_0 + \Delta b$ where a_0, b_0 are nominal parameter values which be determined from manufacturer's data sheets or by system test, off-line identification, using instruments, formulae or analytical calculations; $\Delta a, \Delta b$ are additive perturbations or uncertainties which happen between rotation of system. Thus, the observer parameters are always assigned to the nominal values as follow;

$$\dot{\hat{\omega}} = a_0 \hat{\omega} + b_0 i_{eq} + c \hat{T}_L + \ell_1 \tilde{\omega} \quad (6)$$

By subtracting eqn. (6) from eqn. (1), the next error eqn. is attained as

$$\dot{\tilde{\omega}} = (a_0 - \ell_1) \tilde{\omega} + c \tilde{T}_L + \Delta a \omega + \Delta b i_{eq} \quad (7)$$

This denotes that if i_{eq} is step input, the motor-load system in steady-state period will rotate by a constant angular speed that is an identical worth of steady-state estimated speed from the linear observer. Therefore, the speed estimation error over steady-state period likewise tends to zero ($t \rightarrow \infty, \tilde{\omega}(\infty) \rightarrow 0$) and

$$\tilde{T}_L(\infty) = -\frac{1}{c}(\Delta a \omega + \Delta b i_{eq}) \quad (8)$$

This implies that the steady-state estimated load torque error is independent on selecting the gains ℓ_1, ℓ_2 and initial states $\hat{\omega}(0), \hat{T}_L(0)$ but it is depend on $c, \Delta a, \Delta b, \omega$ and i_{eq} . Consequently, when both pertinent system and observer parameters are sufficiently distinct, both the actual and estimated load torque are explicitly different too.

The Proposed Adaptive Load Torque Observer

Subsequently, to decrease the estimated load torque error, expanding the structure of the linear full-order state observer by appending adaptation laws or on-line parameter

identification portions to the conventional observer is a way of contemplation about an adaptive mechanism which be defined as

$$\dot{\hat{\omega}} = \hat{a} \hat{\omega} + \hat{b} i_{eq} + c \hat{T}_L + \hat{\ell}_1 \tilde{\omega} \quad (9)$$

where $\hat{\ell}_1 = -\gamma_1 \hat{a} + \gamma_2 \hat{b}$ is the time-varying gain; γ_1, γ_2 are the constant gains; $\hat{a}, \hat{b}$ are the on-line updated parameters. By taking eqn. (9) from eqn. (1), the estimation error is expressed as

$$\dot{\tilde{\omega}} = [(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b] \tilde{\omega} + \tilde{a}(\hat{\omega} - \gamma_1 \tilde{\omega}) + \tilde{b}(i_{eq} + \gamma_2 \tilde{\omega}) + c \tilde{T}_L \quad (10)$$

where $\tilde{a} = a - \hat{a}, \tilde{b} = b - \hat{b}$ are the parameter errors. To obtain the adaptive scheme, the positive-definite Lyapunov function can be chosen as

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\omega}^2 + \frac{c}{2\alpha_1} \tilde{T}_L^2 + \frac{1}{2\alpha_1} \tilde{a}^2 + \frac{1}{2\alpha_2} \tilde{b}^2 \geq 0 \quad (11)$$

where α_1, α_2 are the positive adaptation gains. After differentiating V with respect to time and substituting eqn. (10) into the derivative, this yields

$$\dot{V} = [(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b] \tilde{\omega}^2 \quad (12)$$

where the parameter updates or adaptation laws satisfies

$$\dot{\hat{a}} = \alpha_1 \tilde{\omega} (\hat{\omega} - \gamma_1 \tilde{\omega}) \quad (13)$$

$$\dot{\hat{b}} = \alpha_2 \tilde{\omega} (i_{eq} + \gamma_2 \tilde{\omega}) \quad (14)$$

and the estimated load torque is available via

$$\hat{T}_L = \ell_2 \tilde{\omega} \quad (15)$$

In order to retain uniform asymptotical stability, the γ_1 and γ_2 gains are adjusted such that $(\gamma_1 + 1)a - \gamma_2 b < 0$ is established. This renders $\dot{V}$ definite negative ($\dot{V} \leq 0$) and

