การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบคู่ควบเชิงกล

นายรณเดช จันทรมัส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-533-413-8

TORSIONAL RESONANCE SUPPRESSION IN A MECHANICAL COUPLED SYSTEM

Mr. Ronnadate Chantaramas

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 2004

ISBN 974-533-413-8

การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบคู่ควบเชิงกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)
ประธานกรรมการ

(รศ. น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

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

(อ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ

(รศ. น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

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

รณเดช จันทรมัส : การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบคู่ควบเชิงกล (TORSIONAL RESONANCE SUPPRESSION IN A MECHANICAL COUPLED SYSTEM)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 152 หน้า. ISBN 974-533-413-8

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหารีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล โดยพิจารณาระบบเป็นเชิงเส้นแบบอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้ดีตลอดย่านการทำงานอินพุตกว้าง การดำเนินงานดังกล่าวจะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยแบบจำลอง ARMAX การออกแบบตัวชดเชยจะพิจารณาวิธีการต่างๆ ได้แก่ ตัวชดเชย PI PID และ PIDA วิธีจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) และตัวชดเชยชนิดวงจรกรองแบบช่องบาก (notch filter) ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรกรองแบบช่องบากให้ผลดีกว่าวิธีการอื่นๆ จึงอนุวัตตัวชดเชยด้วยเทคโนโลยีแอนะลอกตามรูปแบบไบควอด จากการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลที่ได้รับการชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก พบว่า ตัวชดเชยดังกล่าวสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบได้ตลอดย่านการทำงานตามความคาดหวัง จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนภายนอกที่กระทำต่อระบบ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบ แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยนี้ยังคงให้ผลตอบสนองเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบโดยอาศัยวิธีฟังก์ชันพรรณนา พบว่า ระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบากยังคงมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานอินพุต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนักศึกษา รณเดช จันทรมัส
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

RONNADATE CHANTARAMAS : TORSIONAL RESONANCE SUPPRESSION IN A MECHANICAL COUPLED SYSTEM

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D. 152 PP.

ISBN 974-533-413-8

TORSIONAL RESONANCE/ARMAX/PIDA/CDM/NOTCH FILTER/BIQUAD

This thesis presents an approach to suppress the torsional resonance of a mechanical coupled system as a linear single-input-single-output (SISO) system to achieve satisfactory results through a wide range of inputs. By this approach, the mathematical model in ARMAX form is developed. The PI PID and PIDA compensators, the pole placement method with two parameter configuration, the Coefficient Diagram Method (CDM), and the notch filter are considered. From the simulation results, among them, the notch filter yields the most preferable performance. The notch-filter compensator is implemented by using analog devices in the biquad form. As results, the compensated system gives satisfactory responses without torsional resonance throughout the expected working region. From the simulation results, the compensated system can regulate the response when disturbance occurs, and provide satisfactory responses when the plant model is subjected to parameter variation. The stability of this system with notch filter is tested by the describing function method. It is found that the compensated system by the proposed method is stable throughout the expected working region.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2004

Student's Signature Ronnadate Chantaramas

Advisor's Signature S. Sujitjorn.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล รักษาการหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์เดชา พวงดาวเรือง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณชาตรี ชวนะนรเศรษฐ์ คุณวิชัย ศรีสุรักษ์ และคุณกองพล อารีรักษ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณสุดารัตน์ ขวัญอ่อน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัย รวมทั้งความเสียสละของสุดารัตน์ ที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่างๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

รณเดช จันทรมัส

สารบัญ

หน้า

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

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 3
2 แบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล 4
2.1 บทนำ 4
2.2 ระบบคู่ควบเชิงกล 4
2.3 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ 6
2.3.1 การระบุเอกลักษณ์ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน 7
2.3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์ 13
2.3.3 ข้อควรรู้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ 13
2.4 ขั้นตอนการทดสอบระบบเพื่อหาแบบจำลอง 15
2.5 ผลการทดสอบ 16
2.6 สรุป 28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยตัวชดเชย PI, PID และ PIDA 30
3.1 บทนำ.....30
3.2 การใช้ตัวชดเชย PI.....30
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....30
3.2.2 การออกแบบตัวชดเชยและผลการจำลองสถานการณ์.....32
3.3 การใช้ตัวชดเชย PID.....39
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....39
3.3.2 การออกแบบตัวชดเชยและผลการจำลองสถานการณ์.....41
3.4 การใช้ตัวชดเชย PIDA.....47
3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....47
3.4.2 การออกแบบตัวชดเชยและผลการจำลองสถานการณ์.....48
3.5 สรุป.....51
4 การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยตัวชดเชยจากวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ 52
4.1 บทนำ.....52
4.2 การใช้ตัวชดเชยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....52
4.2.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....53
4.2.2 การออกแบบตัวชดเชย.....60
4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีตัวชดเชย.....62
4.4 การอนุวัตตัวชดเชยด้วยเทคโนโลยีแอนะลอก.....67
4.5 การอนุวัตตัวชดเชยตามรูปแบบไบควอด.....68
4.6 ผลการทดสอบตัวชดเชย.....78
4.7 สรุป.....85
5 การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก.....86
5.1 บทนำ.....86
5.2 การใช้วงจรกรองแบบช่องบาก.....87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองแบบช่องบาก 87
5.2.2 การออกแบบวงจรกรองแบบช่องบาก 88
5.3 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก.....89
5.4 การอนุวัตวงจรกรองแบบช่องบาก 92
5.5 ผลการทดสอบและอภิปราย 94
5.6 เสถียรภาพของระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก 101
5.7 สรุป 105
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....106
6.1. สรุป 106
6.2 ข้อเสนอแนะ..... 108
รายการอ้างอิง.....110
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล 113
ภาคผนวก ข. โปรแกรมสำหรับการหาแบบจำลองด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ 124
ภาคผนวก ค. ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชย PID ด้วยวิธีการต่างๆ 135
ภาคผนวก ง. การออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้าง
แบบสองพารามิเตอร์.....142
ภาคผนวก จ. รายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....150
ประวัติผู้เขียน.....152

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 แบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกลตลอดย่านอินพุต 16
3.1 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย
และส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่า A.....35
3.2 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย
และส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่าซีโร 37
3.3 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย
และส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่า A.....37
3.4 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย
และส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่า W ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์.....43

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 แบบจำลองทางกายภาพของระบบคู่ควบเชิงกล 5
2.2 แบบจำลองทางพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกล 5
2.3 แผนภาพบล็อกของระบบคู่ควบเชิงกล 5
2.4 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6
2.5 โครงสร้างของแบบจำลองแบบกล่องดำ 10
2.6 แผนภาพแสดงการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์ 14
2.7 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 3.0 โวลต์ 17
2.8 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 3.7 โวลต์ 17
2.9 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 4.6 โวลต์ 18
2.10 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 5.7 โวลต์ 18
2.11 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 6.8 โวลต์ 19
2.12 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 7.8 โวลต์ 19
2.13 เอาต์พุตที่สถานะอยู่ตัว ณ อินพุตค่าต่างๆ 20
2.14 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_1(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 21
ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_1(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 21
2.15 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_2(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 22
ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_2(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 22
2.16 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_3(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 23
ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_3(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 23
2.17 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_4(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 24
ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_4(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 24
2.18 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_5(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 25
ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_5(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 25
2.19 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_6(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 26
ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_6(s)$ เทียบกับ $G(s)$ 26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_1 กับอินพุต 27
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับอินพุต 28
2.22 แผนภาพแสดงระบบวงรอบเปิด 28
3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวชดเชย 31
3.2 ผลตอบสนองทางเวลา ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ 33
3.3 ผลตอบสนองทางความถี่ ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ 33
3.4 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อทำการจูนค่า A 34
3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อทำการจูนค่า A 35
3.6 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อ ค่าซีโรของตัวชดเชยเป็น -3.5, -9.5, -20 และ -40 36
3.7 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อปรับจูนค่า A 38
3.8 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อใช้ตัวชดเชยตามสมการที่ (3-17) 42
3.9 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อปรับจูนค่า W 44
3.10 ผลการตอบสนองทางเวลา เมื่อปรับจูนค่า K_D 45
3.11 ผลตอบสนองทางเวลา ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ 46
3.12 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่มีตัวชดเชย PIDA ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ 49
3.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบที่มีตัวชดเชย PIDA ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ 50
4.1 ระบบตามโครงสร้าง CDM 53
4.2 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ของค่าสัมประสิทธิ์ a_i 58
4.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ของค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i และ ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* 59
4.4 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า γ_i 59
4.5 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า τ 60
4.6 โครงสร้างของระบบที่มีตัวชดเชย 62
4.7 ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวชดเชยตามวิธี CDM 63
4.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยแล้ว 63
4.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของพังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด 64
4.10 แผนภาพแสดงระบบหลังการชดเชยที่เพิ่มชุด G_{add} 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่เพิ่มชุด G_{add} 65
4.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่เพิ่มชุด G_{add} 66
4.13 ผลตอบสนองทางเวลาของเอาต์พุตเมื่อมีการรบกวนระบบ 67
4.14 การอนุวัตด้วยวงจรไบควอดตัวแปรสถานะ 69
4.15 การอนุวัตด้วยวงจรไบควอดโท-โทมัส 72
4.16 วงจรที่ใช้อนุวัตฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (4-50) 74
4.17 วงจรอนุวัตของตัวชดเชย G_{fn} 82
4.18 วงจรอนุวัตของตัวชดเชย G_{fbn} 83
4.19 ผลตอบสนองทางเวลาของตัวชดเชย G_{fbn1} จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ 84
4.20 ผลการทดสอบตัวชดเชย $G_{fbn1} \times 25 \times G_{fbn2} \times 145.07$ 85
5.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบช่องบาก 87
5.2 ผลตอบสนองของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบช่องบาก 89
5.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิดที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก 90
5.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก 90
5.5 โครงสร้างของระบบที่มีลักษณะเฉพาะความไม่เป็นเชิงเส้น 91
5.6 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่มีตัวชดเชยที่อินพุตค่าต่างๆ 91
5.7 การอนุวัตด้วยวงจรไบควอดตัวแปรสถานะ 92
5.8 วงจรอนุวัตของวงจรกรองแบบช่องบาก 93
5.9 การอนุวัตชุดเกน A_1 94
5.10 ผลตอบสนองทางเวลาของวงจรกรองแบบช่องบาก 94
5.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแบบช่องบาก 95
5.12 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของบล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว 96
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับแรงดันอินพุต 96
5.14 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอนุวัตชุด K 97
5.15 ผลการทดสอบของระบบคู่ควบเชิงกลที่ยังไม่มีการชดเชย 98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.16 โครงสร้างของระบบที่ปรับปรุงแล้ว 98
5.17 ผลทดสอบระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบากเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ 99
5.18 โครงสร้างของระบบเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ 100
5.19 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่อมีสัญญาณรบกวนระบบ 100
5.20 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบ 102
5.21 ระบบที่ปรากฏความไม่เป็นเชิงเส้น 103
5.22 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา 104
ก.1 แบบจำลองทางพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกล 114
ก.2 แผนภาพบล็อกของชุดขับ 114
ก.3 แผนภาพวงจรมอเตอร์กระแสตรง 115
ก.4 แผนภาพบล็อกของมอเตอร์ 116
ก.5 แผนภาพบล็อกของเพลาที่เชื่อมระหว่างมอเตอร์และโหลด 117
ก.6 แผนภาพบล็อกของโหลด 118
ก.7 แผนภาพบล็อกของระบบคู่ควบเชิงกล 118
ก.8 ก) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกลเมื่อยุบบล็อกที่ 1 ... 122
ข) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกลเมื่อยุบบล็อกที่ 2 ... 122
ค) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกลเมื่อยุบบล็อกที่ 3 ... 123
ง) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกลเมื่อยุบบล็อกที่ 4 ... 123
จ) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกลเมื่อยุบบล็อกที่ 5 ... 123
ง.1 โครงสร้างของระบบที่ออกแบบด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล 143
ง.2 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่ใช้ตัวชดเชยที่นำเสนอ 148
ง.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิดที่ใช้ตัวชดเชยที่นำเสนอ 148
ง.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดที่ใช้ตัวชดเชยที่นำเสนอ 149

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	คือ	แรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าสู่บล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว
a, b, z	คือ	ซีโรของตัวชดเชย PIDA
a_i	คือ	สัมประสิทธิ์ a_i
$a_n, a_{n-1}, ..., a_0$	คือ	สัมประสิทธิ์ของพหุนามลักษณะเฉพาะของระบบ
A	คือ	อัตราขยายของตัวชดเชย
A_1	คือ	ตัวชดเชยที่อยู่ในรูปอัตราขยายเพื่อการตามรอยอินพุต
ARMAX	คือ	แบบจำลอง ARMAX
ARX	คือ	แบบจำลอง ARX
b	คือ	แรงดันเอาต์พุตของบล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว
b_i, c_i, d_i, f_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำลองกล่องดำ
$\mathbf{B}$	คือ	เมตริกซ์ **B**
$B_a(s)$	คือ	พรีฟิลเตอร์
BJ	คือ	แบบจำลอง Box-Jenkins
$C(s)$	คือ	สัญญาณเอาต์พุต
CDM	คือ	วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์
C_1, C_2	คือ	ค่าความเก็บประจุในวงจรอิเล็กทรอนิกส์
d	คือ	เอาต์พุตที่ออกจากชุด $k_1G(s)$
d, e	คือ	โพลของตัวชดเชย PIDA
$\overline{D}_p(s)$	คือ	พหุนามเฮอร์วิทซ์
$D_1(s)$	คือ	สัญญาณรบกวนภายนอกที่กระทำ ณ ตำแหน่งอินพุตของระบบ
$D_2(s)$	คือ	สัญญาณรบกวนภายนอกที่กระทำ ณ ตำแหน่งเอาต์พุตของระบบ
e	คือ	เอาต์พุตของชุด K
$e(t)$	คือ	สัญญาณรบกวนขาว
Ess	คือ	ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว
$E_i(s)$	คือ	สัญญาณอินพุต
$E_o(s)$	คือ	เอาต์พุตจากทาโคมิเตอร์
f_N	คือ	เวกเตอร์คอลัมน์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

G_{add} คือ ตัวชดเชยที่เพิ่มขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพ

G_{c1}, G_{c2} คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยของชุด $G_c(s)$

G_f คือ ตัวชดเชยแบบป้อนไปหน้า

G_{fb} คือ ตัวชดเชยแบบป้อนกลับ

G_{fbn} คือ ตัวชดเชยแบบป้อนกลับที่ปรับเพิ่มขึ้นใหม่

G_{fn} คือ ตัวชดเชยแบบป้อนไปหน้าที่ปรับเพิ่มขึ้นใหม่

$G_{fn1}, G_{fn2}, G_{fn3}$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยชุด G_{fn}

$G_{fbn1}, G_{fbn2}, G_{fbn3}$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยของชุด G_{fbn}

$G_1, G_2, ..., G_6$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองแต่ละย่านการทำงาน

GM คือ ส่วนเผื่ออัตราขยาย

G(s) คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกล

$G^+(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 5%

$G^-(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบมีการเปลี่ยนแปลงลดลง 5%

$G_c(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย

$G_d(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดขับ

$G_p(s)$ คือ ฟังชันก์ถ่ายโอนของระบบที่ได้รับการปรับแก้แบบจำลอง

$G(q,\theta)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองเอาต์พุตที่อิสระต่อสัญญาณรบกวน

$H(q,\theta)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองการรบกวน

H(s) คือ เซนเซอร์

J_{sh}, K_{sh} คือ ค่าพารามิเตอร์ของเพลาในระบบคู่ควบเชิงกล

k_j คือ อัตราขยายของวงจรย่อยที่นำมาต่อเรียงกัน

k_v คือ ค่าคงตัวความผิดพลาดทางความเร็ว

k_1 คือ ตัวปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

K คือ ตัวลดทอนระดับสัญญาณของการวัด

K_A คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบเอ

K_D คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบดี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

K_I	คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบไอ
K_P	คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบพี
M	คือ ความชัน
n	คือ อันดับของสมการลักษณะเฉพาะ
nb, nc, nf, nk	คือ ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ
nk	คือ เวลาประวิง
N(a)	คือ ฟังก์ชันพรรณนาของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น
OE	คือ แบบจำลอง Output Error
p_k	คือ สัมประสิทธิ์ของพลานต์ สำหรับอันดับที่ k
p_{k-1}	คือ สัมประสิทธิ์ของพลานต์ สำหรับอันดับที่ k-1
P(s)	คือ สมการลักษณะเฉพาะของระบบ
PI	คือ รูปแบบตัวชดเชย PI
PID	คือ รูปแบบตัวชดเชย PID
PIDA	คือ รูปแบบตัวชดเชย PIDA
PM	คือ ส่วนเผื่อเฟส
P.O.	คือ เปอร์เซ็นต์ของการพุ่งเกิน
q	คือ ตัวปฏิบัติการเลื่อน
Q_j	คือ ตัวประกอบคุณภาพ
r_1, r_2, r_3	คือ ค่ารากของจำนวนจริง
R	คือ ค่ารากจำนวนจริงของคู่โพลเชิงซ้อน
$R_1, ...R_{12}$	คือ ค่าความต้านทานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์
R_N	คือ เมตริกซ์ R_N
R(s)	คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง
s_d	คือ ตำแหน่งของโพลเด่น
s_l	คือ ตำแหน่งโพลเด่นของระบบวงปิด
S	คือ แรงดันอิ่มตัว
t	คือ เวลาเต็มหน่วย
T_L, B_L, J_L, ω_L	คือ ค่าพารามิเตอร์ของโหลดในระบบคู่ควบเชิงกล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T_m, B_m, J_m, ω_m	คือ	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในระบบคู่ควบเชิงกล
T_p	คือ	เวลาที่เกิดค่ายอดสูงสุด
T_r	คือ	ช่วงเวลาขึ้น
T_s	คือ	ช่วงเวลาเข้าที่
$u(t)$	คือ	สัญญาณอินพุต
$\mathbf{V}$	คือ	เมตริกซ์ของแรงดัน
V_{in}	คือ	แรงดันอินพุตของวงจรอิเล็กทรอนิกส์
V_o	คือ	แรงดันเอาต์พุตของวงจรอิเล็กทรอนิกส์
V_1, V_2, V_3	คือ	แรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์
$V_N(\theta)$	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
W	คือ	อัตราขยายของตัวชดเชยตามสมการที่ (3-8)
x, y, z	คือ	โนดของแรงดันในวงจรอิเล็กทรอนิกส์
X	คือ	ขนาดของแรงดันอินพุตที่ให้กับวงจรชุด K
$y(t)$	คือ	สัญญาณเอาต์พุต
$\hat{y}(t \mid \theta)$	คือ	การทำนายค่าเอาต์พุต $y(t)$
$\mathbf{Z}$	คือ	เมตริกซ์ $\mathbf{Z}$
λ	คือ	อันดับสูงสุดของซีโร
β	คือ	มุม β
κ	คือ	พารามิเตอร์ κ
ζ	คือ	อัตราส่วนการหน่วง
τ	คือ	ค่าคงที่ทางเวลา
γ_i	คือ	ค่าดรรชนีเสถียรภาพ
γ_i^*	คือ	ค่าจำกัดเสถียรภาพ
ζ_z	คือ	อัตราส่วนการหน่วงของพหุนามเศษ
ζ_p	คือ	อัตราส่วนการหน่วงของพหุนามส่วน
$\varepsilon(t, \theta)$	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย
$\eta(t)$	คือ	แบบจำลองของเอาต์พุตที่อิสระต่อสัญญาณรบกวน
$\omega(t)$	คือ	แบบจำลองของสัญญาณรบกวน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ω	คือ ความถี่ ω
ω_P	คือ ส่วนจินตภาพของโพลเด่น
ω_π	คือ ความถี่ที่ทำให้ระบบมีมุมเฟสล้าหลัง 180 องศา
ω_{0j}	คือ ความถี่โพล
ω_1	คือ ความถี่ ω_1
σ	คือ ส่วนจริงของโพลเด่น
θ	คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ
$\hat{\theta}_N$	คือ ค่าประมาณของ θ
$\varphi(t)$	คือ เวกเตอร์ของอินพุตและเอาต์พุตเก่า
$\varnothing_m$	คือ ค่าของส่วนเผื่อเฟส
ψ	คือ มุม ψ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มีการใช้ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ากับกระบวนการผลิต เช่น ระบบเครื่องรีดโลหะ ซึ่งมีมอเตอร์ เพลา และโหลดต่อคู่ควบกัน มักประสบปัญหาอันเนื่องมาจากรีโซแนนซ์การบิด (torsional resonance) รีโซแนนซ์นี้เกิดจากเพลาของมอเตอร์มีความยืดหยุ่นอย่างจำกัด ส่งผลให้เมื่อแรงบิดส่งผ่านเพลาทำให้เกิดการบิดตัวของเพลา การบิดตัวของเพลาทำให้เกิดความแตกต่างของการหมุนในตำแหน่งเชิงมุมตลอดแนวเพลา ตำแหน่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ที่กระตุ้นและพารามิเตอร์ทางพลวัตของระบบ ในระบบเชิงกลที่มีการเก็บสะสมพลังงานจลน์จะทำให้บางความถี่อาจส่งผลให้มุมของการบิดตัวมีเฟสที่ตรงข้ามกัน ส่งผลให้ขนาดของการบิดตัวเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า รีโซแนนซ์การบิด ปรากฏการณ์นี้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางกล ทำให้ชิ้นส่วนประกอบต่างๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง เช่นบ่ารองเพลาแตกง่าย เพลาร้าวและหักก่อนเวลาอันควร และระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่าย รวมถึงสมรรถนะที่ด้อยลง

แนวทางการแก้ปัญหาการสั่นเนื่องจากแรงบิดในต่างประเทศได้มีผู้เสนอหลายวิธี เช่น การเลือกอัตราการป้อนกลับสถานะที่เหมาะสม (Fujikawa, Yang, Kobayashi, and Koga, 1991) การใช้ตัวสังเกตตามหลักการป้อนกลับสถานะ (Song, Ji, Sul, and Park, 1993) การควบคุมความเร็วแบบอัตราขยายอันดับสองเชิงเส้นด้วยการชดเชยแรงบิดโหลดป้อนไปหน้า (Ji, Lee, and Sul, 1993) การควบคุมความเร็วด้วยตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) และสถานะอันดับสองเชิงเส้น (Ji, and Sul, 1995) การควบคุมความเร็วที่เหมาะสมโดยการควบคุมอัตราส่วนรีโซแนนซ์อย่างช้า (slow resonance ratio control) (Hori, Sawada, and Chun, 1999) ในประเทศไทยได้มีผู้เสนอแนวทางการแก้ปัญหา เช่น การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบสองมวลโดยใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร่ (ชัชชัย อุทัยวสิน, 2543) การแก้ไขปัญหารีโซแนนซ์การบิดดังกล่าวมีข้อจำกัดคือการใช้งานระบบจำกัดไว้ที่จุดปฏิบัติงานเพียงจุดเดียว ต่อมาได้ทำการขยายย่านการทำงานของระบบให้กว้างขึ้นโดยคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (กองพัน อารีรักษ์, 2544) การปฏิบัติเช่นนี้จะต้องมีการหาลักษณะสมบัติแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ ซึ่งมีความ

ยุ่งยากซับซ้อนในการหารูปแบบของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงตำแหน่งของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น จากที่กล่าวมาจึงนำเสนอแนวทางแก้ปัญหารีโซแนนซ์การบิดด้วยการพิจารณาว่าระบบเป็นแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถใช้ระบบควบคุมแบบเชิงเส้นที่มีความง่ายในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวชดเชยระบบ โดยใช้การชดเชยทางพลวัตบนรากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบคลาสสิก (classical control system) พร้อมทั้งขยายย่านการทำงานของระบบให้กว้างขึ้น เพื่อให้สามารถใช้งานระบบคู่ควบเชิงกลได้อย่างคุ้มค่า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดของระบบคู่ควบเชิงกล
- เพื่อให้ระบบที่มีการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดแล้ว ทำงานได้ทุกค่าอินพุตที่สมจริง
- ออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์เพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX (AutoRegressive-Moving Average with eXogeneous) ดำเนินการในลักษณะการทดสอบสภาวะขั้นบันได (step-transient test)
- ย่านการทำงานของระบบคู่ควบเชิงกลกำหนดให้มีอินพุตอยู่ในช่วง 2.7-8.0 โวลต์ (สอดคล้องกับแรงดันอินพุตของมอเตอร์ 10.7-59.7 โวลต์)
- การพัฒนาตัวชดเชยใช้เทคโนโลยีแอนะลอก

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- ทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลพร้อมทั้งเก็บข้อมูล
- หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกลโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX
- ทำการออกแบบตัวชดเชยสี่รูปแบบ และดำเนินการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีตัวชดเชยดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบผล
- นำตัวชดเชยที่ให้ผลดีที่สุดจากการออกแบบสี่รูปแบบมาสร้างด้วยเทคโนโลยีแอนะลอกและทดสอบผลกับระบบคู่ควบเชิงกล
- วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้อุปกรณ์ต้นแบบที่ทำหน้าที่กำจัดรีโซแนนซ์การบิดอย่างได้ผลดี

- สามารถใช้แนวทางระบบควบคุมแบบเชิงเส้น เพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาเนื่องจากรีโซแนนซ์การบิดได้

- สามารถใช้งานระบบคู่ควบเชิงกลที่เสถียรและให้สมรรถนะเป็นที่พึงพอใจ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 5 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบคู่ควบเชิงกล แนวคิดของวิธีการหาแบบจำลองของระบบด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ รวมทั้งดำเนินการทดสอบระบบและหาแบบจำลองดังกล่าวด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบด้วยตัวชดเชย PI, PID และ PIDA และผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ใช้ตัวชดเชย พร้อมทั้งสรุปผลการใช้ตัวชดเชยดังกล่าวกับระบบคู่ควบเชิงกล

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ใช้ตัวชดเชยดังกล่าว แนวทางการอนุวัตตัวชดเชยด้วยเทคโนโลยีแอนะลอกที่อยู่ในรูปแบบไบควอด ผลการทดสอบตัวชดเชยที่ได้อนุวัตขึ้น รวมทั้งสรุปผลที่กล่าวมาทั้งหมด

บทที่ 5 กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่ใช้ตัวชดเชยดังกล่าว การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่มีการชดเชย การอนุวัตวงจรกรองแบบช่องบาก ผลการทดสอบตัวชดเชยและระบบหลังผ่านการชดเชยแล้ว พร้อมทั้งสรุปผลการดำเนินการ

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล

ภาคผนวก ข. รายละเอียดของโปรแกรมสำหรับการหาแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล

ภาคผนวก ค. ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชย PID ด้วยวิธีการต่างๆ

ภาคผนวก ง. การออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์

ภาคผนวก จ. รายการบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2
แบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล

2.1 บทนำ

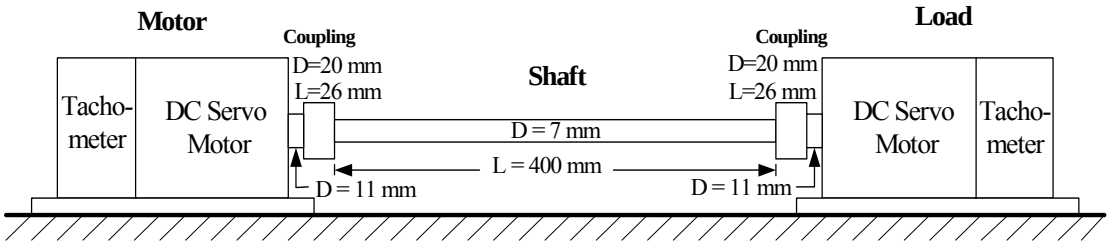
ในการดำเนินงานวิเคราะห์และออกแบบเพื่อควบคุมระบบด้วยวิธีการควบคุมแบบคลาสสิก (classical control) มีความจำเป็นที่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อใช้อธิบายพลวัตของกระบวนการที่ควบคุม และใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ดังนั้น กระบวนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งซึ่งควรได้รับการพิจารณาอย่างถ้วนถี่ แนวทางหนึ่งในการหาแบบจำลองระบบสามารถใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ (identification) ของระบบ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับต่อไป ในกรณีดำเนินการออกแบบตัวชดเชยเพื่อควบคุมระบบด้วยวิธีแบบคลาสสิก สามารถจัดรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ของฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถพิจารณาได้จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ให้กับระบบ

เนื้อหาในบทที่ 2 จะได้กล่าวถึงระบบคู่ควบเชิงกล ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพิจารณาเพื่อทำการออกแบบตัวชดเชยระบบ รวมทั้งได้นำเสนอแนวคิดของวิธีการหาแบบจำลองของระบบด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะอาศัยข้อมูลระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการทดสอบ โดยพิจารณาเป็นแบบจำลองกล่องดำ (black-box model) ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ปรากฏในแบบจำลองซึ่งพิจารณาในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนจะไม่สื่อถึงความหมายทางกายภาพของระบบ แต่ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์ ข้อควรรู้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ และขั้นตอนการทดสอบระบบเพื่อหาแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกลที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ด้วย รวมถึงผลตอบสนองทางเวลาในแต่ละย่านการทำงานของระบบคู่ควบเชิงกล เมื่อจำลองสถานการณ์ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงของระบบดังกล่าว

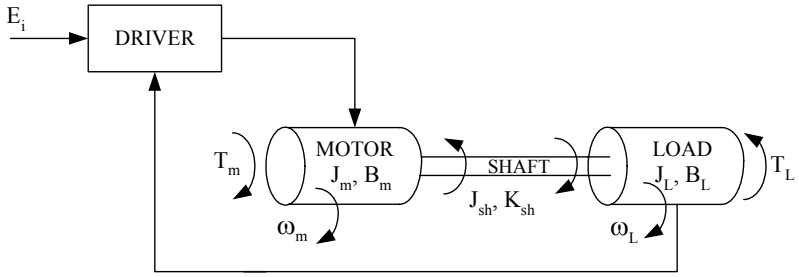
2.2 ระบบคู่ควบเชิงกล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยระบบที่ใช้จะเรียกว่าระบบคู่ควบเชิงกล ซึ่งจะประกอบไปด้วยดีซีเซอร์โวมอเตอร์จำนวนสองตัว (ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็น

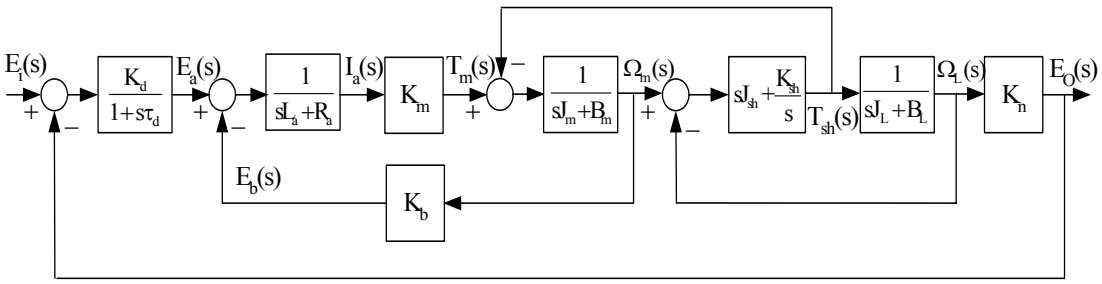
มอเตอร์ และอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นโหลด) ที่ต่อคู่ควบกันด้วยเพลายาวที่มีความยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พร้อมทั้งแสดงแบบจำลองทางพลวัตและแผนภาพบล็อกของระบบคู่ควบเชิงกลดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ของบริษัท ซันโย เดนกิ (Sanyo Denki Co., Ltd) รุ่น U718T-002 ซึ่งภายในตัวมอเตอร์จะมีทาโคมิเตอร์ (tachometer) ต่อคู่ควบอยู่ภายใน ผนวกกับตัวขับ (driver) รุ่น PDT-203-30 ของบริษัทเดียวกัน



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางกายภาพของระบบคู่ควบเชิงกล



รูปที่ 2.2 แบบจำลองทางพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกล



รูปที่ 2.3 แผนภาพบล็อกของระบบคู่ควบเชิงกล

จากแผนภาพบล็อกที่แสดงในรูปที่ 2.3 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างเอาต์พุตจากทาโคมิเตอร์ $E_o(s)$ กับ สัญญาณอินพุต $E_i(s)$ ได้ดังสมการที่ (2-1) ทั้งนี้รายละเอียดในการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกลได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก.

$$G(s) = \frac{E_o(s)}{E_i(s)}$$

$$= \frac{h_2 s^2 + h_0}{g_5 s^5 + g_4 s^4 + g_3 s^3 + g_2 s^2 + g_1 s + g_0} \qquad (2\text{-}1)$$

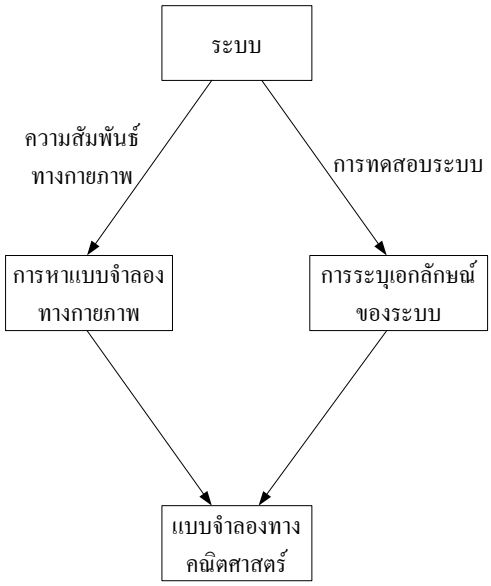
2.3 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีดังนี้

1) การหาแบบจำลองด้วยวิธีทางกายภาพ (physical modeling) วิธีนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมทางพลวัตด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

2) วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) วิธีนี้จะอาศัยข้อมูลจากการทดสอบระบบโดยนำสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมาผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม

กระบวนการสร้างแบบจำลองทั้งสองวิธีข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถจัดได้หลายรูปแบบ (Ljung and Glad, 1994) ซึ่งเมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ปรากฏค่าพารามิเตอร์ (parameterized model) สามารถแบ่งประเภทของแบบจำลองโดยใช้ความเข้าใจทางกายภาพของระบบเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) แบบจำลองเฉพาะกรณี (tailor-made models) เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยอาศัยความรู้ทางกายภาพของระบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ปรากฏในแบบจำลองจะสื่อถึงความหมายทางกายภาพของระบบ

2) แบบจำลองทั่วไป (ready-made models) เป็นแบบจำลองที่มีความยืดหยุ่นโดยพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้จะไม่สื่อถึงความรู้ทางกายภาพของระบบ แต่จะใช้เป็นสิ่งที่อธิบายคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบ แบบจำลองนี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แบบจำลองกล่องดำ (black-box model)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยพิจารณาเป็นแบบจำลองที่ปรากฏค่าพารามิเตอร์แบบกล่องดำชนิดที่เป็นเชิงเส้น และจัดแบบจำลองที่ได้ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีอันดับของจำนวนโพลและซีโรเป็นไปตามแบบจำลองทางกายภาพของระบบ เพื่อที่จะนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการออกแบบตัวชดเชยให้กับระบบคู่ควบเชิงกลต่อไป

2.3.1 การระบุเอกลักษณ์ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน

โดยทั่วไป แบบจำลองแบบกล่องดำจะอธิบายในเทอมเวลาเต็มหน่วย (discrete time) เนื่องจากข้อมูลถูกบันทึกในแบบชักตัวอย่าง ถ้าต้องการแบบจำลองในเทอมเวลาต่อเนื่อง (continuous time) สามารถทำได้โดยแปลงแบบจำลองจากเวลาเต็มหน่วยเป็นแบบเวลาต่อเนื่องได้ ด้วยวิธีต่างๆ อาทิเช่น วิธีการแปลงแบบทุสติน (tustin transformation) เป็นต้น แบบจำลองชนิดเวลาเต็มหน่วยแบบเชิงเส้น แสดงได้ดังสมการที่ (2-2) ทั้งนี้ เฉพาะเนื้อหาที่ปรากฏในหัวข้อ 2.3.1 นี้เท่านั้น ที่ใช้ t ในความหมายถึงเวลาเต็มหน่วย

$$y(t) = \eta(t) + \omega(t) \tag{2-2}$$

โดยที่ $\eta(t)$ คือ แบบจำลองของเอาต์พุตที่อิสระต่อสัญญาณรบกวน

$\omega(t)$ คือ แบบจำลองของสัญญาณรบกวน

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของ $\eta(t)$ และ $\omega(t)$ ได้ดังสมการที่ (2-3) และ (2-4) ตามลำดับ

$$\eta(t) = G(q,\theta)u(t) \tag{2-3}$$

$$\omega(t) = H(q,\theta)e(t) \tag{2-4}$$

โดยที่ u(t) คือ สัญญาณอินพุต และ e(t) คือ สัญญาณรบกวนขาว (white noise) ทั้งนี้สมการที่ (2-3) สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งแสดงดังสมการที่ (2-5)

$$\eta(t) + f_1\eta(t-1) + \ldots + f_{nf}\eta(t-nf) = b_1u(t-nk) + \ldots + b_{nb}u(t-(nb+nk-1)) \tag{2-5}$$

กำหนดให้ $G(q,\theta)$ และ $H(q,\theta)$ เป็นฟังก์ชันของตัวปฏิบัติการเลื่อน q (shift operator) แสดงได้ดังสมการที่ (2-6) และ (2-7) ตามลำดับ

$$G(q,\theta) = \frac{B(q)}{F(q)} = \frac{b_1q^{-nk} + b_2q^{-nk-1} + \ldots + b_{nb}q^{-nk-nb+1}}{1 + f_1q^{-1} + \ldots + f_{nf}q^{-nf}} \tag{2-6}$$

$$H(q,\theta) = \frac{C(q)}{D(q)} = \frac{1 + c_1q^{-1} + \ldots + c_{nc}q^{-nc}}{1 + d_1q^{-1} + \ldots + f_{nd}q^{-nd}} \tag{2-7}$$

เมื่อ nb, nc, nd, nf และ nk คือ ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ ทั้งนี้ nk หมายถึง เวลาประวิง และ b_i, c_i, d_i และ f_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองกล่องดำ และกำหนดให้คาบเวลาของการชักตัวอย่างมีค่าคงที่ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2-2) สามารถเขียนสรุปได้ดังสมการที่ (2-8) และ (2-9)

$$y(t) = G(q,\theta)u(t) + H(q,\theta)e(t) \tag{2-8}$$

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \tag{2-9}$$

โดยที่ เวกเตอร์พารามิเตอร์ θ จะประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ b_i, c_i, d_i และ f_i และจะพบว่าแบบจำลองกล่องดำจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ 5 ตัว คือ nb, nc, nd, nf และ nk ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวที่แสดงดังสมการที่ (2-9) เป็นที่รู้จักกันในชื่อแบบจำลอง Box-Jenkins (BJ)

ถ้าสัญญาณรบกวนไม่ได้ถูกนำมาใช้สร้างแบบจำลอง และแบบจำลองของสัญญาณรบกวน H(q) กำหนดให้เป็น 1 นั่นคือ nc = nd = 0 ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลอง Output Error (OE) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2-10)

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + e(t) \quad (2\text{-}10)$$

กำหนดให้พหุนามส่วนของสมการที่ (2-6) และ (2-7) มีค่าเหมือนกัน ดังสมการที่ (2-11) โดยที่ na คือค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ nf และ nd

$$F(q) = D(q) = A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \ldots + a_{na} q^{-na} \quad (2\text{-}11)$$

เมื่อทำการคูณสมการที่ (2-8) ด้วย A(q) จะได้เป็นสมการที่ (2-12) ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลอง ARMAX (AutoRegressive-Moving Average with eXogeneous)

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \quad (2\text{-}12)$$

ถ้ากำหนดให้ C(q) เท่ากับ 1 นั่นคือ nc = 0 จะได้แบบจำลองเป็นดังสมการที่ (2-13) ซึ่งรู้จักกันในชื่อ แบบจำลอง ARX (AutoRegressive with eXogenous variable)

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (2\text{-}13)$$

จากสมการที่ (2-8) จะสามารถทำการทำนายค่าเอาต์พุต y(t) ได้ดังสมการที่ (2-14)

$$\hat{y}(t \mid \theta) = G(q, \theta)u(t) \quad (2\text{-}14)$$

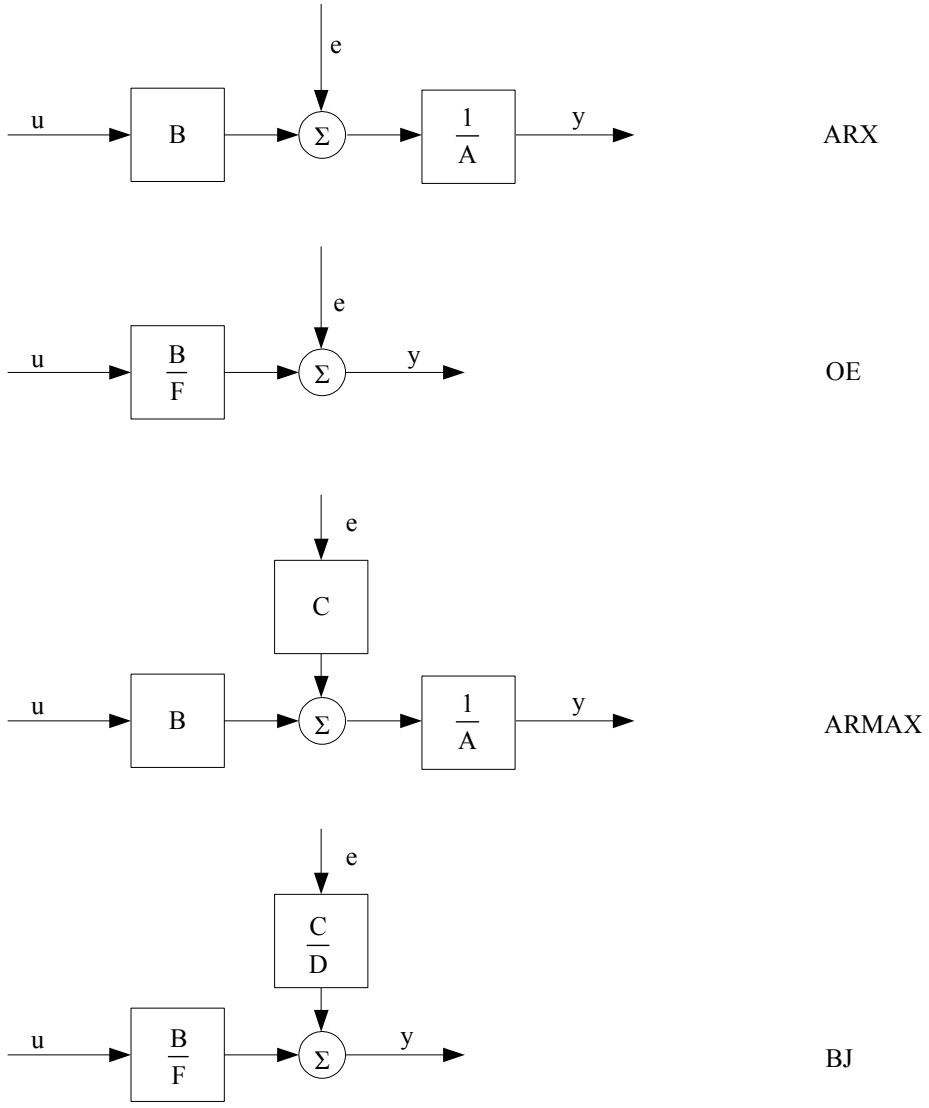
จากกรณีแบบจำลอง ARX ดังสมการที่ (2-13) จะได้

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \ldots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-nk) + \ldots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \quad (2\text{-}15)$$

และจะได้ค่าการทำนายเอาต์พุต $\hat{y}(t \mid \theta)$ เป็นดังสมการที่ (2-16)

$$\hat{y}(t \mid \theta) = -a_1 y(t-1) - \ldots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-nk) + \ldots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) \quad (2\text{-}16)$$

จากที่กล่าวมาสามารถสรุปโครงสร้างของแบบจำลองกล่องดำเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแบบจำลองแบบกล่องดำ

เมื่อพิจารณารูปแบบโครงสร้างแบบจำลองดังสมการที่ (2-8) ค่าการทำนายสามารถหาได้ในอีกทางหนึ่งโดยทำการคูณสมการที่ (2-8) ด้วย $H^{-1}(q,\theta)$ จะได้เป็นดังสมการที่ (2-17)

$$y(t) = [1 - H^{-1}(q,\theta)]y(t) + H^{-1}(q,\theta)G(q,\theta)u(t) + e(t) \qquad (2\text{-}17)$$

จากสมการที่ (2-17) จะได้ค่าการทำนาย $\hat{y}(t \mid \theta)$ เป็นดังสมการที่ (2-18)

$$\hat{y}(t \mid \theta) = [1 - H^{-1}(q,\theta)]y(t) + H^{-1}(q,\theta)G(q,\theta)u(t) \qquad (2\text{-}18)$$

ค่าการทำนายดังสมการที่ (2-18) สามารถทำการจัดรูปแบบใหม่โดยใช้การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) แสดงดังสมการที่ (2-19)

$$\hat{y}(t \mid \theta) = \theta^T \varphi(t) \tag{2-19}$$

โดยที่ θ คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ

$\varphi(t)$ คือ เวกเตอร์ของอินพุตและเอาต์พุตเก่าซึ่งอาจเรียกว่า รีเกรสเซอร์ (regressor)

นำแบบจำลอง ARX มาจัดรูปตามสมการที่ (2-19) ค่า θ และ $\varphi(t)$ จะได้เป็นดังสมการที่ (2-20) และ (2-21) ตามลำดับ

$$\theta = [a_1 \; a_2 \ldots a_{na} \; b_1 \ldots b_{nb}]^T \tag{2-20}$$

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \ldots - y(t-na) \;\; u(t-nk) \ldots u(t-nk-nb+1)]^T \tag{2-21}$$

ในการประเมินว่าค่าการทำนายดีเพียงพอกับความต้องการหรือไม่ สามารถดูได้จากค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (prediction error) ที่ช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งเขียนแทนด้วย $\varepsilon(t,\theta)$ ดังสมการที่ (2-22)

$$\varepsilon(t,\theta) = y(t) - \hat{y}(t \mid \theta) \tag{2-22}$$

เมื่อเก็บรวบรวมข้อมูลระหว่างอินพุตและเอาต์พุตตลอดช่วงเวลาที่สนใจ ($t = 1, \ldots, N$) ค่าความคลาดเคลื่อนสามารถเขียนด้วย $V_N(\theta)$ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2-23)

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} \varepsilon^2(t,\theta) \tag{2-23}$$

จากสมการที่ (2-23) สามารถทำการหาค่าพารามิเตอร์ θ ในการคำนวณจะทำการเลือกค่า θ ที่ทำให้สมการที่ (2-23) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งแทนด้วยสมการที่ (2-24)

$$\hat{\theta}_N = \arg\min_{\theta} V_N(\theta) \tag{2-24}$$

ส่วนการคำนวณเมื่อแบบจำลองเป็นแบบถดถอยเชิงเส้นดังสมการที่ (2-19) ค่าความคลาดเคลื่อน $\varepsilon(t,\theta)$ สามารถหาได้ดังสมการที่ (2-25)

$$\varepsilon(t,\theta) = y(t) - \theta^T\varphi(t) \tag{2-25}$$

และค่าความคลาดเคลื่อน $V_N(\theta)$ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-26)

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} y^2(t) - 2\theta^T f_N + \theta^T R_N \theta \tag{2-26}$$

โดยที่ f_N เป็นเวกเตอร์คอลัมน์ และ R_N เป็นเมตริกซ์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2-27) และ (2-28) ตามลำดับ

$$f_N = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)y(t) \tag{2-27}$$

$$R_N = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)\varphi^T(t) \tag{2-28}$$

ถ้า R_N สามารถอินเวิร์สได้ (invertible) สมการที่ (2-26) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2-29)

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} y^2(t) - f_N^T R_N^{-1} f_N + (\theta - R_N^{-1}f_N)^T R_N (\theta - R_N^{-1}f_N) \tag{2-29}$$

จากสมการที่ (2-29) ค่า $V_N(\theta)$ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทอมทางด้านขวาสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\theta = \hat{\theta}_N = R_N^{-1} f_N \tag{2-30}$$

ดังนั้น การประมาณค่ากำลังสองแบบน้อยที่สุดของ $\hat{\theta}_N$ สามารถพิจารณาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2-28) และ (2-30) แต่ในทางปฏิบัติจะทำการหลีกเลี่ยงการหาเมตริกซ์ผกผันของ R_N ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเชิงตัวเลข และ $\hat{\theta}_N$ สามารถแก้สมการหาคำตอบด้วยการใช้ระบบสมการเชิงเส้น

2.3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์

ลำดับขั้นของกระบวนการระบุเอกลักษณ์สามารถแบ่งได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) จัดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบระบบ และดำเนินการทดสอบระบบพร้อมทั้งเก็บข้อมูลของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต

ขั้นตอนที่ 2) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาปรับสภาพข้อมูลให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการหาแบบจำลอง เช่น ถ้าข้อมูลมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นมาก อาจใช้วงจรกรองสัญญาณเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนทิ้งไป เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3) นำข้อมูลที่ปรับสภาพให้เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 2 มาทำการหาแบบจำลองด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ตามโครงสร้างแบบจำลองที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 4) นำแบบจำลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มาผ่านกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model validation) เพื่อพิจารณาว่าแบบจำลองที่ได้สามารถนำไปใช้แทนระบบได้หรือไม่

- ถ้ายอมรับแบบจำลอง ก็ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 7
- ถ้าไม่ ก็ดำเนินการขั้นตอนที่ 5 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 5) ตรวจสอบว่าแบบจำลองมีปัญหาที่โครงสร้างของแบบจำลองหรือไม่

- ถ้ามี ก็ดำเนินการเลือกโครงสร้างของแบบจำลองใหม่อีกครั้ง แล้วกลับไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง
- ถ้าไม่ ก็ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 6 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 6) ตรวจสอบว่าปัญหาเกิดจากข้อมูลที่นำมาทำการระบุเอกลักษณ์หรือไม่

- ถ้าใช่ ก็ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2
- ถ้าไม่ ก็ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 7) เสร็จสิ้นขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ของระบบ จะได้แบบจำลองเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

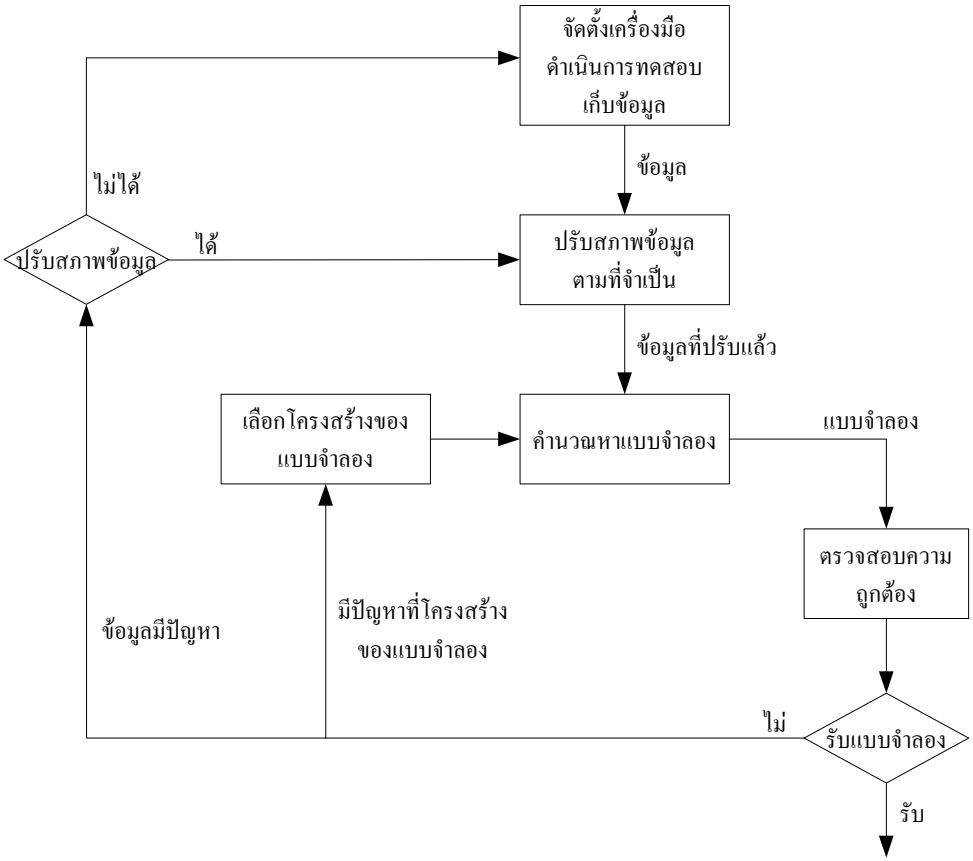
จากขั้นตอนการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.6

2.3.3 ข้อควรรู้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

ในการทดสอบระบบเพื่อที่จะนำข้อมูลไปผ่านกระบวนการระบุเอกลักษณ์ของระบบมีปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึงดังต่อไปนี้

การเลือกช่วงเวลาชักตัวอย่าง (sampling interval)

ช่วงเวลาชักตัวอย่างเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อไม่ให้ข้อมูลที่ได้เกิดความผิดพลาดหรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์เคลือบแฝง (aliasing) ซึ่งจากทฤษฎีการชักตัวอย่างกำหนดไว้ว่า ความถี่ของการชักตัวอย่างต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่ไนควิสต์



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์

ช่วงเวลาชักตัวอย่างจะมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวทางเวลาของระบบ คือ เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ ค่าความถี่ของการชักตัวอย่างจะมีค่าประมาณ 10 เท่าของแบนด์วิดท์ของระบบ และเมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา ช่วงเวลาขึ้น (rise time) จะต้องชักตัวอย่างประมาณ 5-8 ครั้ง เมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันได

การปรุงแต่งข้อมูล

การระบุเอกลักษณ์ต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาใช้ ถ้าข้อมูลที่ได้มีความไม่เหมาะสมเกิดขึ้น เช่น ข้อมูลเกิดการขยับเลื่อน (drift) หรือเกิดสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงเกิดขึ้นกับข้อมูล สิ่งเหล่านี้จะทำให้ข้อมูลมีค่าที่ผิดพลาดไปจากค่าจริง ดังนั้นจึงต้องทำการปรุงแต่งข้อมูลให้เหมาะสมก่อนที่จะนำไประบุเอกลักษณ์ โดยที่การแก้ปัญหาในเรื่องข้อมูลเกิดการขยับเลื่อน สามารถทำได้ด้วยการใช้วงจรกรองผ่านสูง ส่วนการเกิดสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูง สามารถแก้ปัญหาด้วยการใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำ

การเลือกโครงสร้างของแบบจำลอง

การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม เป็นสิ่งสำคัญในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ถ้าเลือกใช้แบบจำลองกล่องดำจะเลือกใช้แบบจำลองแบบใดระหว่าง ARX, OE, ARMAX หรือ BJ และจะเลือกอันดับของแบบจำลองเท่ากับเท่าไรจึงจะเหมาะสม ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลอง ARX แสดงดังสมการที่ (2-13) เป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดเพื่อที่จะประมาณค่า (estimation) พารามิเตอร์ในแบบจำลองและเป็นแบบจำลองที่ใช้เริ่มต้นในการระบุเอกลักษณ์ แต่แบบจำลองนี้มีข้อเสียคือ เทอมของแบบจำลองการรบกวน $H(q,\theta) = 1/A(q)$ จะมีโพลเหมือนกับเทอมของแบบจำลองเอาต์พุตที่อิสระต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นสาเหตุให้การประมาณค่าของระบบพลวัตไม่ถูกต้อง และสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้โดยให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูง

แบบจำลอง ARMAX แสดงดังสมการที่ (2-12) เป็นแบบจำลองที่มีความอ่อนตัวกว่าแบบจำลอง ARX และมีเทอม C(q) เพิ่มเข้ามาเพื่อจัดการกับปัญหาเรื่องพลวัตของการรบกวน จึงทำให้แบบจำลองนี้เป็นที่นิยมใช้แพร่หลายมาก

แบบจำลอง OE แสดงดังสมการที่ (2-10) เป็นแบบจำลองที่มีข้อดีคือแบบจำลองเอาต์พุตที่อิสระต่อสัญญาณรบกวนกับแบบจำลองการรบกวน แยกส่วนกันเด็ดขาด และจะให้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่แม่นยำ หากทดสอบระบบแบบวงรอบเปิดจริงๆ

แบบจำลอง BJ แสดงดังสมการที่ (2-9) เป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์ที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ กล่าวคือ แบบจำลองของเอาต์พุตที่อิสระต่อสัญญาณรบกวนกับแบบจำลองการรบกวนจะพิจารณาแยกอิสระต่อกัน

แบบจำลองแบบ ARX และ ARMAX จะมีการใช้พลวัตร่วมกันระหว่างสัญญาณรบกวน e(t) และ สัญญาณอินพุต u(t) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับระบบที่มีสัญญาณทั้งสองเข้ามากระทำกับระบบพร้อมๆ กัน ในทางตรงกันข้าม แบบจำลองแบบ BJ จะเหมาะสมกับระบบเมื่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณอินพุตเข้ามากระทำกับระบบไม่พร้อมกัน

2.4 ขั้นตอนการทดสอบระบบเพื่อหาแบบจำลอง

การทดสอบระบบคู่ควบเชิงกล มีขั้นตอนดังนี้

1) ป้อนแรงดันอินพุตเท่ากับ 2.7 โวลต์เข้าสู่ระบบ

2) จับสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุตและจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ (แรงดันเอาต์พุต 1 โวลต์ มีความหมายเป็นความเร็วรอบเท่ากับ 143 rpm)

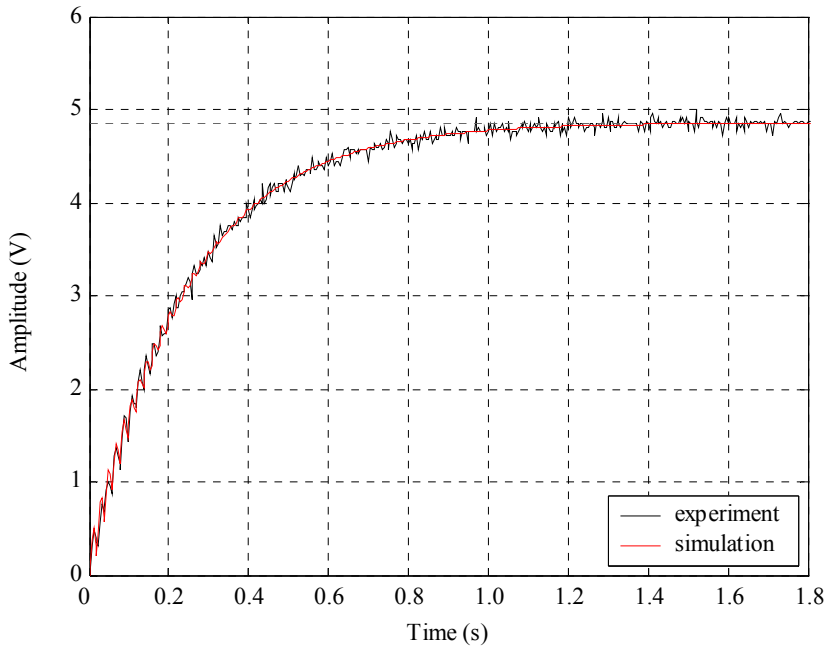
3) ดำเนินการซ้ำตามข้อ 2 โดยปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตเป็น 2.8, 2.9, …, 5.3, 5.5, 5.7, …, 8.0 โวลต์ ตามลำดับ

2.5 ผลการทดสอบ

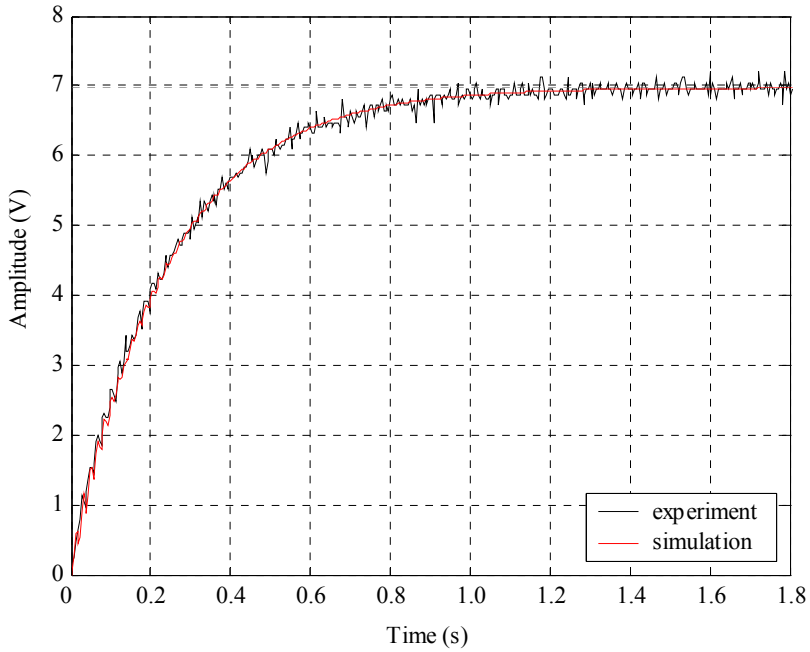
เมื่อได้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตจากการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลครบถ้วนแล้ว ในลำดับต่อมาจะดำเนินการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/System Identification Toolbox (Ljung, 1995) ที่แบบจำลองมีโครงสร้างแบบ ARMAX โดยที่อันดับของแบบจำลองจะอ้างอิงตามสมการที่ (2-1) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลและรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้หาแบบจำลองของระบบด้วยวิธีระบุเอกลักษณ์แสดงอยู่ในภาคผนวก ข. เมื่อพิจารณาย่านการทำงานของระบบคู่ควบเชิงกลตั้งแต่ 2.7-8.0 โวลต์ สามารถพิจารณาแบ่งย่านการทำงานของระบบดังกล่าวได้เป็น 6 ย่านการทำงาน ดังปรากฏในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะได้แบบจำลองของระบบจำนวน 6 ชุด แสดงด้วยสัญลักษณ์ G_1, G_2, …, G_6 ตามลำดับ ทั้งนี้ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองแต่ละย่านการทำงานได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองของระบบที่ได้จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองดังกล่าวเมื่ออินพุตเป็นแบบของขั้นบันได และแสดงผลตอบสนองทางเวลาเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของระบบคู่ควบเชิงกลในแต่ละย่านอินพุต ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.7 ถึง 2.12 ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ว่า ผลตอบสนองทางเวลาที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลอง G_1, G_2, …, G_6 มีความใกล้เคียงกันกับผลที่ได้จากการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลในแต่ละย่านอินพุต และยังคงปรากฏลักษณะของรีโซแนนซ์การบิดเกิดขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองของระบบที่ได้จากวิธีการระบุเอกลักษณ์สามารถใช้แทนพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกลได้

ตารางที่ 2.1 แบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกลตลอดย่านอินพุต

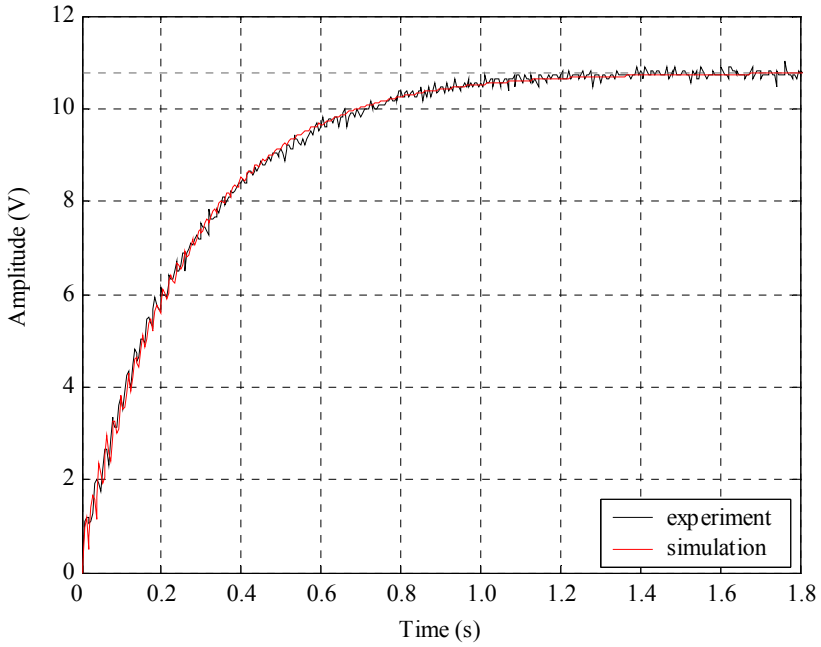
แบบจำลอง	ย่านอินพุต (โวลต์)	ฟังก์ชันถ่ายโอน
G_1	2.7-3.3	$\frac{3.78\times10^{6}s^{2}+5.53\times10^{8}s+9.08\times10^{10}}{s^{5}+339\,s^{4}+2.41\times10^{5}s^{3}+3.73\times10^{7}s^{2}+1.39\times10^{10}s+5.61\times10^{10}}$
G_2	3.3-4.2	$\frac{9.76\times10^{5}s^{2}+3.1\times10^{8}s+1.04\times10^{11}}{s^{5}+73.11\,s^{4}+2.35\times10^{5}s^{3}+9.78\times10^{6}s^{2}+1.34\times10^{10}s+5.52\times10^{10}}$
G_3	4.2-5.1	$\frac{7.44\times10^{5}s^{2}+2.82\times10^{9}s+3.77\times10^{11}}{s^{5}+32.12s^{4}+4.67\times10^{5}s^{3}+7.52\times10^{6}s^{2}+4.29\times10^{10}s+1.61\times10^{11}}$
G_4	5.1-6.1	$\frac{8.33\times10^{5}s^{2}+1.15\times10^{9}s+1.29\times10^{11}}{s^{5}+147.6s^{4}+2.35\times10^{5}s^{3}+1.8\times10^{7}s^{2}+1.33\times10^{10}s+4.71\times10^{10}}$
G_5	6.1-7.4	$\frac{9.99\times10^{6}s^{2}+7.89\times10^{9}s+6.0\times10^{11}}{s^{5}+1033s^{4}+5.8\times10^{5}s^{3}+1.54\times10^{8}s^{2}+6.15\times10^{10}s+2\times10^{11}}$
G_6	7.4-8.0	$\frac{1.96\times10^{6}s^{2}+9.98\times10^{9}s+7.93\times10^{11}}{s^{5}+61.66s^{4}+7.14\times10^{5}s^{3}+2.32\times10^{7}s^{2}+7.63\times10^{10}s+2.49\times10^{11}}$



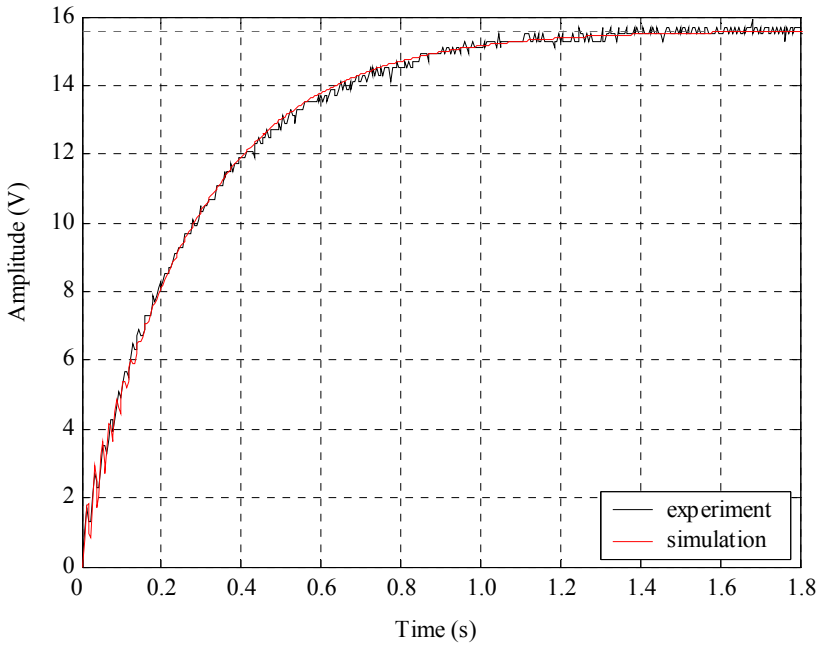
รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 3.0 โวลต์



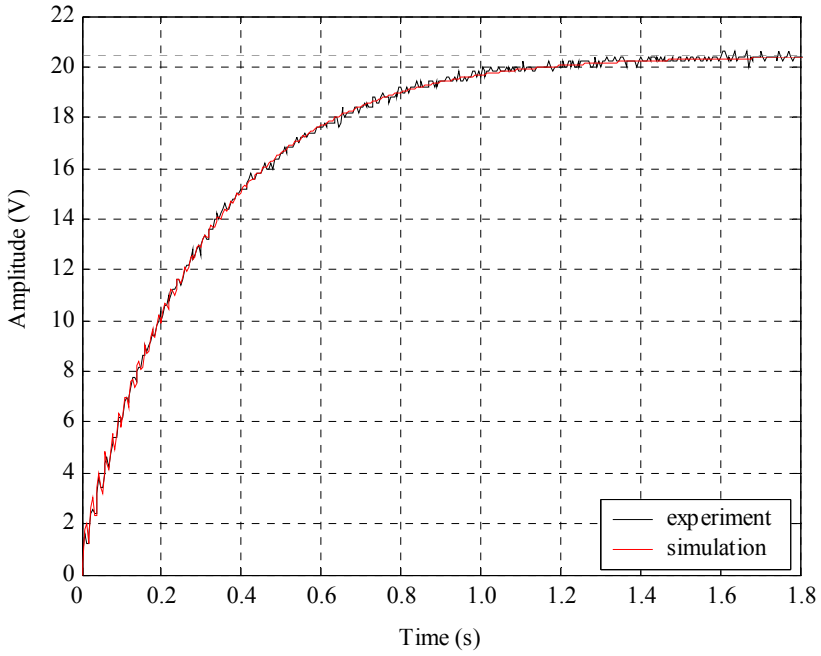
รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 3.7 โวลต์



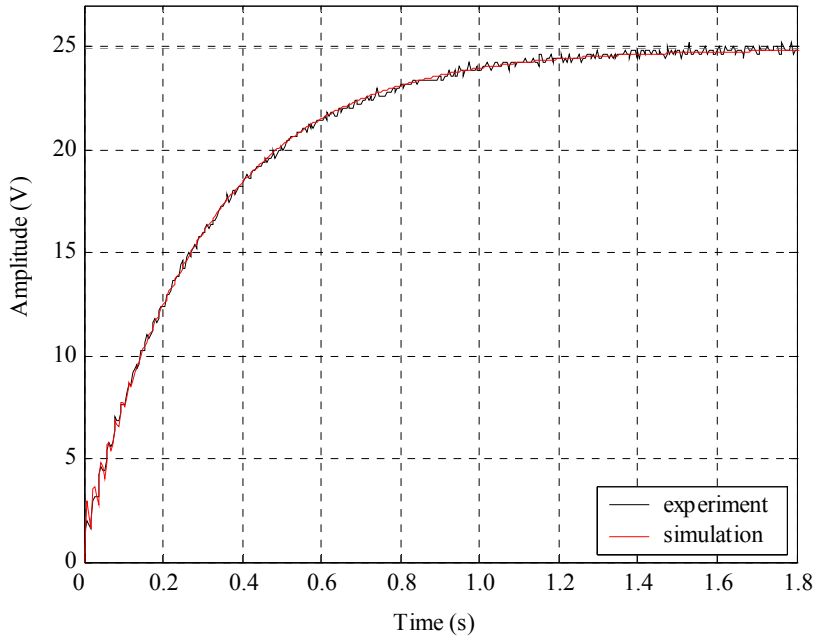
รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 4.6 โวลต์



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 5.7 โวลต์



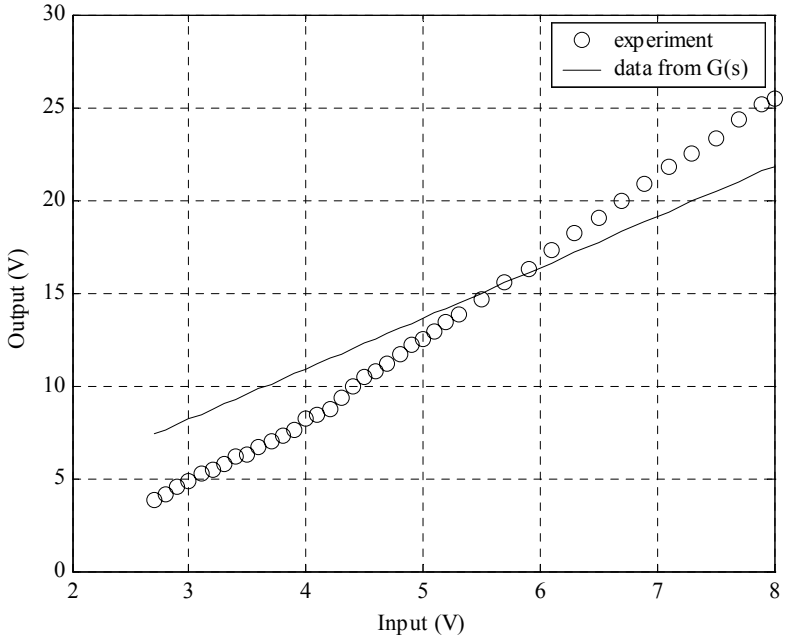
รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 6.8 โวลต์



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่ออินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 7.8 โวลต์

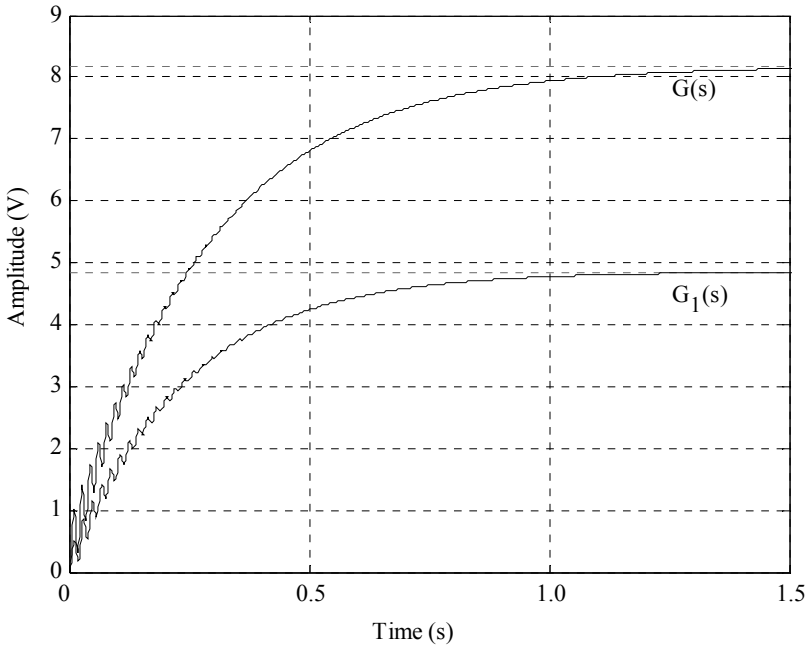
เมื่อพิจารณาระดับเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวเทียบกับอินพุต ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดสอบดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่อาจมีค่าผิดพลาดปรากฏอยู่บ้าง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้แบบจำลองเพียงชุดเดียวที่อธิบายระบบดังกล่าว โดยทำการรวมแบบจำลองทั้ง 6 ชุด ให้เป็นแบบจำลองเพียงชุดเดียวโดยเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลองเฉลี่ย แสดงดังสมการที่ (2-31)

$$G(s) = \frac{3.05\times10^{6}s^{2} + 3.79\times10^{9}s + 3.49\times10^{11}}{s^{5} + 281.1s^{4} + 4.12\times10^{5}s^{3} + 4.17\times10^{7}s^{2} + 3.69\times10^{10}s + 1.28\times10^{11}} \qquad (2\text{-}31)$$

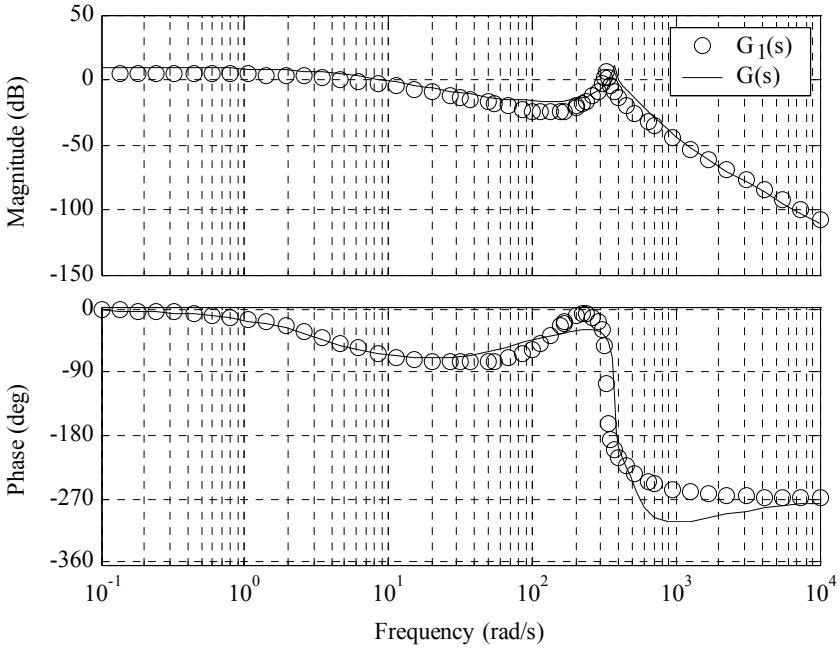


รูปที่ 2.13 เอาต์พุตที่สถานะอยู่ตัว ณ อินพุตค่าต่างๆ

เมื่อได้แบบจำลองเฉลี่ย เพื่อพิจารณาความถูกต้องของแบบจำลองจะทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของแบบจำลองเฉลี่ยกับแบบจำลองทั้ง 6 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ถึงรูปที่ 2.19 ซึ่งพบว่า ผลตอบสนองทางความถี่ของแบบจำลองเฉลี่ยจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับของแบบจำลองทั้ง 6 ชุด ส่วนผลตอบสนองทางเวลาของแบบจำลองเฉลี่ยจะมีผลตอบสนองช่วงสภาวะชั่วครู่ที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองทั้ง 6 ชุด แต่จะมีความแตกต่างกันที่ค่าเอาต์พุตที่สถานะอยู่ตัว ซึ่งผลของเอาต์พุตที่สถานะอยู่ตัวของแบบจำลอง G(s) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบระบบเป็นดังรูปที่ 2.13 ดังที่สังเกตได้ชัดเจนถึงค่าผิดพลาดของแบบจำลอง



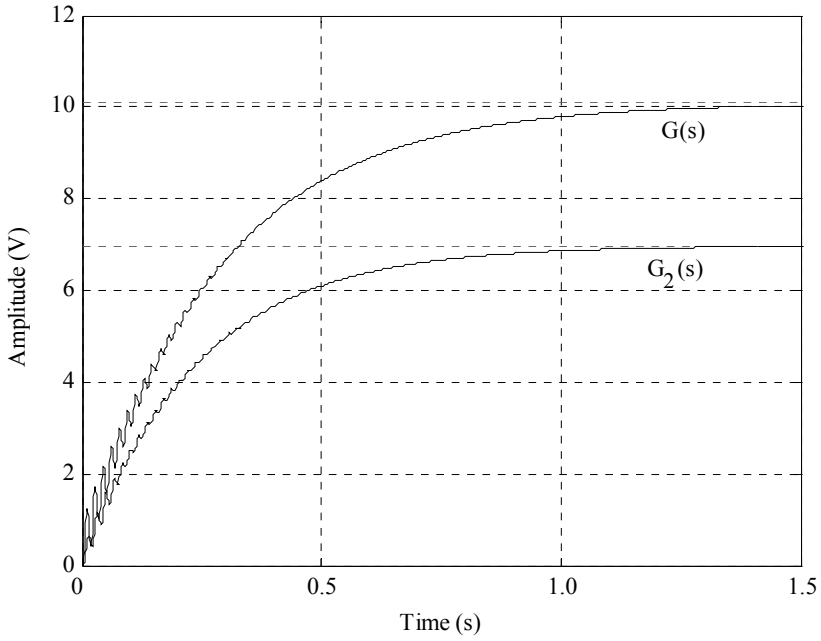
ก)



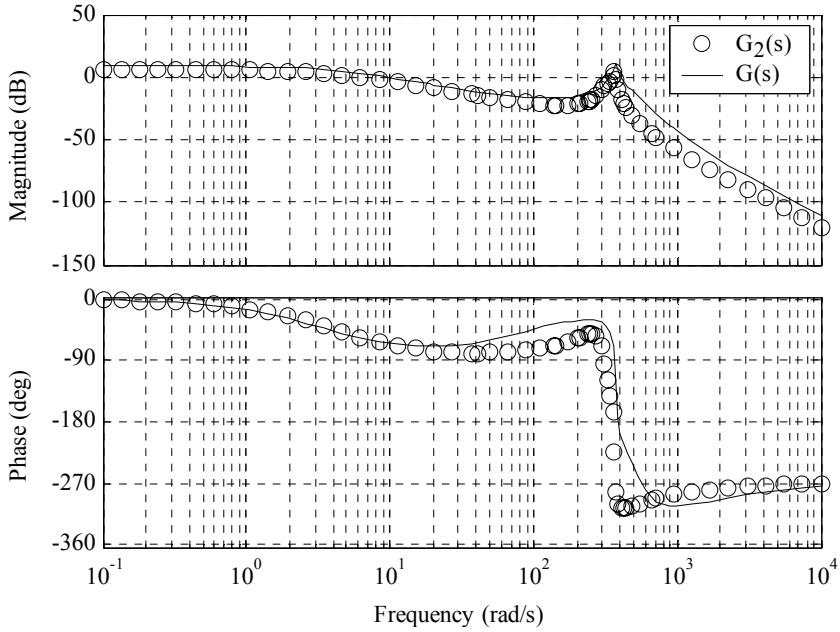
ข)

รูปที่ 2.14 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_1(s)$ เทียบกับ $G(s)$

ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_1(s)$ เทียบกับ $G(s)$



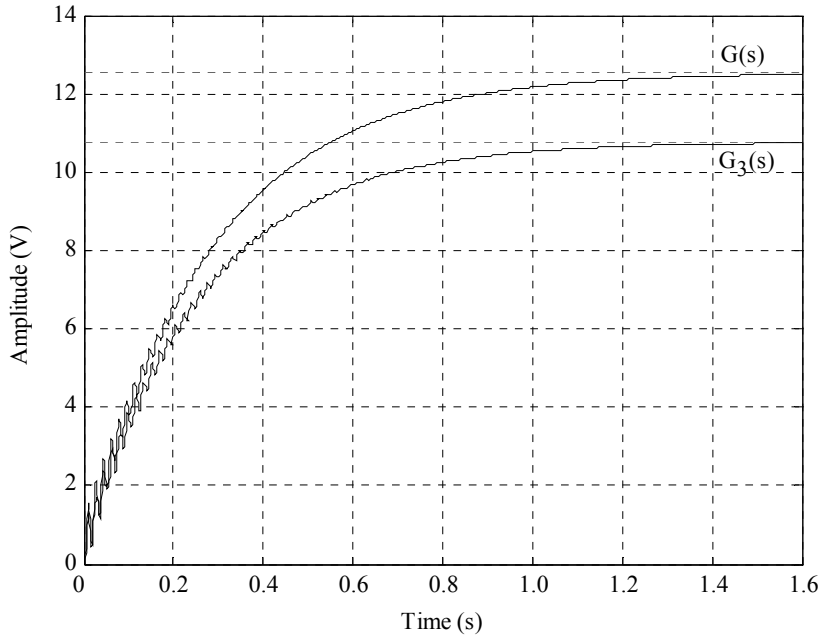
ก)



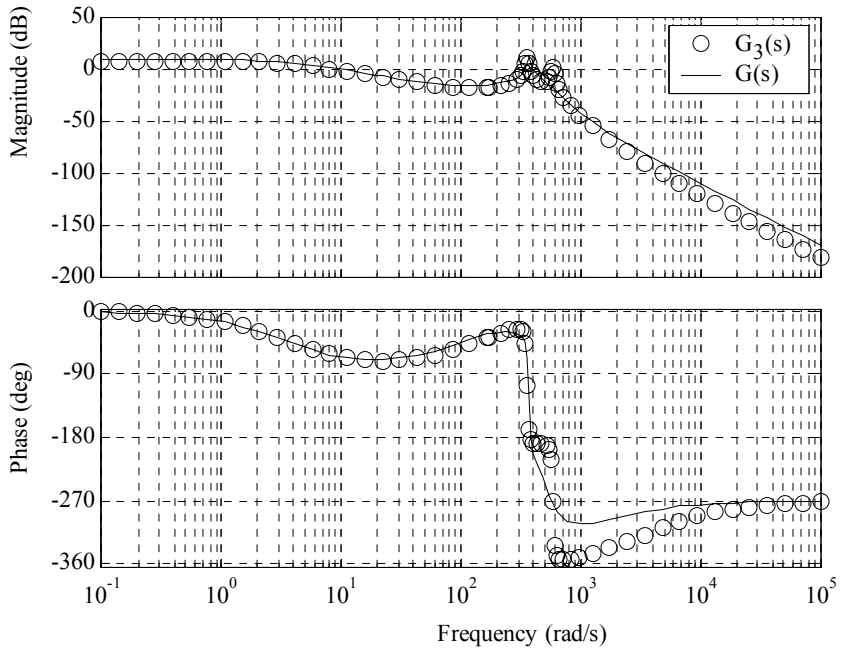
ข)

รูปที่ 2.15 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_2(s)$ เทียบกับ G(s)

ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_2(s)$ เทียบกับ G(s)



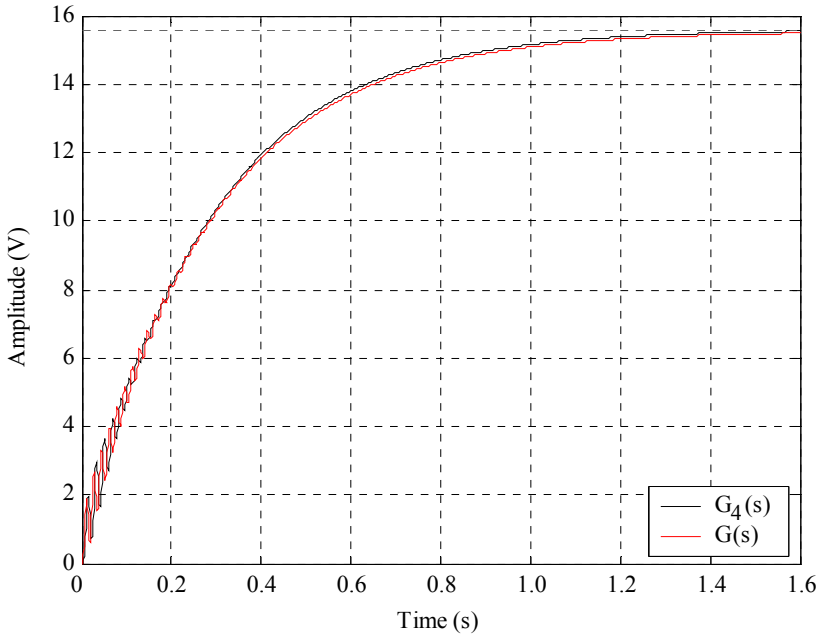
ก)



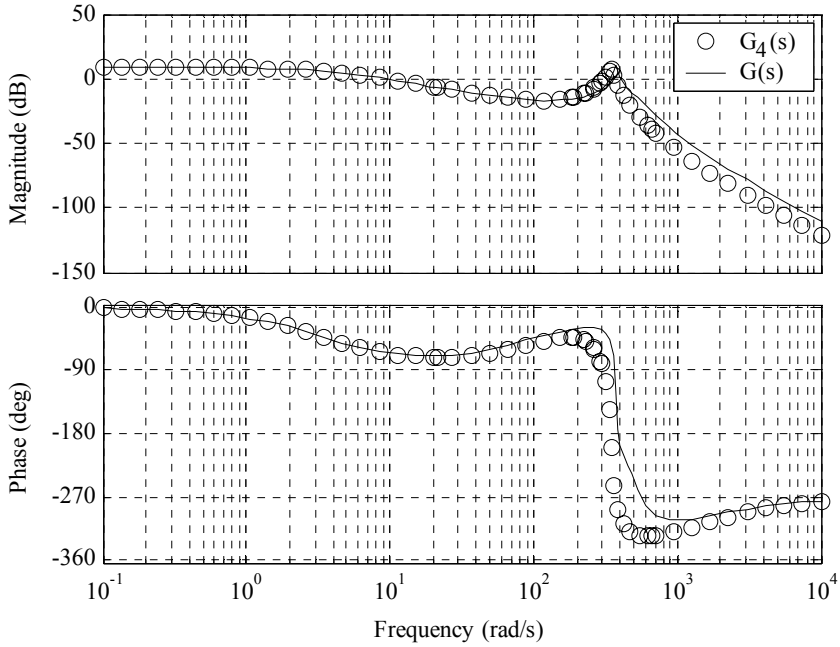
ข)

รูปที่ 2.16 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_3(s)$ เทียบกับ G(s)

ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_3(s)$ เทียบกับ G(s)



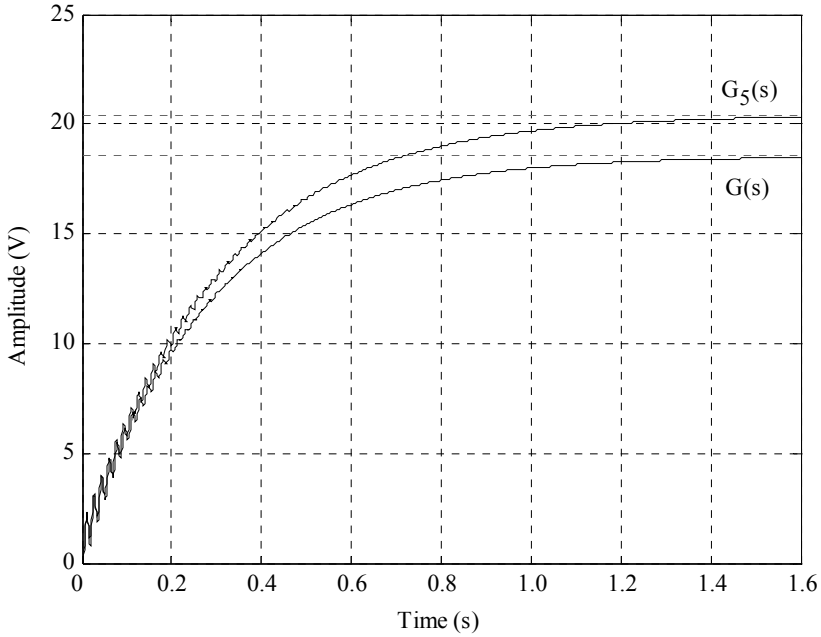
ก)



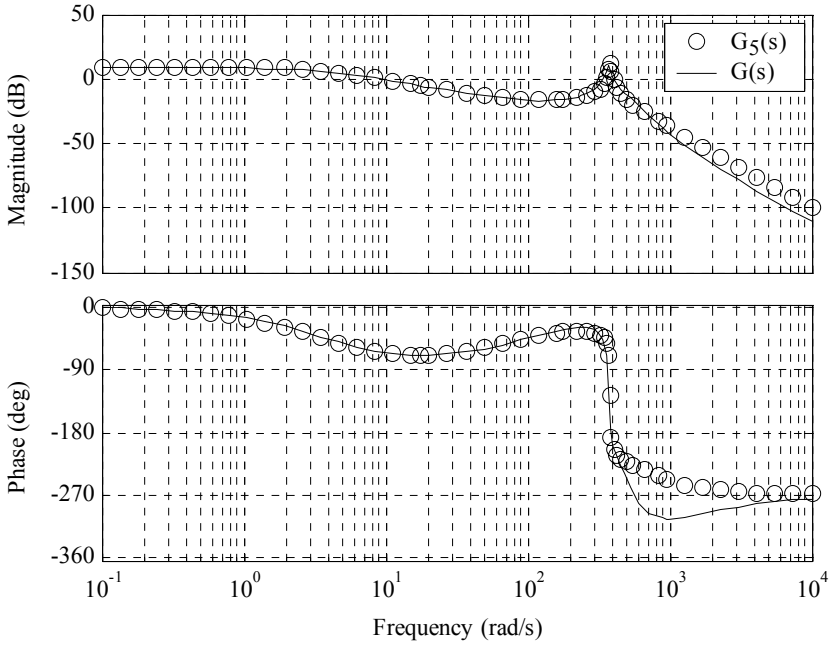
ข)

รูปที่ 2.17 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_4(s)$ เทียบกับ $G(s)$

ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_4(s)$ เทียบกับ $G(s)$



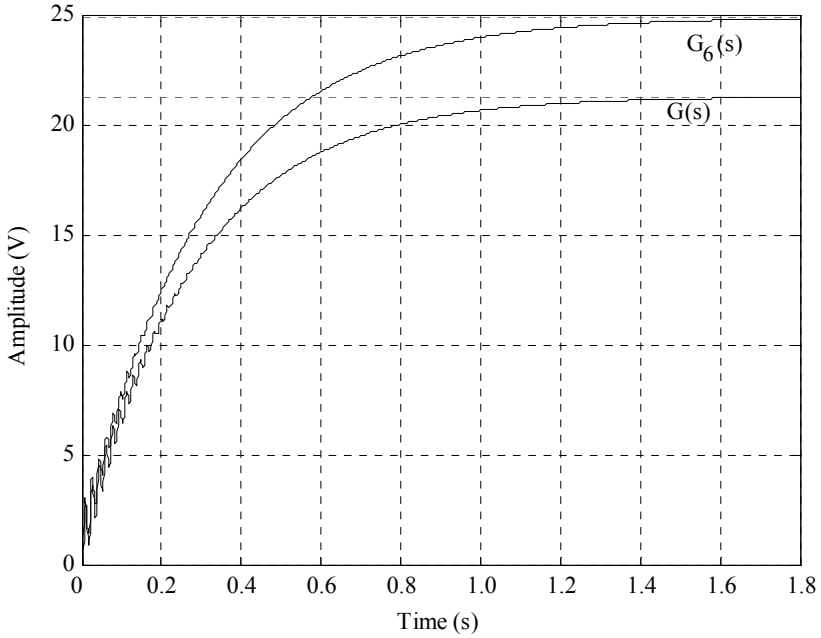
ก)



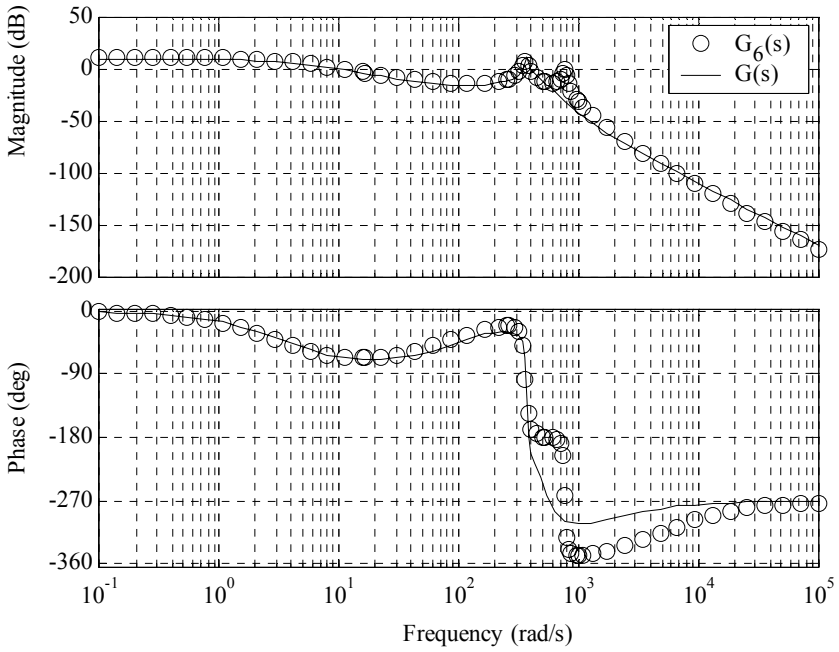
ข)

รูปที่ 2.18 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_5(s)$ เทียบกับ $G(s)$

ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_5(s)$ เทียบกับ $G(s)$



ก)



ข)

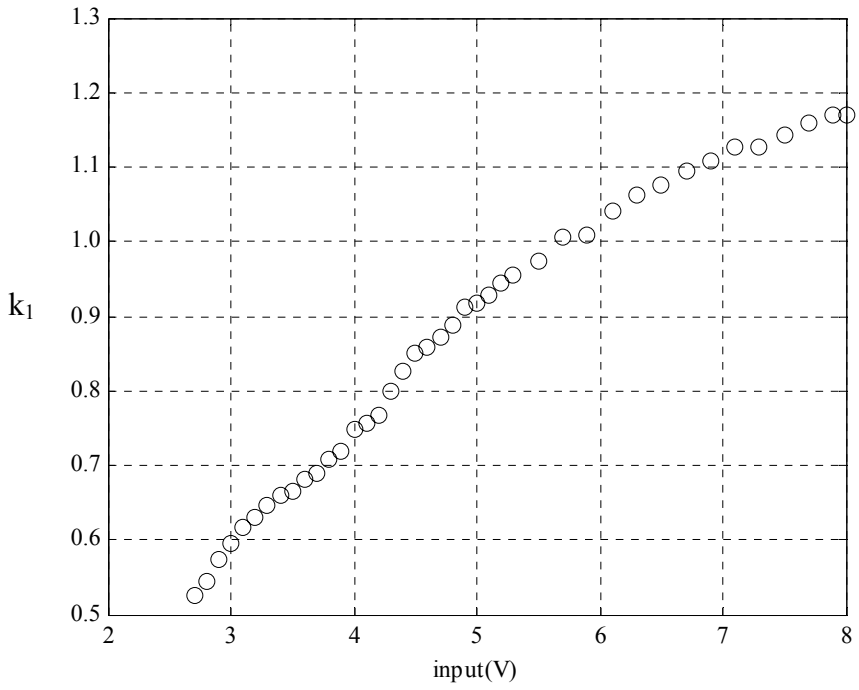
รูปที่ 2.19 ก) ผลตอบสนองทางเวลาของ $G_6(s)$ เทียบกับ $G(s)$

ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของ $G_6(s)$ เทียบกับ $G(s)$

ดังนั้นจึงทำการเพิ่มชุด k_1 เข้าไปที่แบบจำลองเฉลี่ยเพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตที่สถานะอยู่ตัวของแบบจำลอง และชุด K เข้าไปหลังชุดแบบจำลองเฉลี่ยซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนระดับสัญญาณของการวัด (measurement gain) ให้สัญญาณเอาต์พุตมีขนาดเท่ากับสัญญาณอินพุต โดยที่ความเร็วรอบของเอาต์พุตยังคงมีค่าเท่าเดิม โดยที่ค่า k_1 และ K แสดงดังสมการที่ (2-32) และ (2-33) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_1 และ K กับค่าอินพุตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ

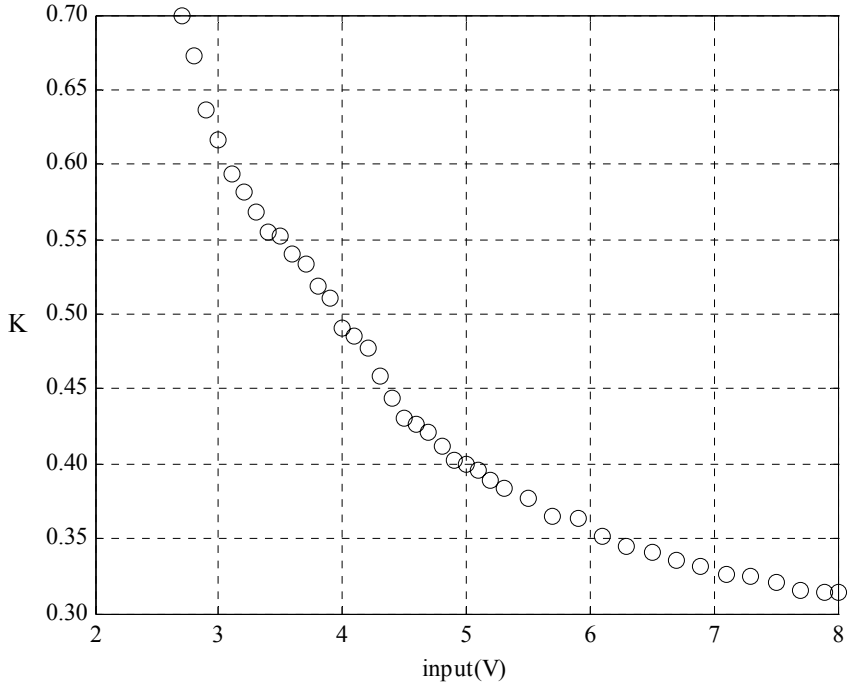
$$k_1 = \frac{\text{ขนาดของเอาต์พุตจากการทดสอบ}}{\text{ขนาดของเอาต์พุตจากแบบจำลองเฉลี่ย G(s)}} \tag{2-32}$$

$$K = \frac{\text{ขนาดของอินพุต}}{\text{ขนาดของเอาต์พุตจากการทดสอบ}} \tag{2-33}$$

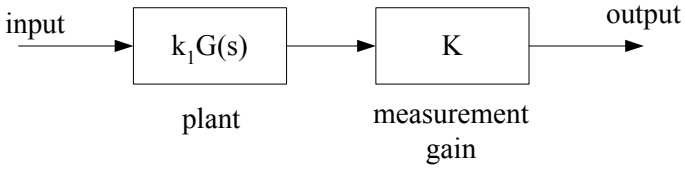


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_1 กับอินพุต

จากที่กล่าวมา สามารถแสดงแผนภาพบล็อกของแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกลได้ดังรูปที่ 2.22 และนำแบบจำลองที่ได้ไปทำการออกแบบตัวชดเชยเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิด โดยจะเลือกค่าอินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์เพื่อใช้ในการออกแบบตัวชดเชยเนื่องจาก ณ จุดการทำงานนี้จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบตัวชดเชยในบทต่อไป



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับอินพุต



รูปที่ 2.22 แผนภาพแสดงระบบวงรอบเปิด

2.6 สรุป

ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ต่อคู่ควบกับโหลดด้วยเพลายาว จะพิจารณาในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ ที่แบบจำลองมีโครงสร้างแบบ ARMAX ทั้งนี้อันดับของแบบจำลองในการระบุเอกลักษณ์ประกอบด้วยโพลจำนวน 5 ตัวและซีโรจำนวน 2 ตัว ในกระบวนการทดสอบระบบเพื่อหาแบบจำลองของระบบดังกล่าวด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ได้ทำการทดสอบระบบโดยแบ่งเป็น 6 ย่านการทำงาน ซึ่งมีจุดปฏิบัติงานอยู่ในช่วง 2.7-8.0 โวลต์ จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า เมื่อดำเนินการจำลองระบบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนทั้ง 6 ย่านที่ได้จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ ให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบของระบบจริง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่จากการระบุ

เอกลักษณ์มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการออกแบบตัวชดเชยได้ในลำดับต่อไป อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวชดเชยจากฟังก์ชันถ่ายโอนทั้ง 6 ชุด ย่อมต้องใช้ตัวชดเชย 6 ชุดด้วย หากดำเนินการเช่นนี้ ก็จะเกิดความยุ่งยากและใช้ทุนสูงในการพัฒนาเทคโนโลยี เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัว พบว่า ผลการทดสอบแสดงลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ดีตลอดย่านอินพุต จึงเป็นตัวบ่งชี้ในขั้นต้นนี้ได้ว่า มีความเป็นไปได้ที่จะพิจารณาใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเพียงชุดเดียวในการออกแบบตัวชดเชย และเมื่อดำเนินการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อใช้แบบจำลองเฉลี่ยเพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่เปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละย่านการทำงาน ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าให้ผลตอบสนองทางความถี่ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลา พบว่า มีความคลาดเคลื่อนในส่วนของผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ซึ่งสามารถลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวได้ด้วยค่าเกน k_1 และลดทอนระดับสัญญาณของการวัดได้ด้วยค่าเกน K ตามที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้แบบจำลองเฉลี่ยในการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อๆ ไป

บทที่ 3
การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยตัวชดเชย PI, PID และ PIDA

3.1 บทนำ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทางพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกล อันประกอบด้วยมอเตอร์ต่อคู่ควบกับโหลดด้วยเพลายาว พบว่ามีรีโซแนนซ์การบิดเกิดขึ้นกับระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดรีโซแนนซ์การบิดเหล่านี้ ในการปฏิบัติดังกล่าวจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล ดังได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 สำหรับใช้ในการออกแบบตัวชดเชยเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดที่เกิดขึ้นกับระบบ แนวทางหนึ่งในการออกแบบตัวชดเชยดังกล่าวได้แก่ การใช้ตัวชดเชยแบบ PI (proportional-integral) และตัวชดเชยแบบ PID (proportional-integral-derivative) ซึ่งเป็นตัวชดเชยที่นิยมใช้กันมากและยังคงให้ผลดีในทางอุตสาหกรรม รวมทั้งตัวชดเชยแบบ PIDA (proportional-integral-derivative-acceleration) ซึ่งเป็นตัวชดเชยที่ทำการเพิ่มซีโรเข้าไปให้กับตัวชดเชย PID อีกตัวหนึ่ง

เนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวชดเชยแบบ PI, PID และ PIDA เพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดที่ปรากฏขึ้นกับระบบคู่ควบเชิงกล ทั้งนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในการออกแบบตัวชดเชยแบบต่างๆ ซึ่งจะดำเนินการจำลองสถานการณ์ให้กับระบบ โดยจะทำการพิจารณาทั้งผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของระบบ เพื่อพิจารณาประสิทธิผลของตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบ

3.2 การใช้ตัวชดเชย PI

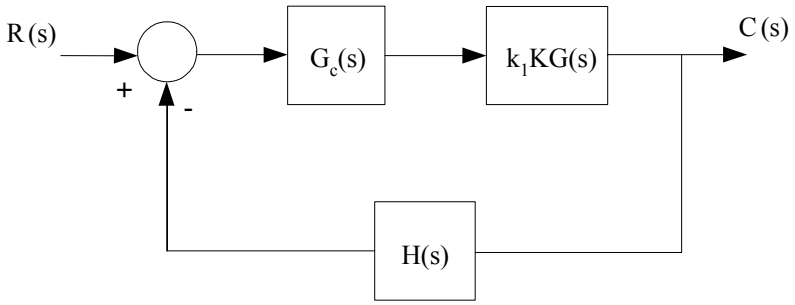
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบ

โครงสร้างของระบบที่ใช้ตัวชดเชย PI สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งตัวชดเชยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังสมการที่ (3-1)

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P s + K_I}{s} \qquad (3\text{-}1)$$

โดยที่ K_P คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบพี

K_I คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบไอ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวชดเชย

โดยที่ R(s) คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง

C(s) คือ สัญญาณเอาต์พุต

$G_c(s)$ คือ ตัวชดเชย (compensator)

G(s) คือ ระบบหรือพลานต์ (plant)

H(s) คือ เซนเซอร์ (sensor)

k_1 คือ ตัวปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ที่ได้จากบทที่ 2

