

การออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ทำหน้าที่ได้ส่วนเพื่ออัตราขยาย
และส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ

นายณัฐพล มีเดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**DESIGN OF PHASE LAG-LEAD COMPENSATORS
FOR ACCURATE GAIN AND PHASE MARGINS**

Nuttapol Meedech

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Mechatronics

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ลำนำให้มีส่วนเพื่ออัตราขยาย
และส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ศ. น.ท. ดร.สรวิชัย สุจิตจร)

กรรมการ

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐพล มีเดช : การออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้าให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ (DESIGN OF PHASE LAG-LEAD COMPENSATORS FOR ACCURATE GAIN AND PHASE MARGINS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 143 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้า ที่ให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ โดยนำเสนอวิธีการออกแบบไว้สองวิธี วิธีแรกเป็นการประยุกต์ใช้วิธี BODE COMPENSATOR DESIGN ของ WAKELAND (1976) และ MITCHELL (1977) ร่วมกับวิธีการของ WANG ET AL. (2006) วิธีที่สองเป็นวิธีการที่พัฒนาต่อจากวิธีการของ WANG ET AL. (2006) โดยนอกจากจะให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำแล้ว ยังสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่กำหนดอีกด้วย โดยใช้หลักการหาผลเฉลยของสมการสี่สมการสี่ตัวแปร คำนวณให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการ ร่วมกับการปรับแต่งอัตราขยายดีซีของตัวชดเชยเพื่อให้ได้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวตามที่กำหนด



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

NUTTAPOL MEEDECH : DESIGN OF PHASE LAG-LEAD
COMPENSATORS FOR ACCURATE GAIN AND PHASE MARGINS.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D.,
143 PP.

GAIN MARGIN/PHASE MARGIN/D.C. GAIN/STEADY STATE ERROR

In this thesis, two design methods for phase lag-lead compensators to achieve specific gain and phase margins are proposed. The first method is combination between Bode compensator design method (Wakeland, 1976; Mitchell, 1977) and Tuning of phase lead compensator method (Wang et al., 2006). The second method is developed from Wang et al. (2006) method which can control steady state error, too. Principle of the second method are using four equations, four variables to find solution for accurate gain and phase margins and using d.c.gain tuning to satisfy the requirement on the given static error constant.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จล่งด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดขึ้นมิได้ ถ้าหากไม่ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล และศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิสุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือสนับสนุน ให้คำปรึกษา และชี้แนะทางในการทำวิจัย ตลอดจนคอยกระตุ้นให้กำลังใจ จนทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการฟันฝ่าอุปสรรคต่าง ๆ จนผ่านไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความเมตตาของท่านสุดทายเป็นขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของการศึกษาเป็นอย่างดี ผู้วิจัยรู้สึกสำนึกในความเสียสละของท่านมาโดยตลอด

ณัฐพล มีเดช



สารบัญ

หน้า

| | |
|--|-----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ซ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | ฎ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น..... | 3 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนการวิจัย..... | 5 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 5 |
| 1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์..... | 6 |
| 2 การออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหน้าด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006)..... | 7 |
| 2.1 กล่าวนำ..... | 7 |
| 2.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหน้าตามวิธีการของ Wang et al. (2006)..... | 8 |
| 2.3 ผลการออกแบบกับพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะ..... | 14 |
| 2.4 สรุป..... | 36 |
| 3 การออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหลัง-ลำหน้าให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำด้วยการผสมผสานวิธีการเดิมกับวิธีการใหม่..... | 38 |
| 3.1 กล่าวนำ..... | 38 |
| 3.2 ขั้นตอนการออกแบบ..... | 38 |

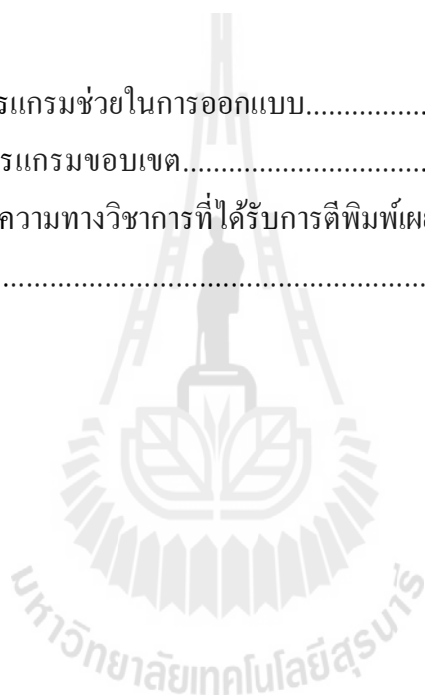
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.3 | ผลการออกแบบ..... | 42 |
| 3.4 | สรุป..... | 66 |
| 4 | การออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล่าหน้าให้ได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพอย่างแม่นยำและจำกัด ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว..... | 67 |
| 4.1 | กล่าวนำ..... | 67 |
| 4.2 | การพัฒนาสูตรเพื่อการออกแบบ..... | 68 |
| 4.3 | ขั้นตอนการออกแบบ..... | 73 |
| 4.4 | ผลการออกแบบ..... | 74 |
| 4.5 | สรุป..... | 98 |
| 5 | การประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยในการออกแบบ..... | 99 |
| 5.1 | กล่าวนำ..... | 99 |
| 5.2 | โครงสร้างของโปรแกรม..... | 99 |
| 5.3 | ขั้นตอนการออกแบบ..... | 101 |
| 5.4 | ผลการออกแบบ..... | 101 |
| 5.5 | สรุป..... | 103 |
| 6 | การกำหนดขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟส..... | 104 |
| 6.1 | กล่าวนำ..... | 104 |
| 6.2 | โครงสร้างของโปรแกรม..... | 104 |
| 6.3 | ขั้นตอนการออกแบบ..... | 105 |
| 6.4 | ผลการออกแบบ..... | 106 |
| 6.5 | สรุป..... | 109 |
| 7 | การประยุกต์ใช้งานกับระบบทางอุตสาหกรรม..... | 110 |
| 7.1 | กล่าวนำ..... | 110 |
| 7.2 | ผลการทดสอบ..... | 110 |
| 7.3 | สรุป..... | 115 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 8 สรุปและข้อเสนอแนะ..... | 116 |
| 8.1 สรุป..... | 116 |
| 8.2 ข้อเสนอแนะ..... | 118 |
| รายการอ้างอิง..... | 119 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก โปรแกรมช่วยในการออกแบบ..... | 121 |
| ภาคผนวก ข โปรแกรมขอบเขต..... | 128 |
| ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา..... | 135 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 143 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 2.1 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ตัวอย่าง.....12 |
| 2.2 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 1.....17 |
| 2.3 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 2.....21 |
| 2.4 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 3.....25 |
| 2.5 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 4.....30 |
| 2.6 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 5.....33 |
| 2.7 | สรุปผลการทดสอบ.....37 |
| 3.1 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 1 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....44 |
| 3.2 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 2 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....48 |
| 3.3 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 3 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....53 |
| 3.4 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 4 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....57 |
| 3.5 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 5 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....61 |
| 3.6 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 7 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....64 |
| 4.1 | อัตราขยายดีซีของตัวชดเชยหลังจากปรับแต่งด้วยวิธีการปรับสัดส่วน.....72 |
| 4.2 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 1 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ.....77 |
| 4.3 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 2 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ.....81 |
| 4.4 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 3 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ.....84 |
| 4.5 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 4 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ.....88 |
| 4.6 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 5 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ.....92 |
| 4.7 | ผลการตอบสนองของพลาเน็ตต์ 7 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ.....96 |
| 7.1 | ผลการตอบสนองหลังชดเชยด้วยวิธีการทั้งสามวิธี.....114 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1.1 | โครงสร้างของระบบควบคุมวงปิดที่พิจารณา..... | 4 |
| 2.1 | กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ตต์ตัวอย่าง..... | 10 |
| 2.2 | แผนภาพโบลด์ของระบบก่อนและหลังการชดเชย..... | 11 |
| 2.3 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดก่อนและหลังการชดเชย..... | 12 |
| 2.4 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย..... | 14 |
| 2.5 | กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ตต์ 1..... | 15 |
| 2.6 | แผนภาพโบลด์ก่อนและหลังการชดเชยของพลาเน็ตต์ 1..... | 16 |
| 2.7 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ตต์ 1..... | 16 |
| 2.8 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ตต์ 1..... | 18 |
| 2.9 | กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ตต์ 2..... | 19 |
| 2.10 | แผนภาพโบลด์ก่อนและหลังการชดเชยของพลาเน็ตต์ 2..... | 20 |
| 2.11 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ตต์ 2..... | 22 |
| 2.12 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ตต์ 2..... | 23 |
| 2.13 | กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ตต์ 3..... | 24 |
| 2.14 | แผนภาพโบลด์ก่อนและหลังการชดเชยของพลาเน็ตต์ 3..... | 26 |
| 2.15 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ตต์ 3..... | 26 |
| 2.16 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ตต์ 3..... | 27 |
| 2.17 | กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ตต์ 4..... | 28 |
| 2.18 | แผนภาพโบลด์ก่อนและหลังการชดเชยของพลาเน็ตต์ 4..... | 29 |
| 2.19 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ตต์ 4..... | 29 |
| 2.20 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ตต์ 4..... | 31 |
| 2.21 | กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ตต์ 5..... | 32 |
| 2.22 | แผนภาพโบลด์ก่อนและหลังการชดเชยของพลาเน็ตต์ 5..... | 34 |
| 2.23 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ตต์ 5..... | 34 |
| 2.24 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ตต์ 5..... | 35 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 4.9 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 3).....84 |
| 4.10 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 3).....85 |
| 4.11 | แผนภาพโบลของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 4).....87 |
| 4.12 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 4).....87 |
| 4.13 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 4).....89 |
| 4.14 | แผนภาพโบลของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 5).....91 |
| 4.15 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 5).....91 |
| 4.16 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 5).....93 |
| 4.17 | แผนภาพโบลของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 7).....95 |
| 4.18 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 7).....95 |
| 4.19 | ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 7).....97 |
| 5.1 | โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวชดเชย.....100 |
| 5.2 | ตัวอย่างการป้อนฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้คำสั่ง Find & Replace.....101 |
| 5.3 | การแสดงผลใน Command Window ของพลาเน็ต 1.....102 |
| 5.4 | การแสดงผลใน Command Window ของพลาเน็ต 2.....103 |
| 6.1 | โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมขอบเขต.....105 |
| 6.2 | ตัวอย่างการป้อนฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้คำสั่ง Find & Replace.....105 |
| 6.3 | ขอบเขตการออกแบบสำหรับพลาเน็ต 1.....106 |
| 6.4 | แผนภาพโบลเมื่อชดเชยด้วยวิธีการทั้งสามแบบในย่านเสถียรภาพสูง (พลาเน็ต 1).....107 |
| 6.5 | ขอบเขตการออกแบบสำหรับพลาเน็ต 2.....108 |
| 6.6 | แผนภาพโบลเมื่อชดเชยด้วยวิธีการทั้งสามแบบในย่านเสถียรภาพสูง (พลาเน็ต 2).....109 |
| 7.1 | ขอบเขตการออกแบบสำหรับพลาเน็ต AVR (Rahimian and Raahemifar, 2011).....111 |
| 7.2 | แผนภาพโบลของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006).....112 |
| 7.3 | แผนภาพโบลของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการในบทที่ 3.....112 |
| 7.4 | แผนภาพโบลของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการในบทที่ 4.....113 |
| 7.5 | ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิด.....114 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|---------------------------------|---|---|
| α | = | พารามิเตอร์สำหรับกำหนดขนาดและมุมของตัวชดเชย |
| α_1 | = | พารามิเตอร์สำหรับกำหนดขนาดและมุมของตัวชดเชย |
| λ | = | พารามิเตอร์เพื่อปรับแต่งสำหรับกำหนดจุดตัดขนาด |
| ω_g | = | ความถี่ตัดขนาดของพลาเน็ตว่รอบเปิดหลังการชดเชย |
| ω_{Gp} | = | ความถี่ตัดเฟสของพลาเน็ตว่รอบเปิดก่อนชดเชย |
| $\omega_{0dB,new}$ | = | ความถี่ตัดขนาดที่ตำแหน่งใหม่สำหรับตัวชดเชยเฟสล้ำหลังแบบพีชคณิต |
| ϕ_m | = | ส่วนเฟสที่ต้องการ (เรเดียน) |
| A, B, C, q, r, m | = | พารามิเตอร์สำหรับคำนวณตัวชดเชยเฟสล้ำหลังแบบพีชคณิต |
| A_m | = | ส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการ เป็นค่าจริงไม่แสดงหน่วย |
| AVR | = | Automatic Voltage Regulator (ตัวปรับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ) |
| dB | = | Decibel (หน่วยวัดขนาด) |
| e_{ss} | = | ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว |
| $f_1(\omega)$ | = | ฟังก์ชันตัวแรกที่ใช้สำหรับพล็อตกราฟตามวิธีของ Wang et al. (2006) |
| $f_2(\omega)$ | = | ฟังก์ชันตัวที่สองที่ใช้สำหรับพล็อตกราฟตามวิธีของ Wang et al. (2006) |
| $G(j\omega)$ | = | พลาเน็ตว่รอบเปิด ณ ความถี่ต่าง ๆ (เรเดียนต่อวินาที) |
| $G(j\omega_g)$ | = | พลาเน็ตว่รอบเปิด ณ ความถี่ตัดขนาดหลังการชดเชย (เรเดียนต่อวินาที) |
| $G_c(s)$ | = | ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย |
| $G_{lag}(s)$ | = | ตัวชดเชยเฟสล้ำหลัง |
| $G_{lead}(s)$ | = | ตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า |
| $G_p(s)$ | = | ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดของพลาเน็ตก่อนการชดเชย |
| GM | = | Gain Margin (ส่วนเพื่ออัตราขยาย) |
| $Im[]$ | = | ส่วนของค่าจินตภาพ |
| K | = | อัตราขยายสำหรับกำหนดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว |
| K_c | = | อัตราขยายของตัวชดเชย |
| K_{lag} | = | อัตราขยายของตัวชดเชยเฟสล้ำหลัง |
| K_{lead} | = | อัตราขยายของตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า |
| $\lim_{s \rightarrow 0} G_p(s)$ | = | ลิมิตสำหรับคำนวณหาอัตราขยายดีซีของพลาเน็ตว่รอบเปิดก่อนชดเชย |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | | |
|---------|---|------------------------------------|
| PM | = | Phase Margin (ส่วนเฟส) |
| rad/sec | = | เรเดียนต่อวินาที (หน่วยวัดความถี่) |
| Re[] | = | ส่วนของค่าจริง |
| s | = | วินาที |
| T | = | ค่าคงที่ทางเวลาของตัวชดเชย |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวชดเชยเฟสทำหน้าที่เพิ่มหรือลดส่วนเพื่อเฟสของระบบ ใช้ในกรณีที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมเน้นข้อกำหนดของระดับความคงทนทางเฟสเป็นหลัก ถึงแม้ว่าตัวควบคุมประเภทพีไอดีสามารถใช้เป็นตัวชดเชยเฟสได้เช่นเดียวกัน แต่ในการออกแบบจะทำได้ไม่สะดวกและผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ดีเท่ากับการใช้ตัวชดเชยเฟสโดยตรง การออกแบบตัวชดเชยเฟสสามารถที่จะเลือกชดเชยเฟสที่ความถี่ที่ต้องการได้โดยที่กระทบกับความถี่อื่นน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามในการออกแบบเรายังคงต้องนำคำพิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัว และผลตอบสนองชั่วคราวเข้ามาร่วมพิจารณาด้วย เพื่อการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่ดีของตัวชดเชย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจการออกแบบตัวชดเชยเฟสในโดเมนความถี่ เพื่อให้ระดับความคงทนหรือส่วนเพื่อเฟสของระบบควบคุม มีค่าตามที่ต้องการ การออกแบบตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า ตัวชดเชยเฟสล้ำหลัง และตัวชดเชยผสมเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้า ได้รับการพัฒนามาโดยลำดับ ในระยะแรก ๆ นั้นการออกแบบใช้วิธีลองผิดลองถูก ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบที่ยังไม่ชำนาญใช้เวลาค่อนข้างมากเพื่อดำเนินงาน ในปี ค.ศ. 1976 Wakeland (1976) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า และตัวชดเชยเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้า ที่ใช้การคำนวณแก้สมการพีชคณิตกำลังสองแทนวิธีลองผิดลองถูก โดยพิจารณาเฟสและอัตราขยาย ณ ความถี่ที่ต้องการ ซึ่งวิธีการของ Wakeland (1976) ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการออกแบบด้วยการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการของ Wakeland (1976) สามารถกำหนดได้เพียงส่วนเพื่อเฟสเท่านั้นเนื่องจากพิจารณาที่ความถี่เพียงความถี่เดียว ในปีถัดมา Mitchell (1977) ได้ให้ความเห็นว่าวิธีการของ Wakeland (1976) สามารถใช้กับตัวชดเชยแบบเฟสล้ำหลังได้ด้วย โดยการพิจารณาเงื่อนไขของเฟสและอัตราขยาย ในปี ค.ศ. 1995 Dorf et al. (1995) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า-ล้ำหลังที่อาศัยโพลเด่นหนึ่งคู่ เพื่อให้ได้สมรรถนะในโดเมนเวลาตามที่ต้องการ ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถออกแบบให้ได้เวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกินในช่วงที่ต้องการ โดยไม่ใช้การคำนวณ แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบที่ไม่ปรากฏโพลเด่นอย่างชัดเจนหรือมีโพลเด่นมากกว่าหนึ่งคู่ วิธีการนี้ไม่สามารถใช้ได้ผล และปัญหาอีกประการหนึ่งก็คือ การต้องใช้ตัวกรอง (prefilter) เพิ่มเข้าไปอยู่ในส่วนด้านหน้าของระบบวงรอบปิด เพื่อแก้ปัญหาคำพิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัว ต่อมาได้มีการพัฒนาการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า ตัวชดเชยเฟสล้ำหลัง และตัวชดเชยแบบผสมเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้า โดยใช้วิธีการคำนวณเข้ามาช่วย ในปี ค.ศ. 1998 Yeung (1998) ได้นำเสนอวิธีการ

ออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้า โดยไม่ใช้วิธีลองผิดลองถูก แต่นำเสนอวิธีการทางกราฟที่มีความคลาดเคลื่อนในผลการออกแบบอยู่พอสมควร ปี ค.ศ. 2003 Wang (2003) ได้นำเสนอวิธีการหาผลเฉลยโดยการคำนวณ สำหรับตัวชดเชยเฟสล่าหน้าและตัวชดเชยเฟสล่าหลัง ซึ่งมีหลักการคล้ายคลึงกับที่ Wakeland (1976) นำเสนอ ข้อดีคือขั้นตอนการคำนวณง่ายกว่าวิธีการของ Wakeland (1976) แต่ก็เป็นการพิจารณาเฟสและอัตราขยายที่ความถี่เดียวเช่นกันซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัด ปี ค.ศ. 2005 Hang et al. (2005) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหน้า ด้วยการคำนวณอย่างแม่นยำสำหรับระบบเซอร์โวที่มีอินทิเกรเตอร์หนึ่งตัว ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถออกแบบให้ได้ส่วนเฟสอย่างแม่นยำและได้ส่วนเฟ้ออัตราขยายมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่ต้องการ แต่ข้อจำกัดคือใช้ได้เฉพาะกับระบบเซอร์โวที่มีอินทิเกรเตอร์หนึ่งตัวเท่านั้น ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Wang (2006) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้าสำหรับใช้ในกรณีพิเศษ ซึ่งเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์สามตัวสำหรับใช้ในการออกแบบซึ่งประกอบด้วย ความถี่ตัดขนาด ความถี่ตัดเฟสและส่วนเฟ้ออัตราขยาย (หรือส่วนเฟสอย่างใดอย่างหนึ่ง) การออกแบบเป็นวิธีการคำนวณอย่างแม่นยำ แต่สามารถกำหนดส่วนเฟ้ออัตราขยายหรือส่วนเฟสอย่างแม่นยำได้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งเท่านั้น ในปีเดียวกันนี้ Wang et al. (2006) ได้พัฒนาการออกแบบต่อจากแนวทางที่ทำเมื่อปี ค.ศ. 2005 โดยนำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหน้า เพื่อให้ได้ส่วนเฟ้ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ ข้อดีคือมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายและให้ทั้งส่วนเฟ้ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ แต่ก็ยังคงมีข้อเสียเหมือนเดิมคือเหมาะสำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ส่วนระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบจะมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกินสูง และไม่สามารถกำกับให้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้อยู่ในกรอบที่เหมาะสมได้ ในปี ค.ศ. 2008 Wang (2008) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหน้า ตัวชดเชยเฟสล่าหลัง ตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้า และตัวชดเชยเฟสแบบอันดับสอง ซึ่งสามารถให้ผลเฉลยอย่างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังคงใช้การพิจารณาอัตราขยายและเฟสที่ความถี่เดียวเช่นเดียวกันกับวิธีการของ Wakeland (1976) ซึ่งมีข้อจำกัดคือสามารถกำหนดได้เฉพาะส่วนเฟสที่ต้องการเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถกำหนดส่วนเฟ้ออัตราขยายไปในคราวเดียวกันได้ ในปี ค.ศ. 2009 Wang (2009) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหน้าและตัวชดเชยเฟสล่าหลัง ที่ให้ข้อมูลของส่วนเฟ้ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ครบถ้วน แต่ก็ยังคงเป็นวิธีการทางกราฟมากกว่าที่จะใช้การคำนวณอย่างแม่นยำ และในปีเดียวกัน Li et al. (2009) ได้วิเคราะห์ให้เห็นว่าตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้าในรูปแบบทั่วไปนั้น สามารถต่อยอดกันได้ดีที่สุดไม่เกินห้าตัว หากมากกว่านี้จะไม่สามารถหาผลเฉลยอย่างแม่นยำได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการพัฒนาวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสเพื่อให้ได้ส่วนเฟ้ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำโดยใช้วิธีการคำนวณ วิธีการที่นำเสนอเป็นการพัฒนาต่อ

จากแนวทางของ Wang et al. (2006) ที่สามารถใช้วิธีนี้ได้กับระบบทั้งที่มีและไม่มีเวลาประวิง โดยได้พัฒนาวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าหน้า เพื่อให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ และปรับปรุงให้ใช้กับระบบทั้งที่มีและไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบได้ โดยปกติแล้วเฟสล่าช้าจะมีผลกระทบกับระบบในย่านความถี่ต่ำ ดังนั้นโดยทั่วไปจะใช้ในการเพิ่มอัตราขยายของระบบเพื่อลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ในขณะที่ส่วนของเฟสล่าช้ามีผลกับระบบในย่านความถี่สูง และจะใช้ในการเพิ่มค่าส่วนเพื่อเฟสเป็นหลัก ทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพคงทนที่ดี (สราวุฒิ สุจิตจร, 2546)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาข้อจำกัดในงานวิจัยที่มีมาก่อนแล้ว ในเรื่องการออกแบบตัวชดเชยเฟส
- 1.2.2 เพื่อปรับปรุงพัฒนาวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสให้ได้ผลดีขึ้นสำหรับใช้งาน
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยออกแบบตัวควบคุมด้วย MATLAB

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ระบบควบคุมที่พิจารณา เป็นระบบเชิงเส้นไม่ผันแปรตามเวลา มีอินพุตเดียว เอาต์พุตเดียว เมื่อมีการป้อนกลับ ใช้การป้อนกลับแบบลบ มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่งในวิถีป้อนกลับ
- 1.3.2 อินพุตเพื่อการทดสอบระบบเป็นขั้นบันไดหนึ่งหน่วย พิจารณาการตามรอยอินพุตเป็นหลัก ไม่พิจารณาการรบกวนจากภายนอก
- 1.3.3 การคำนวณและการแสดงผลต่าง ๆ ใช้โปรแกรม MATLAB Simulink และ Control System Toolbox เป็นเครื่องมือ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 พลาเน็ตที่จะนำมาพิจารณาศึกษาข้อจำกัดของวิธีการเก่า และสมรรถนะของวิธีการที่ปรับปรุงแล้วมีจำนวนทั้งหมด 7 พลาเน็ต ซึ่งประกอบด้วยพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะตามคำแนะนำของ Astrom and Hagglund (2000) จำนวน 6 พลาเน็ต (พลาเน็ตที่ 1-6) และพลาเน็ตที่ 7 ปรากฏในบทความของ Wang et al. (2006)

$$1. G(s) = \frac{1}{s(s+1)^3}$$

$$2. G(s) = \frac{1}{(s+1)(0.500s+1)(0.250s+1)(0.125s+1)}$$

$$3. G(s) = \frac{1}{(s+1)^4}$$

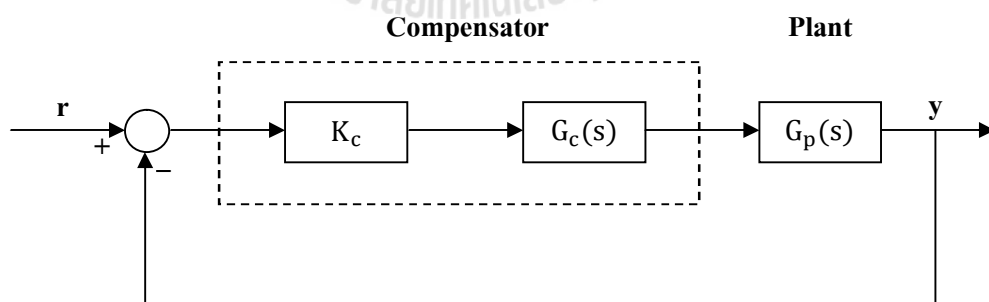
$$4. G(s) = \frac{1}{(10s+1)^2} e^{-s}$$

$$5. G(s) = \frac{1}{(s+1)(s^2+0.200s+1)}$$

$$6. G(s) = \frac{1-2s}{(s+1)^3}$$

$$7. G(s) = \frac{5}{s(s+0.700)(s+7)} e^{-0.230s}$$

1.4.2 ระบบควบคุมวงปิดที่พิจารณา มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่ง $G_c(s)$ และ $G_p(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยเฟสและพลาเนตตามลำดับ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบควบคุมวงปิดที่พิจารณา

1.4.3 วิธีการออกแบบดำเนินงานในโดเมนความถี่และระนาบ-เอส

1.4.4 การออกแบบจะคำนึงถึงเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ ส่วนด้านสมรรถนะนั้น พิจารณาการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

1.4.5 ประยุกต์วิธีการที่พัฒนาขึ้นกับการควบคุมระบบทางอุตสาหกรรม ทั้งนี้ดำเนินการทางการคำนวณและจำลองสถานการณ์

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมผลงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อนแล้วเกี่ยวกับตัวชดเชยเฟสลำหน้า ตัวชดเชยเฟสลำหลัง และตัวชดเชยเฟสลำหลัง-ลำหน้า

1.5.2 ศึกษาพัฒนาการด้านการออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหน้า ตัวชดเชยเฟสลำหลัง และตัวชดเชยเฟสลำหลัง-ลำหน้า ซึ่งได้แก่วิธีการของ Wakeland (1976) ที่นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหน้า และตัวชดเชยเฟสลำหลัง-ลำหน้า ที่ใช้การคำนวณแก้สมการพีชคณิตกำลังสองแทนวิธีลองผิดลองถูก วิธีการของ Mitchell (1977) ที่ให้ความเห็นว่าวิธีการของ Wakeland (1976) สามารถใช้กับตัวชดเชยเฟสลำหลังได้ด้วย โดยการพิจารณาเงื่อนไขของเฟสและอัตราขยาย และวิธีการของ Wang et al. (2006) ที่นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหน้าให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ แล้วเลือกวิธีการที่ให้ผลดีเพื่อนำมาพัฒนาต่อ โดยนำวิธีการของ Wang et al. (2006) มาดำเนินการซ้ำ และทดสอบกับพลาเน็ตอีก 6 พลาเน็ตดังรายการที่แสดงในหัวข้อ 1.4

1.5.3 พัฒนาวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหลัง-ลำหน้า เพื่อให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ

1.5.4 จำลองสถานการณ์กับพลาเน็ตในบทความของ Wang et al. (2006) และพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะทั้ง 6 พลาเน็ต รวมทั้งประยุกต์วิธีการกับพลาเน็ตทางอุตสาหกรรม ซึ่งในที่นี้ใช้พลาเน็ตเครื่องปรับแรงดัน ไฟฟ้าอัตโนมัติ (Rahimian and Raahemifar, 2011) มาทดสอบ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้วิธีการใหม่ที่พัฒนาต่อจากวิธีการเดิม ในการออกแบบตัวชดเชยเฟสแบบผสมลำหลัง-ลำหน้าให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ รวมทั้งสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้

1.6.2 ได้โปรแกรม CAD สำหรับออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหลัง-ลำหน้าตามวิธีการที่นำเสนอ

1.6.3 ได้เผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบการตีพิมพ์บทความวิชาการในระดับชาติ

1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 8 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับหน้าตามวิธีการของ Wang et al. (2006) โดยนำตัวอย่างพลาเน็ตในบทความมาดำเนินการซ้ำ และทดสอบกับพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะ (benchmarking) อีก 6 พลาเน็ต

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับหลัง-หน้า ให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ โดยประยุกต์ใช้วิธี Bode compensator design ของ Wakeland (1976) และ Mitchell (1977) ร่วมกับวิธีการของ Wang et al. (2006) แล้วนำไปทดสอบกับพลาเน็ตตัวอย่างในบทความของ Wang et al. (2006) เพื่อเปรียบเทียบผล รวมทั้งทดสอบกับพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะ (benchmarking) อีก 6 พลาเน็ตด้วย

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับหลัง-หน้า ให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ โดยที่สามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ แล้วนำไปทดสอบกับพลาเน็ตทั้ง 7 แบบที่ใช้ทดสอบในบทที่ 2 และ 3

บทที่ 5 กล่าวถึงการนำโปรแกรม MATLAB มาช่วยในการออกแบบ

บทที่ 6 กล่าวถึงการกำหนดขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟส

บทที่ 7 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานกับระบบทางอุตสาหกรรม

บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

การออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006)

2.1 กล่าวนำ

ตัวชดเชยเฟสสำหรับ เป็นตัวควบคุมชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมากในงานทางอุตสาหกรรม ตัวชดเชยดังกล่าวให้ปริมาณเฟสเพิ่มเติมแก่ระบบพลวัต เพื่อการสร้างเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่คงทนแก่ระบบวงปิด อย่างไรก็ตามยังไม่มีวิธีการใดที่จะสามารถออกแบบตัวชดเชยเฟสแล้วได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำในเวลาเดียวกัน ความยากในการปรับแต่งตัวชดเชยเฟสให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการ คือความไม่เป็นเชิงเส้นในความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของตัวชดเชยเฟส ยิ่งกว่านั้นข้อกำหนดของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟส ทำให้เราได้สมการเพียงสี่สมการ ในขณะที่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ถึงห้าตัวที่ต้องนำมาพิจารณา ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์สามตัวของตัวชดเชยและความถี่ตัดข้ามอีกสองตัว ในปี ค.ศ. 2006 Wang et al. (2006) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับ ที่สามารถให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำในเวลาเดียวกัน โดยใช้วิธีกำหนดค่าให้กับพารามิเตอร์ตัวหนึ่งก่อน ซึ่งก็คือความถี่ตัดขนาด ทำให้เหลือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าสี่ตัว ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลเฉลยอย่างแม่นยำได้ จากนั้นจึงสร้างฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นมาสองฟังก์ชันจากส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่กำหนด แล้วนำฟังก์ชันทั้งสองพล็อตลงไปในกราฟเดียวกันเพื่อหาจุดตัด ซึ่งก็คือผลเฉลยที่ต้องการนั่นเอง โดยต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของจุดตัดเพื่อทำให้ตัวชดเชยที่ได้มีเสถียรภาพ ตัวชดเชยเฟสสำหรับมีรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงดังสมการ (2.1)

$$G_c(s) = K_c \frac{T_s + 1}{\alpha T_s + 1}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (2.1)$$

โดยที่ K_c, T_s และ α คือ พารามิเตอร์ทั้งสามตัวของตัวชดเชยเฟสสำหรับ

วัตถุประสงค์ของวิธีการนี้คือต้องการทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด $G_c G(s)$ เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (2.2) และ (2.3) ไปพร้อม ๆ กัน

$$K_c \frac{j\omega_p T + 1}{j\omega_p \alpha T + 1} G(j\omega_p) = -\frac{1}{A_m} \quad (2.2)$$

$$K_c \frac{j\omega_g T + 1}{j\omega_g \alpha T + 1} G(j\omega_g) = -e^{j\theta_m} \quad (2.3)$$

| | | | |
|--------|----------------|-----|--|
| โดยที่ | A_m | คือ | ส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการ (ค่าจริงไม่แสดงหน่วย) เท่ากับ $10^{(GM_{dB})/20}$ |
| | θ_m | คือ | ส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการ (เรเดียน) เท่ากับ $\frac{\pi}{180} (PM_{deg})$ |
| | ω_p | คือ | ความถี่ตัดเฟสหลังการชดเชย (เรเดียน/วินาที) |
| | ω_g | คือ | ความถี่ตัดขนาดหลังการชดเชย (เรเดียน/วินาที) |
| | $G(j\omega)$ | คือ | พลาเน็ตัวรอบเปิด ณ ความถี่ต่าง ๆ |
| | $G(j\omega_g)$ | คือ | พลาเน็ตัวรอบเปิด ณ ความถี่ตัดขนาดใหม่ |

2.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชยเฟสลำหน้าตามวิธีการของ Wang et al. (2006)

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดความถี่ตัดขนาดของระบบวงรอบเปิดหลังการชดเชยดังสมการ (2.4)

$$\omega_g = \lambda \omega_{Gp} \quad (2.4)$$

| | | | |
|--------|---------------|-----|--|
| โดยที่ | ω_{Gp} | คือ | ความถี่ตัดเฟสของระบบวงรอบเปิดก่อนการชดเชย (เรเดียน/วินาที) |
| | λ | คือ | พารามิเตอร์ปรับแต่ง ซึ่ง $\lambda \in [0.500 \ 2]$ ในบทความของ Wang et al. (2006) แนะนำค่า $\lambda = 1$ ในการใช้งาน |

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ตามสมการ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

$$f_1(\omega) = \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{-1}{A_m G(j\omega)} \right] - \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right]}{\omega \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{A_m G(j\omega)} \right] - \omega_g \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right]} \quad (2.5)$$

$$f_2(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega_g} \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right] - \frac{1}{\omega} \text{Im} \left[\frac{-1}{A_m G(j\omega)} \right]}{\text{Re} \left[\frac{-1}{A_m G(j\omega)} \right] - \text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right]} \quad (2.6)$$

ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่าที่จุดตัดระหว่างกราฟทั้งสอง ค่าที่อ่านได้นี้คือค่า αT ซึ่งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตตามสมการ (2.8) โดยมีที่มาจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า K_c ดังนี้

$$K_c = \text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right] - \omega_g \alpha T \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right] \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) ปกติแล้วค่า K_c , α และ T ต้องเป็นค่าบวก เพื่อให้โพลและซีโรของตัวชดเชยที่ออกแบบอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ-เอส ดังนั้นจึงได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right] > \omega_g \alpha T \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right] > 0 \\ \frac{\text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right]}{\omega_g \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G(j\omega_g)} \right]} > \alpha T > 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่ α และ T คือ พารามิเตอร์ของตัวชดเชยเฟสลำดับนำ

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่า K_c จากสมการ (2.7)

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่า T จากสมการ (2.9)

$$T = \frac{\text{Im} \left[\frac{-1}{A_m G(j\omega_p)} \right] + \alpha T \omega_p \text{Re} \left[\frac{-1}{A_m G(j\omega_p)} \right]}{K_c \omega_p} \quad (2.9)$$

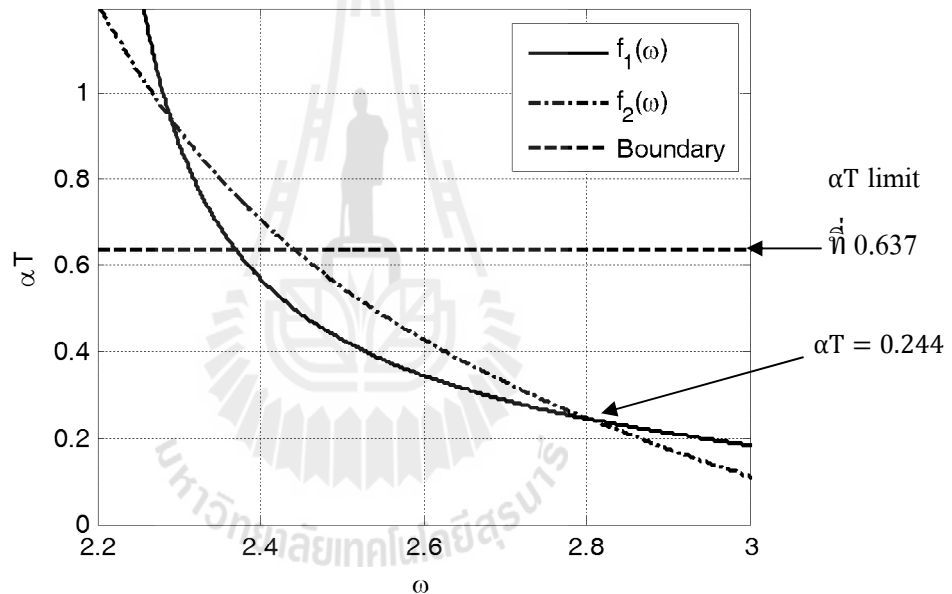
ต่อไปนี้เป็นกรณาดำเนินงานซ้ำตัวอย่างในบทความของ Wang et al. (2006) ซึ่งกำหนดให้มีพลานต์

$$G(s) = \frac{5}{s(s + 0.700)(s + 7)} e^{-0.230s} \quad (2.10)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°

ขั้นตอนที่ 1 $\omega_g = 1.316$ (กรณี $\lambda = 1$)

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลานต์ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่า αT จากกราฟได้ $\alpha T = 0.244$ ($0 < \alpha T < 0.637$)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $K_c = 1.109$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $T = 1.862$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (2.11)

$$G_c(s) = 8.467 \left(\frac{s + 0.537}{s + 4.099} \right) \quad (2.11)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย : -0.537

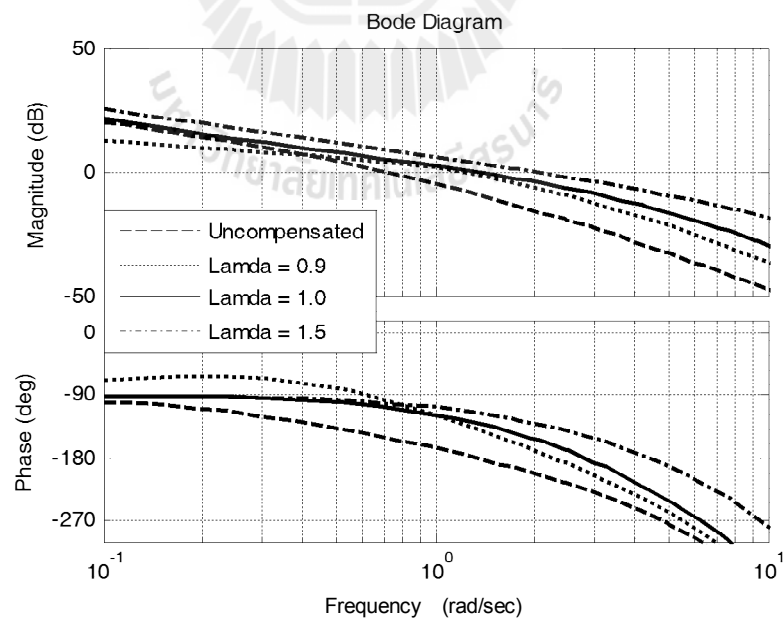
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย : -4.099

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.12)

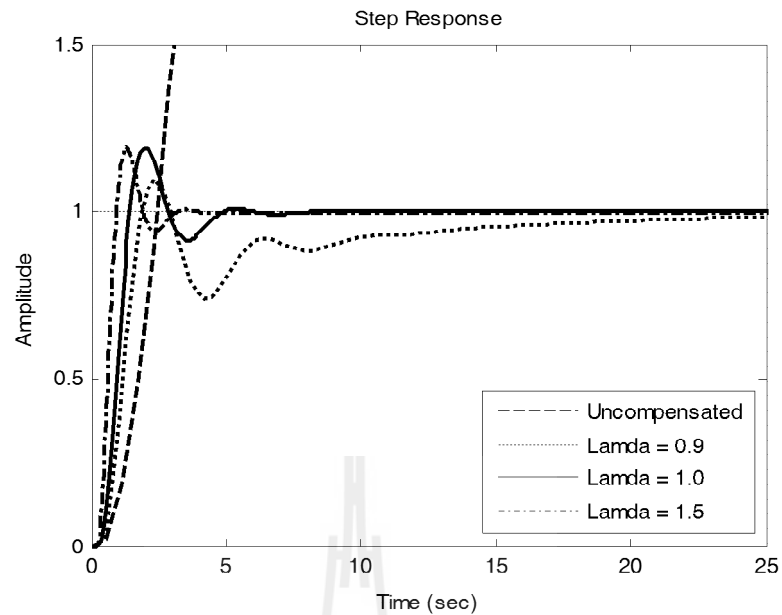
$$GH(s) = \frac{(10.330s + 5.547)e^{-0.230s}}{0.244s^4 + 2.879s^3 + 8.895s^2 + 4.900s} \quad (2.12)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.13)

$$T(s) = \frac{(10.330s + 5.547)e^{-0.230s}}{0.244s^4 + 2.879s^3 + 8.895s^2 + 4.900s + (10.330s + 5.547)e^{-0.230s}} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.2 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชย



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดก่อนและหลังการชดเชย

ตารางที่ 2.1 ผลการตอบสนองของพลาเน็ตตัวอย่าง

| ผลการตอบสนอง | พลาเน็ตก่อนชดเชย | $\lambda = 0.9$ (min.) | $\lambda = 1.0$ | $\lambda = 1.5$ (max.) |
|---------------------|------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 8.932 dB | 7.999 dB | 7.998 dB | 8.001 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | 29.334° | 50.001° | 50.008° | 50.004° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0.712 rad/sec | 1.185 rad/sec | 1.316 rad/sec | 1.975 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | N/A | 0.977 s | 0.776 s | 0.484 s |
| การพุ่งเกิน | N/A | 14% | 18.800% | 19% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | N/A | 9.840 s | 4.560 s | 2.920 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | N/A | 0% | 0% | 0% |
| แบนด์วิดท์ | N/A | 2.265 rad/sec | 2.702 rad/sec | 4.259 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.540 dB | 2.090 dB | 1.800 dB |