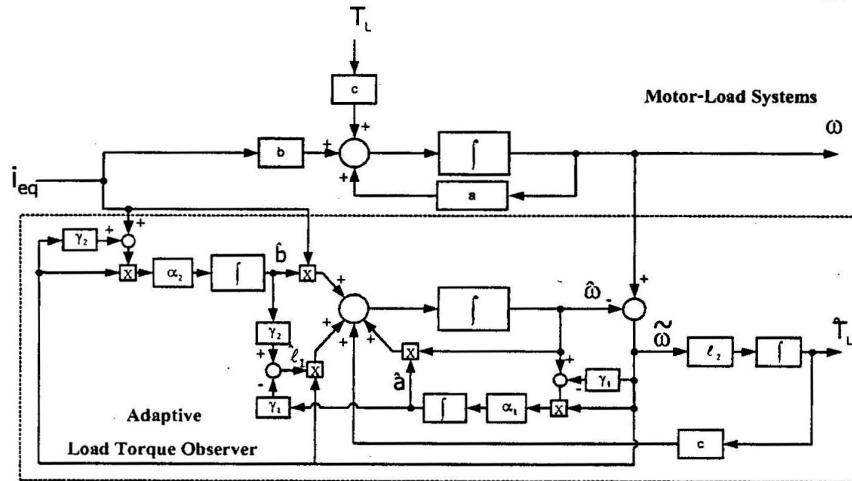


Figure 3 – Block diagram of adaptive load torque observer

signifies that the initial updated parameters ($\hat{a}(0)$ and $\hat{b}(0)$) may be essentially unequal with the conformable true parameters (a and b) while the initial estimated speed $\hat{\omega}(0)$ is an arbitrary value except the initial estimated load torque $\hat{\tau}_l(0)$ is usually disposed to be zero. Moreover, the estimated load torque error through transient and steady-state periods relies upon trimming the α_1 , α_2 , ℓ_2 , γ_1 and γ_2 design gains in each opportunity of rotation. The proposed adaptive load torque observer (Fig 3.) consists of eqns. (9), (13), (14) and (15).

When the whole initial updated parameters are taken to be the nominal values ($\hat{a}(0) = a_o$, $\hat{b}(0) = b_o$) and again i_{oq} is step input, the speed estimation error will converge to zero ($\tilde{\omega} \rightarrow 0$) as time continues to infinity ($t \rightarrow \infty$) and eqn. (10) reduces to

$$\ddot{\tau}_l(\infty) = -\frac{1}{c} [\ddot{\tilde{\omega}}(\infty)\omega + \ddot{\tilde{b}}(\infty)i_{oq}] \quad (16)$$

where the steady-state actual speed remains bounded to a final value. Eqn. (16) indicates that while steady-state period arrives, the estimated load torque error correlates with both the parameter errors and if all the design gains are appropriately tuned, both magnitudes of the parameter errors almost diminishes to zero such that the estimated load torque error magnitude is nearly exhausted.

When i_{oq} is a sinusoidal input, which expediently contains single frequency and adequate amplitude, the motor-load system will rotate clockwise and anti-clockwise, alternately. As time reaches to infinity, all errors simultaneously converge to zero although the entire initial updated parameters are commenced at any numbers or even no a priori knowledge ($\hat{a}(0) = 0$, $\hat{b}(0) = 0$), based on persistent excitation property of an adaptive mechanism. This case brings the estimated load torque to the actual one.

Results

Table 1 – Nominal parameters of the motor-load system

Rated Load Torque (N.m)	J_o (kg.m ²)	B_o (N.m s / rad)	K_{to} (N.m / A)
1.91	0.014197	0.018929	0.0568

Table 2 – Nominal parameter of the observers and the motor-load system

a_o	b_o	c_o
-1.3333	4.0008	-70.4374

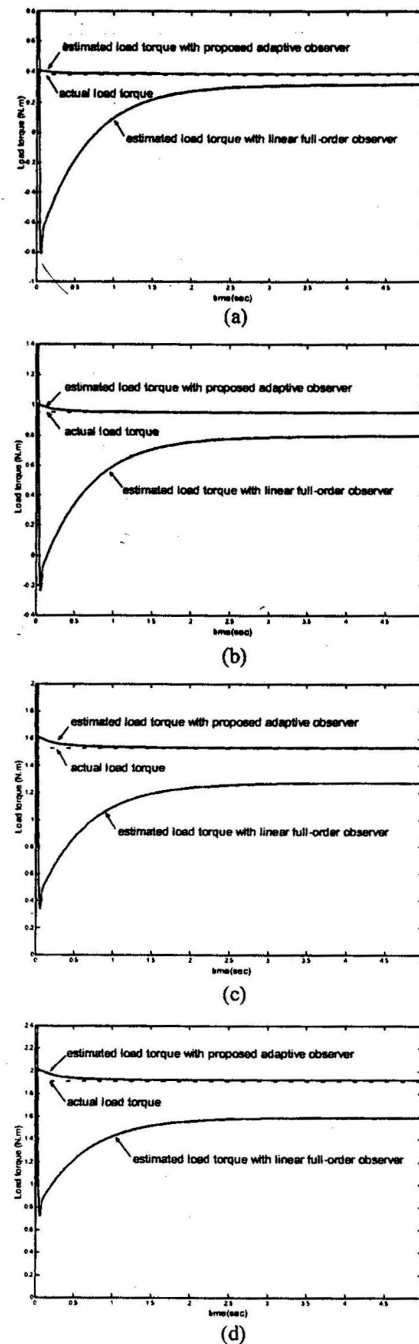
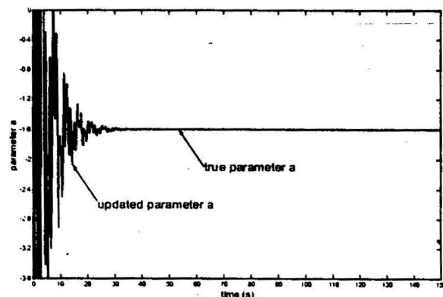
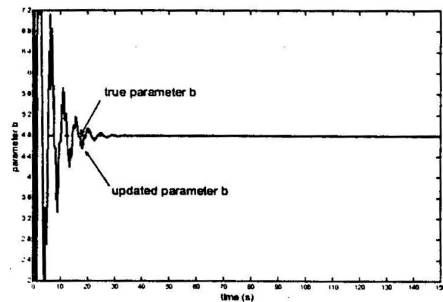


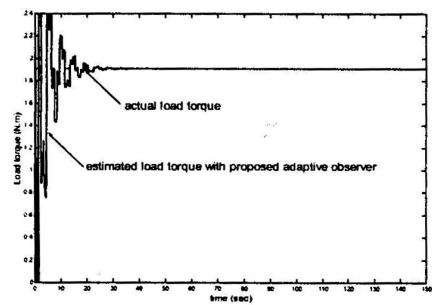
Figure 4 - Simulation results of load torque estimations at different percentage of rated load torque (a) 20%, (b) 50%, (c) 80%, (d) 100%



(a)

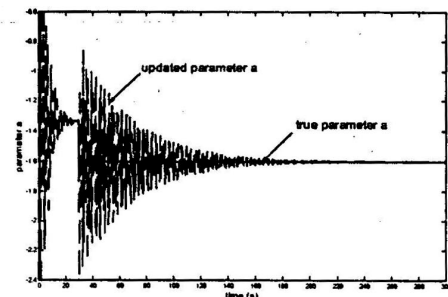


(b)

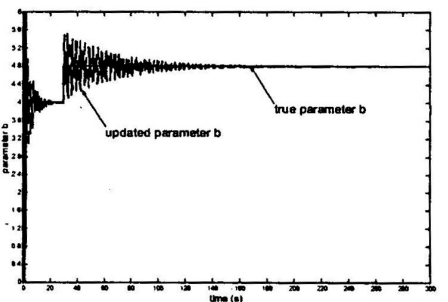


(c)