K คือ ตัวลดทอนระดับสัญญาณของการวัด ที่ได้จากบทที่ 2

การออกแบบด้วยตัวชดเชย PI จะทำการออกแบบเพื่อเลือกค่าอัตราขยาย K_P และ K_I ให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ ทั้งนี้จะดำเนินการออกแบบตัวชดเชยดังกล่าวในโดเมนความถี่ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (Phillips and Harbor, 2000)

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่าส่วนเผื่อเฟส (phase margin) ตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2) หาค่าความถี่ ω_1 ที่ทำให้มุมของ $k_1KG(j\omega_1)H(j\omega_1)$ มีค่าเท่ากับ $-180+\varnothing_m+5$ โดยที่ $\varnothing_m$ คือ ค่าของส่วนเผื่อเฟสที่ได้จากการกำหนดในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3) ค่าอัตราขยาย K_P สามารถหาได้จากสมการที่ (3-2)

$$K_P = \frac{1}{\left|k_1KG(j\omega_1)H(j\omega_1)\right|} \tag{3-2}$$

ขั้นตอนที่ 4) ค่า K_I สามารถหาได้จากสมการที่ (3-3)

$$K_I = 0.1\omega_1 K_P \tag{3-3}$$

3.2.2 การออกแบบตัวชดเชยและผลการจำลองสถานการณ์

ในการออกแบบตัวชดเชย จะกำหนดค่า H(s) = 1 และทำการออกแบบโดยเลือกจุดปฏิบัติงานที่มีค่าเท่ากับ 5.7 โวลต์ จะได้ค่า $k_1 = 1$, K = 0.365 และแบบจำลองของระบบเป็นดังสมการที่ (3-4)

$$G(s) = \frac{3.049\times10^{6}s^{2} + 3.785\times10^{9}s + 3.491\times10^{11}}{s^{5} + 281.1s^{4} + 4.122\times10^{5}s^{3} + 4.171\times10^{7}s^{2} + 3.688\times10^{10}s + 1.281\times10^{11}} \qquad (3\text{-}4)$$

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่า $\varnothing_m = 50°$

ขั้นตอนที่ 2) หาค่า ω_1 โดยที่มุมของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด $k_1KG(j\omega_1)$ มีค่าเท่ากับ -125 องศา ซึ่งจะได้ความถี่ ω_1 เท่ากับ 369 เรเดียนต่อวินาที

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณค่า K_P

$$K_P = \frac{1}{\left|0.365\times G(369j)\right|} = 0.834$$

ขั้นตอนที่ 4) คำนวณค่า K_I

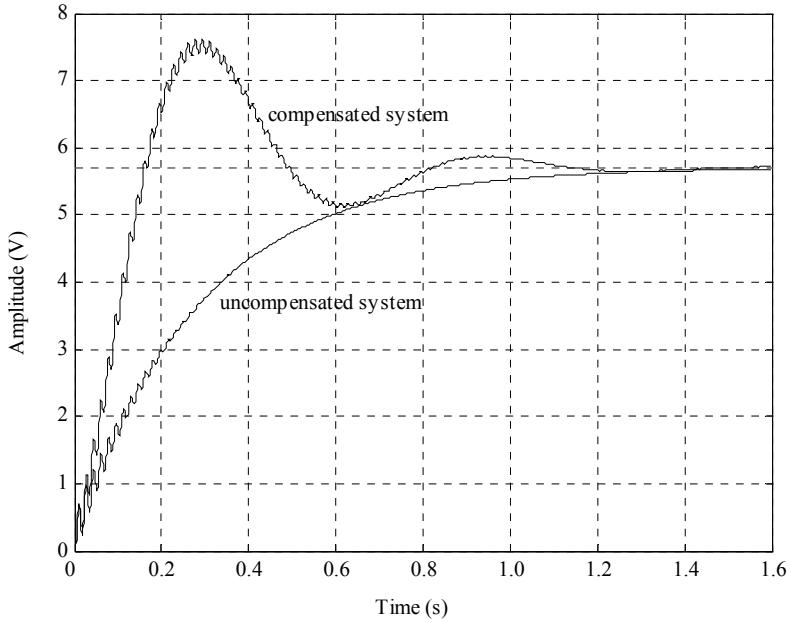
$$K_I = 0.1\times369\times0.834 = 30.78$$

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มาจัดรูปแบบตัวชดเชย ตามสมการที่ (3-1) ได้เป็น

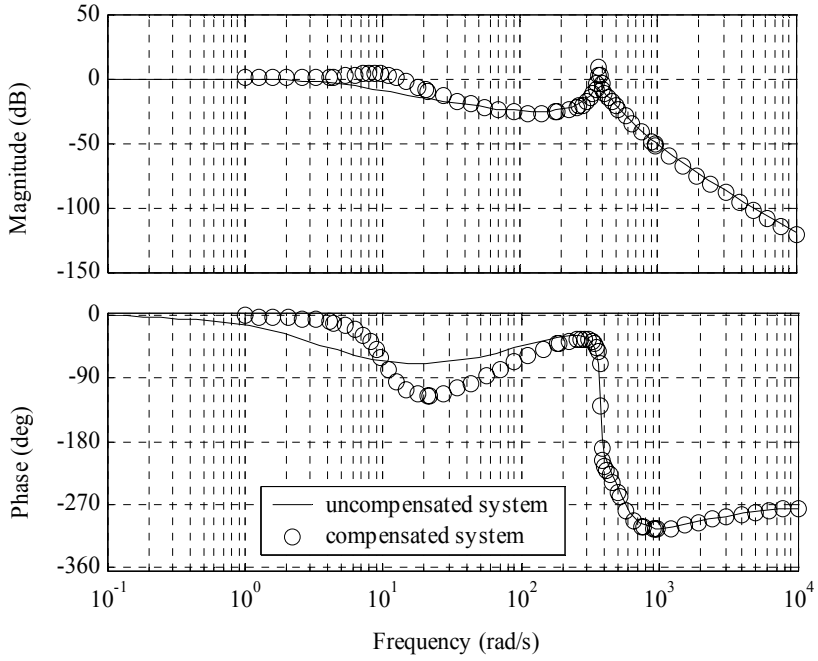
$$G_c(s) = \frac{0.834s + 30.78}{s} \qquad (3\text{-}5)$$

$$G_c(s) = \frac{0.834(s + 36.91)}{s} \qquad (3\text{-}6)$$

เมื่อทำการจำลองสถานการณ์หลังการชดเชยระบบด้วยตัวชดเชย PI แล้ว ระบบดังกล่าวจะมีผลตอบสนองทางเวลาดังปรากฏในรูปที่ 3.2 และผลตอบสนองทางความถี่ของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองทางเวลา ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์

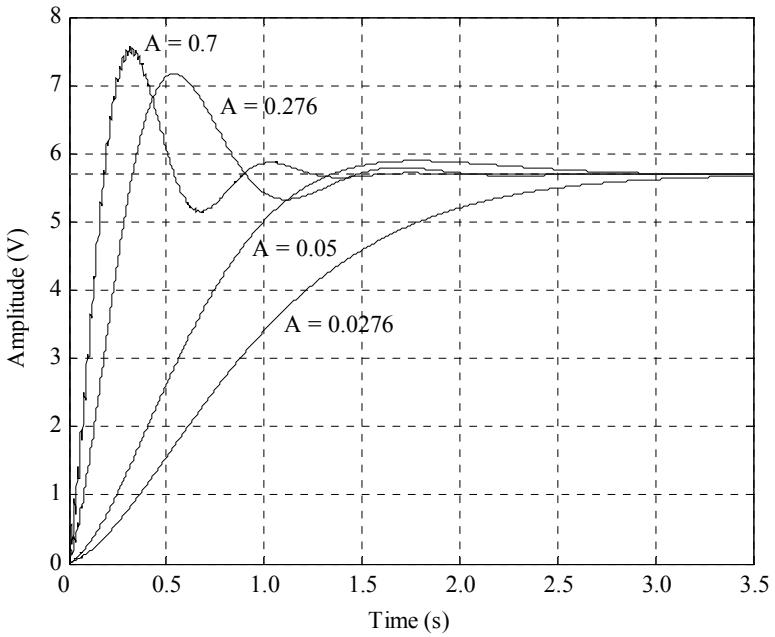


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองทางความถี่ ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์

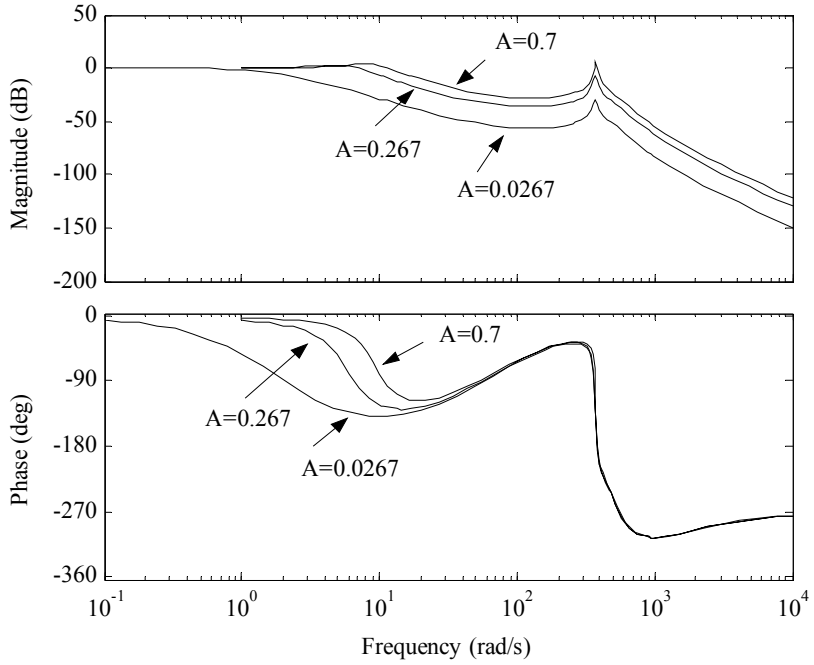
เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของระบบคู่ควบเชิงกลที่ได้รับการชดเชยด้วยตัวชดเชย PI ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ พบว่า ระบบที่ได้รับการชดเชยแล้วนั้น ยังคงมีรีโซแนนซ์การบิดเกิดขึ้น แสดงว่าตัวชดเชยดังกล่าวที่ได้จากการออกแบบยังไม่เหมาะสมต่อการกำจัดรีโซแนนซ์การบิด ดังนั้นจึงนำตัวชดเชยที่ได้มาทำการจูนอีกครั้ง โดยมีวิธีการจูนดังนี้

1) ทำการจูนค่า A ซึ่งเดิมแทนค่าเท่ากับ 0.834 ดังแสดงในสมการที่ (3-6)

จากการลองปรับจูนค่า A เป็น 0.0276, 0.276, 0.7 จะได้ผลตอบสนองทางเวลา ทางความถี่ และค่าการตอบสนองของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.4, 3.5 และตารางที่ 3.1 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาของระบบดังปรากฏในรูปที่ 3.4 พบว่า เมื่อค่า A มีค่าเท่ากับ 0.0276 ระบบจะไม่มีรีโซแนนซ์การบิดเกิดขึ้น และไม่เกิดการพุ่งเกิน แต่ระบบนี้จะตอบสนองช้ามากเมื่อเทียบกับก่อนทำการชดเชยระบบ และเมื่อทำการเพิ่มค่า A ให้มากขึ้น จะเห็นได้ว่าทำให้ระบบมีรีโซแนนซ์การบิดและค่าการพุ่งเกินที่เพิ่มขึ้น แต่ระบบจะสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งค่าการตอบสนองของระบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และเมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบดังปรากฏในรูปที่ 3.5 พบว่า เมื่อทำการปรับค่า A เพิ่มขึ้น ระบบยังคงมีรีโซแนนซ์เกิดขึ้น โดยความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อทำการจูนค่า A



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อทำการจูนค่า A

ตารางที่ 3.1 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย และ ส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่า A

A	T_r (s)	T_s (s)	P.O.(%)	Ess (%)	GM	PM
0.0276	1.68	2.81	0	0	33.5	76.35
0.05	0.879	2.28	3.39	0	28.33	67.96
0.276	0.247	1.38	25.8	0	13.5	43.9
0.5	0.172	1.33	30.7	0	8.33	40.4
0.7	0.136	1.13	32.6	0	5.41	39.9
0.8343	0.132	1.03	33.7	0	3.89	40.0
0.9	0.13	1.01	34.3	0	3.23	28.8
1.2	0.101	1.66	37.6	0	0.73	4.51

โดยที่ T_r คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time)

T_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

P.O. คือ เปอร์เซ็นต์ของการพุ่งเกิน (percent overshoot)

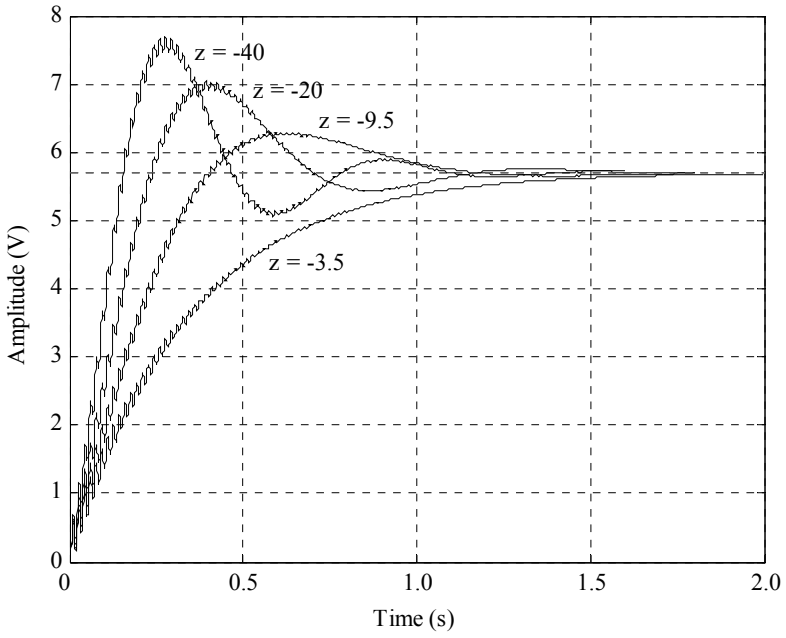
Ess คือ ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error)

GM คือ ส่วนเผื่ออัตราขยาย (gain margin)

PM คือ ส่วนเผื่อเฟส (phase margin)

2) จากสมการที่ (3-6) ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าซีโรของตัวชดเชย

ในการดำเนินการดังกล่าวจะทำการเลือกค่า A ให้คงที่เท่ากับ 0.834 และดำเนินการจูนค่าซีโรของตัวชดเชย PI ผลตอบสนองทางเวลาของระบบคู่ควบเชิงกลที่ได้รับการชดเชยแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 และค่าผลการตอบสนองทางเวลาของระบบดังกล่าวพร้อมทั้งส่วนเผื่อเฟสและส่วนเผื่ออัตราขยายสามารถแสดงได้ด้วยตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อ ค่าซีโรของตัวชดเชยเป็น -3.5, -9.5, -20 และ -40

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่ได้รับการชดเชยด้วยตัวชดเชย PI ดังปรากฏในรูปที่ 3.6 พบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนค่าซีโรของตัวชดเชยให้แตกต่างกันไป ผลตอบสนองดังกล่าวจะมีการสั่นเกิดขึ้นสำหรับทุกค่าซีโรที่ทำการปรับเปลี่ยน ซึ่งก็คือยังคงมีรีโซแนนซ์เกิดขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาค่าการตอบสนองของระบบดังแสดงในตารางที่ 3.2 อาจกล่าวได้ว่า ถ้าขนาดของซีโรมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่า T_r , GM, และ PM มีค่าลดลง แต่ P.O. จะมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการตอบสนองทางเวลาของระบบที่แสดงในรูปที่ 3.6 จะสังเกตเห็นว่า ในกรณีที่ค่าซีโรเป็น -3.5 จะทำให้ผลตอบสนองไม่เกิด P.O.

ตารางที่ 3.2 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย และส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่าซีโร

Zero (G_c)	T_r (s)	T_s (s)	P.O.(%)	Ess (%)	GM	PM
-3.5	0.785	1.36	0	0	4.86	55.4
-9.5	0.315	1.03	10.4	0	4.68	54.1
-20	0.197	1.05	23.5	0	4.38	49.7
-28	0.162	0.903	29.2	0	4.15	44
-36.9	0.132	1.03	33.7	0	3.89	40
-40	0.130	1.00	35.0	0	3.80	39
-81	0.083	0.908	44.5	0	2.71	32
-110	0.068	0.933	47.7	0	2	24.3

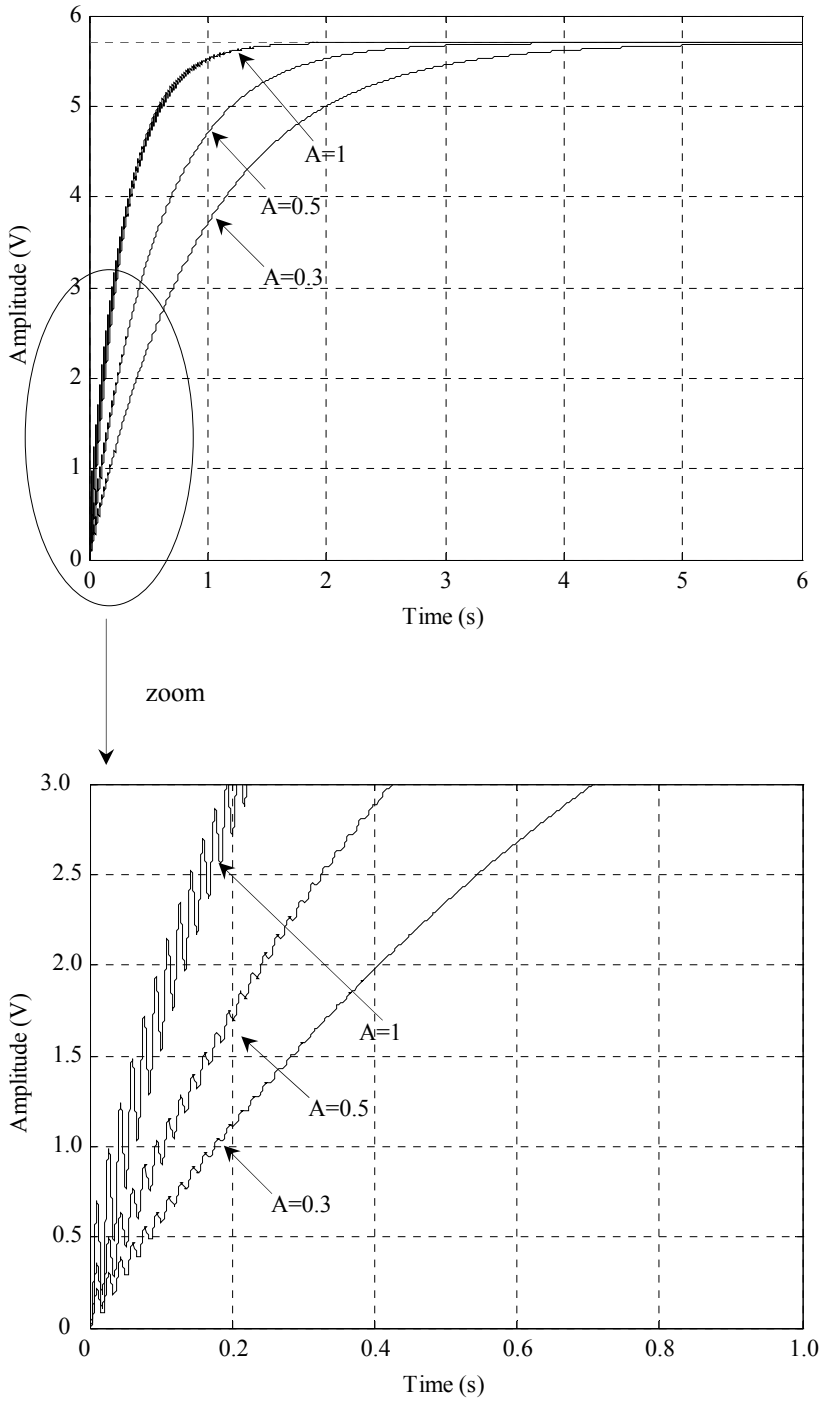
3) นำค่าซีโรที่เหมาะสมที่ได้จากการจูนตามข้อ 2) มาดำเนินการจูนค่า A ใหม่

ซึ่งจากการจูนตามข้อ 2) ค่าซีโรที่เหมาะสมคือ -3.5 จากนั้นดำเนินการจูนค่า A อีกครั้ง เพื่อเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยระบบคู่ควบเชิงกล ซึ่งผลตอบสนองทางเวลาหลังจากทำการจูนค่า A แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 และค่าผลตอบสนองของระบบดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

พิจารณาผลการจูนค่า A ดังแสดงในตารางที่ 3.3 พบว่า เมื่อค่า A มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า T_r, T_s และ GM มีค่าลดลง และไม่ปรากฏการพุ่งเกินสูงสุด และเมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาที่ปรากฏดังรูปที่ 3.7 จะสังเกตเห็นได้ว่า ถ้าค่า A เพิ่มขึ้น จะทำให้การตอบสนองของระบบคู่ควบเชิงกลปรากฏการสั่นไกวมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะปรากฏการณ์ทางรีโซแนนซ์การบิด ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า จากผลการจูนค่า A จะไม่มีค่าใดเลยที่สามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้หมดไปได้อย่างแท้จริง

ตารางที่ 3.3 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย และส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่า A

A	T_r (s)	T_s (s)	P.O.(%)	Ess (%)	GM	PM
0.3	2.11	3.75	0	0	13.75	90.52
0.5	1.29	2.26	0	0	9.31	90.88
0.8	0.815	1.42	0	0	5.22	91.44
1.0	0.647	1.16	0	0	3.29	92.84



รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อปรับจูนค่า A

เมื่อพิจารณาผลการจูนค่า A และค่าซีโรของสมการที่ (3-6) พบว่า การชดเชยด้วยตัวชดเชย PI โดยกำหนดค่า A = 0.0276 ระบบจะตอบสนองช้าและยังคงมีรีโซแนนซ์เกิดขึ้นในโดเมนความถี่ ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งาน และถ้าทำการจูนค่า A และซีโรด้วยค่าอื่นๆตามที่ได้

กล่าวมาแล้วข้างต้น จะได้ว่า ระบบที่ได้รับการชดเชยจะยังคงมีรีโซแนนซ์การบิดเกิดขึ้น ดังนั้นการออกแบบด้วยตัวชดเชย PI จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบคู่ควบเชิงกลที่สนใจนี้

3.3 การใช้ตัวชดเชย PID

3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบ

รูปแบบโครงสร้างของระบบที่มีตัวชดเชย PID จะเหมือนกับตัวชดเชย PI ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพียงแต่รูปแบบ $G_c(s)$ จะแตกต่างกัน โดยตัวชดเชย PID จะมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G_c(s)$ เป็นดังสมการที่ (3-7) หรือ (3-8) โดยที่ K_D คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบดี

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{3-7}$$

$$G_c(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \tag{3-8}$$

วิธีการออกแบบจะอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยแผนภาพไนควิสต์ที่กำหนดค่า $\varnothing_m$ ที่ความถี่ ω_1 และสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด แสดงดังสมการที่ (3-9)

$$k_1 KG(j\omega_1)G_c(j\omega_1) = 1\angle -180 + \varnothing_m \tag{3-9}$$

ถ้ากำหนดให้ θ เป็นมุมของ $G_c(j\omega_1)$ จะได้

$$\theta = -180 + \varnothing_m - \angle k_1 KG(j\omega_1) \tag{3-10}$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3-8) และ (3-9) จะได้

$$K_P + j(K_D\omega_1 - \frac{K_I}{\omega_1}) = \left|G_c(j\omega_1)\right|(\cos\theta + j\sin\theta) \tag{3-11}$$

จากสมการที่ (3-9) สามารถจัดรูปได้เป็น

$$\left|G_c(j\omega_1)\right| = \frac{1}{\left|k_1 KG(j\omega_1)H(j\omega_1)\right|} \tag{3-12}$$

แทนค่าสมการที่ (3-12) ลงในสมการที่ (3-11) จะได้

$$K_P + j(K_D\omega_1 - \frac{K_I}{\omega_1}) = \frac{1}{\left|k_1 KG(j\omega_1)H(j\omega_1)\right|}(\cos\theta + j\sin\theta) \tag{3-13}$$

สมการที่ (3-13) สามารถแยกพิจารณาเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้ดังสมการที่ (3-14) และสมการที่ (3-15) ตามลำดับ

$$K_P = \frac{\cos\theta}{\left|k_1 KG(j\omega_1)H(j\omega_1)\right|} \tag{3-14}$$

$$K_D\omega_1 - \frac{K_I}{\omega_1} = \frac{\sin\theta}{\left|k_1 KG(j\omega_1)H(j\omega_1)\right|}$$

$$K_D = \frac{\sin\theta}{\omega_1\left|k_1 KG(j\omega_1)H(j\omega_1)\right|} + \frac{K_I}{\omega_1^2} \tag{3-15}$$

การออกแบบตัวชดเชย PID จะมีขั้นตอนดังนี้ (Phillips and Harbor, 2000)

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่าเวลาเข้าที่ (T_s) และค่า $\varnothing_m$ ตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2) คำนวณค่า ω_1 จากสมการที่ (3-16)

$$\omega_1 = \frac{8}{T_s\tan(\varnothing_m)} \tag{3-16}$$

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณค่า θ จากสมการที่ (3-10)

ขั้นตอนที่ 4) หาค่า K_I โดยใช้ข้อกำหนดสมรรถนะในสถานะอยู่ตัว ที่ทำเช่นนี้เพราะในย่านความถี่ต่ำ พจน์การอินทิเกรตจะส่งผลอิทธิพลสูงสุดในการทำงานของตัวควบคุม

ขั้นตอนที่ 5) คำนวณค่า K_P โดยแทนค่า ω_1 กับ θ จากขั้นตอนที่ 2 และ 3 ลงสมการที่ (3-14)

ขั้นตอนที่ 6) คำนวณค่า K_D จากสมการที่ (3-15)

3.3.2 การออกแบบตัวชดเชยและผลการจำลองสถานการณ์

ในการออกแบบตัวชดเชย จะกำหนดค่า H(s) = 1 และทำการออกแบบโดยเลือกจุดปฏิบัติงานที่มีค่าเท่ากับ 5.7 โวลต์ จะได้ค่า $k_1 = 1$, K = 0.365 และแบบจำลองของระบบเป็นดังสมการที่ (3-4)

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่า $T_s = 0.55$ วินาที และ $\varnothing_m = 55$ องศา

ขั้นตอนที่ 2) หาค่า ω_1 จะได้

$$\omega_1 = \frac{8}{(0.55)\tan 55} = 10.18$$

ขั้นตอนที่ 3) หาค่า θ จะได้

$$\theta = -180 + \varnothing_m - \angle k_1 K G_p(j\omega_1) = -59.56$$

ขั้นตอนที่ 4) กำหนดให้ระบบมีค่าคงตัวความผิดพลาดทางความเร็ว (k_v) เท่ากับ 500

$$k_v = \lim_{s\to 0} s k_1 K G_c G(s) = K_I$$

ดังนั้นจะได้ว่า K_I มีค่าเท่ากับ 500 ด้วย

ขั้นตอนที่ 5) หาค่า K_P จะได้

$$K_P = \frac{\cos(-59.56°)}{|0.365 \times G(j10.18)|} = 1.55$$

ขั้นตอนที่ 6) หาค่า K_D จะได้

$$K_D = \frac{\sin(-59.56°)}{10.18 \times |0.365 \times G(j10.18)|} + \frac{500}{(10.18)^2} = 4.56$$

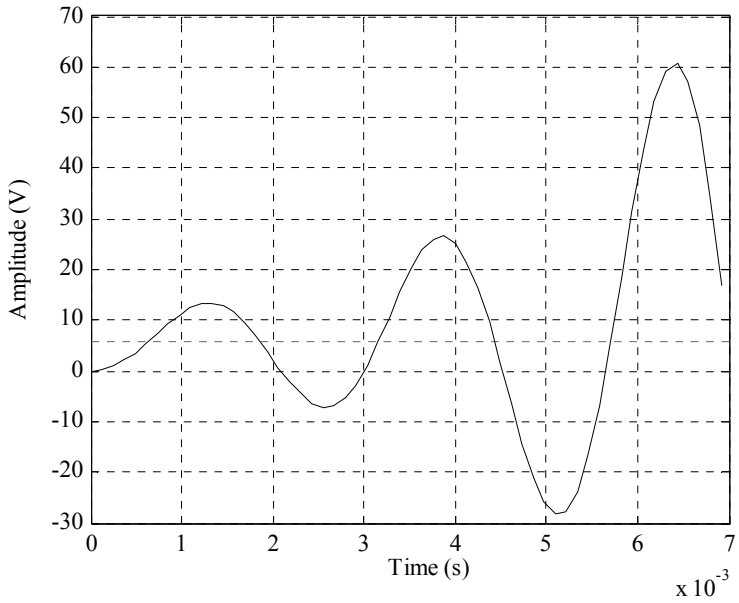
จากการออกแบบตัวชดเชย PID จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_c(s) = 1.55 + \frac{500}{s} + 4.56s \qquad (3\text{-}17)$$

หรือจัดรูปตัวชดเชยใหม่ได้เป็น

$$G_c(s) = 4.56\left(\frac{s^2 + 0.34s + 109.65}{s}\right) \tag{3-18}$$

นำตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบมาดำเนินการจำลองสถานการณ์กับระบบคู่ควบเชิงกล ซึ่งจะได้ผลตอบสนองทางเวลาแสดงดังรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณาผลตอบสนองที่ปรากฏดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นการชดเชยระบบด้วยตัวชดเชย PID ที่แสดงดังสมการที่ (3-17) พบว่า ระบบจะขาดเสถียรภาพ หรือเมื่อพิจารณาโพลของระบบเมื่อมีการชดเชยแล้ว จะมีโพล 1 คู่ที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ-เอส (s-plane) ทำให้ตัวชดเชยที่ออกแบบยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงทำการจูนค่าตัวชดเชย PID โดยมีวิธีการจูนดังนี้



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อใช้ตัวชดเชยตามสมการที่ (3-17)

1) ทำการเปลี่ยนแปลงการกำหนดค่า K_I จากขั้นตอนที่ 4)

จากการปรับเปลี่ยนค่า K_I ให้อยู่ในช่วง 35-5000 จากนั้นทำการหาค่าตัวชดเชยและทำการจำลองสถานการณ์ระบบด้วยตัวชดเชยดังกล่าว พบว่าระบบที่มีการชดเชยแล้วมีโพล 1 คู่ที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ-เอส ดังนั้น จึงสรุปว่า การปรับค่า K_I ในช่วงที่กล่าวมาเพื่อนำไปหาตัวชดเชย ใหม่อีกครั้งยังคงทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ

2) ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของตัวชดเชย PID

จากสมการที่ (3-18) อัตราขยายของตัวชดเชยมีค่าเท่ากับ 4.56 ซึ่งจะแทนด้วยตัวแปร W และดำเนินการพลอตทางเดินของรากเพื่อพิจารณาค่า W ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ ซึ่งพบว่า ค่า W จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.03 ดังนั้น จึงทำการจูนค่า W โดยผลตอบสนองทางเวลาดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และค่าผลตอบสนองทางเวลาต่างๆ พร้อมทั้งค่าส่วนเผื่อเฟส และส่วนเผื่ออัตราขยายแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าการตอบสนองชั่วครู่ การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ส่วนเผื่ออัตราขยาย และส่วนเผื่อเฟส เมื่อทำการจูนค่า W ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์

W	T_r (s)	T_s (s)	P.O.(%)	Ess (%)	GM	PM
0.005	3.8	6.07	0	0	17.1	79.8
0.01	1.74	2.35	0.216	0	11.1	59.6
0.02	0.911	2.18	7.51	0	5.09	29.6
0.03	0.674	1.75	14.1	0	1.57	7.8

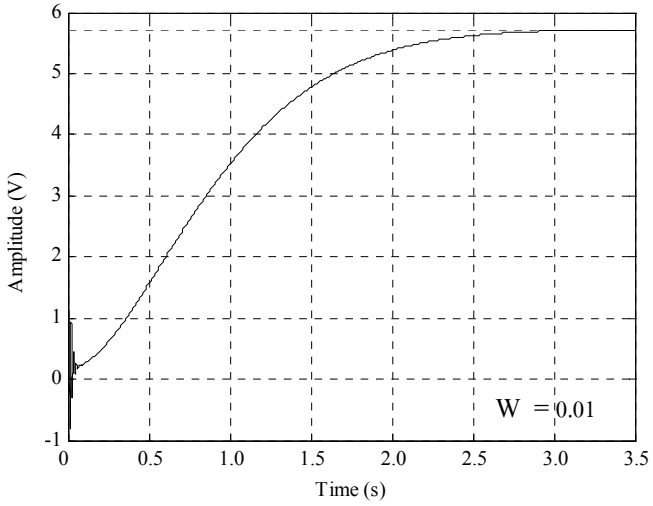
เมื่อพิจารณาผลจากการปรับจูนค่า W ดังรูปที่ 3.9 พบว่า ถ้า W มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ช่วงเริ่มต้นของสัญญาณเกิดการสั่นที่มีลักษณะเป็นแถบที่มากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 3.4 ประกอบกัน จะพบว่า ถ้า W มีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วขึ้น แต่ก็จะทำให้ระบบเกิดการพุ่งเกินมากตามไปด้วย จากผลการจูนค่าที่กล่าวมา สรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาจากช่วงการตอบสนองชั่วครู่ ระบบยังคงเกิดการสั่นในช่วงเริ่มต้น และค่าการตอบสนองของระบบให้ผลที่ไม่ดี

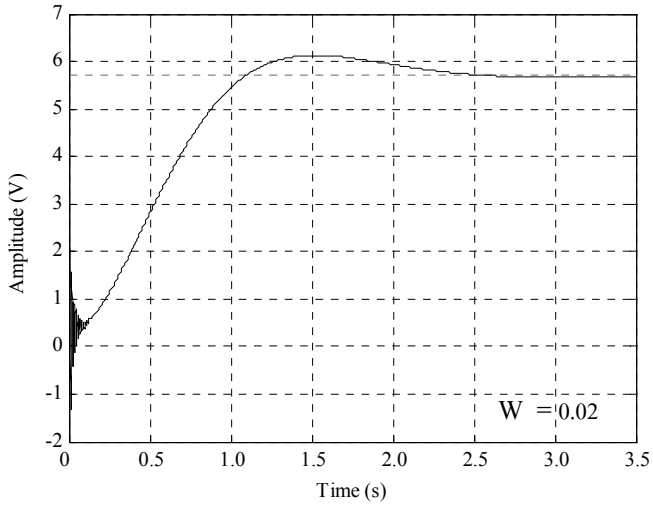
3) ปรับจูนค่า K_D , K_P และ K_I ซึ่งแบ่งการจูนได้ดังต่อไปนี้

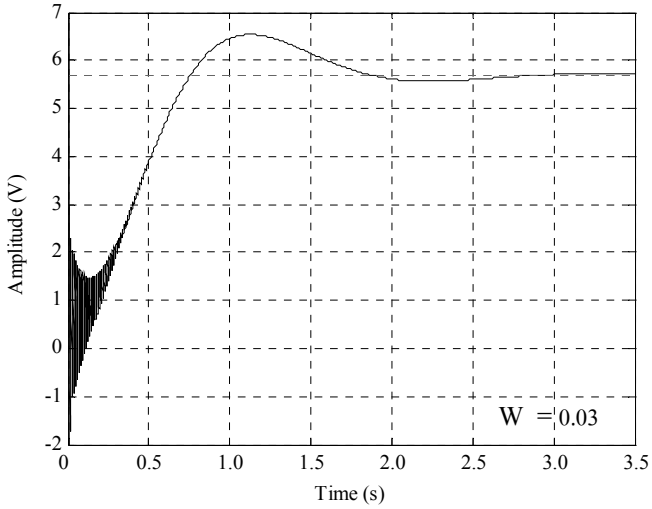
- ปรับจูนค่า K_D โดยที่ค่า K_P และ K_I คงที่

เมื่อทำปรับจูนค่า K_D ให้เพิ่มขึ้น ระบบเมื่อผ่านการชดเชยยังคงขาดเสถียรภาพเหมือนเดิม โดยที่เมื่อสังเกตโพลของระบบหลังทำการชดเชยแล้ว พบว่า มีโพลจำนวน 1 คู่ที่อยู่ทางด้านขวา ของระนาบ-เอส และตำแหน่งของโพลคู่นี้จะอยู่ห่างจากจุดกำเนิด (origin) ไปทางด้านขวามากขึ้น

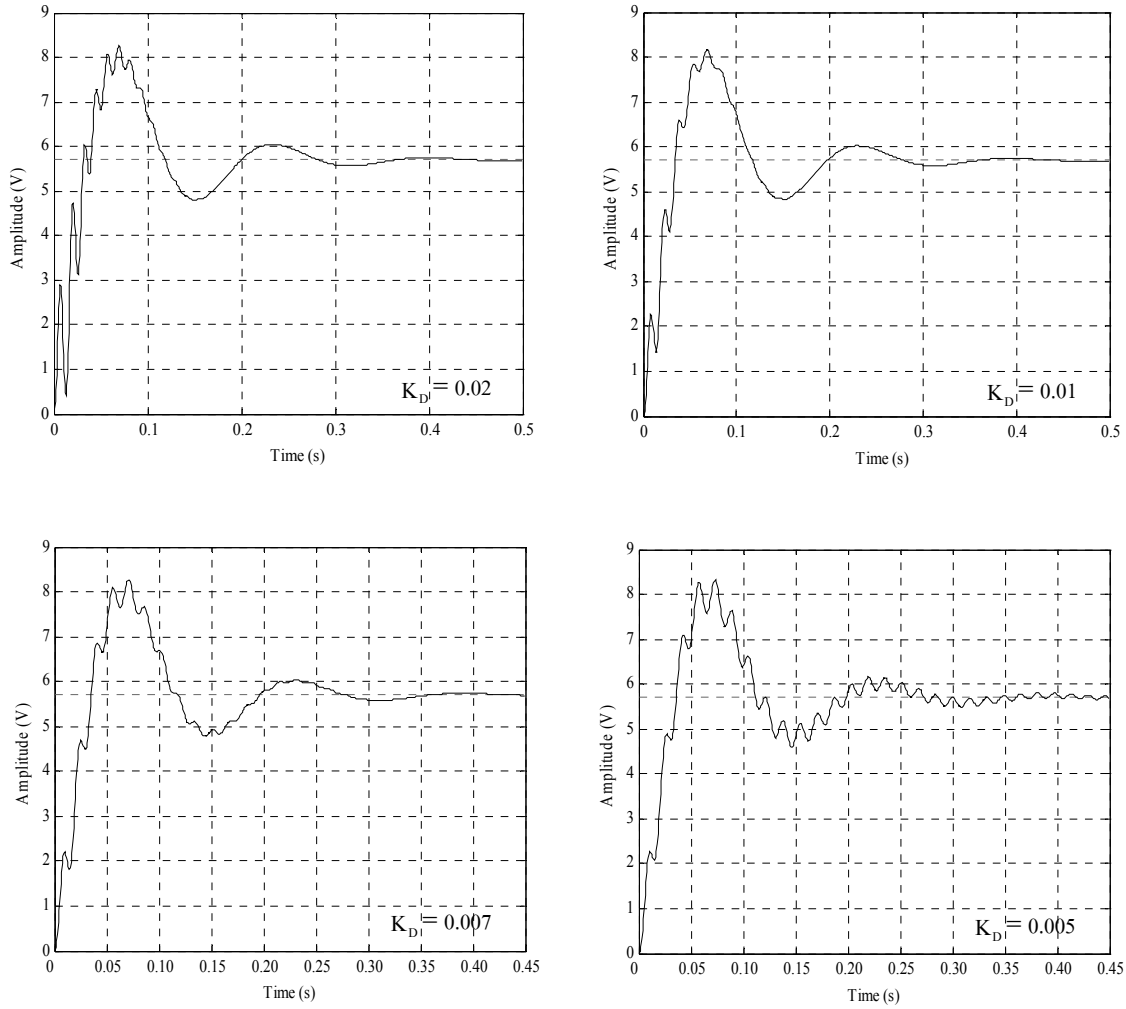
เมื่อทำการปรับจูน ค่า K_D ให้ลดลงเป็น 0.02, 0.01, 0.007 และ 0.004 ตามลำดับ จะแสดงผลตอบสนองทางเวลาได้ดังรูปที่ 3.10 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลตอบสนองดังกล่าว พบว่า การปรับลดค่า K_D ลง ก็ยังคงมีการสั่นของสัญญาณเกิดขึ้น







รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองทางเวลา เมื่อปรับจูนค่า W



รูปที่ 3.10 ผลการตอบสนองทางเวลา เมื่อปรับจูนค่า K_D

- ปรับจูนค่า K_P โดยที่ค่า K_D และ K_I คงที่

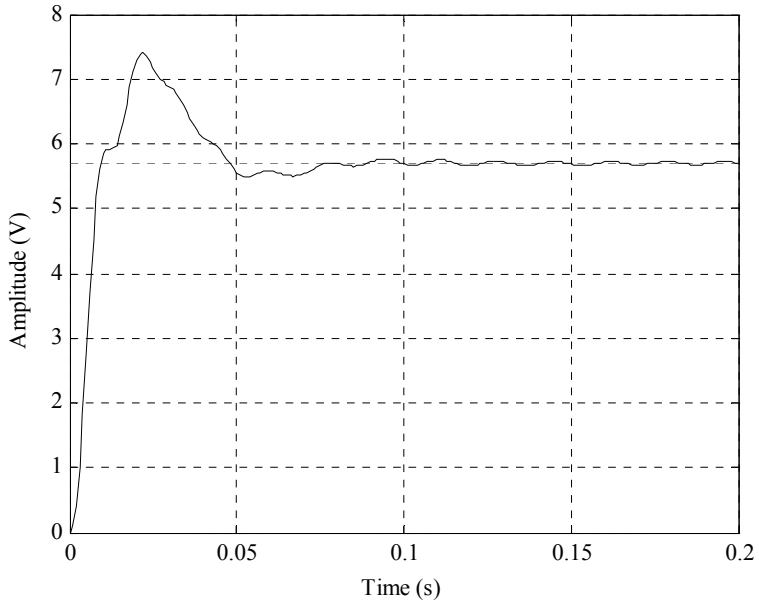
เมื่อทำการปรับจูนค่า K_P ให้มีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 10000 จะพบว่า ระบบหลังทำการชดเชยแล้วจะขาดเสถียรภาพ เนื่องจากจะมีโพลอยู่ทางด้านขวาของระนาบ-เอสจำนวน 1 คู่

- ปรับจูนค่า K_I โดยที่ค่า K_D และ K_P คงที่

จากการปรับจูนค่า K_I ให้มีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 10000 จะพบว่า ระบบคู่ควบเชิงกลหลังทำการชดเชยแล้วจะขาดเสถียรภาพ ทั้งนี้เนื่องมาจากมีโพลจำนวน 1 คู่ที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ-เอส

4) ทำการจูนค่า K_I ที่กำหนดขึ้นจากขั้นตอนที่ 4) โดยที่ T_s และ $\varnothing_m$ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.04 วินาที และ 55 องศา ตามลำดับ

จากการจูนค่า K_I ที่อยู่ในช่วง 35-4000 พบว่า ที่ค่า K_I ระหว่าง 35-3000 จะทำให้ระบบหลังการชดเชยขาดเสถียรภาพ เนื่องจากมีโพล 1 คู่ที่อยู่ทางด้านขวา และเมื่อพิจารณาค่า K_I ตั้งแต่ 3010-4000 พบว่า ถ้า K_I มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ระบบหลังจากชดเชยแล้วจะมีการสั่นของสัญญาณเพิ่มขึ้น จากการจูนค่า จะเลือกใช้ค่าที่ K_I เท่ากับ 3040 เพราะว่าที่จุดนี้จะให้ผลดีที่สุดจากขอบเขตที่กำหนดข้างต้น โดยเมื่อทำการชดเชยระบบแล้วจะให้ผลตอบสนองทางเวลาแสดงดังรูปที่ 3.11 จากรูปสังเกตเห็นว่าจะมีการสั่นของสัญญาณเกิดขึ้นพร้อมทั้งมีการพุ่งเกินสูงสุดประมาณ 30% เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจากการจูนค่า K_I พบว่าไม่มีค่าใดที่เหมาะสำหรับการชดเชยให้กับระบบคู่ควบเชิงกล



รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองทางเวลา ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์

5) ทำการปรับค่า T_s โดยค่า $\varnothing_m$ และ K_I มีค่าเท่าเดิมคือ 55 องศา และ 500 ตามลำดับ

เมื่อลองปรับ ค่า T_s เป็น 0.04-0.55 วินาที พบว่า ระบบหลังชดเชยมีโพล 1 คู่ที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ-เอส ซึ่งทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ

นอกจากการออกแบบตัวชดเชย PID ที่กล่าวมาข้างต้น ยังได้นำเสนอแนวทางการออกแบบตัวชดเชย PID ด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งขอกล่าวเพียงรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบไว้ในภาคผนวก ค. สามารถสรุปโดยรวมได้ว่า เมื่อนำตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีต่างๆ มาใช้กับระบบคู่ควบเชิงกล พบว่า ตัวชดเชยดังกล่าวจะไม่สามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบ

ได้ ดังนั้นตัวชดเชย PID ที่ออกแบบด้วยวิธีการดังที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบคู่ควบเชิงกล

3.4 การใช้ตัวชดเชย PIDA

3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบ

โครงสร้างรูปแบบการชดเชยระบบด้วยตัวชดเชย PIDA (Jung and Dorf, 1996) จะแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยตัวชดเชย PIDA จะมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G_c(s)$ เป็นดังสมการที่ (3-19) โดยที่ K_A คือ ค่าอัตราขยายขององค์ประกอบเอ

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{(s+d)} + \frac{K_A s^2}{(s+d)(s+e)} \tag{3-19}$$

$$= K_1 \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s(s+d)(s+e)} \qquad a, b, z << d, e \tag{3-20}$$

โดยที่ a, b, z และ d, e เป็นซีโรและโพลของตัวชดเชย PIDA ตามลำดับ และถ้า a, b, z << d, e จะได้ว่า สมการที่ (3-19) สามารถตัดค่าโพล d, e ทิ้งได้ ทำให้สามารถจัดรูปตัวชดเชยได้ดังสมการที่ (3-21) หรือสมการที่ (3-22)

$$G_c(s) = K_1 \frac{(s+a)(s+b)(s+c)}{s} \tag{3-21}$$

$$G_c(s) = \frac{K_A s^3 + K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \tag{3-22}$$

การออกแบบตัวชดเชย PIDA จะใช้วิธีโลกัสของรากที่มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (Jung and Dorf, 1996)

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่าเวลาเข้าที่ (T_s) และการพุ่งเกินสูงสุด (P.O.) ตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 2) หาค่า ζ และ ω_n จากสมการที่ (3-23) และ (3-24) ตามลำดับ

$$\zeta = \sqrt{\frac{(\ln \frac{P.O.}{100})^2}{\pi^2 + (\ln \frac{P.O.}{100})^2}} \tag{3-23}$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \tag{3-24}$$

จะได้โพลเด่น (dominant pole: s_d) โดยที่

$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{3-25}$$

ขั้นตอนที่ 3) เลือกค่ารากจำนวนจริงให้เท่ากับส่วนจริงของคู่โพลเชิงซ้อนที่สำคัญคือ

$$R = \mathrm{Re}\{\text{dominant roots}\} \leq -\zeta\omega_n \tag{3-26}$$

ขั้นตอนที่ 4) เลือกค่ารากของจำนวนจริง r_1, r_2, r_3 โดยกำหนดให้ $r_i << -\zeta\omega_n$; i = 1, 2 และ 3

ขั้นตอนที่ 5) เขียนสมการลักษณะเฉพาะ (characteristic equation) $1+k_1KGG_c(s) = 0$ และกำหนดให้

$$(s-s_d)(s-R)(s-r_1)(s-r_2)(s-r_3) = 0$$

ขั้นตอนที่ 6) คำนวณหาสมการลักษณะเฉพาะ

ขั้นตอนที่ 7) แก้สมการจากขั้นตอนที่ 6) เพื่อหาค่า K_A, K_D, K_P และ K_I ของตัวชดเชยที่ปรากฏในสมการที่ (3-22)

3.4.2 การออกแบบตัวชดเชยและผลการจำลองสถานการณ์

ในการออกแบบตัวชดเชย จะกำหนดค่า H(s) = 1 และทำการออกแบบโดยจุดปฏิบัติงานที่มีค่าเท่ากับ 5.7 โวลต์ จะได้ค่า $k_1 = 1$, K = 0.365 และพลานต์เป็นดังสมการที่ (3-4)

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่า T_s = 0.55 วินาที และ P.O. = 0.1%

ขั้นตอนที่ 2) หาค่า ζ และ ω_n จากสมการ (3-23) และ (3-24) ตามลำดับ ซึ่งจะได้ ζ = 0.91 และ ω_n = 7.99 รวมทั้งจะได้โพลเด่นอยู่ที่ -7.27±3.32j

ขั้นตอนที่ 3) เลือกค่ารากจำนวนจริง R = -10

ขั้นตอนที่ 4) เลือกค่า r_1, r_2, r_3 เป็น -200, -250 และ -750 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5) เขียนสมการได้ดังสมการที่ (3-27)

$$1+k_1KGG_c(s) = (s+10)(s+200)(s+250)(s+750)(s+7.27\pm3.32j) \tag{3-27}$$

ขั้นตอนที่ 6) ทำการแก้สมการที่ (3-27) จะได้ตัวชดเชยเป็นดังสมการที่ (3-28) และทำการจัดรูปแบบตัวชดเชยได้ดังสมการที่ (3-29) และ (3-30)

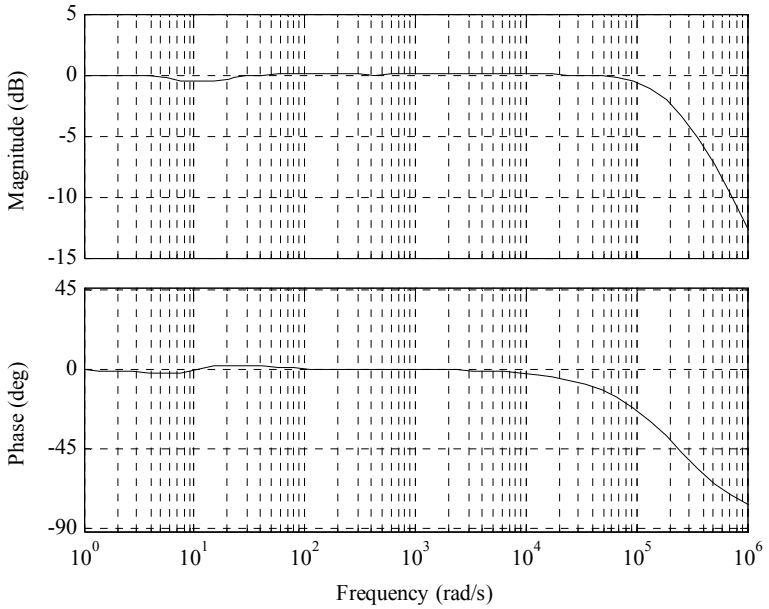
$$G_c(s) = \frac{0.2145s^3 + 4.938s^2 + 43.57s + 136.3}{s} \tag{3-28}$$

$$G_c(s) = \frac{0.2145(s + 8.04 \pm 5.19j)(s + 6.94)}{s} \tag{3-29}$$

$$G_c(s) = 43.57 + \frac{136.3}{s} + 4.938s + 0.2145s^2 \tag{3-30}$$

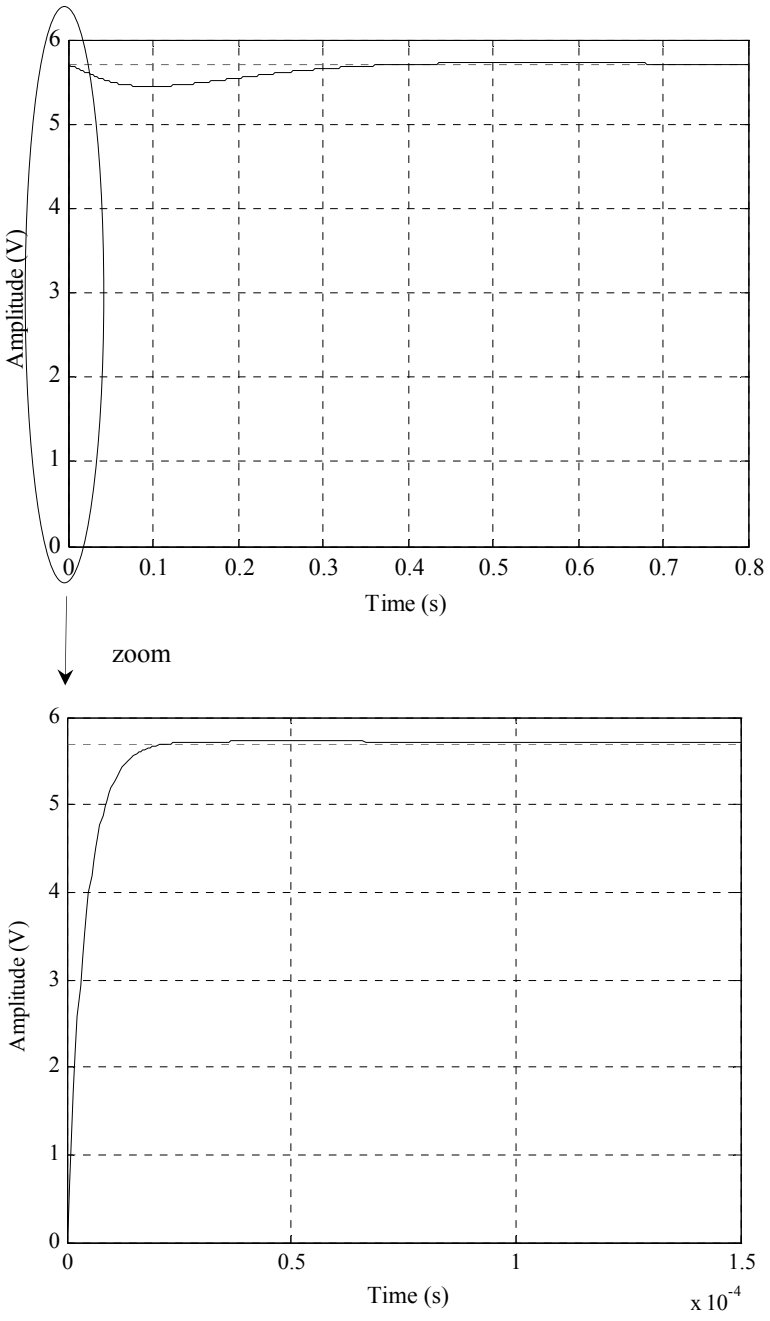
เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีตัวชดเชย PIDA ตามสมการที่ (3-28) จะให้ผลตอบสนองทางความถี่และผลตอบสนองทางเวลา แสดงดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 3.12 และ 3.13 พบว่า ผลตอบสนองทางความถี่และทางเวลาของระบบจะไม่มีรีโซแนนซ์เกิดขึ้น โดยมีค่า T_r = 0.78 มิลลิวินาที, T_s = 0.234 วินาที และ P.O. = 0.39%

ตัวชดเชยตามสมการที่ (3-30) มีความไม่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์จริง เนื่องจาก ในเทอมของ derivative และ accerelatation จะมีจำนวนโพลน้อยกว่าจำนวนซีโร ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มซีโรที่มีค่า -d และ -e ให้กับตัวชดเชย โดยที่มีเงื่อนไขต้องเป็นไปตามสมการ



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบที่มีตัวชดเชย PIDA ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์

ที่ (3-20) คือ ค่า d, e >> 6.94, 8.04 จากการลองทำการสุ่มเลือกค่า d และ e ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 50 ถึง 10000 แล้วทำการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีตัวชดเชยดังกล่าว พบว่าจะทำให้โพล ของระบบโดยรวม จะมีโพล 1 คู่ที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ-เอส ซึ่งทำให้ระบบจะขาดเสถียรภาพ ดังนั้น ตัวชดเชย PIDA ที่ทำการออกแบบเพื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์จริงไม่สามารถที่จะนำไปใช้เป็นตัวชดเชยเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่มีตัวชดเชย PIDA ที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงตัวชดเชยที่มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน 3 แบบ คือ ตัวชดเชยแบบ PI PID และ PIDA จากการจำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาพลวัตของระบบที่ผ่านการชดเชยด้วยตัวชดเชยทั้ง 3 แบบ โดยดำเนินการพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ จะสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี โดยกรณีแรก เป็นการใช้ตัวชดเชยแบบ PI เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่จะพบว่ารีโซแนนซ์การบิดยังคงปรากฏอยู่แม้จะมีการปรับจูนค่าแล้วก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลา จะเห็นได้ว่า รีโซแนนซ์การบิดสามารถถูกกำจัดได้แต่ก็ทำให้ผลตอบสนองทางเวลาของระบบช้ากว่าก่อนทำการชดเชยระบบ กรณีต่อมา เป็นการใช้ตัวชดเชยแบบ PID ซึ่งทำการปรับจูนค่าต่างๆดังที่ได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.2 สรุปได้ว่าตัวชดเชยไม่สามารถทำการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลได้ ส่วนกรณีสุดท้าย เป็นการใช้ตัวชดเชยแบบ PIDA จะพบว่าจากการออกแบบตัวชดเชยดังกล่าวสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดได้ และมีการตอบสนองต่อระบบได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่เหมาะสำหรับนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์จริงดังได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นจึงปรับปรุงตัวชดเชยดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำไปสร้างอุปกรณ์จริงได้ แต่จากผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยที่ได้จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ จากการออกแบบตัวชดเชยทั้ง 3 แบบ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า ตัวชดเชยที่ดำเนินการออกแบบนั้นไม่เหมาะสำหรับนำไปชดเชยระบบคู่ควบเชิงกล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการอื่นเพื่อให้สามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิด และยังคงได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 4 และ 5 ต่อไป

บทที่ 4
การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยตัวชดเชยจากวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

4.1 บทนำ

การออกแบบระบบควบคุมเชิงเส้น ในปัจจุบันอาจดำเนินการด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งใน 3 วิธีต่อไปนี้ คือ ดำเนินการด้วยทฤษฎีระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (conventional control theory) ดำเนินการด้วยทฤษฎีระบบควบคุมสมัยใหม่ (modern control theory) และใช้พีชคณิต (algebraic method) หรือที่อาจเรียกว่าวิธีพหุนาม (polynomial method)

วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ หรือเรียกย่อๆ ว่า CDM (Coefficient Diagram Method) เป็นการออกแบบด้วยวิธีพีชคณิตรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรมระบบควบคุมเป็นเวลากว่า 40 ปี ด้วยการนำไปใช้ทางด้านต่างๆ เช่น การควบคุมระบบเซอร์โว การควบคุมระบบขับเคลื่อนในโรงหล่อเหล็กกล้า และการควบคุมกังหันไอพ่น เป็นต้น

บทนี้นำเสนอเนื้อหาที่จะกล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยให้กับระบบด้วยวิธี CDM ซึ่งเป็นการออกแบบทางระบบควบคุมด้วยวิธีพีชคณิตที่ใช้แผนผังที่เรียกว่า แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ วิธีนี้จะพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะ และกำหนดช่วงเวลาเข้าที่ (T_s) ของระบบรวม (overall system) ตามที่ต้องการ โดยคำนึงถึงความมีเสถียรภาพ ผลตอบสนองของระบบ และความคงทนเมื่อมีการรบกวนจากภายนอกไปพร้อมๆกันอย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีตัวชดเชยโดยการแสดงผลออกมาในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ พร้อมทั้งความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนภายนอก นอกจากนี้ยังนำเสนอแนวทางการอนุวัตตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และดำเนินการทดสอบตัวชดเชยที่อนุวัตขึ้นเพื่อพิจารณาคุณสมบัติว่าตรงตามที่ออกแบบหรือไม่

4.2 การใช้ตัวชดเชยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

วิธี CDM มีลักษณะที่สำคัญ 5 ประการดังนี้ (Manabe, 2003)

1) ระบบจะจัดให้อยู่ในรูปพหุนามและเมตริกซ์พหุนาม (polynomial matrix)

2) สมการลักษณะเฉพาะและตัวชดเชย สามารถที่จะออกแบบได้ในเวลาเดียวกัน

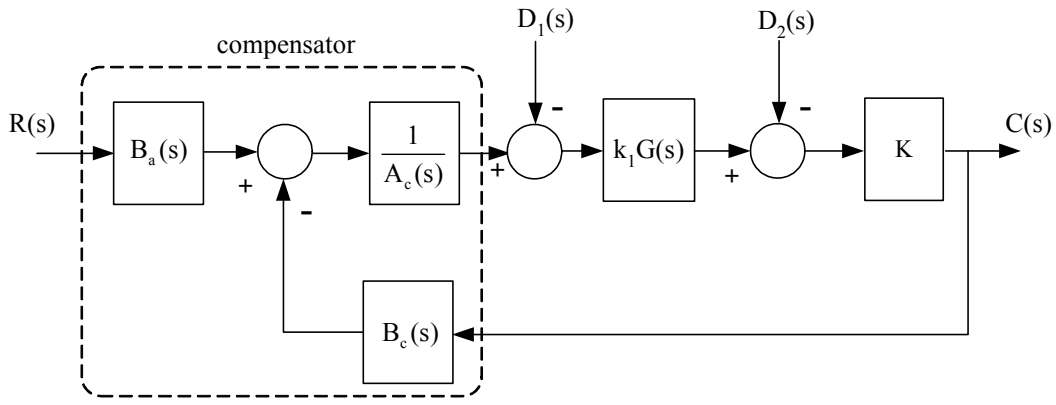
3) แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิผล

4) เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลีพาทอฟ (Lipatov) เป็นส่วนสำคัญทางทฤษฎีของวิธี CDM

5) รูปแบบมาตรฐานของเคสเลอร์ (Kessler) จะใช้เป็นรูปแบบมาตรฐานของวิธี CDM

4.2.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชย

แผนภาพบล็อกของระบบที่มีการออกแบบตัวชดเชยตามมาตรฐานของวิธี CDM สำหรับระบบอินพุตเดียว-เอาต์พุตเดียว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบตามโครงสร้าง CDM

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

$$G_p(s) = k_1 K G(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} \tag{4-1}$$

โดยที่ G(s) คือ ระบบหรือพลานต์

k_1 คือ ตัวปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ที่ได้จากบทที่ 2

K คือ ตัวลดทอนระดับสัญญาณของการวัดแรงดันเอาต์พุต ที่ได้จากบทที่ 2

พิจารณาบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถจัดให้อยู่ในรูปพหุนามได้ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \ldots + p_0 \tag{4-2}$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \ldots + q_0 \tag{4-3}$$

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda\text{-}1} s^{\lambda\text{-}1} + \ldots + l_0 \tag{4-4}$$

$$B_c(s) = k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda\text{-}1} s^{\lambda\text{-}1} + \ldots + k_0 \tag{4-5}$$

$$B_a(s) = k_0 \tag{4-6}$$

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ เป็นการกำหนดให้จำนวนโพลวงรอบเปิดมากกว่าจำนวนซีโร่วงรอบเปิด เพื่อประกันว่าระบบจะมีเสถียรภาพตามที่ต้องการ ส่วนเทอม $B_a(s)$ เรียกว่าพรีฟิลเตอร์ (prefilter) ถูกปรับให้เท่ากับ k_0 เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบที่มีตัวชดเชยไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว

การออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธี CDM มี 4 ขั้นตอน (Manabe, 2003) ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่าเวลาเข้าที่ (T_s) แล้วคำนวณค่าคงที่ทางเวลา (τ) จากสมการที่ (4-7)

$$\tau = \frac{T_s}{(2.5 \sim 3)} \tag{4-7}$$

ขั้นตอนที่ 2) กำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพ (γ_i) ดังสมการที่ (4-8)

$$\gamma_i = [2.5, 2, 2, \ldots, 2]; \quad i = 1, \ldots, n-1 \tag{4-8}$$

โดยที่ n คือ อันดับของสมการลักษณะเฉพาะ

ค่าดรรชนีเสถียรภาพสามารถเรียกชื่อเป็นแบบอื่นได้หลายแบบ เช่น ตัวประกอบการหน่วง (damping factor) (Kessler, 1960) อัตราส่วนลักษณะเฉพาะ (characteristic ratio) (Naslin, 1968) และ อัตราส่วนคู่ (double ratio) (Branderburg, 1987) เป็นต้น ทั้งนี้ค่า γ_i ตามที่ปรากฏดังสมการที่ (4-8) เป็นค่าตามรูปแบบมาตรฐานที่กำหนดโดย Manabe (2003) ที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี แต่จะสามารถนำค่านี้ไปใช้ในการออกแบบได้ เงื่อนไขในอสมการที่ (4-9) จะต้องเป็นจริง ถ้าเงื่อนไขดังกล่าวไม่เป็นจริง ให้ปรับค่า γ_{n-1}, γ_{n-2} และค่าอื่นๆ จนกระทั่งอสมการ (4-9) เป็นจริง

$$\frac{p_k}{p_{k\text{-}1}} > \frac{\tau}{(\gamma_{n\text{-}1})(\gamma_{n\text{-}2})\ldots(\gamma_1)} \tag{4-9}$$

โดยที่ p_k และ p_{k-1} คือ สัมประสิทธิ์ของพลานต์ สำหรับอันดับที่ k และ k-1 ตามลำดับ

ในการออกแบบ ค่า γ_i สามารถที่จะเปลี่ยนไปตามผู้ออกแบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบตามที่ต้องการ โดยที่เงื่อนไขต้องเป็นไปตามสมการที่ (4-10)

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \quad ; i = 1,..., n-1 \tag{4-10}$$

โดยที่ γ_i^* คือ ค่าจำกัดเสถียรภาพ สามารถหาได้จากสมการที่ (4-11)

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad ; \gamma_0 = \gamma_n = \infty \tag{4-11}$$

ขั้นตอนที่ 3) ทำการหาสมการลักษณะเฉพาะของระบบที่มีตัวชดเชยดังรูปที่ 4.1 ได้เป็น

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) = 0 \tag{4-12}$$

และถ้าจัด P(s) ให้อยู่ในรูปของพหุนาม แสดงดังสมการที่ (4-13)

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ldots + a_0 \tag{4-13}$$

โดยที่ a_n , a_{n-1} , …, a_0 คือ สัมประสิทธิ์ของพหุนามลักษณะเฉพาะของระบบ และ n คือ อันดับของสมการคุณลักษณะ ตามวิธีของ CDM มีสูตรการหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_i (i =1, 2, … , n) ดังสมการที่ (4-14)

$$a_i = a_0\tau^i \frac{1}{(\gamma_{i-1})\ldots(\gamma_2)^{i-2}(\gamma_1)^{i-1}}$$

$$= a_0\tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \tag{4-14}$$

และสามารถหาค่าสมการคุณลักษณะ P(s) ได้ดังสมการที่ (4-15)

$$P(s) = a_0\left[\left\{\sum_{i=2}^{n}\left(\prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{(\gamma_{i-1})^j}\right)(\tau s)^i\right\} + \tau s + 1\right] \tag{4-15}$$

ขั้นตอนที่ 4) ปรับค่า $B_a(s) = k_0$

เงื่อนไขเสถียรภาพสำหรับ CDM

โดยทั่วๆ ไป วิธีที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ เช่น เกณฑ์เสถียรภาพของเราธ์ (Routh's stability criterion) จะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก แต่เป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยากและไม่พอเพียงต่อการประยุกต์ใช้ในงานออกแบบระบบควบคุมอันดับสูงๆ ดังนั้น ลีพาทอฟ (Lipatov) (Manabe, 2003) จึงเสนอการตรวจสอบเสถียรภาพของวิธี CDM โดยใช้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลีพาทอฟ (sufficient condition of stability by Lipatov) ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ตรวจสอบได้ง่าย และวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน

การตรวจสอบเสถียรภาพสามารถเขียนในเทอมของดรรชนีเสถียรภาพ ได้ดังต่อไปนี้

1) ระบบอันดับที่ 3 จะเสถียรก็ต่อเมื่อ

$$\gamma_2\gamma_1 > 1 \tag{4-16}$$

2) ระบบอันดับที่ 4 จะเสถียรก็ต่อเมื่อ

$$\gamma_2 > \gamma_2^* \tag{4-17}$$

3) สำหรับระบบที่มีอันดับสูงกว่า 4 ลีพาทอฟได้เสนอเงื่อนไขพอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพและความไม่มีเสถียรภาพของระบบไว้หลายรูปแบบ ทฤษฎีที่เหมาะสมกับการออกแบบตัวชดเชยด้วย CDM กล่าวไว้ว่า "ระบบจะเสถียรก็ต่อเมื่อพหุนามย่อยอันดับที่ 4 ทุกชุดของระบบมีเสถียรภาพด้วยตัวคูณขนาด 1.12 และระบบจะไม่มีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อมีพหุนามย่อยอันดับที่ 3 บางชุดของระบบไม่มีเสถียรภาพ"

จากทฤษฎีที่กล่าวข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น 2 กรณี ต่อไปนี้

กรณีที่ 1 เงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของระบบที่มีสมการลักษณะเฉพาะดังสมการที่ (4-12) ระบบจะมีเสถียรภาพถ้าสมการ (4-18) หรือ (4-19) เป็นจริง

$$\sqrt{\gamma_i\gamma_{i+1}} > 1.466 \qquad \text{สำหรับ ทุกๆค่า ของ } i = 2, \ldots, n\text{-}2 \tag{4-18}$$

$$\gamma_i > 1.12\gamma_i^* \qquad \text{สำหรับ ทุกๆค่า ของ } i = 2, \ldots, n\text{-}2 \tag{4-19}$$

กรณีที่ 2 เงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพสำหรับระบบที่มีสมการลักษณะเฉพาะดังสมการที่ (4-12) ระบบจะไม่มีเสถียรภาพถ้าสมการ (4-20) เป็นจริง

$$\gamma_i\gamma_{i+1} \le 1 \qquad \text{สำหรับ ทุกๆค่า ของ } i = 2, \ldots, n-2 \qquad (4\text{-}20)$$

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

การออกแบบตัวชดเชยจะอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเป็นแผนผังชนิดกึ่งลอการิทึม และทำการตรวจสอบเสถียรภาพและผลตอบสนองของระบบในแผนผัง ในที่นี้จะทำการยกตัวอย่างแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบอันดับ 5 โดยกำหนดค่าดังต่อไปนี้ (Manabe, 2003)

$$A_P(s) = 0.25s^4 + s^3 + 2s^2 + 0.5s \quad , \quad B_P(s) = 1$$

$$A_c(s) = L_1 s \quad , \quad B_c(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0$$

เมื่อ $L_1 = 1,\ k_2 = 1.5,\ k_1 = 1$ และ $k_0 = 0.2$ จากนั้นกำหนดค่า

$$\gamma_i = [\ \gamma_4\ \ \gamma_3\ \ \gamma_2\ \ \gamma_1\ ] = [\ 2\ \ 2\ \ 2\ \ 2.5\ ]$$

$$\tau = 5$$

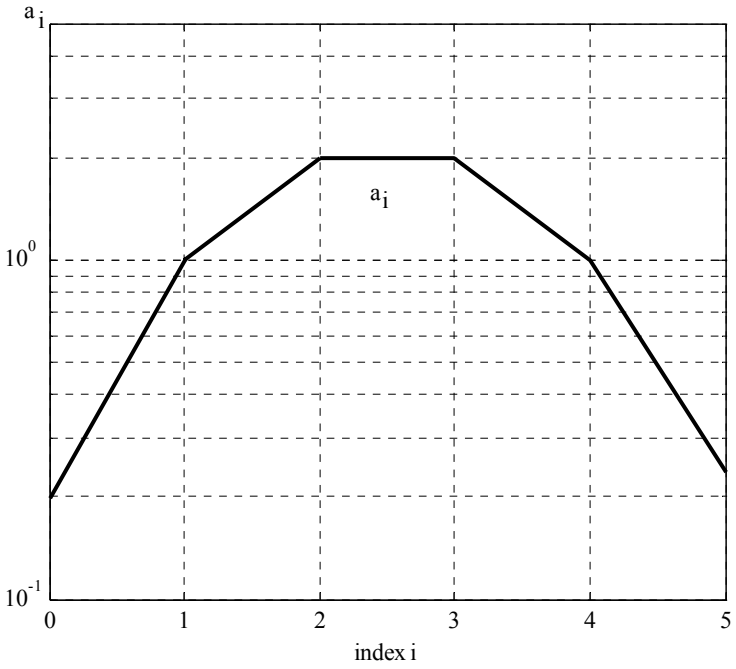
จากค่า γ_i และ τ ที่กำหนด สามารถหาค่า γ_i^* และ P(s) จากสมการที่ (4-11) และ (4-14) ได้ผลดังนี้

$$\gamma_i^* = [\ \gamma_4^*\ \ \gamma_3^*\ \ \gamma_2^*\ \ \gamma_1^*\ ] = [\ 0.5\ \ 1.0\ \ 0.9\ \ 0.5\ ]$$

$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 0.2$$

$$a_i = [a_5\ \ a_4\ \ a_3\ \ a_2\ \ a_1\ \ a_0] = [\ 0.25\ \ 1\ \ 2\ \ 2\ \ 1\ \ 0.2\ ]$$

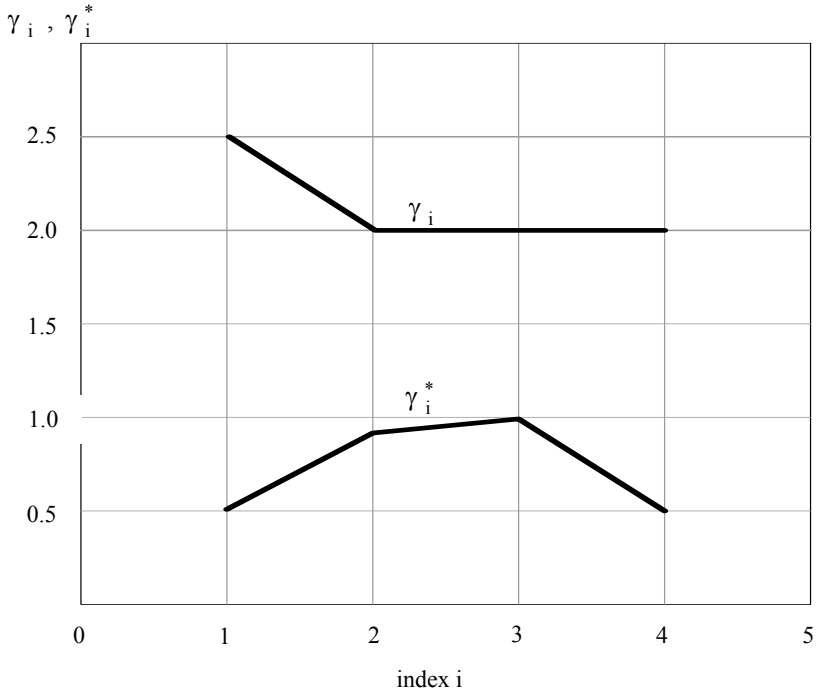
แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงเส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ a_i โดยที่เส้นกราฟนี้สามารถบอกความคงทนของระบบได้ คือ ถ้าเส้นกราฟมีความโค้งมาก ก็จะทำให้ความคงทนของระบบมีค่ามากตามไปด้วย และรูปที่ 4.3 เป็นกราฟของค่า γ_i และ γ_i^* เมื่อพิจารณาค่าระยะห่างระหว่างเส้นกราฟของ γ_i และ γ_i^* จะเป็นตัวแสดงระดับความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามลักษณะเฉพาะ กล่าวคือ ถ้าระยะห่างมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ระบบมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของระบบได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน



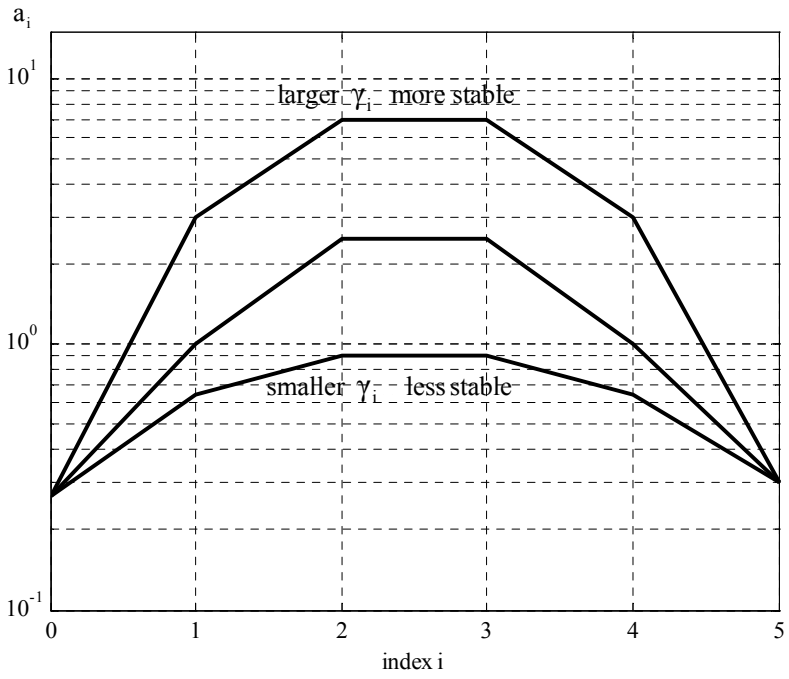
รูปที่ 4.2 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ของค่าสัมประสิทธิ์ a_i

รูปที่ 4.4 เป็นกราฟที่แสดงผลกระทบเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของ γ_i โดยส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ คือ ถ้ากราฟของค่าสัมประสิทธิ์ a_i มีความโค้งเพิ่มขึ้น จะแสดงถึงการที่ระบบมีเสถียรภาพมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า γ_i มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าเส้นกราฟมีลักษณะความโค้งที่ลดลง ระบบก็จะมีโอกาสขาดเสถียรภาพได้ง่ายขึ้น

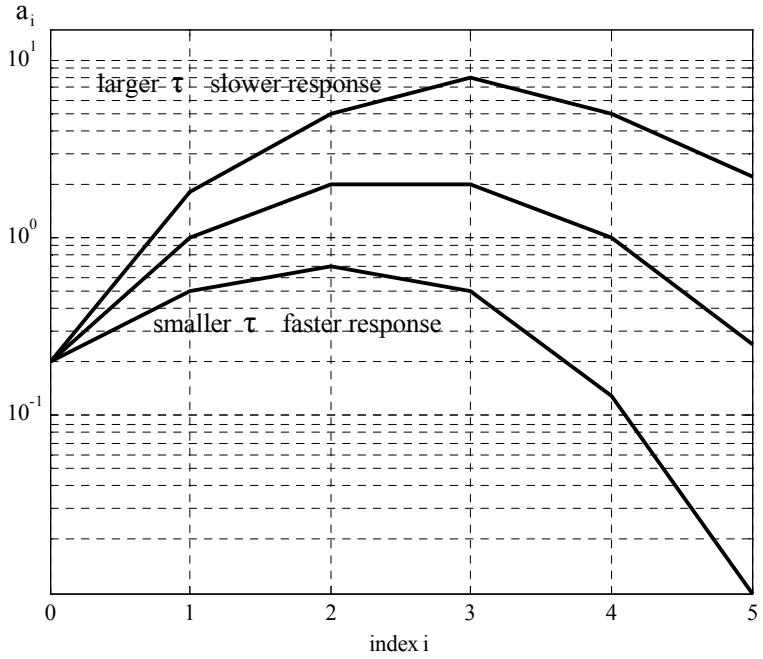
รูปที่ 4.5 เป็นกราฟที่แสดงผลกระทบเมื่อค่าคงตัวทางเวลาสมมูล τ มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อความเร็วของการตอบสนองของระบบ คือ ถ้าปลายทางขวาของกราฟค่าสัมประสิทธิ์ a_i มีลักษณะถูกกดให้ต่ำลงยิ่งมากเท่าใดก็หมายความว่า ค่า τ จะลดลงมากขึ้นเท่านั้น และระบบจะตอบสนองได้รวดเร็วขึ้นไปตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ของค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i และ ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^*



รูปที่ 4.4 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า γ_i



รูปที่ 4.5 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า τ

4.2.2 การออกแบบตัวชดเชย

พิจารณาระบบคู่ควบเชิงกลที่มีแบบจำลองดังสมการที่ (4-21)

$$G_p = k_1 KG(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)}$$

$$= \frac{1.12\times10^6 s^2 + 1.39\times10^9 s + 1.28\times10^{11}}{s^5 + 281.1s^4 + 4.12\times10^5 s^3 + 4.17\times10^7 s^2 + 3.69\times10^{10} s + 1.28\times10^{11}} \qquad (4\text{-}21)$$

การออกแบบตัวชดเชย ดำเนินการเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดค่า $T_s = 0.55$ วินาที และคำนวณค่า τ จากสมการ (4-7) จะได้

$$\tau = \frac{T_s}{2.5} = 0.22 \qquad (4\text{-}22)$$

ขั้นตอนที่ 2) กำหนด γ_i ดังนี้

$$\gamma_i = [10.17,\ 3,\ 2.74,\ 2.8,\ 2.9,\ 2.9,\ 2.9,\ 3] \quad ;\ i = 1, 2, \ , 8 \tag{4-23}$$

ค่า γ_i ที่กำหนดตามสมการที่ (4-23) เมื่อทำการตรวจสอบเงื่อนไขในการกำหนดค่า γ_i พบว่าเป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้น จึงสามารถใช้ค่า γ_i ที่กำหนดขึ้นได้ จากนั้นทำการหาค่า γ_i^* ตามสมการที่ (4-11) จะได้ค่าเป็น

$$\gamma_i^* = [0.463,\ 0.691,\ 0.71,\ 0.702,\ 0.69,\ 0.678] \quad ;\ i = 2, \ldots, 7$$

ตรวจสอบเสถียรภาพของวิธี CDM ได้ดังนี้

1) ตรวจสอบความมีเสถียรภาพตามสมการที่ (4-19) จะได้

$$\gamma_2 > 0.52,\ \gamma_3 > 0.777,\ \gamma_4 > 0.798,\ \gamma_5 > 0.789,\ \gamma_6 > 0.776,\ \gamma_7 > 0.762 \tag{4-24}$$

เมื่อนำค่า γ_i จากสมการที่ (4-23) มาตรวจสอบตามเงื่อนไขตามสมการที่ (4-24) พบว่า เงื่อนไขเป็นจริงทุกประการ ดังนั้นระบบนี้จะมีเสถียรภาพ

2) ตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพ ดังสมการที่ (4-20) คือ

$$\gamma_i \gamma_{i+1} \le 1 \quad ;\ i = 1, \ldots, 7$$

จากการตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพ พบว่าไม่มีเงื่อนไขใดเลยที่สอดคล้องเป็นไปตามสมการที่ (4-20) ดังนั้นจากการตรวจสอบเสถียรภาพทั้งสองทฤษฎี สามารถสรุปได้ว่าระบบนี้มีเสถียรภาพ

ขั้นตอนที่ 3) หาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_i จากสมการที่ (4-14) และจัดรูปพหุนามตามสมการที่ (4-13) ได้ดังสมการที่ (4-25)

$$P(s) = s^9 + 7.785\times10^4 s^8 + 2.02\times10^9 s^7 + 1.808\times10^{13} s^6 + 5.577\times10^{16} s^5 + 5.934\times10^{19} s^4$$

$$+2.255\times10^{22} s^3 + 3.127\times10^{24} s^2 + 1.446\times10^{26} s + 6.571\times10^{26} \tag{4-25}$$

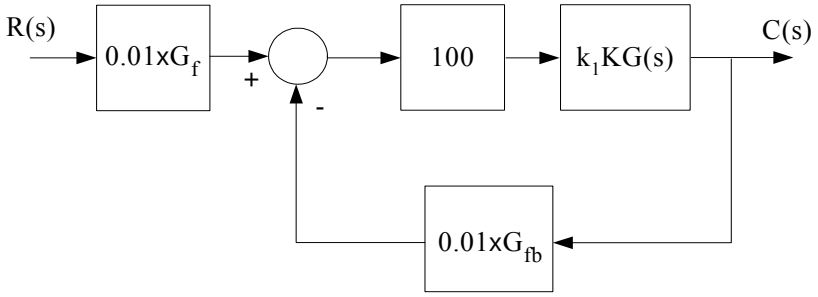
จากนั้น ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (4-25) กับสมการที่ (4-12) จะได้พหุนาม B_c และ A_c แสดงดังสมการที่ (4-26) และ (4-27) ตามลำดับ

$$B_c = 1.436\times10^{7}s^4 + 3.091\times10^{10}s^3 + 1.243\times10^{13}s^2 + 1.063\times10^{15}s + 5.1\times10^{15} \quad (4\text{-}26)$$

$$A_c = s^4 + 7.757\times10^{4}s^3 + 1.998\times10^{9}s^2 + 1.419\times10^{12}s + 3.145\times10^{13} \quad (4\text{-}27)$$

ขั้นตอนที่ 4) ปรับค่า $B_a = 5.131\times1015$ เพื่อให้ระบบมีการตามรอยอินพุตอย่างเหมาะสม

ดังนั้น จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวชดเชยที่แสดงดังรูปที่ 4.1 และสามารถจัดรูปแบบตัวชดเชยใหม่เป็นตัวชดเชยได้ 2 ชุด คือ ตัวชดเชยแบบป้อนไปหน้า (G_f : forward compensator) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $B_a(s)/A_c(s)$ และ ตัวชดเชยแบบป้อนกลับ (G_{fb} : feedback compensator) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $B_c(s)/A_c(s)$ และทำการปรับลดอัตราขยายลง 100 เท่าของตัวชดเชย G_f และ G_{fb} แล้วค่อยเพิ่มอัตราขยายเป็น 100 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ที่ทำเช่นนี้เพื่อไม่ให้ค่าอัตราขยายของตัวชดเชยมีค่าสูงเกินขอบเขตของวงจรอนุวัตที่สามารถทำงานได้



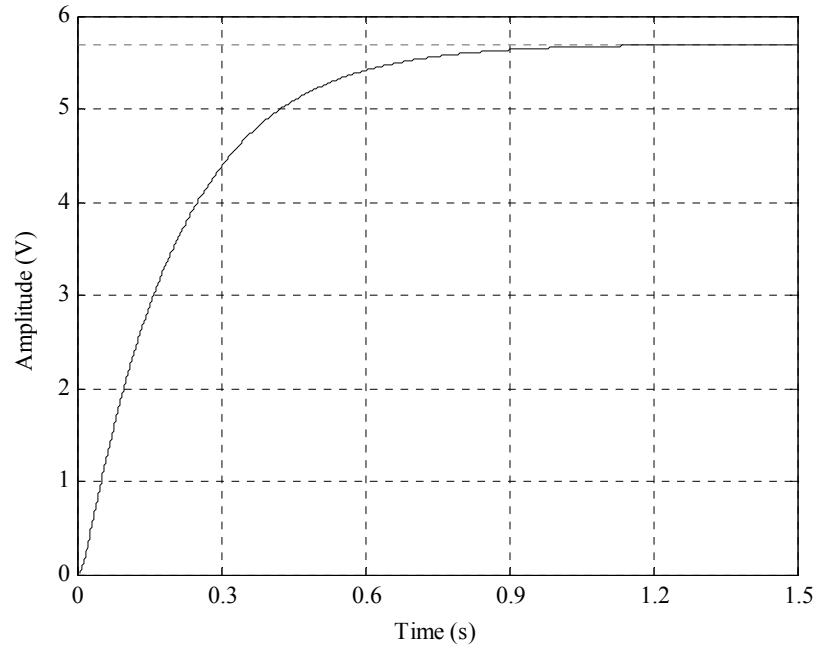
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบที่มีตัวชดเชย

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีตัวชดเชย

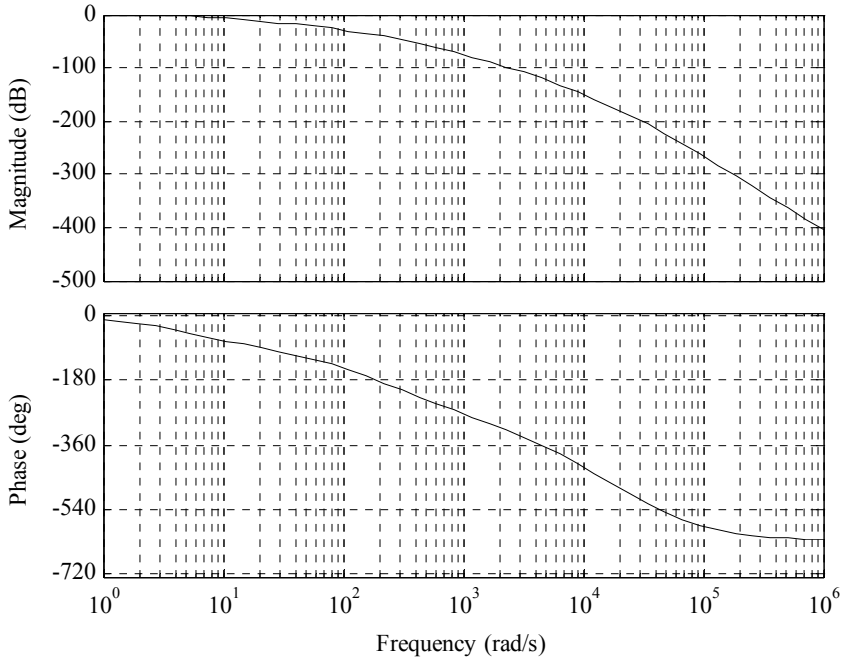
ผลการจำลองสถานการณ์ระบบในหัวข้อนี้ แสดงผลให้เห็นว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยจะทำให้สามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดได้ และสามารถกำจัดผลจากสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งการจำลองสถานการณ์ระบบนั้นกระทำด้วยโปรแกรม MATLAB

รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่ใช้ตัวชดเชยตามวิธี CDM เมื่อป้อนอินพุตเป็นแบบขั้นบันไดที่มีขนาด 5.7 โวลต์ โดยที่ k_1 และ K ตามโครงสร้างของรูปที่ 4.6 มีค่าเท่ากับ 1 และ 0.365 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.7 จะพบว่าตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดอย่างได้ผลดี และจะให้ค่าช่วงเวลาขึ้น (rise time) เป็น 0.433 วินาที ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) เป็น 0.782 วินาที และไม่เกิดการพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot) ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบวงปิดเมื่อมีการชดเชยแล้ว แสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่ง

พบว่าระบบจะให้สมรรถนะทางความถี่ที่ดี กล่าวคือ ระบบไม่เกิดรีโซแนนซ์ และมีแบนด์วิดท์กว้างถึง 5.01 เรเดียนต่อวินาที

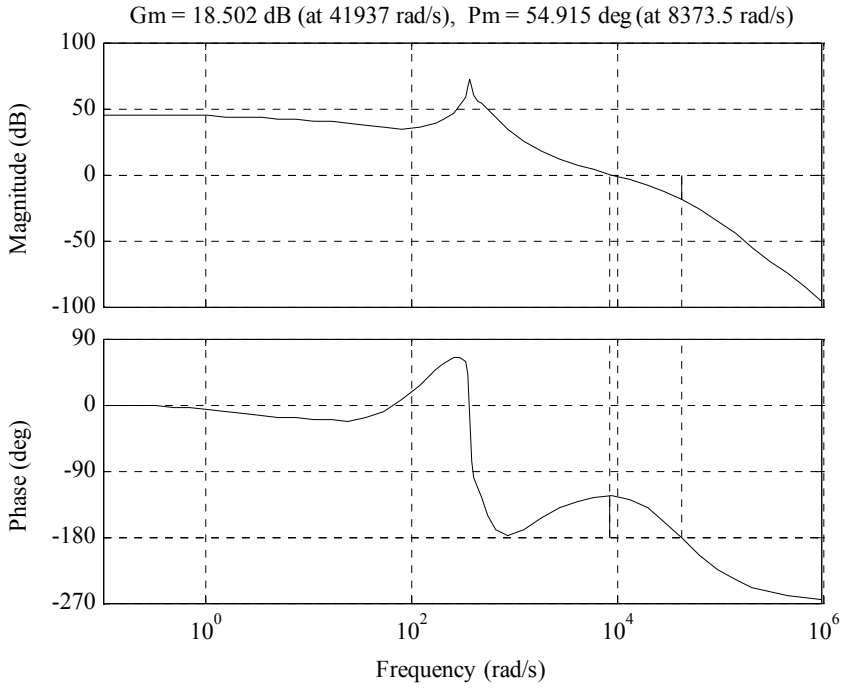


รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบที่ใช้ตัวชดเชยตามวิธี CDM



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยแล้ว

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดดังรูปที่ 4.9 เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ พบว่า แม้ค่าส่วนเผื่ออัตราขยาย (gain margin) และส่วนเผื่อเฟส (phase margin) มีค่ามากกว่าศูนย์ แต่เมื่อสังเกตจากรูป จุดตัดของมุมเฟสที่ -180 องศา จะมีจุดต่ำสุดที่ใกล้กับจุด -180 องศา อีกจุดหนึ่งที่ความถี่ประมาณ 856 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งที่ตำแหน่งนี้มีแนวโน้มทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ง่าย ดังนั้นจึงทำการแก้ไขเพื่อให้จุดนี้ขยับขึ้นไปห่างจากแกนที่มีมุมเฟสที่ -180 องศา ซึ่งทำได้โดยเพิ่มชุดตัวชดเชย G_{add} ที่แสดงดังสมการที่ (4-27) เข้าไปที่ตัวชดเชย ชุด G_f และ G_{fb} ซึ่งแสดงโครงสร้างระบบที่มีการเพิ่มชุดตัวชดเชยใหม่เป็นดังรูปที่ 4.10 โดยที่ G_{fn} และ G_{fbn} เป็นดังสมการที่ (4-28) และ (4-29) ตามลำดับ

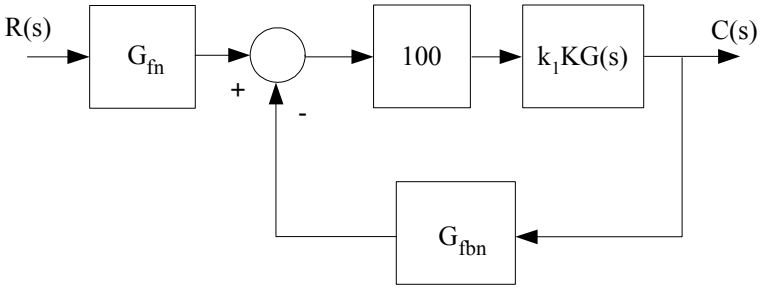


รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

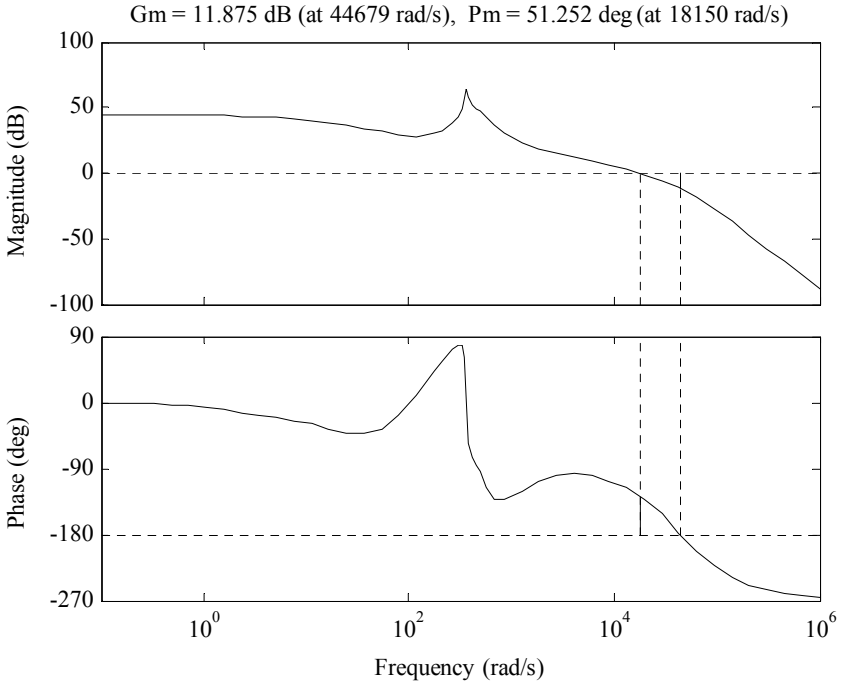
$$G_{add}=\left(\frac{9s+3600}{s+3600}\right)\left(\frac{0.271s+40.65}{s+40.65}\right)=\frac{2.439s^2+1341s+(1.463\times10^5)}{s^2+3641s+(1.463\times10^5)} \quad (4\text{-}27)$$

$$G_{fn}=0.01\times G_f\times G_{add} \quad (4\text{-}28)$$

$$G_{fbn}=0.01\times G_{fb}\times G_{add} \quad (4\text{-}29)$$



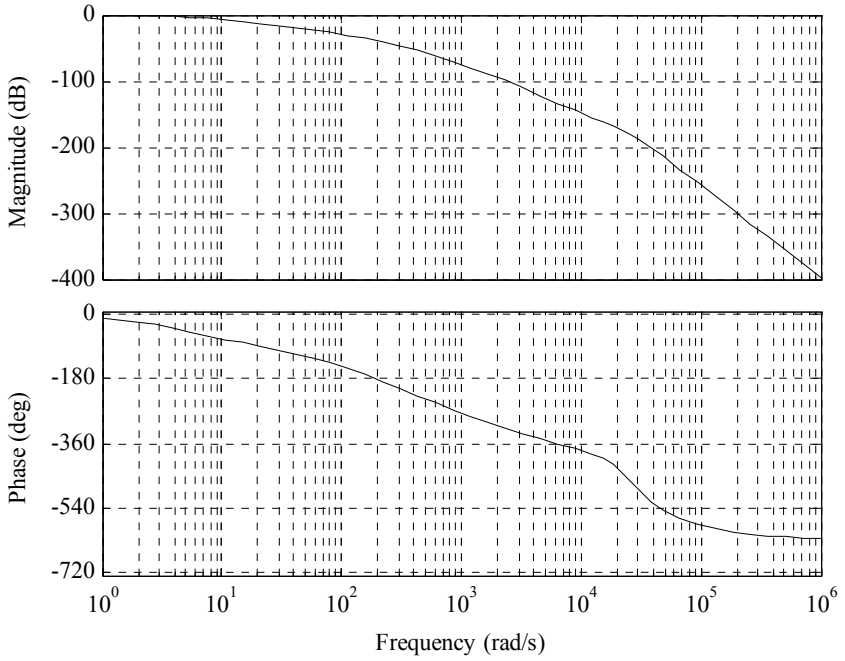
รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงระบบหลังการชดเชยที่เพิ่มชุด G_{add}



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่เพิ่มชุด G_{add}

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่เพิ่มชุด G_{add} ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าระบบจะมีค่าส่วนเผื่ออัตราขยายเท่ากับ 11.88 เดซิเบล และมีค่าส่วนเผื่อเฟสเท่ากับ 51.25 องศา และเมื่อดำเนินการจำลองสถานการณ์ระบบตลอดย่านการทำงาน พบว่า ค่าส่วนเผื่ออัตราขยายและค่าส่วนเผื่อเฟสมีค่าเท่ากับ 11.88 เดซิเบล และ 51.25 องศา ตามลำดับ ซึ่งในทางทฤษฎีของ Philip และ Harbor (2000) ได้กล่าวไว้ว่า ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบที่ดี ควรมีค่าส่วนเผื่ออัตราขยายมากกว่าหรือเท่ากับ 8 เดซิเบล และ ส่วนเผื่อเฟสมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 50 องศา เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟส

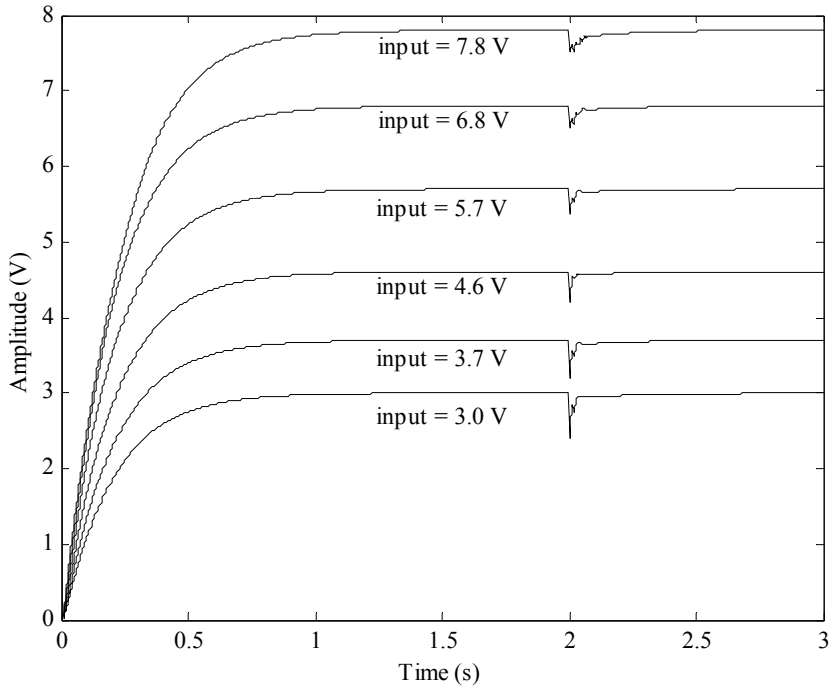
ของระบบคู่ควบเชิงกลหลังดำเนินการชดเชยแล้ว สามารถสรุปได้ว่า ระบบนี้มีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดี เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ที่แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าระบบดังกล่าวจะไม่มีปรากฏการณ์รีโซแนนซ์เกิดขึ้น และแบนวิดท์ของระบบมีค่าเท่ากับเมื่อยังไม่เพิ่มชุด G_{add}



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่เพิ่มชุด G_{add}

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาเมื่อเพิ่มชุด G_{add} อีกครั้งหนึ่งที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ พบว่า ผลตอบสนองจะให้ช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และการพุ่งเกินสูงสุด เหมือนกับกรณีที่ยังไม่เพิ่ม G_{add} เข้าไปที่ตัวชดเชย ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์ระบบหลังทำการชดเชยตลอดย่านการทำงานอินพุต จะให้ช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และการพุ่งเกินสูงสุด เท่ากับที่ทำการจำลองระบบที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ จากนั้นพิจารณาผลตอบสนองของระบบเมื่อมีสัญญาณรบกวนจากภายนอก $D_2(s)$ ดังรูปที่ 4.1 (ไม่พิจารณาค่า $D_1(s)$) โดยเลือกค่า $D_2(s)$ ที่เป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดที่มีขนาดหนึ่งหน่วยป้อนเข้าสู่ระบบ ณ เวลา 2 วินาที และอินพุตที่ป้อนเข้าสู่ระบบเป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดที่มีขนาดเท่ากับ 3.0, 3.7, 4.6, 5.7, 6.8 และ 7.8 โวลต์ ตามลำดับ รวมทั้งเพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่ามากเกินไป จนอาจส่งผลให้ระบบทางกลเกิดความเสียหาย จึงทำการเพิ่มบล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัวที่มีความชันเท่ากับ 1 และเกิดการอิ่มตัวที่แรงดัน 8.0 โวลต์ เข้าไปก่อนที่จะป้อนเข้าสู่บล็อก $k_1G(s)$ ซึ่งผลตอบสนองทางเวลาเมื่อมีสัญญาณรบกวน

ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาจากรูปพบว่า ที่ทุกระดับอินพุต ตัวชดเชยที่ออกแบบไว้สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ โดยที่ไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองทางเวลาของเอาต์พุตเมื่อมีการรบกวนระบบ

4.4 การอนุวัตตัวชดเชยด้วยเทคโนโลยีแอนะลอก

การอนุวัตตัวชดเชยแบบแอนะลอกมีรากฐานมาจากการสังเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นโครงข่ายแบบพาสซีฟ (passive network) ที่มีชิ้นส่วนพาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ เป็นส่วนประกอบในการสร้าง และโครงข่ายแบบแอกทีฟ (active network) ที่มีองค์ประกอบเป็น ออปแอมป์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ในการอนุวัตตัวชดเชย การอนุวัตแบบแอกทีฟ จะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์มากกว่าแบบพาสซีฟ (สราวุฒิ สุจิตจร, 2541) ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

- กระบวนการในการออกแบบที่ง่ายกว่า
- มีขนาดเล็กและน้ำหนักที่เบา
- เหมาะสำหรับการใช้งานที่มีพิสัยการทำงานเชิงความถี่ตามปกติที่ไม่เกิน 200-300 กิโลเฮิรตซ์

คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องพิจารณาเพื่อที่จะสามารถนำไปอนุวัตเป็นตัวชดเชย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- เป็นฟังก์ชันที่สมจริง (rational function) ของ s ที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นค่าจริง

- โพลและซีโรที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน จะต้องเป็นแบบคู่สังยุกต์ (conjugate pair)

- ต้องไม่มีโพลปรากฏทางฝั่งขวาของระนาบ-เอส

- หากปรากฏโพลบนแกน jω จะต้องไม่เป็นโพลที่ซ้ำกัน

ส่วนค่าซีโรสามารถอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้ในระนาบ-เอส นอกจากนี้ในการอนุวัตตัวชดเชยยังต้องคำนึงถึงผลจากความไม่สมบูรณ์แบบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ความไม่แน่นอนของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ปัญหาด้านสัญญาณรบกวน สลูว์เลต (slew rate) ของออปแอมป์ ความไว (sensitivity) ของสมรรถนะที่มีต่อผลคูณเกน-แบนวิดท์ (gain-bandwidth product) ที่ส่งผลต่อการจำกัดแบนวิดท์การทำงานของตัวชดเชย (Daryanani, 1976)

การอนุวัตตัวชดเชยด้วยวิธีการสังเคราะห์โครงข่ายแบบแอกทีฟสามารถทำได้หลายรูปแบบเช่น รูปแบบออปแอมป์ตัวเดียวที่ป้อนกลับแบบบวก (positive feedback single op-amp) ออปแอมป์ตัวเดียวที่ป้อนกลับแบบลบ (negative feedback single op-amp) ไบควอดแบบขยายหลายย่าน (multiple-amplifier biquad) หรือเรียกอีกอย่างว่า โครงสร้างออปแอมป์ 3 ตัว (three op-amp structure) และโครงสร้างบันได LC (LC ladder structure) หรือเรียกอีกอย่างว่าโครงสร้างแบบคู่ควบ (coupled structure) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกัน พบว่า โครงสร้างบันได LC เหมาะสมกับการอนุวัตทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่อันดับสูงกว่า 8 แต่การจูนค่าพารามิเตอร์จะยากเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ มีการต่อคู่ควบกันอยู่ตลอดเวลา และเมื่อพิจารณาระหว่างวงจรที่ใช้ออปแอมป์ตัวเดียว และวงจรไบควอด พบว่า วงจรแบบไบควอด จะมีข้อดีมากกว่าหลายประการดังนี้

- สามารถใช้กับการอนุวัตตัวชดเชยหรือตัวกรองความถี่ได้ทุกรูปแบบ รวมทั้งที่ต้องการค่า Q สูงๆ ด้วย (Q > 5)

- จูนได้ง่าย แม้ว่านำมาต่อพ่วงกันหลายระยะ

- มีความไวต่ำต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจร

- การออกแบบ จะทำการกำหนดค่าตัวเก็บประจุ และทำการปรับค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวต้านทานเท่านั้น

- สามารถสร้างได้ง่าย ด้วยอุปกรณ์ที่มีราคาถูก ขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา

จากที่กล่าวมา จะทำการเลือกแนวทางการอนุวัตตัวชดเชยด้วยรูปแบบไบควอด และนำเสนอรายละเอียดของการอนุวัตพร้อมทั้งผลจากการออกแบบในหัวข้อต่อไป

4.5 การอนุวัตตัวชดเชยตามรูปแบบไบควอด

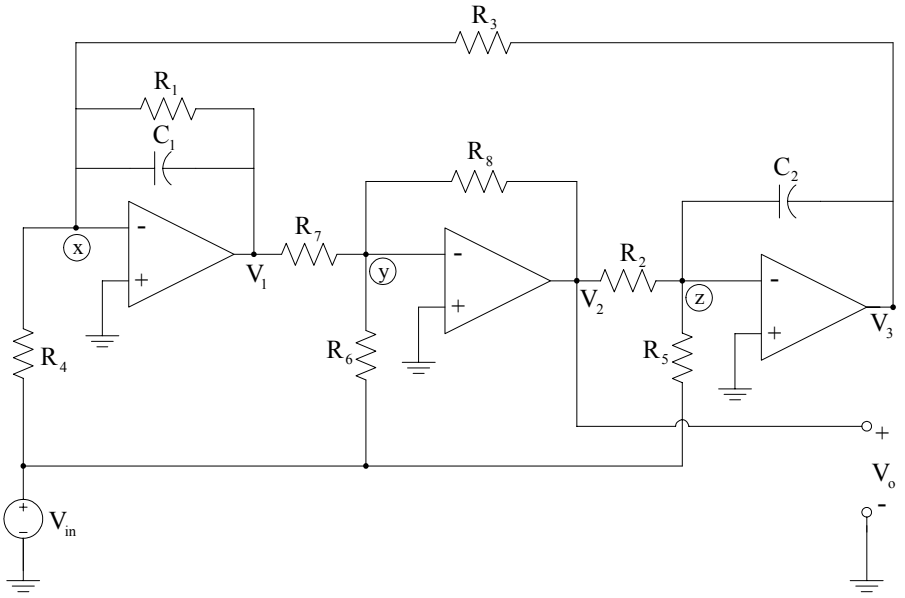
การอนุวัตตัวชดเชยตามรูปแบบไบควอด จะมีรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีกำลังสองทั้งเศษและส่วน แสดงดังสมการที่ (4-30) ซึ่งสามารถอนุวัตได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างหลักเป็น

ออปแอมป์ 3 ตัว ซึ่งแบ่งวิธีการอนุวัตเป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้

$$T(s)=A\frac{s^2+cs+d}{s^2+as+b} \tag{4-30}$$

1) ไบควอดตัวแปรสถานะ (state-variable biquad)

การอนุวัตจะอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (สราวุฒิ สุจิตจร, 2541) และสามารถวิเคราะห์วงจรดังกล่าวโดยอาศัยการวิเคราะห์แบบโนด ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.14 การอนุวัตด้วยวงจรไบควอดตัวแปรสถานะ

สมการโนด x : $$-\left(\frac{1}{R_1}+sC_1\right)V_1-\frac{1}{R_3}V_3=\frac{1}{R_4}V_{in} \tag{4-31}$$

สมการโนด y : $$-\frac{1}{R_7}V_1-\frac{1}{R_8}V_2=\frac{1}{R_6}V_{in} \tag{4-32}$$

สมการโนด z : $$-\frac{1}{R_2}V_2-sC_2V_3=\frac{1}{R_5}V_{in} \tag{4-33}$$

จัดรูปสมการที่ (4-31)-(4-33) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-34)

$$[\mathbf{Z}][\mathbf{V}] = [\mathbf{B}]V_{in} \tag{4-34}$$

โดยที่

$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_1} + sC_1\right) & 0 & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_7} & -\frac{1}{R_8} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & -sC_2 \end{bmatrix} \quad , \quad [\mathbf{V}] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad [\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_4} \\ \frac{1}{R_6} \\ \frac{1}{R_5} \end{bmatrix}$$

จะได้

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{V_2(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\begin{vmatrix} -\left(\frac{1}{R_1} + sC_1\right) & \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_7} & \frac{1}{R_6} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_5} & -sC_2 \end{vmatrix}}{\det(\mathbf{Z})}$$

$$= \frac{\frac{C_1C_2}{R_6}\left[s^2 + s\left(\frac{1}{R_1C_1} - \frac{1}{R_4C_1}\frac{R_6}{R_7}\right) + \frac{R_6}{R_7}\frac{1}{R_3R_5C_1C_2}\right]}{\det(\mathbf{Z})}$$

โดยที่

$$\det(\mathbf{Z}) = -\frac{C_1C_2}{R_8}\left[s^2 + \frac{s}{R_1C_1} + \frac{R_8}{R_7}\frac{1}{R_2R_3C_1C_2}\right]$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรไบควอดเป็นดังสมการที่ (4-35)

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \left(-\frac{R_8}{R_6}\right)\frac{s^2 + s\left(\frac{1}{R_1C_1} - \frac{1}{R_4C_1}\frac{R_6}{R_7}\right) + \frac{R_6}{R_7}\frac{1}{R_3R_5C_1C_2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_1C_1}\right) + \frac{R_8}{R_7}\frac{1}{R_2R_3C_1C_2}} \tag{4-35}$$

กำหนดให้ขนาดของความต้านทานและตัวเก็บประจุบางตัวเป็นดังนี้

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ F} \quad \text{และ} \quad R_2 = R_3 = R_7 = R_8 = R$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (4-30) และ (4-35) โดยละความสำคัญของเครื่องหมายลบที่ปรากฏ ในสมการดังกล่าว จะพบว่า ค่าความต้านทานภายในวงจรแต่ละตัวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4-36)-(4-40) ตามลำดับ

$$R_1 = \frac{1}{a} \tag{4-36}$$

$$R_2 = R_3 = R_7 = R_8 = \frac{1}{\sqrt{b}} \tag{4-37}$$

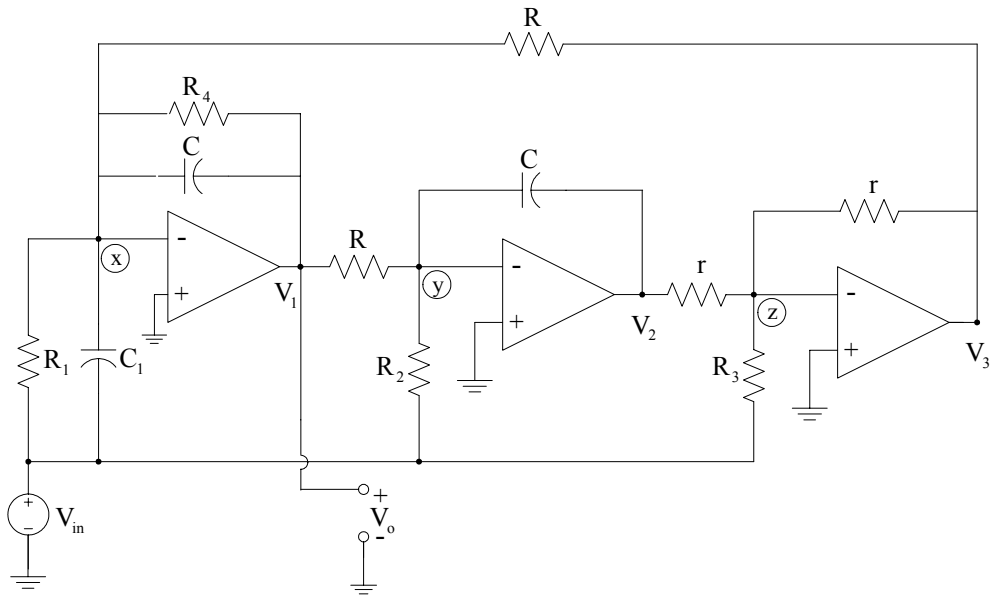
$$R_4 = \frac{1}{A(a - c)} \tag{4-38}$$

$$R_5 = \frac{\sqrt{b}}{Ad} \tag{4-39}$$

$$R_6 = \frac{1}{A\sqrt{b}} \tag{4-40}$$

2) ไบควอดโท-โทมัส (Tow-Thomas biquad)

การอนุวัตด้วยวิธีไบควอดโท-โทมัส จะอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (Deliyannis, Sun, and Fidler, 1999) และสามารถวิเคราะห์วงจรดังกล่าวโดยอาศัยการวิเคราะห์แบบโนดดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.15 การอนุวัตด้วยวงจรไบควอดโท-โทมัส

สมการโนด x : $$-\left(\frac{1}{R_4}+sC\right)V_1-\frac{1}{R}V_3=\left(\frac{1}{R_1}+sC_1\right)V_{in} \tag{4-41}$$

สมการโนด y : $$-\left(\frac{1}{R}\right)V_1-sCV_2=\frac{1}{R_2}V_{in} \tag{4-42}$$

สมการโนด z : $$-\left(\frac{1}{r}\right)V_2-\left(\frac{1}{r}\right)V_3=\frac{1}{R_3}V_{in} \tag{4-43}$$

จัดสมการที่ (4-41)-(4-43) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-34) โดยที่

$$[\mathbf{Z}]=\begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_4}+sC\right) & 0 & -\frac{1}{R} \\ -\left(\frac{1}{R}\right) & -sC & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{r}\right) & -\left(\frac{1}{r}\right) \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{V}]=\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad [\mathbf{B}]=\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_1}+sC_1\right) \\ \frac{1}{R_2} \\ \frac{1}{R_3} \end{bmatrix}$$

ซึ่งจะได้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_1}{V_{in}} = \frac{\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + sC_1\right) & 0 & -\frac{1}{R} \\ \frac{1}{R_2} & -sC & 0 \\ \frac{1}{R_3} & -\left(\frac{1}{r}\right) & -\left(\frac{1}{r}\right) \end{vmatrix}}{\det(\mathbf{Z})}$$

โดยที่

$$\det(\mathbf{Z}) = -\frac{C^2}{r}\left(s^2 + \frac{1}{R_4 C}s + \frac{1}{R^2C^2}\right)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรดังรูปที่ 4.15 แสดงดังสมการที่ (4-44)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{\frac{C_1}{C}s^2 + \frac{1}{RC}\left(\frac{R}{R_1} - \frac{r}{R_3}\right)s + \frac{1}{RR_2C^2}}{s^2 + \frac{1}{R_4 C}s + \frac{1}{R^2C^2}} \qquad (4\text{-}44)$$

กำหนดค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุเป็นดังต่อไปนี้

$$C = 0.01\ \mu F, \quad R_3 = 100\ k\Omega \text{ และ } \quad r = 10\ k\Omega$$

เมื่อเปรียบเทียบเทียบสมการที่ (4-30) และ (4-44) โดยละความสำคัญของเครื่องหมายลบที่ปรากฏ จะพบว่า องค์ประกอบภายในวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ (4-45)-(4-49)

$$C_1 = AC \qquad (4\text{-}45)$$

$$R_4 = \frac{1}{aC} \qquad (4\text{-}46)$$

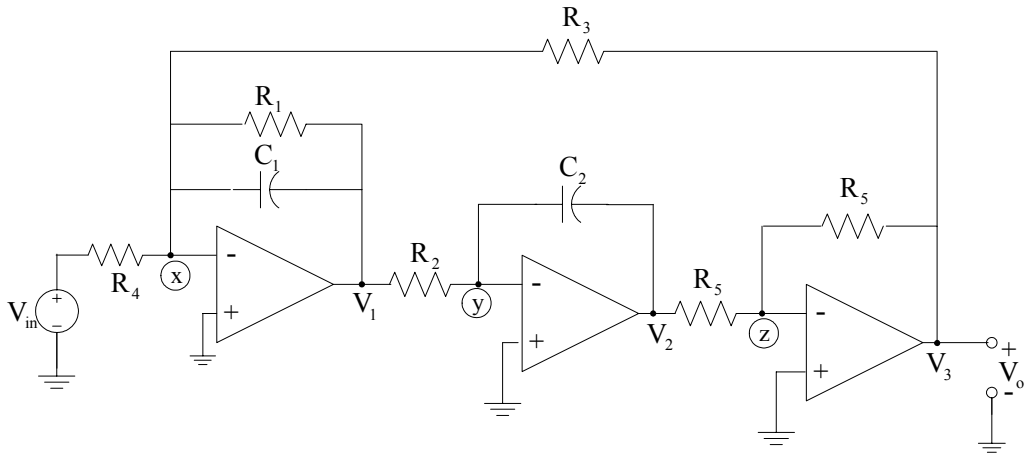
$$R = \frac{1}{\sqrt{b}C} \tag{4-47}$$

$$R_1 = \frac{R}{\frac{Ac}{\sqrt{b}} + \frac{r}{R_3}} \tag{4-48}$$

$$R_2 = \frac{1}{RC^2 d} \tag{4-49}$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีกำลังสองเฉพาะตรงที่พหุนามส่วนดังสมการที่ (4-50) การอนุวัตจะอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (Schaumann and Valkenburg, 2001)

$$T(s) = \frac{d}{s^2 + as + b} \tag{4-50}$$



รูปที่ 4-16 วงจรที่ใช้อนุวัตฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (4-50)

ซึ่งสามารถอาศัยการวิเคราะห์แบบโนด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

สมการโนด x : $$\left(\frac{1}{R_1} + sC_1\right)V_1 + \frac{1}{R_3}V_3 = \left(\frac{1}{R_4}\right)V_{in} \tag{4-51}$$

สมการโนด y : $$\left(\frac{1}{R_2}\right)V_1 - sC_2V_2 = 0 \quad (4\text{-}52)$$

สมการโนด z : $$-\left(\frac{1}{R_5}\right)V_2 - \left(\frac{1}{R_5}\right)V_3 = 0 \quad (4\text{-}53)$$

จัดสมการที่ (4-51)-(4-53) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (4-34) โดยที่

$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_1}+sC_1\right) & 0 & \frac{1}{R_3} \\ \frac{1}{R_2} & -sC_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{R_5} \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{V}] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad [\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_4} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

และจะได้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_3}{V_{in}} = \frac{\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1}+sC_1\right) & 0 & \frac{1}{R_4} \\ \frac{1}{R_2} & -sC_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_5} & 0 \end{vmatrix}}{\det(\mathbf{Z})}$$

โดยที่

$$\det(\mathbf{Z}) = \frac{C_1C_2}{R_5}\left(s^2+\frac{1}{R_1C_1}s+\frac{1}{R_2R_3C_1C_2}\right)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรดังรูปที่ 4.16 แสดงดังสมการที่ (4-54)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{R_2R_4C_1C_2}}{s^2+\frac{1}{R_1C_1}s+\frac{1}{R_2R_3C_1C_2}} \tag{4-54}$$

กำหนดให้ขนาดของความต้านทานและตัวเก็บประจุบางตัวเป็นดังนี้

$C_1 = C_2 = 1$ F และ $R_2 = R_3$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (4-50) และ (4-54) จะพบว่า ค่าความต้านทานภายในวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ (4-55)-(4-57)

$$R_1 = \frac{1}{a} \tag{4-55}$$

$$R_2 = R_3 = \frac{1}{\sqrt{b}} \tag{4-56}$$

$$R_4 = \frac{\sqrt{b}}{d} \tag{4-57}$$

จากที่กล่าวมาเป็นการอนุวัตตัวชดเชยอันดับสอง ถ้าต้องการอนุวัตตัวชดเชยที่มีอันดับสูงกว่าสอง สามารถทำได้โดยสังเคราะห์วงจรอันดับสองหรืออันดับหนึ่งหลายๆ ชุดมาเรียงต่อกัน (cascade) แสดงดังสมการที่ (4-58) ซึ่งสามารถทำแบบนี้ได้เนื่องจากอิมพีแดนซ์เอาต์พุตของวงจรอันดับสองมีค่าต่ำ เมื่อนำมาต่อเรียงกันจะไม่เกิดสภาวะการดึงพลังงานต่อกันมากนัก

$$T(s) = T_1(s)T_2(s)T_3(s) \ldots T_n(s) \tag{4-58}$$

การต่อวงจรแบบเรียงกัน มีข้อควรพิจารณาดังต่อไปนี้

1) การพิจารณาค่าพิสัยทางพลวัต (dynamic range) เพื่อให้ค่าพิสัยทางพลวัตมีค่ามาก ค่าอัตราขยายสูงสุดของวงจรสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของแต่ละวงจรย่อยควรมีค่าเท่ากับอัตราขยายสูงสุดของวงจรตัวชดเชยโดยรวม

2) การพิจารณาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio) เพื่อให้ค่านี้ของตัวชดเชยมีค่ามากที่สุด ขนาดของสัญญาณของวงจรฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรย่อยที่จะนำมาเรียงต่อกันในย่านความถี่ผ่านได้ (passband) มีความราบเรียบให้มากที่สุด และสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนให้น้อยลงได้โดยให้วงจรที่มีค่าอัตราขยายสูงๆ อยู่ในช่วงต้นๆ

3) ถ้าฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมีการจัดวางวงจรผ่านต่ำ (low-pass) หรือวงจรผ่านแถบ (bandpass) ที่ตำแหน่งอินพุตของวงจรสมบูรณ์ จะช่วยลดองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณ และช่วยหลีกเลี่ยงการเกิดสลูว์ (slewing) ในระยะถัดไปของวงจรสมบูรณ์ด้วย และถ้าจัดวางวงจรผ่านสูง (high-pass) หรือวงจรผ่านแถบ ไว้ที่จุดเอาต์พุตของวงจรสมบูรณ์ จะสามารถลดค่าดีซีออฟเซต (dc offset) หรือการกระเพื่อมในย่านความถี่ต่ำ

ดังนั้น ในการดำเนินการอนุวัตตัวชดเชยด้วยการต่อเรียงกัน โดยแบ่งเป็นวงจรย่อยที่มีรูปแบบแสดงดังแสดงในสมการที่ (4-59) และ (4-60) มีขั้นตอนการแบ่งเป็นวงจรย่อย 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ (Schaumann and Valkenburg, 2001)

$$T(s) = \prod_{j=1}^{n} k_j \frac{\alpha_{2j}s^2+\alpha_{1j}s+\alpha_{0j}}{s^2+s\omega_{0j}/Q_j+\omega_{0j}^2} = \prod_{j=1}^{n} T_j(s) \tag{4-59}$$

$$T_j(s) = k_j \frac{\alpha_{2j}s^2+\alpha_{1j}s+\alpha_{0j}}{s^2+s\omega_{0j}/Q_j+\omega_{0j}^2} = k_j t_j(s) \tag{4-60}$$

โดยที่ Q_j คือ ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) และ

ω_{0j} คือ ความถี่โพล (pole frequency)

1) การเข้าคู่กันของโพลและซีโร (pole-zero pairing)

ขั้นตอนแรกของการแบ่งตัวชดเชยที่มีอันดับสูงๆ เป็นวงจรย่อยคือ การจับคู่ของโพลและซีโร ซึ่งมีหลักการง่ายๆ คือ เลือกค่าโพลที่เป็นค่าจริงหรือคู่โพลที่อยู่ใกล้กับซีโรมากที่สุด

2) การเลือกตำแหน่งการวางของวงจรย่อย (section ordering)

เมื่อเลือกคู่โพลและซีโรได้แล้ว จะเป็นการจัดอันดับของวงจรย่อยแต่ละวงจรว่าควรจะวางไว้ที่ตำแหน่งใด โดยพิจารณาจากค่า Q_i ที่มีเงื่อนไขเป็นดังสมการที่ (4-61) คือ วงจรย่อยที่มีค่า Q น้อยที่สุดควรจะวางตำแหน่งเป็นวงจรชุดแรก ตามด้วยวงจรย่อยที่มีค่า Q ถัดลงมา และวงจรย่อยสุดท้ายจะเป็นวงจรที่มีค่า Q มากที่สุด

$$Q_1 < Q_2 < \ldots < Q_n \tag{4-61}$$

3) การเลือกค่าอัตราขยายของแต่ละวงจรย่อย (gain assignment)

ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการหาอัตราขยาย k_j ที่เหมาะสมให้กับวงจรย่อยของแต่ละวงจร ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยอาศัยสมการที่ (4-62) ถึงสมการที่ (4-64)

$$k_1 = A\frac{M_n}{M_1} \tag{4-62}$$

$$k_j = \frac{M_{j-1}}{M_j} \quad ; \quad j = 2, ..., n \tag{4-63}$$

$$M_i = \max\prod_{j=1}^{i}\left|t_j(j\omega)\right| \quad ; \quad i = 1, ..., n \tag{4-64}$$

โดยที่ A คือ อัตราขยายของตัวชดเชย

4.6 ผลการทดสอบตัวชดเชย

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการทดสอบตัวชดเชยที่ได้จากการอนุวัตตัวชดเชย โดยจะแบ่งตัวชดเชยเป็น 2 ชุด คือ G_{fn} และ G_{fbn} มีการจัดวางตำแหน่งตัวชดเชยดังรูปที่ 4.10 โดยฟังก์ชันถ่ายโอนจะแสดงดังสมการที่ (4-65) และ (4-66) ตามลำดับ

$$G_{fn} = \frac{1.251\times10^{14}s^2 + 6.883\times10^{16}s + 7.509\times10^{18}}{s^6 + 8.121\times10^{4}s^5 + 2.281\times10^{9}s^4 + 8.706\times10^{12}s^3 + 5.492\times10^{15}s^2 + 3.222\times10^{17}s + 4.603\times10^{18}} \tag{4-65}$$

$$G_{fbn} = \frac{3.503\times10^{5}s^6 + 9.584\times10^{8}s^5 + 7.466\times10^{11}s^4 + 2.393\times10^{14}s^3 + 3.266\times10^{16}s^2 + 1.624\times10^{18}s + 7.467\times10^{18}}{s^6 + 8.121\times10^{4}s^5 + 2.281\times10^{9}s^4 + 8.706\times10^{12}s^3 + 5.492\times10^{15}s^2 + 3.222\times10^{17}s + 4.603\times10^{18}} \tag{4-66}$$

โดยเมื่อดำเนินการแบ่งฟังก์ชันถ่ายโอนให้เป็นอันดับสองจำนวนสามชุดมาเรียงต่อกันโดยอาศัยขั้นตอนดังที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว จะได้การจัดเรียงฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังสมการที่ (4-67) ถึง (4-68)

$$G_{fn} = \frac{2.642\times10^{4}}{s^{2}+730.3s+1.62\times10^{4}} \times \frac{1.942\times10^{9}}{s^{2}+7.684\times10^{4}s+1.942\times10^{9}} \times \frac{2.439(s^{2}+550s+6\times10^{4})}{s^{2}+3641s+1.463\times10^{5}}$$

$$= G_{fn1}G_{fn2}G_{fn3} \qquad (4\text{-}67)$$

$$G_{fbn} = \frac{2.2(s^{2}+115.9s+565.1)}{s^{2}+730.3s+1.62\times10^{4}} \times 25 \times \frac{18(s^{2}+2.037\times10^{3}s+6.287\times10^{5})}{s^{2}+7.684\times10^{4}s+1.942\times10^{9}} \times 145.07 \times \frac{2.439(s^{2}+550s+6\times10^{4})}{s^{2}+3641s+1.463\times10^{5}}$$

$$= G_{fbn1} \times 25 \times G_{fbn2} \times 145.07 \times G_{fbn3} \qquad (4\text{-}68)$$

- ชุด G_{fn}

อันดับแรก พิจารณาชุด G_{fn1} ซึ่งอนุวัตตามวงจรรูปที่ 4.16 ที่ดำเนินการตามสมการที่ (4-55) ถึงสมการที่ (4-57) จะได้ขนาดของตัวเก็บประจุและความต้านทานเป็นดังต่อไปนี้

$C_1 = C_2 = 1$ F

$R_1 = 1.37\times10^{-3}$ Ω

$R_2 = R_3 = 7.857\times10^{-3}$ Ω

$R_4 = 4.818\times10^{-3}$ Ω

ทำการปรับสัดส่วนขนาดของอิลิเมนต์ (impedance scaling) ด้วยค่า 10^{7} จะได้อิลิเมนต์ที่มีขนาดสมจริงเป็นดังนี้

$C_1 = C_2 = 0.1$ μF

$R_1 = 13.7$ kΩ

$R_2 = R_3 = 78.57$ kΩ

$R_4 = 48.18$ kΩ

อันดับต่อมาพิจารณาชุด G_{fn2} ซึ่งอนุวัตตามวงจรรูปที่ 4.16 ที่ดำเนินการตามสมการที่ (4-55) (4-56) และ (4-57) และทำการปรับสัดส่วนขนาดของอิลิเมนต์ (impedance scaling) ด้วยค่า 10^{8} จะได้อิลิเมนต์ที่มีขนาดสมจริงเป็นดังนี้

$C_1 = C_2 = 0.01$ μF

$R_1 = 1.3$ kΩ

$R_2 = R_3 = 2.27$ kΩ

$R_4 = 2.27\ k\Omega$

อันดับสุดท้าย พิจารณาชุด G_{fn3} ซึ่งอนุวัตตามวงจรรูปที่ 4.14 ที่ดำเนินการตามสมการที่ (4-36)-(4-40) และทำการปรับสัดส่วนขนาดของอิลิเมนต์ (impedance scaling) ด้วยค่า 10^7 จะได้อิลิเมนต์ที่มีขนาดสมจริงที่แสดงดังรูปที่ 4.14 เป็นดังนี้

$C_1 = C_2 = 0.1\ \mu F$

$R_1 = 2.75\ k\Omega$

$R_2 = R_3 = R_7 = R_8 = 26.14\ k\Omega$

$R_4 = 1.33\ k\Omega$

$R_5 = 26.14\ k\Omega$

$R_6 = 10.72\ k\Omega$

- ชุด G_{fbn}

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน G_{fbn1} ซึ่งอนุวัตตามวงจรดังรูปที่ 4.14 ที่ดำเนินการตามสมการที่ (4-36)-(4-40) และทำการปรับสัดส่วนขนาดของอิลิเมนต์ (impedance scaling) ด้วยค่า 10^7 จะได้อิลิเมนต์ที่มีขนาดสมจริงเป็นดังนี้

$C_1 = C_2 = 0.1\ \mu F$

$R_1 = 13.7\ k\Omega$

$R_2 = R_3 = R_7 = R_8 = 78.6\ k\Omega$

$R_4 = 7.4\ k\Omega$

$R_5 = 1.02\ M\Omega$

$R_6 = 35.7\ k\Omega$

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน G_{fbn2} ซึ่งอนุวัตตามวงจรดังรูปที่ 4.15 ที่ดำเนินการตามสมการที่ (4-45)-(4-49) และทำการปรับสัดส่วนขนาดของอิลิเมนต์ (impedance scaling) ด้วยค่า 10^7 จะได้อิลิเมนต์ที่มีขนาดสมจริงเป็นดังนี้

$C_1 = 0.18\ \mu F$

$C = 0.01\ \mu F$

$R_4 = 1.3\ k\Omega$

$R = 2.27\ k\Omega$

$R_1 = 2.43\ k\Omega$

$R_2 = 389.3\ k\Omega$

ส่วน G_{fbn3} จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนเหมือนกับชุด G_{fn3} ดังนั้นวงจรจะใช้แบบเดียวกับที่ได้อธิบายรายละเอียดไปก่อนหน้านี้แล้ว หลังจากที่ทำการออกแบบวงจรอิเลกทรอนิกส์แล้วสามารถแสดงวงจรตัวชดเชย G_{fn} และ G_{fbn} ได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ จึงดำเนินการทดสอบวงจรที่ได้สร้างขึ้นโดยแบ่งการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

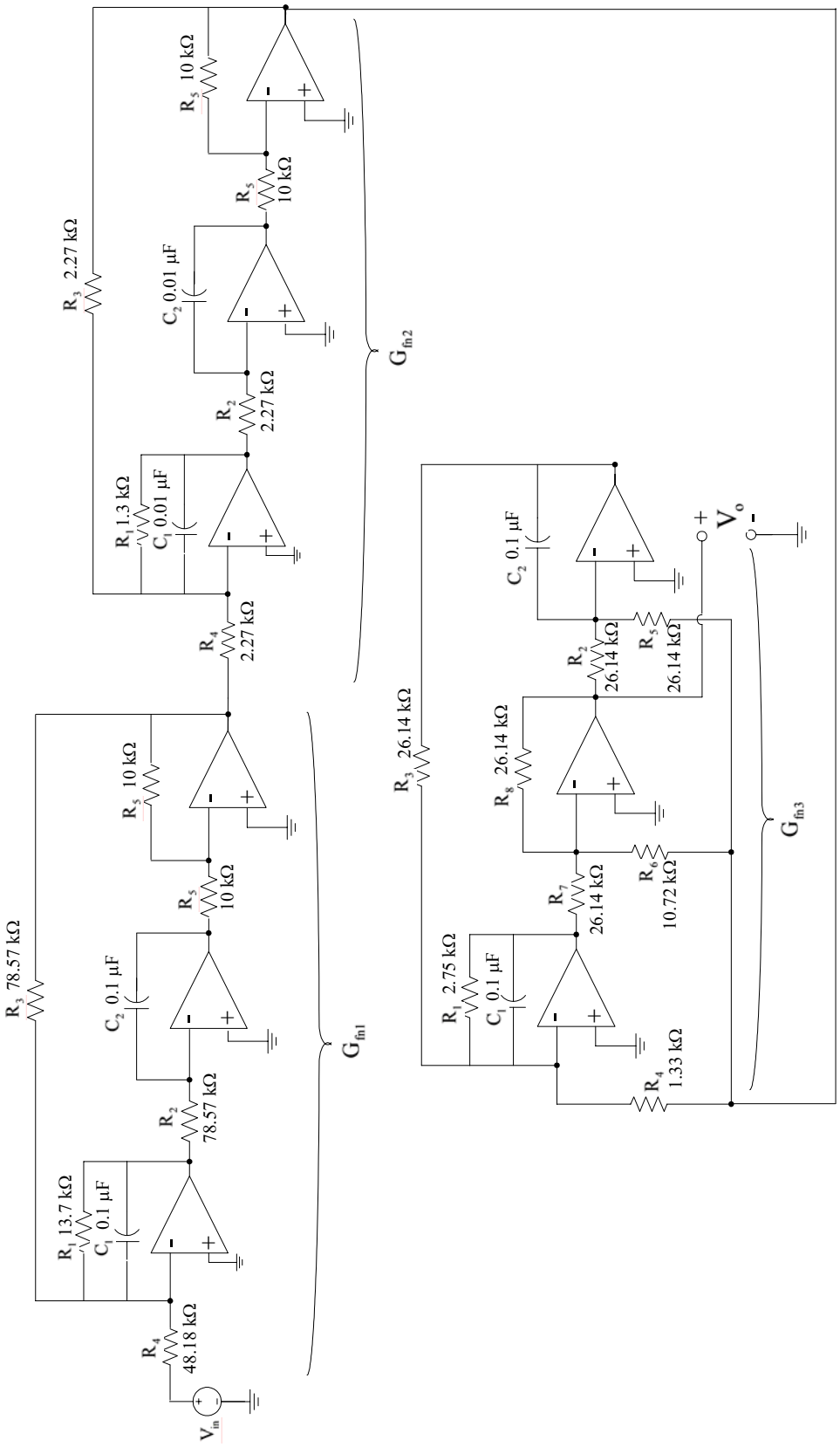
1) ดำเนินการทดสอบชุด G_{fbn1}

การทดสอบตัวชดเชย G_{fbn1} จะทำโดยการป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดขนาด 3.4 โวลต์ แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองตัวชดเชย G_{fbn1} แสดงผลดังรูปที่ 4.19 ซึ่งพบว่าผลของตัวชดเชยเป็นไปตามที่ตัวชดเชยที่ได้ออกแบบไว้

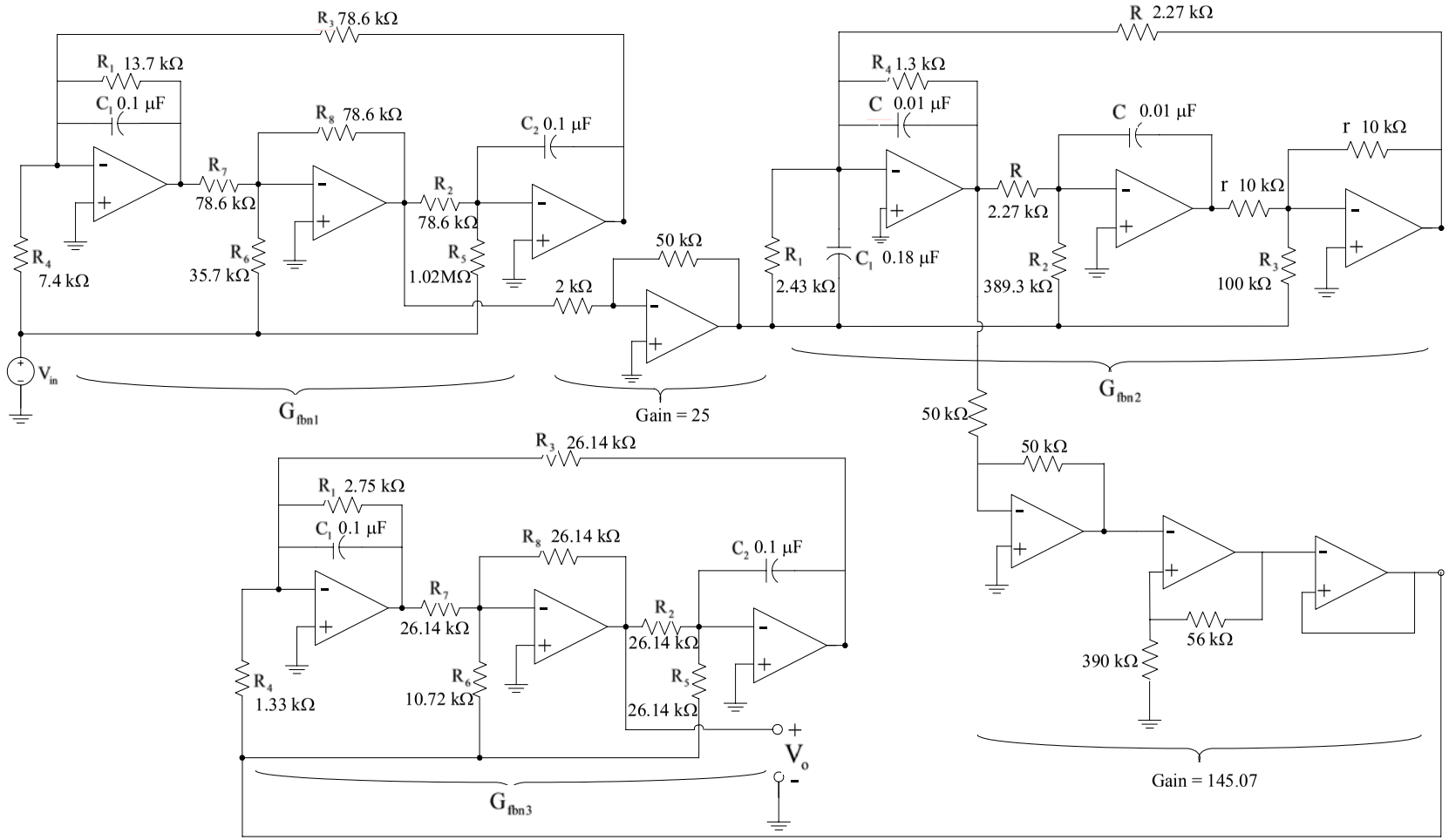
2) ดำเนินการทดสอบชุด $G_{fbn1}\times 25\times G_{fbn2}\times 145.07$

ผลการทดสอบตัวชดเชย $G_{fbn1}\times 25\times G_{fbn2}\times 145.07$ โดยป้อนอินพุตเป็นแบบขั้นบันไดขนาด 3.3 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.20 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบดังกล่าวพบว่ามีสัญญาณรบกวนจำนวนมากปรากฏที่ผลการทดสอบตัวชดเชย ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

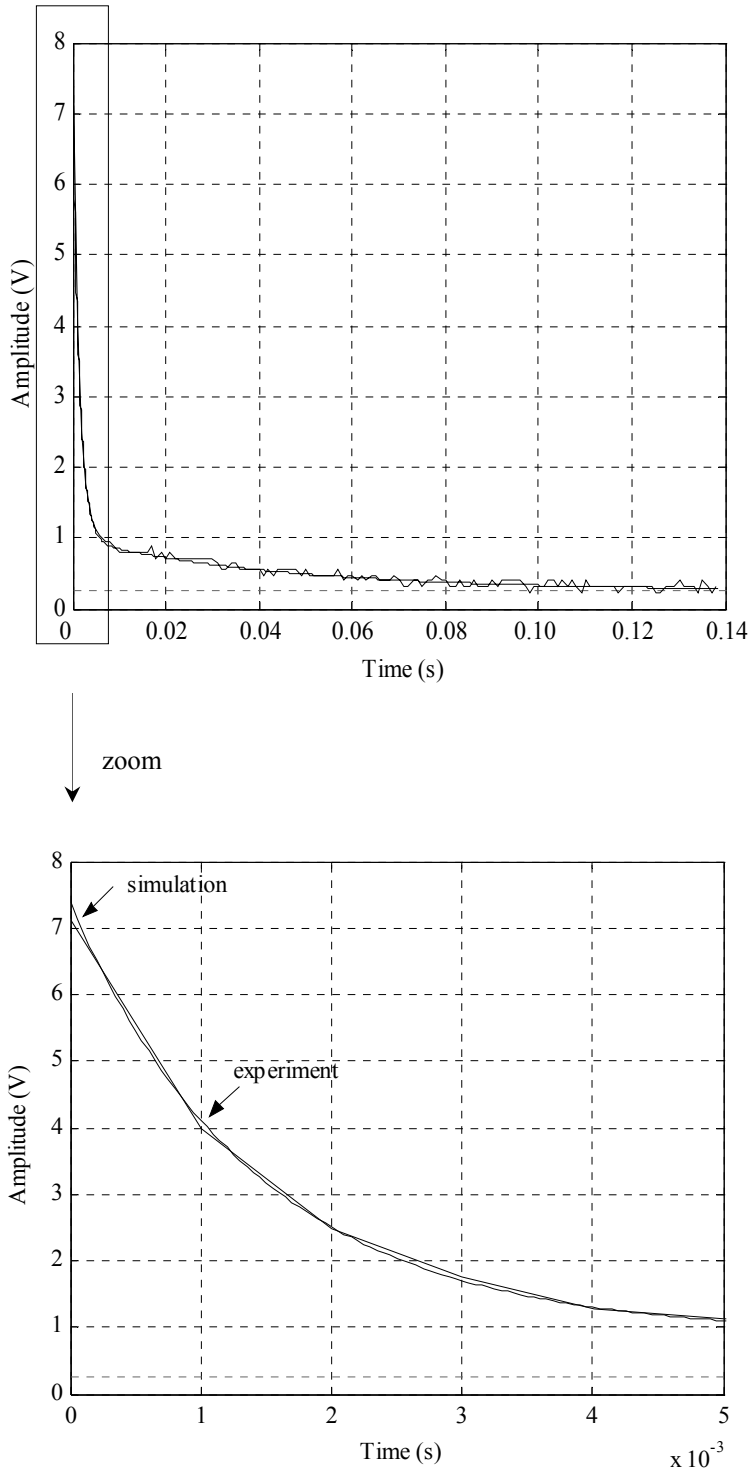
ขนาดอินพุตที่ป้อนเข้าตัวชดเชยชุดนี้มีค่าเท่ากับ 3.3 โวลต์ เมื่อป้อนเข้าชุดแรก $G_{fbn1}\times 25$ จะได้เอาต์พุตที่ออกจากชุดแรกเท่ากับ 6.24 โวลต์ เพื่อป้อนเข้าชุด G_{fbn2} ที่มีอัตราขยายสัญญาณกระแสตรง (dc gain) เท่ากับ 0.00583 ซึ่งเอาต์พุตที่ออกจากชุด G_{fbn2} มีค่าประมาณ 40 มิลลิโวลต์ จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าเอาต์พุตที่ได้มีค่าต่ำ ดังนั้นสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (ground noise) จึงอาจส่งผลกระทบต่อสัญญาณเอาต์พุต และเมื่อสัญญาณเอาต์พุตดังกล่าวถูกขยายสัญญาณด้วยค่าอัตราขยายคืออัตราขยาย 145.07 เท่า ส่งผลให้ขนาดของสัญญาณรบกวนถูกขยายขึ้นด้วยดังปรากฏในรูปที่ 4.20 ดังนั้น ปัญหาในการอนุวัตจึงขึ้นอยู่กับตัวชดเชยชุด G_{fbn2} ซึ่งมีค่าอัตราขยายสัญญาณกระแสตรงที่ต่ำมาก จึงได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม pspice โดยทำการเพิ่มค่าอัตราขยายของตัวชดเชย G_{fbn2} พบว่า ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีค่าแตกต่างไปจากสัญญาณเอาต์พุตจริงที่ได้จากการออกแบบตัวชดเชย ทั้งนี้เนื่องจากวงจรไบควอดที่ได้รับการอนุวัตขึ้นประกอบด้วยออปแอมป์ ซึ่งเอาต์พุตที่ออกจากออปแอมป์จะมีขอบเขตจำกัด หากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการขยายสัญญาณของออปแอมป์มีขนาดเกินขอบเขตดังกล่าว จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการอิ่มตัว (saturation) ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวชดเชยมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ดังนั้นการปรับค่าอัตราขยายของตัวชดเชย G_{fbn2} เพิ่มขึ้นจึงไม่เหมาะกับการนำไปอนุวัตเป็นตัวชดเชยสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ จากที่กล่าวมา จึงไม่สามารถนำตัวชดเชยที่อนุวัตขึ้นไปใช้ในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล



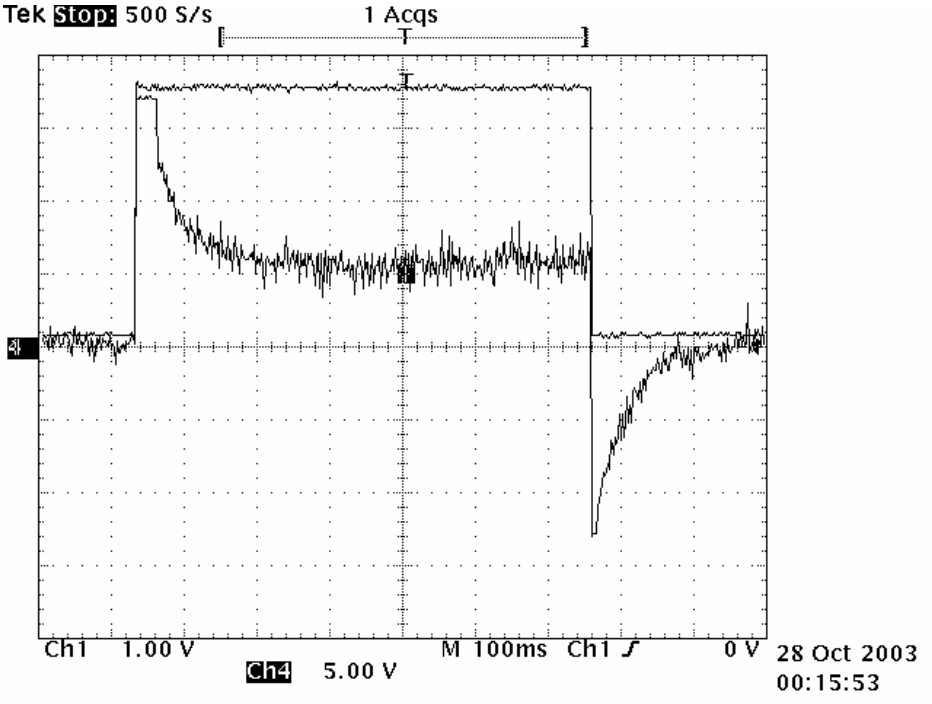
รูปที่ 4.17 วงจรอนุวัตของตัวชดเชย G_{fn}



รูปที่ 4.18 วงจรอนุวัตของตัวชดเชย G_{fbn}



รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองทางเวลาของตัวชดเชย G_{fbn1} จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบตัวชดเชย $G_{fbn1}\times 25\times G_{fbn2}\times 145.07$

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธี CDM จากการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีตัวชดเชยตามวิธี CDM ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาผลตอบสนองของระบบเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดตลอดย่านการทำงาน จะพบว่า เมื่อพิจารณาทางโดเมนเวลาระบบสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดได้ รวมทั้งให้ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เป็นที่พึงพอใจ เมื่อพิจารณาทางโดเมนความถี่ ระบบที่ชดเชยแล้วไม่ปรากฏสภาวะรีโซแนนซ์ และตัวชดเชยที่ออกแบบยังมีความสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนเมื่อมีการรบกวนระบบจากภายนอกได้ พร้อมทั้งดำเนินการอนุวัตตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคการอนุวัตแบบแอนะลอก ซึ่งผลจากการทดสอบตัวชดเชยที่สร้างขึ้นสามารถสรุปได้ว่าตัวชดเชยที่สร้างขึ้นไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล เพราะตัวชดเชยที่สร้างขึ้นจะมีสัญญาณรบกวนจำนวนมากเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงนำเสนอแนวทางการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิด ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 5
การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก

5.1 บทนำ

หลังจากที่ได้ดำเนินการออกแบบตัวชดเชยเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลด้วยรูปแบบต่างๆ ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบตัวชดเชย PI, PID, PIDA และวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) รวมถึงวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ จากการดำเนินการออกแบบและจำลองสถานการณ์ตัวชดเชยแบบต่างๆ ที่กล่าวถึง พบว่า วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะให้ผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่เป็นที่น่าพึงพอใจมากกว่าตัวชดเชยรูปแบบอื่นๆ ดังนั้นจึงได้นำตัวชดเชยดังกล่าวมาออกแบบและอนุวัตด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล แต่ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยดังกล่าวไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทดสอบตัวชดเชยที่อนุวัตขึ้นจะมีสัญญาณรบกวน (noise) ปรากฏอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงได้ดำเนินการออกแบบตัวชดเชยในอีกรูปแบบหนึ่งที่เรียกว่า วงจรกรองแบบช่องบาก (notch filter) ซึ่งมีโครงสร้างและวิธีการออกแบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก ในการอนุวัตตัวชดเชยด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะดำเนินการตามรูปแบบไบควอดตัวแปรสถานะ ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับต่อไป ทั้งนี้จะพิจารณาความสามารถของตัวชดเชยวงจรกรองแบบช่องบากในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลด้วย

เนื้อหาในบทนี้ กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก ผลการจำลองสถานการณ์ระบบคู่ควบเชิงกลที่มีตัวชดเชยดังกล่าว โดยดำเนินการพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ จากนั้นจึงอนุวัตตัวชดเชยที่ได้ออกแบบขึ้นด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในการดำเนินการอนุวัตดังกล่าวได้ทำการทดสอบวงจรกรองแบบช่องบาก และทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลที่ได้รับการชดเชยด้วยวงจรที่กล่าวถึง จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ นอกจากนี้ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่มากระทำต่อระบบ และเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบ รวมทั้งดำเนินการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบหลังจากที่ชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก

5.2 การใช้วงจรกรองแบบช่องบาก

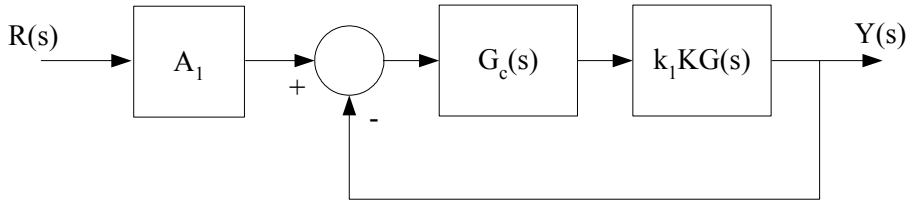
5.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองแบบช่องบาก

โครงสร้างของระบบที่มีตัวชดเชยเป็นวงจรกรองแบบช่องบาก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย $G_c(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (5-1)

$$G_c(s) = \frac{s^2+2\zeta_z\omega_n s+\omega_n^2}{s^2+2\zeta_p\omega_n s+\omega_n^2} \tag{5-1}$$

เมื่อ ω_n คือ ความถี่รีโซแนนซ์ และความสัมพันธ์ระหว่าง ζ_z และ ζ_p (ชัชชัย อุทัยวสิน, 2543) เป็นดังสมการที่ (5-2)

$$\zeta_p = \frac{1+2\zeta_z^2}{2\zeta_z} \tag{5-2}$$



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบช่องบาก

โดยที่ $R(s)$ คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง

$Y(s)$ คือ สัญญาณเอาต์พุต

$G(s)$ คือ แบบจำลองของระบบ

$G_c(s)$ คือ ตัวชดเชยที่ได้จากวงจรกรองแบบช่องบาก

A_1 คือ ตัวชดเชยที่อยู่ในรูปอัตราขยายเพื่อการตามรอยอินพุต (tracking)

k_1 คือ ตัวปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ที่ได้จากบทที่ 2

K คือ ตัวลดทอนระดับสัญญาณของการวัด ที่ได้จากบทที่ 2

การออกแบบตัวชดเชยวงจรกรองแบบช่องบากจะทำการเลือกพหุนามเศษของ $G_c(s)$ ก่อน โดยอาศัยเทคนิคการตัดทอนโพล-ซีโร (pole-zero cancellation) จากนั้นจึงทำการหาค่า ζ_p จากความ สัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (5-2) เพื่อแทนค่าหาตัวส่วนของ $G_c(s)$

5.2.2 การออกแบบวงจรกรองแบบช่องบาก

เมื่อพิจารณาพหุนามส่วนของแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (5-3) และสามารถแยกตัวประกอบได้ดังสมการที่ (5-4)

$$D(s) = s^5+281.1s^4+4.12\times10^5s^3+4.17\times10^7s^2+3.69\times10^{10}s+1.28\times10^{11} \quad (5\text{-}3)$$

$$D(s) = (s+3.49)(s+9.53\pm368.4j)(s+129.3\pm503.8j) \quad (5\text{-}4)$$

ในการออกแบบตัวชดเชยจะกำหนดค่าซีโรของวงจรกรองแบบช่องบาก ให้มีค่าดังสมการที่ (5-5) และสามารถคำนวณหาค่า ω_n , ζ_z และ ζ_p ได้จากสมการที่ (5-6)-(5-8) ตามลำดับ

$$G_c(s) = \frac{s^2+22s+1.36\times10^5}{s^2+2\zeta_p\omega_n s+\omega_n^2} \quad (5\text{-}5)$$

$$\omega_n = 368.4 \quad (5\text{-}6)$$

$$\zeta_z = \frac{22}{2\omega_n} = 0.03 \quad (5\text{-}7)$$

$$\zeta_p = \frac{1+2\zeta_z^2}{2\zeta_z} = 16.76 \quad (5\text{-}8)$$

ดังนั้น จะได้ตัวชดเชย $G_c(s)$ ดังแสดงในสมการที่ (5-9) หรือสมการที่ (5-10) และ A_1 ที่ปรากฏในรูปที่ 5.1 จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 เพื่อวัตถุประสงค์ในการตามรอยอินพุต กล่าวคือต้องการให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต

$$G_c(s) = \frac{s^2+22s+1.36\times10^5}{s^2+1.24\times10^4s+1.36\times10^5} \quad (5\text{-}9)$$

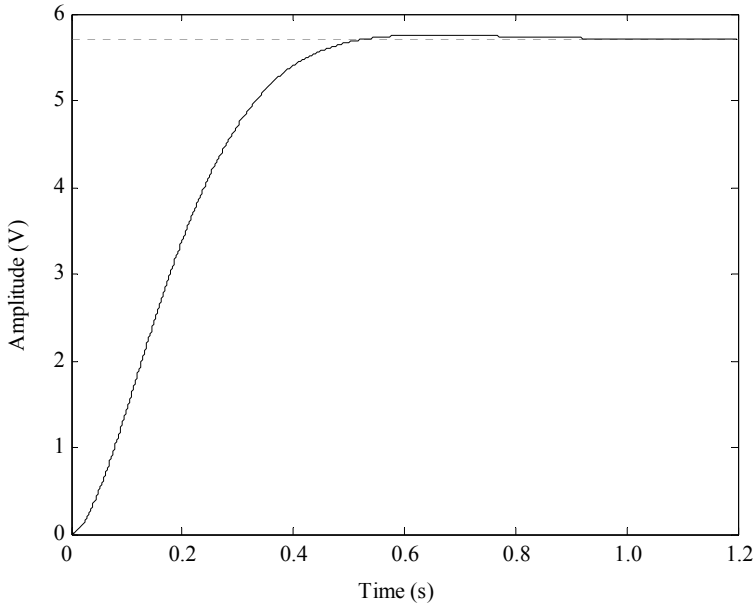
$$G_c(s) = \frac{(s+11\pm368j)}{(s+11)(s+1.24\times10^4)} \quad (5\text{-}10)$$

5.3 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก

เมื่อพิจารณาตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบดังสมการที่ (5-10) สังเกตเห็นว่ามีโพลจำนวน 1 ตัวที่อยู่ห่างจากซีโรของตัวชดเชยไกลมาก ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการอนุวัตตัวชดเชยด้วยวงจรไบควอดตัวแปรสถานะ กล่าวคือ จะทำให้ค่าเอาต์พุตที่สถานะอยู่ตัวของวงจรไบควอดตัวแปรสถานะมีค่าผิดเพี้ยนไปจากตัวชดเชยที่ได้ออกแบบตามสมการที่ (5-10) เนื่องจากเมื่ออนุวัตตัวชดเชยจะเกิดปรากฏการณ์อิ่มตัวของออปแอมป์เกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำการย้ายตำแหน่งโพลจากเดิมที่ -1.24×10^{4} ไปยังตำแหน่งที่ -200 พร้อมทั้งทำการปรับค่าอัตราขยายกระแสตรง (dc gain) ให้มีค่าเท่ากับค่าอัตราขยายกระแสตรงของสมการที่ (5-10) ซึ่งมีค่าเป็นหนึ่ง ดังนั้นจะได้ตัวชดเชยใหม่แสดงได้ดังสมการที่ (5-11) และต่อจากนี้เป็นต้นไป ถ้ากล่าวถึงตัวชดเชย $G_c(s)$ จะหมายถึงตัวชดเชยวงจรกรองแบบช่องบากที่แสดงดังสมการที่ (5-11)

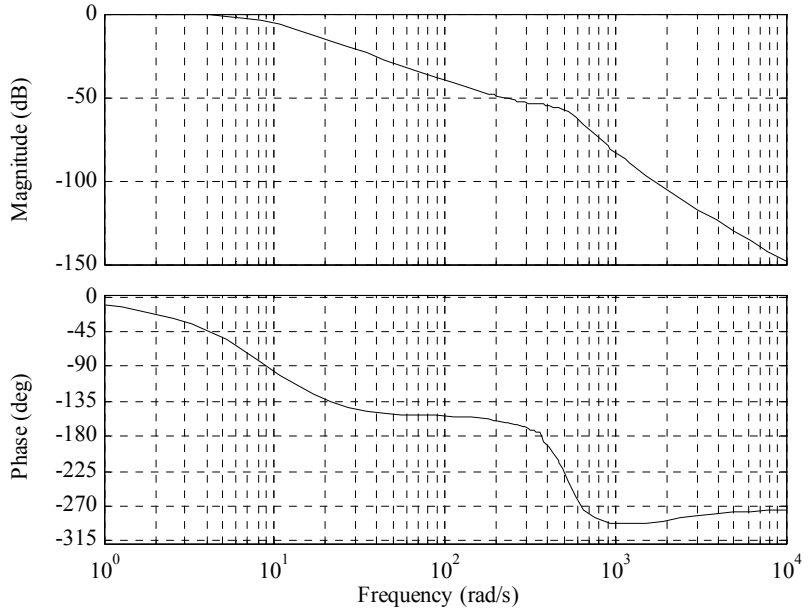
$$G_c(s) = \frac{0.0162s^2+0.356s+2194}{s^2+211s+2194} \tag{5-11}$$

การจำลองระบบเพื่อดูผลตอบสนองทางเวลาจะดำเนินการที่อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์ โดยที่ k_1 และ K เท่ากับ 1 และ 0.365 ตามลำดับ ผลตอบสนองที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่ารีโซแนนซ์การบิดถูกกำจัดไป และช่วงเวลาขึ้นเท่ากับ 0.3 วินาที ช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 0.46 วินาที และเกิดเปอร์เซ็นต์ของการพุ่งเกินเท่ากับ 0.82%

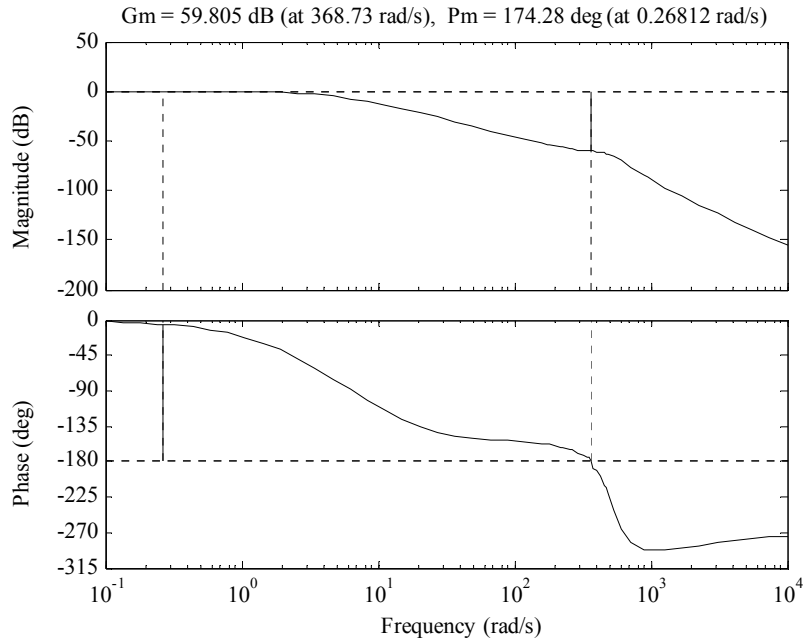


รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบช่องบาก

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิดที่แสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่า ระบบจะไม่เกิดรีโซแนนซ์ และมีแบนวิดท์กว้างถึง 7.21 เรเดียนต่อวินาที เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่



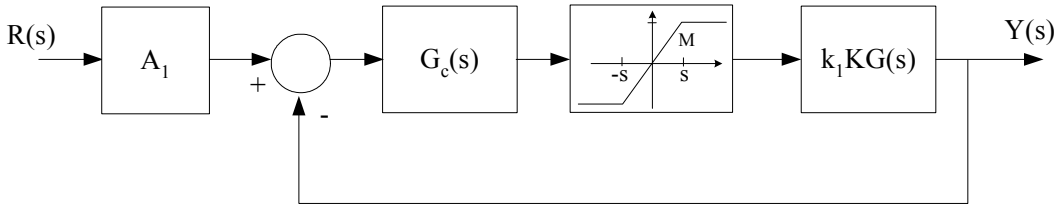
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิดที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก



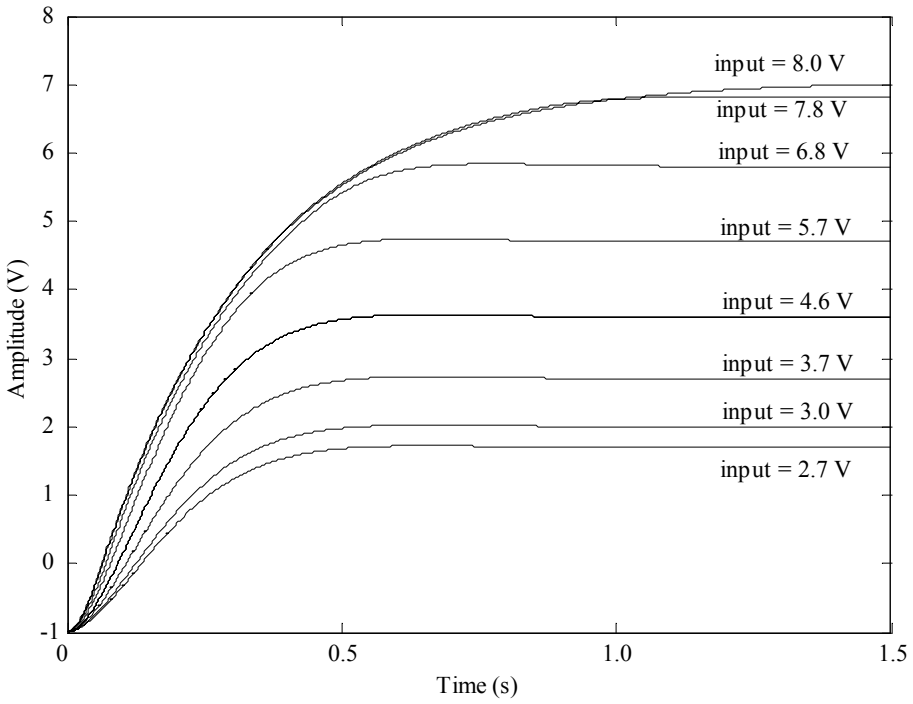
รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก

ของระบบวงเปิดดังแสดงในรูปที่ 5.4 พบว่าระบบที่ใช้วงจรกรองแบบช่องบากมีส่วนเผื่ออัตราขยายเท่ากับ 59.81 เดซิเบล และส่วนเผื่อเฟสเท่ากับ 174.28 องศา ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกให้ทราบว่าระบบที่ได้รับการชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบากมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

จากโครงสร้างของระบบที่มีตัวชดเชยดังรูปที่ 5.1 จะเพิ่มลักษณะเฉพาะที่แสดงความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว (saturation) เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่ามากเกินไป จนอาจส่งผลให้ระบบทางกลเกิดความเสียหายได้ โครงสร้างของระบบที่ปรับปรุงแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 โดยที่บล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัวจะมีความชัน (M) เท่ากับ 1 และเอาต์พุตที่ออกจาก



รูปที่ 5.5 โครงสร้างของระบบที่มีลักษณะเฉพาะความไม่เป็นเชิงเส้น



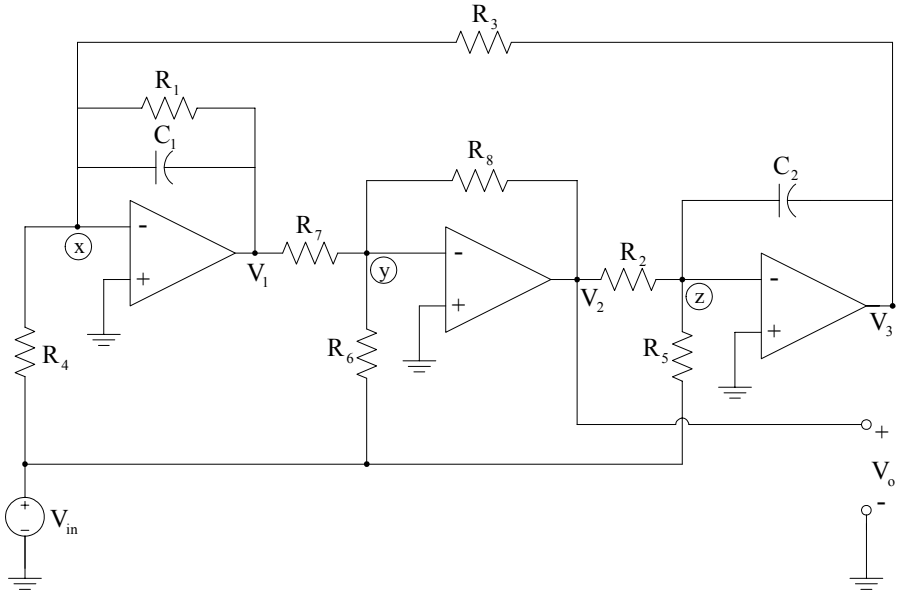
รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่มีตัวชดเชยที่อินพุตค่าต่างๆ

บล็อกนี้จะเกิดการอิ่มตัวที่แรงดัน (S) เท่ากับ 8 โวลต์ โครงสร้างของระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นดังกล่าวนี้ ยอมรับได้ว่ามีความสมจริง เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 5.5 ด้วยโปรแกรม SIMULINK เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่มีตัวชดเชยที่อินพุตค่าต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งจากรูปดังกล่าว พบว่า วงจรกรองแบบช่องบากสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบได้เป็นอย่างดี

5.4 การอนุวัตวงจรกรองแบบช่องบาก

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงการอนุวัตวงจรกรองแบบช่องบากที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ 5.2 โดยจะอนุวัตด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตามรูปแบบไบควอดตัวแปรสถานะ (สราวุฒิ สุจิตจร, 2541) ดังแสดงในรูปที่ 5.7 รายละเอียดการวิเคราะห์วงจรตามรูปแบบดังกล่าวจะไม่ขอกล่าวถึง เนื่องจากได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 4.5 จากนั้นทำการจัดรูปสมการของวงจรกรองแบบช่องบากที่ได้จากการออกแบบดังสมการที่ (5-11) จะได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$G_c(s) = \left(0.00648\frac{s^2+55s+5485}{s^2+211s+2194}\right)(2.5)$$



รูปที่ 5.7 การอนุวัตด้วยวงจรไบควอดตัวแปรสถานะ

เมื่อพิจารณาสมการดังกล่าว กำหนดให้

$$G_{c1}(s) = \left(0.00648\frac{s^2+55s+5485}{s^2+211s+2194}\right) \quad \text{และ}$$

$$G_{c2}(s) = 2.5$$

การอนุวัตชุด $G_{c1}(s)$ สามารถดำเนินการหาค่าความต้านทานภายในวงจรได้ด้วยสมการที่ (4-36)-(4-40) และทำการปรับสัดส่วนขนาดของอิลิเมนต์ด้วยค่า 10^7 จะได้อิลิเมนต์ที่มีขนาดสมจริงเป็นดังนี้

$C_1 = C_2 = 0.1 \ \mu F$

$R_1 = 47.4 \ k\Omega$

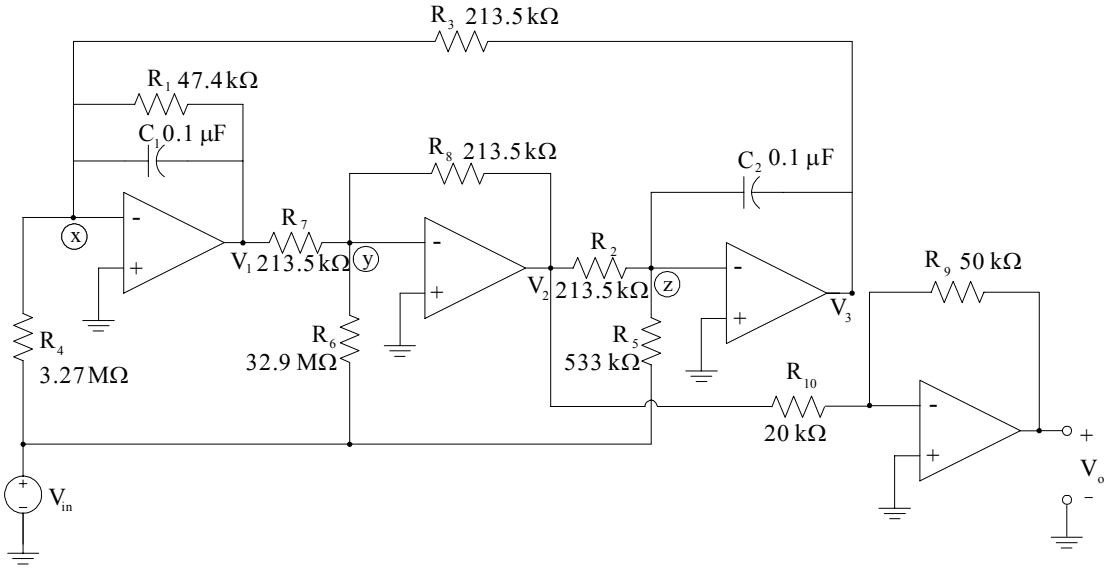
$R_2 = R_3 = R_7 = R_8 = 213.5 \ k\Omega$

$R_4 = 3.27 \ M\Omega$

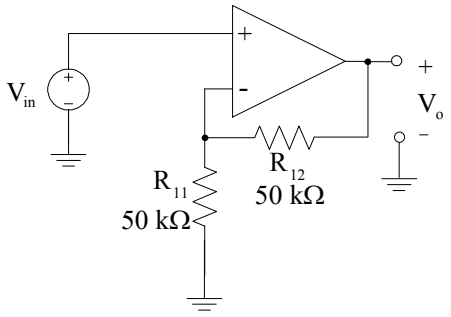
$R_5 = 533 \ k\Omega$

$R_6 = 32.9 \ M\Omega$

การอนุวัตชุด $G_{c2}(s)$ จะใช้วงจรขยายกลับขั้วสัญญาณ ที่กำหนดให้อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 2.5 ซึ่งวงจรของตัวชดเชย $G_c(s)$ ที่ได้อนุวัตขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.8 ส่วนการอนุวัตชุด A_1 ที่เป็นชุดอัตราขยายสัญญาณจำนวน 2 เท่า จะใช้วงจรขยายแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 วงจรอนุวัตของวงจรกรองแบบช่องบาก

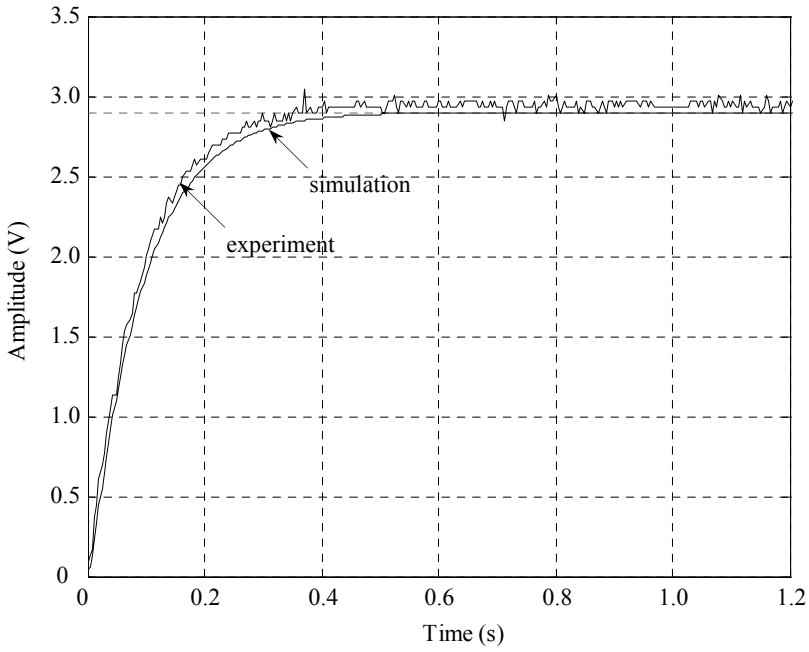


รูปที่ 5.9 การอนุวัตชุดเกน A_1

5.5 ผลการทดสอบและอภิปราย

ผลการทดสอบวงจรกรองแบบช่องบาก

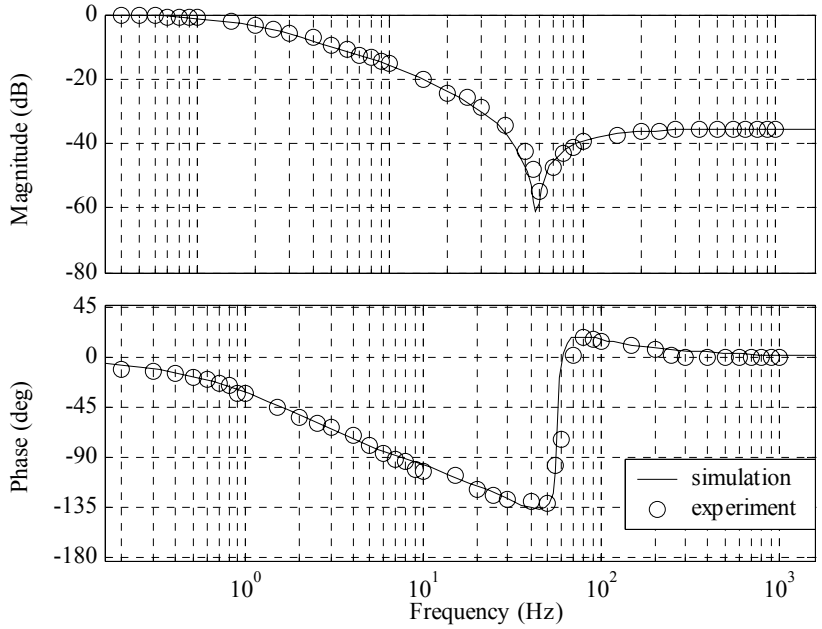
เมื่อดำเนินการอนุวัตวงจรกรองแบบช่องบากเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้ทดสอบวงจรดังกล่าวว่ามีคุณสมบัติตรงตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยพิจารณาจากผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของวงจรกรองแบบช่องบาก เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาจะทดสอบโดยป้อนแรงดันอินพุตแบบขั้นบันไดขนาด 2.9 โวลต์เข้าสู่วงจรดังกล่าว เพื่อเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการจำลองสถานการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ส่วนการทดสอบเพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของ



รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองทางเวลาของวงจรกรองแบบช่องบาก

วงจรจะดำเนินการโดยป้อนแรงดันอินพุตที่เปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วง 0.1-1000 เฮิรตซ์ เพื่อพิจารณาขนาด (magnitude) และมุมเฟส (phase shift) ของวงจรที่อนุวัตขึ้นเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของวงจรกรองแบบช่องบาก ดังปรากฏในรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ พบว่า วงจรที่ได้อนุวัตขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงสามารถนำวงจรดังกล่าวไปใช้ในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลได้



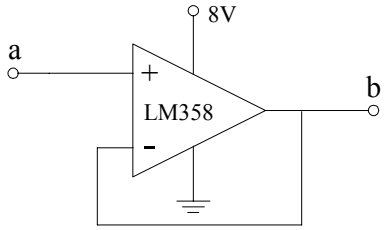
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแบบช่องบาก

ผลทดสอบระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก

เมื่อดำเนินการอนุวัตวงจรของตัวชดเชยเพื่อที่จะกำจัดรีโซแนนซ์การบิดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะเป็นการนำวงจรดังกล่าวติดตั้งเข้ากับระบบที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์เพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1) บล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว

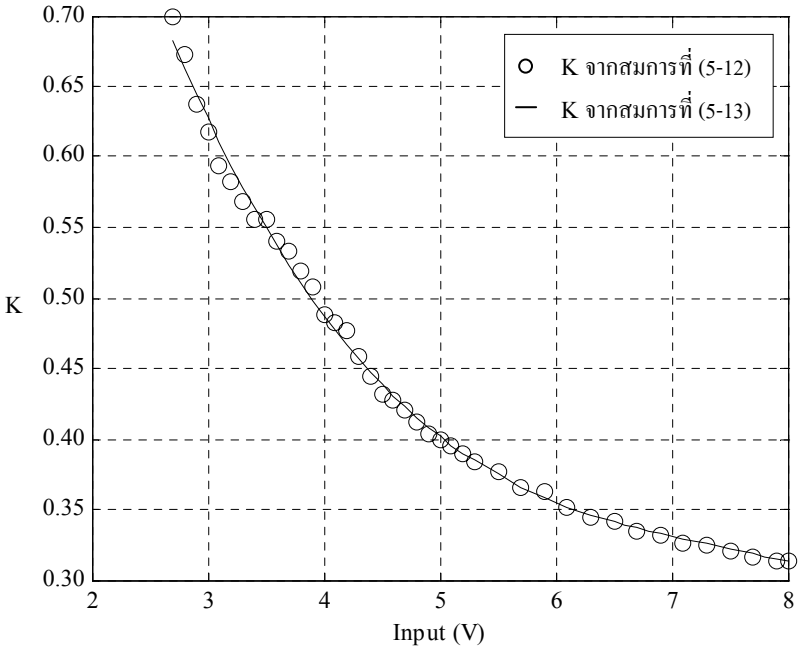
การสร้างบล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว จะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ที่จำกัดแรงดันเอาต์พุตด้วยไฟเลี้ยงออปแอมป์ให้เอาต์พุตที่ออกจากวงจรนี้มีแรงดันสูงสุดได้ไม่เกิน 8.0 โวลต์ โดยที่จุด a คือ แรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าสู่บล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว และจุด b คือเอาต์พุตของวงจรดังกล่าว



รูปที่ 5.12 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของบล็อกความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว

2) ชุด K

ชุด K จะทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนระดับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจากการวัด เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันอินพุต ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แล้ว ซึ่งสามารถหาค่า K ได้จากสมการที่ (5-12) ทั้งนี้ค่า K ที่ทำการอนุวัตจะพิจารณาเป็นสมการพหุนามอันดับสามของแรงดันอินพุต ดังแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยสมการที่ (5-13) เมื่อเปรียบเทียบค่า K ที่ได้จากสมการที่ (5-13) กับที่ได้จากสมการที่ (5-12) พบว่า ค่า K ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทุกย่านอินพุต ดังแสดงในรูปที่ 5.13 จากที่กล่าวมาจึงสามารถใช้ค่า K จากสมการที่ (5-13) มาอนุวัตเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแสดงรายละเอียดของวงจรดังกล่าวได้ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งจุด X หมายถึง ขนาดของแรงดันอินพุตที่ให้กับวงจร จุด d คือ เอาต์พุตที่ออกจากชุด $k_1G(s)$ และจุด e คือ เอาต์พุตของชุด K

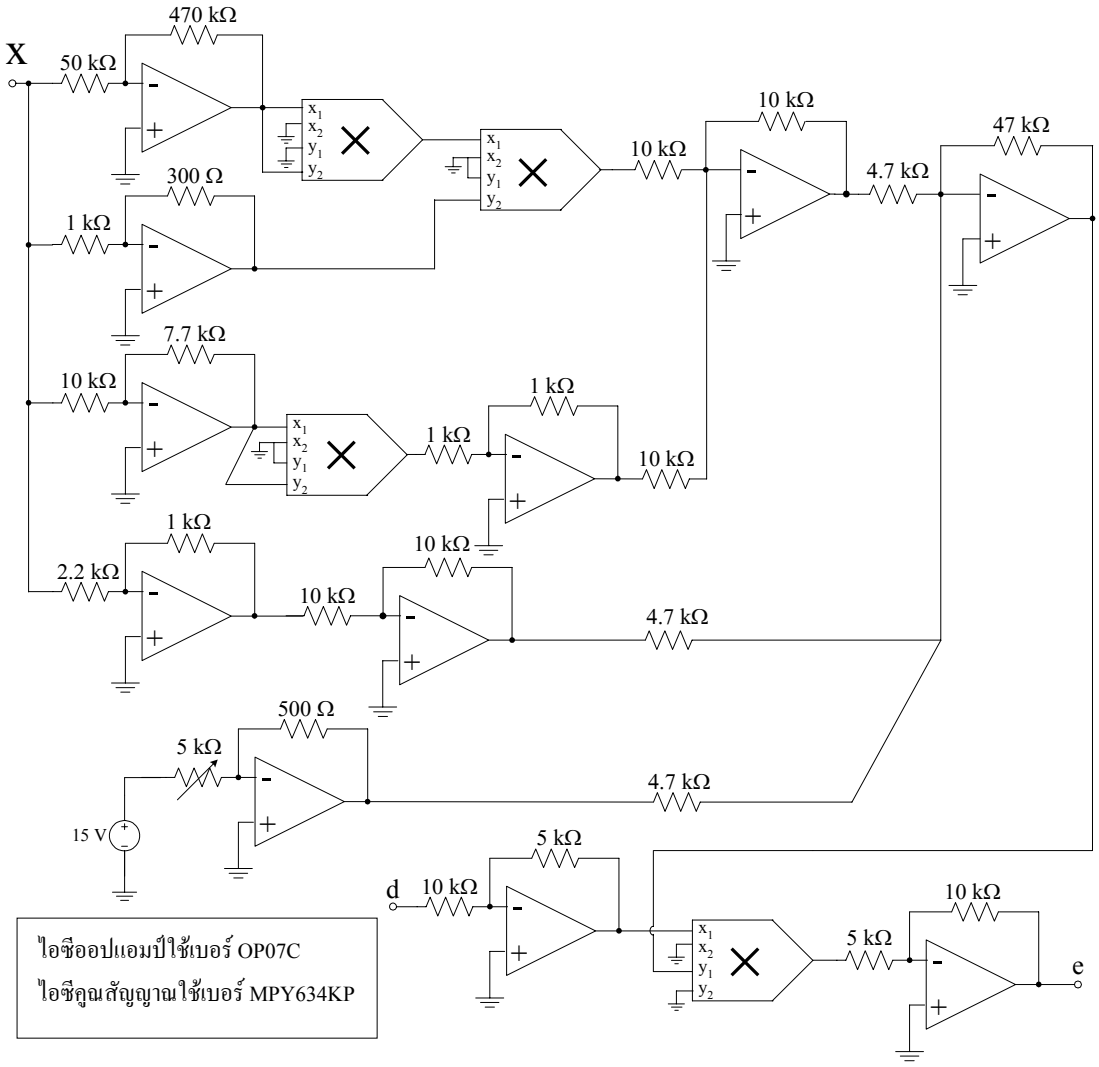


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับแรงดันอินพุต

$$K = \frac{\text{ขนาดของอินพุต}}{\text{ขนาดของเอาต์พุตจากการทดสอบ}} \tag{5-12}$$

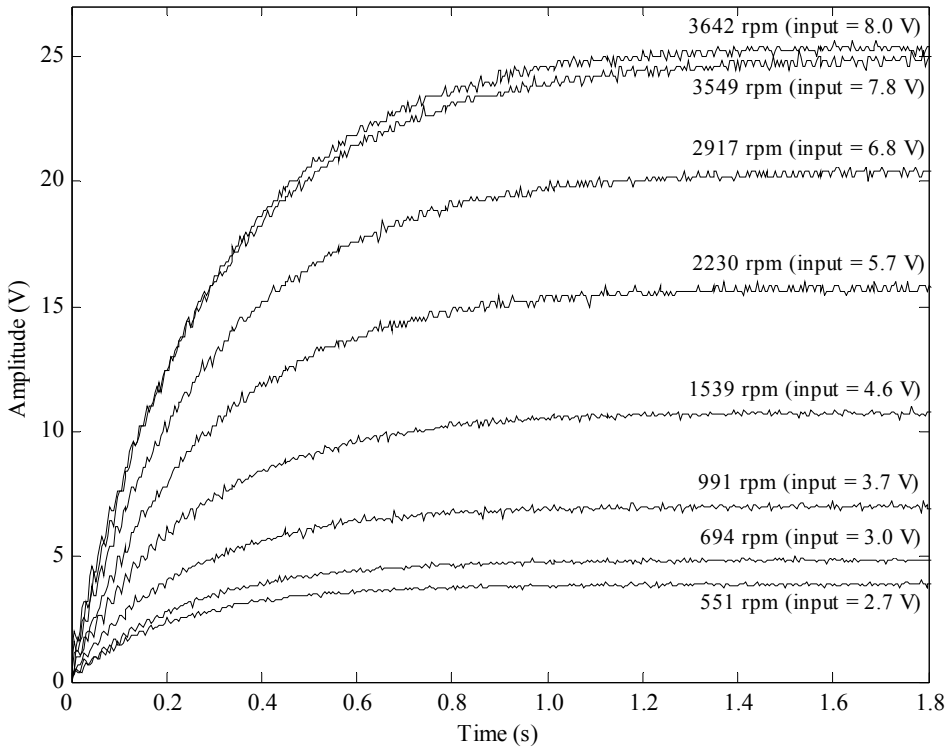
$$K = -0.0027X^3 + 0.0598X^2 - 0.4588X + 1.538 \tag{5-13}$$

โดยที่ X คือ ขนาดของแรงดันอินพุต

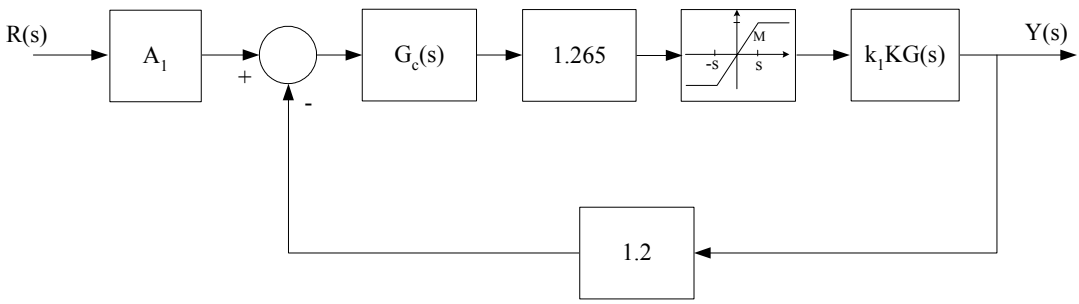


รูปที่ 5.14 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอนุวัตชุด K

เมื่อดำเนินการอนุวัตวงจรดังกล่าวแล้ว อันดับต่อไปจะเป็นการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลที่เชื่อมต่อกับวงจรต่างๆ ที่ทำการอนุวัต ดังมีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 5.5 ในการทดสอบระบบจะพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาเป็นหลัก โดยจะกระตุ้นระบบที่ปราศจากตัวชดเชยด้วยแรงดันอินพุตแบบขั้นบันไดขนาด 2.7, 3.0, 3.7, 4.6, 5.7, 6.8, 7.8 และ 8.0 โวลต์ ผลการทดสอบระบบดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางเวลายังมีรีโซแนนซ์การบิดเกิดขึ้น

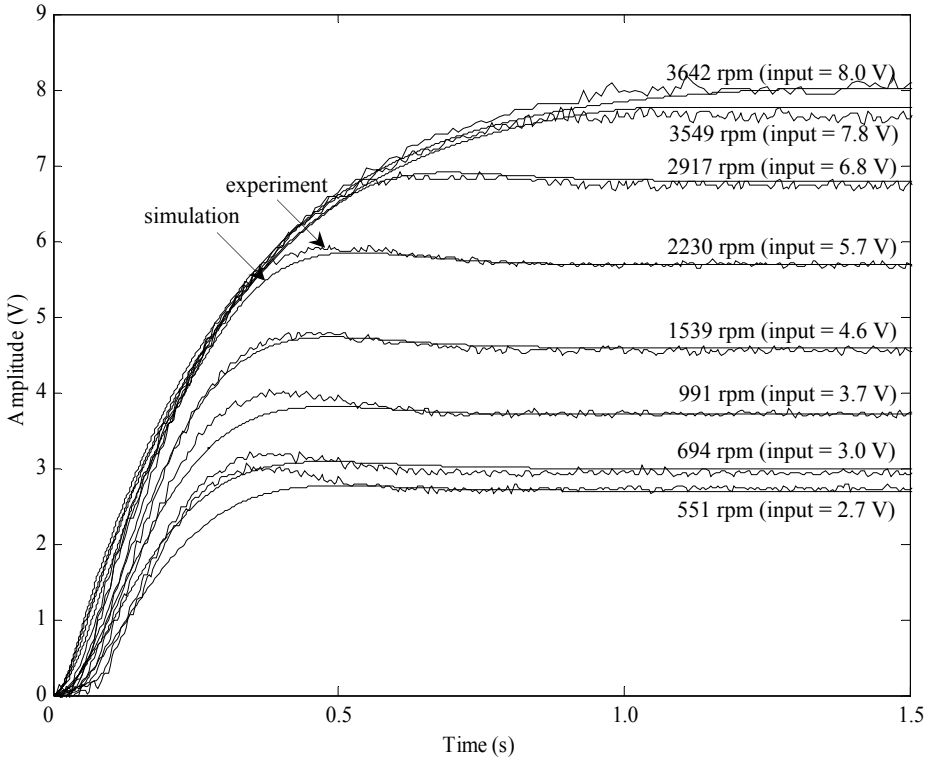


รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบของระบบคู่ควบเชิงกลที่ยังไม่มีการชดเชย



รูปที่ 5.16 โครงสร้างของระบบที่ปรับปรุงแล้ว

จากนั้นดำเนินการทดสอบระบบที่มีการชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก และนำผลทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ตามโครงสร้างดังรูปที่ 5.16 ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะเป็นการปรับแต่งแผนภาพของโครงสร้างตามที่ปรากฏในรูปที่ 5.5 ทั้งนี้เพื่อให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบ ซึ่งการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาระหว่างผลทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งสังเกตเห็นว่า ผลการทดสอบมีความใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ตลอดย่านการทำงานอินพุต รวมทั้งสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลได้

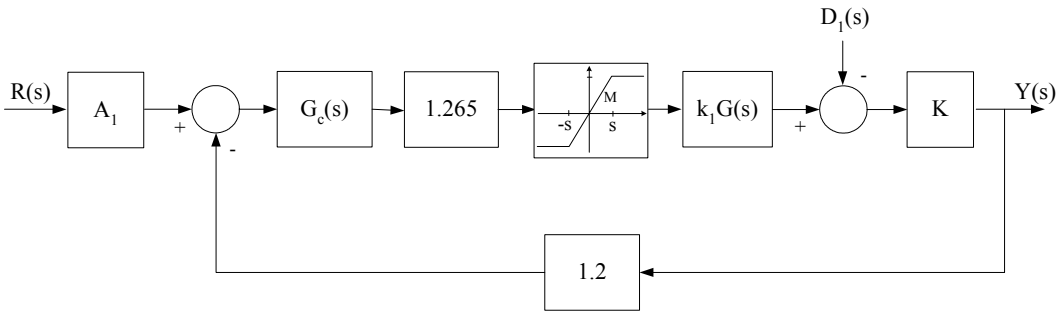


รูปที่ 5.17 ผลทดสอบระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบากเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์

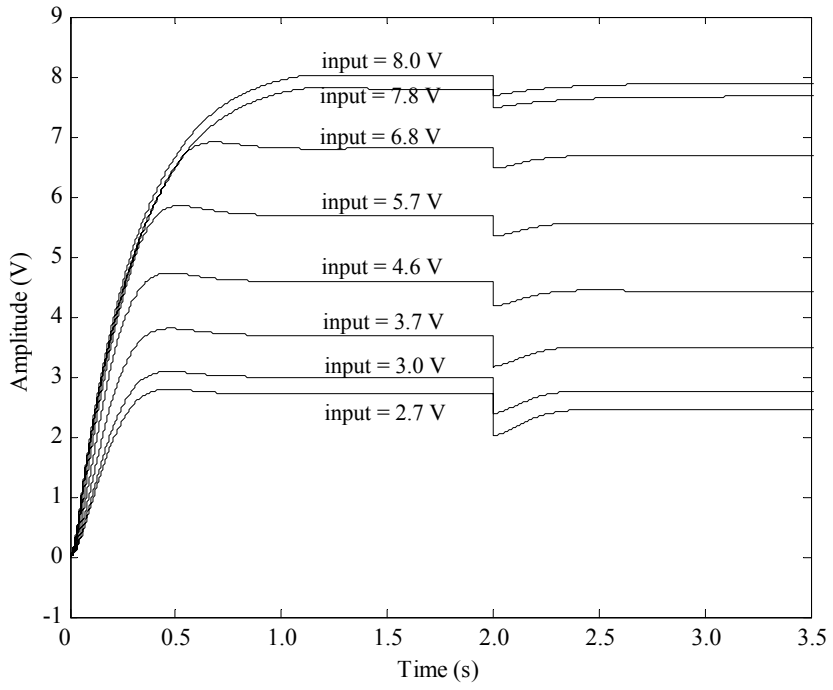
หลังจากดำเนินการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลที่มีวงจรกรองแบบช่องบากแล้ว จึงดำเนินการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบากเพื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนภายนอก และผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองของระบบ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอก จะดำเนินการโดยให้สัญญาณรบกวนภายนอก $D_1(s)$ เป็นแบบขั้นบันไดขนาดหนึ่งหน่วย ณ เวลา 2 วินาที ป้อนเข้าสู่

ระบบตามโครงสร้างที่แสดงดังรูปที่ 5.18 ผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนระบบแสดงดังรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่าวงจรกรองแบบช่องบากสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนภายนอกได้ระดับหนึ่ง โดยจะมีค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวเกิดขึ้นสูงสุดประมาณ 10% ที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 2.7 โวลต์ ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่าลดลงเมื่ออินพุตมีค่ามากขึ้น และจะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.52% ที่อินพุตเท่ากับ 8 โวลต์



รูปที่ 5.18 โครงสร้างของระบบเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่อมีสัญญาณรบกวนระบบ

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองของระบบ จึงได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์ระบบตามโครงสร้างที่แสดงดังรูปที่ 5.16 เมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 5% และลดลง 5% จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน G(s) ซึ่งมีลักษณะเป็นดังสมการที่ (5-14) และ (5-15) ตามลำดับ ผลตอบสนองของระบบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.20 ซึ่งพบว่าผลตอบสนองทางเวลาจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก จึงอาจกล่าวได้ว่าตัวชดเชยดังกล่าวสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบได้เมื่อเกิดความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบ

$$G^{+}(s) = \frac{3.2\times10^{6}s^{2}+3.97\times10^{9}s+3.67\times10^{11}}{s^{5}+295.2s^{4}+4.33\times10^{5}s^{3}+4.38\times10^{7}s^{2}+3.87\times10^{10}s+1.35\times10^{11}} \qquad (5\text{-}14)$$

$$G^{-}(s) = \frac{2.9\times10^{6}s^{2}+3.6\times10^{9}s+3.32\times10^{11}}{s^{5}+267s^{4}+3.92\times10^{5}s^{3}+3.96\times10^{7}s^{2}+3.50\times10^{10}s+1.22\times10^{11}} \qquad (5\text{-}15)$$

5.6 เสถียรภาพของระบบที่มีวงจรกรองแบบช่องบาก

ในหัวข้อนี้จะดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีตัวชดเชยจะมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน โดยจะวิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา (describing function) (กองพัน อารีรักษ์, 2544)

วิธีฟังก์ชันพรรณนาเป็นวิธีการที่ดำเนินงานในโดเมนความถี่ โดยที่ข้อสมมติเบื้องต้นของวิธีการนี้ ระบบจะต้องมีพฤติกรรมตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้ (กองพัน อารีรักษ์, 2544)

1) ระบบจะต้องประกอบไปด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นเพียงแค่ส่วนเดียว

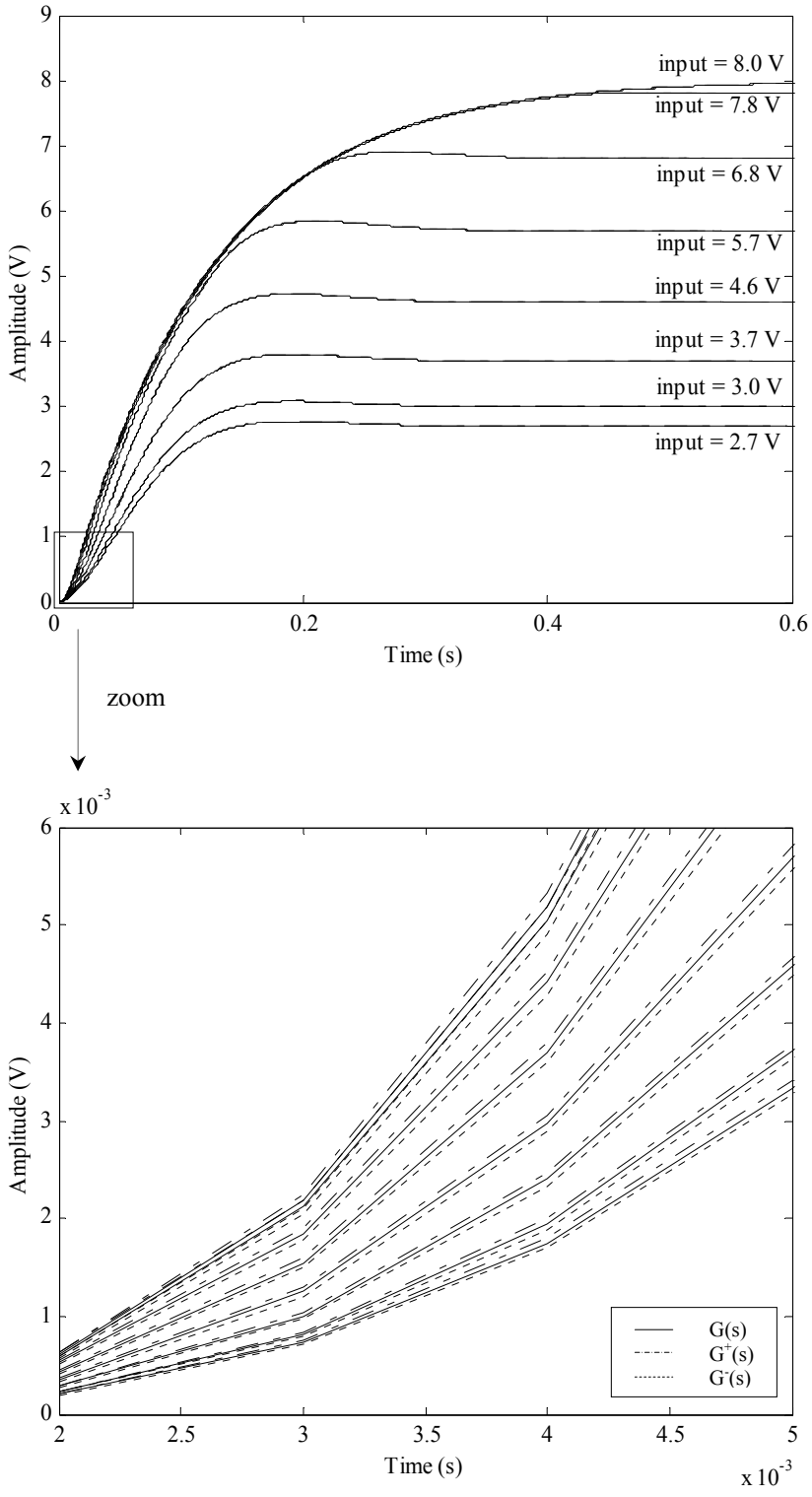
2) ความไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องไม่ขึ้นกับเวลา

3) เมื่อกำหนดให้อินพุตที่เข้าสู่ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสัญญาณซายน์ จะพิจารณาเอาต์พุตที่ฮาร์มอนิกพื้นฐาน โดยไม่สนใจเอาต์พุตที่ความถี่อื่นๆ

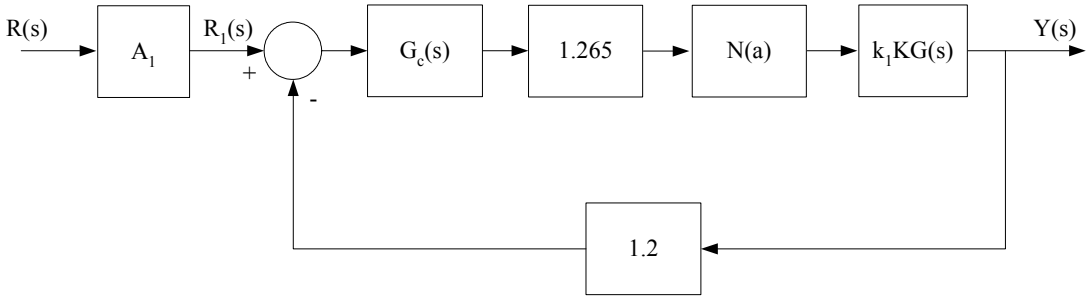
4) ความไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องมีลักษณะสมมาตรรอบจุดกำเนิด

5) ความไม่เป็นเชิงเส้นไม่มีความสามารถในการจดจำข้อมูล (ไม่มีหน่วยความจำ)

พิจารณาระบบดังรูปที่ 5.21 ซึ่งกำหนดให้ N(a) คือฟังก์ชันพรรณนาของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะในวงรอบปิดของระบบ หมายความว่าตัวชดเชยแบบป้อนไปหน้า A_1 จะไม่นำมาใช้ในการพิจารณา เนื่องจากทราบเป็นที่แน่นอนแล้วว่าตัวชดเชยดังกล่าวเสถียรและตายตัว (fixed) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบวงปิด ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดและสมการลักษณะเฉพาะเป็นดังสมการที่ (5-16) และ (5-17) ตามลำดับ



รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองทางเวลาเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบ



รูปที่ 5.21 ระบบที่ปรากฏความไม่เป็นเชิงเส้น

$$\frac{Y(j\omega)}{R_1(j\omega)} = \frac{1.265G_c(j\omega)N(a)k_1KG(j\omega)}{1+(1.2)(1.265)G_c(j\omega)N(a)k_1KG(j\omega)} \tag{5-16}$$

$$1+(1.2)(1.265)G_c(j\omega)N(a)k_1KG(j\omega) = 0 \tag{5-17}$$

จัดรูปสมการที่ (5-17) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดเป็นดังสมการที่ (5-18)

$$(1.2)(1.265)G_c(j\omega)k_1KG(j\omega) = -\frac{1}{N(a)} \tag{5-18}$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีนี้ จะเริ่มจากการวาดกราฟของระบบวงเปิดบนระนาบเชิงซ้อน ในทิศทางที่ ω มีค่าเพิ่มขึ้น และวาดกราฟของ $-\frac{1}{N(a)}$ ในทิศทางที่ a มีขนาดเพิ่มขึ้นไว้บนระนาบเดียวกัน เมื่อ $N(a)$ แสดงได้ดังสมการที่ (5-19) (กองพัน อารีรักษ์, 2544)

$$N(a) = \frac{2M}{\pi}\left[\sin^{-1}\left(\frac{S}{a}\right)+\left(\frac{S}{a}\right)\sqrt{1-\left(\frac{S}{a}\right)^2}\right] \tag{5-19}$$

โดยที่ N(a) คือ ฟังก์ชันพรรณนาของความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว

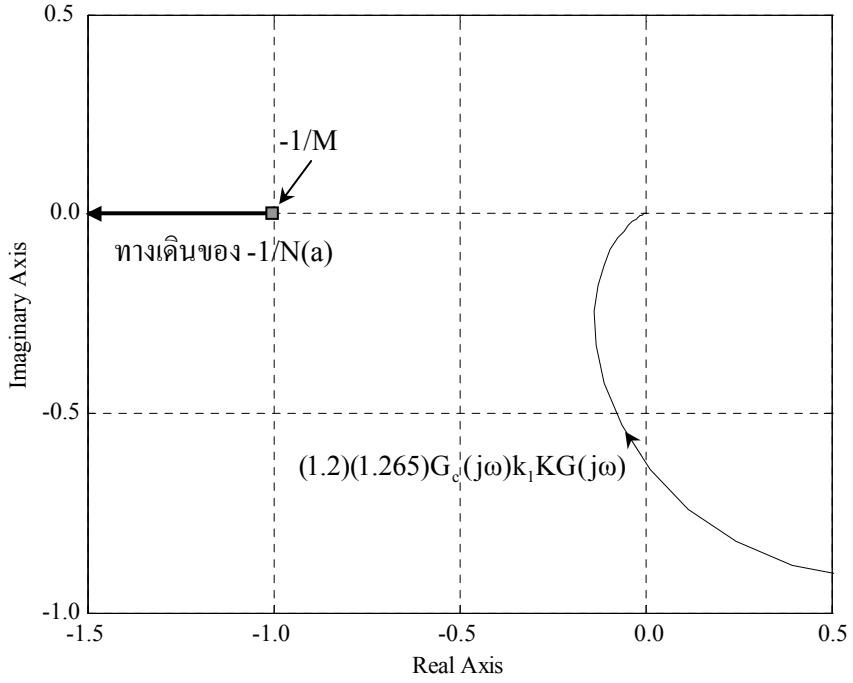
M คือ ความชันของความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว

a คือ ขนาดอินพุตซายน์

S คือ จุดที่เริ่มเกิดการอิ่มตัวของความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัว

เมื่อดำเนินการวาดกราฟเรียบร้อยแล้ว จะพิจารณาเสถียรภาพโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพโคเชนเบอเกอร์ (Kochenberger stability criterion) ที่กล่าวไว้ว่า “ระบบจะเสถียรเมื่อเส้นกราฟ $-\frac{1}{N(a)}$ ปรากฏอยู่ทางซ้ายมือของกราฟฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิด ในทิศที่ ω เพิ่มขึ้น” (Eronini, 1999)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะพิจารณาโครงสร้างดังรูปที่ 5.21 โดยที่กำหนดความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัวให้ M = 1 และ S = 8 สามารถแสดงผลการตรวจสอบเสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนาดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.22 จะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟของ $-\frac{1}{N(a)}$ จะปรากฏอยู่ทางด้านซ้ายของกราฟระบบวงเปิด $(1.2)(1.265)G_c(j\omega)k_1KG(j\omega)$ ซึ่งสอดคล้องตามเกณฑ์เสถียรภาพโคเชนเบอเกอร์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัวดังกล่าว จะยังคงมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานจริงของอินพุต

5.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก จากการจำลองสถานการณ์ระบบคู่ควบเชิงกลที่มีตัวชดเชยดังกล่าว เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของระบบ พบว่า ตัวชดเชยวงจรกรองแบบช่องบากสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบได้ตลอดย่านการทำงาน รวมทั้งยังให้ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เป็นที่พึงพอใจ ดังนั้นจึงทำการอนุวัตตัวชดเชยที่ได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปแบบเป็นไบควอดตัวแปรสถานะ และตัวชดเชยที่อนุวัตขึ้นมีคุณสมบัติตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นจึงดำเนินการนำตัวชดเชยประกอบเข้ากับระบบคู่ควบเชิงกล ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่าตัวชดเชยวงจรกรองแบบช่องบากที่อนุวัตขึ้นมาสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลได้เป็นที่น่าพึงพอใจ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีสัญญาณรบกวนมากระทำต่อระบบ ตัวชดเชยดังกล่าวสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ในระดับที่ยอมรับได้ รวมทั้งพิจารณาความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล พบว่าระบบที่ได้รับการชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบากยังคงให้ผลตอบสนองเช่นเดียวกับกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของระบบไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่ชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก จะพิจารณาด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้เนื่องจากในการออกแบบตัวชดเชยที่กล่าวถึงได้มีส่วนของความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิ่มตัวปรากฏอยู่ด้วย เพื่อจำกัดขนาดของแรงดันอินพุตที่เข้าสู่ระบบไม่ให้สูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้ระบบได้รับความเสียหาย จากการตรวจสอบเสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าว พบว่า ระบบคู่ควบเชิงกลที่ดำเนินการชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบากยังคงมีเสถียรภาพตลอดช่วงอินพุตที่สามารถใช้งานได้จริง

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษา และหาแนวทางในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบคู่ควบเชิงกล รีโซแนนซ์การบิดเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างทางกลของระบบ ส่งผลให้ชิ้นส่วนประกอบต่างๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง และระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่าย ในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ดำเนินการโดยใช้ตัวชดเชยทางพลวัตบนรากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบคลาสสิก (classical control) เพื่อให้สามารถใช้งานระบบคู่ควบเชิงกลได้อย่างคุ้มค่า ในการดำเนินการเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้ระบบดังกล่าว จะเริ่มต้นด้วยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้แทนพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกล โดยอาศัยวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ ตัวชดเชยแบบ PI, PID และ PIDA การออกแบบด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ รวมทั้งวงจรกรองแบบช่องบาก หลังจากที่ได้ออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการต่างๆ ดังที่ได้กล่าวถึงแล้ว ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของระบบคู่ควบเชิงกล จากนั้นจึงนำตัวชดเชยที่ให้ผลดีที่สุดจากวิธีการออกแบบดังกล่าว มาอนุวัตด้วยเทคโนโลยีแอนะลอกตามรูปแบบของไบควอด และดำเนินการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกลที่ได้รับการชดเชยด้วยตัวชดเชยที่อนุวัตขึ้น เพื่อศึกษาผลของการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล ในการดำเนินการออกแบบและอนุวัตตัวชดเชยเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์ให้กับระบบ พบว่า ตัวชดเชยชนิดวงจรกรองแบบช่องบากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นอีกสามกรณี สามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบได้ผลเป็นที่พึงพอใจมากที่สุดตลอดย่านการทำงาน ซึ่งมีแรงดันอินพุตอยู่ในช่วง 2.7-8.0 โวลต์ และเมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของระบบที่ได้รับการชดเชยแล้ว เห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการทดสอบใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนจากภายนอก รวมทั้งความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล และเมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ได้รับการชดเชยด้วยตัวชดเชยดังกล่าว โดยใช้วิธีฟังก์ชันพรรณนา พบว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพ

ตลอดย่านการทำงาน ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าตัวชดเชยชนิดวงจรกรองแบบช่องบากที่ออกแบบและอนุวัตขึ้นสามารถกำจัดรีโซแนนซ์ให้กับระบบคู่ควบเชิงกลได้ผลน่าพึงพอใจ

บทที่ 1 ของวิทยานิพนธ์ได้กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา คือ การเกิดรีโซแนนซ์การบิดในระบบทางกลทั่วๆ ไป ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบ จากนั้นได้กล่าวถึงแนวทางในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยวิธีการแบบต่างๆ ซึ่งสำหรับในประเทศไทยมีผู้เสนอแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดได้เพียงจุดปฏิบัติการเดียว ถ้าต้องการขยายย่านการทำงานให้กว้างขึ้น จะต้องพิจารณาถึงความไม่เป็นเชิงเส้นด้วย ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ดำเนินการออกแบบและอนุวัตตัวชดเชยเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลได้ตลอดย่านการทำงานอินพุตด้วยทฤษฎีระบบควบคุมแบบคลาสสิกที่มีความง่ายทั้งในด้านการวิเคราะห์และออกแบบ ส่วนในบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์ได้กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกลด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์แบบ ARMAX ทั้งนี้เพื่อนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะนำตัวชดเชยที่ให้ผลดีที่สุดจากการออกแบบไปทำการอนุวัตเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล ในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์ได้อธิบายการออกแบบตัวชดเชย PI, PID และ PIDA ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าตัวชดเชยแบบ PI ไม่สามารถกำจัดรีโซแนนซ์ในโดเมนความถี่ได้ ส่วนกรณีใช้ตัวชดเชยแบบ PID พบว่าระบบหลังผ่านการชดเชยจะไม่สามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดได้ และมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินค่อนข้างมาก รวมถึงมีแนวโน้มที่ระบบจะขาดเสถียรภาพด้วย ส่วนกรณีใช้ตัวชดเชยแบบ PIDA พบว่าตัวชดเชยที่ออกแบบสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดได้ แต่เมื่อจัดรูปแบบตัวชดเชยให้เหมาะสำหรับการอนุวัตเป็นอุปกรณ์จริง พบว่า ระบบที่มีตัวชดเชยดังกล่าวจะขาดเสถียรภาพ ส่วนการออกแบบด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ง. เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบที่ได้รับการชดเชยดังกล่าว พบว่า ระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่าย ดังนั้นการออกแบบตัวชดเชยที่กล่าวมาข้างต้นจึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปอนุวัตเพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล

วิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ที่ได้จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ตัวชดเชยดังกล่าวสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบได้ จากนั้นจึงได้ดำเนินการอนุวัตตัวชดเชยด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตามรูปแบบไบควอด และเมื่อทำการทดสอบตัวชดเชยดังกล่าว พบว่า ผลการทดสอบมีสัญญาณรบกวนปรากฏอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นตัวชดเชยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่ออกแบบขึ้นจึงไม่เหมาะสำหรับการอนุวัตเพื่อใช้กำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกล และในบทที่ 5 ของวิทยานิพนธ์ได้กล่าวถึงการออกแบบและอนุวัตตัวชดเชยด้วยวิธีวงจรกรองแบบ

ช่องบาก เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ของระบบคู่ควบเชิงกลที่ได้รับการชดเชยด้วยตัวชดเชยดังกล่าวทั้งจากผลการทดสอบและจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าผลตอบสนองที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบได้ตลอดย่านการทำงานอินพุตระหว่าง 2.7-8.0 โวลต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนภายนอกมากระทำต่อระบบ รวมทั้งเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบมีการเปลี่ยนแปลง พบว่า ตัวชดเชยดังกล่าวสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ในระดับหนึ่ง และยังให้ผลตอบสนองเป็นที่พึงพอใจเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงไป ±5% นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบคู่ควบเชิงกลที่ได้รับการชดเชยด้วยวงจรกรองแบบช่องบาก โดยอาศัยวิธีฟังก์ชันพรรณนา พบว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานที่กล่าวถึงข้างต้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าตัวชดเชยชนิดวงจรกรองแบบช่องบากสามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลตลอดย่านการทำงานอินพุตจาก 2.7-8.0 โวลต์ ได้เป็นที่น่าพอใจ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ จะพบว่าตัวชดเชยจากการออกแบบมีจำนวน 2 ชุด และแต่ละชุดมีอันดับเท่ากับ 6 เมื่อพัฒนาตัวชดเชยด้วยเทคโนโลยีแอนะลอก จะมีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำตัวชดเชยไปใช้งานจริงได้ ดังนั้นอาจดำเนินการพัฒนาตัวชดเชยดังกล่าวด้วยเทคโนโลยีดิจิตอล ซึ่งอาจจะไม่เกิดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนมากนัก

2. การออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ต้องมีการกำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพเพื่อใช้ในการออกแบบ ซึ่งการกำหนดค่าดังกล่าวจะไม่มีหลักเกณฑ์ที่ตายตัว ดังนั้นในการออกแบบตัวชดเชยระบบ อาจนำวิธีการค้นหารูปแบบต่างๆ เข้าช่วยในการค้นหาค่าดรรชนีเสถียรภาพเหมาะที่สุดสำหรับระบบนี้

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนพลวัตของระบบมีอันดับห้า ซึ่งอันดับของแบบจำลองจะสูง ดังนั้นในการออกแบบตัวชดเชยจะมีความยุ่งยาก และอาจต้องใช้ตัวชดเชยอันดับสูงเพื่อทำหน้าที่กำจัดรีโซแนนซ์การบิด ดังนั้นแนวทางหนึ่งอาจใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวชดเชย เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ หรืออาจใช้การควบคุมแบบปรับตัว (adaptive control) เข้ามาแก้ปัญหาดังกล่าว

4. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองเฉลี่ยเพียงชุดเดียวในการแทนพลวัตของระบบ เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ดังนั้นอาจจะเลือกใช้แบบจำลองหลายชุด (multiple model) แทนพลวัตของระบบ เพื่อให้

ได้แบบจำลองที่สมจริงกับระบบ จากนั้นจึงดำเนินการออกแบบตัวชดเชยของแบบจำลองแต่ละชุด เพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดและให้สมรรถนะตามที่ต้องการ

5. แนวทางในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดให้กับระบบคู่ควบเชิงกลดังที่ได้กล่าวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จำเป็นต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ถูกต้องแม่นยำ ซึ่งถ้าขาดแบบจำลองที่ถูกต้องแม่นยำแล้ว ย่อมทำให้การออกแบบตัวชดเชยขาดความถูกต้องไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ไม่ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงอาจใช้วิธีการควบคุมแบบชาญฉลาด (intelligent control) เช่น ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic) และโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) เป็นต้น ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่แม่นยำ

รายการอ้างอิง

กองพัน อารีรักษ์. (2544). **การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบสองมวลความเฉื่อยที่ปรากฏการกำทอนเชิงกล**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ชัชชัย อุทัยวสิน. (2543). **การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวล โดยใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

สราวุฒิ สุจิตจร. (2541). **รายงานการวิจัยเรื่องการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมด้วยการจัดตำแหน่งซีโร่.** ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ.

Castelo, F. J., and Garcia, R. F. (2002). A control frequency selection procedure for frequency domain autotuning methods on PID controllers. **IEEE Symp. Computer Aided Control System Design**. 139-144.

Chen, C. T. (1993). **Analog & digital control system design transfer function, state space & algebraic methods.** Saunders College Publishing.

Daryanani, G. (1976). **Principles of active network systhesis and design.** Singapore: John Wiley & Sons, Inc.

Deliyannis, T., Sun, Y., and Fidler, J. K. (1999). **Continuous-time active filter design.** Boca Raton: CRC Press LLC.

Eronini, U. E. (1999). **System dynamics and control.** Pacific Grove : PWS Publishing company. New York: CRC Press.

Fujikawa, K., Yang, Z. O., Kobayashi, H., and Koga, T. (1991). Robust and fast speed control for torsional system based on state space method. **Proc. IEEE EECON'91.** 1: 687-692.

Hori, Y., Sawada, H., and Chun, Y. (1999). Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system. **IEEE Trans. Industrial Electronics.** 46(1): 162-168.

Ji, J. K., Lee, D. C., and Sul, S. K. (1993). LQG based speed controller for torsional vibration suppression in 2-mass motor drive system. **Proc. IEEE IECON'93.** 2: 1157-1162.

Ji, J. K., and Sul, S. K. (1995). Kalman filter and LQ based speed controller for torsional vibration suppression in a 2-mass motor drive system. **IEEE Trans. Industrial Electronics.** 42(6): 564-571.

Jung, S., and Dorf, R. C. (1996). Analytic PIDA controller design technique for a third order system. **Proc. of the 35th Conf. on Decision and Control.** 3: 2513-2518.

Ljung, L. (1995). System identification toolbox for use with MATLAB. The MathWorks Inc.

Ljung, L., and Glad, T. (1994). **Modeling of dynamic systems.** New Jersey: Prentice Hall Inc.

Manabe, S. (2003). Importance of coefficient diagram in polynomial method. **Proc. of the 42nd Conf. on Decision and Control.** 4: 3489-3494.

Martinez, M., Salcedo, J. V., and Muñoz . (2000). Adaptive design of PID controllers based on an alternative method to root locus. In Quevedo, J., and Escobet, T. (eds.). **Digital control: past, present and future on PID control** (pp. 199-204). New York: Elsevier Science Inc.

Naslin, P. (1968). **Essentials of optimal control** (pp. 30-51). London: Illifebook.

Kessler, C. (1960). Ein Beitrag zur Theorie mehrschleifiger. **Regelungstechnik**. 8(8): 261-266.

Kristiansson, B., and Lennartson, B. (2000). Near optimal tuning rules for PI and PID controllers. In Quevedo, J., and Escobet, T. (eds.). **Digital control: past, present and future on PID control** (pp. 325-330). New York: Elsevier Science Inc.

Persson, P. (1993). A Matlab Toolbox for PID controller design. **Motion Control Proceedings**. 230-236.

Phillips, C. L., and Harbor R. D. (2000). **Feedback Control Systems**. (4th ed.). New Jersey: Prentice Hall Inc.

Schaumann, R., and Valkenburg, M. E. V. (2001). **Design of analog filters.** New York: Oxford University Press.

Song, S. H., Ji, J. K., and Park, M. H. (1993). Torsional vibration suppression control in 2-mass system by state feedback speed controller. **Proc. IEEE CCA'93.** 1: 129-134.

Zaeh, M., and Brandebburg. (1987). Das erweiterte daempfungsoptimum. **Automatis-ierungstechnikat**. 35(7): 257-283.

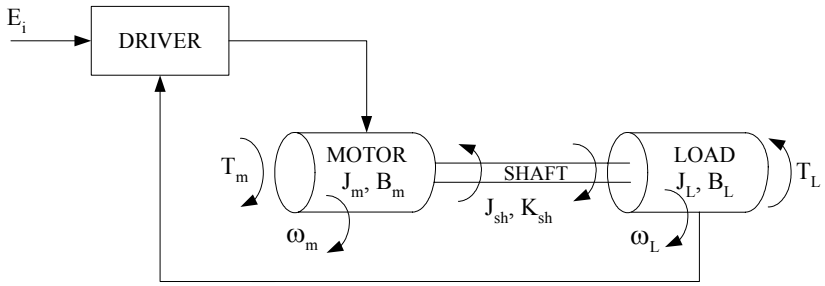
ภาคผนวก ก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกล จะทำการหาแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาอันดับของแบบจำลอง และนำอันดับที่ได้ไปใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองต่อไป

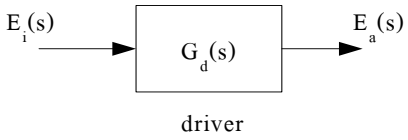
แบบจำลองทางพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และได้นำมาแสดงใหม่ในที่นี้เป็นรูปที่ ก.1 ซึ่งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบตามรูปที่ ก.1 สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้



รูปที่ ก.1 แบบจำลองทางพลวัตของระบบคู่ควบเชิงกล

1. พิจารณาชุดตัวขับ

แผนภาพบล็อกของชุดตัวขับสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.2 ซึ่งสามารถแทนชุดขับ ให้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งดังสมการที่ (ก-1)



รูปที่ ก.2 แผนภาพบล็อกของชุดขับ

$$G_d(s) = \frac{E_a(s)}{E_i(s)} = \frac{K_d}{1+s\tau_d} \qquad (ก\text{-}1)$$

2. พิจารณาชุดมอเตอร์

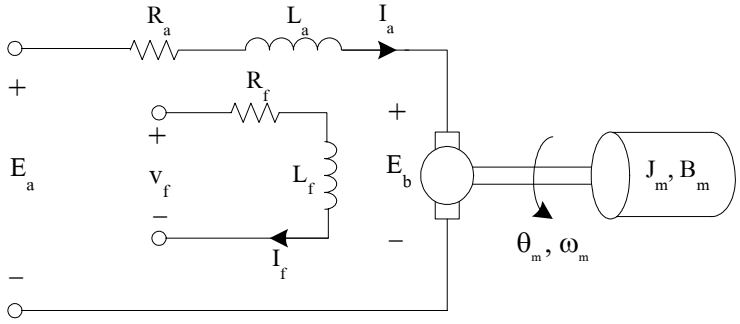
จากรูปที่ ก.3 เมื่อพิจารณาด้านวงจรอาร์เมเจอร์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (ก-2)

$$E_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b \qquad (ก\text{-}2)$$

จากสมการที่ (ก-2) ทำการเขียนแสดงในระนาบ-เอส ได้เป็นสมการที่ (ก-3) และ (ก-4)

$$E_a(s) = I_a(s)[sL_a + R_a] + E_b(s) \qquad (ก\text{-}3)$$

$$\frac{I_a(s)}{E_a(s) - E_b(s)} = \frac{1}{sL_a + R_a} \qquad (ก\text{-}4)$$



รูปที่ ก.3 แผนภาพวงจรมอเตอร์กระแสตรง

และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (ก-5) ทำการเขียนแสดงในระนาบ-เอสแสดงดังสมการที่ (ก-6)

$$E_b = K_b \omega(t) \qquad (ก\text{-}5)$$

$$E_b(s) = K_b \Omega(s) \qquad (ก\text{-}6)$$

พิจารณาค่าแรงบิดของมอเตอร์ T_m จากสมการที่ (ก-7) ในระนาบ-เอสเป็นดังสมการที่ (ก-8)

$$T_m = K_m I_a \qquad (ก\text{-}7)$$

$$T_m(s) = K_m I_a(s) \quad \text{(ก-8)}$$

พิจารณาสมการผลรวมของแรงบิด แสดงดังสมการที่ (ก-9)-(ก-12)

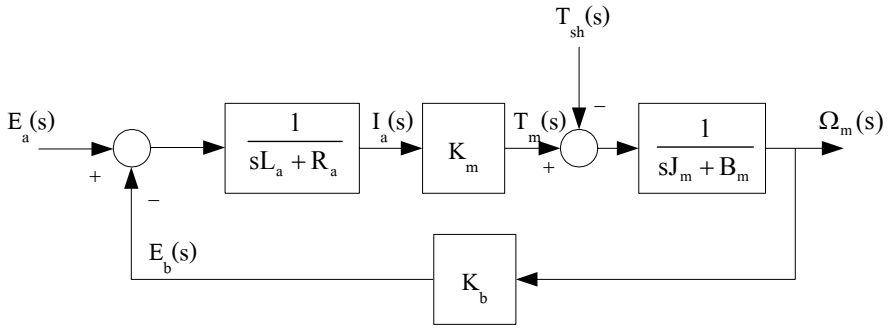
$$\sum T = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad \text{(ก-9)}$$

$$T_m - T_{sh} - B_m\omega_m(t) = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad \text{(ก-10)}$$

$$T_m(s) - T_{sh}(s) - B_m\Omega_m(s) = J_m s\Omega_m(s) \quad \text{(ก-11)}$$

$$\frac{\Omega_m(s)}{T_m(s) - T_{sh}(s)} = \frac{1}{(sJ_m + B_m)} \quad \text{(ก-12)}$$

นำสมการ (ก-4), (ก-6), (ก-8) และ (ก-12) มาเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 แผนภาพบล็อกของมอเตอร์

3. พิจารณาที่เพลา

พิจารณาผลรวมของแรงบิดที่เพลาเป็นดังสมการที่ (ก-13) และ (ก-14)

$$\sum T = J_{sh} \frac{d}{dt}(\omega_m(t) - \omega_L(t)) \quad \text{(ก-13)}$$

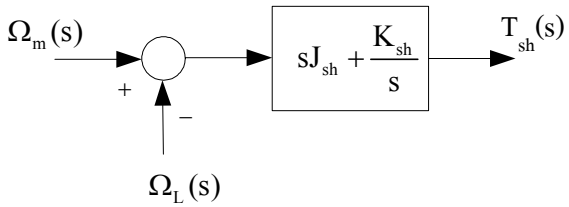
$$T_{sh} - K_{sh}\int_0^t(\omega_m(t) - \omega_L(t))dt = J_{sh}\frac{d}{dt}(\omega_m(t) - \omega_L(t)) \quad \text{(ก-14)}$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (ก-14) ให้อยู่ในระนาบ-เอส แสดงดังสมการที่ (ก-15)

$$T_{sh}(s) - \frac{K_{sh}}{s}[\Omega_m(s) - \Omega_L(s)] = J_{sh}s[\Omega_m(s) - \Omega_L(s)] \quad \text{(ก-15)}$$

$$\frac{T_{sh}(s)}{\Omega_m(s) - \Omega_L(s)} = sJ_{sh} + \frac{K_{sh}}{s} \quad \text{(ก-16)}$$

จากการพิจารณาที่เพลาของระบบสามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 แผนภาพบล็อกของเพลาที่เชื่อมระหว่างมอเตอร์และโหลด

4. พิจารณาที่โหลด

พิจารณาผลรวมของแรงบิดที่โหลดเป็นดังสมการที่ (ก-17)-(ก-19)

$$\sum T = J_L\frac{d\omega_L}{dt} \quad \text{(ก-17)}$$

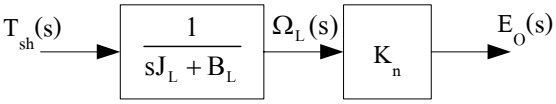
$$T_{sh} - B_L\omega_L = J_L\frac{d\omega_L}{dt} \quad \text{(ก-18)}$$

$$T_{sh}(s) = (sJ_L + B_L)\Omega_L(s) \quad \text{(ก-19)}$$

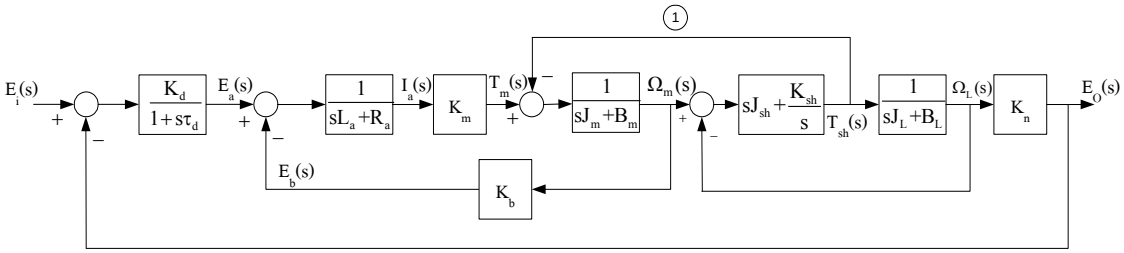
เมื่อพิจารณาที่โหลดจะมีทาโคมิเตอร์ติดอยู่ภายใน ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อป้อนกลับไปยังชุดตัวขับ และสามารถแทนทาโคมิเตอร์ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (ก-20)

$$E_0(s) = K_n \Omega_L(s) \qquad \text{(ก-20)}$$

แผนภาพบล็อกของโหลดแสดงดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 แผนภาพบล็อกของโหลด



รูปที่ ก.7 แผนภาพบล็อกของระบบคู่ควบเชิงกล

จากอุปกรณ์ทั้ง 4 ส่วนที่กล่าวมาข้างต้น ดำเนินการเขียนเป็นแผนภาพบล็อกรวมทั้งหมดของระบบคู่ควบเชิงกล แสดงเป็นดังรูปที่ ก.7 และดำเนินการยุบแผนภาพบล็อกเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างเอาต์พุต ($E_o(s)$) และอินพุต ($E_i(s)$) โดยแสดงขั้นตอนการหาดังรูปที่ ก.8 สามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. จากรูปที่ ก.7 ทำการย้ายปลายของบล็อกที่ 1 ไปยังตำแหน่ง Ω_L ได้ดังรูปที่ ก.8.ก)

2. จากรูปที่ ก.8.ก) ทำการยุบบล็อกที่ 2 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในสมการที่ (ก-21) และ (ก-22)

$$G_1(s)=\frac{\Omega_L(s)}{\Omega_m(s)}=\frac{\left(sJ_{sh}+\frac{K_{sh}}{s}\right)\left(\frac{1}{sJ_L+B_L}\right)}{\left(sJ_{sh}+\frac{K_{sh}}{s}\right)\left(\frac{1}{sJ_L+B_L}\right)+1} \quad \text{(ก-21)}$$

$$=\frac{J_{sh}s^2+K_{sh}}{(J_L+J_{sh})s^2+B_Ls+K_{sh}} \quad \text{(ก-22)}$$

3. ทำการย้ายต้นของบล็อกที่ 3 ของรูปที่ ก.8.ข) เลื่อนไปข้างหน้า แสดงได้ดังรูปที่ ก.8.ค)

4. ทำการยุบบล็อกที่ 4 ที่แสดงในรูปที่ ก.8.ค) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_2(s)=\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)}=\frac{\frac{K_m}{(sL_a+R_a)(sJ_m+B_m)}}{1+\frac{K_mK_b}{(sL_a+R_a)(sJ_m+B_m)}} \quad \text{(ก-23)}$$

$$G_2(s)=\frac{K_m}{(sL_a+R_a)(sJ_m+B_m)+K_mK_b} \quad \text{(ก-24)}$$

$$G_2(s)=\frac{K_m}{(L_aJ_m)s^2+(L_aB_m+R_aJ_m)s+(R_aB_m+K_mK_b)} \quad \text{(ก-25)}$$

5. ทำการยุบบล็อกที่ 5 ที่แสดงดังรูปที่ ก.8.ง) จะฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_3(s)=\frac{\Omega_L(s)}{E_a(s)}=\frac{G_1(s)G_2(s)}{1+[G_1(s)G_2(s)(\frac{sLa+Ra}{K_m})(sJ_L+B_L)]} \quad \text{(ก-26)}$$

ทำการแทนค่า $G_1(s)$ และ $G_2(s)$ จากสมการที่ (ก-22) และ (ก-25) ตามลำดับ ลงสมการที่ (ก-26) จะได้

$$G_3(s)=\frac{\left(\frac{J_{sh}s^2+K_{sh}}{(J_L+J_{sh})s^2+B_Ls+K_{sh}}\right)\left(\frac{K_m}{(L_aJ_m)s^2+(L_aB_m+R_aJ_m)s+(R_aB_m+K_mK_b)}\right)}{1+\left(\frac{J_{sh}s^2+K_{sh}}{(J_L+J_{sh})s^2+B_Ls+K_{sh}}\right)\left(\frac{K_m}{(L_aJ_m)s^2+(L_aB_m+R_aJ_m)s+(R_aB_m+K_mK_b)}\right)\left(\frac{sL_a+R_a}{K_m}\right)(sJ_L+B_L)} \quad \text{(ก-27)}$$

กำหนดให้

$$G_3(s) = \frac{n_1(s)}{d_1(s)} \qquad \text{(ก-28)}$$

โดยที่

$$n_1(s) = K_m J_{sh} s^2 + K_{sh} K_m$$

$$d_1(s) = \left\{\left((J_L + J_{sh})s^2 + B_L s + K_{sh}\right)\left((L_a J_m)s^2 + (L_a B_m + R_a J_m)s + (R_a B_m + K_m K_b)\right)\right\}$$

$$+\left\{\left(J_{sh}s^2 + K_{sh}\right)\left(sL_a + R_a\right)\left(sJ_L + B_L\right)\right\}$$

$$= \left\{(J_L + J_{sh})(L_a J_m)\right\}s^4 + \left\{(J_L + J_{sh})(L_a B_m + R_a J_m) + B_L L_a J_m\right\}s^3$$

$$+\left\{(J_L + J_{sh})(R_a B_m + K_m K_b) + B_L(L_a B_m + R_a J_m) + K_{sh} L_a J_m + L_a J_L\right\}s^2$$

$$+\left\{B_L(R_a B_m + K_m K_b) + K_{sh}(L_a B_m + R_a J_m) + (R_a J_L + L_a B_L)\right\}s$$

$$+\left\{K_{sh}(R_a B_m + K_m K_b) + R_a B_L\right\}$$

ดังนั้น จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_3(s)$ เป็นดังสมการที่ (ก-29)

$$G_3(s) = \frac{b_2 s^2 + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \qquad \text{(ก-29)}$$

โดยที่

$$b_2 = K_m J_{sh}$$

$$b_0 = K_{sh} K_m$$

$$a_4 = (J_L + J_{sh})(L_a J_m)$$

$$a_3 = (J_L + J_{sh})(L_a B_m + R_a J_m) + B_L L_a J_m$$

$$a_2 = (J_L + J_{sh})(R_a B_m + K_m K_b) + B_L (L_a B_m + R_a J_m) + K_{sh} L_a J_m + L_a J_L$$

$$a_1 = B_L (R_a B_m + K_m K_b) + K_{sh} (L_a B_m + R_a J_m) + (R_a J_L + L_a B_L)$$

$$a_0 = K_{sh} (R_a B_m + K_m K_b) + R_a B_L$$

6. ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ในรูปที่ ก.8.จ) ได้เป็นสมการที่ (ก-30)

$$G = \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{\left(\frac{K_d}{1+s\tau_d}\right)(G_3(s))(K_n)}{1+\left\{\left(\frac{K_d}{1+s\tau_d}\right)(G_3(s))(K_n)\right\}} \qquad \text{(ก-30)}$$

$$G = \frac{\left(\frac{K_d}{1+s\tau_d}\right)\left(\frac{b_2 s^2 + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}\right)(K_n)}{1+\left\{\left(\frac{K_d}{1+s\tau_d}\right)\left(\frac{b_2 s^2 + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}\right)(K_n)\right\}} \qquad \text{(ก-31)}$$

$$G = \frac{(K_d)(b_2 s^2 + b_0)(K_n)}{\left\{(1+s\tau_d)(a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0)\right\} + \left\{(K_d)(b_2 s^2 + b_0)(K_n)\right\}} \qquad \text{(ก-32)}$$

$$G = \frac{h_2 s^2 + h_0}{g_5 s^5 + g_4 s^4 + g_3 s^3 + g_2 s^2 + g_1 s + g_0} \qquad \text{(ก-33)}$$

โดยที่

$$h_2 = K_d K_n b_2$$

$$h_0 = K_d K_n b_0$$

$$g_5 = a_4\tau_d$$

$$g_4 = a_4 + a_3\tau_d$$

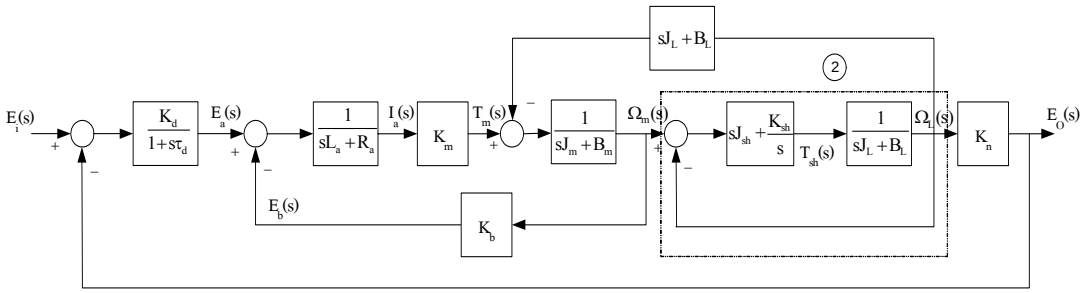
$$g_3 = a_3 + a_2\tau_d$$

$$g_2 = a_2 + a_1\tau_d + K_dK_nb_2$$

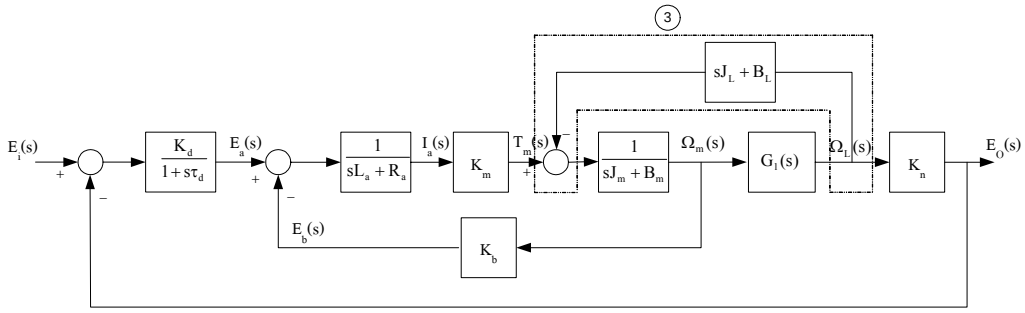
$$g_1 = a_1 + a_0\tau_d$$

$$g_0 = a_0 + K_dK_nb_0$$

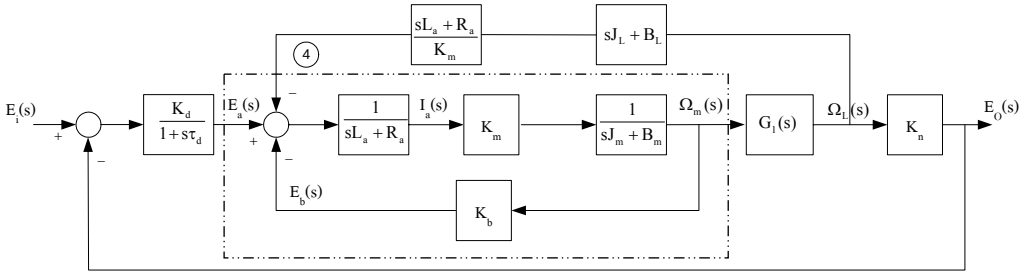
จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคู่ควบเชิงกลสามารถแสดงในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงดังสมการที่ (ก-33) ซึ่งเป็นระบบอันดับห้า ที่มีจำนวนซีโรเท่ากับสอง และจำนวนโพลเท่ากับห้า



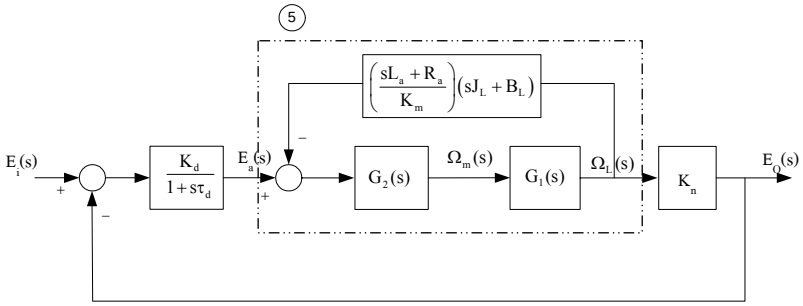
ก)



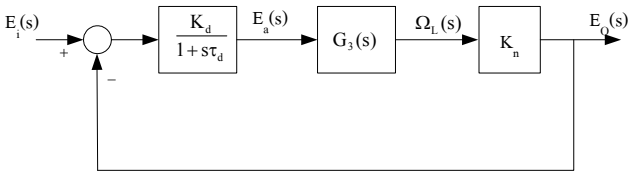
ข)



ค)



ง)



จ)

รูปที่ ก.8 ก) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกล เมื่อยุบบล็อกที่ 1
ข) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกล เมื่อยุบบล็อกที่ 2
ค) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกล เมื่อยุบบล็อกที่ 3
ง) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกล เมื่อยุบบล็อกที่ 4
จ) แผนภาพบล็อกแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคู่ควบเชิงกล เมื่อยุบบล็อกที่ 5

ภาคผนวก ข

โปรแกรมสำหรับการหาแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล

โปรแกรมสำหรับการหาแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกล

```
**********************************************************************************************
โปรแกรมสำหรับการหาแบบจำลองของระบบคู่ควบเชิงกลด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์
โดย นายรณเดช จันทรมัส สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2547
**********************************************************************************************
โปรแกรม ident_30.m              % โปรแกรมหาแบบจำลองของระบบในย่านที่ 1 (อินพุตเท่ากับ
                                % 3.0 โวลต์)
load E:\backup_drive_f\data_poten_text\data_30.txt
                                % โหลดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบลง MATLAB
t=0:0.004:0.004*491;            % เวลาที่ใช้ในการทดสอบระบบซึ่งมีเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ
                                % 0.004 วินาที
u=(3*ones(1,492))';             % กำหนดอินพุตเท่ากับ 3 โวลต์โดยมีจำนวนจุดข้อมูลเท่ากับ
                                % 492 จุดข้อมูล
z3=[data_30 u];                 % กำหนดตัวแปร z3 เป็นเมตริกซ์ข้อมูลเอาต์พุตและอินพุต
th=armax(z3,[5 7 3 1]);         % การระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX ซึ่งเก็บ
                                % ผลไว้ที่ตัวแปร th เป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[NUM,DEN] = th2tf(th);          % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาไม่
                                % ต่อเนื่อง
[a,b,c,d]=tf2ss(NUM,DEN);       % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[ab,bb,cb,g,tb]=dbalreal(a,b,c); % การแปลงแบบสมดุลเพื่อใช้ในการลดอันดับของแบบจำลอง
elim=[6:7];                     % กำหนดให้อันดับลดลงเหลือเท่ากับ 5
[ar,br,cr,dr]=dmodred(ab,bb,cb,d,elim); % ลดอันดับของแบบจำลองให้มีอันดับเท่ากับ 5
[numd1,dend1]=ss2tf(ar,br,cr,dr,1) % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน
[numc,denc]=d2cm(numd1,dend1,0.004,'zoh');
                                % เปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนจากเวลาไม่ต่อเนื่องไปเป็นแบบเวลา
                                % ต่อเนื่อง
[z,p,k]=tf2zp(numc,denc);       % เปลี่ยนรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นรูปซีโร โพล และอัตราขยาย
numcc=z(4:5);                   % เลือก numcc ให้มีค่าเป็นซีโร z(4) และ z(5)
a1=poly(numcc);                 % จัดค่าซีโรของ numcc ให้อยู่ในรูปพหุนาม
q1=dcgain(numc,denc)/dcgain(a1,denc); % กำหนดให้ q1 เป็นตัวปรับให้อัตราขยายกระแสตรงของ
                                % tf(a1,denc1) มีค่าเท่ากับ tf(numc,denc)
```

```
sys30=tf(q1*a1,denc);                    %  แบบจำลองของระบบในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีซีโรเท่ากับ 2
                                         %  และโพลเท่ากับ 5
y6=lsim(sys30,u,t);                      %  จำลองสถานการณ์แบบจำลอง sys30 เมื่อป้อนอินพุต u
figure(1);plot(t,y6,'r');hold on;plot(t,data_30);
                                         %  พลอตกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จาก
                                         %  แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบระบบ
```

****

โปรแกรม ident_37.m

```
                                         %  โปรแกรมหาแบบจำลองของระบบในย่านที่ 2 (อินพุตเท่ากับ
                                         %  3.7 โวลต์)
load E:\backup_drive_f\data_poten_text\data_37.txt
                                         %  โหลดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบลง MATLAB
t=0:0.004:0.004*480;                     %  เวลาที่ใช้ในการทดสอบระบบซึ่งมีเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ
                                         %  0.004 วินาที
u=(3.7*ones(1,481))';                    %  กำหนดอินพุตเท่ากับ 3.7 โวลต์โดยมีจำนวนจุดข้อมูลเท่ากับ
                                         %  481 จุดข้อมูล
z3=[data_37 u];                          %  กำหนดตัวแปร z3 เป็นเมตริกซ์ข้อมูลเอาต์พุตและอินพุต
th=armax(z3,[9 11 5 1]);                 %  การระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX ซึ่งเก็บ
                                         %  ผลไว้ที่ตัวแปร th เป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[NUM,DEN] = th2tf(th);                   %  เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาไม่
                                         %  ต่อเนื่อง
[a,b,c,d]=tf2ss(NUM,DEN);                %  เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[ab,bb,cb,g,tb]=dbalreal(a,b,c);         %  การแปลงแบบสมดุลเพื่อใช้ในการลดอันดับของแบบจำลอง
elim=[6:11];                             %  กำหนดให้อันดับลดลงเหลือเท่ากับ 5
[ar,br,cr,dr]=dmodred(ab,bb,cb,d,elim);  %  ลดอันดับของแบบจำลองให้มีอันดับเท่ากับ 5
[numd1,dend1]=ss2tf(ar,br,cr,dr,1);      %  เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน
[numc,denc]=d2cm(numd1,dend1,0.004,'zoh');
                                         %  เปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนจากเวลาไม่ต่อเนื่องไปเป็นแบบเวลา
                                         %  ต่อเนื่อง
[z,p,k]=tf2zp(numc,denc);                %  เปลี่ยนรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นรูปซีโร โพล อัตราขยาย
numcc=z(3:4);                            %  เลือก numcc ให้มีค่าเป็นซีโร z(3) และ z(4)
a1=poly(numcc);                          %  จัดรูปค่าซีโรของ numcc ให้อยู่ในรูปพหุนาม
q1=dcgain(numc,denc)/dcgain(a1,denc);    %  กำหนดให้ q1 เป็นตัวปรับให้อัตราขยายกระแสตรงของ
                                         %  tf(a1,denc1) มีค่าเท่ากับ tf(numc,denc)
sys37=tf(q1*a1,denc);                    %  แบบจำลองของระบบในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีซีโรเท่ากับ 2
```

```
                                    % และโพลเท่ากับ 5
y6=lsim(sys37,u,t);                 % จำลองสถานการณ์แบบจำลอง sys37 เมื่อป้อนอินพุต u
figure(1);plot(t,y6,'r');hold on;plot(t,data_37);
                                    % พลอตกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จาก
                                    % แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบระบบ

**********************************************************************************************
```

โปรแกรม ident_46.m

```
                                    % โปรแกรมหาแบบจำลองของระบบในย่านที่ 3 (อินพุตเท่ากับ
                                    % 4.6 โวลต์)
load E:\backup_drive_f\data_poten_text\data_46.txt
                                    % โหลดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบลง MATLAB
t=0:0.004:0.004*473;                % เวลาที่ใช้ในการทดสอบระบบซึ่งมีเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ
                                    % 0.004 วินาที
u=(4.6*ones(1,474))';               % กำหนดอินพุตเท่ากับ 4.6 โวลต์โดยมีจำนวนจุดข้อมูลเท่ากับ
                                    % 474 จุดข้อมูล
z3=[data_46 u];                     % กำหนดตัวแปร z3 เป็นเมตริกซ์ข้อมูลเอาต์พุตและอินพุต
th=armax(z3,[14 7 8 1]);            % การระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX ซึ่งเก็บ
                                    % ผลไว้ที่ตัวแปร th เป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[NUM,DEN] = th2tf(th);              % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาไม่
                                    % ต่อเนื่อง
[a,b,c,d]=tf2ss(NUM,DEN);           % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[ab,bb,cb,g,tb]=dbalreal(a,b,c);    % การแปลงแบบสมดุลเพื่อใช้ในการลดอันดับของแบบจำลอง
elim=[6:14];                        % กำหนดให้อันดับลดลงเหลือเท่ากับ 5
[ar,br,cr,dr]=dmodred(ab,bb,cb,d,elim); % ลดอันดับของแบบจำลองให้มีอันดับเท่ากับ 5
[numd1,dend1]=ss2tf(ar,br,cr,dr,1)  % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน
[numc,denc]=d2cm(numd1,dend1,0.004,'zoh');
                                    % เปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนจากเวลาไม่ต่อเนื่องไปเป็นแบบเวลา
                                    % ต่อเนื่อง
[z,p,k]=tf2zp(numc,denc);           % เปลี่ยนรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นรูปซีโร โพล อัตราขยาย
numcc=[z(5);-3650];                 % เลือก numcc ให้มีค่าเป็นซีโร z(5) และ -3650
a1=poly(numcc);                     % จัดรูปค่าซีโรของ numcc ให้อยู่ในรูปพหุนาม
q1=dcgain(numc,denc)/dcgain(a1,denc); % กำหนดให้ q1 เป็นตัวปรับให้อัตราขยายกระแสตรงของ
                                    % tf(a1,denc1)  มีค่าเท่ากับ tf(numc,denc)
sys46=tf(q1*a1,denc);               % แบบจำลองของระบบในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีซีโรเท่ากับ 2
                                    % และโพลเท่ากับ 5
```

```
y6=lsim(sys46,u,t);                    % จำลองสถานการณ์แบบจำลอง sys46 เมื่อป้อนอินพุต u
figure(1);plot(t,y6,'r');hold on;plot(t,data_46);
                                       % พลอตกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จาก
                                       % แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบระบบ
```

****

โปรแกรม ident_57.m % โปรแกรมหาแบบจำลองของระบบในย่านที่ 4 (อินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์)

```
load E:\backup_drive_f\data_poten_text\data_57uu.txt
                                       % โหลดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบลง MATLAB
t=0:0.004:0.004*485;                   % เวลาที่ใช้ในการทดสอบระบบซึ่งมีเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ
                                       % 0.004 วินาที
u=(5.7*ones(1,486))';                  % กำหนดอินพุตเท่ากับ 5.7 โวลต์โดยมีจำนวนจุดข้อมูลเท่ากับ
                                       % 486 จุดข้อมูล
z3=[data_57uu u];                      % กำหนดตัวแปร z3 เป็นเมตริกซ์ข้อมูลเอาต์พุตและอินพุต
th=armax(z3,[11 6 3 1]);               % การระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX ซึ่งเก็บ
                                       % ผลไว้ที่ตัวแปร th เป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[NUM,DEN] = th2tf(th);                 % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาไม่
                                       % ต่อเนื่อง
[a,b,c,d]=tf2ss(NUM,DEN);              % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[ab,bb,cb,g,tb]=dbalreal(a,b,c);       % การแปลงแบบสมดุลเพื่อใช้ในการลดอันดับของแบบจำลอง
elim=[6:11];                           % กำหนดให้อันดับลดลงเหลือเท่ากับ 5
[ar,br,cr,dr]=dmodred(ab,bb,cb,d,elim); % ลดอันดับของแบบจำลองให้มีอันดับเท่ากับ 5
[numd1,dend1]=ss2tf(ar,br,cr,dr,1);    % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน
[numc,denc]=d2cm(numd1,dend1,0.004,'zoh');
                                       % เปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนจากเวลาไม่ต่อเนื่องไปเป็นแบบเวลา
                                       % ต่อเนื่อง
[z,p,k]=tf2zp(numc,denc);              % เปลี่ยนรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นรูปซีโร โพล อัตราขยาย
numcc=[z(1);z(5)];                     % เลือก numcc ให้มีค่าเป็นซีโร z(1) และ z(5)
a1=poly(numcc);                        % จัดรูปค่าซีโรของ numcc ให้อยู่ในรูปพหุนาม
q1=dcgain(numc,denc)/dcgain(a1,denc); % กำหนดให้ q1 เป็นตัวปรับให้อัตราขยายกระแสตรงของ
                                       % tf(a1,denc1) มีค่าเท่ากับ tf(numc,denc)
sys57=tf(q1*a1,denc);                  % แบบจำลองของระบบในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีซีโรเท่ากับ 2
                                       % และโพลเท่ากับ 5
y6=lsim(sys57,u,t);                    % จำลองสถานการณ์แบบจำลอง sys57 เมื่อป้อนอินพุต u
```

```
figure(1);plot(t,y6,'r');hold on;plot(t,data_57uu);
                                        %  พลอตกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จาก
                                        %  แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบระบบ
```

****

โปรแกรม ident_68.m

```
                                        %  โปรแกรมหาแบบจำลองของระบบในย่านที่ 5 (อินพุตเท่ากับ
                                        %  6.8 โวลต์)
load E:\backup_drive_f\data_poten_text\data_68.txt
                                        %  โหลดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบลง MATLAB
t=0:0.004:0.004*479;                    %  เวลาที่ใช้ในการทดสอบระบบซึ่งมีเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ
                                        %  0.004 วินาที
u=(6.8*ones(1,480))';                   %  กำหนดอินพุตเท่ากับ 6.8 โวลต์โดยมีจำนวนจุดข้อมูลเท่ากับ
                                        %  480 จุดข้อมูล
z3=[data_68 u];                         %  กำหนดตัวแปร z3 เป็นเมตริกซ์ข้อมูลเอาต์พุตและอินพุต
th=armax(z3,[5 5 3 1]);                 %  การระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX ซึ่งเก็บ
                                        %  ผลไว้ที่ตัวแปร th เป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[NUM,DEN] = th2tf(th);                  %  เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาไม่
                                        %  ต่อเนื่อง
[numc,denc]=d2cm(NUM,DEN,0.004,'zoh');
                                        %  เปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนจากเวลาไม่ต่อเนื่องไปเป็นแบบเวลา
                                        %  ต่อเนื่อง
[z,p,k]=tf2zp(numc,denc);               %  เปลี่ยนรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นรูปซีโร โพล อัตราขยาย
numcc=[z(1);z(4)];                      %  เลือก numcc ให้มีค่าเป็นซีโร z(1) และ z(4)
a1=poly(numcc);                         %  จัดรูปค่าซีโรของ numcc ให้อยู่ในรูปพหุนาม
q1=dcgain(numc,denc)/dcgain(a1,denc);   %  กำหนดให้ q1 เป็นตัวปรับให้อัตราขยายกระแสตรงของ
                                        %  tf(a1,denc1) มีค่าเท่ากับ tf(numc,denc)
sys68=tf(q1*a1,denc);                   %  แบบจำลองของระบบในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีซีโรเท่ากับ 2
                                        %  และโพลเท่ากับ 5
y6=lsim(sys68,u,t);                     %  จำลองสถานการณ์แบบจำลอง sys68 เมื่อป้อนอินพุต u
figure(1);plot(t,y6,'r');hold on;plot(t,data_68);
                                        %  พลอตกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จาก
                                        %  แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบระบบ
```

****

โปรแกรม ident_78.m

```
% โปรแกรมหาแบบจำลองของระบบในย่านที่ 6 (อินพุตเท่ากับ
% 7.8 โวลต์)
load E:\backup_drive_f\data_poten_text\data_78.txt
% โหลดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบลง MATLAB
t=0:0.004:0.004*481; % เวลาที่ใช้ในการทดสอบระบบซึ่งมีเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ
% 0.004 วินาที
u=(7.8*ones(1,482))'; % กำหนดอินพุตเท่ากับ 7.8 โวลต์โดยมีจำนวนจุดข้อมูลเท่ากับ
% 481 จุดข้อมูล
z3=[data_78 u]; % กำหนดตัวแปร z3 เป็นเมตริกซ์ข้อมูลเอาต์พุตและอินพุต
th=armax(z3,[8 7 4 1]); % การระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยแบบจำลอง ARMAX ซึ่งเก็บ
% ผลไว้ที่ตัวแปร th เป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[NUM,DEN] = th2tf(th); % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาไม่
% ต่อเนื่อง
[a,b,c,d]=tf2ss(NUM,DEN); % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง
[ab,bb,cb,g,tb]=dbalreal(a,b,c); % การแปลงแบบสมดุลเพื่อใช้ในการลดอันดับของแบบจำลอง
elim=[6:8]; % กำหนดให้อันดับลดลงเหลือเท่ากับ 5
[ar,br,cr,dr]=dmodred(ab,bb,cb,d,elim); % ลดอันดับของแบบจำลองให้มีอันดับเท่ากับ 5
[numd1,dend1]=ss2tf(ar,br,cr,dr,1); % เปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน
[numc,denc]=d2cm(numd1,dend1,0.004,'zoh');
% เปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนจากเวลาไม่ต่อเนื่องไปเป็นแบบเวลา
% ต่อเนื่อง
[z,p,k]=tf2zp(numc,denc); % เปลี่ยนรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นรูปซีโร โพล อัตราขยาย
numcc=[z(5);-5000]; % เลือก numcc ให้มีค่าเป็นซีโร z(5) และ -5000
a1=poly(numcc); % จัดรูปค่าซีโรของ numcc ให้อยู่ในรูปพหุนาม
q1=dcgain(numc,denc)/dcgain(a1,denc); % กำหนดให้ q1 เป็นตัวปรับให้อัตราขยายกระแสตรงของ
% tf(a1,denc1) มีค่าเท่ากับ tf(numc,denc)
sys78=tf(c*a1,denc); % แบบจำลองของระบบในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีซีโรเท่ากับ 2
% และโพลเท่ากับ 5
figure(50);plot(t,y6,'r');hold on;plot(t,data_78);
% พลอตกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จาก
% แบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบระบบ
```

****

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระบบคู่ควบเชิงกล จะบันทึกด้วยออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS420A ที่มีนามสกุลของไฟล์ที่บันทึกเป็น .CSV จากนั้นทำการโหลดข้อมูลลง MATLAB โดยการคัดลอกข้อมูลที่เป็นขนาดของแรงดันเอาต์พุตที่มีนามสกุลเป็น .CSV ลงโปรแกรม Notepad และบันทึกข้อมูลให้มีนามสกุลเป็น .txt เพื่อโหลดข้อมูลลงยังโปรแกรม MATLAB ส่วนเวลาในการชักตัวอย่าง (sampling time) สำหรับออสซิลโลสโคปรุ่นนี้จะมีการชักตัวอย่างเท่ากับ 0.004 วินาที ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้ง 6 จุดการทำงานจะจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ซึ่งแสดงไว้ท้ายข้อความนี้

data_30'=

```
[   0.00  0.04  0.32  0.48  0.40  0.36  0.32  0.56  0.76  0.68  0.72  0.92  1.00  0.96  0.88
    0.92  1.28  1.36  1.28  1.20  1.12  1.48  1.72  1.68  1.44  1.44  1.76  1.92  1.84  1.84
    1.80  2.08  2.20  2.08  2.00  2.20  2.36  2.24  2.16  2.32  2.48  2.48  2.36  2.40  2.56
    2.68  2.56  2.60  2.60  2.80  2.84  2.88  2.76  2.92  3.00  2.88  2.88  3.00  3.04  3.04
    3.08  3.12  3.20  3.16  2.96  3.24  3.32  3.24  3.24  3.28  3.36  3.32  3.40  3.32  3.48
    3.48  3.40  3.36  3.64  3.56  3.52  3.56  3.76  3.64  3.68  3.68  3.68  3.76  3.76  3.68
    3.72  3.80  3.76  3.76  3.84  3.80  3.84  3.84  3.84  4.00  3.92  3.84  3.92  4.04  3.92
    3.96  4.00  4.04  4.00  4.20  4.00  4.04  4.16  4.20  4.08  4.16  4.20  4.12  4.12  4.20
    4.20  4.20  4.12  4.24  4.20  4.16  4.12  4.20  4.32  4.24  4.28  4.40  4.28  4.28  4.32
    4.28  4.36  4.36  4.36  4.32  4.48  4.36  4.36  4.40  4.44  4.40  4.40  4.36  4.48  4.48
    4.40  4.44  4.52  4.40  4.40  4.44  4.44  4.40  4.48  4.48  4.56  4.56  4.60  4.48  4.56
    4.56  4.56  4.52  4.56  4.52  4.56  4.56  4.56  4.56  4.56  4.44  4.60  4.56  4.56  4.64
    4.60  4.60  4.64  4.64  4.56  4.60  4.68  4.64  4.56  4.76  4.68  4.60  4.64  4.72  4.68
    4.68  4.64  4.68  4.68  4.68  4.64  4.68  4.56  4.64  4.64  4.72  4.56  4.68  4.72  4.68
    4.76  4.68  4.68  4.68  4.76  4.64  4.68  4.72  4.68  4.68  4.80  4.72  4.72  4.80  4.72
    4.72  4.72  4.76  4.72  4.72  4.80  4.76  4.76  4.68  4.76  4.76  4.76  4.64  4.76  4.76
    4.76  4.76  4.92  4.76  4.80  4.76  4.76  4.76  4.80  4.72  4.76  4.84  4.72  4.72  4.84
    4.76  4.80  4.80  4.80  4.84  4.76  4.80  4.76  4.88  4.68  4.76  4.76  4.76  4.72  4.76
    4.80  4.84  4.80  4.88  4.80  4.76  4.84  4.76  4.80  4.84  4.80  4.84  4.92  4.80  4.76
    4.80  4.72  4.84  4.80  4.76  4.76  4.84  4.80  4.84  4.88  4.72  4.84  4.76  4.80  4.72
    4.92  4.84  4.80  4.84  4.92  4.84  4.84  4.80  4.84  4.84  4.76  4.80  4.80  4.80  4.84
    4.84  4.80  4.72  4.84  4.84  4.80  4.88  4.96  4.80  4.80  4.92  4.76  4.88  4.88  4.80
    4.80  4.92  4.84  4.80  4.84  4.88  4.84  4.84  4.84  4.84  4.84  4.88  4.84  4.84  4.76
    4.88  4.84  4.84  4.76  4.88  4.84  4.76  4.92  4.96  4.88  4.84  4.92  4.84  4.88  4.80
    4.84  4.84  4.88  4.80  4.80  4.84  4.88  4.88  4.84  4.84  4.92  4.88  4.92  4.84  4.92
    4.76  4.88  4.84  4.84  4.76  5.00  4.88  4.80  4.92  4.92  4.84  4.88  4.88  4.84  4.88
    4.88  4.80  4.88  4.80  4.88  4.84  4.84  4.72  4.84  4.92  4.84  4.92  4.84  4.84  4.84
    4.92  4.76  4.84  4.80  4.84  4.76  4.92  4.88  4.80  4.88  4.88  4.84  4.88  4.88  4.84
    4.84  4.88  4.84  4.88  4.76  4.84  4.84  4.84  4.72  4.88  4.84  4.84  4.92  4.96  4.84
    4.84  4.88  4.84  4.80  4.84  4.84  4.84  4.88  4.88  4.84  4.84  4.88  4.88  4.84  4.84
    4.88  4.88  4.84  4.84  4.88  4.72  4.84  4.84  4.80  4.76  5.00  4.84  4.84  4.92  4.96
    4.88  4.88  4.92  4.80  4.84  4.84  4.80  4.88  4.76  4.84  4.80  4.84  4.76  4.76  4.84
    4.88  4.88  4.84  4.80  4.84  4.92  4.84  4.88  4.88  4.84  4.80  4.96]
```

data_37'=

```
[   0.00  0.16  0.24  0.48  0.64  0.64  0.80  1.12  1.04  0.96  1.20  1.36  1.52  1.52  1.44
    1.60  1.92  2.00  1.92  1.84  2.24  2.32  2.24  2.24  2.40  2.64  2.64  2.56  2.48  2.88
    2.96  3.04  2.88  3.04  3.44  3.20  3.20  3.28  3.44  3.36  3.36  3.44  3.68  3.76  3.52
    3.68  3.92  3.92  3.92  3.76  4.08  4.16  4.16  4.08  4.32  4.32  4.24  4.24  4.32  4.56
    4.48  4.40  4.56  4.56  4.64  4.64  4.72  4.80  4.72  4.72  4.80  4.88  4.88  4.88  4.96
    4.80  5.12  4.96  5.04  5.12  5.04  5.36  5.12  5.36  5.28  5.28  5.20  5.36  5.44  5.36
    5.44  5.28  5.52  5.52  5.52  5.68  5.52  5.60  5.52  5.60  5.68  5.68  5.68  5.76  5.76
    5.68  5.76  5.76  5.84  5.84  5.84  5.92  6.08  5.92  6.00  5.84  5.92  6.00  6.00  6.00
    6.08  6.00  5.76  5.92  6.08  6.08  6.08  6.00  6.24  6.16  6.16  6.08  6.16  6.16  6.16
    6.24  6.24  6.40  6.08  6.24  6.24  6.32  6.48  6.24  6.32  6.32  6.40  6.40  6.40  6.48
    6.40  6.32  6.32  6.48  6.64  6.40  6.40  6.40  6.48  6.56  6.40  6.48  6.48  6.48  6.40
```

6.48 6.48 6.48 6.40 6.32 6.80 6.56 6.56 6.48 6.40 6.64 6.56 6.48 6.56 6.64
6.56 6.56 6.64 6.64 6.72 6.40 6.64 6.72 6.72 6.72 6.56 6.72 6.72 6.64 6.72
6.80 6.64 6.64 6.72 6.64 6.80 6.88 6.72 6.72 6.72 6.80 6.72 6.80 6.80 6.72
6.72 6.72 6.80 6.80 6.64 6.72 6.48 6.96 6.80 6.72 6.80 6.72 6.80 6.72 6.80
6.88 6.88 6.48 6.80 6.88 6.88 6.88 6.72 6.80 6.88 6.80 6.88 6.96 6.88 6.80
6.80 6.88 7.04 6.72 6.80 6.88 6.80 6.88 6.96 6.96 6.88 6.80 6.88 6.96 7.04
6.88 6.80 6.96 6.88 6.88 6.80 6.80 6.88 6.72 6.88 6.88 6.96 6.96 6.72 6.96
6.96 6.96 6.88 6.88 6.80 6.88 6.88 6.88 7.04 6.88 6.88 6.88 6.96 7.04 6.88
6.88 6.88 7.04 6.88 6.96 6.88 6.88 6.88 6.80 7.12 7.12 6.96 6.80 6.88 6.96
6.96 6.96 6.96 6.88 6.88 6.88 6.96 6.96 6.96 6.88 6.80 7.12 6.88 6.88 6.96
6.96 6.96 6.80 6.96 7.04 7.04 6.72 6.88 6.96 6.96 7.04 6.80 7.04 6.88 6.96
6.96 7.04 6.96 6.96 6.96 6.96 7.04 6.96 6.96 6.88 6.96 7.04 7.04 6.96 6.96
6.80 6.96 6.96 7.04 6.96 6.96 6.96 6.88 6.96 6.96 7.04 6.88 6.80 7.04 7.04
6.96 6.88 6.96 6.96 6.96 6.96 6.96 7.12 6.80 6.96 6.96 6.96 7.04 6.88 6.96
6.96 6.96 6.96 7.04 7.04 6.96 6.88 7.04 7.12 7.12 6.96 6.96 6.88 6.96 6.96
6.96 7.04 6.96 6.96 6.96 6.96 6.96 6.96 7.04 6.88 7.20 6.88 7.04 6.96 6.80
6.96 6.96 6.96 6.96 6.96 6.96 7.04 6.96 7.04 7.12 6.80 6.96 6.96 6.96 7.04
6.88 6.96 6.96 6.96 7.04 7.04 6.96 7.04 6.96 6.96 7.04 7.20 6.96 6.96 6.96
7.04 7.04 6.88 7.04 6.96 6.96 6.88 6.96 6.96 7.04 6.96 6.72 7.20 6.96 7.04
6.88 6.88 7.12 6.96 6.96 6.96 6.96 6.80 7.04 6.96 6.96 7.12 6.80 7.04 6.96
7.04 7.12 6.96 6.96 6.88 6.96 6.96 7.12 6.96 6.96 6.96 6.96 7.12 7.12 7.04
6.96]

data_46'=
[0.00 0.40 1.12 1.20 1.20 1.04 1.12 1.28 1.92 2.00 2.00 1.92 1.76 2.24 2.64
2.64 2.64 2.32 2.88 3.36 3.28 3.12 3.12 3.60 3.84 3.76 3.52 3.92 4.24 4.32
4.16 4.00 4.48 4.80 4.72 4.56 4.64 5.04 5.04 4.88 4.96 5.44 5.52 5.36 5.28
5.68 5.92 5.76 5.68 5.68 6.16 6.00 6.00 5.92 6.24 6.40 6.32 6.32 6.48 6.72
6.48 6.48 6.64 6.88 6.88 6.48 6.88 6.96 7.12 7.04 7.04 7.20 7.28 7.20 7.20
7.52 7.44 7.44 7.36 7.28 7.84 7.60 7.60 7.68 7.68 7.84 7.76 7.92 8.08 8.08
7.92 8.00 8.08 8.08 8.24 8.16 8.24 8.32 8.40 8.40 8.40 8.48 8.40 8.40 8.56
8.64 8.64 8.56 8.64 8.72 8.64 8.72 8.88 8.72 8.80 8.80 8.88 8.96 8.88 8.88
9.04 9.04 9.04 8.96 9.04 9.12 9.04 8.88 9.12 9.20 9.20 9.12 9.12 9.44 9.36
9.36 9.28 9.20 9.36 9.36 9.20 9.36 9.44 9.52 9.52 9.44 9.60 9.68 9.52 9.52
9.60 9.84 9.60 9.60 9.68 9.76 9.76 9.68 9.76 9.84 9.84 9.60 9.84 9.84 9.92
10.0 9.60 9.84 9.92 9.92 9.92 9.84 10.00 9.92 9.92 9.84 9.92 10.00 10.00 10.00
10.0 10.16 10.00 10.08 10.00 10.00 10.08 10.08 10.08 10.08 10.0 10.16 10.16 10.16 10.24
10.1 10.16 10.24 10.16 10.40 10.40 10.24 10.24 10.32 10.40 10.24 10.32 10.32 10.40 10.24
10.24 10.40 10.40 10.48 10.16 10.40 10.24 10.48 10.48 10.24 10.40 10.56 10.40 10.32 10.40
10.48 10.48 10.32 10.32 10.56 10.40 10.48 10.40 10.40 10.64 10.48 10.48 10.40 10.48 10.48
10.56 10.48 10.64 10.48 10.56 10.48 10.56 10.56 10.56 10.48 10.56 10.48 10.64 10.72 10.56
10.56 10.64 10.64 10.48 10.64 10.64 10.64 10.48 10.56 10.56 10.64 10.64 10.40 10.64 10.64
10.64 10.72 10.48 10.72 10.72 10.64 10.56 10.56 10.72 10.64 10.64 10.56 10.72 10.56 10.64
10.56 10.48 10.72 10.72 10.64 10.64 10.56 10.64 10.72 10.64 10.72 10.72 10.72 10.72 10.64
10.72 10.80 10.64 10.64 10.64 10.80 10.64 10.64 10.72 10.72 10.72 10.72 10.64 10.72 10.80
10.64 10.72 10.72 10.72 10.80 10.48 10.72 10.72 10.72 10.72 10.56 10.72 10.72 10.72 10.64
10.64 10.72 10.72 10.72 10.64 10.80 10.72 10.72 10.72 10.72 10.72 10.72 10.72 10.72 10.64
10.72 10.72 10.72 10.88 10.72 10.80 10.72 10.64 10.88 10.80 10.72 10.72 10.80 10.80 10.72
10.80 10.80 10.80 10.72 10.72 10.72 10.72 10.88 10.64 10.72 10.80 10.72 10.88 10.72 10.72
10.72 10.72 10.80 10.80 10.72 10.72 10.72 10.56 10.80 10.72 10.80 10.64 10.64 10.88 10.80
10.72 10.72 10.64 10.72 10.72 10.72 10.80 10.72 10.72 10.72 10.72 10.88 10.80 10.72 10.72
10.64 10.88 10.88 10.80 10.80 10.72 10.80 10.72 10.72 10.72 10.72 10.64 10.72 10.72 10.80
10.88 10.64 10.72 10.80 10.80 10.80 10.64 10.72 10.72 10.72 10.72 10.80 10.80 10.72 10.72
10.48 10.80 10.72 10.72 10.72 10.72 11.04 10.80 10.72 10.72 10.64 10.72 10.72 10.64 10.80
10.72 10.80 10.72 10.72 10.88 10.80 10.80 10.80 10.72 10.88 10.72 10.72 10.72 10.88 10.80
10.72 10.72 10.72 10.88 10.56 10.80 10.72 10.80 10.88]

data_57'=
[0.00 0.40 1.10 1.70 1.30 1.30 1.30 2.10 2.70 2.50 2.30 2.30 2.90 3.50 3.50
3.50 3.30 3.70 4.30 4.30 3.90 4.30 4.70 5.10 4.90 4.90 5.30 5.70 5.70 5.50
5.70 6.10 6.50 6.30 6.30 6.70 6.90 6.70 6.70 6.90 7.30 7.30 7.30 7.30 7.70
7.90 7.70 7.90 8.10 8.30 8.10 8.30 8.50 8.50 8.50 8.70 8.70 8.90 9.10 9.10

9.10 9.30 9.30 9.30 9.70 9.70 9.70 9.70 9.70 10.10 10.10 9.90 9.90 10.10 10.50
10.30 10.30 10.50 10.50 10.70 10.70 10.70 10.70 10.70 11.10 11.10 11.10 11.10 11.10 11.50
11.30 11.50 11.50 11.50 11.70 11.50 11.70 11.70 11.70 11.90 11.90 11.90 11.90 12.10 12.10
12.10 12.10 12.10 11.90 12.30 12.30 12.50 12.30 12.30 12.50 12.50 12.70 12.50 12.50 12.70
12.70 12.70 12.70 12.70 12.90 12.70 13.10 12.90 12.90 12.90 13.10 13.30 13.10 13.10 12.90
13.30 13.30 13.30 13.30 13.30 13.50 13.50 13.50 13.50 13.50 13.50 13.50 13.50 13.70 13.50
13.70 13.50 13.70 13.70 13.50 13.70 13.90 13.90 13.90 13.70 13.70 13.90 14.10 13.90 13.90
14.10 13.90 13.90 14.10 13.90 14.10 14.10 14.30 14.30 14.10 14.10 14.30 14.30 14.10 14.10
14.30 14.50 14.30 14.50 14.30 14.50 14.30 14.30 14.50 14.30 14.50 14.50 14.50 14.50 14.10
14.50 14.50 14.50 14.70 14.50 14.50 14.50 14.50 14.70 14.50 14.70 14.50 14.50 14.70 14.70
14.70 14.70 14.90 14.90 14.90 14.90 14.90 14.70 14.90 14.90 14.90 14.90 14.90 14.90 14.90
14.90 15.10 14.90 14.90 15.10 15.10 14.90 15.10 15.10 14.90 15.10 15.10 14.90 15.10 15.10
15.30 15.10 14.90 15.10 15.10 15.30 15.10 15.10 15.10 15.10 15.10 15.10 15.30 15.10 15.30
15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.10 15.50 15.10 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30
15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.50 15.50 15.50 15.30 15.30 15.30 15.50
15.30 15.50 15.30 15.30 15.50 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.10 15.30 15.30 15.50
15.30 15.50 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.50 15.30 15.30 15.30 15.70 15.50 15.50
15.30 15.50 15.50 15.30 15.50 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.30 15.70 15.30 15.30 15.50
15.50 15.70 15.50 15.50 15.50 15.30 15.70 15.50 15.50 15.50 15.50 15.70 15.50 15.50 15.50
15.50 15.70 15.50 15.70 15.50 15.50 15.50 15.70 15.50 15.50 15.50 15.70 15.50 15.70 15.50
15.50 15.70 15.50 15.50 15.30 15.50 15.50 15.70 15.70 15.50 15.50 15.50 15.50 15.70 15.50
15.70 15.50 15.70 15.70 15.50 15.70 15.50 15.50 15.70 15.70 15.50 15.50 15.70 15.50 15.50
15.50 15.70 15.70 15.50 15.50 15.50 15.50 15.50 15.70 15.50 15.50 15.50 15.50 15.70 15.70
15.50 15.50 15.70 15.50 15.70 15.50 15.50 15.70 15.50 15.50 15.70 15.50 15.70 15.70 15.70
15.90 15.50 15.70 15.70 15.50 15.70 15.50 15.50 15.70 15.70 15.70 15.50 15.50 15.70 15.50
15.70 15.70 15.50 15.70 15.50 15.70 15.30 15.70 15.50 15.70 15.70 15.50 15.70 15.70 15.70
15.70 15.50 15.50 15.70 15.70 15.70 15.50 15.70 15.70 15.70 15.70 15.70 15.70 15.70 15.70
15.70 15.70 15.70 15.70 15.50 15.70 15.70 15.50 15.50 15.70 15.90 15.90 15.70 15.50 15.70
15.70 15.70 15.70 15.70 15.70 15.50]

data_68'=

[0.00 0.80 1.60 1.20 1.20 1.60 2.40 2.60 2.40 2.40 3.20 3.80 3.40 3.40 4.00
4.40 4.60 4.20 4.80 5.20 5.40 5.40 5.40 6.20 6.20 6.00 6.20 6.80 7.00 6.80
7.00 7.40 7.80 7.80 7.60 8.00 8.20 8.20 8.60 8.60 9.00 8.80 9.00 9.20 9.60
9.40 9.40 9.80 10.0 10.40 10.00 10.20 10.60 10.6 11.00 10.80 11.00 11.20 11.20 11.40
11.60 11.60 11.40 11.60 12.00 12.00 12.20 12.20 12.40 12.80 12.40 12.60 12.80 13.00 12.60
13.00 13.20 13.40 13.20 13.20 13.60 13.60 13.60 14.00 14.00 14.20 14.00 14.20 14.40 14.60
14.60 14.40 14.40 14.60 14.60 14.80 14.80 15.00 15.00 15.00 15.20 15.20 15.20 15.20 15.40
15.60 15.80 15.60 15.60 15.60 15.80 15.80 15.80 16.00 16.00 16.20 16.00 16.00 16.20 16.20
16.00 16.40 16.40 16.40 16.40 16.60 16.60 16.80 16.60 16.80 16.80 16.80 16.80 17.00 17.00
17.20 17.00 17.20 17.20 17.20 17.40 17.20 17.40 17.40 17.40 17.40 17.40 17.60 17.60 17.60
17.60 17.60 17.80 17.60 17.80 17.80 17.80 17.80 17.80 18.00 18.00 17.60 17.80 18.40 18.20
18.00 18.20 18.20 18.20 18.20 18.20 18.40 18.40 18.20 18.20 18.40 18.40 18.60 18.40 18.60
18.40 18.40 18.40 18.80 18.80 18.60 18.60 18.80 18.80 19.00 18.80 18.80 18.80 18.60 18.80
18.80 18.80 19.00 18.80 19.20 19.20 19.00 19.00 19.00 19.20 19.00 19.20 19.20 19.20 19.20
19.40 19.20 19.20 19.40 19.20 19.20 19.20 19.20 19.40 19.40 19.40 19.20 19.40 19.20 19.40
19.40 19.40 19.40 19.40 19.60 19.60 19.40 19.40 19.40 19.60 19.40 19.80 19.40 19.40 19.40
19.60 19.40 19.60 19.60 19.60 19.80 19.80 19.60 19.60 19.80 19.60 20.00 19.80 19.60 19.80
19.80 20.00 19.80 19.80 19.80 19.80 20.00 19.80 19.80 19.80 19.80 20.00 19.80 20.00 19.80
20.00 19.80 20.00 20.00 19.80 19.80 20.00 20.20 19.80 20.00 20.00 20.00 20.00 19.80 19.80
20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.20 20.00 19.80 20.00 20.00 20.00 20.00
20.00 20.00 20.20 20.00 20.00 20.20 20.20 20.00 20.20 20.00 20.00 20.20 20.00 20.20 20.20
20.20 20.20 20.20 20.20 20.00 20.00 20.20 20.40 20.00 20.20 20.00 20.20 20.20 20.20 20.40
20.20 20.20 20.20 20.20 20.40 20.20 20.20 20.20 20.40 20.40 20.20 20.00 20.20 20.20 20.20
20.20 20.20 20.20 20.00 20.20 20.40 20.20 20.20 20.20 20.20 20.40 20.20 20.40 20.40 20.40
20.20 20.40 20.20 20.40 20.20 20.40 20.20 20.20 20.20 20.20 20.40 20.20 20.20 20.20 20.40
20.40 20.20 20.20 20.20 20.40 20.20 20.20 20.40 20.40 20.20 20.40 20.40 20.40 20.20 20.20
20.40 20.40 20.20 20.40 20.20 20.40 20.40 20.40 20.40 20.20 20.40 20.40 20.60 20.60 20.40
20.20 20.40 20.20 20.40 20.60 20.20 20.20 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.60 20.00 20.40
20.20 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.60 20.40 20.20 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40
20.40 20.20 20.60 20.40 20.20 20.40 20.40 20.40 20.60 20.40 20.20 20.20 20.40 20.40 20.40
20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.40 20.60 20.40 20.20 20.40 20.40 20.40
20.20 20.20 20.40 20.40 20.20 20.20 20.60 20.40 20.40 20.60 20.20 20.40 20.20 20.60 20.40]

data_78’=

```
[  0.00  1.40  2.00  1.80  1.60  2.00  3.00  3.20  3.20  3.20  4.20  4.60  4.40  4.40  5.00
   5.40  5.80  5.60  5.80  6.40  7.00  6.80  6.80  7.20  7.60  7.60  7.60  8.20  8.60  8.60
   8.60  9.20  9.40  9.60  9.40  9.60 10.20 10.20 10.20 10.60 11.00 10.80 11.00 11.20 11.60
  11.80 11.60 11.80 12.20 12.40 12.40 12.40 13.00 13.00 13.00 13.20 13.60 13.60 13.60 13.80
  13.80 14.40 14.60 14.20 14.20 14.80 15.00 14.80 15.00 15.20 15.40 15.20 15.40 15.80 15.80
  16.00 16.00 16.20 16.40 16.20 16.40 16.40 16.60 16.60 16.80 17.00 17.20 17.20 17.20 17.40
  17.60 17.80 17.40 17.60 18.00 18.00 17.80 18.00 18.20 18.20 18.20 18.40 18.60 18.80 18.60
  18.60 18.80 19.00 19.00 19.20 19.20 19.20 19.20 19.40 19.40 19.60 19.40 19.60 19.60 19.80
  20.00 19.60 19.80 20.00 20.00 20.20 20.00 20.20 20.40 20.40 20.40 20.60 20.60 20.60 20.60
  20.80 20.80 20.80 21.00 21.00 21.00 20.80 21.20 21.00 21.20 21.00 21.20 21.40 21.40 21.40
  21.40 21.40 21.60 21.40 21.80 21.60 21.80 21.80 21.80 21.60 21.60 22.00 22.00 21.80 22.00
  22.00 22.00 22.20 22.00 22.00 22.00 22.40 22.40 22.20 22.20 22.20 22.40 22.40 22.40 22.60
  22.40 22.60 22.40 22.40 22.60 23.00 22.60 22.60 22.60 22.60 22.60 22.80 22.80 22.80 22.80
  23.00 23.00 22.80 23.00 23.00 23.20 23.20 23.00 23.20 23.20 23.20 23.20 23.20 23.40 23.40
  23.20 23.20 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.40 23.60
  23.60 23.40 23.40 23.60 23.60 23.60 23.80 23.60 23.60 23.80 23.60 23.60 24.00 23.80 23.80
  23.60 23.80 23.80 24.20 23.80 23.80 23.80 23.80 24.00 23.80 23.80 23.80 24.00 24.00 24.00
  24.20 24.00 23.80 24.00 24.00 24.20 24.20 24.00 24.00 24.00 24.20 24.20 24.20 23.80 24.00
  24.20 24.20 24.20 24.00 24.20 24.20 24.20 24.20 24.20 24.40 24.20 24.20 24.20 24.20 24.40
  24.20 24.20 24.00 24.60 24.60 24.20 24.20 24.40 24.40 24.40 24.60 24.20 24.40 24.40 24.40
  24.40 24.40 24.60 24.20 24.40 24.20 24.60 24.60 24.20 24.40 24.40 24.40 24.40 24.60 24.20
  24.40 24.40 24.40 24.60 24.60 24.60 24.40 24.60 24.40 24.80 24.40 24.40 24.40 24.60 24.60
  24.60 24.60 24.40 24.60 24.40 24.60 24.40 24.60 24.60 24.60 24.60 24.60 24.80 24.60 24.60
  24.40 24.80 24.80 24.80 24.40 24.80 24.40 24.80 24.80 24.60 24.80 24.80 24.80 24.60 24.80
  24.80 24.80 24.60 24.60 24.80 24.60 24.60 24.40 24.60 25.00 24.60 24.80 24.60 24.80 24.60
  24.80 24.80 24.40 24.80 24.80 24.60 24.60 25.20 25.00 24.60 24.60 24.80 24.80 24.80 24.60
  24.60 24.80 25.00 25.00 24.60 24.80 24.80 24.80 24.60 24.60 24.80 25.00 24.60 24.60 24.60
  25.00 24.80 24.80 24.80 24.80 25.00 24.80 24.60 24.80 24.80 24.80 24.60 24.40 25.00 25.00
  24.80 24.80 24.80 25.00 24.80 24.60 24.60 25.00 24.80 24.80 24.80 24.80 25.00 24.80 24.80
  24.80 25.00 25.00 25.00 24.60 24.60 25.20 25.00 24.80 24.80 24.80 24.80 25.20 24.60 24.80
  24.80 25.00 25.00 24.80 24.80 24.80 25.00 24.80 24.80 25.00 25.00 25.00 24.40 25.20 25.00
  24.80 24.80 24.80 25.00 25.00 24.80 24.80 25.00 24.80 24.80 24.80 25.00 24.80 24.80 24.80
  24.80 24.80]
```

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชย PID ด้วยวิธีการต่างๆ

ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชย PID ด้วยวิธีการต่างๆ

ในภาคผนวก ค. จะนำเสนอขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชย PID ด้วยวิธีการต่างๆ เพิ่มเติมจากวิธีการออกแบบในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการออกแบบได้ดังต่อไปนี้

- Phillips และ Harbor (2000) ได้เสนอวิธีการออกแบบด้วยวิธีทางเดินของราก ซึ่งต้องกำหนดตำแหน่งโพลเด่นของระบบวงปิดให้อยู่ในตำแหน่งตามต้องการที่ s_1 และทำการกำหนดมุม β และ ψ โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (ค-1) และ (ค-2) ตามลำดับ

$$s_1=\left|s_1\right|e^{j\beta} \tag{ค-1}$$

$$k_1KG(s_1)H(s_1)=\left|k_1KG(s_1)H(s_1)\right|e^{j\psi} \tag{ค-2}$$

จากนั้นจึงทำการออกแบบเพื่อหาค่า K_P, K_I, K_D ตามสมการที่ (ค-3) และ (ค-4)

$$K_P=\frac{-\sin(\beta+\psi)}{\left|k_1KG(s_1)H(s_1)\right|\sin(\beta)}-\frac{2K_I\cos(\beta)}{\left|s_1\right|} \tag{ค-3}$$

$$K_D=\frac{\sin(\psi)}{\left|s_1\right|\left|k_1KG(s_1)H(s_1)\right|\sin(\beta)}+\frac{K_I}{\left|s_1\right|^2} \tag{ค-4}$$

จะเห็นว่ามีเพียง 2 สมการเพื่อที่จะใช้หาค่าพารามิเตอร์จำนวน 3 ตัว ดังนั้นในการดำเนินงานจึงต้องทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่งก่อน แนวทางหนึ่งจะเลือก K_I เพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวตามที่ต้องการ และทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหลือตามสมการข้างต้น

- Persson (1993) ได้เสนอการออกแบบ PID ด้วยการวางจัดวางโพลของระบบวงรอบปิดซึ่งกำหนดโพลเด่นตามที่ต้องการ (s_1) เป็นดังสมการที่ (ค-5)

$$s_1=-\zeta_0\omega_0+j\omega_0\sqrt{1-\zeta_0^2} \tag{ค-5}$$

จากนั้น คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ K_P, K_I, K_D ตามสมการที่ (ค-6)-(ค-7)

$$K_P = -\frac{\sqrt{1-\zeta_0^2}X_3+(\alpha_0^2-1)\zeta_0 BC}{X_1} \quad \text{(ค-6)}$$

$$K_I = -\alpha_0\omega_0\frac{(\alpha_0-\zeta_0)BC+X_2}{X_1} \quad \text{(ค-7)}$$

$$K_D = -\frac{(\alpha_0\zeta_0-1)BC+\alpha_0 X_2}{\omega_0 X_1} \quad \text{(ค-8)}$$

โดยที่

$$A = \text{Real}\left\{k_1 KG(s_1)\right\} \quad \text{(ค-9)}$$

$$B = \text{Imag}\left\{k_1 KG(s_1)\right\} \quad \text{(ค-10)}$$

$$C = k_1 KG(-\alpha_0\omega_0) \quad \text{(ค-11)}$$

$$X_1 = (1-2\alpha_0\zeta_0+\alpha_0^2)\sqrt{1-\zeta_0^2}(A^2+B^2)C \quad \text{(ค-12)}$$

$$X_2 = \sqrt{1-\zeta_0^2}(AC-A^2-B^2) \quad \text{(ค-13)}$$

$$X_3 = -2\alpha_0\zeta_0(A^2+B^2)+(1+\alpha_0^2)AC \quad \text{(ค-14)}$$

โดยทั่วไป ค่าพารามิเตอร์ α_0 จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 และสำหรับระบบที่เกิดรีโซแนนซ์จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.4

- Matinez Salcedo และ Muñoz (2000) เสนอแนวทางการออกแบบโดยกำหนดโพลเด่นของระบบวงปิดที่ต้องการดังสมการที่ (ค-15) โดยที่ค่า σ และ ω_P สามารถหาได้จากการกำหนดช่วงเวลาเข้าที่ (T_s) และเวลาที่เกิดค่ายอดสูงสุด (T_p) แสดงดังสมการที่ (ค-16) และ (ค-17) ตามลำดับ

$$s_1 = -\zeta\omega_0 + j\omega_0\sqrt{1-\zeta_0^2} = -\sigma \pm j\omega_P \quad \text{(ค-15)}$$

$$\sigma = \frac{4}{T_s(98\%)} \quad \text{(ค-16)}$$

$$\omega_P = \frac{\pi}{T_p} \quad \text{(ค-17)}$$

และจะได้สมการลักษณะเฉพาะของระบบวงปิดเป็นดังสมการที่ (ค-18)

$$1+G_c(s)k_1KG(s)H(s) = 0 \quad \text{(ค-18)}$$

จากสมการที่ (ค-18) ทำการหาค่า $G_c(s)$ ตามสมการที่ (ค-19)

$$G_c(s)\big|_{s=s_1} = -\left.\frac{1}{k_1KG(s)H(s)}\right|_{s=s_1} = \text{Real}(G_c)\big|_{s=s_1} + j\text{Imag}(G_c)\big|_{s=s_1} \quad \text{(ค-19)}$$

จากสมการที่ (ค-19) จะพิจารณาเทอมของ $\text{Imag}(G_c)$ ซึ่งแบ่งได้ 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ค่า $\text{Imag}(G_c) = 0$

ถ้าไม่มีส่วนจินตภาพ บล็อก G_c จะใช้เพียงค่าอัตราขยาย K_P ก็เพียงพอ โดยที่สามารถหาค่า K_P ได้จากสมการที่ (ค-20)

$$G_c = K_P = \text{Real}(G_c(s))\big|_{s=s_1} \quad \text{(ค-20)}$$

ถ้า G_c ดังสมการที่ (ค-20) ทำให้ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวเกิดขึ้น ในกรณีนี้ จะเลือกใช้ตัวชดเชยเป็นแบบ PI ตามสมการที่ (ค-21)

$$G_c(s) = \frac{K_P(s+a)}{s} \quad \text{(ค-21)}$$

โดยที่ K_P และ a สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ค-20) และ (ค-22) ตามลำดับ

$$a = -\frac{\text{Real}(s_1)}{\text{ratio}} \quad ; \text{ratio} \in [6,10] \tag{ค-22}$$

กรณีที่ 2 ค่า $\text{Imag}(G_c) \neq 0$

กำหนดให้ ตัวชดเชย G_c มีรูปแบบเป็นดังสมการที่ (ค-23)

$$G_c(s) = \frac{K_a(s+b)(s+a)}{s} \tag{ค-23}$$

จากสมการที่ (ค-23) สามารถหาค่าพารามิเตอร์ a, K_a และ b ได้จากสมการที่ (ค-20), (ค-24) และ (ค-25) ตามลำดับ

$$K_a = \frac{\text{Im}}{\omega_0\sqrt{1-\zeta_0^2}} \tag{ค-24}$$

$$b = \omega_0\zeta_0 + \frac{\text{Re}}{\text{Im}}\omega_0\sqrt{1-\zeta_0^2} \tag{ค-25}$$

โดยที่

$$\text{Im} = -\text{Imag}\left(\left.\frac{s}{(s+a)k_1KG(s)H(s)}\right|_{s=s_1}\right) \tag{ค-26}$$

$$\text{Re} = -\text{Real}\left(\left.\frac{s}{(s+a)k_1KG(s)H(s)}\right|_{s=s_1}\right) \tag{ค-27}$$

- Kristiansson และ Lennartson (2000) ได้เสนอแนวทางการจูนค่าตัวชดเชย PID ที่มีวงจรกรองแบบผ่านต่ำร่วมด้วย ซึ่งมีรูปแบบตัวชดเชยแสดงดังสมการที่ (ค-28) โดยต้องคำนวณหาค่า κ ดังแสดงในสมการที่ (ค-29)

$$G_c(s) = k_a\frac{1+2\zeta\tau s+(\tau s)^2}{s\left(1+s\frac{\tau}{\beta}\right)} \tag{ค-28}$$

$$\kappa = \frac{|G(j\omega_\pi)|}{|G(0)|} \qquad \text{(ค-29)}$$

โดยที่ ω_π คือ ความถี่ที่ทำให้พลานต์มีมุมเฟสล้าหลัง 180 องศา

สำหรับพลานต์ที่มีค่า $\kappa \geq 0.1$ จะมีวิธีการจูนเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวชดเชยดังแสดงในสมการที่ (ค-30)-(ค-34)

$$k_\infty = \begin{cases} \frac{1}{|G(0)|}(13\text{-}20\kappa) & ; \kappa \leq 0.5 \\ \frac{1}{|G(0)|}3.0 & ; \kappa > 0.5 \end{cases} \qquad \text{(ค-30)}$$

$$\zeta = 0.8 \qquad \text{(ค-31)}$$

$$k_a = \frac{\omega_\pi}{|G(0)|}(1.6\kappa^2\text{-}2.3\kappa\text{+}1.1) \qquad \text{(ค-32)}$$

$$\frac{1}{\tau} = \omega_\pi(0.37\text{+}\kappa) \qquad \text{(ค-33)}$$

$$\beta = \frac{k_\infty}{\tau k_a} \qquad \text{(ค-34)}$$

- Castelo และ Garcia (2002) ได้เสนอแนวทางการจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวชดเชย PID ที่มีรูปแบบ เป็นดังสมการที่ (3-7) โดยมีวิธีการออกแบบ 2 แบบดังต่อไปนี้

วิธีที่ 1 กำหนดค่าส่วนเผื่อเฟส ($\varnothing_m$) ที่ต้องการที่ความถี่ ω_1 และสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของ PID ได้ดังสมการที่ (ค-35)-(ค-39)

$$K_P = \frac{\cos(\theta_c)}{|k_1 KG(j\omega_1)|} \qquad \text{(ค-35)}$$

$$\theta_c = 180 + \varnothing_m - \angle k_1 KG(j\omega_1) \qquad \text{(ค-36)}$$

$$T_d = \frac{\tan(\theta_c)+\sqrt{\tan(\theta_c)^2+\frac{4}{K_t}}}{2\omega_1} \qquad \text{(ค-37)}$$

$$K_D = K_P T_d \qquad \text{(ค-38)}$$

$$K_I = \frac{K_P}{K_t T_d} \quad ; \quad 2 \le K_t \le 8 \qquad \text{(ค-39)}$$

วิธีที่ 2 กำหนดค่าส่วนเผื่ออัตราขยาย (A_m) ที่ต้องการที่ความถี่ ω_1 และสามารถคำนวณค่า K_P ได้จากสมการที่ (ค-40)-(ค-41) ส่วนค่า K_I และ K_D สามารถหาได้จากการออกแบบตามวิธีที่ 1 ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (ค-38)-(ค-39)

$$K_P = \frac{\cos(\theta_c)}{A_m \left| k_1 KG(j\omega_1) \right|} \qquad \text{(ค-40)}$$

$$\theta_c = 180 - \angle k_1 KG(j\omega_1) \qquad \text{(ค-41)}$$

ภาคผนวก ง

การออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล ที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์

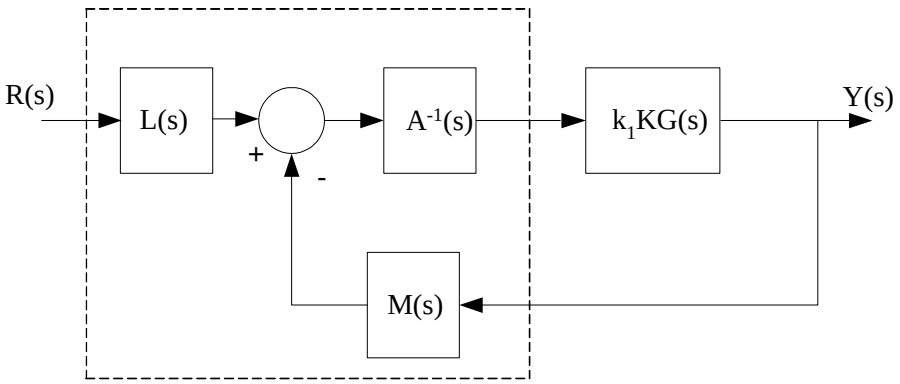
การออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล ที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์

ในภาคผนวก ง. จะกล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบตัวชดเชยด้วยการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ ซึ่งต้องกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบรวม (overall transfer function) ขึ้นเป็นอันดับแรก โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวสามารถหาด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ และทำการหาตัวชดเชยด้วยวิธีพีชคณิตเชิงเส้น โดยตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบสามารถแยกได้เป็นสองชุด คือ ตัวชดเชยป้อนไปหน้า (forward compensator) ที่มีผลต่อการปรับปรุงผลตอบสนองของระบบตามที่ต้องการ และตัวชดเชยป้อนกลับ (feedback compensator) ที่มีผลต่อการกำหนดโพลและรักษาเสถียรภาพของระบบ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ระบบที่ผ่านการชดเชยแล้วเพื่อดูผลตอบสนองของระบบทั้งทางเวลาและทางความถี่

การออกแบบตัวชดเชยด้วยการจัดวางตำแหน่งโพล

ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชย

โครงสร้างของระบบที่ออกแบบตัวชดเชยด้วยการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ง.1 และเมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจาก $R(s)$ ไปยัง $Y(s)$ จะเป็นดังสมการที่ (ง-1)



รูปที่ ง.1 โครงสร้างของระบบที่ออกแบบด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{L(s)A^{-1}(s)k_1KG(s)}{1+A^{-1}(s)M(s)k_1KG(s)}$$

$$= \frac{L(s)N(s)}{A(s)D(s)+M(s)N(s)} \qquad (ง\text{-}1)$$

โดยที่ $k_1KG(s) = N(s)/D(s)$ และ อันดับของ $N(s) < D(s) = n$

กำหนดให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบรวมทั้งหมด $G_0(s)$ เป็นดังสมการที่ (ง-2) และสามารถหาตัวชดเชยป้อนไปหน้า (forward compensator) $L(s)/A(s)$ และตัวชดเชยป้อนกลับ (feedback compensator) $M(s)/A(s)$ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (Chen, 1993)

$$G_0(s) = \frac{N_0(s)}{D_0(s)} = \frac{L(s)N(s)}{A(s)D(s)+M(s)N(s)} \qquad (ง\text{-}2)$$

ขั้นตอนที่ 1) นำ $N(s)$ หาร $G_0(s)$ ได้เป็นสมการที่ (ง-3)

$$\frac{G_0(s)}{N(s)} = \frac{N_0(s)}{D_0(s)N(s)} = \frac{N_p(s)}{D_p(s)} \qquad (ง\text{-}3)$$

ถ้ากำหนดให้ $N_0(s) = N(s)$ แล้วจะได้ $D_p(s) = D_0(s)$ และ $N_p(s) = 1$ ซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าว สามารถจัดรูปสมการที่ (ง-2) ใหม่ได้เป็นสมการที่ (ง-4)

$$G_0(s) = \frac{N_p(s)N(s)}{D_p(s)} = \frac{L(s)N(s)}{A(s)D(s)+M(s)N(s)} \qquad (ง\text{-}4)$$

ขั้นตอนที่ 2) เลือกพหุนามเฮอร์วิทซ์ $\overline{D}_p(s)$ ที่ทำให้อันดับของ $D_p(s)\overline{D}_p(s)$ มีค่าอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 2n-1 หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ถ้ากำหนดให้อันดับของ $D_p(s) = p$ แล้ว อันดับของ $\overline{D}_p(s)$ จะต้องมีค่าอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 2n-1-p

ขั้นตอนที่ 3) เขียนสมการที่ (ง-4) ใหม่ได้ดังสมการที่ (ง-5)

$$G_0(s) = \frac{N(s)N_p(s)}{D_p(s)} = \frac{N(s)\left[N_p(s)\overline{D}_p(s)\right]}{D_p(s)\overline{D}_p(s)} = \frac{N(s)L(s)}{A(s)D(s)+M(s)N(s)} \qquad (ง\text{-}5)$$

และถ้ากำหนดให้ L(s) เป็นดังสมการที่ (ง-6) จะสามารถแก้สมการหาค่า A(s) และ M(s) ได้จากสมการที่ (ง-7)

$$L(s) = N_p(s)\overline{D}_p(s) \tag{ง-6}$$

$$A(s)D(s)+M(s)N(s) = D_p(s)\overline{D}_p(s) = F(s) \tag{ง-7}$$

ถ้ากำหนดให้ A(s) , M(s) และ F(s) มีรูปแบบสมการเป็นดังสมการที่ (ง-8)-(ง-10) ตามลำดับ

$$A(s) = A_0+A_1s+...+A_ms^m \tag{ง-8}$$

$$M(s) = M_0+M_1s+...+M_ms^m \tag{ง-9}$$

$$F(s) = D_p(s)\overline{D}_p(s) = F_0+F_1s+...+F_{n+m}s^{n+m} \tag{ง-10}$$

โดยที่ $m \geq n-1$ แล้ว สามารถหาค่า A(s) และ M(s) โดยการใช้สมการพีชคณิตเชิงเส้นที่จัดในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (ง-11)

$$\begin{bmatrix} D_0 & N_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ D_1 & N_1 & D_0 & N_0 & \cdots & M & M \\ M & M & M & M & \cdots & 0 & 0 \\ D_n & N_n & D_{n-1} & N_{n-1} & \cdots & D_0 & N_0 \\ 0 & 0 & D_n & N_n & \cdots & D_1 & N_1 \\ M & M & M & M & \cdots & M & M \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & D_n & N_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ M_0 \\ A_1 \\ M_1 \\ M \\ A_m \\ M_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ M \\ F_{n+m} \end{bmatrix} \tag{ง-11}$$

การออกแบบตัวชดเชยของระบบคู่ควบเชิงกล

การกำหนดให้ $G_0(s)$ จะใช้หลักการเลือกโพลเด่น เพื่อให้ผลตอบสนองทางเวลาตามที่ต้องการ โดยกำหนดให้ มีค่าเวลาเข้าที่เท่ากับ 0.55 วินาที และ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินไม่เกิน 0.1% ดังนั้นตำแหน่งของโพลเด่น อยู่ที่ $-7.27 \pm 3.32j$ และโพลด้อย (insignificant pole) อยู่ที่ -3000

-4000 และ -4000 ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ $G_0(s)$ เป็นดังสมการที่ (ง-12) และดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

$$G_0(s) = \frac{3.58\times10^{12}}{s^5+1.151\times10^4 s^4+4.42\times10^7 s^3+5.66\times10^{10}s^2+8.17\times10^{11}s+3.58\times10^{12}} \quad \text{(ง-12)}$$

ขั้นตอนที่ 1) นำ $N(s)$ หาร $G_0(s)$ ได้เป็นสมการที่ (ง-13)

$$\frac{G_0(s)}{N(s)} = \frac{N_p(s)}{D_p(s)}$$

$$= \frac{3.2\times10^6}{(s^5+1.15\times10^4 s^4+4.42\times10^7 s^3+5.66\times10^{10}s^2+8.17\times10^{11}s+3.58\times10^{12})}\times$$

$$\frac{1}{s^2+1.24\times10^3 s+1.15\times10^5} \quad \text{(ง-13)}$$

ขั้นตอนที่ 2) อันดับของ $\overline{D}_p(s)$ จะมีค่าเท่ากับ 2 และเลือกพหุนามเฮอร์วิทซ์เป็นดังสมการที่ (ง-14)

$$\overline{D}_p(s) = (s+4000)^2 = s^2+8000s+1.6\times10^7 \quad \text{(ง-14)}$$

ขั้นตอนที่ 3) หาค่า $L(s)$ จากสมการที่ (ง-6) ได้เป็นสมการที่ (ง-15) และคำนวณหาสมการที่ (ง-7) ได้เป็นสมการที่ (ง-16)

$$L(s) = 3.2\times10^6(s^2+8000s+1.6\times10^7) \quad \text{(ง-15)}$$

$$A(s)D(s)+M(s)N(s) = D_p(s)\overline{D}_p(s)$$

$$= s^9+2.08\times10^4 s^8+1.77\times10^8 s^7+7.86\times10^{11}s^6+1.92\times10^{15}s^5$$

$$+2.42\times10^{18}s^4+1.28\times10^{21}s^3+1.21\times10^{23}s^2+1.57\times10^{24}s+6.56\times10^{24} \quad \text{(ง-16)}$$

ดำเนินการแก้สมการที่ (ง-16) เพื่อหา A(s) และ M(s) ได้ดังสมการที่ (ง-17) และ (ง-18) ตามลำดับ ซึ่งสามารถจัดรูปแบบเป็นตัวชดเชยป้อนไปหน้าและตัวชดเชยป้อนกลับได้ดังสมการที่ (ง-19) และ (ง-20) ตามลำดับ

$$A(s) = s^4 + 2.05\times10^4 s^3 + 1.71\times10^8 s^2 + 1.84\times10^{11} s + 1.68\times10^{13} \quad \text{(ง-17)}$$

$$M(s) = 4.87\times10^5 s^4 + 9.83\times10^8 s^3 + 8.10\times10^{11} s^2 + 6.89\times10^{12} s + 3.44\times10^{13} \quad \text{(ง-18)}$$

$$G_f(s) = \frac{L(s)}{A(s)}$$

$$= \frac{3.2\times10^6 (s^2 + 8000s + 1.6\times10^7)}{s^4 + 2.05\times10^4 s^3 + 1.71\times10^8 s^2 + 1.84\times10^{11} s + 1.68\times10^{13}} \quad \text{(ง-19)}$$

$$G_{fb}(s) = \frac{M(s)}{A(s)}$$

$$= \frac{4.87\times10^5 s^4 + 9.83\times10^8 s^3 + 8.10\times10^{11} s^2 + 6.89\times10^{12} s + 3.44\times10^{13}}{s^4 + 2.05\times10^4 s^3 + 1.71\times10^8 s^2 + 1.84\times10^{11} s + 1.68\times10^{13}} \quad \text{(ง-20)}$$

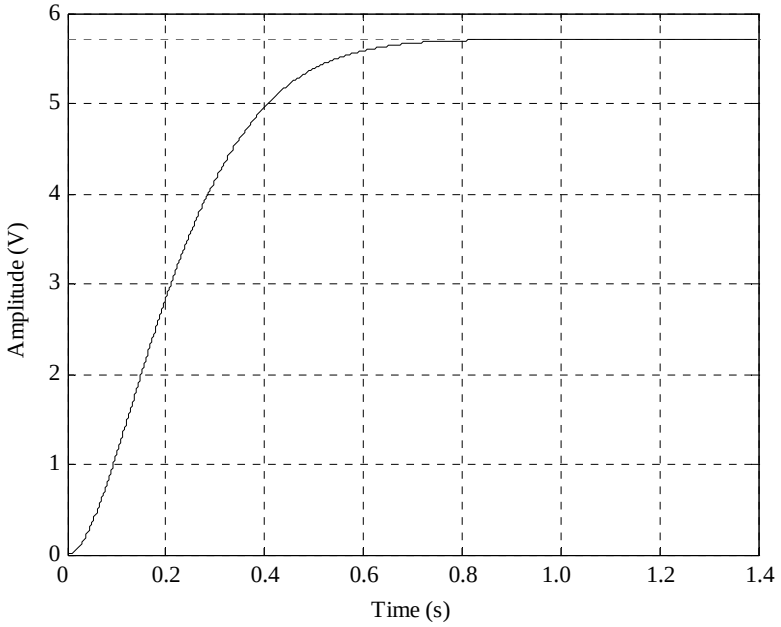
ผลการจำลองสถานการณ์ระบบ

หลังจากออกแบบตัวชดเชยในหัวข้อที่แล้ว จะเป็นการจำลองสถานการณ์ระบบที่ผ่านการชดเชยด้วยโปรแกรม MATLAB โดยแบ่งผลการจำลองสถานการณ์เป็นผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

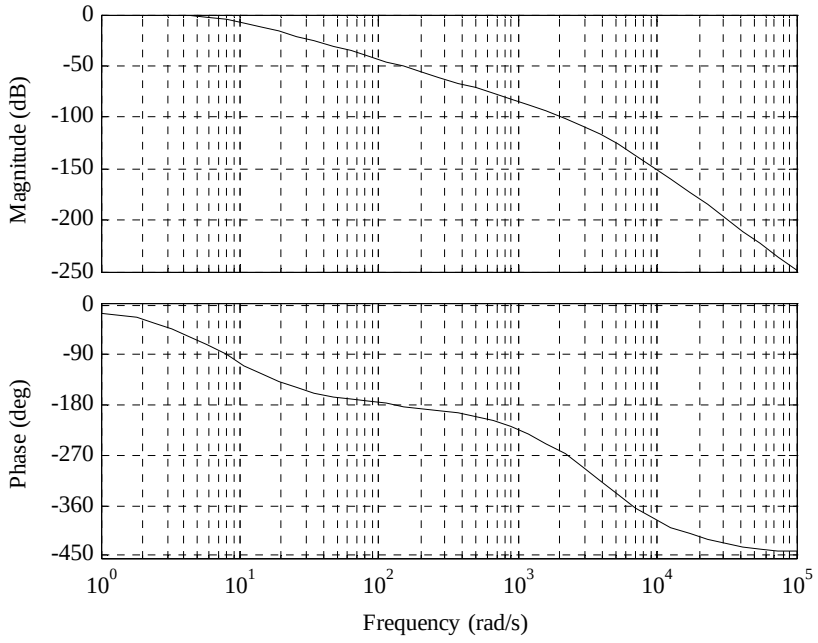
เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาของระบบหลังผ่านการชดเชยแล้วดังแสดงในรูปที่ ง.2 พบว่า รีโซแนนซ์การบิดได้ถูกกำจัดโดยสิ้นเชิง โดยที่ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่คือช่วงเวลาขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.366 วินาที ช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 0.60 วินาที และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินเท่ากับ 0.1%

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ จากรูปที่ ง.3 ซึ่งแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิด จะพบว่า ระบบจะไม่มีรีโซแนนซ์ และมีแบนวิดท์กว้างเท่ากับ 5.86 เรเดียนต่อวินาที แต่เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดแสดงดังรูปที่ ง.4 เพื่อดูเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบโดยรวม พบว่า ระบบที่มีตัวชดเชยจะให้ค่า ส่วนเผื่ออัตราขยายเท่ากับ -38.5 เดซิเบล ส่วนเผื่อเฟสเท่ากับ 34 องศา ซึ่งค่าส่วนเผื่ออัตราขยายมีค่าติดลบ จะเป็นตัวบ่งบอกว่าระบบมีแนวโน้มที่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย ดังนั้นตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบแม้ว่าสามารถกำจัดรี

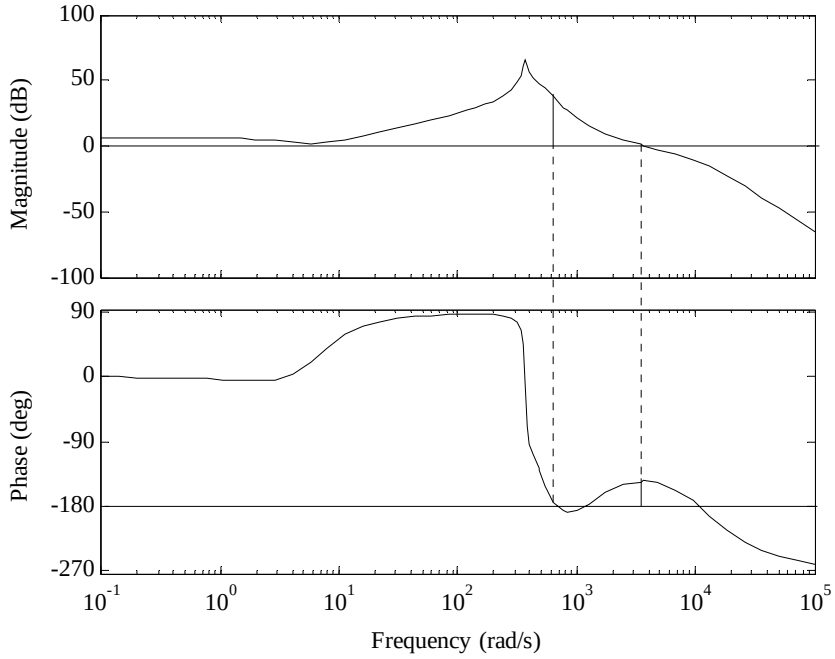
โซแนนซ์การบิดได้และให้ผลตอบสนองทางเวลาตามที่ต้องการ แต่มีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรได้ จึงไม่เลือกใช้ตัวชดเชยจากการออกแบบด้วยวิธีนี้กับระบบคู่ควบเชิงกล



รูปที่ ง.2 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบที่ใช้ตัวชดเชยที่นำเสนอ



รูปที่ ง.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงปิดที่ใช้ตัวชดเชยที่นำเสนอ



รูปที่ ง.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดที่ใช้ตัวชดเชยที่นำเสนอ

สรุป

จากการออกแบบตัวชดเชยด้วยการจัดวางตำแหน่งโพลที่มีโครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์เพื่อที่จะกำจัดรีโซแนนซ์การบิดและให้ผลตอบสนองตามที่ต้องการแล้ว เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ระบบหลังผ่านการชดเชย พบว่า ตัวชดเชยที่ออกแบบไว้สามารถกำจัดรีโซแนนซ์การบิดได้ เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาและทางความถี่ แต่เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบที่มีตัวชดเชย พบว่าระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่าย ดังนั้นตัวชดเชยที่ได้จากการออกแบบจะไม่เหมาะที่นำมาใช้ชดเชยให้กับระบบคู่ควบเชิงกล

ภาคผนวก จ

รายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดด้วยวิธีการควบคุมแบบคลาสสิก” วารสารสงขลานครินทร์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 26 ฉบับที่ 6 พ.ย.-ธ.ค. 2547 หน้า 895-906.

ประวัติผู้เขียน

นายรณเดช จันทรมัส เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2524 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับสอง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 ขณะศึกษาระดับปริญญาโท เคยสอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งปฏิบัติการระบบควบคุมและการวัด และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา 1 บทความ ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก จ. มีความสนใจทางด้านระบบควบคุม การออกแบบและอนุวัตด้วยเทคโนโลยีแอนะลอกและดิจิตอล