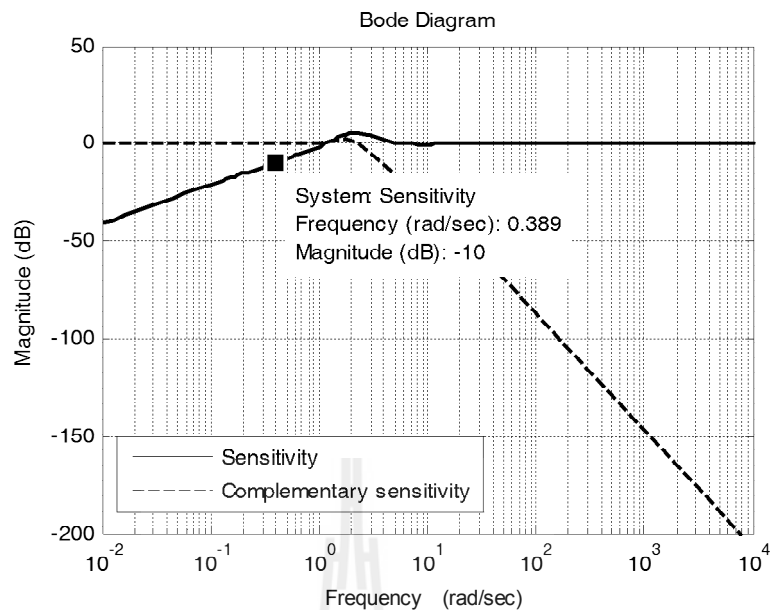
จากตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยมี $GM = 7.998$ dB, $PM = 50.008^\circ$ และ $\omega_g = 1.316$ rad/sec ($\lambda = 1$) ซึ่งให้ผลตรงตามที่ต้องการ ออกแบบไว้ (ก่อนชดเชย $GM = 8.932$ dB และ $PM = 29.334^\circ$) เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนค่า λ เพื่อหาช่วงที่สามารถใช้งานได้ โดยแปรผันค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 3 ปรากฏว่าค่าที่ใช้งานได้อยู่ในช่วง 0.9 ถึง 1.5 โดยถ้าค่า λ อยู่นอกช่วงดังกล่าวนี้ จะไม่ได้เสถียรสัมพัทธ์ตามที่กำหนด และเพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน เราจึงนำค่าต่ำสุด ($\lambda = 0.9$) ค่าสูงสุด ($\lambda = 1.5$) และค่าที่แนะนำ ($\lambda = 1$) ในบทความของ Wang et al. (2006) มาทดลองออกแบบ พบว่าการปรับเปลี่ยนค่า λ จะทำให้ตำแหน่งของจุดตัดขนาดเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อเพิ่มค่า λ เป็น 1.5 จะทำให้ความถี่ที่จุดตัดขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 1.975 rad/sec และเมื่อลดค่า λ เป็น 0.9 จะทำให้ความถี่ที่จุดตัดขนาดลดลงเป็น 1.185 rad/sec ดังนั้นการปรับเปลี่ยนค่า λ ก็คือการเปลี่ยนจุดตัดขนาดนั่นเอง ซึ่งจะมีผลทำให้แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบของพลานต์ที่มีตัวอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ สำหรับระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย เราสามารถควบคุมให้พลานต์ผลการตอบสนองเข้าสู่ระดับคงตัวที่หนึ่งหน่วยตามต้องการ สำหรับเวลาประวิงทั้งก่อนและหลังการชดเชยไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.230 วินาที ส่วนการเพิ่มค่า λ ทำให้เวลาขาขึ้นและเวลาเข้าที่รวดเร็วยิ่งขึ้น ในขณะที่การพุ่งเกินก็สูงขึ้นด้วย แต่ในขณะเดียวกันขนาดการตอบสนองสูงสุดกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า λ ที่น้อยกว่ากลับทำให้อัตราขยายตามวิธีการของ Wang et al. (2006) น้อยกว่าไปด้วย ส่งผลให้ตัวชดเชยเฟสล้ำหน้าต้องใช้ขนาดเพิ่มมากขึ้นเพื่อชดเชยให้ระบบได้เสถียรภาพตามที่ต้องการ จึงทำให้ขนาดการตอบสนองสูงสุดซึ่งเกิดในย่านความถี่สูงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการที่ขนาดการตอบสนองสูงสุดลดลงก็จะทำให้การตอบสนองชั่วคราวมีการสั่นไกวน้อยลง ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.3

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.14)

$$S_G^T = \frac{0.244s^4 + 2.879s^3 + 8.895s^2 + 4.900s}{0.244s^4 + 2.879s^3 + 8.895s^2 + 4.900s + (10.330s + 5.547)e^{-0.230s}} \quad (2.14)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (2.15)

$$T = \frac{(10.330s + 5.547)e^{-0.230s}}{0.244s^4 + 2.879s^3 + 8.895s^2 + 4.900s + (10.330s + 5.547)e^{-0.230s}} \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.4 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำกว่า 0.389 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่สูงกว่า 0.389 rad/sec ระบบวงปิดมีขนาดของความไวเพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 0 dB ในย่านความถี่สูง ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ว่าระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดรบกวนจากภายนอกและสามารถตามรอยอินพุตได้ดี ในย่านความถี่สูงค่าคอมพลิเมนต์ของความไวจะมีขนาดน้อย ๆ นั้นหมายความว่าระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยจะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูงได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลานต์

2.3 ผลการออกแบบกับพลานต์ที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะ

หลังจากการดำเนินงานซ้ำกับพลานต์ในบทความของ Wang et al. (2006) แล้ว เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวนี้ จึงได้ประยุกต์วิธีการนี้กับพลานต์สำหรับเทียบสมรรถนะตามคำแนะนำของ Astrom and Hagglund (2000) จำนวน 6 พลานต์ ดังนี้

พลานต์ 1

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)^3} \quad (2.16)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°

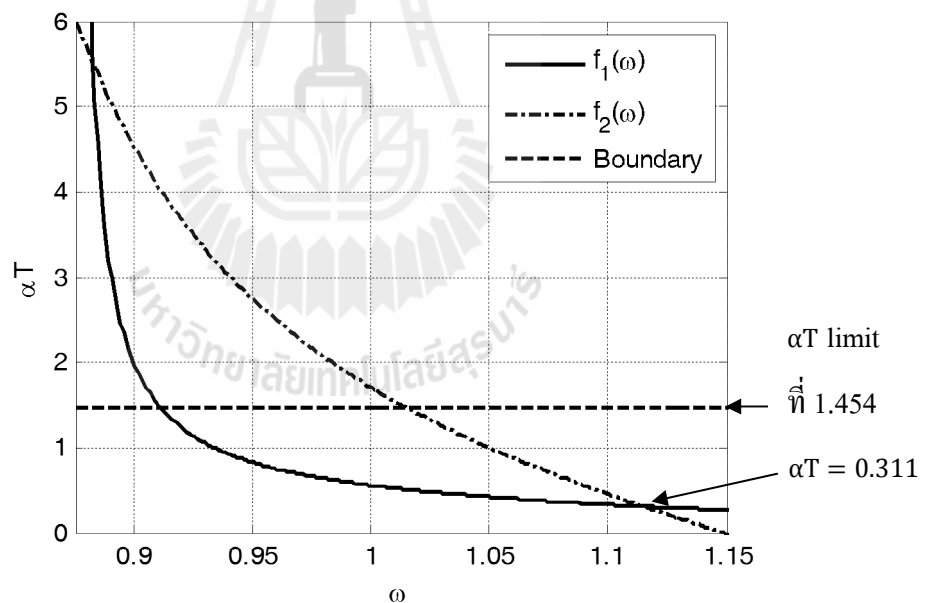
- ขั้นตอนที่ 1 $\omega_g = 0.577$ (กรณี $\lambda = 1$)
- ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.5
- ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่า αT จากกราฟได้ $\alpha T = 0.311$ ($0 < \alpha T < 1.454$)
- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $K_c = 0.449$
- ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $T = 3.020$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (2.17)

$$G_c(s) = 4.366 \left(\frac{s + 0.331}{s + 3.218} \right) \quad (2.17)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.331

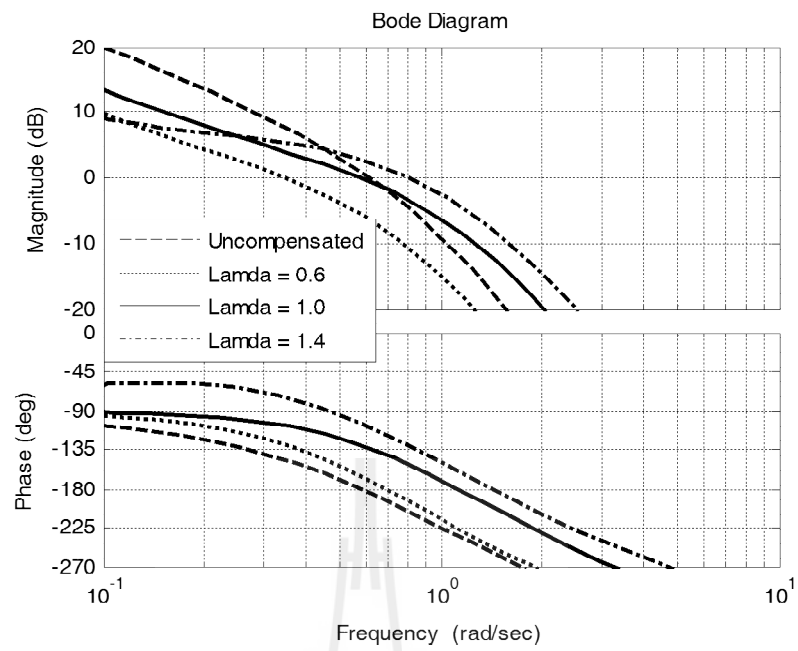
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -3.218



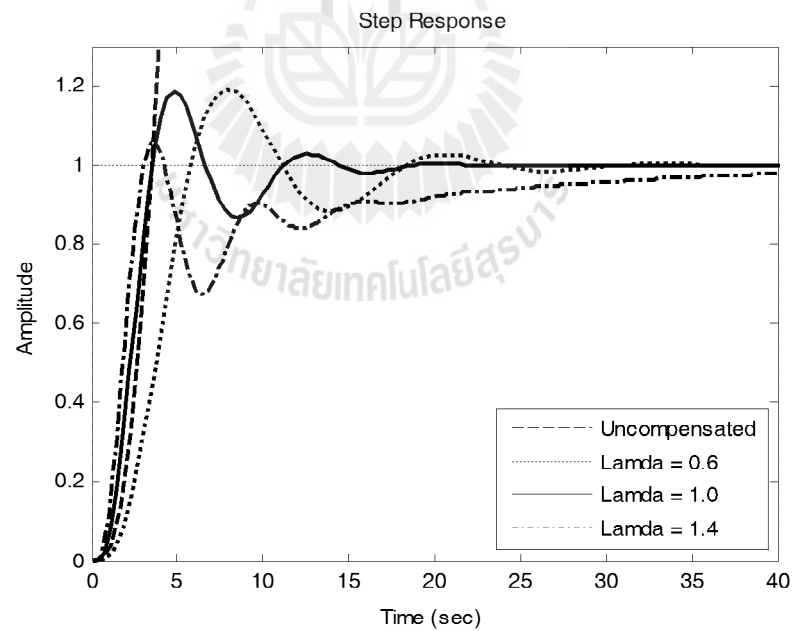
รูปที่ 2.5 กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ต 1

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.18)

$$GH(s) = \frac{1.357s + 0.449}{0.311s^5 + 1.932s^4 + 3.932s^3 + 3.311s^2 + s} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.6 แผนภาพโบดก่อนและหลังการชดเชยของพลาเน็ต 1



รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ต 1

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.19)

$$T(s) = \frac{1.357s + 0.449}{0.311s^5 + 1.932s^4 + 3.932s^3 + 3.311s^2 + 2.357s + 0.449} \quad (2.19)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.331

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: $-0.260, -2.730 \pm 0.461i$ และ $-0.248 \pm 0.815i$

ตารางที่ 2.2 ผลการตอบสนองของพลานต์ 1

| ผลการตอบสนอง | พลานต์ก่อนชดเชย | $\lambda = 0.6$ (min.) | $\lambda = 1.0$ | $\lambda = 1.4$ (max.) |
|---------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -1.024 dB | 8 dB | 8.001 dB | 7.997 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -4.970° | 50° | 50.026° | 50.001° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0.617 rad/sec | 0.346 rad/sec | 0.577 rad/sec | 0.808 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | N/A | 3.350 s | 2.060 s | 1.760 s |
| การพุ่งเกิน | N/A | 19.400% | 18.500% | 5.810% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | N/A | 21.900 s | 13.400 s | 41.100 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | N/A | 0% | 0% | 0% |
| แบนด์วิดท์ | N/A | 0.667 rad/sec | 1.090 rad/sec | 1.392 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.470 dB | 2.610 dB | 2.940 dB |

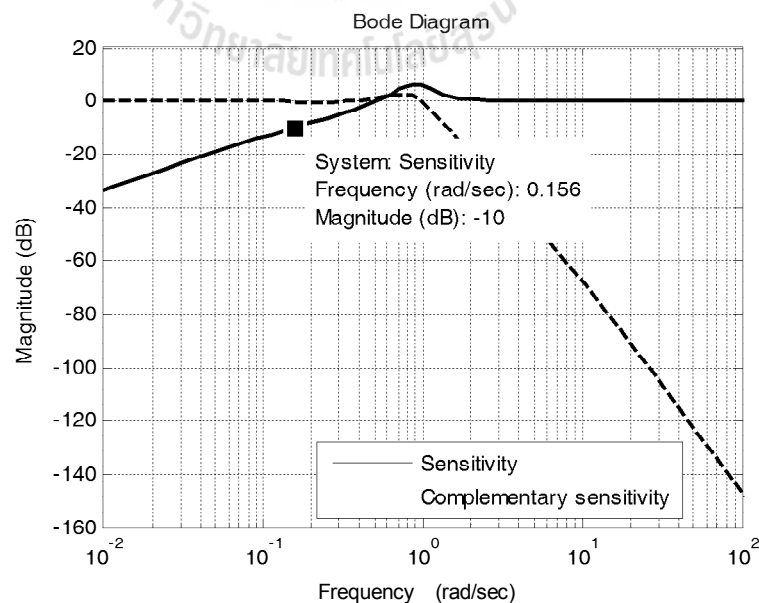
จากตารางที่ 2.2 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยมีส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ จากรูปที่ 2.6 ในย่านความถี่ต่ำอัตราขยายของระบบหลังการชดเชยต่ำกว่าก่อนการชดเชย ทั้งนี้เนื่องมาจากการปรับลดอัตราขยายของระบบในขั้นตอนที่ 4 ($K_c = 0.449$) ซึ่งจะมีผลกระทบต่ออัตราขยายดีซีของระบบหลังการชดเชย ส่วนในย่านความถี่สูงอัตราขยายของระบบหลังการชดเชยยกตัวสูงขึ้น เนื่องจากผลของตัวชดเชยเฟสลำหน้าที่เพิ่มขนาดให้กับระบบ ส่วนกราฟเฟสก็มีการยกตัวสูงขึ้นเนื่องจากผลของตัวชดเชยเฟสลำหน้าที่เพิ่มเฟส

ให้กับระบบเช่นกัน เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนและหลังการชดเชยมีลักษณะเช่นเดียวกันกับพลาเน็ตต์ตัวอย่างของ Wang et al. (2006) จึงจะไม่ขอกกล่าวซ้ำอีก สำหรับค่า λ ที่ใช้งานได้อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1.4 การเพิ่มค่า λ จะทำให้เวลาขาขึ้นรวดเร็วขึ้นเพราะเป็นการเพิ่มแบนด์วิดธ์ให้กับระบบ ส่วนการพุ่งเกิน เวลาเข้าที่ และขนาดการตอบสนองสูงสุด จะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวชดเชยตามวิธีการของ Wang et al. (2006) ซึ่งประกอบด้วยค่าอัตราขยายและค่าขนาดกัมมของตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า กล่าวคือถ้าอัตราขยายต่ำ ตัวชดเชยเฟสล้ำหน้าจะสร้างขนาดและเฟสที่สูงขึ้นเพื่อชดเชยให้ได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดสูงสุดเพิ่มมากขึ้น และค่า Final value ลดลง เป็นต้น การอภิปรายในทำนองนี้ต่อไปจะไม่ขอกกล่าวซ้ำอีก เพราะเป็นไปในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.20)

$$S_G^T = \frac{1}{1 + GH(s)} = \frac{0.311s^5 + 1.932s^4 + 3.932s^3 + 3.311s^2 + s}{0.311s^5 + 1.932s^4 + 3.932s^3 + 3.311s^2 + 2.357s + 0.449} \quad (2.20)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (2.21)

$$T = 1 - S_G^T = \frac{1.357s + 0.449}{0.311s^5 + 1.932s^4 + 3.932s^3 + 3.311s^2 + 2.357s + 0.449} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.8 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ตต์ 1

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่น้อยกว่าและมากกว่า 0.156 rad/sec ลักษณะของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลาเน็ตในบทความของ Wang et al. (2006) การอภิปรายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกัน จะไม่ขอกล่าวซ้ำอีก

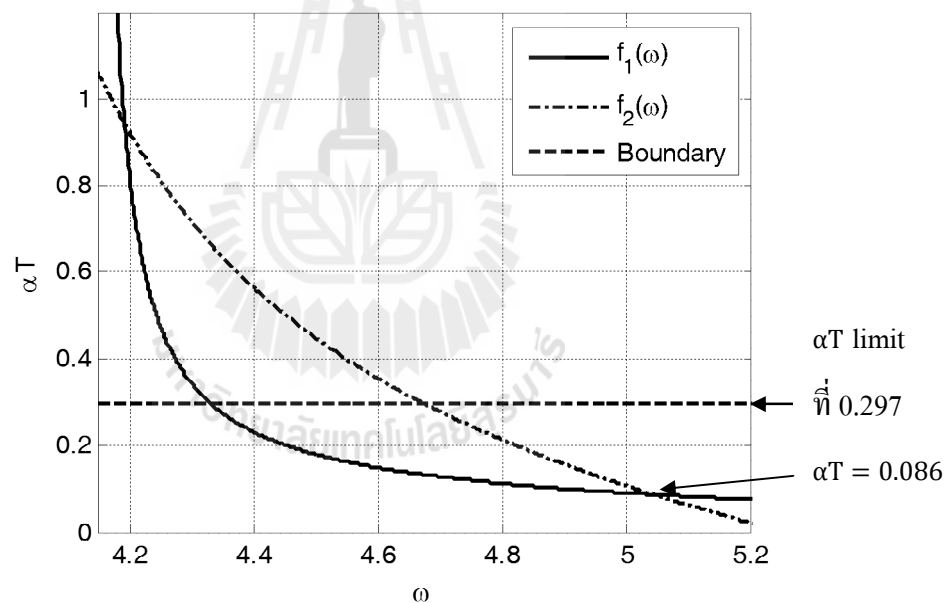
พลาเน็ต 2

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(0.500s + 1)(0.250s + 1)(0.125s + 1)} \quad (2.22)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

ขั้นตอนที่ 1 $\omega_g = 2.828$ (กรณี $\lambda = 1$)

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ต 2

ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่า αT จากกราฟได้ $\alpha T = 0.086$ ($0 < \alpha T < 0.297$)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $K_c = 3.075$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $T = 0.716$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (2.23)

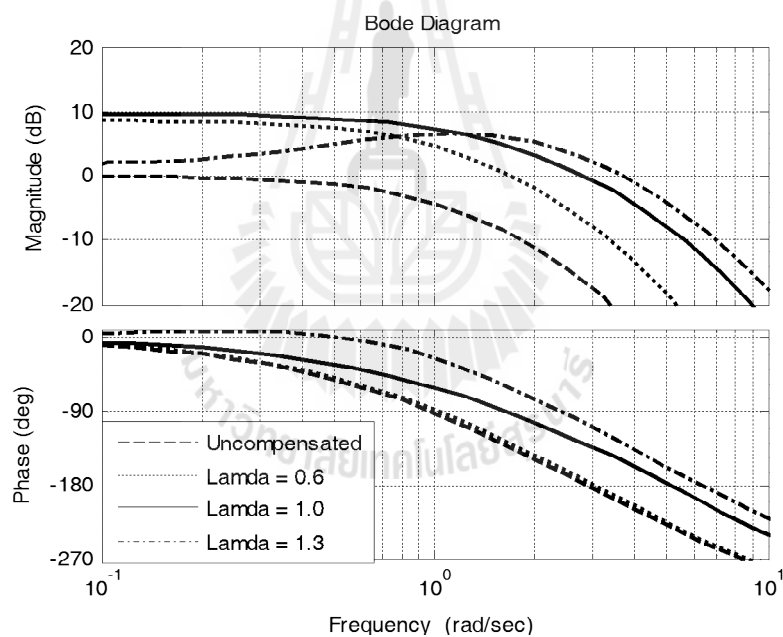
$$G_c(s) = 25.498 \left(\frac{s + 1.396}{s + 11.574} \right) \quad (2.23)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย : -1.396

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย : -11.574

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.24)

$$GH(s) = \frac{2.203s + 3.075}{0.001s^5 + 0.036s^4 + 0.329s^3 + 1.256s^2 + 1.961s + 1} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.10 แผนภาพโบดก่อนและหลังการชดเชยของพลานต์ 2

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.25)

$$T(s) = \frac{2.203s + 3.075}{0.001s^5 + 0.036s^4 + 0.329s^3 + 1.256s^2 + 4.164s + 4.075} \quad (2.25)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -1.396

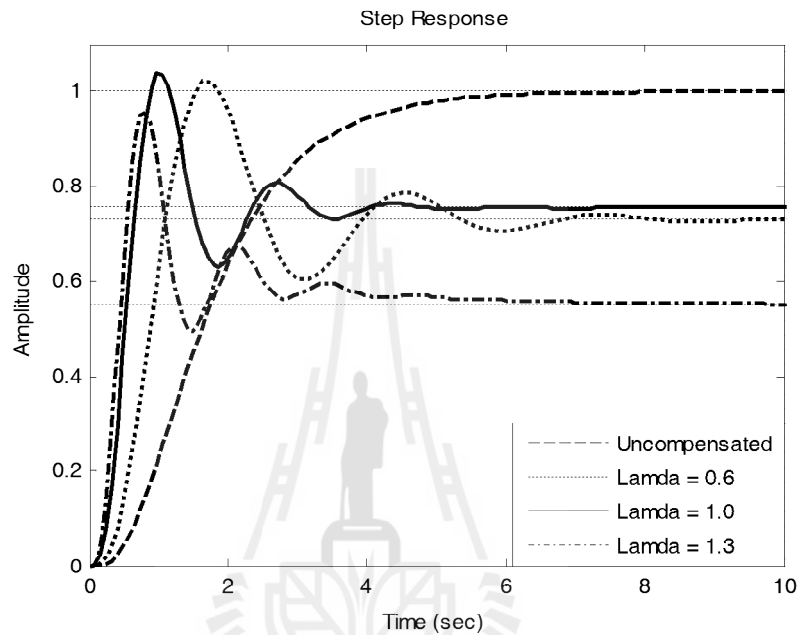
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: $-1.371, -11.595 \pm 3.594i$ และ $-1.009 \pm 3.732i$

ตารางที่ 2.3 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 2

| ผลการตอบสนอง | พลาเน็ตก่อนชดเชย | $\lambda = 0.6$ (min.) | $\lambda = 1.0$ | $\lambda = 1.3$ (max.) |
|---------------------|------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 16.586 dB | 8 dB | 7.998 dB | 8.002 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50.002° | 50.001° | 50° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 1.697 rad/sec | 2.828 rad/sec | 3.677 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 2.700 s | 0.626 s | 0.377 s | 0.251 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 39.700% | 37.400% | 73.700% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 5.020 s | 6.370 s | 3.770 s | 5.440 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 26.9% | 24.500% | 45% |
| แบนด์วิดท์ | 0.799 rad/sec | 3.223 rad/sec | 5.387 rad/sec | 7.325 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.800 dB | 2.760 dB | 2.870 dB |

จากตารางที่ 2.3 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยให้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าในย่านความถี่ต่ำอัตราขยายของระบบหลังการชดเชยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการปรับเพิ่มอัตราขยายให้กับระบบการอภิปรายเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพลาเน็ต 1 การทดสอบในพลาเน็ตถัดไปจะไม่ขอกกล่าวซ้ำอีก ค่า λ ที่ใช้งานได้อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1.3 การอภิปรายเกี่ยวกับการเปลี่ยนจุดตัดขนาดก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับพลาเน็ต 1 เช่นกัน ซึ่งต่อไปจะไม่ขอกกล่าวซ้ำอีก เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าสำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ การปรับอัตราขยายให้กับระบบนั้น จะทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเปลี่ยนแปลงไป ระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 24.500% ($\lambda = 1$) จึงอาจกล่าวได้ว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) สนใจเฉพาะส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟส ส่วนค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเมื่อมีในปริมาณมาก

Wang et al. (2006) แนะนำให้ใส่อินทิเกรเตอร์เพิ่มในวงควบคุม ส่วนผลของการเปลี่ยนแปลงค่า λ นั้น เมื่อ $\lambda = 1$ ตัวชดเชยมีอัตราขยายสูงสุด ส่งผลให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวต่ำสุด จึงทำให้การพุ่งเกินเมื่อเทียบกับ Final value ต่ำสุดไปด้วย สำหรับ λ ค่าอื่นก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน เพื่อความกระชับของเนื้อหา ต่อไปจะไม่ขอกล่าวซ้ำอีก



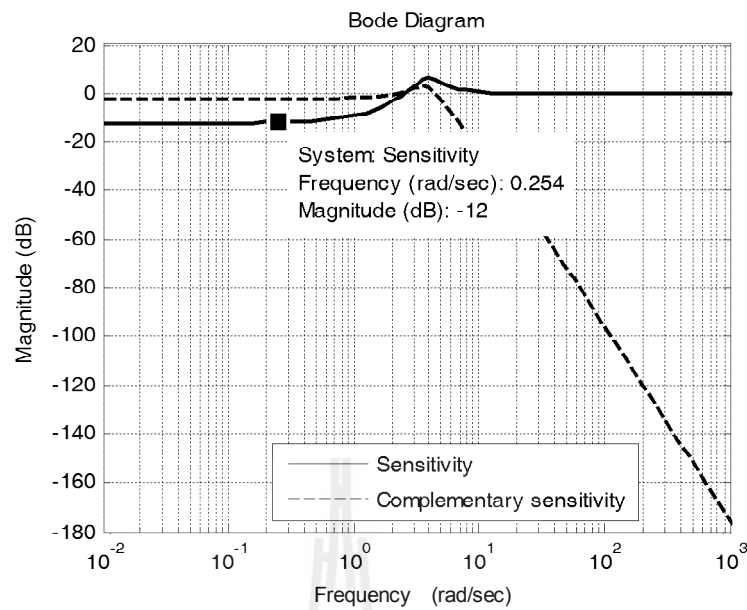
รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ต 2

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.26)

$$S_G^T = \frac{1}{1 + GH(s)} = \frac{0.001s^5 + 0.036s^4 + 0.329s^3 + 1.256s^2 + 1.961s + 1}{0.001s^5 + 0.036s^4 + 0.329s^3 + 1.256s^2 + 4.164s + 4.075} \quad (2.26)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (2.27)

$$T = 1 - S_G^T = \frac{2.203s + 3.075}{0.001s^5 + 0.036s^4 + 0.329s^3 + 1.256s^2 + 4.164s + 4.075} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.12 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ต 2

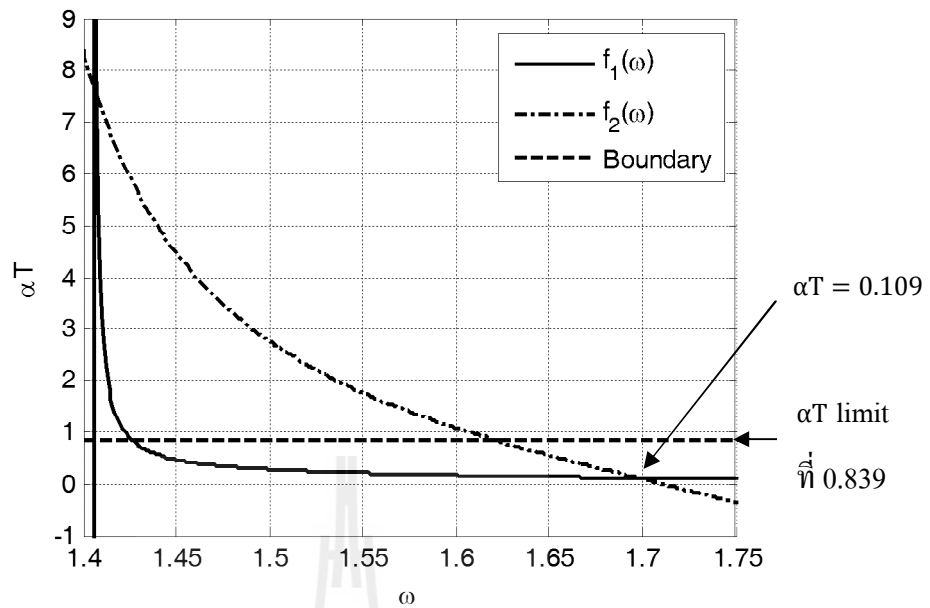
จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำระบบมีความไวสูง (ประมาณ -12 dB) ส่วนในย่านความถี่สูงความไวเพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 0 dB ดังนั้นวิธีการของ Wang et al. (2006) มีความสามารถในการกำจัดรบกวนจากภายนอกได้ไม่ดีนัก แต่ยังคงกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูงได้ดี

พลาเน็ต 3

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (2.28)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

- ขั้นตอนที่ 1 $\omega_g = 1$ (กรณี $\lambda = 1$)
- ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.13
- ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่า αT จากกราฟได้ $\alpha T = 0.109$ ($0 < \alpha T < 0.839$)
- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $K_c = 2.237$
- ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $T = 1.495$



รูปที่ 2.13 กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ต 3

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (2.29)

$$G_c(s) = 30.691 \left(\frac{s + 0.669}{s + 9.177} \right) \quad (2.29)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.669

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -9.177

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.30)

$$GH(s) = \frac{3.344s + 2.237}{0.109s^5 + 1.436s^4 + 4.654s^3 + 6.436s^2 + 4.109s + 1} \quad (2.30)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.31)

$$T(s) = \frac{3.344s + 2.237}{0.109s^5 + 1.436s^4 + 4.654s^3 + 6.436s^2 + 7.453s + 3.237} \quad (2.31)$$

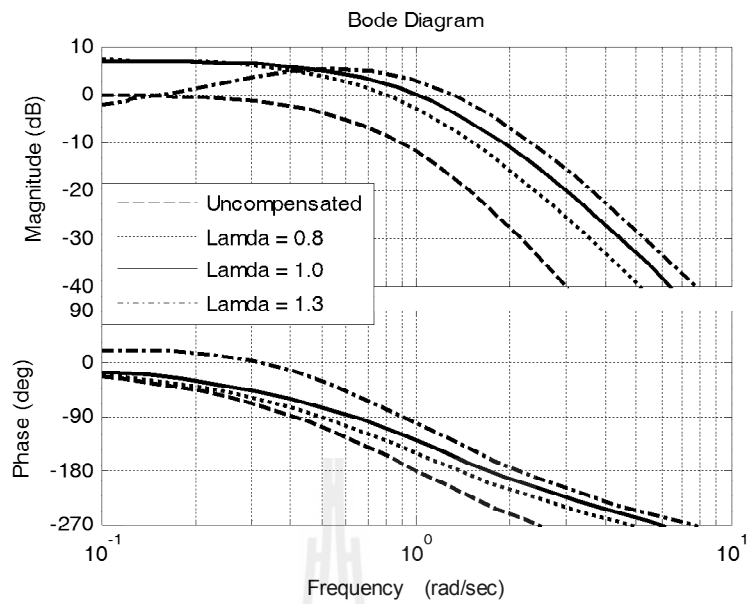
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.669

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: $-9.115, -2.786, -0.672$ และ $-0.301 \pm 1.284i$

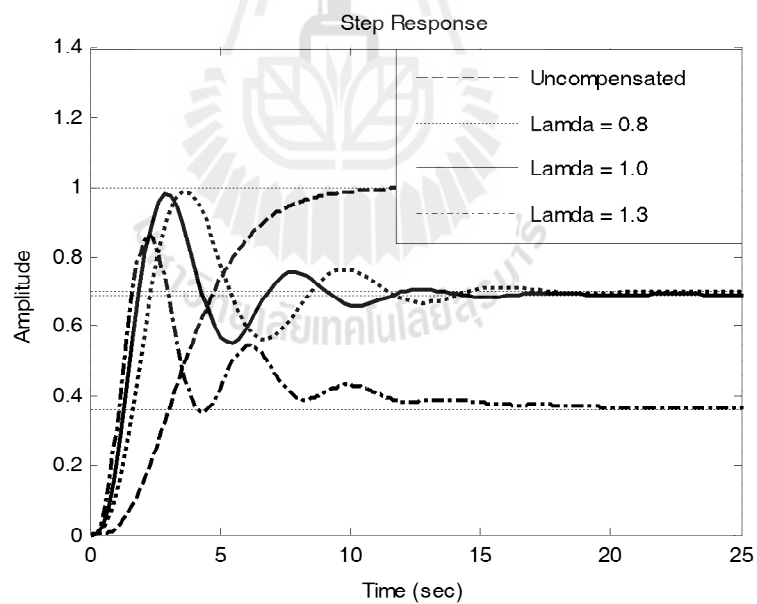
ตารางที่ 2.4 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 3

| ผลการตอบสนอง | พลาเน็ตก่อนชดเชย | $\lambda = 0.8$ (min.) | $\lambda = 1.0$ | $\lambda = 1.3$ (max.) |
|---------------------|------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| ส่วนเฟื่ออัตราขยาย | 12.041 dB | 8.002 dB | 8.003 dB | 8.003 dB |
| ส่วนเฟื่อเฟส | -180° | 50.002° | 50° | 50.010° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 0.800 rad/sec | 1 rad/sec | 1.300 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 4.940 s | 1.360 s | 1.090 s | 0.601 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 41.600% | 42.300% | 140% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 9.080 s | 16.200 s | 13.100 s | 19 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 30.100% | 30.900% | 64% |
| เวลาประวิง | 0 s | 0 s | 0 s | 0 s |
| แบนด์วิดท์ | 0.434 rad/sec | 1.482 rad/sec | 1.849 rad/sec | 2.735 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.980 dB | 2.990 dB | 3.050 dB |

จากตารางที่ 2.4 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ตามที่ต้องการ จากการทดสอบค่า λ ที่ใช้งานได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.3 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า ระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังการชดเชยค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเพิ่มสูงถึง 30.900% ($\lambda = 1$) และค่า λ ที่แตกต่างกันทำให้อัตราขยายของตัวชดเชยแตกต่างกันมาก ส่งผลให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวแตกต่างกันมากตามไปด้วย ดังที่ได้อภิปรายไว้แล้วกับพลาเน็ต 2



รูปที่ 2.14 แผนภาพ โบริคก่อนและหลังการชดเชยของพลานต์ 3



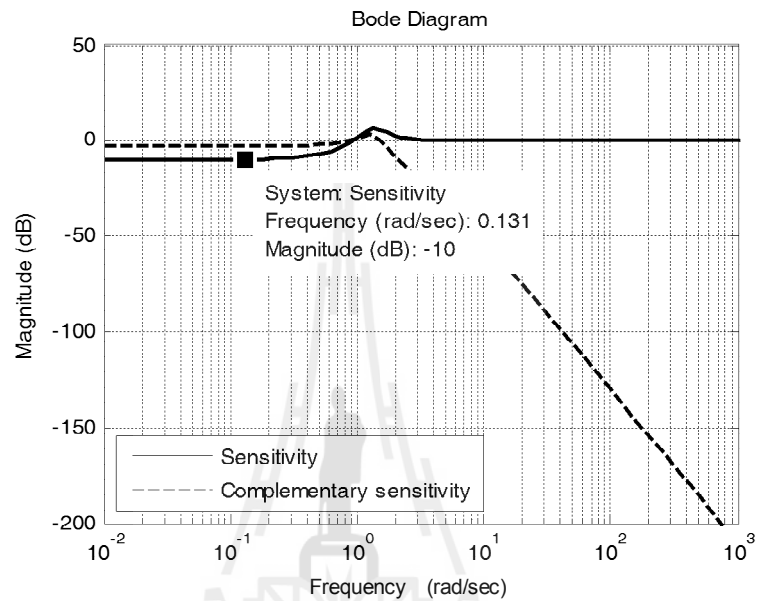
รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลานต์ 3

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.32)

$$S_G^T = \frac{1}{1 + GH(s)} = \frac{0.109s^5 + 1.436s^4 + 4.654s^3 + 6.436s^2 + 4.109s + 1}{0.109s^5 + 1.436s^4 + 4.654s^3 + 6.436s^2 + 7.453s + 3.237} \quad (2.32)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (2.33)

$$T = 1 - S_G^T = \frac{3.344s + 2.237}{0.109s^5 + 1.436s^4 + 4.654s^3 + 6.436s^2 + 7.453s + 3.237} \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.16 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ต 3

จากรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่า ลักษณะของความไวเป็นไปทำนองเดียวกันกับพลาเน็ต 2 จึงอาจกล่าวได้ว่า สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูง และสมรรถนะในการกำจัดการรบกวนจากภายนอกไม่ดีอีกด้วย

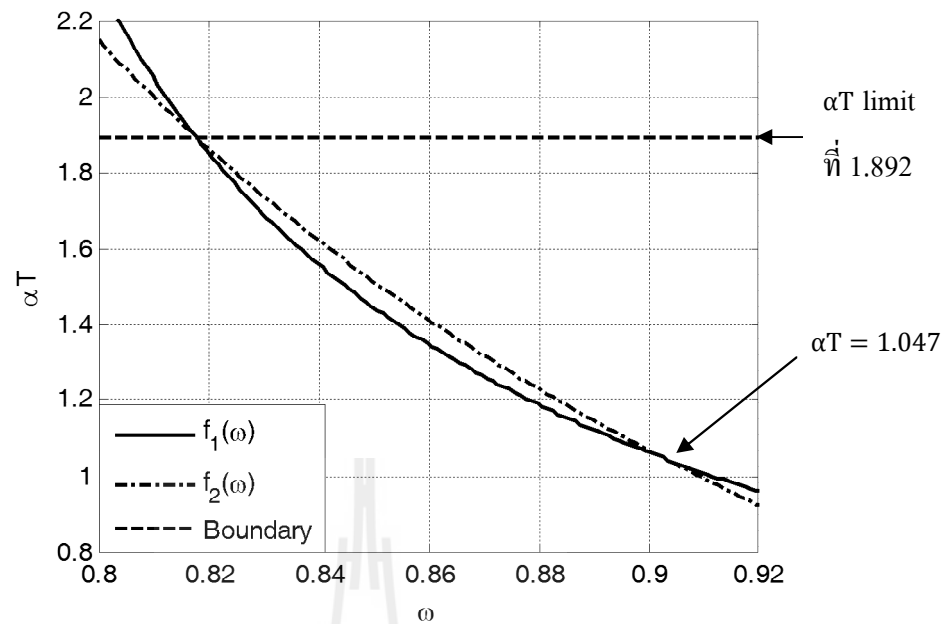
พลาเน็ต 4

$$G(s) = \frac{1}{(10s + 1)^2} e^{-s} \quad (2.34)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°

ขั้นตอนที่ 1 $\omega_g = 0.444$ (กรณี $\lambda = 1$)

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ต 4

ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่า αT จากกราฟได้ $\alpha T = 1.047$ ($0 < \alpha T < 1.892$)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $K_c = 5.931$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $T = 8.366$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (2.35)

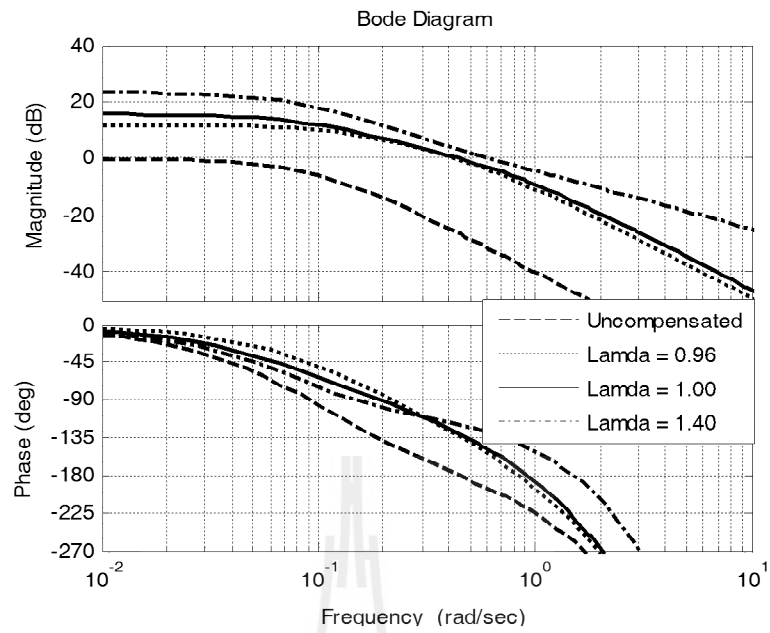
$$G_c(s) = 47.373 \left(\frac{s + 0.120}{s + 0.955} \right) \quad (2.35)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.120

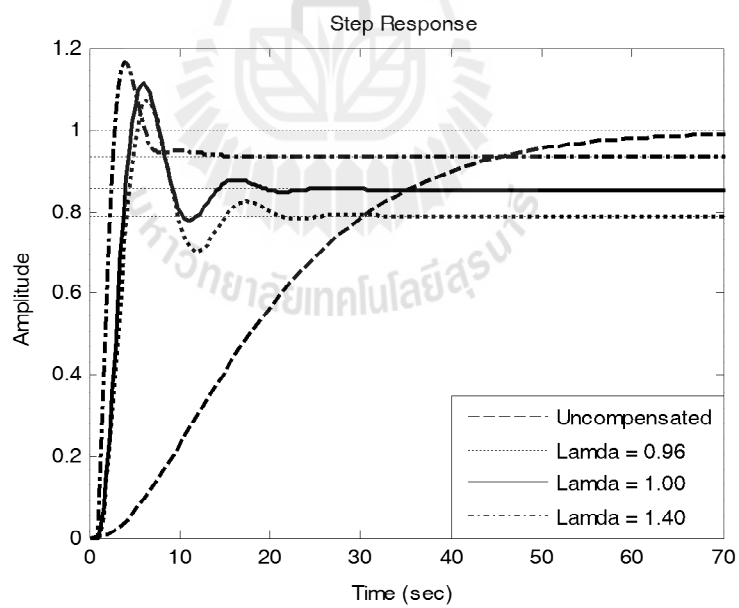
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.955

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.36)

$$GH(s) = \frac{(49.620s + 5.931)e^{-s}}{104.700s^3 + 120.900s^2 + 21.050s + 1} \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.18 แผนภาพ โบคก่อนและหลังการชดเชยของพลาเน็ต 4



รูปที่ 2.19 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ต 4

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.37)

$$T(s) = \frac{(49.620s + 5.931)e^{-s}}{104.700s^3 + 120.900s^2 + 21.050s + 1 + (49.620s + 5.931)e^{-s}} \quad (2.37)$$

ตารางที่ 2.5 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 4

| ผลการตอบสนอง | พลาเน็ตก่อนชดเชย | $\lambda = 0.96$ (min.) | $\lambda = 1.00$ | $\lambda = 1.40$ (max.) |
|---------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 26.307 dB | 8.134 dB | 8.001 dB | 8 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50° | 50.020° | 49.998° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 0.426 rad/sec | 0.443 rad/sec | 0.621 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 33.600 s | 2.210 s | 2.100 s | 1.280 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 36% | 30.600% | 25% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 59.300 s | 19.700 s | 17.600 s | 7.180 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 21% | 14.400% | 6.400% |
| เวลาประวิง | 1 s | 1 s | 1 s | 1 s |
| แบนด์วิดท์ | 0.064 rad/sec | 0.878 rad/sec | 0.935 rad/sec | 1.490 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.200 dB | 2.160 dB | 1.540 dB |

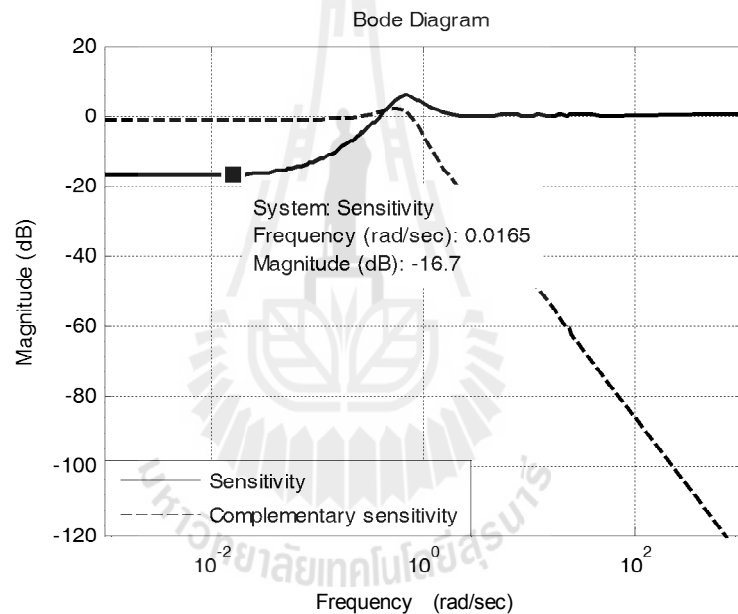
จากตารางที่ 2.5 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ตามที่ต้องการ เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนค่า λ ค่าที่ใช้งานได้อยู่ในช่วง 0.96 ถึง 1.40 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 14.400% ($\lambda = 1$) สำหรับเวลาประวิงทั้งก่อนและหลังการชดเชยไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับ 1 วินาที

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.38)

$$S_G^T = \frac{1}{1 + GH(s)} = \frac{104.700s^3 + 120.900s^2 + 21.050s + 1}{104.700s^3 + 120.900s^2 + 21.050s + 1 + (49.620s + 5.931)e^{-s}} \quad (2.38)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (2.39)

$$T = 1 - S_G^T = \frac{(49.620s + 5.931)e^{-s}}{104.700s^3 + 120.900s^2 + 21.050s + 1 + (49.620s + 5.931)e^{-s}} \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.20 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ต 4

จากรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลาเน็ต 2 และ 3 การอธิบายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกัน จะไม่ขอกล่าวซ้ำอีก

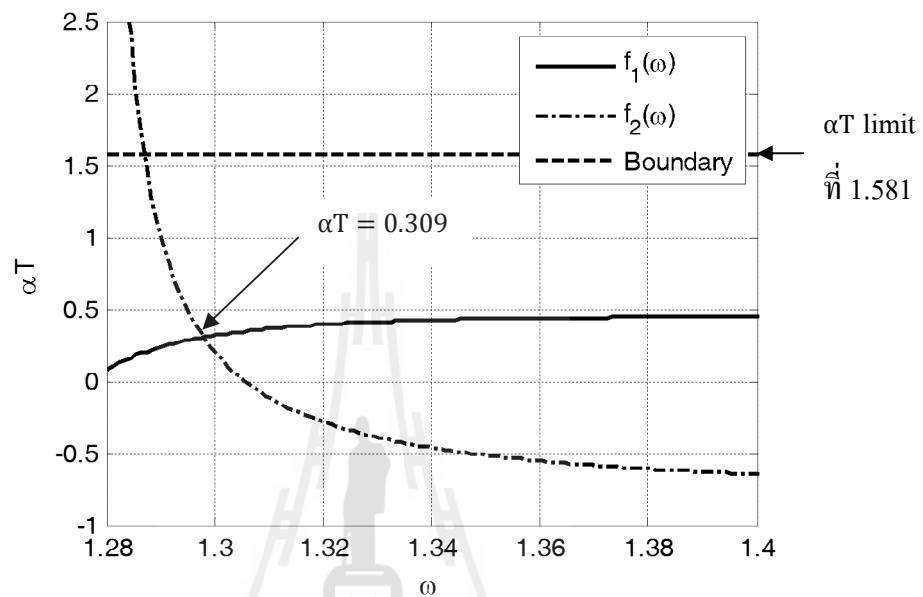
พลาเน็ต 5

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(s^2 + 0.200s + 1)} \quad (2.40)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 30^\circ$

ขั้นตอนที่ 1 $\omega_g = 1.095$ (กรณี $\lambda = 1$)

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลาเน็ต 5

ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่า αT จากกราฟได้ $\alpha T = 0.309$ ($0 < \alpha T < 1.581$)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $K_c = 0.307$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $T = 1.038$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (2.41)

$$G_c(s) = 1.032 \left(\frac{s + 0.963}{s + 3.241} \right) \quad (2.41)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.963

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -3.241

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.42)

$$GH(s) = \frac{0.318s + 0.307}{0.308s^4 + 1.370s^3 + 1.570s^2 + 1.509s + 1} \quad (2.42)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.43)

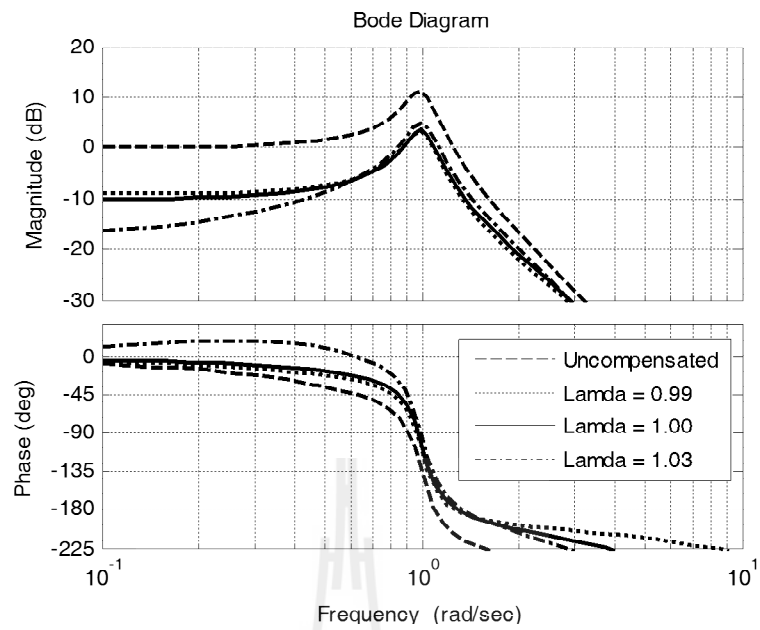
$$T(s) = \frac{0.318s + 0.307}{0.308s^4 + 1.370s^3 + 1.570s^2 + 1.827s + 1.307} \quad (2.43)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.963

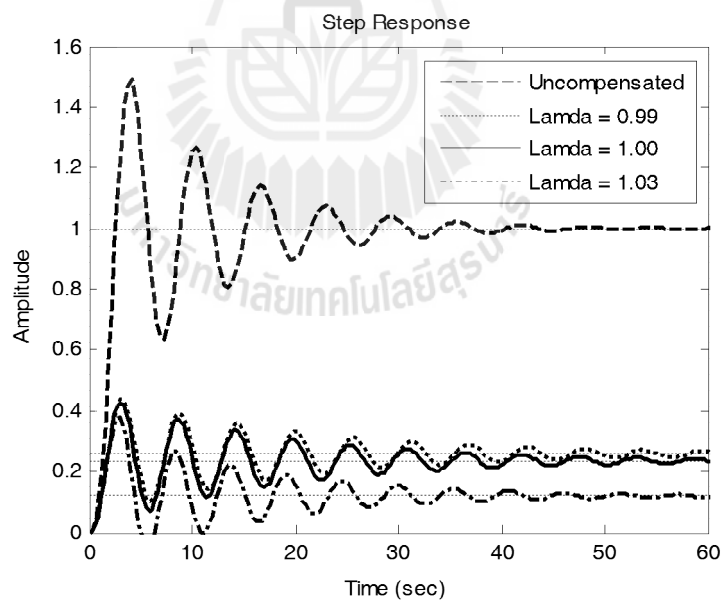
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: $-3.333, -0.993$ และ $-0.058 \pm 1.130i$

ตารางที่ 2.6 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 5

| ผลการตอบสนอง | พลาเน็ตก่อนชดเชย | $\lambda = 0.99$ (min.) | $\lambda = 1.00$ | $\lambda = 1.03$ (max.) |
|---------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -7.131 dB | 8.006 dB | 8 dB | 8.006 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -27.719° | 30.003° | 30° | 29.959° |
| ความถี่ตัดขนาด | 1.253 rad/sec | 1.084 rad/sec | 1.095 rad/sec | 1.128 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 1.500 s | 1.100 s | 1.020 s | 0.707 s |
| การพุ่งเกิน | 48.900% | 69.800% | 81.900% | 213% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 35.900 s | 68.1 s | 66.900 s | 57 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 74.200% | 76.500% | 88% |
| แบนด์วิดท์ | 1.342 rad/sec | 1.609 rad/sec | 1.707 rad/sec | 2.160 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | 11.100 dB | 7.010 dB | 6.890 dB | 6.610 dB |



รูปที่ 2.22 แผนภาพ โบริคก่อนและหลังการชดเชยของพลานต์ 5



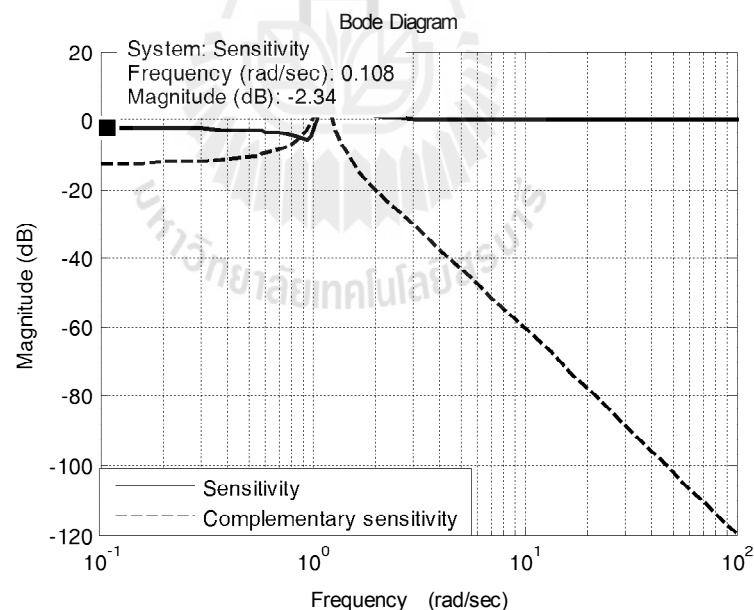
รูปที่ 2.23 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลานต์ 5

จากตารางที่ 2.6 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่า แม้ว่าจะระบบจะมีการสั่นไกวมาก แต่หลังจากชดเชยด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006) แล้วก็ยังคงมีส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ ส่วนค่าที่ใช้งานได้นั้นอยู่ในช่วง 0.99 ถึง 1.03 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 76.500% ($\lambda = 1$) ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (2.44)

$$S_G^T = \frac{1}{1 + GH(s)} = \frac{0.306s^4 + 1.367s^3 + 1.567s^2 + 1.506s + 1}{0.306s^4 + 1.367s^3 + 1.567s^2 + 1.823s + 1.307} \quad (2.44)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (2.45)

$$T = 1 - S_G^T = \frac{0.317s + 0.307}{0.306s^4 + 1.367s^3 + 1.567s^2 + 1.823s + 1.307} \quad (2.45)$$



รูปที่ 2.24 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชยของพลาเน็ต 5

จากรูปที่ 2.24 จะเห็นได้ว่าในย่านความถี่ต่ำ ความไวของระบบมีค่าสูง (ประมาณ -2 dB) รูปแบบของความไวคล้ายกับกรณีพลาเน็ต 2, 3 และ 4 เช่นกัน

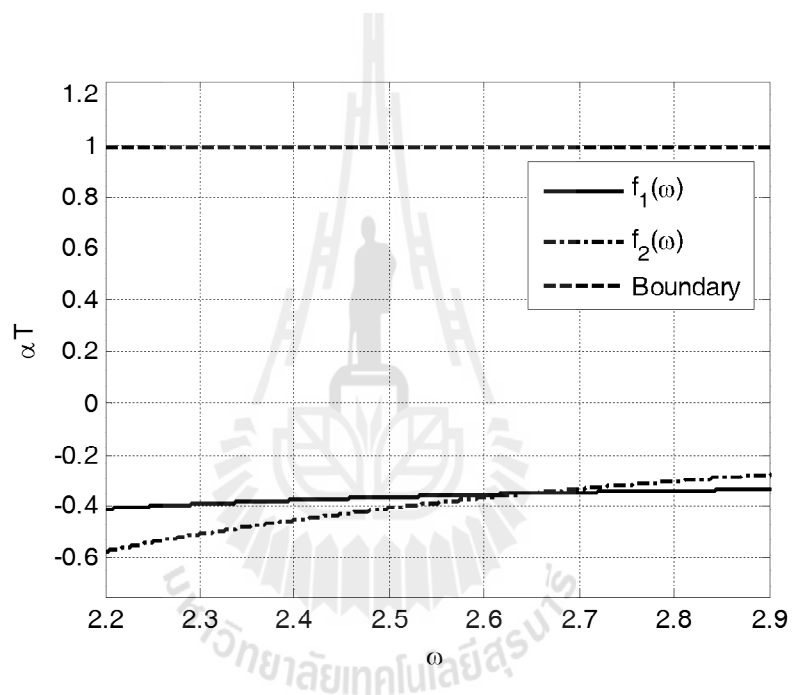
พลานต์ 6

$$G(s) = \frac{1 - 2s}{(s + 1)^3} \quad (2.46)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°

ขั้นตอนที่ 1 $\omega_g = 0.845$ (กรณี $\lambda = 1$)

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ของพลานต์ 6

จากรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่าจุดตัดของกราฟอยู่นอกเงื่อนไขขอบเขต โดยมีค่าต่ำกว่าศูนย์ ทำให้ไม่สามารถออกแบบตัวชดเชยด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006) ได้

2.4 สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 2.7 จะเห็นว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสได้อย่างแม่นยำ โดยใช้ได้ผลดีกับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งได้แก่พลานต์ตัวอย่างในบทความของ Wang et al. (2006) และพลานต์ 1 ส่วนระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งได้แก่พลานต์ 2, 3, 4 และ 5 พบว่ามีค่าผิดพลาดใน

ตารางที่ 2.7 สรุปผลการทดสอบ

| พลานต์ | ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย (dB) | 7.998 | 8.001 | 7.998 | 8.003 | 8.001 | 8.000 |
| ส่วนเพื่อเฟส (°) | 50.008 | 50.026 | 50.001 | 50.000 | 50.020 | 49.998 |
| ความถี่ตัดขนาด (rad/sec) | 1.316 | 0.577 | 2.828 | 1.000 | 0.443 | 0.621 |
| เวลาขาขึ้น (s) | 0.776 | 2.060 | 0.377 | 1.090 | 2.100 | 1.280 |
| การพุ่งเกิน (%) | 18.800 | 18.500 | 37.400 | 42.300 | 30.600 | 25.000 |
| เวลาเข้าที่ (s) | 4.560 | 13.400 | 3.770 | 13.100 | 17.600 | 7.180 |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} (%) | 0 | 0 | 24.500 | 30.900 | 14.400 | 6.400 |
| แบนด์วิดท์ (rad/sec) | 2.702 | 1.090 | 5.387 | 1.849 | 0.935 | 1.490 |
| ขนาดสูงสุดระบบวงปิด (dB) | 2.090 | 2.610 | 2.760 | 2.990 | 2.160 | 1.540 |

สถานะอยู่ตัวสูง สาเหตุเนื่องจากวิธีการของ Wang et al. (2006) ใช้การปรับอัตราขยายของระบบ เพื่อให้ได้จุดตัดขนาดที่ต้องการ สำหรับการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ปรับแต่ง λ จะทำให้ความถี่ตัดขนาดเปลี่ยนแปลงไป แต่ยังคงได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ การเพิ่มค่า λ จะทำให้แบนด์วิดท์ของระบบเพิ่มขึ้นจึงทำให้เวลาขาขึ้นเร็วขึ้น ส่วนการพุ่งเกิน เวลาเข้าที่ และขนาดสูงสุด จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของตัวชดเชยซึ่งก็คืออัตราขยายและขนาดกับเฟสของตัวชดเชยเฟสล่วงหน้าที่แปรเปลี่ยนเพื่อทำให้ได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ สำหรับพลานต์ 6 ไม่สามารถใช้วิธีการของ Wang et al. (2006) ออกแบบให้ได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการเนื่องจากจุดตัดของกราฟอยู่นอกเงื่อนไขขอบเขต เมื่อพิจารณาความไวของระบบวงปิดสำหรับพลานต์ที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบพบว่ามีความสามารถที่ดีในการตามรอยอินพุตและกำจัดการรบกวนจากภายนอกตลอดจนสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงได้ดี แต่สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบพบว่าระบบมีความสามารถในการกำจัดการรบกวนจากภายนอกและการติดตามรอยอินพุตที่ไม่ดีนัก แต่อย่างไรก็ตามวิธีการของ Wang et al. (2006) สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงได้ดี

บทที่ 3

การออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล่าหน้าให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำด้วยการผสมผสานวิธีการเดิมกับวิธีการใหม่

3.1 กล่าวนำ

การออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าหรือเฟสล่าช้าเพียงอย่างเดียว นั้น บางครั้งก็อาจทำให้เกิดปัญหาในการควบคุม ในสถานการณ์จริงอาจพบว่า ตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้าทำให้ต้องใช้อัตราขยายที่สูงมาก จนขับให้ระบบเข้าสู่ย่านการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรืออาจทำให้มีสัญญาณรบกวนต่อระบบมากเกินไป ส่วนตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้าก็อาจทำให้ระบบวงปิดมีการตอบสนองช้าจนเกินไป แนวทางหนึ่งที่จะช่วยบรรเทาปัญหาทางเทคนิคที่อาจจะเกิดขึ้นนี้ คือการใช้ตัวชดเชยล่าช้ากับล่าหน้า (lag-lead compensation) ซึ่งจะนำจุดแข็งของตัวชดเชยแต่ละแบบมาผสมกัน ในขณะที่บรรเทาจุดอ่อนที่อาจเกิดขึ้นลงไปได้บางส่วน การดำเนินงานออกแบบ เราอาจเริ่มออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้าก่อน เพื่อให้ได้อัตราขยายในย่านความถี่ต่ำตามที่ต้องการ ตลอดจนปรับปรุงส่วนเพื่อเฟสไว้ระดับหนึ่งก่อน ต่อจากนั้นจึงออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสล่าหน้าเสริมเข้าไป เพื่อยกระดับส่วนเพื่อเฟสให้ได้ตามที่ต้องการ พร้อมทั้งขยายแบนด์วิดท์ของระบบวงปิด ช่วยให้ระบบที่ชดเชยแล้วมีการตอบสนองที่รวดเร็วยิ่งขึ้น (สราวุฒิ สุจิตจร, 2546) สำหรับในบทนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล่าหน้า ให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ โดยจะทำการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าก่อน ด้วยวิธี Bode compensator design (Wakeland, 1976; Mitchell, 1977) ต่อจากนั้นจึงดำเนินการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหน้าด้วยวิธี Tuning of phase lead compensator (Wang et al., 2006) เสร็จแล้วนำวิธีการที่นำเสนอขึ้นไปทดสอบกับพลาเน็ตจำนวน 7 พลาเน็ต เช่นเดียวกับที่ทดสอบวิธีการของ Wang et al. (2006) ในบทที่ 2

3.2 ขั้นตอนการออกแบบ

วิธีการออกแบบในบทนี้ มีจุดประสงค์เพื่อให้ระบบวงรอบปิดหลังการชดเชย มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสตามที่ต้องการอย่างแม่นยำ โดยในขั้นตอนแรกที่ทำกรออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า นั้น เราสามารถที่จะกำหนดปริมาณของส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการได้อย่างอิสระ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณส่วนเพื่อเฟสที่สร้างขึ้นโดยตัวชดเชยเฟสล่าช้า นั้นควรอยู่ในช่วง 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการทั้งหมด จากนั้นจึงใช้ตัวชดเชยเฟสล่าหน้าสร้างส่วน

เพื่อเฟสที่เหลือ พร้อมกับปรับส่วนเพื่ออัตราขยายให้ได้ตามที่ต้องการ สาเหตุที่ใช้ตัวชดเชยแบบ ผสมเฟสล่าหลัง-ล่าหน้า ก็เพื่อที่จะใช้คุณสมบัติของตัวชดเชยเฟสล่าหลัง ช่วยลดค่าผิดพลาดใน สถานะอยู่ตัวของระบบหลังการชดเชยนั่นเอง

รูปแบบของตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้าที่ใช้ในการออกแบบแสดงดังสมการ (3.1)

$$G_{lag}G_{lead}(s) = \left[\frac{\alpha Ts + 1}{Ts + 1} \right] \left[K_c \frac{Ts + 1}{\alpha_1 Ts + 1} \right] \quad (3.1)$$

ในส่วนแรกเป็นการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหลังโดยใช้วิธี Bode compensator design (Wakeland, 1976; Mitchell, 1977)

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาอัตราขยายของระบบวงรอบปิด ที่ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ ตามที่กำหนด โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้อินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยเป็นสัญญาณทดสอบ เช่นเดียวกันกับที่ใช้ในบทความของ Wang et al. (2006) ทั้งนี้เพื่อการเปรียบเทียบผล ดังนั้นเราจึง สามารถคำนวณหาอัตราขยายได้จากสมการ (3.2)

$$K = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} G(s)} \left(\frac{1}{e_{ss}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

โดยที่ $G(s)$ คือ พลาเน็ตวงรอบเปิดก่อนการชดเชย
 e_{ss} คือ ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ต้องการ (%error)

ขั้นตอนที่ 2 เลือกจุดตัดขนาดที่ตำแหน่งใหม่ ($\omega_{odB,new}$) ที่ทำให้ตัวชดเชยเฟสล่าหลังสร้าง ส่วนเพื่อเฟสไว้ส่วนหนึ่งก่อน โดยพิจารณาจากแผนภาพโบคของระบบวงรอบเปิด จากนั้นให้อ่าน ค่าขนาดที่ตำแหน่งความถี่ใหม่นี้ด้วย

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า α จากสมการ (3.3)

$$A\alpha^2 + B\alpha + C = 0 \quad (3.3)$$

โดยที่ $A = q^2 - r + 1$ (3.4)

$$B = 2q^2r \quad (3.5)$$

$$C = (qr)^2 + r^2 - r \quad (3.6)$$

$$q = \tan(-5^\circ) \quad (3.7)$$

$$r = 10^{0.1m} \quad (3.8)$$

$$m = -\text{ขนาดที่อ่านได้จากขั้นตอนที่ 2 (เดซิเบล)} \quad (3.9)$$

วิธี Bode compensator design (Wakeland, 1976; Mitchell, 1977) ในขั้นตอนนี้ใช้เพื่อกำหนดส่วนเพื่อเฟสใหม่ โดยการเปลี่ยนแปลงจุดตัดขนาด ($\omega_{\text{odB,new}}$) ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เกี่ยวกับการกำหนดส่วนเพื่ออัตราขยายแต่อย่างใด นอกจากนี้ผลกระทบจากเฟสล้าหลังก็ไม่ได้เป็นอย่างไรแม้ว่า แต่ถูกประมาณไว้ที่ -5° ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นวิธีที่ให้ผลเฉพาะส่วนเพื่อเฟสใหม่โดยการประมาณเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่า τ จากสมการ (3.10)

$$\tau = \frac{1}{\omega_{\text{odB,new}}} \sqrt{\frac{1-r}{r-\alpha^2}} \quad (3.10)$$

ในส่วนที่สองเป็นการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้าหน้าโดยใช้วิธีการของ Wang et al. (2006)

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณความถี่ตัดขนาด ω_g ของระบบวงรอบเปิดหลังชดเชยดังสมการ (3.11)

$$\omega_g = \lambda \omega_{Gp} \quad (3.11)$$

โดยที่ ω_{Gp} คือ ความถี่ตัดเฟสของพลาเน็ตวงรอบเปิดก่อนชดเชย (เรเดียน/วินาที)
 λ คือ พารามิเตอร์ปรับแต่ง ซึ่ง $\lambda \in [0.500 \ 2]$ ในบทความของ Wang et al. (2006) แนะนำค่า $\lambda = 1$ ในการใช้งาน

ขั้นตอนที่ 6 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ตามสมการ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ

$$f_1(\omega) = \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{-1}{A_m G_{\text{lag}} G_p(j\omega)} \right] - \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right]}{\omega \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{A_m G_{\text{lag}} G_p(j\omega)} \right] - \omega_g \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right]} \quad (3.12)$$

$$f_2(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega_g} \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right] - \frac{1}{\omega} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{A_m G_{\text{lag}} G_p(j\omega)} \right]}{\operatorname{Re} \left[\frac{-1}{A_m G_{\text{lag}} G_p(j\omega)} \right] - \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right]} \quad (3.13)$$

| | | | |
|--------|---------------------------------|-----|---|
| โดยที่ | A_m | คือ | ส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการ เป็นค่าจริงไม่แสดงหน่วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $10^{(GM_{dB})/20}$ |
| | θ_m | คือ | ส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการ (เรเดียน) เท่ากับ $\frac{\pi}{180} (PM_{deg})$ |
| | $G_{\text{lag}} G_p(j\omega)$ | คือ | พลาเน็ตว่รอบเปิด ณ ความถี่ต่าง ๆ หลังชดเชยด้วยเฟสล้หลัง |
| | $G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)$ | คือ | พลาเน็ตว่รอบเปิด ณ ความถี่ตัดขนาดใหม่ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 หลังจากชดเชยด้วยเฟสล้หลัง |

จุดตัดระหว่างกราฟทั้งสองคือค่า $\alpha_1 T$ ซึ่งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตในสมการ (3.14)

$$\frac{\operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right]}{\omega_g \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right]} > \alpha_1 T > 0 \quad (3.14)$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่า K_c จากสมการ (3.15)

$$K_c = \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right] - \omega_g \alpha_1 T \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}}{G_{\text{lag}} G_p(j\omega_g)} \right] \quad (3.15)$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่า T จากสมการ (3.16)

$$T = \frac{\text{Im} \left[\frac{-1}{A_m G_{lag} G_p(j\omega_p)} \right] + \alpha_1 T \omega_p \text{Re} \left[\frac{-1}{A_m G_{lag} G_p(j\omega_p)} \right]}{K_c \omega_p} \quad (3.16)$$

3.3 ผลการออกแบบ

นำวิธีการออกแบบที่นำเสนอ มาทดสอบกับพลาเน็ตทั้ง 7 แบบ ที่ใช้เพื่อทดสอบกับวิธีการของ Wang et al. (2006) ในบทที่ 2

พลาเน็ต 1

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)^3} \quad (3.17)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

ขั้นตอนที่ 1 ระบบนี้มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ จึงไม่ต้องคำนวณหาค่าอัตราขยายใหม่

ขั้นตอนที่ 2 $\omega_{0dB,new} = 0.470$ (ตัวชดเชยเฟสที่หลังสร้าง PM ไว้ 30% ของทั้งหมด)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $\alpha = 0.604$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $\tau = 15.474$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $\omega_g = 0.577$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่า $\alpha_1 T = 0.298$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า $K_c = 0.651$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่า $T = 3.530$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (3.18)

$$G_c(s) = 4.660 \left[\frac{s + 0.283}{s + 3.359} \right] \left[\frac{s + 0.107}{s + 0.065} \right] \quad (3.18)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.283 และ -0.107

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -3.359 และ -0.065

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.19)

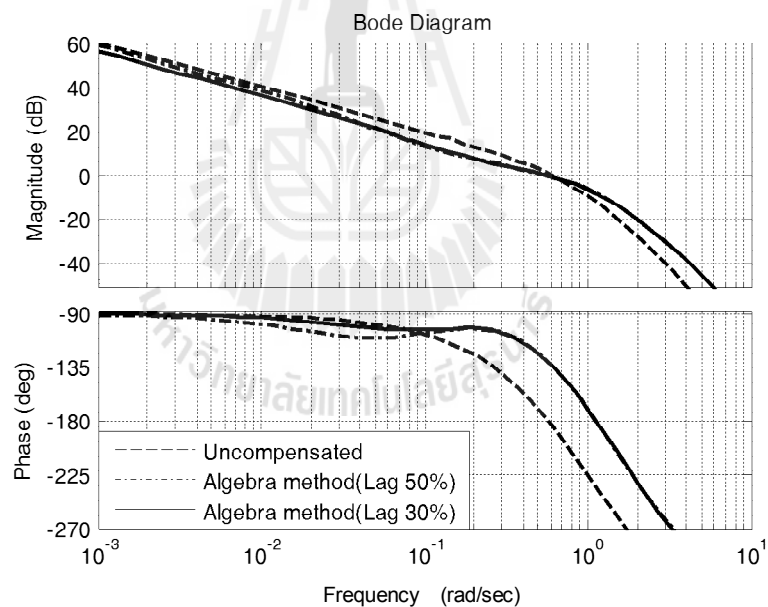
$$GH(s) = \frac{1.388s^2 + 0.542s + 0.042}{0.298s^6 + 1.912s^5 + 4.016s^4 + 3.549s^3 + 1.213s^2 + 0.065s} \quad (3.19)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.20)

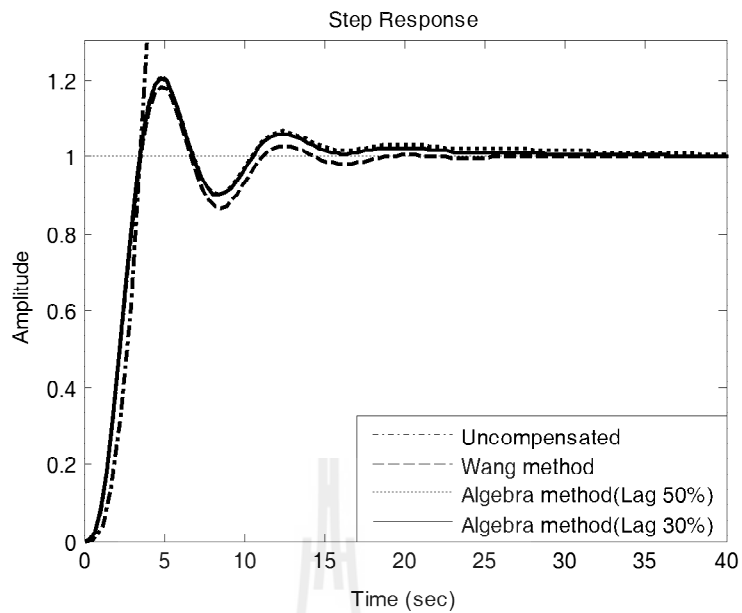
$$T(s) = \frac{1.388s^2 + 0.542s + 0.042}{0.298s^6 + 1.912s^5 + 4.016s^4 + 3.549s^3 + 2.601s^2 + 0.606s + 0.042} \quad (3.20)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.283 และ -0.107

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: $-0.174, -0.138, -2.804 \pm 0.373i$ และ -0.252 ± 0.822



รูปที่ 3.1 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 1)



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลานต์ 1)

ตารางที่ 3.1 ผลการตอบสนองของพลานต์ 1 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ

| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | Lag-Lead(50%) | Lag-Lead(30%) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -1.024 dB | 8.001 dB | 8.005 dB | 8 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -4.970° | 50.026° | 50° | 50° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0.617 rad/sec | 0.577 rad/sec | 0.577 rad/sec | 0.577 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | N/A | 2.060 s | 2.020 s | 2.020 s |
| การพุ่งเกิน | N/A | 18.500% | 20.800% | 20.600% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | N/A | 13.400 s | 27.100 s | 21.200 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | N/A | 0% | 0% | 0% |
| แบนด์วิดท์ | N/A | 1.090 rad/sec | 1.102 rad/sec | 1.102 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.610 dB | 2.620 dB | 2.620 dB |

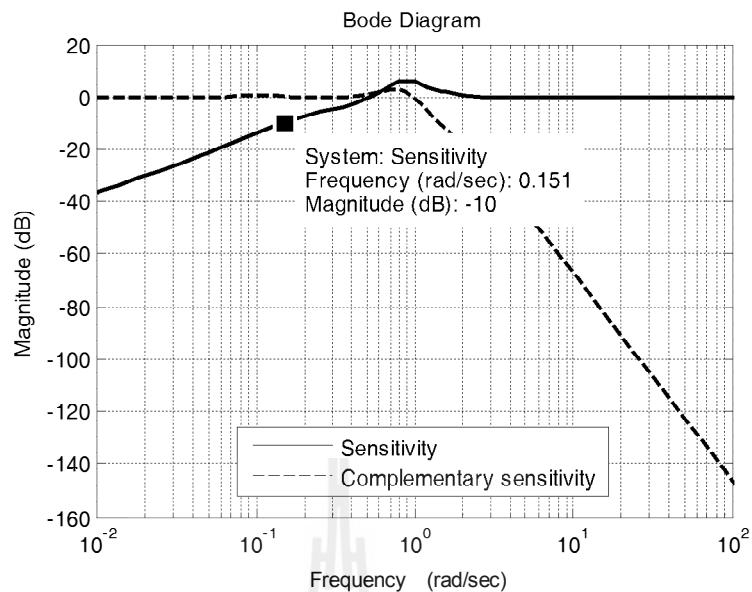
สำหรับการออกแบบตัวชดเชยแบบผสมเฟสล่าหลัง-ล่าหน้า ตามปกติแล้วเราจะให้ตัวชดเชยเฟสล่าหลังสร้างส่วนเฟสไว้ประมาณ 30-50% ของส่วนเฟสที่ต้องสร้างทั้งหมด (หากน้อยกว่า 30% ใช้ตัวชดเชยเฟสล่าหน้าเพียงอย่างเดียวก็พอ และหากมากกว่า 50% ใช้ตัวชดเชยเฟสล่าหลังเพียงอย่างเดียวก็พอ) ด้วยเหตุนี้เราจะทดสอบทั้งแบบ 30% และ 50% เพื่อเปรียบเทียบผลเมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมี $GM = 8$ dB, $PM = 50^\circ$ และ $\omega_g = 0.577$ rad/sec ซึ่งให้ผลตรงตามที่ต้องการ (ก่อนการชดเชย $GM = -1.024$ dB และ $PM = -4.970^\circ$) ในย่านความถี่ต่ำผลของตัวชดเชยเฟสล่าหลังที่แตกต่างกันจะทำให้ลักษณะกราฟต่างกัน แต่ในย่านความถี่สูงผลของตัวชดเชยเฟสล่าหน้าจะปรับกราฟทั้งสองให้ทับกันพอดี เพื่อให้ได้ส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเฟสตามที่ต้องการ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเวลา หลังการชดเชยเราสามารถควบคุมให้พลานต์ผลิตการตอบสนองเข้าสู่ระดับคงตัวที่หนึ่งหน่วยตามต้องการ กราฟ PM 30% และ 50% (เพื่อความกระชับในการอภิปราย ต่อไปขอเรียกการชดเชยด้วยเฟสล่าหลัง 30% และ 50% ว่า PM 30% และ 50% ตามลำดับ) มีเวลาขาขึ้นและการพุ่งเกินใกล้เคียงกันมาก แตกต่างกันตรงเวลาเข้าที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดพารามิเตอร์ของตัวชดเชยเฟสล่าหลังที่แตกต่างกัน โดยตัวชดเชยเฟสล่าหลังที่สร้างส่วนเฟสมากกว่า (ในที่นี้คือ PM 50%) จะมีเวลาเข้าที่ช้ากว่า สำหรับการคำนวณในบทถัด ๆ ไปเราจะใช้ข้อมูลการทดสอบที่ค่า 30% เพียงค่าเดียวเนื่องจากให้เวลาเข้าที่ที่เร็วกว่าจากผลการทดลองสรุปได้ว่า วิธีการที่นำเสนอให้ส่วนเผื่อเสถียรภาพอย่างแม่นยำตามที่ต้องการ แต่สำหรับระบบนี้ซึ่งมีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.21)

$$S_G^T = \frac{0.282s^6 + 1.853s^5 + 3.891s^4 + 3.375s^3 + 1.080s^2 + 0.024s}{0.282s^6 + 1.853s^5 + 3.891s^4 + 3.375s^3 + 2.496s^2 + 0.517s + 0.036} \quad (3.21)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (3.22)

$$T = \frac{1.416s^2 + 0.493s + 0.036}{0.282s^6 + 1.853s^5 + 3.891s^4 + 3.375s^3 + 2.496s^2 + 0.517s + 0.036} \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.3 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 1)

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ลักษณะของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับตอนทดสอบด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006) ในบทที่ 2 คือระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดการรบกวนจากภายนอกและสามารถตามรอยอินพุตได้ดี รวมทั้งสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูงได้ดีอีกด้วย

พลาเน็ต 2

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(0.500s + 1)(0.250s + 1)(0.125s + 1)} \quad (3.23)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

- ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่า $K = 99$ (กำหนดให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1%)
- ขั้นตอนที่ 2 $\omega_{0dB,new} = 4.460$ (ตัวชดเชยเฟสล้ำหลังสร้าง PM ไว้ 30% ของทั้งหมด)
- ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $\alpha = 0.191$
- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $\tau = 10.810$
- ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $\omega_g = 2.828$
- ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่า $\alpha_1 T = 0.080$
- ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า $K_c = 0.120$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่า $T = 1.004$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (3.24)

$$G_c(s) = 28.413 \left[\frac{s + 0.484}{s + 0.093} \right] \left[\frac{s + 0.996}{s + 12.480} \right] \quad (3.24)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.996 และ -0.484

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -12.484 และ -0.093

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.25)

$$GH(s) = \frac{2.276s^2 + 3.369s + 1.097}{0.001s^6 + 0.035s^5 + 0.325s^4 + 1.274s^3 + 2.070s^2 + 1.181s + 0.093} \quad (3.25)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.26)

$$T(s) = \frac{2.276s^2 + 3.369s + 1.097}{0.001s^6 + 0.035s^5 + 0.325s^4 + 1.274s^3 + 4.346s^2 + 4.549s + 1.189} \quad (3.26)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.997 และ -0.484

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.395, -0.997, -12.045 ± 3.516i และ -1.041 ± 3.774i

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมี $GM = 8$ dB, $PM = 50^\circ$ และ $\omega_g = 2.83$ rad/sec ซึ่งให้ผลตรงตามที่ต้องการแบบไว้ ลักษณะของกราฟเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพลานต์ 1 กล่าวคือในย่านความถี่ต่ำ ลักษณะกราฟต่างกัน ในย่านความถี่สูงกราฟทั้งสองทับกันพอดี เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าหลังการชดเชยวิธีการของ Wang et al. (2006) วิธี PM 30% และ 50% มีเวลาขาขึ้นใกล้เคียงกันเนื่องจากเราออกแบบให้ความถี่ตัดขนาดเท่ากันจึงทำให้แบนด์วิดธ์ใกล้เคียงกัน ส่วนค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว PM 50% มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวต่ำที่สุดเพียง 3.500% เนื่องจากการที่เราใช้ตัวชดเชยเฟสล่าหลังสร้างส่วนเพื่อเฟสไว้ก่อนถึง 50% ซึ่งคุณสมบัติของตัวชดเชยเฟสล่าหลังจะช่วยลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้เป็นอย่างดี ส่วนการพุ่งเกินและเวลาเข้าที่จะแตกต่างกันไปขึ้นกับค่า Final value และผลของตัวชดเชยเฟสล่าหน้า จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการที่นำเสนอสามารถให้

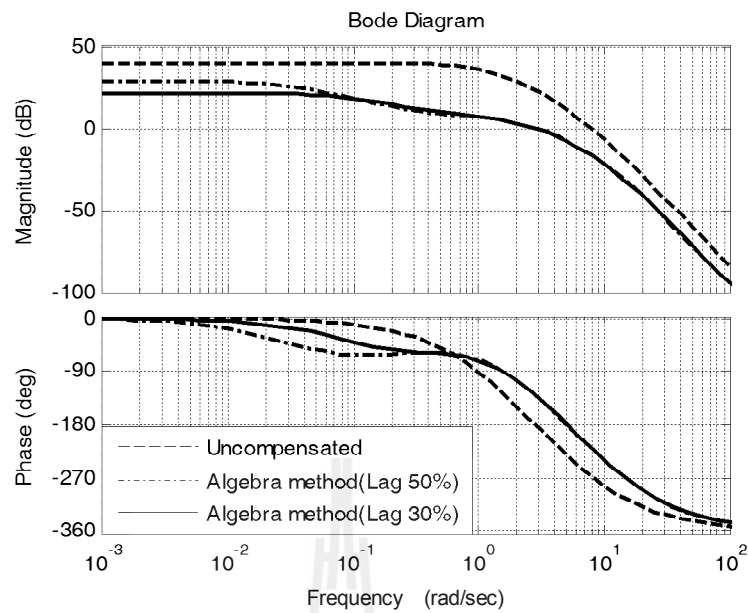
ส่วนเพื่อเสถียรภาพอย่างแม่นยำตามที่ต้องการ และลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลงได้ต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ซึ่งมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 24.500%

ตารางที่ 3.2 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 2 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ

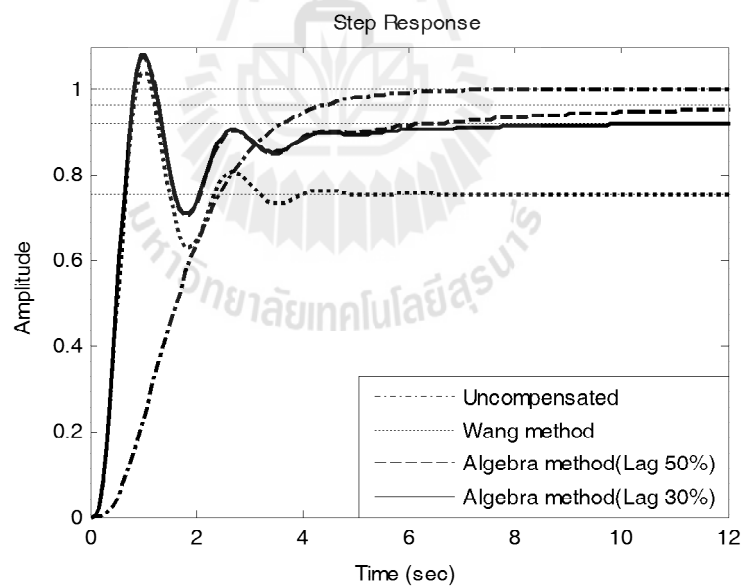
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | Lag-Lead(50%) | Lag-Lead(30%) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 16.586 dB | 7.998 dB | 7.998 dB | 7.997 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50.001° | 50.001° | 50.001° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 2.828 rad/sec | 2.828 rad/sec | 2.828 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 2.700 s | 0.377 s | 0.461 s | 0.481 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 37.400% | 11.600% | 7.920% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 5.020 s | 3.770 s | 9.710 s | 17.200 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 24.500% | 3.500% | 7.800% |
| เวลาประวิง | 0 s | 0 s | 0 s | 0 s |
| แบนด์วิดท์ | 0.799 rad/sec | 5.387 rad/sec | 5.065 rad/sec | 5.147 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.760 dB | 2.780 dB | 2.780 dB |

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.27)

$$S_G^T = \frac{0.001s^6 + 0.035s^5 + 0.325s^4 + 1.250s^3 + 4.212s^2 + 4.164s + 0.514}{0.001s^6 + 0.035s^5 + 0.325s^4 + 1.250s^3 + 1.966s^2 + 1.014s + 0.007} \quad (3.27)$$



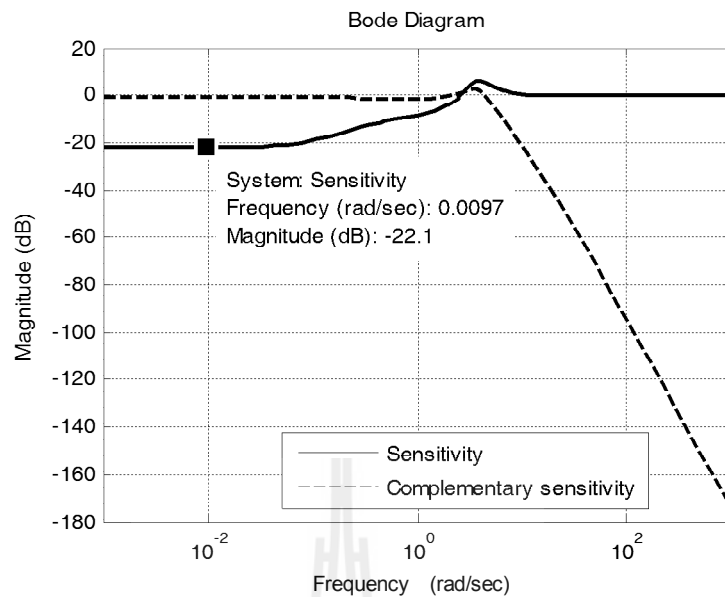
รูปที่ 3.4 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 2)



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 2)

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (3.28)

$$T = \frac{2.246s^2 + 3.150s + 0.507}{0.001s^6 + 0.035s^5 + 0.325s^4 + 1.250s^3 + 1.966s^2 + 1.014s + 0.007} \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.6 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 2)

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำระบบมีความไวประมาณ -22 dB ซึ่งต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ในบทที่ 2 ซึ่งมีความไวประมาณ -12 dB ส่วนในย่านความถี่สูงให้ผลการตอบสนองที่คล้ายกัน ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยลดความไวของระบบในย่านความถี่ต่ำได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006)

พลาเน็ต 3

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (3.29)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

- ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่า $K = 99$ (กำหนดให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1%)
- ขั้นตอนที่ 2 $\omega_{0dB,new} = 1.650$ (ตัวชดเชยเฟสล่าหลังสร้าง PM ไว้ 30% ของทั้งหมด)
- ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $\alpha = 0.137$
- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $\tau = 43.643$
- ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $\omega_g = 1$
- ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่า $\alpha_1 T = 0.096$
- ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า $K_c = 0.130$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่า $T = 2.023$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (3.30)

$$G_c(s) = 36.927 \frac{[s + 0.168]}{[s + 0.023]} \frac{[s + 0.494]}{[s + 10.380]} \quad (3.30)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.494 และ -0.168

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -10.380 และ -0.023

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.31)

$$GH(s) = \frac{3.554s^2 + 2.352s + 0.294}{0.096s^6 + 1.387s^5 + 4.610s^4 + 6.490s^3 + 4.243s^2 + 1.094s + 0.023} \quad (3.31)$$

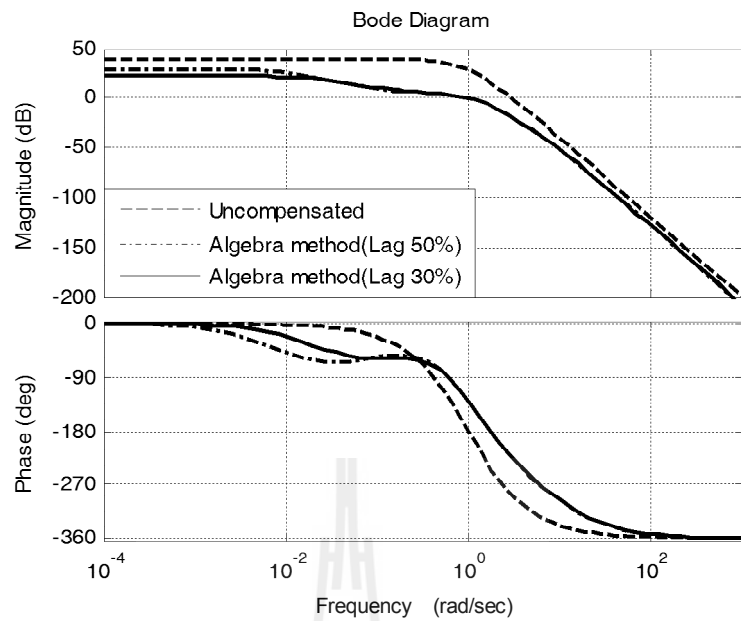
ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.32)

$$T(s) = \frac{3.554s^2 + 2.352s + 0.294}{0.096s^6 + 1.387s^5 + 4.610s^4 + 6.490s^3 + 7.797s^2 + 3.446s + 0.317} \quad (3.32)$$

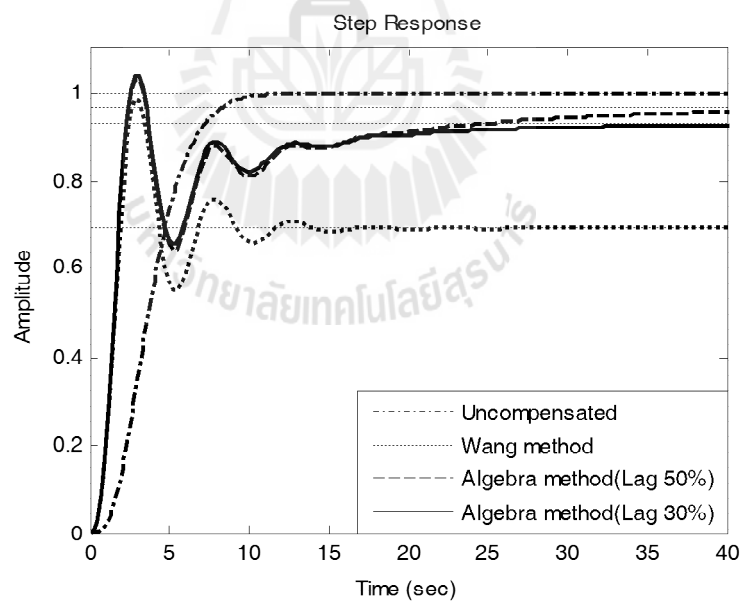
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.494 และ -0.168

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -10.327, -2.811, -0.515, -0.123 และ $-0.312 \pm 1.301i$

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมีส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ ลักษณะของกราฟเป็นไปในการทำงานเดียวกันกับพลานต์ 1 และ 2 จึงไม่ขอกกล่าวซ้ำอีก เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังจากการชดเชยกราฟ PM 30% และ 50% ในช่วงการตอบสนองชั่วคราวแทบจะซ้อนทับกันพอดี แตกต่างกันที่ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว PM 30% มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว 7.200% ส่วน PM 50% มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเพียง 3.300% ซึ่งต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ซึ่งมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 30.900%



รูปที่ 3.7 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 3)



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองใน โดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 3)

ตารางที่ 3.3 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 3 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ

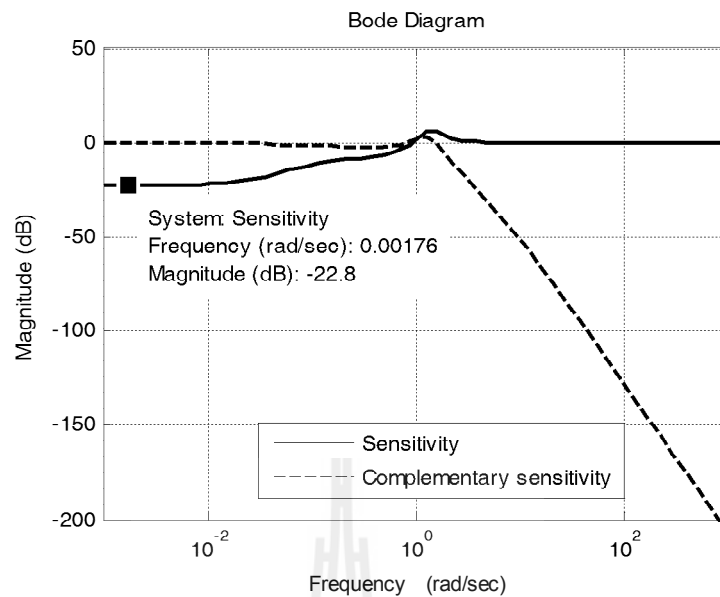
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | Lag-Lead(50%) | Lag-Lead(30%) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 12.041 dB | 8.003 dB | 8.007 dB | 8.007 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50° | 50° | 50° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 1 rad/sec | 1 rad/sec | 1 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 4.940 s | 1.090 s | 1.440 s | 1.350 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 42.3% | 6.480% | 11.900% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 9.080 s | 13.100 s | 32.900 s | 21.500 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 30.900% | 3.300% | 7.200% |
| เวลาประวิง | 0 s | 0 s | 0 s | 0 s |
| แบนด์วิดท์ | 0.434 rad/sec | 1.849 rad/sec | 1.707 rad/sec | 1.732 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.990 dB | 3.020 dB | 3.020 dB |

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.33)

$$S_G^T = \frac{0.096s^6 + 1.387s^5 + 4.610s^4 + 6.490s^3 + 4.243s^2 + 1.094s + 0.023}{0.096s^6 + 1.387s^5 + 4.610s^4 + 6.490s^3 + 7.797s^2 + 3.446s + 0.317} \quad (3.33)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (3.34)

$$T = \frac{3.554s^2 + 2.352s + 0.294}{0.096s^6 + 1.387s^5 + 4.610s^4 + 6.490s^3 + 7.797s^2 + 3.446s + 0.317} \quad (3.34)$$



รูปที่ 3.9 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 3)

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำระบบมีความไวประมาณ -23 dB ซึ่งต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ที่นำเสนอไปในบทที่ 2 ซึ่งมีความไวประมาณ -10 dB ส่วนในย่านความถี่สูงให้ผลการตอบสนองที่คล้ายกัน ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยลดความไวของระบบในย่านความถี่ต่ำได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับตอนทดสอบกับพลาเน็ต 2

พลาเน็ต 4

$$G(s) = \frac{1}{(10s + 1)^2} e^{-s} \quad (3.35)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

- ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่า $K = 99$ (กำหนดให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1%)
- ขั้นตอนที่ 2 $\omega_{0dB,new} = 0.570$ (ตัวชดเชยเฟสสี่เหลี่ยมสร้าง PM ไว้ 30% ของทั้งหมด)
- ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $\alpha = 0.324$
- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $\tau = 41.530$
- ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $\omega_g = 0.444$
- ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่า $\alpha_1 T = 0.938$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า $K_c = 0.131$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่า $T = 11.589$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (3.36)

$$G_c(s) = 52.173 \frac{[s + 0.074]}{[s + 0.024]} \frac{[s + 0.086]}{[s + 1.066]} \quad (3.36)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.086 และ -0.074

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -1.066 และ -0.024

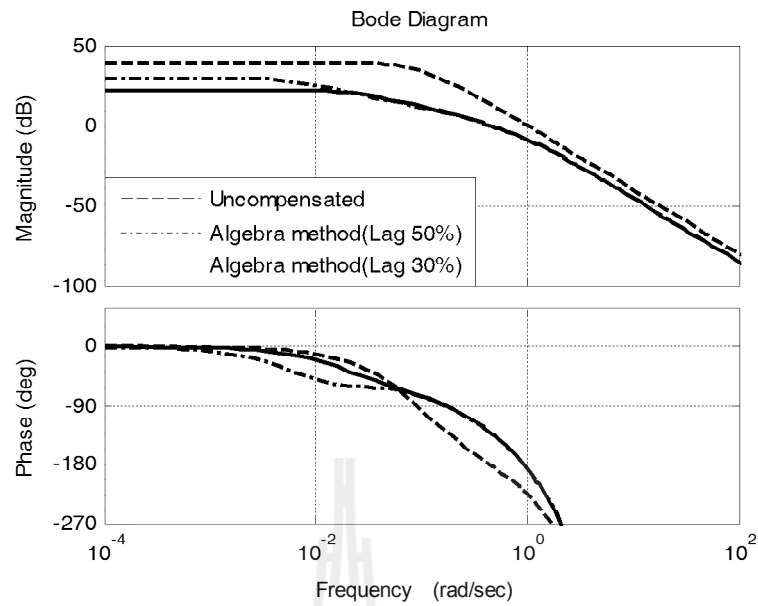
ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.37)

$$GH(s) = \frac{(48.950s^2 + 7.856s + 0.314)e^{-s}}{95.84s^4 + 121s^3 + 23.800s^2 + 1.504s + 0.024} \quad (3.37)$$

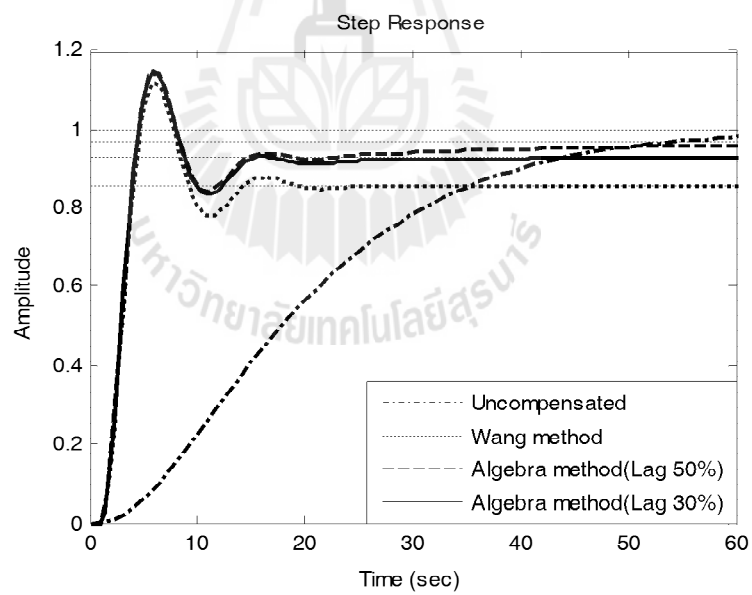
ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.38)

$$T(s) = \frac{(48.950s^2 + 7.856s + 0.314)e^{-s}}{95.84s^4 + 121s^3 + 23.800s^2 + 1.504s + 0.024 + (48.950s^2 + 7.856s + 0.314)e^{-s}} \quad (3.38)$$

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมีส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ ลักษณะของกราฟเป็นไปในการทำงานเดียวกันกับพลานต์ 1, 2 และ 3 จึงไม่ขอกล่าวซ้ำอีก เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังการชดเชยการตอบสนองเป็นในทำงานเดียวกันกับพลานต์ 2 และ 3 โดย PM 30% มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว 7.100% ส่วน PM 50% มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเพียง 3.100% ซึ่งต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ซึ่งมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 14.400% สำหรับเวลาประวิงก่อนและหลังการชดเชยไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับ 1 วินาที



รูปที่ 3.10 แผนภาพโบคของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ตต์ 4)



รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ตต์ 4)

ตารางที่ 3.4 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 4 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ

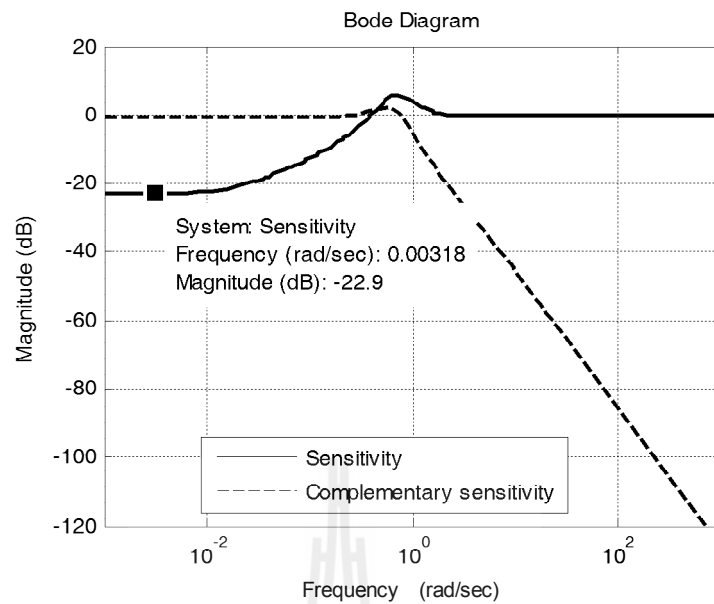
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | Lag-Lead(50%) | Lag-Lead(30%) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 26.307 dB | 8.001 dB | 7.999 dB | 8 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50.020° | 50° | 50.003° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 0.443 rad/sec | 0.444 rad/sec | 0.443 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 33.600 s | 2.100 s | 2.530 s | 2.20 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 30.600% | 18.100% | 23.100% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 59.300 s | 17.600 s | 39.300 s | 14.200 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0 | 14.400% | 3.100% | 7.100% |
| เวลาประวิง | 1 s | 1 s | 1 s | 1 s |
| แบนด์วิดท์ | 0.064 rad/sec | 0.935 rad/sec | 0.909 rad/sec | 0.926 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.160 dB | 1.990 dB | 2.140 dB |

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.39)

$$S_G^T = \frac{95.84s^4 + 121s^3 + 23.800s^2 + 1.504s + 0.024}{95.84s^4 + 121s^3 + 23.800s^2 + 1.504s + 0.024 + (48.950s^2 + 7.856s + 0.314)e^{-s}} \quad (3.39)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (3.40)

$$T = \frac{(48.950s^2 + 7.856s + 0.314)e^{-s}}{95.84s^4 + 121s^3 + 23.800s^2 + 1.504s + 0.024 + (48.950s^2 + 7.856s + 0.314)e^{-s}} \quad (3.40)$$



รูปที่ 3.12 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 4)

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำระบบมีความไวประมาณ -23 dB ซึ่งต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ที่นำเสนอไปในบทที่ 2 ซึ่งมีความไวประมาณ -17 dB ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยลดความไวของระบบในย่านความถี่ต่ำได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับตอนทดสอบกับพลาเน็ต 2 และ 3

พลาเน็ต 5

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(s^2+0.200s+1)} \quad (3.41)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 30^\circ$

- ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่า $K = 99$ (กำหนดให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1%)
- ขั้นตอนที่ 2 $\omega_{0dB,new} = 1.420$ (ตัวชดเชยเฟสล่าหลังสร้าง PM ไว้ 30% ของทั้งหมด)
- ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $\alpha = 0.018$
- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $\tau = 442.299$
- ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $\omega_g = 1.095$
- ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่า $\alpha_1 T = 0.333$
- ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า $K_c = 0.145$

ขั้นตอนที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ $T = 1.379$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (3.42)

$$G_c(s) = 1.089 \frac{[s + 0.127]}{[s + 0.002]} \frac{[s + 0.725]}{[s + 3.006]} \quad (3.42)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.725 และ -0.127

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -3.006 และ -0.002

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.43)

$$GH(s) = \frac{0.354s^2 + 0.302s + 0.032}{0.333s^5 + 1.400s^4 + 1.602s^3 + 1.536s^2 + 1.003s + 0.002} \quad (3.43)$$

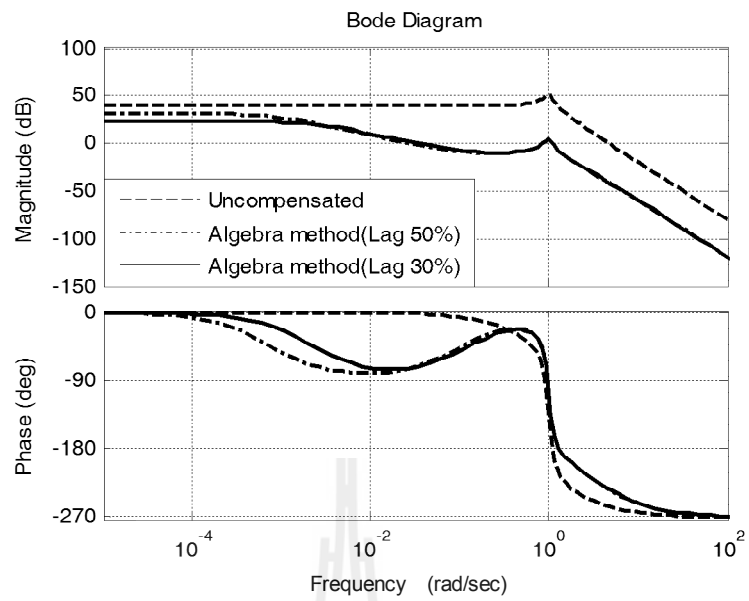
ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.44)

$$T(s) = \frac{0.354s^2 + 0.302s + 0.032}{0.333s^5 + 1.400s^4 + 1.602s^3 + 1.890s^2 + 1.305s + 0.035} \quad (3.44)$$

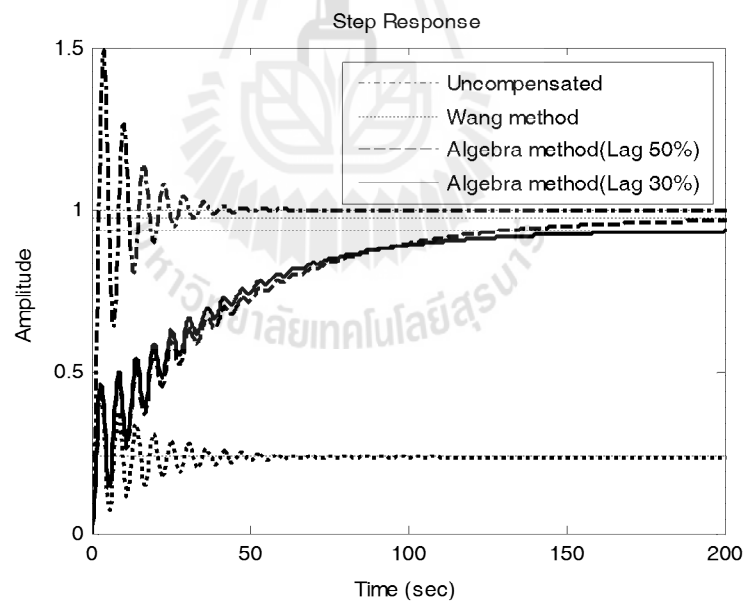
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.725 และ -0.127

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: $-3.120, -0.943, -0.028$ และ $-0.059 \pm 1.131i$

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าถึงแม้ระบบก่อนการชดเชยจะมีการสั่นไกวสูง แต่ระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอก็สามารถให้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอก็มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว 6.500% และ 2.600% สำหรับ PM 30% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ซึ่งมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 76.500% ดังนั้นจากการทดสอบกับพลาเน็ต 2, 3, 4 และ 5 ทำให้สรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับวิธีการของ Wang et al. (2006) ลงได้



รูปที่ 3.13 แผนภาพโบคของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 5)



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 5)

ตารางที่ 3.5 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 5 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ

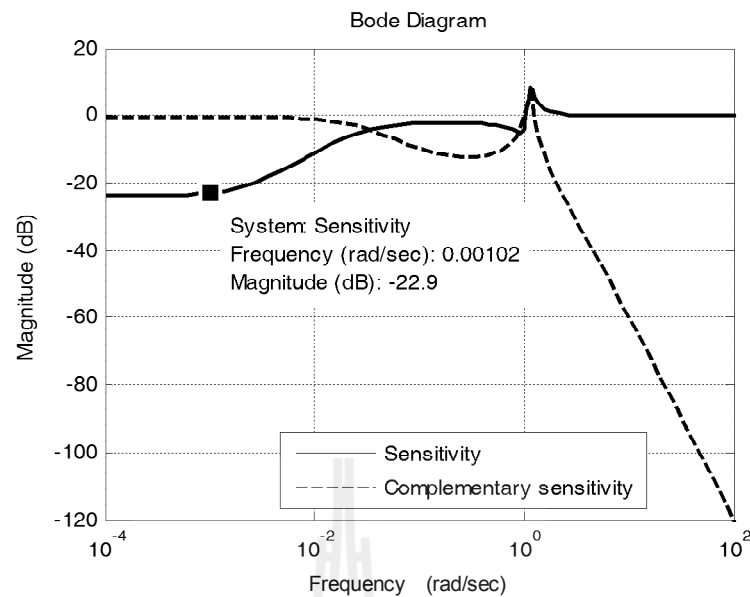
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | Lag-Lead(50%) | Lag-Lead(30%) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -7.131 dB | 8 dB | 7.996 dB | 8.006 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -27.719° | 30° | 30° | 30° |
| ความถี่ตัดขนาด | 1.253 rad/sec | 1.095 rad/sec | 1.095 rad/sec | 1.095 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 1.500 s | 1.020 s | 89.900 s | 73 s |
| การพุ่งเกิน | 48.900% | 81.900% | 0% | 0% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 35.900 s | 66.900 s | 162 s | 132 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 76.500% | 2.600% | 6.500% |
| เวลาประวิง | 0 s | 0 s | 0 s | 0 s |
| แบนด์วิดท์ | 1.342 rad/sec | 1.707 rad/sec | 0.024 rad/sec | 0.029 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | 11.100 dB | 6.890 dB | 6.900 dB | 6.900 dB |

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.45)

$$S_G^T = \frac{1}{1 + GH(s)} = \frac{0.329s^5 + 1.395s^4 + 1.595s^3 + 1.530s^2 + s + 0.0003}{0.329s^5 + 1.395s^4 + 1.595s^3 + 1.877s^2 + 1.302s + 0.025} \quad (3.45)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (3.46)

$$T = 1 - S_G^T = \frac{0.347s^2 + 0.302s + 0.025}{0.329s^5 + 1.395s^4 + 1.595s^3 + 1.877s^2 + 1.302s + 0.025} \quad (3.46)$$



รูปที่ 3.15 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลานต์ 5)

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำระบบมีความไวประมาณ -23 dB ซึ่งต่ำกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) ที่นำเสนอไปในบทที่ 2 ซึ่งมีความไวสูงประมาณ -2 dB ดังนั้นจากผลการทดสอบกับพลานต์ 2, 3, 4 และ 5 ทำให้สรุปได้ว่า สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการที่นำเสนอสามารถลดความไวในย่านความถี่ต่ำได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006)

พลานต์ 6

$$G(s) = \frac{1 - 2s}{(s + 1)^3} \quad (3.47)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่า $K = 99$ (กำหนดให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1%)

ขั้นตอนที่ 2 ไม่มี $\omega_{0dB,new}$ ที่ทำให้ตัวชดเชยเฟสล่าหลังสร้าง PM ได้ตามที่กำหนด

จากการทดลองพบว่า การออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าหลังในขั้นตอนแรกนั้น ไม่มีจุดตัดขนาดที่ทำให้ได้ส่วนเฟสเท่ากับ 30% หรือ 50% ตามที่ต้องการ ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงไม่สามารถใช้กับพลานต์ 6 ได้

พลาเน็ต 7

$$G(s) = \frac{5}{s(s + 0.700)(s + 7)} e^{-0.230s} \quad (3.48)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°

ขั้นตอนที่ 1 ระบบนี้มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ จึงไม่ต้องคำนวณหาค่าอัตราขยายใหม่

ขั้นตอนที่ 2 $\omega_{0dB,new} = 1.510$ (ตัวชดเชยเฟสล้ำหลังสร้าง PM ไว้ 30% ของทั้งหมด)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $\alpha = 0.353$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า $\tau = 13.804$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า $\omega_g = 1.316$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่า $\alpha_1 T = 0.221$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า $K_c = 0.253$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่า $T = 2.330$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (3.49)

$$G_c(s) = 9.410 \frac{[s + 0.205][s + 0.429]}{[s + 0.072][s + 4.523]} \quad (3.49)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.429 และ -0.205

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -4.523 และ -0.072

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.50)

$$GH(s) = \frac{(10.410s^2 + 6.603s + 0.917)e^{-0.230s}}{0.221s^5 + 2.718s^4 + 8.979s^3 + 5.536s^2 + 0.355s} \quad (3.50)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.51)

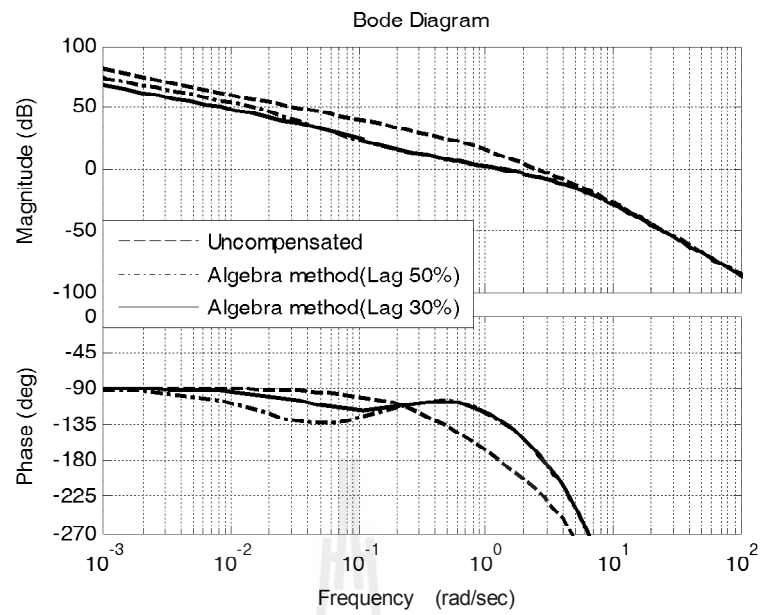
$$T(s) = \frac{(10.410s^2 + 6.603s + 0.917)e^{-0.230s}}{0.221s^5 + 2.718s^4 + 8.979s^3 + 5.536s^2 + 0.355s + (10.410s^2 + 6.603s + 0.917)e^{-0.230s}} \quad (3.51)$$

ตารางที่ 3.6 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 7 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ

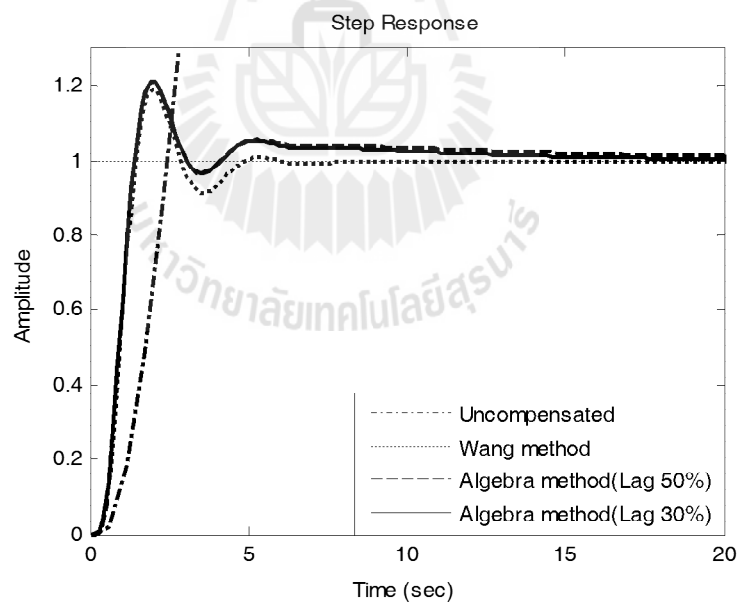
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | Lag-Lead(50%) | Lag-Lead(30%) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 8.932 dB | 7.998 dB | 7.998 dB | 7.995 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | 29.334° | 50.008° | 50.008° | 50.011° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0.712 rad/sec | 1.316 rad/sec | 1.316 rad/sec | 1.316 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | N/A | 0.776 s | 0.755 s | 0.752 s |
| การพุ่งเกิน | N/A | 18.800% | 21.300% | 21.500% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | N/A | 4.560 s | 15.300 s | 11.500 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | N/A | 0% | 0% | 0% |
| เวลาประวิง | 0.230 s | 0.230 s | 0.230 s | 0.230 s |
| แบนด์วิดท์ | N/A | 2.702 rad/sec | 2.751 rad/sec | 2.758 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.090 dB | 2.04 dB | 2.03 dB |

จากรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าระบบหลังการชดเชยมีส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.17 หลังการชดเชยกราฟ PM 30% และ 50% มีเวลาขาขึ้นและการพุ่งเกินใกล้เคียงกัน แตกต่างกันที่เวลาเข้าที่ ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับตอนทดสอบพลาเน็ต 1 จึงจะไม่ขอกล่าวซ้ำ ส่วนเวลาประวิงก่อนและหลังการชดเชยมีค่าเท่ากันที่ 0.230 วินาที จากผลการทดลองกับพลาเน็ต 1 และ 7 พบว่า ระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบวิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่าความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (3.52)

$$S_G^T = \frac{0.221s^5 + 2.718s^4 + 8.979s^3 + 5.536s^2 + 0.355s}{0.221s^5 + 2.718s^4 + 8.979s^3 + 5.536s^2 + 0.355s + (10.410s^2 + 6.603s + 0.917)e^{-0.230s}} \quad (3.52)$$



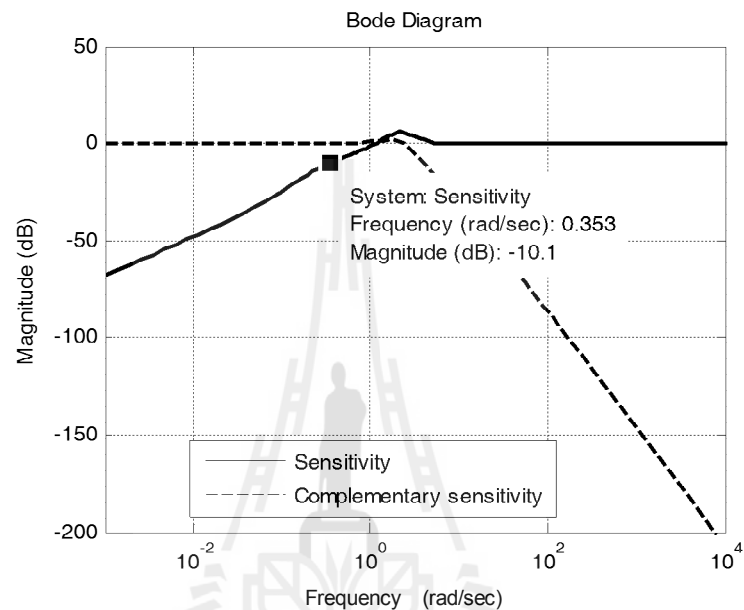
รูปที่ 3.16 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 7)



รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 7)

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (3.52)

$$T = \frac{(10.410s^2 + 6.603s + 0.917)e^{-0.230s}}{0.221s^5 + 2.718s^4 + 8.979s^3 + 5.536s^2 + 0.355s + (10.410s^2 + 6.603s + 0.917)e^{-0.230s}} \quad (3.53)$$



รูปที่ 3.18 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 7)

จากรูปที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าความไวมีลักษณะเดียวกันกับพลาเน็ต 1 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สำหรับพลาเน็ตที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอสามารถลดความไวในย่านความถี่ต่ำได้ดี

3.4 สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่าวิธีการที่นำเสนอได้แก่ พลาเน็ต 1 และ 7 สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบซึ่งก็คือพลาเน็ต 2, 3, 4 และ 5 วิธีการที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่า โดยสามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดความไวในย่านความถี่ต่ำลงได้มากกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) อีกด้วย สำหรับพลาเน็ต 6 ไม่สามารถใช้วิธีการที่นำเสนอออกแบบให้ได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการ เนื่องจากในขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า ไม่มีจุดตัดที่ทำให้ได้ส่วนเพื่อเฟสตามที่ต้องการ

บทที่ 4

การออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้าหน้าให้ได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพอย่างแม่นยำ และจำกัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

4.1 กล่าวนำ

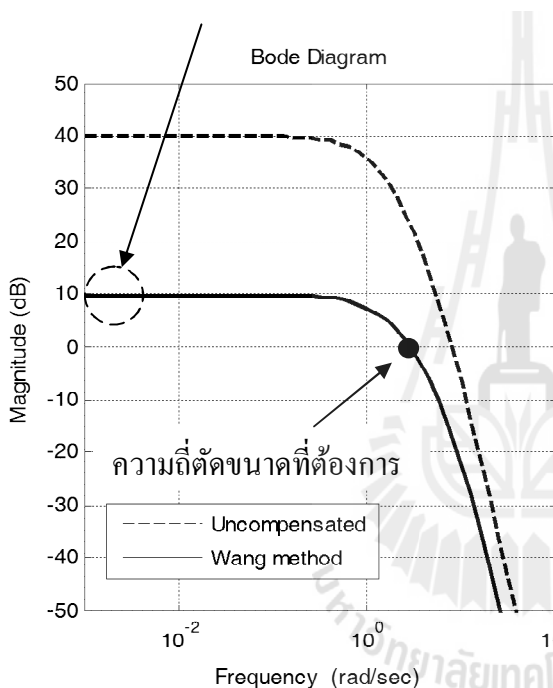
วิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าของ Wang et al. (2006) ใช้ได้ผลดีกับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ แต่สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบจะทำให้ระบบหลังการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวค่อนข้างสูง วิธีการที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 สามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลงจนใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ แต่ก็ไม่สามารถบรรลุผลตามข้อกำหนดสมรรถนะได้เสมอไป ดังนั้นในบทนี้เราจึงจะพัฒนาวิธีการออกแบบที่มีแนวคิดมาจากวิธีการของ Wang et al. (2006) โดยพัฒนาความสัมพันธ์ที่ใช้เพื่อออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้าหน้าควบกัน ทำให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำ รวมทั้งสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามข้อกำหนดสมรรถนะ

เนื่องจากวิธีการออกแบบที่นำเสนอพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่เกิดขึ้นกับวิธีการออกแบบของ Wang et al. (2006) จึงขออธิบายปัญหาที่เกิดขึ้นก่อนดังนี้ ตามปกติแล้วก่อนที่เราจะออกแบบตัวชดเชย เราจะปรับอัตราขยายของระบบวงรอบปิดให้ได้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวตามที่ต้องการก่อน ซึ่งก็คือการกำหนดค่า KG(s) นั้นเอง หลังจากนั้นจึงจะทำการออกแบบตัวชดเชยโดยต้องปรับอัตราขยายคิซิจของตัวชดเชยให้เป็น 1 เพื่อไม่ให้กระทบกับค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ได้ออกแบบไว้ แต่วิธีการออกแบบของ Wang et al. (2006) นั้นมีการปรับเปลี่ยนอัตราขยายของตัวชดเชยเพื่อปรับให้กราฟมีความถี่ตัดขนาดตามที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทำให้อัตราขยายคิซิจของตัวชดเชยไม่เป็น 1 ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของระบบหลังการชดเชยได้

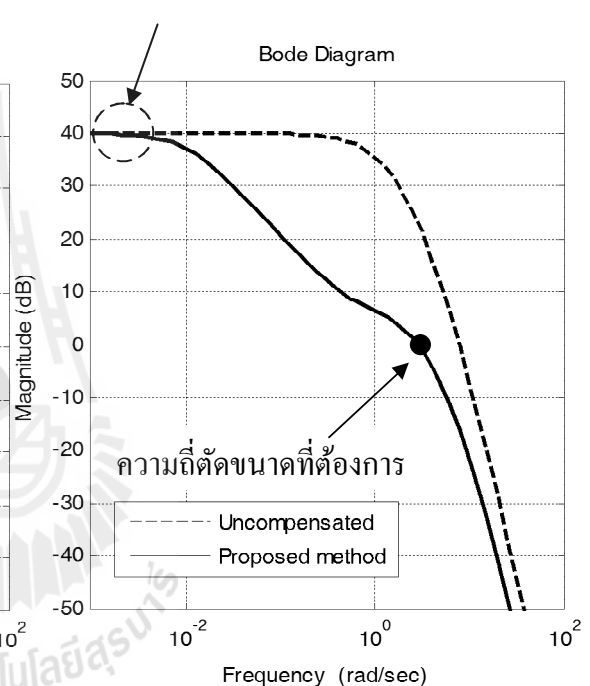
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) มีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของระบบเพื่อให้ได้ความถี่ตัดขนาดที่ต้องการ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายจะมีผลตลอดย่านความถี่ ทำให้อัตราขยายของระบบในย่านความถี่ต่ำเปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวให้เป็นไปตามที่กำหนดเอาไว้ในขั้นต้นแรก ส่วนวิธีการที่นำเสนอใช้ตัวชดเชยเฟสล่าช้าเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของระบบเฉพาะในย่านความถี่สูงเพื่อให้ได้ความถี่ตัดขนาดที่ต้องการ ทำให้อัตราขยายของระบบในย่านความถี่ต่ำไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.1

จึงทำให้ไม่มีผลกระทบกับค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ออกแบบเอาไว้ในขั้นตอนแรก แต่เนื่องจากผลของตัวชดเชยเฟสล่าช้าที่เพิ่มเข้ามา ทำให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการปรับแต่งเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อกำจัดผลกระทบดังกล่าว จากนั้นจึงนำวิธีการที่ออกแบบนี้ไปทดสอบกับพลาเน็ตทั้ง 7 พลาเน็ต ที่ใช้ตอนทดสอบกับวิธีการของ Wang et al. (2006) ในบทที่ 2 เพื่อการเปรียบเทียบผล

วิธีการของ Wang et al. (2006) เปลี่ยนแปลง
อัตราขยายของระบบในย่านความถี่ต่ำด้วย



วิธีการที่นำเสนอไม่มีการเปลี่ยนแปลง
อัตราขยายของระบบในย่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 4.1 แผนภาพโบดเปรียบเทียบวิธีการของ Wang et al. (2006) กับวิธีการที่นำเสนอ

4.2 การพัฒนาสูตรเพื่อการออกแบบ

รูปแบบของตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้ำหน้าแบบจำกัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว แสดงดังสมการ (4.1)

$$G_c(s) = \left[K_{lag} \frac{s + \omega_g/n}{s + K_{lag} \omega_g/n} \right] \left[K_{lead} \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่ $K_{lag} < 1, n > 1, 0 < \alpha < 1$

วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือการทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดของระบบหลังการชดเชยซึ่งก็คือ $G_cG(s)$ มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสตามที่ต้องการ (Hang, 2005) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (4.2) และ (4.3)

$$G_cG(j\omega_p) = \left[K_{lag} \frac{j\omega_p + \omega_g/n}{j\omega_p + K_{lag} \omega_g/n} \right] \left[K_{lead} \frac{j\omega_p T + 1}{j\omega_p \alpha T + 1} \right] G(j\omega_p) = -\frac{1}{A_m} \quad (4.2)$$

$$G_cG(j\omega_g) = \left[K_{lag} \frac{j\omega_g + \omega_g/n}{j\omega_g + K_{lag} \omega_g/n} \right] \left[K_{lead} \frac{j\omega_g T + 1}{j\omega_g \alpha T + 1} \right] G(j\omega_g) = -e^{j\phi_m} \quad (4.3)$$

| | | | |
|--------|-------------|-----|---|
| โดยที่ | K_{lag} | คือ | อัตราขยายของตัวชดเชยเฟสล้าหลัง ซึ่งในขั้นตอนแรกจะกำหนดให้เป็น 1 (ทำให้เหลือเพียงพจน์เฟสล้าหน้า) เพื่อที่จะหาค่า K_{lead} ออกมาก่อน แล้วค่อยคำนวณหา K_{lag} ในภายหลัง |
| | K_{lead} | คือ | อัตราขยายของตัวชดเชยเฟสล้าหน้า |
| | ω_p | คือ | ความถี่ตัดเฟสของระบบหลังการชดเชย (เรเดียน/วินาที) |
| | ω_g | คือ | ความถี่ตัดขนาดของระบบหลังการชดเชย (เรเดียน/วินาที) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับความถี่ตัดเฟสของระบบก่อนการชดเชย เช่นเดียวกันกับวิธีการของ Wang et al. (2006) |
| | n | คือ | แฟกเตอร์กำหนดระยะห่างระหว่างตัวชดเชยเฟสล้าหลังกับความถี่ตัดขนาด โดยทั่วไปกำหนดให้น้อยกว่า 5-10 เท่า ในที่นี้กำหนดให้เป็น 5 เพื่อให้การตอบสนองไม่ช้าจนเกินไป (Ogata, 2002) |
| | A_m | คือ | ส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการ (ค่าจริงไม่แสดงหน่วย) เท่ากับ $10^{(GM_{dB})/20}$ |
| | ϕ_m | คือ | ส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการ (เรเดียน) เท่ากับ $\frac{\pi}{180}(PM_{deg})$ |
| | α, T | คือ | พารามิเตอร์ของตัวชดเชยเฟสล้าหน้า |

จากสมการ (4.2) จัดรูปแบบสมการใหม่ดังนี้

$$jK_{lead}\omega_p T + K_{lead} = j\omega_p \alpha T \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{lag} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] + \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{lag} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] \quad (4.4)$$

จากสมการ (4.4) แยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพได้สมการ 2 สมการดังนี้

$$K_{\text{lead}} = \text{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] - \omega_p \alpha T \text{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] \quad (4.5)$$

$$K_{\text{lead}} T = \alpha T \text{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] + \frac{1}{\omega_p} \text{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] \quad (4.6)$$

จากสมการ (4.3) จัดรูปแบบสมการใหม่ดังนี้

$$jK_{\text{lead}} \omega_g T + K_{\text{lead}} = j\omega_g \alpha T \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] + \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] \quad (4.7)$$

จากสมการ (4.7) แยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพได้สมการ 2 สมการดังนี้

$$K_{\text{lead}} = \text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \omega_g \alpha T \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] \quad (4.8)$$

$$K_{\text{lead}} T = \alpha T \text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] + \frac{1}{\omega_g} \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] \quad (4.9)$$

ให้สมการ (4.5) เท่ากับสมการ (4.8) ได้ว่า

$$\begin{aligned} & \text{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] - \omega_p \alpha T \text{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] \\ &= \text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \omega_g \alpha T \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] \\ \alpha T &= \frac{\text{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \text{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right]}{\omega_g \text{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{\text{lag}} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \omega_p \text{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{\text{lag}} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right]} \quad (4.10) \end{aligned}$$

ให้สมการ (4.6) เท่ากับสมการ (4.9) ได้ว่า

$$\begin{aligned}
 & \alpha T \operatorname{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{lag} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] + \frac{1}{\omega_p} \operatorname{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{lag} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] \\
 &= \alpha T \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] + \frac{1}{\omega_g} \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] \\
 & \alpha T = \frac{\frac{1}{\omega_g} \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \frac{1}{\omega_p} \operatorname{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{lag} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right]}{\operatorname{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p) K_{lag} (j\omega_p + \omega_g/5)} \right] - \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right]} \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

นำสมการ (4.10) และ (4.11) มาพล็อตกราฟเพื่อหาจุดตัด จุดตัดของกราฟคือค่า αT ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

จากสมการ (4.8) ปกติแล้วค่า K_{lead} , α และ T ต้องเป็นค่าบวก ทำให้ได้ว่า

$$\begin{aligned}
 0 < \omega_g \alpha T \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] < \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right] \\
 0 < \alpha T < \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right]}{\omega_g \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m} (j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g) K_{lag} (j\omega_g + \omega_g/5)} \right]} \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่า αT แล้วจึงนำไปคำนวณหาค่า K_{lead} ตามสมการ (4.8)

ขั้นตอนต่อไปเป็นการปรับแต่งอัตราขยายดีซีของตัวชดเชย เพื่อจำกัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวให้เป็นไปตามที่กำหนดโดยใช้ Final value theorem for Laplace transforms (James, 2004) พิจารณาอัตราขยายดีซีของตัวชดเชยจากสมการ (4.13)

$$D. C. \text{ gain} = \lim_{s \rightarrow 0} G_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\left(K_{lag} \frac{s + \omega_g/5}{s + K_{lag} \omega_g/5} \right) \left(K_{lead} \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \right) \right] \quad (4.13)$$

จากสมการ (4.13) จะเห็นได้ว่า อัตราขยายดีซีของตัวชดเชยขึ้นอยู่กับค่า K_{lead} ดังนั้นเราต้องปรับแต่งค่า K_{lag} เพื่อให้ K_{lead} มีค่าเป็น 1 เมื่อย้อนกลับไปดูแนวคิดเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ เราใช้คุณสมบัติทางขนาดของตัวชดเชยเฟสล่าช้าหลังทำหน้าที่เปลี่ยนจุดตัดขนาดแทนการเปลี่ยนอัตราขยายโดยตรง ซึ่งตามรูปแบบของตัวชดเชยในสมการที่ (4.13) ก็คือการใช้ K_{lag} ทำหน้าที่แทน K_{lead} นั้นเอง ในขั้นตอนแรกของการออกแบบเราจึงกำหนด K_{lag} ให้เท่ากับ 1 ก่อนซึ่งจะทำให้เหลือเฉพาะตัวชดเชยเฟสล่าช้าตามวิธีการของ Wang et al. (2006) ในขั้นตอนถัดไปเราจึงกำหนดให้ K_{lag} เท่ากับ K_{lead} ตามวิธีการของ Wang et al. (2006) ที่เพิ่งคำนวณได้เพื่อให้ K_{lag} ทำหน้าที่แทน K_{lead} แต่เนื่องจากผลของตัวชดเชยเฟสล่าช้าที่เปลี่ยนแปลงกราฟเฟส ทำให้ K_{lag} ไม่สามารถใช้ชดเชย K_{lead} ได้พอดี โดยถ้า K_{lag} ที่ใช้มีค่ามากเกินไปจะทำให้ K_{lead} ปรับตัวลดลงเพื่อให้ส่วนเฟื่ออัตราขยายและส่วนเฟื่อเฟสเป็นไปตามที่กำหนด เราจึงต้องปรับลด K_{lag} ลงตามสัดส่วนที่ K_{lead} ลดลงเพื่อชดเชย K_{lag} ที่มากเกินไป ในกรณีที่ K_{lag} ที่ใช้มีค่าน้อยเกินไปก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น อาจทำให้เราต้องปรับแต่งค่า K_{lag} มากกว่าหนึ่งครั้งเพื่อให้ได้อัตราขยายดีซีตามที่ต้องการ การปรับแต่ง K_{lag} ด้วยวิธีการปรับสัดส่วนตาม K_{lead} ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไปตามสมการ (4.14)

$$K_{lag_new} = K_{lag_old} \times K_{lead} \quad (4.14)$$

นำพลาเน็ตที่สามารถออกแบบด้วยวิธีของ Wang et al. (2006) และวิธีการในบทที่ 3 ทั้ง 6 พลาเน็ตมาทดลองปรับแต่งอัตราขยายดีซีด้วยวิธีการปรับสัดส่วน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราขยายดีซีของตัวชดเชยหลังจากปรับแต่งด้วยวิธีการปรับสัดส่วน

| พลาเน็ต | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
|---------------|---|---|---|-------|---|---|
| จำนวนรอบ | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| อัตราขยายดีซี | 1 | 1 | 1 | 0.999 | 1 | 1 |
| ค่าผิดพลาด(%) | 0 | 0 | 0 | 0.100 | 0 | 0 |

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าวิธีการปรับสัดส่วนสามารถปรับแต่งอัตราขยายดีซีได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว โดยใช้จำนวนรอบเพียง 1-3 รอบ

4.3 ขั้นตอนการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาอัตราขยายของระบบวงรอบปิด ที่ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่ต้องการ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้อินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยเป็นสัญญาณทดสอบเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในบทความของ Wang et al. (2006) ทั้งนี้เพื่อการเปรียบเทียบผล ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณหาอัตราขยายได้จากสมการ (4.15)

$$K = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} G(s)} \left(\frac{1}{e_{ss}} - 1 \right) \quad (4.15)$$

โดยที่ $G(s)$ คือ พลาเน็ตวงรอบเปิดก่อนการชดเชย
 e_{ss} คือ ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ต้องการ (%error)

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ตามสมการ (4.16) และ (4.17) ตามลำดับ

$$f_1(\omega) = \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\phi_m}(j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{lag}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \operatorname{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p)K_{lag}(j\omega_p + \omega_g/5)} \right]}{\omega_g \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\phi_m}(j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{lag}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \omega_p \operatorname{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p)K_{lag}(j\omega_p + \omega_g/5)} \right]} \quad (4.16)$$

$$f_2(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega_g} \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\phi_m}(j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{lag}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \frac{1}{\omega_p} \operatorname{Im} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p)K_{lag}(j\omega_p + \omega_g/5)} \right]}{\operatorname{Re} \left[\frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/5)}{A_m G(j\omega_p)K_{lag}(j\omega_p + \omega_g/5)} \right] - \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\phi_m}(j\omega_g + K_{lag} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{lag}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right]} \quad (4.17)$$

โดยที่ A_m คือ ส่วนเผื่ออัตราขยายที่ต้องการ (ค่าจริงไม่แสดงหน่วย) เท่ากับ $10^{(GM_{dB})/20}$
 ϕ_m คือ ส่วนเผื่อเฟสที่ต้องการ (เรเดียน) เท่ากับ $\frac{\pi}{180} (PM_{deg})$
 ω_g คือ ความถี่ตัดขนาดหลังการชดเชย (เรเดียน/วินาที) โดยมีค่าเท่ากับความถี่ตัดเฟสของระบบก่อนการชดเชย (Wang et al., 2006)
 K_{lag} คือ อัตราขยายของตัวชดเชยเฟสล้าหลัง

จุดตัดระหว่างกราฟทั้งสองคือค่า αT ซึ่งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตในสมการ (4.18)

$$0 < \alpha T < \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}(j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{\text{lag}}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right]}{\omega_g \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}(j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{\text{lag}}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right]} \quad (4.18)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า K_{lead} จากสมการ (4.19)

$$K_{\text{lead}} = \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}(j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{\text{lag}}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right] - \omega_g \alpha T \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}(j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{\text{lag}}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right] \quad (4.19)$$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับแต่งค่า K_{lag} ตามสมการ (4.20) แล้วกลับไปทำในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ใหม่ จนกว่าจะได้ค่า K_{lead} เท่ากับ 1

$$K_{\text{lag}_{\text{new}}} = K_{\text{lag}_{\text{old}}} \times K_{\text{lead}} \quad (4.20)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่า T จากสมการ (4.21)

$$T = \frac{\alpha T \operatorname{Re} \left[\frac{-e^{j\theta_m}(j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{\text{lag}}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right] + \frac{1}{\omega_g} \operatorname{Im} \left[\frac{-e^{j\theta_m}(j\omega_g + K_{\text{lag}} \omega_g/5)}{G(j\omega_g)K_{\text{lag}}(j\omega_g + \omega_g/5)} \right]}{K_{\text{lead}}} \quad (4.21)$$

4.4 ผลการออกแบบ

นำวิธีการที่ออกแบบนี้ไปทดสอบกับพลานต์ทั้ง 7 พลานต์ ที่ใช้ขั้นตอนทดสอบกับวิธีการของ Wang et al. (2006) ในบทที่ 2

พลานต์ 1

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)^3} \quad (4.22)$$

กำหนดให้ $GM = 8 \text{ dB}$ และ $PM = 50^\circ$

ระบบนี้มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ จึงไม่ต้องคำนวณหาค่าอัตราขยายใหม่
หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบแล้วได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวชดเชยดังนี้

$$\omega_g = 0.577, \alpha T = 0.286, K_{lag} = 0.351, T = 4.018$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (4.23)

$$G_c(s) = 4.925 \frac{[s + 0.249][s + 0.115]}{[s + 3.494][s + 0.040]} \quad (4.23)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.249 และ -0.115

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -3.494 และ -0.040

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.24)

$$GH(s) = \frac{1.410s^2 + 0.514s + 0.041}{0.286s^6 + 1.870s^5 + 3.934s^4 + 3.442s^3 + 1.133s^2 + 0.040s} \quad (4.24)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.25)

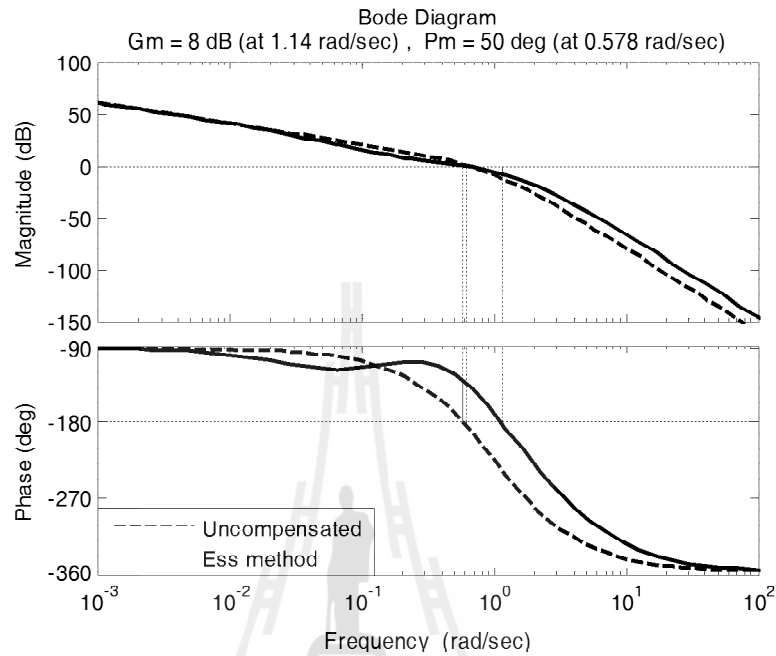
$$T(s) = \frac{1.410s^2 + 0.514s + 0.041}{0.286s^6 + 1.870s^5 + 3.934s^4 + 3.442s^3 + 2.543s^2 + 0.554s + 0.041} \quad (4.25)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.283 และ -0.107

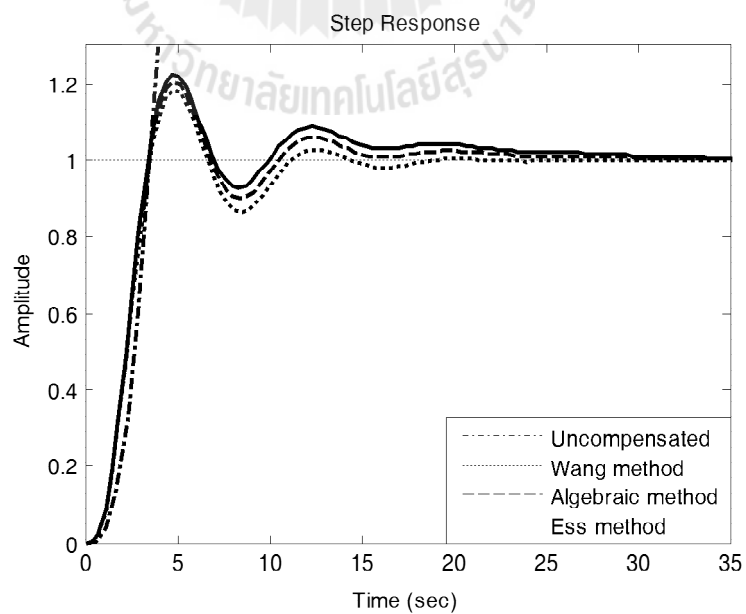
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.174, -0.138, $-2.804 \pm 0.373i$ และ $-0.252 \pm 0.822i$

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมี $GM = 8$ dB, $PM = 50^\circ$ ซึ่งให้ผลตรงตามที่ออกแบบไว้ (ก่อนชดเชย $GM = -1.024$ dB, $PM = -4.970^\circ$) ในย่านความถี่ต่ำอัตราขยายของระบบก่อนและหลังการชดเชยไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากวิธีการที่นำเสนอไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของระบบ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอใช้เวลาขาขึ้นสั้นกว่าวิธีการอื่นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การพุ่งเกินสูงกว่าเล็กน้อยด้วยเช่นกัน โดยผลการตอบสนองมีความใกล้เคียงกับวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3

ดังนั้นจากผลการทดลองสรุปได้ว่า สำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองในภาพรวมได้ดีกว่าวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 4.2 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 1)



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 1)

ตารางที่ 4.2 ผลการตอบสนองของพลานต์ 1 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

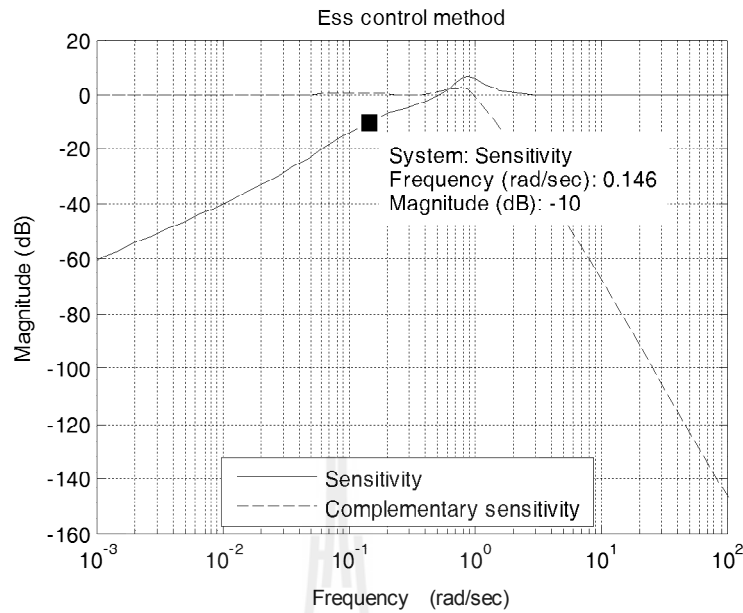
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | วิธีการในบทที่ 3 | วิธีการที่นำเสนอ |
|---------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -1.024 dB | 8.001 dB | 8 dB | 7.999 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -4.970° | 50.026° | 50° | 49.972° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0.617 rad/sec | 0.577 rad/sec | 0.577 rad/sec | 0.578 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | N/A | 2.060 s | 2.020 s | 1.990 s |
| การพุ่งเกิน | N/A | 18.500% | 20.600% | 22.300% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | N/A | 13.400 s | 21.200 s | 25.700 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | N/A | 0% | 0% | 0% |
| เวลาประวิง | 0 s | 0 s | 0 s | 0 s |
| แบนด์วิดท์ | N/A | 1.090 rad/sec | 1.102 rad/sec | 1.110 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.610 dB | 2.620 dB | 2.630 dB |

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.26)

$$T(s) = \frac{0.286s^6 + 1.870s^5 + 3.934s^4 + 3.442s^3 + 1.133s^2 + 0.040s}{0.286s^6 + 1.870s^5 + 3.934s^4 + 3.442s^3 + 2.543s^2 + 0.554s + 0.041} \quad (4.26)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (4.27)

$$T(s) = \frac{1.410s^2 + 0.514s + 0.041}{0.286s^6 + 1.870s^5 + 3.934s^4 + 3.442s^3 + 2.543s^2 + 0.554s + 0.041} \quad (4.27)$$



รูปที่ 4.4 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 1)

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำกว่า 0.146 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่สูงกว่า 0.146 rad/sec ระบบวงปิดมีขนาดของความไวเพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 0 dB ในย่านความถี่สูง ซึ่งแสดงว่าระบบวงปิดมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดรบกวนจากภายนอก และการตามรอยอินพุต รวมทั้งสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูงได้ดี ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3

พลาเน็ต 2

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(0.500s + 1)(0.250s + 1)(0.125s + 1)} \quad (4.28)$$

กำหนดให้ $GM = 8 \text{ dB}$, $PM = 50^\circ$ และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1%

หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบแล้วได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวชดเชยดังนี้

$$K = 99, \omega_g = 2.828, \alpha T = 0.078, K_{lag} = 0.019, T = 1.196$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (4.29)

$$G_c(s) = 29.403 \left[\frac{s + 0.566}{s + 0.011} \right] \left[\frac{s + 0.837}{s + 12.824} \right] \quad (4.29)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย : -0.837 และ -0.566

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย : -12.824 และ -0.011

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.30)

$$GH(s) = \frac{2.296s^2 + 3.219s + 1.086}{0.001s^6 + 0.034s^5 + 0.320s^4 + 1.243s^3 + 1.967s^2 + 1.021s + 0.011} \quad (4.30)$$

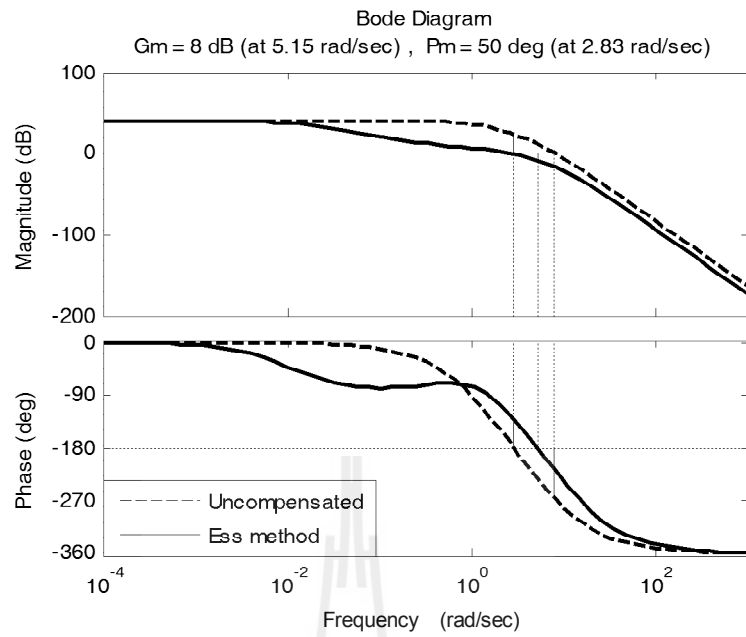
ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.31)

$$T(s) = \frac{2.296s^2 + 3.219s + 1.086}{0.001s^6 + 0.034s^5 + 0.320s^4 + 1.243s^3 + 4.263s^2 + 4.241s + 1.097} \quad (4.31)$$

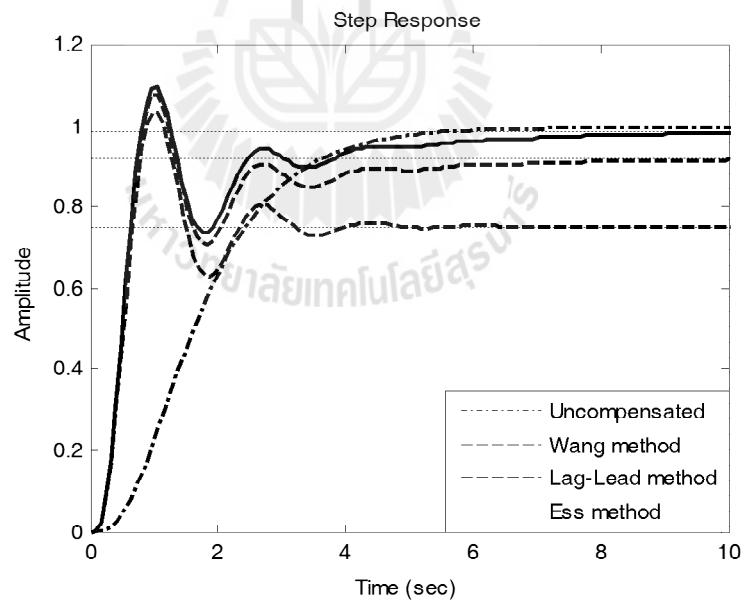
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด : -0.837 และ -0.565

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด : -0.885, -0.408, -12.225 ± 3.442i และ -1.049 ± 3.788i

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมี $GM = 8$ dB, $PM = 50^\circ$ และ $\omega_g = 2.83$ rad/sec ซึ่งให้ผลตรงตามที่ต้องการแบบไว้ (ก่อนชดเชยมี $GM = 16.586$ dB และ $PM = -180^\circ$) ในย่านความถี่ต่ำอัตราขยายของระบบก่อนและหลังการชดเชยไม่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับพลานต์ 1 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังจากชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอแล้วค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1% ตรงตามที่ออกแบบไว้ในขั้นตอนที่ 1 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3



รูปที่ 4.5 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 2)



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 2)

ตารางที่ 4.3 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 2 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

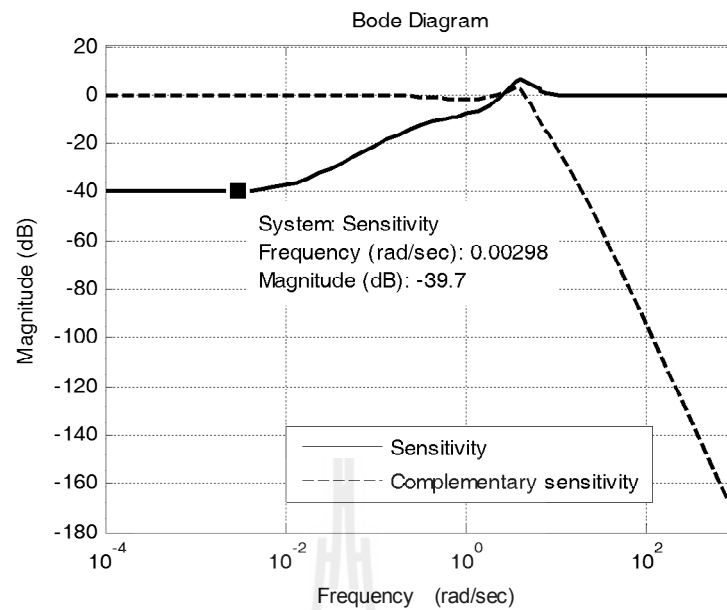
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | วิธีการในบทที่ 3 | วิธีการที่นำเสนอ |
|---------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 16.586 dB | 7.998 dB | 7.999 dB | 7.997 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50.001° | 50.001° | 50.001° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 2.828 rad/sec | 2.828 rad/sec | 2.828 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 2.700 s | 0.377 s | 0.481 s | 0.465 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 37.400% | 7.920% | 10.800% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 5.020 s | 3.770 s | 17.200 s | 6.620 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 24.500% | 7.800% | 1% |
| เวลาประวิง | 0 s | 0 s | 0 s | 0 s |
| แบนด์วิดท์ | 0.799 rad/sec | 5.387 rad/sec | 5.009 rad/sec | 5.147 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.760 dB | 2.770 dB | 2.780 dB |

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.32)

$$S_G^T = \frac{0.001s^6 + 0.034s^5 + 0.320s^4 + 1.243s^3 + 1.967s^2 + 1.021s + 0.011}{0.001s^6 + 0.034s^5 + 0.320s^4 + 1.243s^3 + 4.263s^2 + 4.241s + 1.097} \quad (4.32)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (4.33)

$$T = \frac{2.296s^2 + 3.219s + 1.086}{0.001s^6 + 0.034s^5 + 0.320s^4 + 1.243s^3 + 4.263s^2 + 4.241s + 1.097} \quad (4.33)$$



รูปที่ 4.7 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 2)

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถลดความไวในย่านความถี่ต่ำลงมาอยู่ที่ประมาณ -40 dB ซึ่งให้ผลดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 ที่มีความไวอยู่ที่ประมาณ -12 dB และ -22 dB ตามลำดับ

พลาเน็ต 3

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (4.34)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB, $PM = 50^\circ$ และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1% หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบแล้วได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวชดเชยดังนี้

$$K = 99, \omega_g = 1, \alpha T = 0.093, K_{lag} = 0.016, T = 2.292$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (4.35)

$$G_c(s) = 39.006 \left[\frac{s+0.200}{s+0.003} \right] \left[\frac{s+0.436}{s+10.787} \right] \quad (4.35)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.436 และ -0.200

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -10.787 และ -0.003

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.36)

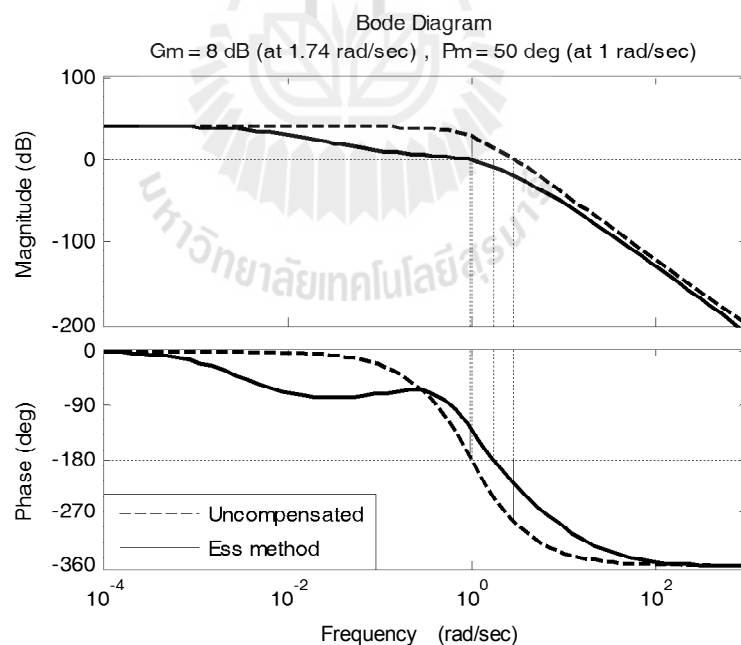
$$GH(s) = \frac{3.612s^2 + 2.298s + 0.315}{0.927s^6 + 1.371s^5 + 4.561s^4 + 6.385s^3 + 4.113s^2 + 1.013s + 0.003} \quad (4.36)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.37)

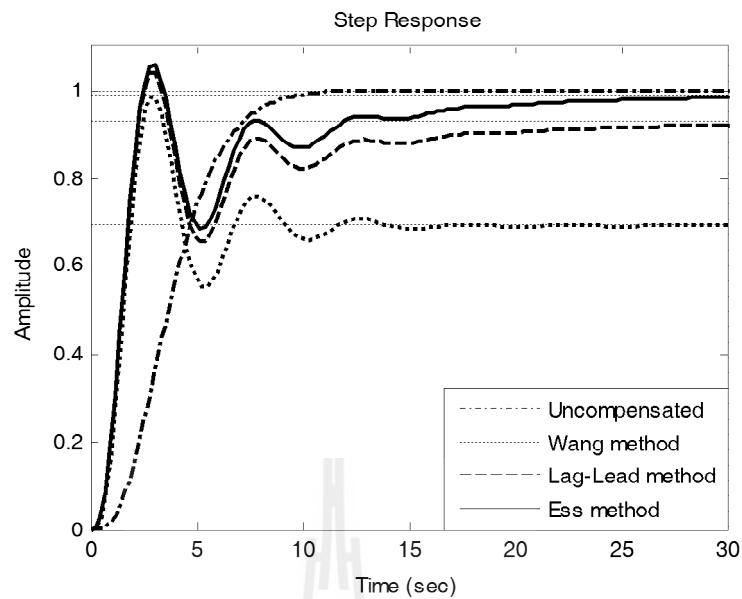
$$T(s) = \frac{3.612s^2 + 2.298s + 0.315}{0.927s^6 + 1.371s^5 + 4.561s^4 + 6.385s^3 + 7.725s^2 + 3.312s + 0.318} \quad (4.37)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.436 และ -0.200

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -10.740 , -2.814 , -0.472 , -0.134 และ $-0.314 \pm 1.305i$,



รูปที่ 4.8 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 3)



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 3)

ตารางที่ 4.4 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 3 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

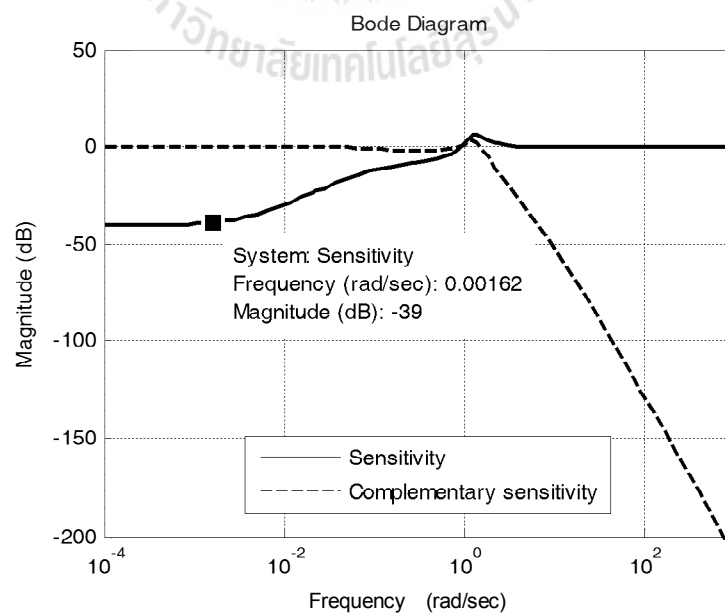
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | วิธีการในบทที่ 3 | วิธีการที่นำเสนอ |
|---------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -12.041 dB | 8.003 dB | 8.007 dB | 8.000 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50° | 50° | 49.972° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 1 rad/sec | 1 rad/sec | 1 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 4.940 s | 1.090 s | 1.350 s | 1.440 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 42.300% | 11.900% | 6.590% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 9.080 s | 13.100 s | 21.500 s | 21.100 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 30.900% | 7.200% | 1% |
| แบนด์วิดท์ | 0.434 rad/sec | 1.849 rad/sec | 1.732 rad/sec | 1.709 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.990 dB | 3.020 dB | 3.040 dB |

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมีส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ได้ออกแบบไว้ ลักษณะกราฟในโดเมนความถี่ก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพลาเน็ต 1 และ 2 ดังนั้นต่อไปจะไม่ขอกล่าวซ้ำอีก เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังจากชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอแล้ว ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1% ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นตอนที่ 1 ในขณะที่วิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีที่นำเสนอในบทที่ 3 มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว 30.900% และ 7.200% ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบดังเช่นพลาเน็ต 2 และ 3 วิธีการที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.38)

$$S_G^T = \frac{0.927s^6 + 1.371s^5 + 4.561s^4 + 6.385s^3 + 4.113s^2 + 1.013s + 0.003}{0.927s^6 + 1.371s^5 + 4.561s^4 + 6.385s^3 + 7.725s^2 + 3.312s + 0.318} \quad (4.38)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (4.39)

$$T = \frac{3.612s^2 + 2.298s + 0.315}{0.927s^6 + 1.371s^5 + 4.561s^4 + 6.385s^3 + 7.725s^2 + 3.312s + 0.318} \quad (4.39)$$



รูปที่ 4.10 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 3)

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำความไวมีค่าประมาณ -39 dB ในขณะที่วิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 มีค่าความไวประมาณ -10 dB และ -23 dB ตามลำดับ

พลาเน็ต 4

$$G(s) = \frac{1}{(10s + 1)^2} e^{-s} \quad (4.40)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB , PM = 50° และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1% หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบแล้วได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวชดเชยดังนี้

$$K = 99, \omega_g = 0.444, \alpha T = 0.888, K_{lag} = 0.029, T = 17.063$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (4.41)

$$G_c(s) = 54.806 \frac{[s + 0.089][s + 0.059]}{[s + 0.003][s + 1.126]} \quad (4.41)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.089 และ -0.059

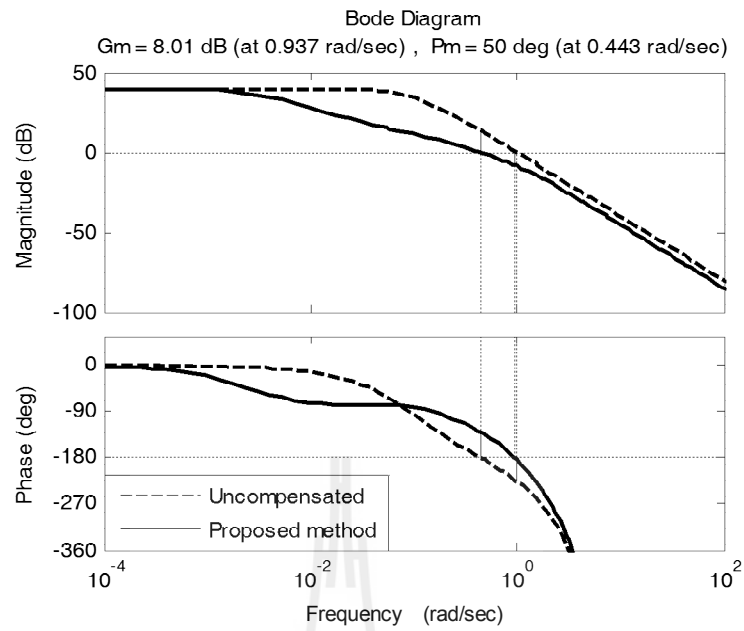
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -1.126 และ -0.003

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.42)

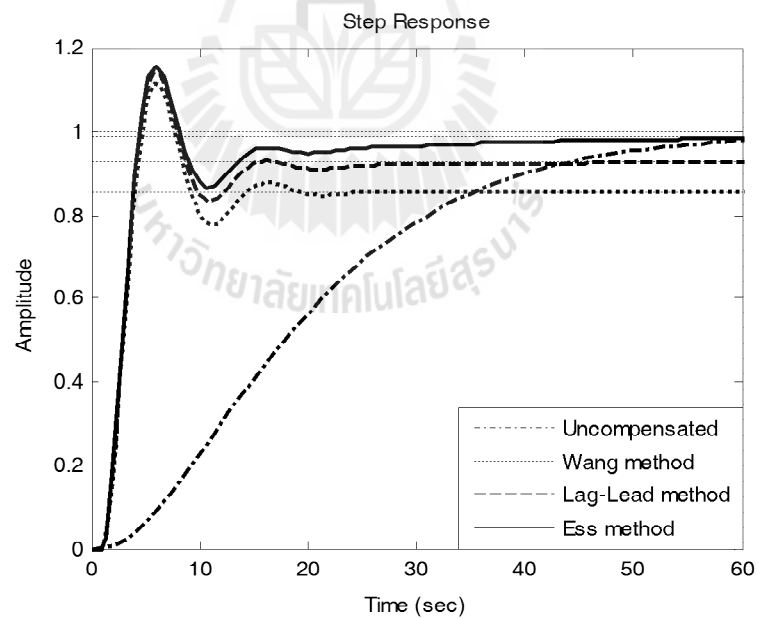
$$GH(s) = \frac{(48.450s^2 + 7.157s + 0.254)e^{-s}}{88.560s^4 + 117.900s^3 + 21.190s^2 + 1.054s + 0.003} \quad (4.42)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.43)

$$T(s) = \frac{(48.450s^2 + 7.157s + 0.254)e^{-s}}{88.56s^4 + 117.9s^3 + 21.190s^2 + 1.054s + 0.003 + (48.45s^2 + 7.157s + 0.254)e^{-s}} \quad (4.43)$$



รูปที่ 4.11 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 4)



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 4)

ตารางที่ 4.5 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 4 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | วิธีการในบทที่ 3 | วิธีการที่นำเสนอ |
|---------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -26.307 dB | 8.001 dB | 8 dB | 8.041 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -180° | 50.020° | 50.003° | 50.216° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0 rad/sec | 0.443 rad/sec | 0.443 rad/sec | 0.442 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 33.600 s | 2.100 s | 2.200 s | 2.360 s |
| การพุ่งเกิน | 0% | 30.600% | 23.100% | 17.100% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 59.300 s | 17.600 s | 14.200 s | 32 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 14.400% | 7.100% | 1% |
| เวลาประวิง | 1 s | 1 s | 1 s | 1 s |
| แบนด์วิดท์ | 0.064 rad/sec | 0.935 rad/sec | 0.926 rad/sec | 0.910 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.160 dB | 2.140 dB | 1.860 dB |

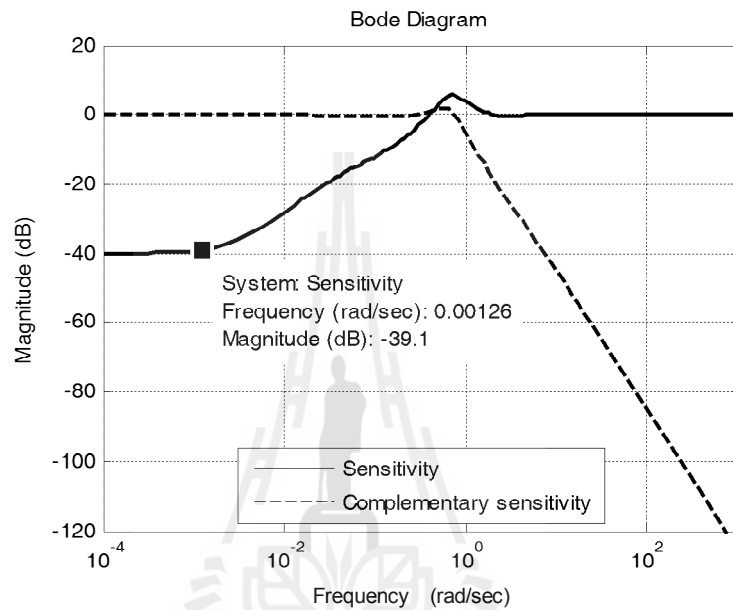
เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ตามที่ออกแบบไว้ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังจากชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอแล้ว ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1% ตรงตามที่ออกแบบไว้ สำหรับเวลาประวิงทั้งก่อนและหลังการชดเชยไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับ 1 วินาที

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.44)

$$S_G^T = \frac{88.560s^4 + 117.900s^3 + 21.190s^2 + 1.054s + 0.003}{88.56s^4 + 117.9s^3 + 21.190s^2 + 1.054s + 0.003 + (48.45s^2 + 7.157s + 0.254)e^{-s}} \quad (4.44)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (4.45)

$$T = \frac{(48.450s^2 + 7.157s + 0.254)e^{-s}}{88.56s^4 + 117.9s^3 + 21.190s^2 + 1.054s + 0.003 + (48.45s^2 + 7.157s + 0.254)e^{-s}} \quad (4.45)$$



รูปที่ 4.13 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 4)

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าลักษณะของความไวในการตอบสนองเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพลาเน็ต 2 และ 3 คือวิธีการที่นำเสนอสามารถลดความไวในช่วงความถี่ต่ำได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3

พลาเน็ต 5

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(s^2 + 0.200s + 1)} \quad (4.46)$$

กำหนดให้ $GM = 8 \text{ dB}$, $PM = 30^\circ$ และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1%

หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบแล้วได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวชดเชยดังนี้

$$K = 99, \omega_g = 1.095, \alpha T = 0.345, K_{lag} = 0.002, T = 1.716$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (4.47)

$$G_c(s) = 1.089 \frac{[s + 0.219]}{[s + 0.0005]} \frac{[s + 0.583]}{[s + 2.899]} \quad (4.47)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.583 และ -0.219

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -2.899 และ -0.0005

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.48)

$$GH(s) = \frac{0.372s^2 + 0.298s + 0.047}{0.346s^5 + 1.415s^4 + 1.615s^3 + 1.546s^2 + 1.001s + 0.0005} \quad (4.48)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.49)

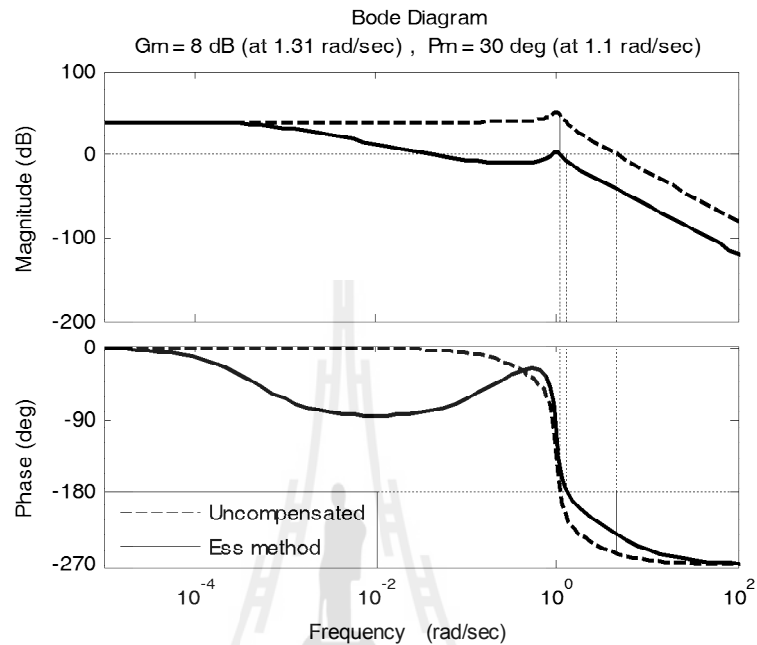
$$T(s) = \frac{0.372s^2 + 0.298s + 0.047}{0.346s^5 + 1.415s^4 + 1.615s^3 + 1.918s^2 + 1.299s + 0.048} \quad (4.49)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -0.582 และ -0.219

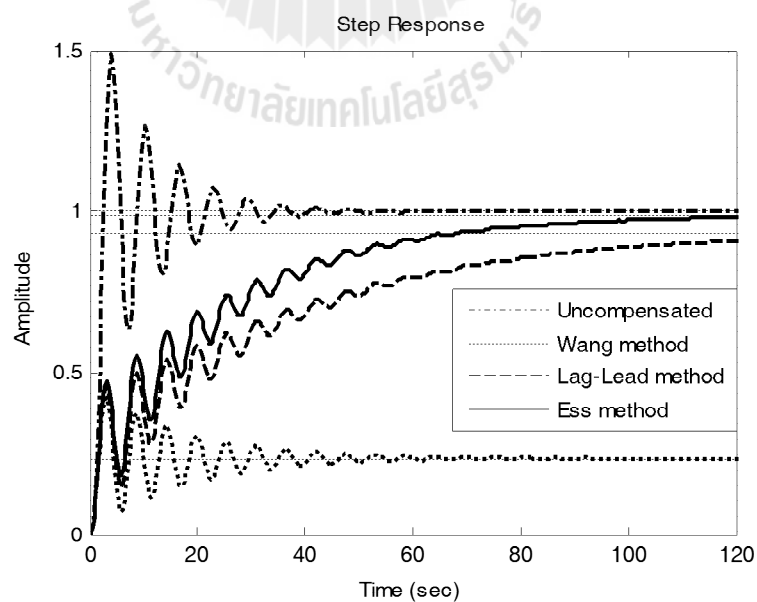
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด: -3.021, -0.917, -0.039 และ $-0.059 \pm 1.131i$

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า แม้ว่าจะระบบก่อนการชดเชยจะมีการสั่นไกวมาก แต่หลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอก็สามารถให้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการคือมี $GM = 8$ dB, $PM = 30^\circ$ และ $\omega_g = 1.1$ rad/sec เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ หลังจากชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอแล้วค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1% ตรงตามที่ออกแบบไว้ ในขณะที่วิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 76.500% และ 6.500% ตามลำดับ จากการ

ทดลองที่ผ่านมากับพลาเน็ต 2, 3, 4 และ 5 ทำให้เราสรุปได้ว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถควบคุมให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.14 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 5)



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 5)

ตารางที่ 4.6 ผลการตอบสนองของพลาเน็ต 5 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

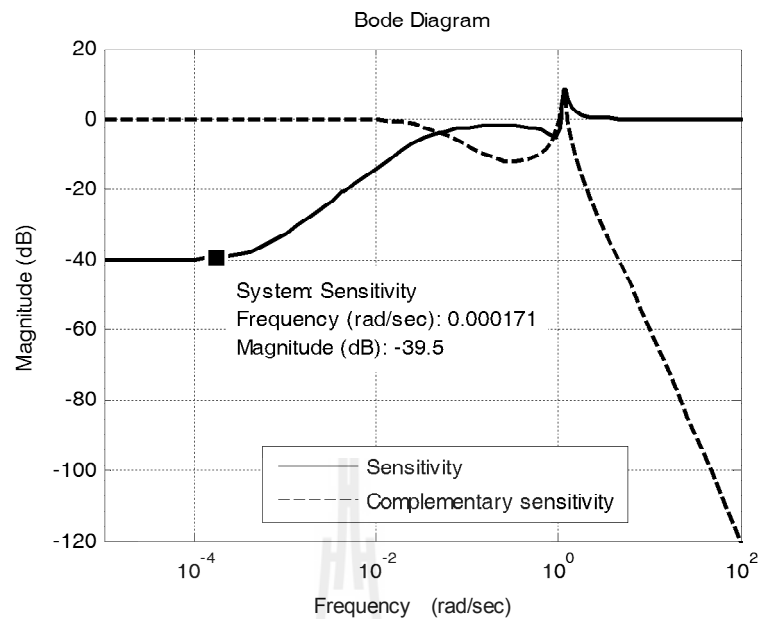
| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | วิธีการในบทที่ 3 | วิธีการที่นำเสนอ |
|---------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | -7.131 dB | 8 dB | 8.006 dB | 7.998 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | -27.719° | 30° | 30° | 29.998° |
| ความถี่ตัดขนาด | 1.253 rad/sec | 1.095 rad/sec | 1.095 rad/sec | 1.095 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 1.500 s | 1.020 s | 73 s | 51.100 s |
| การพุ่งเกิน | 48.900% | 81.900% | 0% | 0% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 35.900 s | 66.900 s | 132 s | 95.500 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 0% | 76.500% | 6.500% | 1% |
| เวลาประวิง | 0 s | 0 s | 0 s | 0 s |
| แบนด์วิดท์ | 1.342 rad/sec | 1.707 rad/sec | 0.029 rad/sec | 0.041 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | 11.100 dB | 6.890 dB | 6.900 dB | 6.910 dB |

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.50)

$$S_G^T = \frac{1}{1 + GH(s)} = \frac{0.346s^5 + 1.415s^4 + 1.615s^3 + 1.546s^2 + 1.001s + 0.0005}{0.346s^5 + 1.415s^4 + 1.615s^3 + 1.918s^2 + 1.299s + 0.048} \quad (4.50)$$

คอมพลีเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (4.51)

$$T = 1 - S_G^T = \frac{0.372s^2 + 0.298s + 0.047}{0.346s^5 + 1.415s^4 + 1.615s^3 + 1.918s^2 + 1.299s + 0.048} \quad (4.51)$$



รูปที่ 4.16 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 5)

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าความไวมีลักษณะเช่นเดียวกับพลาเน็ต 2, 3 และ 4 ดังนั้นสำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการที่นำเสนอสามารถลดความไวในช่วงความถี่ต่ำได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 จึงทำให้กำจัดการรบกวนจากภายนอกได้ดีกว่า

พลาเน็ต 6

$$G(s) = \frac{1 - 2s}{(s + 1)^3} \quad (4.52)$$

กำหนดให้ $GM = 8$ dB และ $PM = 50^\circ$

วิธีการที่นำเสนอ เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากวิธีการของ Wang et al. (2006) ใช้เพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงไม่สามารถใช้กับพลาเน็ต 6 ได้เช่นเดียวกับวิธีการของ Wang et al. (2006)

พลานต์ 7

$$G(s) = \frac{5}{s(s + 0.700)(s + 7)} e^{-0.230s} \quad (4.53)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°

ระบบนี้มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ จึงไม่ต้องคำนวณหาค่าอัตราขยายใหม่

หลังจากดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบแล้วได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวชดเชยดังนี้

$$\omega_g = 1.316, \alpha T = 0.207, K_{lag} = 0.070, T = 2.994$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (4.54)

$$G_c(s) = 10.070 \left[\frac{s + 0.263}{s + 0.018} \right] \left[\frac{s + 0.334}{s + 4.826} \right] \quad (4.54)$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -0.334 และ -0.263

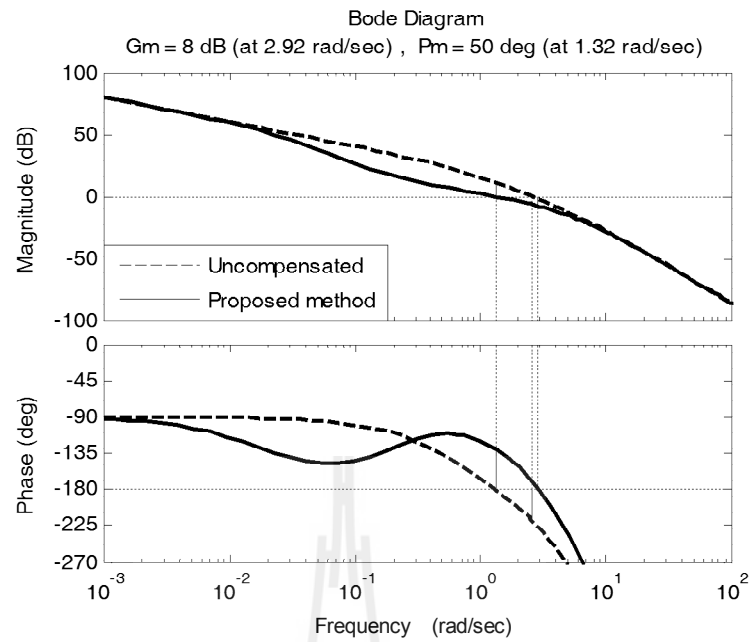
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย: -4.826 และ -0.018

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.55)

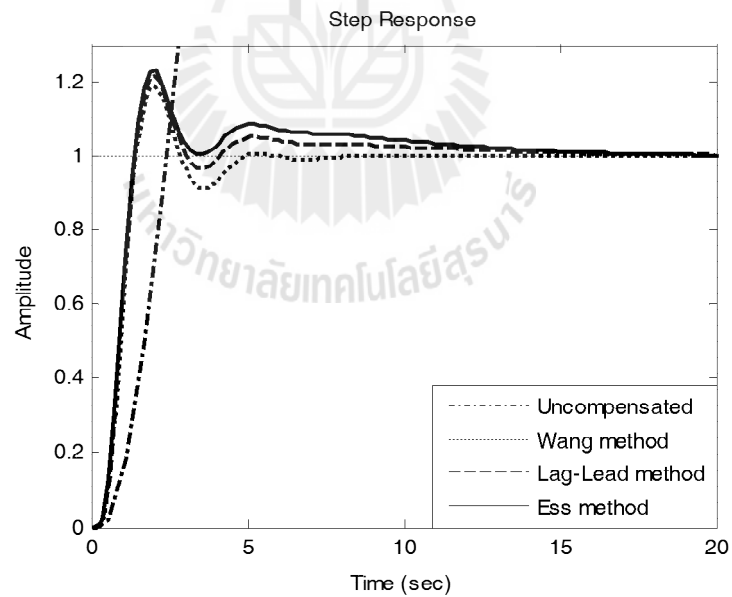
$$GH(s) = \frac{(10.430s^2 + 6.231s + 0.917)e^{-0.230s}}{0.207s^5 + 2.599s^4 + 8.763s^3 + 5.060s^2 + 0.090s} \quad (4.55)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.56)

$$T(s) = \frac{(10.430s^2 + 6.231s + 0.917)e^{-0.230s}}{0.207s^5 + 2.599s^4 + 8.763s^3 + 5.060s^2 + 0.090s + (10.430s^2 + 6.231s + 0.917)e^{-0.230s}} \quad (4.56)$$



รูปที่ 4.17 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ (พลาเน็ต 7)



รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อชดเชยด้วยวิธีที่นำเสนอ (พลาเน็ต 7)

ตารางที่ 4.7 ผลการตอบสนองของพลานต์ 7 หลังชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | วิธีการในบทที่ 3 | วิธีการที่นำเสนอ |
|---------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 8.932 dB | 7.998 dB | 7.995 dB | 8.026 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | 29.334° | 50.008° | 50.011° | 50.140° |
| ความถี่ตัดขนาด | 0.712 rad/sec | 1.316 rad/sec | 1.316 rad/sec | 1.312 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | N/A | 0.776 s | 0.752 s | 0.731 s |
| การพุ่งเกิน | N/A | 18.800% | 21.500% | 23.300% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | N/A | 4.560 s | 11.500 s | 13.400 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | N/A | 0% | 0% | 0% |
| เวลาประวิง | 0.230 s | 0.230 s | 0.230 s | 0.230 s |
| แบนด์วิดท์ | N/A | 2.702 rad/sec | 2.758 rad/sec | 2.810 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | N/A | 2.090 dB | 2.03 dB | 1.8 dB |

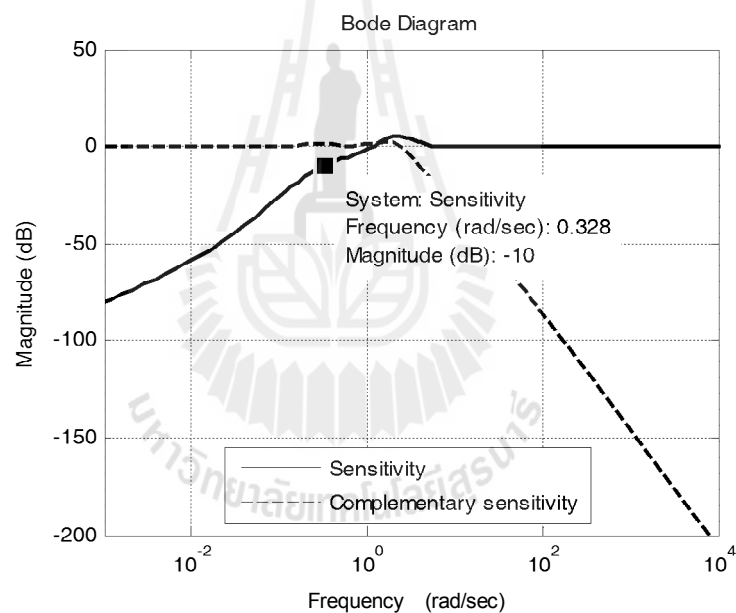
เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า ระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอยังคงได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่กำหนด เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากพจน์อินทิเกรเตอร์ หลังการชดเชยสามารถเข้าสู่ระดับคงตัวที่หนึ่งหน่วยตามต้องการ วิธีการที่นำเสนอใช้เวลาขาขึ้นสั้นกว่าวิธีการอื่น ๆ เล็กน้อย แต่ก็ทำให้การพุ่งเกินสูงกว่าเล็กน้อยด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า จากผลการทดสอบกับพลานต์ 1 และ 7 ทำให้สรุปได้ว่า สำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่าวิธีการที่นำเสนอ

ความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย แสดงดังสมการ (4.57)

$$S_G^T = \frac{0.207s^5 + 2.599s^4 + 8.763s^3 + 5.060s^2 + 0.090s}{0.207s^5 + 2.599s^4 + 8.763s^3 + 5.060s^2 + 0.090s + (10.430s^2 + 6.231s + 0.917)e^{-0.230s}} \quad (4.57)$$

คอมพลิเมนต์ของความไวแสดงดังสมการ (4.58)

$$T = \frac{(10.430s^2 + 6.231s + 0.917)e^{-0.230s}}{0.207s^5 + 2.599s^4 + 8.763s^3 + 5.060s^2 + 0.090s + (10.430s^2 + 6.231s + 0.917)e^{-0.230s}} \quad (4.58)$$



รูปที่ 4.19 ความไวและคอมพลิเมนต์ของความไวของระบบวงปิดที่มีตัวชดเชย (พลาเน็ต 7)

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าในย่านความถี่ต่ำระบบมีความไวต่ำ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับพลาเน็ต 1 ซึ่งเป็นพลาเน็ตที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบเหมือนกัน

4.5 สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่าวิธีการที่นำเสนอตั้งเช่น พลาเน็ต 1 และพลาเน็ต 7 โดยวิธีการของ Wang et al. (2006) ใช้เวลาในการเข้าที่น้อยกว่าวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบได้แก่ พลาเน็ต 2, 3, 4 และ 5 วิธีการที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการในบทที่ 3 โดยสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่ต้องการ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอ ยังสามารถลดความไวของระบบในย่านความถี่ต่ำได้มากกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการในบทที่ 3 อีกด้วย สำหรับพลาเน็ต 6 ไม่สามารถใช้วิธีการที่นำเสนอออกแบบให้ได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพตามที่ต้องการได้ เนื่องจากวิธีการที่นำเสนอเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีการของ Wang et al. (2006) เพื่อแก้ปัญหาค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นเมื่อวิธีการของ Wang et al. (2006) ใช้ไม่ได้ วิธีการที่นำเสนอก็ใช้ไม่ได้ด้วยเช่นกัน

ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 กับบทที่ 4 มีดังนี้

1) วิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 ในขั้นตอนการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าไม่มีหลักเกณฑ์ตายตัว โดยออกแบบให้สร้างส่วนเฟสไว้ในช่วง 30-50% ของส่วนเฟสที่ต้องการทั้งหมดก่อน จากนั้นจึงใช้ตัวชดเชยเฟสล่าช้าตามวิธีการของ Wang et al. (2006) สร้างส่วนเฟสที่เหลือพร้อมทั้งปรับส่วนเพื่ออัตราขยายให้ได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวจึงไม่สามารถควบคุมให้เท่ากับที่กำหนดได้ แต่ก็สามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ในระดับหนึ่งจากคุณสมบัติของตัวชดเชยเฟสล่าช้า

2) วิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4 เป็นการพัฒนาวิธีการของ Wang et al. (2006) เพื่อแก้ปัญหาค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว โดยใช้ตัวชดเชยเฟสล่าช้าที่เพิ่มเข้ามา ทำหน้าที่เปลี่ยนตำแหน่งความถี่ตัดขนาด แทนการปรับเปลี่ยนอัตราขยายของระบบโดยตรงตามวิธีการของ Wang et al. (2006) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัตราขยายดีซีไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่ต้องการ

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยในการออกแบบ

5.1 กล่าวนำ

การออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ล้าหน้าที่นำเสนอไปในบทที่ 3 และบทที่ 4 ที่ผ่านมานั้น มีขั้นตอนที่ต้องพล็อตกราฟ หาจุดตัดของกราฟ และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ทำให้ต้องใช้เวลานานในการออกแบบ ดังนั้นเพื่อลดเวลาดังกล่าว เราจึงนำโปรแกรม MATLAB มาใช้เพื่อช่วยในการออกแบบ โดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องการ จากนั้นจึงให้โปรแกรมทำการคำนวณหาตัวชดเชยออกมาโดยอัตโนมัติ พร้อมทั้งแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ โดยเราจะนำโปรแกรมที่ออกแบบนี้ไปทดสอบกับพลาเน็ตทั้ง 7 พลาเน็ต ที่ใช้ในตอนทดสอบกับวิธีการในบทที่ 2 ถึงบทที่ 4

5.2 โครงสร้างของโปรแกรม

ตัวโปรแกรมมีเพียงโปรแกรมหลักเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ไม่ยาวนาน โดยมียานวนทั้งหมด 358 บรรทัด รายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ก โครงสร้างของโปรแกรมแบ่งเป็น 6 ส่วนดังนี้

- 1) ส่วนป้อนข้อมูล ใช้สำหรับป้อนฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ
- 2) ส่วนคำนวณหาตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ล้าหน้าด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006) ทำหน้าที่ในการคำนวณหาจุดตัดของกราฟ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวชดเชยออกมาโดยอัตโนมัติ
- 3) ส่วนคำนวณหาตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ล้าหน้า ด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3
- 4) ส่วนคำนวณหาตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ล้าหน้า แบบจำกัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว
- 5) ส่วนแสดงผลกราฟ ใช้สำหรับแสดงผลกราฟทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่
- 6) ส่วนแสดงรายละเอียด ใช้แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

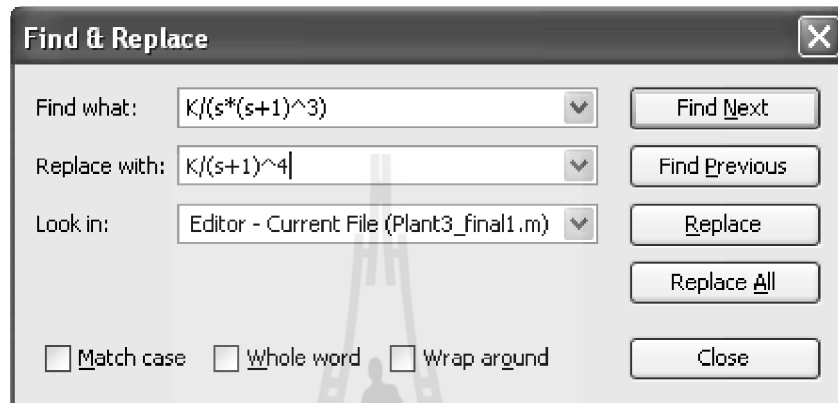
โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวชดเชย

5.3 ขั้นตอนการออกแบบ

- 1) ป้อนอัตราขยายที่ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นไปตามที่กำหนด
- 2) ป้อนฟังก์ชันถ่ายโอน โดยการกดคีย์ Ctrl+H เพื่อเรียกใช้งานฟังก์ชัน Find & Replace ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการป้อนฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้คำสั่ง Find & Replace

- 3) กำหนดส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการในหน่วยเดซิเบล
- 4) กำหนดส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการในหน่วยองศา
- 5) กำหนดเวลาที่ใช้ในการพล็อตกราฟในโดเมนเวลา (หน่วยวินาที)
- 6) กำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับแต่ง (λ)
- 7) รันโปรแกรม โปรแกรมจะแสดงผลกราฟและตัวชดเชยพร้อมทั้งรายละเอียด

5.4 ผลการออกแบบ

เพื่อความกระชับของเนื้อหาจึงได้นำพลานต์ 1 กับ 2 มาทดลองออกแบบได้ผลดังนี้

พลานต์ 1

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)^3} \quad (5.1)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°

หลังจากป้อนพารามิเตอร์และรันโปรแกรมแล้ว โปรแกรมจะแสดงกราฟในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ดังที่แสดงไว้แล้วในบทที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งจะไม่ขอแสดงซ้ำอีก ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนและรายละเอียดของตัวชดเชยจะแสดงในหน้าต่าง Command Window ดังแสดงในรูปที่ 5.3

```

Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help
Wang method. (Lead compensator)
Transfer function:
1.357 s + 0.4492
-----
0.3108 s + 1
Gain margin = 8.0 dB. (at 1.12 rad/s)
Phase margin = 50.0 degree. (at 0.58 rad/s)
(Wg = 0.58, AlphaT = 0.31, Kc = 0.45, T = 3.02, Boundary = 1.45)
*****
Algebraic method. (Lag-Lead compensator)
Lag =
Transfer function:
0.6038 s + 0.06462
-----
s + 0.06462
Lead =
Transfer function:
2.298 s + 0.6509
-----
0.2977 s + 1
Gain margin = 8.000 dB. (at 1.126 rad/s)
Phase margin =50.000 degree. (at 0.577 rad/s)
(Lag : W0dBnew = 0.470, Alpha = 0.604, Ta = 15.474)
(Lead : Wg = 0.577, Alpha1T = 0.298, Kc = 0.651, T = 3.530)
OVR...

Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help
Control steady state error method. (Lag-Lead compensator)
Lag =
Transfer function:
0.3505 s + 0.04048
-----
s + 0.04048
Lead =
Transfer function:
4.021 s + 1.001
-----
0.2862 s + 1
Gain margin = 7.999 dB. (at 1.135 rad/s)
Phase margin =49.972 degree. (at 0.578 rad/s)
(Wg = 0.577, AlphaT = 0.286, K_lag = 0.351, T = 4.018)
*****
Summary
-----
Method Gain margin Phase margin Wp Wg
-----
Uncompensated -1.0 -5.0 0.58 0.62
Wang 8.0 50.0 1.12 0.58
Algebra 8.0 50.0 1.13 0.58
Ess control 8.0 50.0 1.14 0.58
-----
*****
OVR...

```

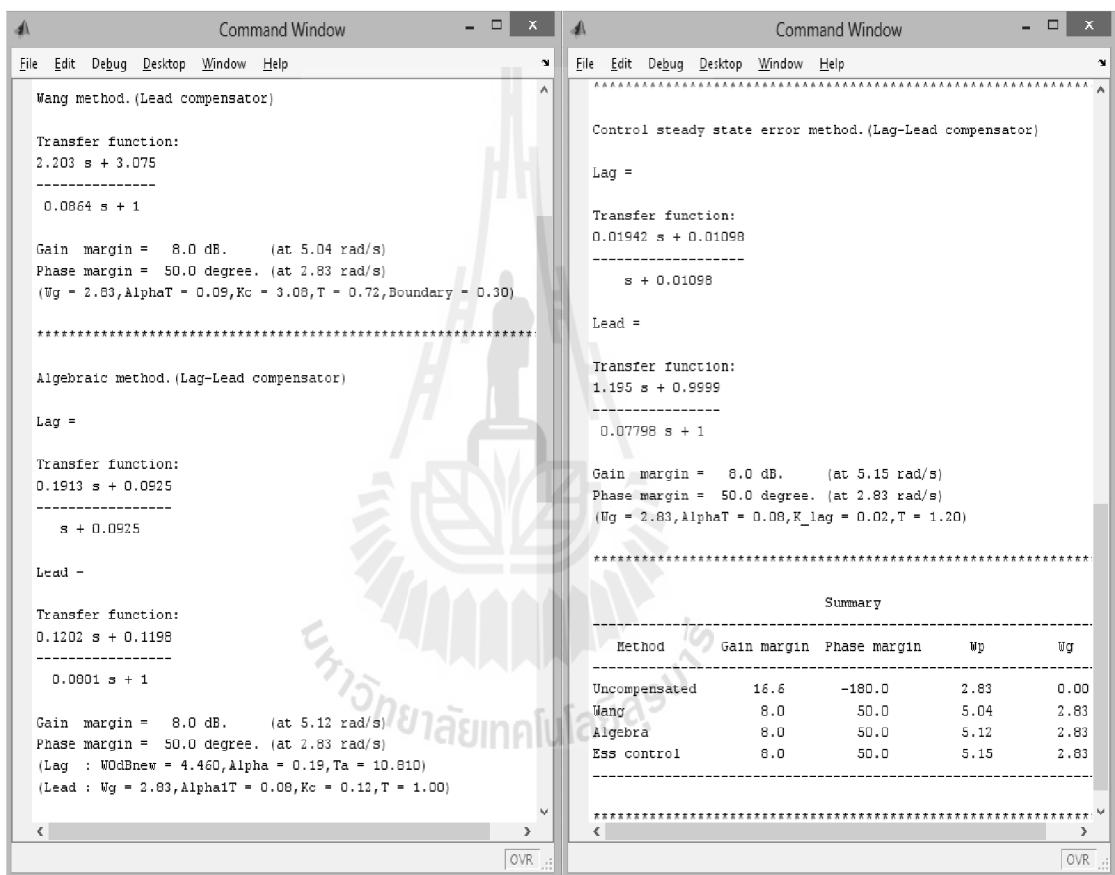
รูปที่ 5.3 การแสดงผลใน Command Window ของพลาเน็ต 1

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าโปรแกรมจะแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยทั้งสามวิธี และสำหรับตัวชดเชยเฟสล่าช้าหลัง-ล่าหน้าจะแยกแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยเฟสล่าหน้าและตัวชดเชยเฟสล่าช้าออกจากกันเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังแสดงรายละเอียดพารามิเตอร์ของตัวชดเชยแต่ละแบบ และตอนท้ายยังมีตารางสรุปผลจากการชดเชยของวิธีการแต่ละวิธีเอาไว้อีกด้วย

พลานต์ 2

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(0.500s + 1)(0.250s + 1)(0.125s + 1)} \quad (5.2)$$

กำหนดให้ GM = 8 dB และ PM = 50°



รูปที่ 5.4 การแสดงผลใน Command Window ของพลานต์ 2

5.5 สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า โปรแกรมสามารถช่วยให้เราออกแบบได้ภายในเวลาอันสั้น และให้รายละเอียดอย่างครบถ้วน ทั้งในรูปแบบของกราฟและรายละเอียดของตัวชดเชย รวมทั้งสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการออกแบบได้โดยง่าย จึงช่วยในการตัดสินใจเลือกตัวชนิดของตัวชดเชย และปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ผลตอบสนองโดยรวมอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ

บทที่ 6

การกำหนดขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟส

6.1 กล่าวนำ

จากการทดลองออกแบบตัวชดเชยในบทที่ 2, 3 และ 4 จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่แล้วเรากำหนดให้ส่วนเพื่ออัตราขยายเท่ากับ 8 เดซิเบล และส่วนเพื่อเฟสเท่ากับ 50 องศา แต่ในทางปฏิบัติเราอาจต้องการกำหนดค่าที่แตกต่างออกไป บางครั้งเมื่อเราทดลองกำหนดค่าที่ต้องการลงไปแล้วปรากฏว่าไม่มีจุดตัดของกราฟ เราจึงต้องทำการกำหนดค่าใหม่แล้วทดลองออกแบบเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าที่มีจุดตัดของกราฟ ซึ่งค่าที่มีจุดตัดของกราฟที่ได้นี้ก็อาจทำให้ผลตอบสนองหลังการชดเชยอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถยอมรับได้ เราจึงต้องทดลองเปลี่ยนค่าใหม่อีก ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ทำให้ต้องใช้เวลาในการออกแบบ ดังนั้นในบทนี้เราจะออกแบบกราฟสำหรับแสดงขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่สามารถใช้งานได้สำหรับวิธีการแต่ละวิธี ซึ่งทำให้เราสามารถเลือกส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการได้โดยง่าย และไม่ต้องเสียเวลาในการทดลองสุ่มหาค่าอีกต่อไป

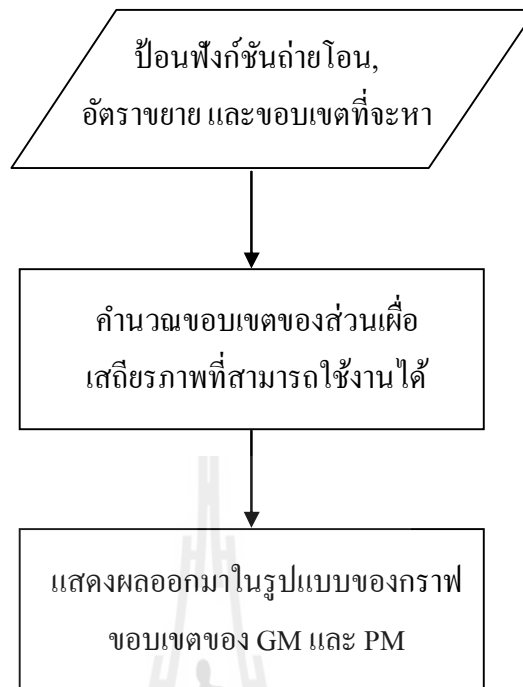
6.2 โครงสร้างของโปรแกรม

โปรแกรมขอบเขตมีทั้งหมด 3 โปรแกรม ได้แก่โปรแกรมสำหรับวิธีการของ Wang et al. (2006) โปรแกรมสำหรับวิธีการของ Wakeland (1976); Mitchell (1977) ร่วมกับวิธีการของ Wang et al. (2006) และโปรแกรมสำหรับวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ลำหน้าแบบจำกัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว รายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ข

โครงสร้างของโปรแกรมแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

- 1) ส่วนป้อนข้อมูล ใช้สำหรับป้อนฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ
- 2) ส่วนการคำนวณ ใช้สำหรับคำนวณหาขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสของตัวชดเชยออกมาโดยอัตโนมัติ
- 3) ส่วนแสดงผล ใช้สำหรับแสดงกราฟขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่สามารถใช้งานได้ โดยส่วนเพื่ออัตราขยายแสดงอยู่ในแนวแกน Y และส่วนเพื่อเฟสแสดงอยู่ในแนวแกน X

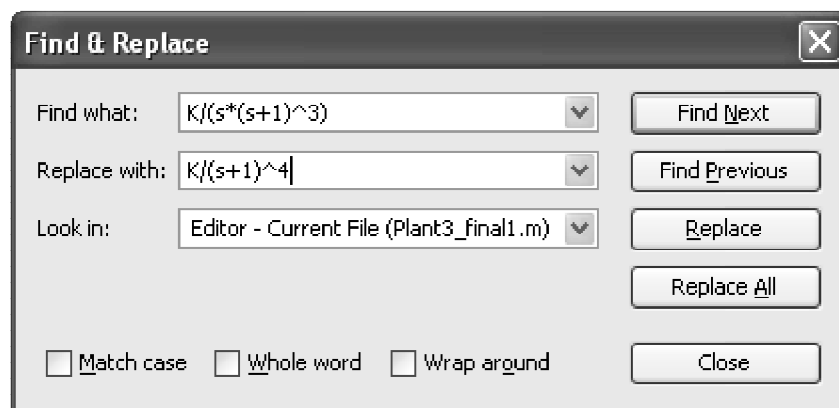
โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมขอบเขต

6.3 ขั้นตอนการออกแบบ

- 1) ป้อนอัตราขยายที่ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นไปตามที่กำหนด
- 2) ป้อนฟังก์ชันถ่ายโอน โดยการกดคีย์ Ctrl+H เพื่อเรียกใช้งานฟังก์ชัน Find & Replace ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.2
- 3) กำหนดช่วงของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการค้นหา



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างการป้อนฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้คำสั่ง Find & Replace

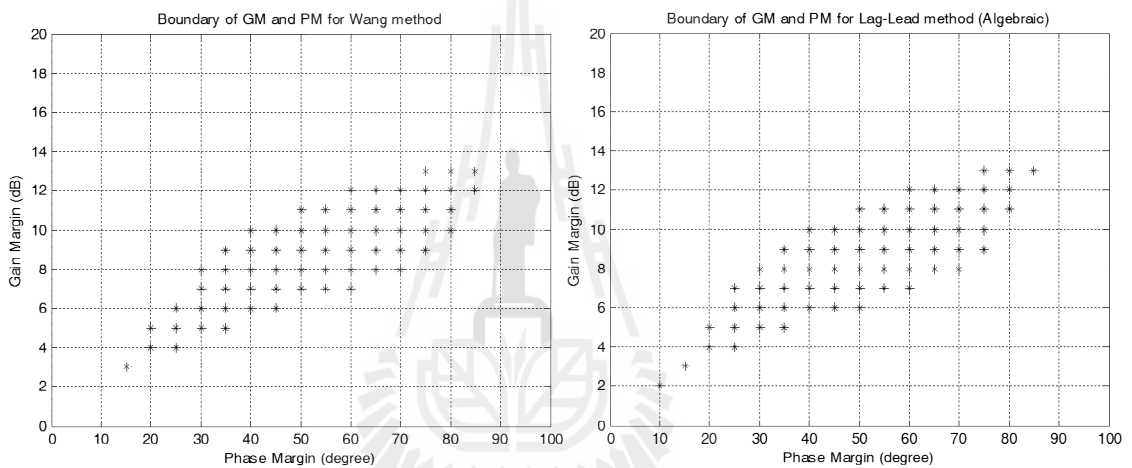
6.4 ผลการออกแบบ

เพื่อความกระชับของเนื้อหาจึงได้นำพลาเน็ต 1 และ 2 มาทดลองออกแบบ

พลาเน็ต 1

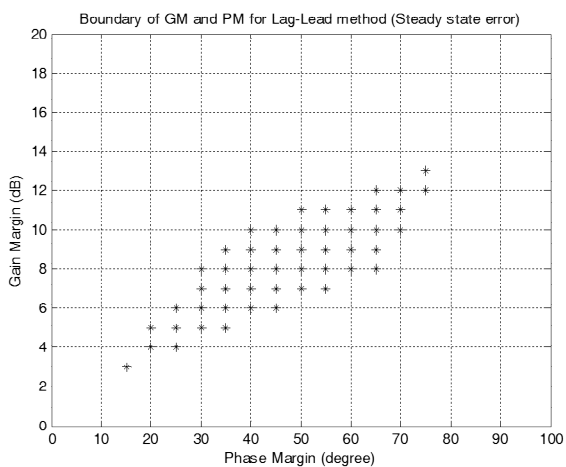
$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)^3} \quad (6.1)$$

ทดลองรันโปรแกรมขอบเขตทั้งสามโปรแกรมได้ผลแสดงดังรูปที่ 6.3



(ก) วิธีของ Wang et al. (2006)

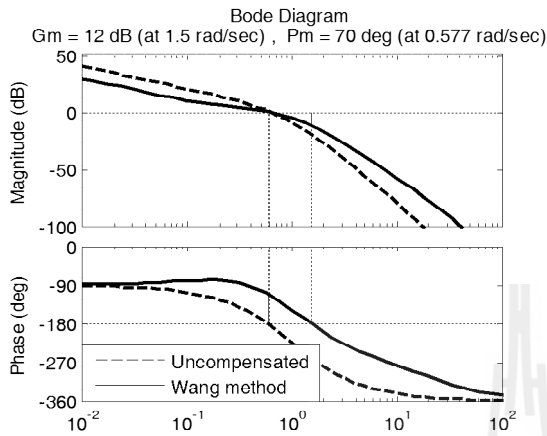
(ข) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 3



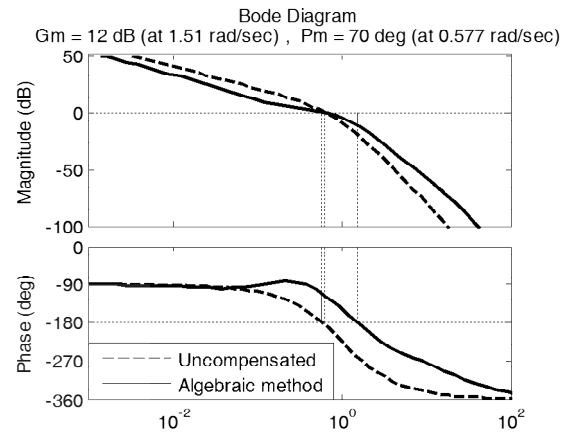
(ค) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 4

รูปที่ 6.3 ขอบเขตการออกแบบสำหรับพลาเน็ต 1

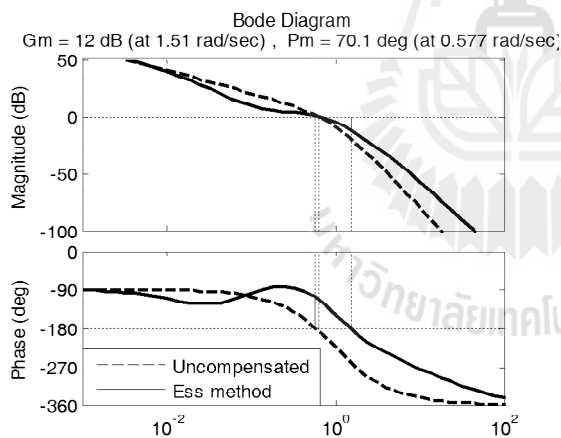
ทดลองออกแบบโดยในที่นี้เลือก $GM = 12$ dB และ $PM = 70^\circ$ แผนภาพโบคของระบบก่อน
และหลังการชดเชยแสดงดังรูปที่ 6.4



(ก) วิธีของ Wang et al. (2006)



(ข) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 3



(ค) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 4

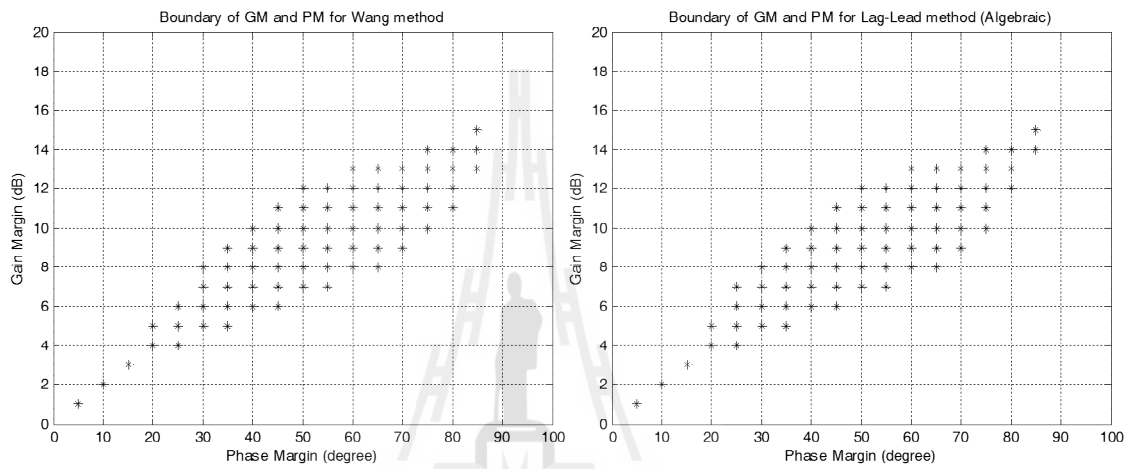
รูปที่ 6.4 แผนภาพโบคเมื่อชดเชยด้วยวิธีการทั้งสามแบบในย่านเสถียรภาพสูง (พลานต์ 1)

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าระบบหลังการชดเชยมี $GM = 12$ dB และ $PM = 70^\circ$ ซึ่งแสดงว่า
กราฟขอบเขตที่ออกแบบไว้สามารถใช้งานได้อย่างถูกต้อง

พลาเน็ต 2

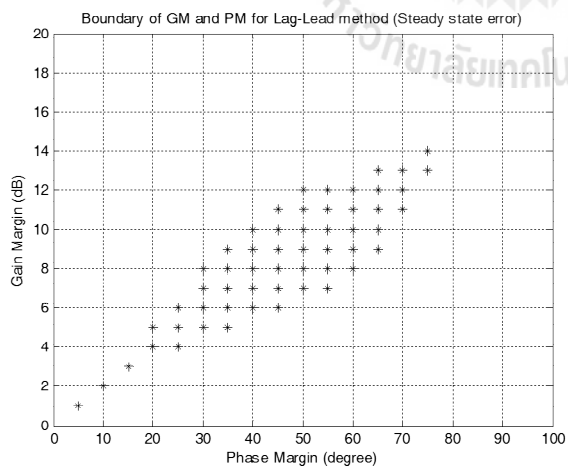
$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(0.500s+1)(0.250s+1)(0.125s+1)} \quad (6.2)$$

ทดลองรันโปรแกรมขอบเขตทั้งสามโปรแกรมได้ผลแสดงดังรูปที่ 6.5



(ก) วิธีของ Wang et al. (2006)

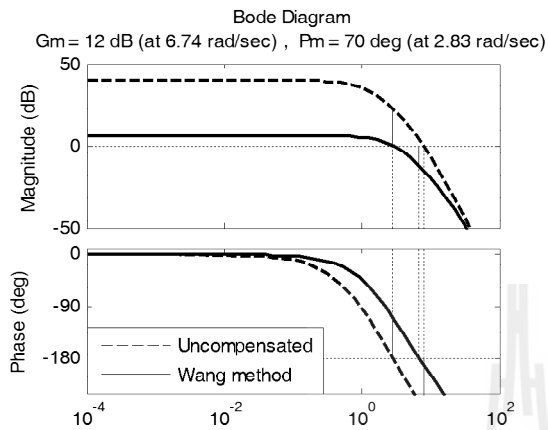
(ข) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 3



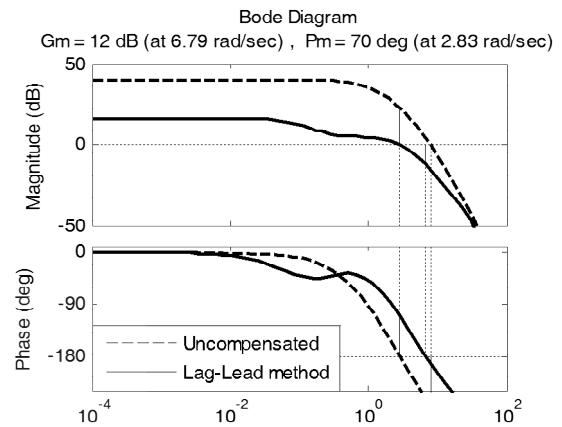
(ค) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 4

รูปที่ 6.5 ขอบเขตการออกแบบสำหรับพลาเน็ต 2

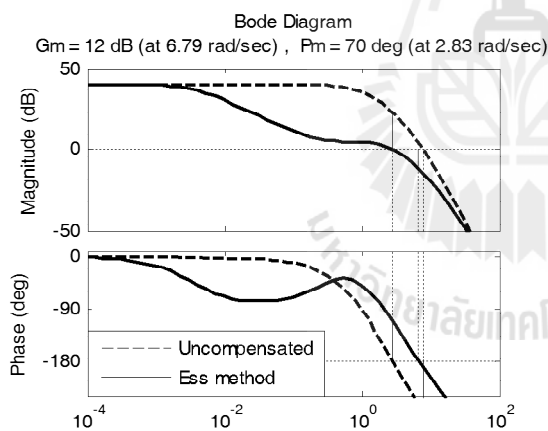
ทดลองออกแบบโดยในที่นี้เลือก $GM = 12$ dB และ $PM = 70^\circ$ แผนภาพโบคของระบบก่อนและหลังการชดเชยแสดงดังรูปที่ 6.6



(ก) วิธีของ Wang et al. (2006)



(ข) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 3



(ค) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 4

รูปที่ 6.6 แผนภาพโบคเมื่อชดเชยด้วยวิธีการทั้งสามแบบในย่านเสถียรภาพสูง (พลานต์ 2)

6.5 สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า กราฟขอบเขตสามารถใช้ช่วยในการเลือกส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการออกแบบได้อย่างถูกต้อง ช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการได้อย่างสะดวก รวดเร็ว ไม่ต้องเสียเวลาในการทดลองซ้ำ

บทที่ 7

การประยุกต์ใช้งานกับระบบทางอุตสาหกรรม

7.1 กล่าวนำ

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอกับระบบที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม จึงได้นำพลาเน็ตทางอุตสาหกรรมมาทดสอบ ซึ่งในที่นี้ได้นำพลาเน็ตเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Rahimian and Raahemifar, 2011) มาใช้ในการทดสอบ โดยในขั้นตอนแรกเราจะทำการตรวจสอบขอบเขตเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่สามารถออกแบบได้ก่อน ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ในบทที่ 6 จากนั้นจึงทดลองใช้วิธีการทั้งสามวิธีออกแบบตัวชดเชยโดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5

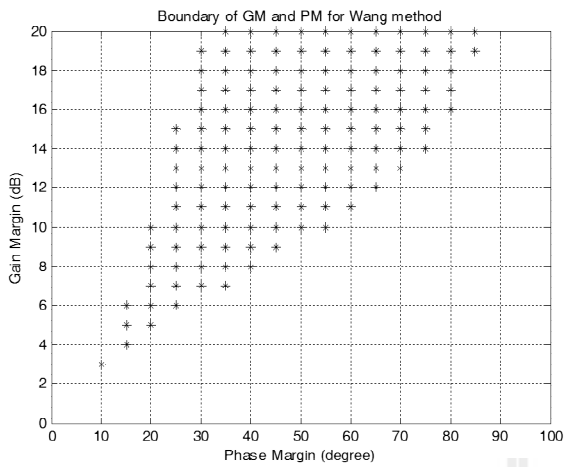
7.2 ผลการทดสอบ

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของพลาเน็ตเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Rahimian and Raahemifar, 2011) แสดงดังสมการ (7.1)

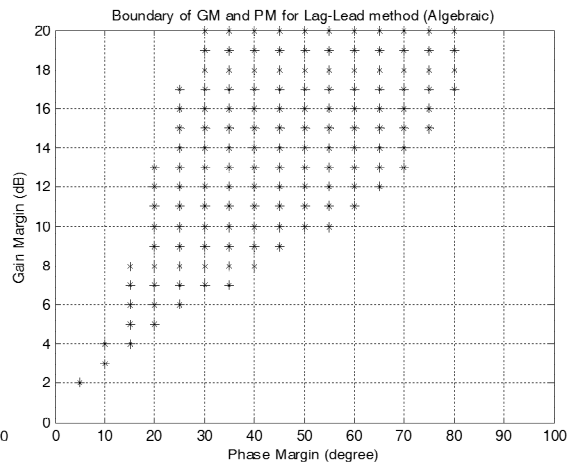
$$G_p(s) = \frac{10}{(1 + 0.1s)(1 + 0.4s)(1 + s)(1 + 0.01s)} \quad (7.1)$$

ทดลองรัน โปรแกรมขอบเขตทั้งสามโปรแกรม ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ในบทที่ 6 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 7.1

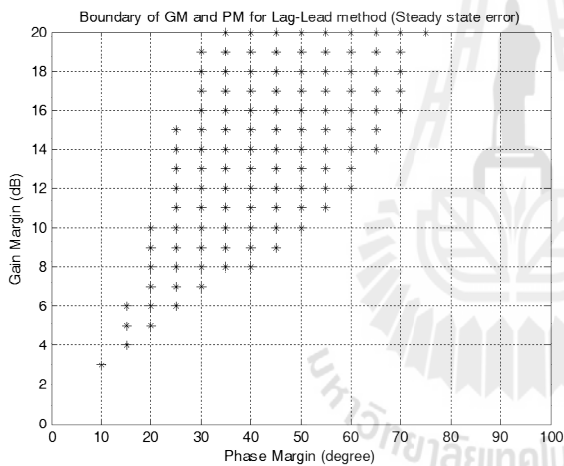
จากรูปที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าพลาเน็ตเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Rahimian and Raahemifar, 2011) สามารถออกแบบด้วยวิธีการทั้งสามวิธีได้ และมีส่วนเพื่อเสถียรภาพที่สูง เราจะทดลองออกแบบเพื่อให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายเท่ากับ 10 dB และส่วนเพื่อเฟสเท่ากับ 50°



(ก) วิธีของ Wang et al. (2006)



(ข) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 3



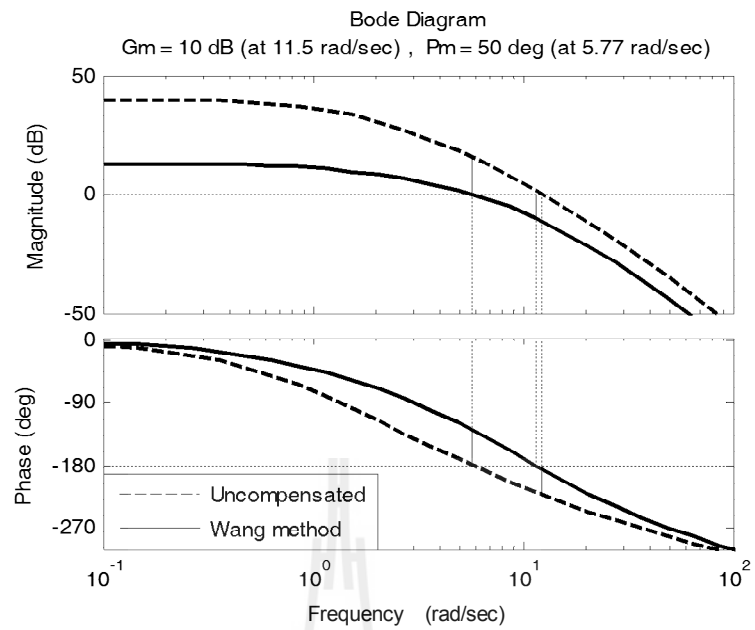
(ค) วิธีที่นำเสนอในบทที่ 4

รูปที่ 7.1 ขอบเขตการออกแบบสำหรับพลาเน็ต AVR (Rahimian and Raahemifar, 2011)

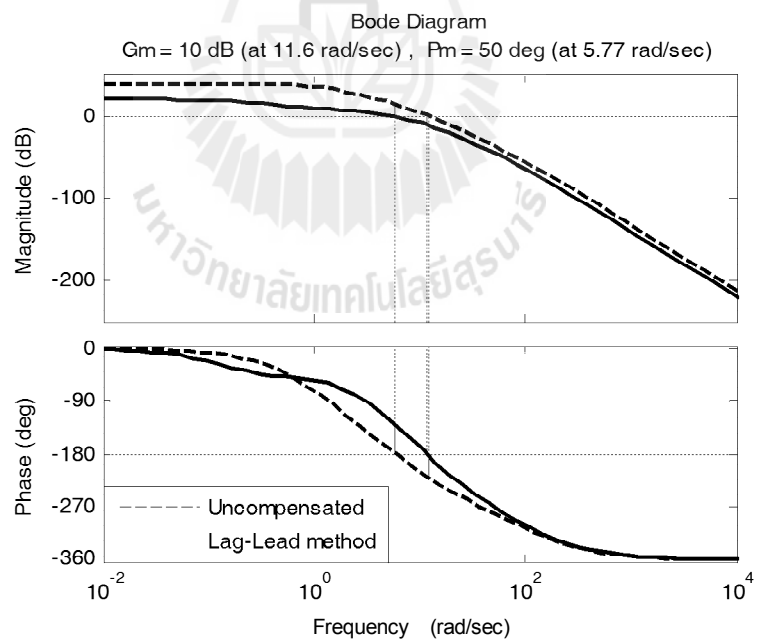
วิธีการของ Wang et al. (2006)

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (7.2)

$$G_c(s) = 3.702 \frac{s + 1.379}{s + 11.538} \tag{7.2}$$



รูปที่ 7.2 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006)



รูปที่ 7.3 แผนภาพโบดของระบบก่อนและหลังการชดเชยด้วยวิธีการในบทที่ 3

วิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3

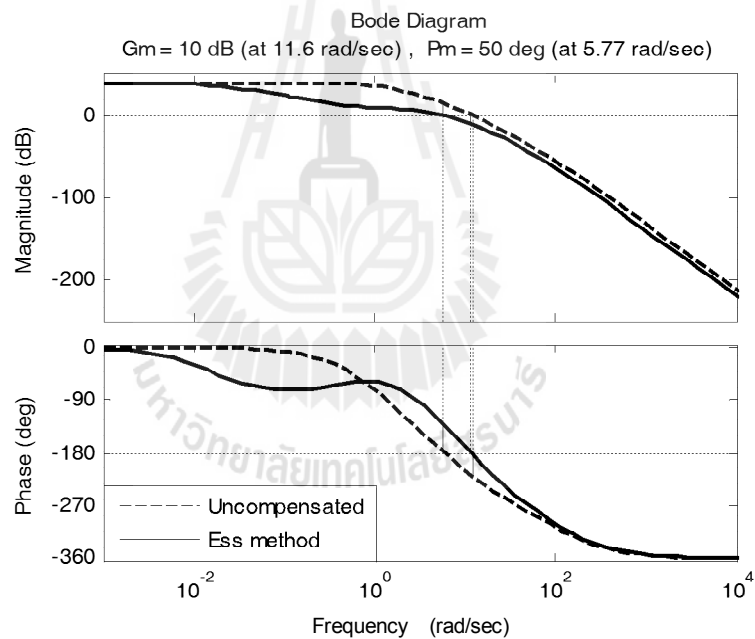
ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (7.3)

$$G_c(s) = 0.386 \left[\frac{s + 0.783}{s + 0.188} \right] \left[\frac{s + 0.832}{s + 11.863} \right] \quad (7.3)$$

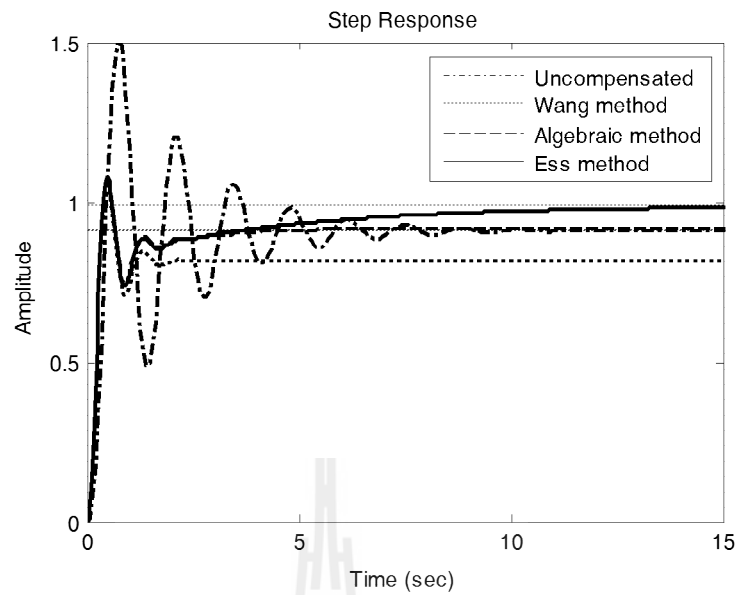
วิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย (เชิงทฤษฎี) แสดงดังสมการ (7.4)

$$G_c(s) = 0.383 \left[\frac{s + 1.153}{s + 0.010} \right] \left[\frac{s + 0.278}{s + 11.806} \right] \quad (7.4)$$



รูปที่ 7.4 แผนภาพโบคของระบบก่อนและหลังชดเชยด้วยวิธีการในบทที่ 4



รูปที่ 7.5 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิด

ตารางที่ 7.1 ผลการตอบสนองหลังชดเชยด้วยวิธีการทั้งสามวิธี

| ผลการตอบสนอง | ก่อนชดเชย | วิธีของ Wang | วิธีการในบทที่ 3 | วิธีการในบทที่ 4 |
|---------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| ส่วนเพื่ออัตราขยาย | 4.618 dB | 10 dB | 10 dB | 10 dB |
| ส่วนเพื่อเฟส | 16.103° | 50.013° | 50.013° | 50.013° |
| ความถี่ตัดขนาด | 4.403 rad/sec | 5.766 rad/sec | 5.766 rad/sec | 5.766 rad/sec |
| เวลาขาขึ้น | 0.264 s | 0.195 s | 0.215 s | 0.236 s |
| การพุ่งเกิน | 65.500% | 30.700% | 18% | 9.050% |
| เวลาเข้าที่ (2%) | 6.980 s | 1.460 s | 3.380 s | 9.680 s |
| ค่าผิดพลาด e_{ss} | 9.100% | 18.400% | 8.200% | 1% |
| แบนด์วิดท์ | 6.946 rad/sec | 10.687 rad/sec | 10.335 rad/sec | 10.053 rad/sec |
| ขนาดสูงสุด (วงปิด) | 11.8 dB | 2.150 dB | 2.150 dB | 2.150 dB |

จากตารางที่ 7.1 เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่าระบบก่อนการชดเชยมี $GM = 4.618$ dB และ $PM = 16.103^\circ$ ระบบหลังการชดเชยด้วยวิธีการทั้งสามมี $GM = 10$ dB, $PM = 50.013^\circ$ และ $\omega_g = 5.766$ rad/sec ซึ่งให้ผลตรงตามที่ต้องการที่ออกแบบไว้ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 7.5 จะเห็นได้ว่าระบบหลังจากชดเชยด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006) มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 18.400% ในขณะที่การพุ่งเกินก็สูงถึง 30.700% ส่วนวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว 8.200% และมีการพุ่งเกิน 18% ส่วนวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4 มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว 1% ตรงตามที่ต้องการที่ออกแบบไว้ ในขณะที่มีการพุ่งเกินเพียง 9.050% ส่วนความไววิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4 มีความไวในย่านความถี่ต่ำน้อยที่สุด ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4 ให้ผลการตอบสนองในภาพรวมได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการในบทที่ 3

7.3 สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าพลาเน็ตเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Rahimian and Raahemifar, 2011) ซึ่งเป็นพลาเน็ตที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ สามารถใช้วิธีการทั้งสามซึ่งประกอบด้วยวิธีการของ Wang et al. (2006) วิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 และบทที่ 4 ออกแบบแล้วให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสตามที่ต้องการ ณ ความถี่ตัดขนาดที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ แต่วิธีการในบทที่ 4 สามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่กำหนดอีกด้วย สรุปได้ว่าวิธีการในบทที่ 4 ให้ผลการตอบสนองในภาพรวมได้ดีที่สุด

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในขั้นแรกได้ศึกษาแนวทางการออกแบบตัวชดเชยเฟส ซึ่งได้แก่ตัวชดเชยเฟสล้าหน้า ตัวชดเชยเฟสล้าหลัง และตัวชดเชยแบบผสมเฟสล้าหลัง-ล้าหน้า ซึ่งตัวชดเชยเหล่านี้ในช่วงเริ่มแรกใช้วิธีการลองผิดลองถูก ซึ่ง Wakeland (1996) ได้เป็นผู้เริ่มต้นการออกแบบโดยใช้การคำนวณ หลังจากนั้นตัวชดเชยเฟสได้ถูกพัฒนามาโดยลำดับ ในปี ค.ศ. 2006 Wang et al. (2006) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้าหน้า ที่ทำให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสได้อย่างแม่นยำโดยใช้การคำนวณ ซึ่งเป็นครั้งแรกที่การออกแบบตัวชดเชยเฟส สามารถให้ทั้งส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสอย่างแม่นยำในเวลาเดียวกัน ในบทความของ Wang et al. (2006) ได้นำพลาเน็ตที่มีเวลาประวิงและมีอินทิเกรเตอร์มาทดสอบ ซึ่งให้ผลตอบสนองตรงตามที่ต้องการไว้ดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 2 จึงเป็นที่น่าสนใจว่าถ้าดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบของ Wang et al. (2006) นี้ จะให้ผลดีต่อการควบคุมพลาเน็ตที่มีพลวัตซับซ้อนดังการเสนอโดย Astrom and Hagglund (2000) เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพหรือไม่ จึงได้ประยุกต์วิธีการของ Wang et al. (2006) เพื่อการออกแบบระบบควบคุมวงปิด ทำการควบคุม 6 พลาเน็ตที่มีพลวัตซับซ้อนดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 2 ซึ่งพบว่าสำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ตัวชดเชยสามารถให้ผลการตอบสนองที่ดี แต่สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ระบบวงปิดหลังชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกินสูง

การพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาที่เป็นจุดอ่อนของการออกแบบตามวิธีของ Wang et al. (2006) ให้สามารถใช้ได้ผลกับพลาเน็ตที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ได้เลือกดำเนินการด้วยการใช้ตัวชดเชยผสมเฟสล้าหลัง-ล้าหน้ามาแทนที่ตัวชดเชยเฟสล้าหน้าเพียงอย่างเดียว เนื่องจากตัวชดเชยเฟสล้าหลังมีคุณสมบัติในการลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ขั้นตอนการดำเนินงานได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ในการดำเนินงานต้องอาศัยการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้าหลังด้วย Bode compensator design (Wakeland, 1996; Mitchell, 1997) ร่วมกับตัวชดเชยเฟสล้าหน้าตามวิธีการของ Wang et al. (2006) จากนั้นนำวิธีการที่นำเสนอไปทดลองกับพลาเน็ตตัวอย่างในบทความของ Wang et al. (2006) และพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะ (benchmarking) อีก 6 พลาเน็ต ผลการทดลองปรากฏว่าสำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองในภาพรวมได้ดีกว่าวิธีการที่นำเสนอ แต่สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็น

ส่วนประกอบ วิธีการที่นำเสนอสามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกิน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในวิธีการของ Wang et al. (2006) ลงได้ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังให้ความไวในการตอบสนองได้ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) อีกด้วย

จากผลการออกแบบในบทที่ 3 พบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลงจนใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ แต่ก็ไม่สามารถบรรลุผลตามข้อกำหนดสมรรถนะได้เสมอไป ดังนั้นจึงได้พัฒนาตัวชดเชยเฟสล่าหลัง-ล่าหน้าต่อจากแนวทางของ Wang et al. (2006) เพื่อใช้แก้ปัญหาค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ขั้นตอนการดำเนินงานได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 จากนั้นจึงนำวิธีการที่นำเสนอไปทดลองกับพลาเน็ตในบทความของ Wang et al. (2006) และพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะอีก 6 พลาเน็ต ผลการทดลองปรากฏว่าสำหรับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ให้ผลการตอบสนองในภาพรวมได้ดีกว่า แต่สำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองได้ดีกว่า โดยสามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวให้เท่ากับค่าที่กำหนด ลดการพุ่งเกินลง และใช้เวลาในการเข้าที่ได้เร็วกว่าวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 นอกจากนี้ความไวในการตอบสนองก็ดีกว่าวิธีการของ Wang et al. (2006) และวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 อีกด้วย

เนื่องจากการออกแบบตามวิธีการที่นำเสนอ มีขั้นตอนที่ต้องพล็อตกราฟ หาจุดตัดของกราฟ ทำซ้ำเพื่อปรับแต่งค่า และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ทำให้ต้องใช้เวลาในการออกแบบนาน ดังนั้นเพื่อลดเวลาดังกล่าว เราจึงนำโปรแกรม MATLAB มาใช้เพื่อช่วยในการออกแบบ มีรายละเอียดการใช้งานอธิบายไว้ในบทที่ 5 โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ พร้อมทั้งรายละเอียดของตัวชดเชย จากนั้นจึงนำโปรแกรมดังกล่าวไปทดสอบกับพลาเน็ตในบทความของ Wang et al. (2006) และพลาเน็ตที่ใช้เพื่อเทียบสมรรถนะ (benchmarking) อีก 6 พลาเน็ต

จากการทดลองออกแบบตัวชดเชยในบทที่ 2, 3 และ 4 จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่แล้วเรากำหนดให้ส่วนเพื่ออัตราขยายเท่ากับ 8 เดซิเบล และส่วนเฟสเท่ากับ 50 องศา แต่ในทางปฏิบัติเราอาจต้องการกำหนดค่าที่แตกต่างออกไป บางครั้งเมื่อเราทดลองกำหนดค่าที่ต้องการลงไปแล้วปรากฏว่าไม่มีจุดตัดของกราฟ เราจึงต้องทำการกำหนดค่าใหม่แล้วทดลองออกแบบเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าที่มีจุดตัดของกราฟ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ทำให้ต้องใช้เวลาในการออกแบบนาน ด้วยเหตุนี้เราจึงได้ออกแบบกราฟสำหรับแสดงขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่สามารถใช้งานได้สำหรับวิธีการแต่ละวิธี ซึ่งทำให้เราสามารถเลือกส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการได้โดยง่าย และไม่ต้องเสียเวลาในการทดลองหาค่าอีกต่อไป รายละเอียดการใช้งานอธิบายไว้ในบทที่ 6

เพื่อทดสอบประสิทธิผลของวิธีการที่นำเสนอกับระบบที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เราจึงได้นำพลาเน็ตทางอุตสาหกรรมมาทดสอบ ซึ่งในที่นี้ได้้นำพลาเน็ตเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Rahimian and Raahemifar, 2011) มาทดสอบ โดยในขั้นตอนแรกเราทำการตรวจสอบขอบเขตเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่สามารถออกแบบได้ก่อน จากนั้นจึงใช้วิธีการทั้งสามวิธีออกแบบตัวชดเชยโดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบ รายละเอียดการทดสอบแสดงไว้ในบทที่ 7

ผลจากการศึกษาวิจัยพบว่าวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้ำหน้าของ Wang et al. (2006) สามารถใช้ได้ผลดีกับระบบที่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ส่วนระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ วิธีการของ Wang et al. (2006) ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกินสูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการออกแบบตัวชดเชยที่สามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกินสำหรับระบบที่ไม่มีอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ โดยมีแนวทางการออกแบบสองแนวทาง แนวทางแรกที่นำเสนอไปในบทที่ 3 เป็นการใชตัวชดเชยเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้า ซึ่งสามารถลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลงได้ แต่ยังไม่เท่ากับค่าที่กำหนดไว้ จึงได้พัฒนาต่อไปยังแนวทางที่สองที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ซึ่งหลีกเลี่ยงการปรับอัตราขยายของระบบโดยตรง โดยใช้ตัวชดเชยเฟสล้ำหลังทำหน้าที่เปลี่ยนตำแหน่งความถี่ตัดขนาดแทน ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ และมีผลตอบสนองในภาพรวมได้ดีกว่าวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 นอกจากนี้ยังได้นำเสนอโปรแกรมสำหรับช่วยในการออกแบบ ซึ่งจะแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟและรายละเอียดของตัวชดเชย รวมทั้งได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับแสดงขอบเขตของเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่สามารถออกแบบได้ ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการทดลองซ้ำอีกต่อไป

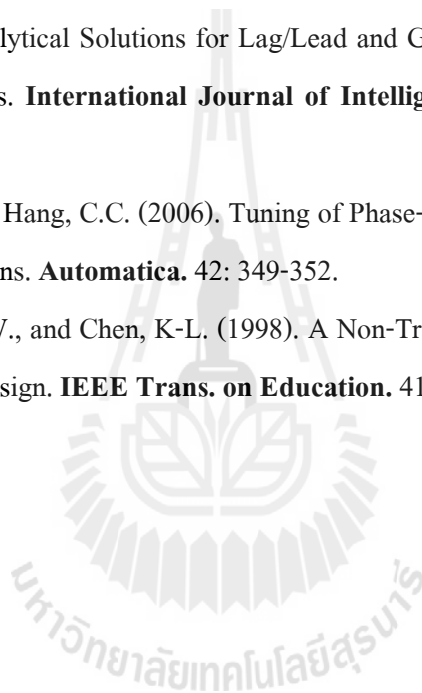
8.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการนำวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานจริง หากเราต้องการปรับแต่งสมรรถนะในโดเมนเวลาในด้านอื่น ๆ ตามที่ต้องการ เช่น เวลาขาขึ้น หรือเวลาเข้าที่ เราอาจทำได้โดยการปรับระยะห่างระหว่างซีโรของตัวชดเชยเฟสล้ำหลังกับความถี่ตัดขนาดซึ่งก็คือการปรับค่า n หรือเราสามารถปรับเปลี่ยนแบนด์วิดท์ของระบบเพื่อให้ได้เวลาขาขึ้นหรือเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการ

รายการอ้างอิง

- ศราวุฒิ สุจิตจร (2546), การควบคุมอัตโนมัติ. เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า, บจก.: 235-327.
- ศราวุฒิ สุจิตจร (2552). วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอในระนาบ-เอสและการอนุวัต. รายงานวิจัย (รหัสโครงการวิจัย SUT7-711-52-12-56) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 1-75.
- Astrom, K.J., and Hagglund, T. (2000). Benchmark Systems for PID Control. **IFAC Digital Control : Past, Present and Future of PID Control.**: 165-166.
- Chapra, S.C., and Canale, R.P. (2006). Numerical Methods for Engineers. **McGraw-Hill International Edition.**: 5-8.
- Dorf, R.C., Jung, S., Dawes, J., and Ng, L. (1995). A s-Plane Analytic Technique for Lead-Lag Controller Design. **Proc. of the American Control Conf. Seattle, Washington.**: 2227-2228.
- Hang, C.C., Wang, Q-G., and Ye, Z. (2005). Tuning of Lead Compensators with Gain and Phase Margin Specifications. **Proc. of the 16th IFAC World Congress.**: 456-456.
- James, G. (2004). Advanced Modern Engineering Mathematics. **Pearson Education Limited.**: 178-182.
- Li, L., and Wu, Z., (2009). The Analytical Solution of the Lag-Lead Compensator. **Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, China.**: 1-5.
- Mitchell, J.R. (1977). Comments on Bode Compensator Design. **IEEE Trans. on Automatic control.** 22: 771-773.
- Rahimian, M., and Raahemifar, K. (2011). Optimal PID controller design for AVR system using particle swarm optimization algorithm. **IEEE CCECE.**: 000337-000340.
- Ogata, K. (2002). Modern Control Engineering, fourth edition. **Pearson Education International.**: 618-678.
- Panagopoulos, H., Astrom K.J., and Hagglund, T. (2002). Design of PID Controllers Based on Constrained Optimization. **IEEE Proc.-Control Theory Appl.** 149(1): 32-40.
- Puangdownreong, D., and Sujitjorn, S. (2007). Obtaining an Optimum PID Controller Via Adaptive Tabu Search. **Lecture Notes in Computer Science, 8th Int. Conf. Adaptive and Natural Computing Algorithms (ICANNGA 2007) – Part II.**: 4432.

- Wakeland, W.R. (1976). Bode Compensator Design. **IEEE Trans. on Automatic Control**. 21: 771-773.
- Wang, D-J. (2009). Synthesis of Phase-Lead/Lag Compensators with Complete Information on Gain and Phase Margins. **Automatica**. 45: 1026-1031.
- Wang, F-Y. (2003). The Exact and Unique Solution for Phase-Lead and Phase-Lag Compensation. **IEEE Trans. on Education**. 46(2): 258-262.
- Wang, F-Y. (2006). A New Non-Trial-and-Error Method for Lag-Lead Compensator Design: A Special Case. **International Journal of Intelligent Control and Systems**. 11(1): 69-76.
- Wang, F-Y. (2008). Analytical Solutions for Lag/Lead and General Second Order Compensator Design Problems. **International Journal of Intelligent Control and Systems**. 13(4): 233-236.
- Wang, Q-G., Ye, Z., and Hang, C.C. (2006). Tuning of Phase-Lead Compensators for Exact Gain and Phase Margins. **Automatica**. 42: 349-352.
- Yeung, K.S., Wong, K.W., and Chen, K-L. (1998). A Non-Trial-and-Error Method for Lag-Lead Compensator Design. **IEEE Trans. on Education**. 41(1): 76-80.





ภาคผนวก ก

โปรแกรมช่วยในการออกแบบ

โปรแกรมช่วยในการออกแบบ

เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบ เราจึงนำโปรแกรม MATLAB มาช่วยในการออกแบบ โดยตัวโปรแกรมจะเขียนใน M-file script ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

```
%-----  
%Part 1 : Input desired data.  
%-----  
%***Input gain to achieve steady state error.***  
K=99;  
%***Input open loop transfer function of plant with gain K.***  
s=tf('s'); Gp=K*exp(-s)/((10*s+1)^2);  
%***Input desired Gain Margin (GM) in dB.***  
db=8;  
%***Input desired Phase Margin (PM) in degree.***  
phim=50;  
%***Input end time of time domain graph.(unit : second)***  
endtime=60;  
%***Input new gain crossover frequency parameter.(not need)***  
L=1;  
%-----  
%Part 2 : Wang method.(Lead compensator)  
%-----  
%Prepare data for calculation.  
Am=10^(db/20); ejphim=exp(j*phim*pi/180);  
%Keep GM and PM data of system before compensation.  
[gm,pm,wg,wp]=margin(Gp/K); clc; wg=L*wg;  
%Assign variable frequency range for phase crossover frequency.  
ws=wg; we=10*wg;  
%Initial condition.  
abs2=0.1; n=1;  
%Loop for calculation of Wang method.  
for w=ws:0.001:we  
    s=j*w; Gjw=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)/K;  
    s=j*wg; Gjwg=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)/K;  
    f1(n)=(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg))./...  
    (w.*imag(-1./(Am*Gjw))-wg*imag(-ejphim/Gjwg));  
    f2(n)=((1/wg)*imag(-ejphim/Gjwg)-(1./w).*imag(-1./(Am*Gjw)))./...  
    (real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg));  
    w_graph(n)=w;  
    aT_con(n)=real(-ejphim/Gjwg)/(wg*imag(-ejphim/Gjwg));  
    %Check intersection point.  
    abs1=abs(f1(n)-f2(n));  
    if (abs1<abs2)&&(f1(n)<aT_con(n))&&(f1(n)>0)  
        aT_w=f1(n); w1=w_graph(n); abs2=abs1;  
    end  
    n=n+1;  
end  
%Not achieve Wang method.(Wa_error=1)  
if abs2>=0.1  
    Wa_error=1;  
%Plot graph to show intersection point.  
plot(w_graph,f1,'k-',w_graph,f2,'k-.',w_graph,aT_con,'k--');
```

```

axis([ws we -1 aT_con(1)+1]); xlabel('\omega'); ylabel('\alphaT');
legend('f_1(\omega)', 'f_2(\omega)', 'boundary'); grid on;
else
%Achieve Wang method. (Wa_error=0)
Wa_error=0;
%Plot graph to show intersection point.
plot(w_graph, f1, 'k-', w_graph, f2, 'k-', w_graph, aT_con, 'k--');
axis([0.8 0.92 0.8 2.2]); xlabel('\omega'); ylabel('\alphaT');
legend('f_1(\omega)', 'f_2(\omega)', 'boundary'); grid on;
%Calculate parameters.
Kc_w=real(-ejphim/Gjwg)-wg*aT_w*imag(-ejphim/Gjwg);
T_w=(imag(-ejphim/Gjwg)+wg*aT_w*real(-ejphim/Gjwg))/(Kc_w*wg);
aT_con_w=aT_con(1);
%Wang compensator.
s=tf('s'); K_wang=Kc_w*(T_w*s+1)/(aT_w*s+1);
end
%Check GM and PM after compensation.
if Wa_error==0
[gm_w, pm_w, wg_w, wp_w]=margin(K_wang*Gp/K);
if (gm_w>Am+0.1) || (gm_w<Am-0.1) || (pm_w>phim+1) || (pm_w<phim-1)
Wa_error=1;
end
end
end
%-----
%Part 3 : Proposed algebraic method. (Lag-Lead compensator)
%-----
%Step 1 : Design Lag with algebraic method. (set PM to 30%)
[gm_ll, pm_ll, wg_ll, wp_ll]=margin(Gp); clc; pm_lag=(phim-pm_ll)*0.3;
%Initial condition.
w_lag=0; phase=0;
%Loop for check gain cut off frequency of phase lag.
while (phase>(-180+pm_ll+pm_lag+5)) && (w_lag<we)
[mag, phase]=bode(Gp, w_lag);
w_lag=w_lag+0.01;
end
%Not achieve gain cut off frequency of phase lag. (wlag_error=1)
if w_lag>=we
wlag_error=1;
%Achieve gain cut off frequency of phase lag. (wlag_error=0)
else
wlag_error=0;
%Algebraic calculation for phase lag.
phi=-5; q=tand(phi); m=-20*log10(mag); r=10^(0.1*m);
A=q^2-r+1; B=2*q^2*r; C=(q*r)^2+r^2-r; al=roots([A B C]);
T_lag=(1/w_lag)*sqrt((1-r)/(r-al(2)^2));
%Lag compensator.
lag=al(2)*(s+1/(al(2)*T_lag))/(s+1/T_lag);
%Step 2 : Design Lead with Wang method.
abs2=0.1; n=1;
%Loop for calculation phase lead of Wang method.
for w=ws:0.001:we
s=j*w; Gjw=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)*...
al(2)*(s+1/(al(2)*T_lag))/(s+1/T_lag);
s=j*wg; Gjwg=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)*...
al(2)*(s+1/(al(2)*T_lag))/(s+1/T_lag);
f1(n)=(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg))./...
(w.*imag(-1./(Am*Gjw))-wg*imag(-ejphim/Gjwg));
f2(n)=((1/wg)*imag(-ejphim/Gjwg)-(1./w).*imag(-1./(Am*Gjw)))./...
(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg));

```

```

w_graph(n)=w;
aT_con(n)=real(-ejphim/Gjwg)/(wg*imag(-ejphim/Gjwg));
%Check intersection point.
abs1=abs(f1(n)-f2(n));
if (abs1<abs2)&&(f1(n)<aT_con(n))&&(f1(n)>0)
    aT_LL=f1(n); w1=w_graph(n); abs2=abs1;
end
n=n+1;
end
%Not achieve phase lead.(LL_error=1)
if abs2>=0.1
LL_error=1;
else
%Achieve phase lead.(LL_error=0)
LL_error=0;
%Calculate parameters.
Kc_LL=real(-ejphim/Gjwg)-wg*aT_LL*imag(-ejphim/Gjwg);
T_LL=(imag(-ejphim/Gjwg)+wg*aT_LL*real(-ejphim/Gjwg))/(Kc_LL*wg);
%Lead compensator.
s=tf('s'); lead=Kc_LL*(T_LL*s+1)/(aT_LL*s+1);
end
%Check GM and PM after compensation.
if LL_error==0
[gm_ll,pm_ll,wg_ll,wp_ll]=margin(lag*lead*Gp);
if (gm_ll>Am+0.1)|| (gm_ll<Am-0.1)|| (pm_ll>phim+1)|| (pm_ll<phim-1)
LL_error=1;
end
end
end
%-----
%Part 4 : Proposed Ess control method. (Lag-Lead compensator)
%-----
%Initial condition.
Kc1=1; Kc2=2; m=1; Es2=0; max_round=30;
%Loop for check steady state error.
while (abs(Kc2-1)>0.001)&&(m<max_round)&&(Es2==0)
%Initial condition.
abs2=0.1; n=1;
for w=ws:0.001:we
    s=j*w; Gjw=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)*...
        Kc1*(s+wg/5)/(s+Kc1*wg/5);
    s=j*wg; Gjwg=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)*...
        Kc1*(s+wg/5)/(s+Kc1*wg/5);
    f1(n)=(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg))./...
        (w.*imag(-1./(Am*Gjw))-wg*imag(-ejphim/Gjwg));
    f2(n)=((1/wg)*imag(-ejphim/Gjwg)-(1./w).*imag(-1./(Am*Gjw)))./...
        (real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg));
    w_graph(n)=w;
    aT_con(n)=real(-ejphim/Gjwg)/(wg*imag(-ejphim/Gjwg));
    %Check intersection point.
    abs1=abs(f1(n)-f2(n));
    if (abs1<abs2)&&(f1(n)<aT_con(n))&&(f1(n)>0)
        aT=f1(n); w1=w_graph(n); abs2=abs1;
    end
    n=n+1;
end
end
%No intersection point.
if abs2>=0.1
Es2=1;

```

```

else
%Achieve intersection point.
Es2=0;
%Calculate dc gain of compensator.
Kc2=real(-ejphim/Gjwg)-wg*aT*imag(-ejphim/Gjwg);
%Tuning phase lag parameter.
Kc1=Kc1*Kc2;
%Keep data for report.
Kc1b(m)=Kc1; Kc2b(m)=Kc2; aTb(m)=aT;
end
m=m+1;
end
%Loop reach maximum limit.
if m>=max_round
Es1=1;
else
%Loop not reach maximum limit.
Es1=0;
end
%Achieve intersection point and not reach maximum limit.
if (Es1==0)&&(Es2==0)
%Calculate compensator parameter.
T=(imag(-ejphim/Gjwg)+wg*aT*real(-ejphim/Gjwg))/(Kc2*wg);
%Ess compensator.
s=tf('s');
lag_e=Kc1*(s+wg/5)/(s+Kc1*wg/5); lead_e=Kc2*(T*s+1)/(aT*s+1);
end
%Check GM and PM after compensation.
if (Es1==0)&&(Es2==0)
[gm_e,pm_e,wg_e,wp_e]=margin(lag_e*lead_e*Gp);
if (gm_e>Am+0.1)|| (gm_e<Am-0.1)|| (pm_e>phim+1)|| (pm_e<phim-1)
Es1=1; Es2=1;
end
end
%-----
%Part 5 : Plot graphs.
%-----
%Wang method is available.
if Wa_error==0
figure(2); margin(Gp); hold on; margin(K_wang*Gp/K);
grid on; legend('Uncompensated','Wang method');
[gm2,pm2,wg2,wp2]=margin(K_wang*Gp/K);
end
%Lag-Lead method available. (Algebra)
if (wlag_error==0)&&(LL_error==0)
figure(3); margin(Gp); hold on; margin(lag*lead*Gp);
grid on; legend('Uncompensated','Algebraic method');
[gm3,pm3,wg3,wp3]=margin(lag*lead*Gp);
end
%Lag-Lead method available. (Control steady state error)
if (Es1==0)&&(Es2==0)
figure(4); margin(Gp); hold on; margin(lag_e*lead_e*Gp);
grid on; legend('Uncompensated','Ess method');
[gm4,pm4,wg4,wp4]=margin(lag_e*lead_e*Gp);
end
%Time domain.
if (Wa_error==0)||((wlag_error==0)&&(LL_error==0))||...
((Es1==0)&&(Es2==0))
figure(5); step(ss(Gp/K),'k-.'); hold on; axis([0 endtime 0 1.5]);

```

```

end
%Wang method is available.
if (Wa_error==0)
figure(5); step(feedback(ss(K_wang*Gp/K),1),'k:');
end
%Lag-Lead method available. (Algebra)
if (wlag_error==0)&&(LL_error==0)
figure(5); step(feedback(ss(lag*lead*Gp),1),'k--');
end
%Lag-Lead method available. (Control steady state error)
if (Es1==0)&&(Es2==0)
figure(5); step(feedback(ss(lag_e*lead_e*Gp),1),'k-');
end
%Show legend.
if (Wa_error==0)&&((wlag_error==0)&&(LL_error==0))&&...
((Es1==0)&&(Es2==0))
legend('Uncompensated','Wang method','Algebraic method','Ess
method');
elseif (Wa_error==0)&&((wlag_error==0)&&(LL_error==0))
legend('Uncompensated','Wang method','Algebraic method');
elseif (Wa_error==0)&&((Es1==0)&&(Es2==0))
legend('Uncompensated','Wang method','Ess method');
elseif (Wa_error==0)
legend('Uncompensated','Wang method');
elseif ((wlag_error==0)&&(LL_error==0))&&((Es1==0)&&(Es2==0))
legend('Uncompensated','Algebraic method','Ess method');
elseif ((wlag_error==0)&&(LL_error==0))
legend('Uncompensated','Algebraic method');
elseif ((Es1==0)&&(Es2==0))
legend('Uncompensated','Ess method');
end
%-----
%Part 6 : Show transfer function of compensators on Command Window.
%-----
clc;
%Display uncompensated plant.
disp('*****')
disp(' ');
disp('Uncompensated Plant');
Gp/K
fprintf('Gain margin =%6.1f dB. (at %.2f
rad/s)\n',20*log10(gm),wg);
fprintf('Phase margin =%6.1f degree. (at %.2f rad/s)\n',pm,wp);
disp(' ');
%Display compensator of Wang method.
if Wa_error==1
disp('*****')
disp('Wang method : Not available. ');
disp('*****')
else
disp('*****')
disp(' ');
disp('Wang method. (Lead compensator) ');
K_wang
fprintf('Gain margin =%6.1f dB. (at %.2f
rad/s)\n',20*log10(gm2),wg2);
fprintf('Phase margin =%6.1f degree. (at %.2f rad/s)\n',pm2,wp2);
fprintf(' (Wg = %.2f,AlphaT = %.2f,Kc = %.2f,T = %.2f,Boundary =
%.2f)\n',wg,aT_w,Kc_w,T_w,aT_con_w);

```

```

disp(' ');
end
%Display compensator of Lag-Lead method.(Algebraic)
if (wlag_error==1)||(LL_error==1)
disp('*****')
disp('Algebraic method : Not available.');
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

disp('*****')
else
disp('*****')
disp(' ');
disp('Algebraic method.(Lag-Lead compensator)');
disp(' ');
disp('Lag ='); lag
disp('Lead ='); lead
fprintf('Gain margin =%6.1f dB. (at %0.2f rad/s)\n',...
20*log10(gm3),wg3);
fprintf('Phase margin =%6.1f degree. (at %0.2f rad/s)\n',pm3,wp3);
fprintf('(Lag : W0dBnew = %0.3f,Alpha = %0.2f,Ta = %0.3f)\n'...
,w_lag,al(2),T_lag);
fprintf('(Lead : Wg = %0.2f,AlphaT = %0.2f,Kc = %0.2f,T = %0.2f)\n'...
,wg,aT_LL,Kc_LL,T_LL);
disp(' ');
end
%Display compensator of Lag-Lead method.(Steady state error)
if (Es1==1)||(Es2==1)
disp('*****')
disp('Ess method : Not available.');
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

disp('*****')
else
disp('*****')
disp(' ');
disp('Control steady state error method.(Lag-Lead compensator)');
disp(' ');
disp('Lag ='); lag_e
disp('Lead ='); lead_e
fprintf('Gain margin =%6.1f dB. (at %0.2f rad/s)\n',...
20*log10(gm4),wg4);
fprintf('Phase margin =%6.1f degree. (at %0.2f rad/s)\n',pm4,wp4);
fprintf('(Wg = %0.2f,AlphaT = %0.2f,K_lag = %0.2f,T = %0.2f)\n',...
wg,aT,Kc1,T);
disp(' ');
end
%-----
%Part 7 : Show calculation details of compensators on Command Window.
%-----
if (Wa_error==0)
disp(' Summary');
disp('-----')
disp(' Method Gain margin Phase margin Wp Wg');
disp('-----')
fprintf('Uncompensated %6.1f %6.1f %6.2f
%6.2f\n',20*log10(gm),pm,wg,wp);
fprintf('Wang %6.1f %6.1f %6.2f
%6.2f\n',20*log10(gm2),pm2,wg2,wp2);
fprintf('Algebra %6.1f %6.1f %6.2f
%6.2f\n',20*log10(gm3),pm3,wg3,wp3);
fprintf('Ess control %6.1f %6.1f %6.2f
%6.2f\n',20*log10(gm4),pm4,wg4,wp4);
```



ภาคผนวก ข

โปรแกรมขอบเขต

โปรแกรมขอบเขตสำหรับวิธีการของ Wang et al. (2006)

เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นบน M-file script ของ MATLAB ใช้ในการพล็อตกราฟเพื่อแสดงค่าขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่สามารถออกแบบได้สำหรับวิธีการของ Wang et al. (2006)

```
%-----  
%Part 1 : Input data.  
%-----  
%***Input gain to achieve steady state error.***  
K=99;  
%***Input transfer function of plant with gain K.***  
s=tf('s'); Gp=K*exp(-s)/((10*s+1)^2);  
%***Input boundary of gain margin.(dB)***  
gm_start=1; gm_re=1; gm_end=14;  
%***Input boundary of phase margin.(degree)***  
pm_start=5; pm_re=5; pm_end=90;  
%-----  
  
%-----  
%Part 2 : Calculation.  
%-----  
%Tunning parameter.  
L=1;  
%Keep data of GM,PM for calculation.  
[gm,pm,wg,wp]=margin(Gp/K); wg=L*wg;  
%Assign frequency range.  
ws=wg; we=10*wg;  
%Initial loop run number.  
p=0;  
%Loop for run Gain Margin and Phase Margin.  
for db=gm_start:gm_re:gm_end  
for phim=pm_start:pm_re:pm_end  
%Prepare data for calculation.  
Am=10^(db/20); ejphim=exp(j*phim*pi/180); s=tf('s');  
%Initial condition.  
abs2=0.1; n=1;  
%Loop for calculation of Wang method.  
for w=ws:0.001:we  
s=j*w; Gjw=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)/K;  
s=j*wg; Gjwg=K*exp(-s)/((10*s+1)^2)/K;  
f1(n)=(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg))./...  
(w.*imag(-1./(Am*Gjw))-wg*imag(-ejphim/Gjwg));  
f2(n)=((1/wg)*imag(-ejphim/Gjwg)-(1./w).*imag(-1./(Am*Gjw)))./...  
(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg));  
w_graph(n)=w; aT_con(n)=real(-ejphim/Gjwg)/(wg*imag(-  
ejphim/Gjwg));  
%Check intersection point.  
abs1=abs(f1(n)-f2(n));  
if (abs1<abs2)&&(f1(n)<aT_con(n))&&(f1(n)>0)  
aT_w=f1(n); w1=w_graph(n); abs2=abs1;
```



```

        end
        n=n+1;
    end
    %Not achieve Wang method. (Wa_error=1)
    if abs2>=0.1
        Wa_error=1;
    else
        Wa_error=0;
        Kc_w=real(-ejphim/Gjwg)-wg*aT_w*imag(-ejphim/Gjwg);
        T_w=(imag(-ejphim/Gjwg)+wg*aT_w*real(-ejphim/Gjwg))/(Kc_w*wg);
        %Wang compensator.
        s=tf('s'); K_wang=Kc_w*(T_w*s+1)/(aT_w*s+1);
    end
    if Wa_error==0
        [gm_w,pm_w,wg_w,wp_w]=margin(K_wang*Gp/K);
        if (gm_w>Am+0.1)|| (gm_w<Am-0.1)|| (pm_w>phim+1)|| (pm_w<phim-1)
            Wa_error=1;
        end
    end
    %Record data if effective.
    if Wa_error==0
        p=p+1; db_range(p)=db; pm_range(p)=phim;
    end
end
end
end
%-----

%-----

%Part 3 : Plot graph.
%-----

if p==0
    clc;
    %Display when cannot design with Wang method.
    disp('-----');
    disp('No have effective exact GM and PM. ');
    disp('-----');
else
    %Plot boundary graph.
    plot(pm_range,db_range,'k*'); grid on; axis([0 100 0 20]);
    Title('Boundary of GM and PM for Wang method');
    xlabel('Phase Margin (degree)'); ylabel('Gain Margin (dB)');
    clc;
end
%-----

```

โปรแกรมขอบเขตสำหรับวิธีเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้าที่น่าสนใจในบทที่ 3

เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นบน M-file script ของ MATLAB ใช้ในการพล็อตกราฟเพื่อแสดงค่าขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่สามารถออกแบบได้ สำหรับวิธีการเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้าด้วยวิธีการของ Wakeland (1976); Mitchell (1977) ร่วมกับ Wang et al. (2006)

```

%-----
%Part 1 : Input data.
%-----
%***Input gain to achieve steady state error.***
K=99;
%***Input transfer function of plant with gain K.***
s=tf('s'); Gp=K*exp(-s)/(10*s+1)^2;
%***Input boundry of gain margin.(dB)***
gm_start=0; gm_re=1; gm_end=16;
%***Input boundry of phase margin.(degree)***
pm_start=0; pm_re=5; pm_end=90;
%-----
%Part 2 : Calculation.
%-----
%Tunning parameter.
L=1;
%Keep data of GM,PM for calculation.
[gm,pm,wg,wp]=margin(Gp/K); wg=L*wg;
%Assign frequency range.
ws=wg; we=10*wg;
%Initial loop run number.
p=0;
%Loop for run Gain Margin and Phase Margin.
for db=gm_start:gm_re:gm_end
for phim=pm_start:pm_re:pm_end
%Prepare data for calculation.
Am=10^(db/20); ejphim=exp(j*phim*pi/180); s=tf('s');
%***Input desired phase from phase lag.***
pm_lag=phim*0.5;
 %[gm_ll,pm_ll,wg_ll,wp_ll]=margin(Gp); pm_lag=(phim-pm_ll)*0.5;
%Initial condition.
w_lag=0; phase=0;
%Loop for check gain cut off frequency of phase lag.
%while (phase>(-180+pm_ll+pm_lag+5))&&(w_lag<we)
while (phase>(-180+pm_lag+5))&&(w_lag<we)
[mag,phase]=bode(Gp,w_lag);
w_lag=w_lag+0.01;
end
%Not achieve gain cut off frequency of phase lag.(wlag_error=1)
if w_lag>=we
wlag_error=1;
%Achieve gain cut off frequency of phase lag.(wlag_error=0)
else
wlag_error=0;
%Algebraic calculation for phase lag.
phi=-5; q=tand(phi); m=-20*log10(mag); r=10^(0.1*m);
A=q^2-r+1; B=2*q^2*r; C=(q*r)^2+r^2-r; al=roots([A B C]);
T_lag=(1/w_lag)*sqrt((1-r)/(r-al(2)^2));
%Lag compensator.

```

```

lag=al(2)*(s+1/(al(2)*T_lag))/(s+1/T_lag);
%Step 2 : Design lead with Wang method.
%Initial condition.
abs2=0.1; n=1;
%Loop for calculation phase lead of Wang method.
for w=ws:0.001:we
    s=j*w; Gjw=K*exp(-s)/(10*s+1)^2*...
    al(2)*(s+1/(al(2)*T_lag))/(s+1/T_lag);
    s=j*wg; Gjwg=K*exp(-s)/(10*s+1)^2*...
    al(2)*(s+1/(al(2)*T_lag))/(s+1/T_lag);
    f1(n)=(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg))./...
    (w.*imag(-1./(Am*Gjw))-wg*imag(-ejphim/Gjwg));
    f2(n)=((1/wg)*imag(-ejphim/Gjwg)-(1./w).*imag(-1./(Am*Gjw)))./...
    (real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg));
    w_graph(n)=w;
    aT_con(n)=real(-ejphim/Gjwg)/(wg*imag(-ejphim/Gjwg));
    %Check intersection point.
    abs1=abs(f1(n)-f2(n));
    if (abs1<abs2)&&(f1(n)<aT_con(n))&&(f1(n)>0)
        aT_LL=f1(n); w1=w_graph(n); abs2=abs1;
    end
    n=n+1;
end
%Not achieve phase lead.(LL_error=1)
if abs2>=0.1
    LL_error=1;
else
    %Achieve phase lead.(LL_error=0)
    LL_error=0;
    Kc_LL=real(-ejphim/Gjwg)-wg*aT_LL*imag(-ejphim/Gjwg);
    T_LL=(imag(-ejphim/Gjwg)+wg*aT_LL*real(-ejphim/Gjwg))/(Kc_LL*wg);
    %Lead compensator.
    s=tf('s'); lead=Kc_LL*(T_LL*s+1)/(aT_LL*s+1);
    [gm_ll,pm_ll,wp_ll,wp_ll]=margin(lag*lead*Gp);
    if (gm_ll>Am+0.1)|| (gm_ll<Am-0.1)|| (pm_ll>phim+1)|| (pm_ll<phim-1)
        LL_error=1;
    end
end
end
%Record data if effective.
if LL_error==0
    p=p+1; db_range(p)=db; pm_range(p)=phim;
end
end
end
end
%-----
%Part 3 : Plot graph.
%-----
if p==0
    clc;
    %Display when cannot design with Wang method.
    disp('-----');
    disp('No have effective exact GM and PM. ');
    disp('-----');
    else
        plot(pm_range,db_range,'k*'); grid on; axis([0 100 0 20]);
        Title('Boundary of GM and PM for Lag-Lead method (Algebraic)');
        xlabel('Phase Margin (degree)'); ylabel('Gain Margin (dB)'); clc;
    end
end

```

โปรแกรมขอบเขตสำหรับวิธีเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้าแบบจำกัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

เป็น โปรแกรมที่เขียนขึ้นบน M-file script ของ MATLAB ใช้ในการพล็อตกราฟเพื่อแสดงค่าขอบเขตของส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่สามารถออกแบบได้ สำหรับวิธีเฟสล้ำหลัง-ล้ำหน้าแบบจำกัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

```

%-----
%Part 1 : Input data.
%-----
%***Input gain to achieve steady state error.***
K=99;
%***Input transfer function of plant with gain K.***
s=tf('s'); Gp=K*exp(-s)/(10*s+1)^2;
%***Input boundry of gain margin.(dB)***
gm_start=0; gm_re=1; gm_end=16;
%***Input boundry of phase margin.(degree)***
pm_start=0; pm_re=5; pm_end=90;
%-----
%Part 2 : Calculation.
%-----
%Tunning parameter.
L=1;
%Keep data of GM,PM for calculation.
[gm,pm,wg,wp]=margin(Gp/K); wg=L*wg;
%Assign frequency range.
ws=wg; we=10*wg;
%Initial loop run number.
p=0;
%Loop for run Gain Margin and Phase Margin.
for db=gm_start:gm_re:gm_end
for phim=pm_start:pm_re:pm_end
%Prepare data for calculation.
Am=10^(db/20); ejphim=exp(j*phim*pi/180); s=tf('s');
%Initial condition.
Kc1=1; Kc2=2; Es2=0; m=1; max_round=30;
%Loop for check steady state error.
while (abs(Kc2-1)>0.0001)&&(m<max_round)&&(Es2==0)
%Initial condition.
abs2=0.1; n=1;
for w=ws:0.001:we
s=j*w; Gjw=K*exp(-s)/(10*s+1)^2*...
Kc1*(s+wg/5)/(s+Kc1*wg/5);
s=j*w; Gjwg=K*exp(-s)/(10*s+1)^2*...
Kc1*(s+wg/5)/(s+Kc1*wg/5);
f1(n)=(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg))./...
(w.*imag(-1./(Am*Gjw))-wg*imag(-ejphim/Gjwg));
f2(n)=((1/wg)*imag(-ejphim/Gjwg)-(1./w).*imag(-1./(Am*Gjw)))./...
(real(-1./(Am*Gjw))-real(-ejphim/Gjwg));
w_graph(n)=w;
aT_con(n)=real(-ejphim/Gjwg)/(wg*imag(-ejphim/Gjwg));
%Check intersection point.
abs1=abs(f1(n)-f2(n));

if (abs1<abs2)&&(f1(n)<aT_con(n))&&(f1(n)>0)
aT=f1(n); w1=w_graph(n); abs2=abs1;

```

```

        end
        n=n+1;
    end
    %No intersection point.
    if abs2>=0.1
        Es2=1;
        %Achieve intersection point.
    else
        Es2=0;
        Kc2=real(-ejphim/Gjwg)-wg*aT*imag(-ejphim/Gjwg);
        Kc1=Kc1*Kc2;
    end
    m=m+1;
    end
    %Loop reach maximum limit.
    if m>=max_round
        Es1=1;
    else
        %Loop not reach maximum limit.
        Es1=0;
    end
    %Achieve intersection point and not reach maximum limit.
    if (Es1==0)&&(Es2==0)
        T=(imag(-ejphim/Gjwg)+wg*aT*real(-ejphim/Gjwg))/(Kc2*wg);
        s=tf('s');
        lag_e=Kc1*(s+wg/5)/(s+Kc1*wg/5); lead_e=Kc2*(T*s+1)/(aT*s+1);
    end
    if (Es1==0)&&(Es2==0)
        [gm_e,pm_e,wg_e,wp_e]=margin(lag_e*lead_e*Gp);
        if (gm_e>Am+0.1)|| (gm_e<Am-0.1)|| (pm_e>phim+1)|| (pm_e<phim-1)
            Es1=1; Es2=1;
        end
    end
    %Record data if effective.
    if (Es1==0)&&(Es2==0)
        p=p+1; db_range(p)=db; pm_range(p)=phim;
    end
    end
    end
    end
    %-----
    %Part 3 : Plot graph.
    %-----
    if p==0
        clc;
        %Display when cannot design with Wang method.
        disp('-----');
        disp('No have effective exact GM and PM. ');
        disp('-----');
    else
        %Plot boundary graph.
        plot(pm_range,db_range,'k*'); grid on; axis([0 100 0 20]);
        Title('Boundary of GM and PM for Lag-Lead method (Steady state error) ');
        xlabel('Phase Margin (degree)'); ylabel('Gain Margin (dB)');
        clc;
    end
    %-----

```

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure standing on a base, with a large 'S' and 'R' integrated into the design. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular arc at the bottom of the logo.

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ณัฐพล มีเดช, จิระพล ศรีเสริฐผล และ สราวุฒิ สุจิตจร (2556). การออกแบบตัวชุดเซยเฟส ล้ำหลัง-ล้ำหน้าให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ. การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 (ECTI-CARD 2013)., หน้า 569-574.



การออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้ำหน้าให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยาย และส่วนเฟสอย่างแม่นยำ

| | | |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| ณัฐพล มีเดช | จิระพล ศรีเสริญผล | สราวุฒิ สุจิตจร |
| สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล | สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน |
| สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ | สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ | กระทรวงวิทยาศาสตร์และ |
| มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี | เทคโนโลยี |
| nuttapolm@haier.co.th | jiraphon@sut.ac.th | sarawut@sut.ac.th |

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้ำหน้า ที่ให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ รวมทั้งสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่กำหนดอีกด้วย โดยใช้หลักการหาผลเฉลยของสมการสี่ตัวแปร จำนวนให้มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการ ร่วมกับการปรับแต่งอัตราขยายดีซีของตัวชดเชยเพื่อให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวตามที่กำหนด

Abstract

In this paper, a design method for phase lag-lead compensators to achieve specific gain and phase margins is proposed. And it can control steady state error, too. Principle of this method are using four equations, four variables to find solution for accurate gain and phase margins and using d.c.gain tuning to satisfy the requirement on the given static error constant.

คำสำคัญ

ส่วนเพื่ออัตราขยาย, ส่วนเฟส, อัตราขยายดีซี, ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

1. บทนำ

ตัวชดเชยเฟส ใช้สำหรับระบบที่ต้องการเสถียรภาพเป็นหลัก เมื่อก่อนวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสมีขั้นตอนที่ต้องประมาณค่า เช่น บวกส่วนเฟสเพิ่ม 5 องศา เป็นต้น ทำให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสออกมาไม่แม่นยำนัก จึงทำให้ต้องมีการออกแบบซ้ำ เพื่อปรับส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสให้ได้ตามที่ต้องการ ต่อมามีการพัฒนาวิธีการออกแบบที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นโดยใช้การคำนวณเข้ามาช่วยในการออกแบบ ในปี ค.ศ.1976 Wakeland [1] ได้นำเสนอวิธีการ

ออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า และตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้ำหน้า ที่ใช้การแก้สมการพีชคณิตกำลังสองช่วยในการออกแบบ ในปีต่อมา Mitchell [2] ได้ให้ความเห็นว่าวิธีการของ Wakeland [1] สามารถใช้กับตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้าได้ด้วย ในปี ค.ศ.1995 Dorf [3] นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้ำหน้า ให้ได้สมรรถนะในโดเมนเวลาตามที่ต้องการ ในปี ค.ศ.1998 Yeung [4] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้ำหน้าที่ใช้วิธีการทางกราฟ ในปี ค.ศ.2003 Wang [5] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าและตัวชดเชยเฟสล่าช้าซึ่งคล้ายกับวิธีการของ Wakeland [1] แต่มีขั้นตอนที่ง่ายกว่า ปี ค.ศ.2005 Hang [6] นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าสำหรับระบบเซอร์โวที่มีอินทิเกรเตอร์หนึ่งตัว ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Wang [7] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า-ล้ำหน้า ซึ่งกำหนดส่วนเผื่อขนาดหรือส่วนเฟสอย่างใดอย่างหนึ่งได้อย่างแม่นยำ ในปีเดียวกันนี้ Wang [8] นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า เพื่อให้ได้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ ในปี ค.ศ.2008 Wang [9] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้า ตัวชดเชยเฟสล่าช้า และตัวชดเชยเฟสอันดับสอง ในปี ค.ศ. 2009 Wang [10] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล่าช้าและตัวชดเชยเฟสล่าช้าที่ให้ข้อมูลส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ครบถ้วน แต่ก็ยังคงเป็นวิธีการทางกราฟมากกว่าที่จะใช้การคำนวณอย่างแม่นยำ

2. ที่มาและแรงจูงใจของปัญหา

วิธีการออกแบบส่วนใหญ่สามารถให้เพียงส่วนเมื่ออัตราขยายหรือส่วนเมื่อเฟสแบบแม่นยำเพียงอย่างเดียวได้อาจหนึ่งเท่านั้น มีเพียงวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้าหน้าของ Wang [8] เพียงวิธีการเดียวที่สามารถออกแบบแล้วได้ทั้งส่วนเมื่ออัตราขยายและส่วนเมื่อเฟสอย่างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมีปัญหาในเรื่องค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว จึงทำให้ยังไม่มียุทธวิธีใด ๆ ที่จะสามารถออกแบบตัวชดเชยเฟสได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้เราจึงได้พัฒนาวิธีการออกแบบต่อจากแนวทางของ Wang [8] โดยใช้ตัวชดเชยแบบผสมเฟสล้าหลัง-ล้าหน้าออกแบบให้ได้ส่วนเมื่ออัตราขยายและส่วนเมื่อเฟสอย่างแม่นยำ รวมทั้งสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้อีกด้วย

3. งานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

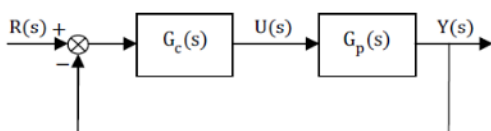
ปี ค.ศ.2006 Wang [8] นำเสนอวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้าหน้าให้ทั้งส่วนเมื่ออัตราขยายและส่วนเมื่อเฟสได้อย่างแม่นยำ โดยใช้วิธีการปรับอัตราขยายร่วมกับการใช้ตัวชดเชยเฟสล้าหน้าเพื่อปรับแผนภาพโพลให้มีความถี่ตัดขนาดและส่วนเมื่ออัตราขยายกับส่วนเมื่อเฟสตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีการปรับเปลี่ยนอัตราขยายของระบบ จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้

4. รายละเอียดการพัฒนา

พัฒนาวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้าหลัง-ล้าหน้าให้มีส่วนเมื่ออัตราขยายและส่วนเมื่อเฟสที่แม่นยำ รวมทั้งสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้อีกด้วย

4.1 ภาพรวมของระบบ

การออกแบบพิจารณาจากโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วย

โดยที่ $G_p(s)$ คือ พลานต์ของระบบที่ต้องการชดเชย

$G_c(s)$ คือ ตัวชดเชยเฟสล้าหลัง-ล้าหน้า

4.2 การออกแบบและพัฒนาระบบ

รูปแบบของตัวชดเชยเฟสล้าหลัง-ล้าหน้าแสดงดังสมการ (1)

$$G_c(s) = \left(K_{lag} \frac{s + \omega_g/n}{s + K_{lag} \omega_g/n} \right) \left(K_{lead} \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \right) \quad (1)$$

โดยที่ $0 < K_{lag} < 1, n > 1, K_{lead} > 0, 0 < \alpha < 1, T > 0$

วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือการทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดของระบบหลังการชดเชยซึ่งก็คือ $G_c G_p(s)$ มีส่วนเมื่ออัตราขยายและส่วนเมื่อเฟสตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (2) และ (3)

$$\left[K_{lag} \frac{j\omega_p + \omega_g/n}{j\omega_p + K_{lag} \omega_g/n} \right] \left[K_{lead} \frac{j\omega_p T + 1}{j\omega_p \alpha T + 1} \right] G(j\omega_p) = -\frac{1}{A_m} \quad (2)$$

$$\left[K_{lag} \frac{j\omega_g + \omega_g/n}{j\omega_g + K_{lag} \omega_g/n} \right] \left[K_{lead} \frac{j\omega_g T + 1}{j\omega_g \alpha T + 1} \right] G(j\omega_g) = -e^{j\phi_m} \quad (3)$$

โดยที่

K_{lag} คือ อัตราขยายของตัวชดเชยเฟสล้าหลัง ซึ่งในขั้นตอนนี้แรกจะกำหนดให้เป็น 1 เพื่อที่จะหาค่า K_{lead} ออกมาก่อน แล้วค่อยคำนวณหาค่า K_{lag} ในภายหลังจากสมการ (11)

K_{lead} คือ อัตราขยายของตัวชดเชยเฟสล้าหน้า เมื่อพิจารณาจากสมการ (1) จะเห็นได้ว่า K_{lead} เป็นตัวกำหนดอัตราขยายดีซีของตัวชดเชย ซึ่งจะส่งผลต่อค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (E_{ss}) ของระบบหลังการชดเชย ดังนั้นในขั้นตอนนี้สุดท้ายเราต้องปรับแต่งให้ K_{lead} เท่ากับ K_c (อัตราขยายที่ให้ E_{ss} ที่ต้องการ)

A_m คือ ส่วนเมื่ออัตราขยายที่ต้องการเท่ากับ $10^{(GM_{dB})/20}$ (ค่าจริงไม่แสดงหน่วย)

ϕ_m คือ ส่วนเมื่อเฟสที่ต้องการเท่ากับ $\frac{\pi}{180} (PM_{deg})$ เรเดียน

ω_p คือ ความถี่ตัดเฟสของระบบหลังชดเชย (เรเดียน/วินาที)

ω_g คือ ความถี่ตัดขนาดของระบบหลังขดเชย (เรเดีย/วินาที) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับความถี่ตัดเฟสของระบบก่อนการขดเชย [8]

n คือ แฟคเตอร์กำหนดระยะห่างระหว่างตัวขดเชยเฟสล้ำหลังกับตัวขดเชยเฟสล้ำหน้า โดยกำหนดให้เท่ากับ 5 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดโดยทั่วไปซึ่งทำให้การตอบสนองไม่ช้าจนเกินไป

จากสมการ (2) และ (3) เราสามารถแยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพได้สมการ 4 สมการดังแสดงในสมการ (4) ถึง (7)

$$K_{lead} = \text{Re}[f_1(\omega_p)] - \omega_p \alpha T \text{Im}[f_1(\omega_p)] \quad (4)$$

$$K_{lead} T = \alpha T \text{Re}[f_1(\omega_p)] + \frac{1}{\omega_p} \text{Im}[f_1(\omega_p)] \quad (5)$$

$$K_{lead} = \text{Re}[f_2(\omega_g)] - \omega_g \alpha T \text{Im}[f_2(\omega_g)] \quad (6)$$

$$K_{lead} T = \alpha T \text{Re}[f_2(\omega_g)] + \frac{1}{\omega_g} \text{Im}[f_2(\omega_g)] \quad (7)$$

โดยที่

$$f_1(\omega_p) = \frac{-(j\omega_p + K_{lag} \omega_g/n)}{A_m G(j\omega_p) K_{lag}(j\omega_p + \omega_g/n)}$$

$$f_2(\omega_g) = \frac{-e^{j\theta_m}(j\omega_g + K_{lag}n)}{G(j\omega_g) K_{lag}(j\omega_g + \omega_g/n)}$$

จัดรูปสมการใหม่เพื่อลดตัวแปรโดยให้สมการ (4) เท่ากับสมการ (6) และสมการ (5) เท่ากับสมการ (7) ได้สมการใหม่ 2 สมการดังแสดงในสมการ (8) และ (9)

$$\alpha T = \frac{\text{Re}[f_2(\omega_g)] - \text{Re}[f_1(\omega_p)]}{\omega_g \text{Im}[f_2(\omega_g)] - \omega_p \text{Im}[f_1(\omega_p)]} \quad (8)$$

$$\alpha T = \frac{\frac{1}{\omega_g} \text{Im}[f_2(\omega_g)] - \frac{1}{\omega_p} \text{Im}[f_1(\omega_p)]}{\text{Re}[f_1(\omega_p)] - \text{Re}[f_2(\omega_g)]} \quad (9)$$

นำสมการ (8) และ (9) มาพล็อตกราฟเพื่อหาจุดตัดโดยการแปรผันค่า ω_p จุดตัดของกราฟที่ได้ออกมาคือค่า αT

จากสมการ (6) ปกติแล้วค่า K_{lead}, α และ T ต้องเป็นค่าบวก ทำให้ได้ว่า

$$0 < \omega_g \alpha T \text{Im}[f_2(\omega_g)] < \text{Re}[f_2(\omega_g)]$$

$$0 < \alpha T < \frac{\text{Re}[f_2(\omega_g)]}{\omega_g \text{Im}[f_2(\omega_g)]} \quad (10)$$

สมการ (10) เป็นเงื่อนไขขอบเขตของค่า αT เมื่อได้ค่า αT แล้วจึงนำไปคำนวณหาค่า K_{lead} ตามสมการ (6)

ขั้นตอนต่อไปเป็นการปรับแต่งอัตราขยายดีซีของตัวขดเชยเพื่อควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (E_{ss}) ให้เป็นไปตามที่กำหนด จากสมการ (1) อัตราขยายดีซีของตัวขดเชยขึ้นอยู่กับค่า K_{lead} เพียงค่าเดียว ซึ่งเราต้องปรับแต่งให้เท่ากับ K_c (อัตราขยายที่ E_{ss} ที่ต้องการ) โดยใช้สมการ (11)

$$K_{lag_new} = K_{lag_old} \times K_{lead} \quad (11)$$

ความสัมพันธ์ในสมการ (11) ได้มาจากที่เราใช้ตัวขดเชยเฟสล้ำหลังทำหน้าที่เปลี่ยนจุดตัดขนาดแทนการปรับอัตราขยายโดยตรงที่ใช้กับวิธีการออกแบบตัวขดเชยเฟสล้ำหน้าของ Wang [8] ทำให้ค่า K_{lag} มีความสัมพันธ์กับค่า K_{lead} โดยตรง อธิบายได้ว่าถ้า K_{lag} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยเกินไป ค่า K_{lead} จะปรับตัวเพิ่มขึ้นเพื่อปรับให้ได้ส่วนเมื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการ ดังนั้นเราจึงต้องปรับค่า K_{lag} เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ K_{lead} ที่เพิ่มขึ้น โดยการคูณเข้าไปโดยตรง เพื่อให้ K_{lag} สามารถขดเชย K_{lead} ได้พอดี ซึ่งก็คือการปรับแต่งให้ K_{lead} มีค่าเท่ากับ K_c นั่นเอง

สรุปขั้นตอนการออกแบบได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาอัตราขยาย (K_c) ที่ทำให้ระบบหลังการขดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวตามที่ต้องการ

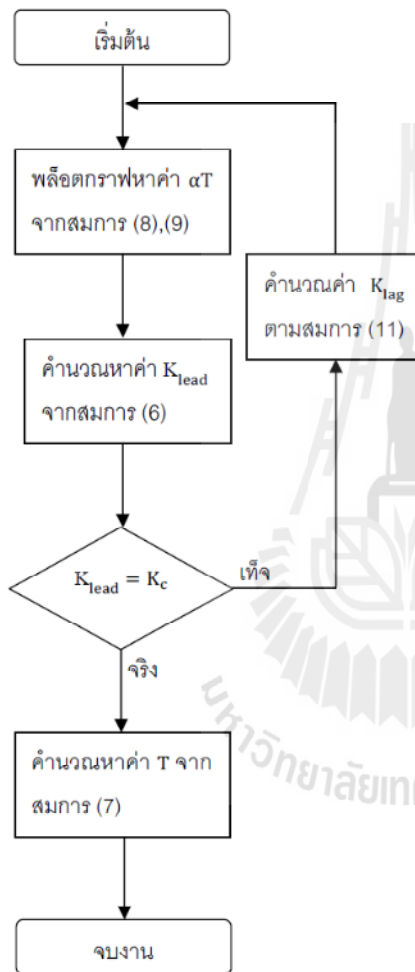
ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟตามสมการ (8) และ (9) เพื่อหาค่า αT

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า K_{lead} จากสมการ (6)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่า K_{lag} ตามสมการ (11) แล้วกลับไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 ใหม่ จนกว่าจะได้ค่า K_{lead} เท่ากับ K_c

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่า T จากสมการ (7)

เนื่องจากการคำนวณที่ซับซ้อนและต้องแสดงผลในรูปแบบของแผนภาพโบทและกราฟในโดเมนเวลา เราจึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB สร้างอัลกอริทึมขึ้นมา ซึ่งมี flow chart แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Flow chart แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบ

4.3 ข้อจำกัดของระบบ

ระบบควบคุมที่ใช้เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วย และส่วนเพื่ออัตราขยายกับส่วนเพื่อเฟสของระบบก่อนการชดเชยต้องเป็นค่าจำกัดเท่านั้น

5. การทดสอบการใช้งาน

นำพลาเน็ตที่มีเวลาประวิง (delay time) มาทดสอบ

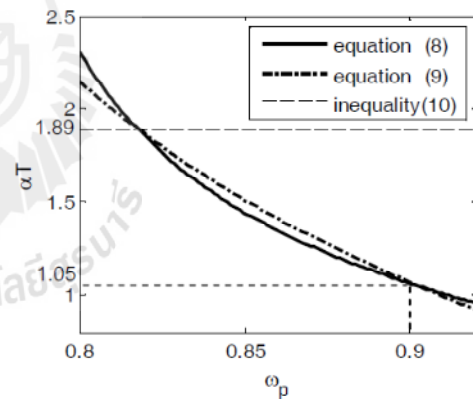
$$G_p(s) = \frac{1}{(10s + 1)^2} e^{-s}$$

กำหนดให้ส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการเท่ากับ 8 เดซิเบล และส่วนเพื่อเฟสเท่ากับ 50 องศา ใช้สัญญาณทดสอบแบบฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย โดยกำหนดให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของระบบหลังการชดเชยไม่เกิน 1%

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าอัตราขยาย (K_c) ที่ทำให้ระบบหลังการชดเชยมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวตามที่ต้องการ

$$K_c = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} G_p(s)} \left(\frac{1}{e_{ss}} - 1 \right) = \frac{1}{1} \left(\frac{1}{0.01} - 1 \right) = 99$$

ขั้นตอนที่ 2 พล็อตกราฟตามสมการ (8) และ (9) เพื่อหาค่า αT



รูปที่ 3 การพล็อตกราฟเพื่อหาจุดตัด αT

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า K_{lead} จากสมการ (6) ได้ค่า K_{lead} = 0.060

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่า K_{lag} ตามสมการ (11) แล้วกลับไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 ใหม่ จนกว่าจะได้ค่า K_{lead} เท่ากับ K_c

ผลการปรับแต่งเป็นไปดังตารางที่ 1

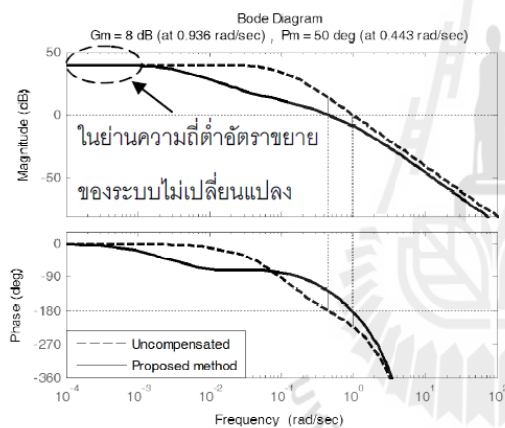
ตารางที่ 1. ผลการปรับแต่งอัตราขยายดีซี

| รอบที่ | K_{lag} | αT | K_{lead} (อัตราขยายดีซี) |
|--------|-----------|------------|----------------------------|
| 1 | 0.060 | 0.894 | 49.054 |
| 2 | 0.030 | 0.886 | 96.843 |
| 3 | 0.029 | 0.886 | 98.904 |

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่า T จากสมการ (7) ได้ค่า $T = 16.948$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแสดงดังสมการ (12)

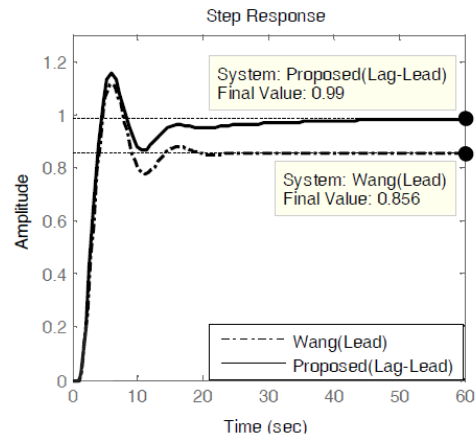
$$G_c(s) = 2.868 \left(\frac{s + 0.089}{s + 0.003} \right) \left(\frac{16.948s + 1}{0.886s + 1} \right) \quad (12)$$



รูปที่ 4 แผนภาพโบดก่อนและหลังการชดเชย

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าระบบหลังจากชดเชยด้วยวิธีการที่นำเสนอ มีส่วนเผื่ออัตราขยายเท่ากับ 8 เดซิเบล และส่วนเผื่อเฟสเท่ากับ 50 องศาตามที่ได้กำหนดไว้ (ระบบก่อนชดเชยมีส่วนเผื่ออัตราขยายเท่ากับ 26.307 เดซิเบล และส่วนเผื่อเฟสเท่ากับ -180 องศา) โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าในย่านความถี่ต่ำอัตราขยายของระบบก่อนและหลังการชดเชยไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ตัวชดเชยเฟสล้ำหน้า ทำหน้าที่

เปลี่ยนจุดตัดขนาดแทนการปรับอัตราขยายโดยตรง



รูปที่ 5 ผลตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

การตอบสนองในโดเมนเวลาต่อสัญญาณอินพุตแบบฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยแสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว 1% ตรงตามที่กำหนดเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 ส่วนวิธีการออกแบบตัวชดเชยเฟสล้ำหน้าตามวิธีการของ Wang [8] ถึงแม้ว่าจะให้ส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟสที่แม่นยำ แต่ก็มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวสูงถึง 14.4%

6. บทสรุป

วิธีการที่นำเสนอสามารถให้ส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟสตรงตามที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ รวมทั้งสามารถควบคุมค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ตามที่กำหนดอีกด้วย

6.1 แนวทางการพัฒนาต่อ

ในอนาคตเราควรจะนำแนวทางในการออกแบบเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมพีไอดี เพื่อให้สามารถควบคุมระบบให้มีทั้งเสถียรภาพและสมรรถนะตามที่ต้องการ เพื่อให้ระบบควบคุมมีความสมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wakeland, W.R. (1976). Bode Compensator Design. IEEE Trans. on Automatic Control. 21: 771-773.
- [2] Mitchell, J.R. (1977). Comments on Bode Compensator Design. IEEE Trans. on Automatic control. 22: 869-870.
- [3] Dorf, R.C., Jung, S., Dawes, J., and Ng, L. (1995). A s-Plane Analytic Technique for Lead-Lag Controller Design. Proc. of the American Control Conf. Seattle, Washington.: 2227-2228.
- [4] Yeung, K.S., Wong, K.W., and Chen, K-L. (1998). A Non-Trial-and-Error Method for Lag-Lead Compensator Design. IEEE Trans. on Education. 41(1): 76-80.
- [5] Wang, F-Y. (2003). The Exact and Unique Solution for Phase-Lead and Phase-Lag Compensation. IEEE Trans. on Education. 46(2): 258-262.
- [6] Hang, C.C., Wang, Q-G., and Ye, Z. (2005). Tuning of Lead Compensators with Gain and Phase Margin Specifications. Proc. of the 16th IFAC World Congress.
- [7] Wang, F-Y. (2006). A New Non-Trial-and-Error Method for Lag-Lead Compensator Design: A Special Case. International Journal of Intelligent Control and Systems. 11(1): 69-76.
- [8] Wang, Q-G., Ye, Z., and Hang, C.C. (2006). Tuning of Phase-Lead Compensators for Exact Gain and Phase Margins. Automatica. 42: 349-352.
- [9] Wang, F-Y. (2008). Analytical Solutions for Lag/Lead and General Second Order Compensator Design Problems. International Journal of Intelligent Control and Systems. 13(4): 233-236.
- [10] Wang, D-J. (2009). Synthesis of Phase-Lead/Lag Compensators with Complete Information on Gain and Phase Margins. Automatica. 45: 1026-1031.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพล มีเดช เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2518 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียน
ขจรโรจน์วิทยา จังหวัดกรุงเทพมหานคร ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี
และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ไฟฟ้า)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา เมื่อปี พ.ศ. 2540 หลังจากเรียนจบได้เข้าทำงานที่
บริษัทชันโย ยูนิเวอร์แซล อิเล็กทริก (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จนถึงปัจจุบัน ตำแหน่งผู้ช่วย
ผู้จัดการฝ่ายซ่อมบำรุง

ปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิง
ประยุกต์ ครั้งที่ 5 ประจำปี พ.ศ. 2556 เรื่อง การออกแบบตัวชดเชยเฟสสำหรับ-ลำหน้าให้มีส่วนเพื่อ
อัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำ