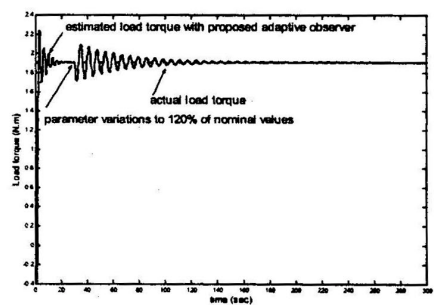
Figure 5 - Simulation results of persistent excitation property in case that both parameters are constant (a) parameter a, (b) parameter b, (c) load torque



(a)



(b)



(c)

Figure 6 - Simulation results of persistent excitation property in case that both parameters are varied at 30 sec. (a) parameter a, (b) parameter b, (c) load torque

The motor-load system that be used throughout all next examinations, holds its several nominal parameters as listed in table 1 and 2. The rated actual load torque that be prescribed in tests is 1.91 N.m. To compare the extents of accuracy along load torque estimation of the proposed adaptive load torque observer versus that of the linear full-order or conventional load torque observer, simulation procedures are set to allow these load torque observers' calculations to accompany the motor-load's rotation provided that the true system parameters vary from their nominal values until a and b increase to $1.2a_0$ and $1.2b_0$, respectively ($\Delta a = 20\%$ and $\Delta b = 20\%$) barring c which be still firm ($c = c_0$), whereas all initial updated parameters of the proposed observer and the conventional observer's parameters become equal to the relevant nominal values. For sake of inspection, load torque estimations of both these observers are executed at some different levels of the rated actual load torque such as 20%, 50%, 80% and 100% (full load torque) of it in first, second, third and fourth tests, respectively. Touching simplicity of evaluation, the motor-load system and both these observers in each of four tests are planned to receive i_{cq} as a step input in magnitude of 100 A with plus sign, together, so that the motor-load rotates towards either clockwise or counter-clockwise direction. Prior to first test, the ℓ_1 , ℓ_2 gains of the conventional load torque observer are picked out as 160 and -150 respectively via pole placement method with nominal parameters, then from second test to fourth test the ℓ_1 , ℓ_2 gains become still the same, so long as the α_1 , α_2 , γ_1 , γ_2 design gains of the proposed load torque observer are adjusted to 2000, 2000, 4.5, and 500 respectively through these four tests by foregoing trial and error method except the ℓ_2 design gain which be tuned to -130, -305, -470 and -570 at 20%, 50%, 80%, and 100% of the actual load torque, respectively.

Numerical results from first test to fourth test are illustrated in fig. 4-a, 4-b, 4-c and 4-d, respectively. Load torque estimations of both these observers are plotted by style of solid lines but some levels of the rated actual load torque at 20%, 50%, 80%, and 100% of it all are referred by style of dashed lines.

To examine the persistent excitation property of the proposed observer, i_{cq} is modified to be a sinusoidal input in amplitude of 100 A with one frequency of 1 Hz for need on alternately clockwise and anti-clockwise rotation of the motor-load system whereas the actual load torque is 100% rated of it. In addition, the true system parameters diversify from their nominal values till a and b enlarge to $1.2a_0$ and $1.2b_0$, respectively except c which seem constant. For interest in capability of the proposed observer, its whole initial updated parameters are put to zero while its design gains of α_1 , α_2 , γ_1 , γ_2 and ℓ_2 are chosen as 100, 100, 100, 100 and -500, respectively. These computational results are depicted in fig. 5-a, 5-b and 5-c.

For revealing further potential of the proposed observer that based on persistent excitation, some supposed environmental factors could urge a condition that the true system parameters are influenced to vary suddenly from

their nominal values to 120% of them relevantly at instant of 30 second, whereas i_{cq} become a sinusoidal input in greater amplitude of 200 A with the same frequency to achieve a shorter space of time on this simulation. The actual load torque, the whole initial updated parameters and all the design gains of the proposed observer are the same as that of last simulation. These computational results are shown in fig. 6-a, 6-b and 6-c.

Discussion

These graphs in fig. 4-a, 4-b, 4-c, and 4-d possess the similar results that in steady-state interval the estimated load torque of the proposed observer almost coincides with the actual one while the estimated load torque of the conventional observer leaves alone at rest below the actual one, noticeably. Even if the ℓ_1 , ℓ_2 gains of the conventional observer are changed into the other numbers, the steady-state estimated load torque error of the latter remains unchanged under the same level of the rated actual load torque.

They in fig. 5-a, 5-b and 5-c display that when the motor-load system rotates by sinusoidal angular speed because of such sinusoidal speed because of such sinusoidal i_{cq} , the proposed observer obviously secures two sinusoidal data of i_{cq} and ω , then over steady-state interval the on-line updated parameters are reached to their true system parameters such that the estimated load torque plainly coincides with the actual one. The transient parameter errors, transient load torque estimation error and more brief or prolonged transient interval all reckon upon selecting the α_1 , α_2 , γ_1 , γ_2 , ℓ_2 design gains.

They in fig. 6-a, 6-b and 6-c disclose that though the true system parameter moderately alters in step under sinusoidal i_{cq} and ω , the estimated load torque still coincides with the actual one, again. In transient interval the parameter errors and the load torque estimation error gradually decay until they decrease to zero at beginning of steady-state interval.

Conclusion

This article describes an attempt of modification about the novel adaptive load torque observer for any motor-load systems. Under the actual load torque which be almost constant, with motor torque constant's and viscous friction coefficient's deviations from their nominal value. These assumptions permit to impel the structure of the proposed observer considering adaptive mechanism which counteracts the aforementioned deviations such that the estimated load torque nearly converge to the actual one. On account of above simulation results, if the motor-load system to rotate either clockwise or counter-clockwise by constant angular speed then all initial updated parameters would be taken to become their nominal values and all design gains would be suitably tuned. But if the same motor-load system was desired to rotate clockwise and anti-clockwise alternately by sinusoidal angular speed then all

initial updated parameters would be always reset to zero and all design gains would be tuned moderately and fairly.

Acknowledgements

The authors are grateful very much to Assoc. Prof. Dr. Sarawut Sujitjorn and The Center for Scientific and Technological Equipment, Suranaree University of Technology for helpful suggestions and facility.

References

- [1] Antsaklis, P.J.; and Michel, A.N. 1997. *Linear systems*. USA: Prentice-Hall.
- [2] Buja, G.S.; Menis, R.; Valla, M.I. 1995. Disturbance Torque Estimation in a Sensorless DC Drive. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 42(4): 351-357.
- [3] Baik, I.C.; Kim, K.H.; Kim, H.S.; Moon, G.W.; and Youn, M.J. 1996. Robust Nonlinear Speed Control of PM Synchronous Motor using Boundary Layer Integral Sliding Control with Sliding Load Torque Observer. Power Electronics Specialists Conference. PESC '96 Record. 27th Annual IEEE. 2: 1242-1247.
- [4] Kim, C.K.; Rhew, H.W.; and Kim, Y.H. 1997. Robust speed control of PMSM using Kalman filter load torque observers. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. IECON 97. 23rd International Conference. 2: 918-923.
- [5] Ko, J.S. 1998. Asymptotically stable adaptive load torque observer for precision position control of BLDC motor. *IEE Proc.-Electrical Power Applicat.* 154(4) 383-386.
- [6] Narendra, K.S.; and Annaswamy, A.M. 1989. *Stable adaptive systems*. USA: Prentice-Hall.

ประวัติผู้เขียน

นายมัธยดิน ดาเต๊ะ เกิดเมื่อวันที่ 06 พฤษภาคม พ.ศ. 2522 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอัสสัมชัญอิสลามียะห์ จังหวัดนราธิวาส และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับสอง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2543 ขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้รับเงินอุดหนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนาเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2545 จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี