

ตัวควบคุมพีไอดีเชิงขนานที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก



นายวุฒิชัยธรรม ตัณฑยาวัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

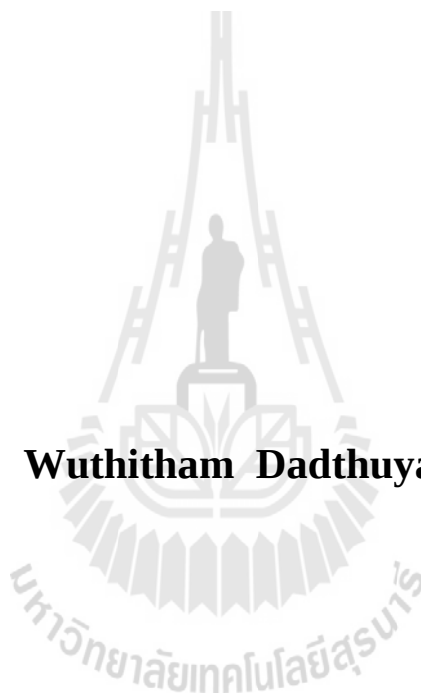
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**CONCURRENT PID CONTROLLERS WITH AN
ADAPTIVE WEIGHTING UNIT**

Wuthitham Dadthuyawat



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

ตัวควบคุมฟิโอดีเชิงขนานที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.วิโรจน์ แสงทอง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วุฒิชรรณ คัตฤยาวัตร : ตัวควบคุมพีไอดีเชิงขนานที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก

(CONCURRENT PID CONTROLLERS WITH AN ADAPTIVE WEIGHTING UNIT)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง, 141 หน้า.

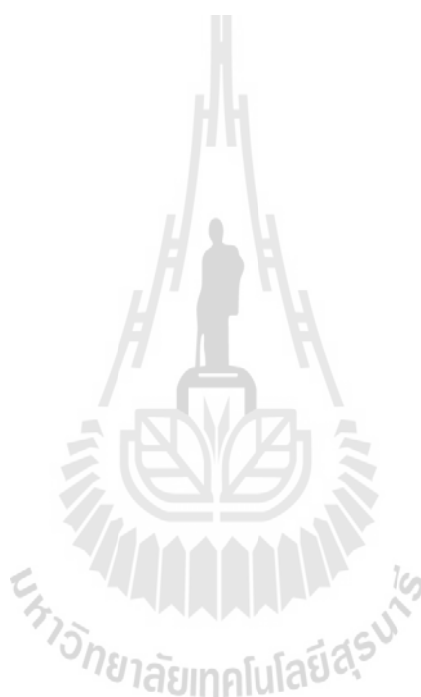
งานวิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายแผนการใหม่ที่ใช้ชดเชยพลวัตของกระบวนการ (พลานต์) ที่ควบคุมยากที่มีการประวิงเวลาและไม่มีการประวิงเวลา เจ็ดรูปแบบ แผนการใหม่นี้ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน (เชิงขนาน) และมีค่าเกนซึ่งได้จากกฎการปรับจูนที่แตกต่างกันหรือสูตรวิธีเชิงวิเคราะห์ และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักที่มีหน้าที่ปรับเปลี่ยนเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว การปรับเปลี่ยนค่าเกนปรับถ่วงน้ำหนักในหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักจะได้รับการใช้วิธีลองผิดลองถูก ถ้าพลานต์มีการประวิงเวลา ระบบวงปิดจะต้องมีตัวทำนายสมิธ จากนั้นนำสัญญาณควบคุมที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักมารวมกัน เพื่อป้อนให้กับพลานต์ควบคุมยาก เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ระบบวงปิดจะสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียวที่ให้ผลตอบสนองแบบติ่งหรือแบบเรียบเท่านั้น หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักจะคำนวณสัญญาณถ่วงน้ำหนักแบบออนไลน์และนำสัญญาณถ่วงน้ำหนักนี้คูณกับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว เนื่องจากระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก คือระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนเปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงได้นำทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่มีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามเวลา มาใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดดังกล่าว และการตรวจสอบเสถียรภาพได้แสดงว่าระบบวงปิดที่ประกอบด้วย พลานต์ควบคุมยากและแผนการใหม่ทุกระบบมีเสถียรภาพ

WUTHITHAM DADTHUYAWAT : CONCURRENT PID CONTROLLERS
WITH AN ADAPTIVE WEIGHTING UNIT. THESIS ADVISOR : WIROTE
SANGTUNGTONG, Ph.D., 141 PP.

PARALLEL PID CONTROLLERS/ ADAPTIVE WEIGHING UNIT/
BENCHMARK PLANT/ LINEAR TIME-VARYING SYSTEM

This thesis describes an innovative scheme for compensating the dynamics of seven types of the benchmark plants. The two types of them have a time delay and the others are without it. This strategy employs the concurrent PID controllers comprising the two parallel PID ones and the adaptive weighting unit. The three gains of each controller could be tuned by either different tuning rules or an analytical method while the adaptive weighting unit is able to adjust the outputs of these PID controllers during execution. One unique gain of such an adaptive weighting unit is selected through the popular trial-and-error method. For a benchmark process with its time delay, the closed-loop system must have also contained Smith predictor. Then the two control signals weighted by the adaptive weighting unit will be added together and the resultant signal is fed into the benchmark plant. The closed-loop responses arising give satisfactory or better performance than those obtained from using the single PID controller which produces only one shape of either tight or smooth response. The adaptive weighting unit on-line evaluates the two signals for weighting and brings them into multiplication with the corresponding outputs of the two PID controllers. Because such a closed-loop system is equivalent to a linear time-varying system, its stability will be guaranteed by the relevant theory on stability which indicates that the

closed-loop systems including the proposed scheme under a benchmark plant all are stable.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

อาจารย์วิโรจน์ แสงชงทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ศาสตราจารย์ น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งเป็นกำลังใจและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและท้อแท้ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

วุฒิธรรม คัคฐยาวัตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงาน.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	6
2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี.....	7
2.1 บทนำ	7
2.2 ตัวควบคุมพีไอดี.....	8
2.2.1 การควบคุมแบบปรับสัดส่วน (Proportional Control).....	9
2.2.2 การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control).....	11
2.2.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)	12
2.2.4 การควบคุมแบบสัดส่วน – ปริพันธ์ – อนุพันธ์ (ตัวควบคุมพีไอดี)	14
2.3 ขั้นตอนการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดี	15
2.4 ตัวอย่างการออกแบบ	17
2.5 ผลการจำลองสถานการณ์.....	22

สารบัญ (ต่อ)

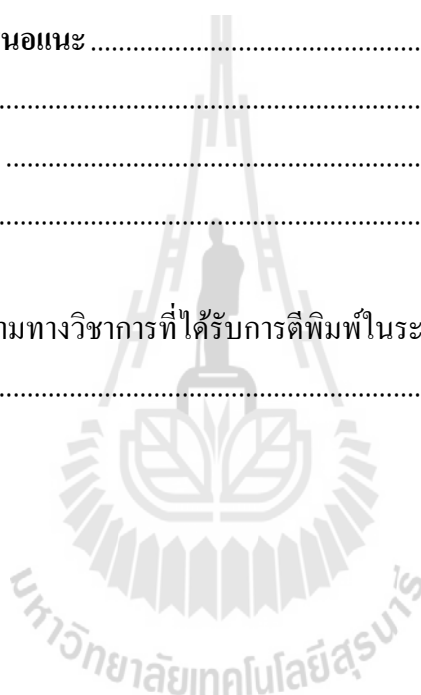
หน้า

2.6	ตัวทำนายสมิธิ	47
2.7	สรุป.....	51
3	การออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั.....	52
3.1	บทนำ	52
3.2	โครงสร้างของระบบวงปิดเมื่อมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั.....	52
3.3	วิธีการออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั	53
3.4	แนวทางการเลือกค่าเกนปรับถ่วงน้ำหนั	58
3.5	สรุป.....	67
4	การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิด.....	69
4.1	บทนำ	69
4.2	ทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	69
4.3	การหาสมการสถานะของระบบวงปิด.....	70
4.4	การตรวจสอบเสถียรภาพของพลานต์ 1	74
4.5	การตรวจสอบเสถียรภาพของพลานต์ 2	77
4.6	การตรวจสอบเสถียรภาพของพลานต์ 3	80
4.7	การตรวจสอบเสถียรภาพของพลานต์ 4	83
4.8	การตรวจสอบเสถียรภาพของพลานต์ 5	85
4.9	การตรวจสอบเสถียรภาพของพลานต์ 6	88
4.10	การตรวจสอบเสถียรภาพของพลานต์ 7	93
4.11	สรุป.....	95
5	ผลการจำลองสถานการณ์	97
5.1	บทนำ	97
5.2	ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์ 1	97
5.3	ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์ 2.....	101
5.4	ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์ 3.....	104
5.5	ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์ 4.....	108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.6 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 5.....	112
5.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 6.....	117
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 7.....	120
5.9 สรุป.....	127
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	129
6.1 สรุป.....	129
6.2 ข้อเสนอแนะ	131
รายการอ้างอิง	132
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา	135
ประวัติผู้เขียน	141



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กฎการปรับจูน (เกณฑ์การปรับจูน) ตัวควบคุมพีไอดี	8
2.2 ผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มค่าเกน K_P K_I และ K_D	14
2.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)	18
2.4 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)	19
2.5 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 1)	21
2.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2)	25
2.7 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2)	26
2.8 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 2)	28
2.9 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3)	29
2.10 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3)	30
2.11 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 3)	32
2.12 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 4)	33
2.13 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 4)	36
2.14 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 5)	37
2.15 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 5)	39
2.16 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 6)	40
2.17 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 6)	40
2.18 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 6)	42
2.19 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 7)	43
2.20 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 7)	44
2.21 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 7)	46
2.22 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบที่มีตัวทำนายสมิธ (พลาเน็ต 4)	49
2.23 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบที่มีตัวทำนายสมิธ (พลาเน็ต 5)	50
3.1 ผลกระทบถึงสมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า k (พลาเน็ต 1)	61
3.2 สมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า k (พลาเน็ต 2 ถึงพลาเน็ต 7)	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.1	สรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับพลาเน็ต 7 รูปแบบ 73
5.1	ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชุดเซตพลาเน็ต 1) 98
5.2	สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 1) 100
5.3	ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชุดเซตพลาเน็ต 2) 101
5.4	สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 2) 103
5.5	ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชุดเซตพลาเน็ต 3) 105
5.6	สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 3) 107
5.7	ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชุดเซตพลาเน็ต 4) 109
5.8	สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 4) 111
5.9	ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชุดเซตพลาเน็ต 5) 113
5.10	สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 5) 115
5.11	ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชุดเซตพลาเน็ต 6) 117
5.12	สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 6) 119
5.13	สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 7) 126

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี	9
2.2	พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วนต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย	10
2.3	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน	10
2.4	พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย	11
2.5	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์	12
2.6	พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย	13
2.7	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์	13
2.8	พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพีไอดีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย	15
2.9	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี	15
2.10	ระบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยที่ใช้ตัวควบคุมพี	16
2.11	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีการแกว่งกตัว	16
2.12	ระบบแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต 1 ในขั้นตอนที่ 1	17
2.13	ผลตอบสนองของระบบวงปิดในสถานะแกว่งกตัว	18
2.14	ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 1)	20
2.15	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)	20
2.16	ระบบถังบรรยากาศจำนวน n ถังต่อแบบอนุกรม	23
2.17	ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 2)	27
2.18	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2)	27
2.19	ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 3)	31
2.20	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3)	31
2.21	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ ZN (พลาเน็ต 4)	34
2.22	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ IAE (พลาเน็ต 4)	34
2.23	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ SOR (พลาเน็ต 4)	35
2.24	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ NOR (พลาเน็ต 4)	35
2.25	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ ISTWE (พลาเน็ต 4)	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26	ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 5)..... 38
2.27	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 5)..... 38
2.28	ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 6)..... 41
2.29	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 6)..... 42
2.30	ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 7)..... 45
2.31	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 7)..... 45
2.32	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสำหรับเกณฑ์ ISTWE..... 46
2.33	โครงสร้างของตัวทำนายแบบสมิธ..... 47
2.34	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีกับตัวทำนายสมิธ (พลาเน็ต 4)..... 48
2.35	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีกับตัวทำนายสมิธ (พลาเน็ต 5)..... 50
3.1	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั (AWU) โดยที่ $F_1' = \frac{F_1}{F_1 + F_2}$ และ $F_2' = \frac{F_2}{F_1 + F_2}$ 53
3.2	กราฟ $e^2(t)$ ที่ได้จากระบบวงปิดหรือระบบควบคุมป้อนกลับที่มีพลาเน็ต 1 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อนานกัน และมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก..... 55
3.3	ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า k ที่แตกต่างกัน (พลาเน็ต 1)..... 59
3.4	การขยายภาพของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.3 ช่วงเวลาระหว่างวินาทีที่ 1.1 ถึง 1.9..... 59
3.5	การขยายภาพของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.3 ในช่วงเวลาระหว่างวินาทีที่ 2 ถึง 5..... 60
3.6	สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' (——) และ F_2' (-----) ที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า k ที่ แตกต่างกัน (พลาเน็ต 1) 65
4.1	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั (AWU)..... 71
4.2	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีค่าเกนพีไอดีเปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 73
4.3	ค่าอินทิเกรตของ $\ C(t)\ $ (พลาเน็ต 1)..... 76
4.4	ค่าอินทิเกรตของ $\ C(t)\ $ (พลาเน็ต 2)..... 79
4.5	ค่าอินทิเกรตของ $\ C(t)\ $ (พลาเน็ต 3)..... 82
4.6	ค่าอินทิเกรตของ $\ C(t)\ $ (พลาเน็ต 4)..... 85
4.7	ค่าอินทิเกรตของ $\ C(t)\ $ (พลาเน็ต 5)..... 88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ค่าอินทิเกรตของ $\ C(t)\ $ (พลาเน็ต 6).....	92
4.9 ค่าอินทิเกรตของ $\ C(t)\ $ (พลาเน็ต 7).....	95
5.1 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 1)	98
5.2 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 1)	99
5.3 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 1)	99
5.4 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 2)	102
5.5 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 2)	102
5.6 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 2)	103
5.7 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 3)	105
5.8 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 3)	106
5.9 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 3)	106
5.10 ระบบควบคุมวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักและตัวทำนายสมิท.....	108
5.11 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 4)	110
5.12 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 4)	110
5.13 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 4)	111
5.14 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 5)	114
5.15 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 5)	114
5.16 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 5)	115
5.17 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 6)	118
5.18 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 6)	118
5.19 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 6)	119
5.20 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี ซึ่งกฎการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีคือ ZN และ SOR (พลาเน็ต 7)	121
5.21 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี เป็นค่าเกนชุดแรก ชุดที่สอง และชุดที่สาม (พลาเน็ต 7)	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีค่าเกินของตัวควบคุมพีไอดี เป็นค่าเกินชุดที่สี่ ชุดที่ห้า และชุดที่หก (พลาเน็ต 7).....	124
5.23 ผลตอบสนองของระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 7)	125
5.24 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 7)	125
5.25 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 7)	126



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) เป็นตัวควบคุมที่ได้รับการใช้งานครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1939 (Bennett, S., 1994) ซึ่งต่อมาได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง เนื่องจากใช้งานง่าย โดยในปัจจุบันยังมีการใช้งานในอุตสาหกรรมควบคุมกระบวนการและเครื่องจักรกลทางอุตสาหกรรม (Ang, Chong, and Li, 2005) เช่น ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ งานทางด้านหุ่นยนต์ ยานพาหนะไฟฟ้า และโรงงานที่ใช้ระบบควบคุมทันสมัย รวมไปถึงยานอวกาศ เป็นต้น เพราะตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่ใช้กันมานานและได้รับความไว้วางใจในสมรรถนะ ตัวควบคุมพีไอดีมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสะดวกในการติดตั้ง จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมนี้ให้วิศวกรและช่างเทคนิคได้ใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการหาพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมให้กับระบบหรือพลานต์สามารถทำได้จากวิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์ หรือกฎการปรับจูน (เกณฑ์การปรับจูน) การออกแบบเชิงวิเคราะห์ต้องทราบแบบจำลองของพลานต์ ในขณะที่กฎการปรับจูนตัวควบคุมต้องทราบผลตอบสนองของระบบ วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์หรือกฎการปรับจูนต่าง ๆ จะมีข้อจำกัดบางประการที่สัมพันธ์กับรูปแบบหรือโครงสร้างของพลานต์ เช่น พลานต์ที่มีการประวิงเวลา (process with time-delay) พลานต์ที่มีคู่โพลและซีโรเชิงซ้อนสังยุค (real and complex-conjugate zeros and poles) และโพลไม่เสถียร (unstable poles) เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้คือสาเหตุของการออกแบบหรือการปรับจูนที่ไม่เป็นไปตามเป้าหมาย ในปี ค.ศ. 2000 Astrom และคณะ (Astrom and Hagglund, 2000) ได้เสนอระบบที่ใช้ทดสอบตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งระบบนี้คือปัญหามาตรฐานหรือชุดตัวอย่างที่ใช้ในการประเมินวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีในทางทฤษฎี ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วยหน่วยสัดส่วน หน่วยปริพันธ์ และหน่วยอนุพันธ์ของความผิดพลาดหรือสัญญาณ ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ในสมการที่ (1.1)

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1.1)$$

โดยที่ K_p , K_I และ K_D คือค่าเกน (อัตราขยาย) ของหน่วยสัดส่วน (P) ค่าเกน (อัตราขยาย) ของหน่วยปริพันธ์ (I) และค่าเกน (อัตราขยาย) ของหน่วยอนุพันธ์ (D) ตามลำดับ

ผู้ใช้งานหรือผู้ปฏิบัติงานสามารถนำสูตรเชิงวิเคราะห์และกฎการปรับจูนมาออกแบบค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ชดเชยพลวัตของระบบหรือพลาเน็ตต่าง ๆ ได้ แต่ระบบวงปิดอาจให้ผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกิน (overshoot) และการแกว่ง (oscillation) สูง จึงได้มีคณานักวิจัยนำเสนอวิธีการออกแบบและนำตัวควบคุมพีไอดีมาใช้พร้อมกับเทคนิคการควบคุมแบบอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าเดิม ดังต่อไปนี้

Kim, Kim และ Edwin (1994) ได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีซีชดเชยก่อน (ป้อนไปหน้า) และตัวควบคุมพีไอดีเพื่อปรับปรุงความคงทนและสมรรถนะของผลตอบสนองของระบบควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์ ทำให้ได้รับผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงลำพัง

Otsubo และคณะ (1998) ได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบไฮบริดที่นำตัวควบคุมพีซีและตัวควบคุมพีไอดีมาต่อขนานกัน ซึ่งทำหน้าที่ชดเชยระบบอันดับหนึ่งล่าช้าและระบบอันดับสองล่าช้าที่มีการประวิงเวลา เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ทำให้ได้รับผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงลำพัง

Li (1998) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมสัดส่วนแบบพีซีที่ใช้งานขนานกับตัวควบคุมพีแบกไอดี (fuzzy P+ID) หรืออีกความหมายหนึ่งคือการใช้ตัวควบคุมสัดส่วนแบบพีซีมาแทนหน่วยสัดส่วนในตัวควบคุมพีไอดี เพื่อชดเชยระบบไม่เชิงเส้น เช่น พลาเน็ตต่าง ๆ ในกระบวนการอุตสาหกรรม ทำให้ได้รับผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงลำพัง

Er และ Sun (2001) ได้นำเสนอวิธีใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมไฮบริดที่มีการทำงานขนานกันระหว่างตัวควบคุมพีซีและพีไอดี เพื่อชดเชยระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น พร้อมกับการใช้จินเนติกอัลกอริทึมค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

Li และ Tsang (2007) ได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีไอดีต่อขนานกับตัวชดเชยแบบเฟสล้ำหน้าที่มีรีเลย์ต่ออนุกรม ซึ่งทำหน้าที่ชดเชยระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของผลตอบสนองในสถานะชั่วคราว และควบคุมสมรรถนะในช่วงเข้าใกล้สถานะอยู่ตัว ทำให้ได้รับผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงลำพัง

Gopala Rao, Amarendra Reddy และ Durga Bhavani (2010) ได้นำเสนอการต่อเรียงกันของตัวควบคุมแบบพีซีพีไอดี พีซีพีไอดี และตัวควบคุมแบบพีไอดี เพื่อชดเชยระบบที่มีการประวิงเวลา ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น ทำให้ได้รับผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงลำพัง

จากปริทัศน์วรรณกรรมดังกล่าว มีประเด็นที่น่าสนใจคือ งานวิจัยได้นำเสนอโครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรมและแบบขนาน (แบบขนานจะทำงานพร้อมกัน) ที่ให้การเสริมหรือการแก้ไขสัญญาณควบคุม การใช้ตัวควบคุมตั้งแต่สองตัวขึ้นไปทำงานแบบขนานจะให้สัญญาณควบคุมรวม (สัญญาณควบคุมสุทธิ) ที่ขึ้นอยู่กับเอาต์พุตของตัวควบคุมแต่ละตัว (การบวกกันทางพีชคณิตของเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นการรวมสัญญาณที่ง่ายที่สุด) ซึ่งมีข้อสังเกตว่า ตัวควบคุมที่นำมาเพิ่มเติมให้กับตัวควบคุมพีไอดี คือตัวควบคุมแบบพีซีโดยส่วนใหญ่ และในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยเพียงงานเดียวที่พิจารณาตัวชดเชยเฟสนำหน้าทำงานพร้อมกับตัวควบคุมพีไอดี ทำให้เกิดความสนใจว่า ถ้าต้องการใช้ตัวควบคุมพีไอดีมากกว่าหนึ่งตัวทำงานพร้อมกันและมีการเชื่อมต่อแบบขนาน จะต้องออกแบบและเพิ่มเติมแผนการหรือหน่วยการคำนวณอื่นใด เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบวงปิด และมีข้อจำกัดด้านใดบ้าง รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบวงปิด

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอและอธิบายวิธีการใหม่ที่น่าดึงดูดตัวควบคุมพีไอดีมาตรฐานสองตัวมาเชื่อมต่อแบบขนาน และทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของพลานต์พร้อมกัน หน่วยปรับถ่วง (Adaptive Weighting Unit: AWU) จะถ่วงน้ำหนักเอาต์พุต (สัญญาณควบคุม) ของตัวควบคุมพีไอดีทั้งสอง ในวิธีที่เน้นหนักและผ่อนคลายนลักษณะ (พฤติกรรม) ของตัวควบคุมแต่ละตัวอย่างเหมาะสม จากนั้นนำสัญญาณควบคุมที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักมารวมกัน ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมรวม (สัญญาณควบคุมสุทธิ) และนำไปป้อนให้กับพลานต์ เป็นผลให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีมาตรฐานเพียงหนึ่งตัว ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีตัวแรกและตัวที่สองตัวใดตัวหนึ่งดังกล่าวจะต้องให้ผลตอบสนองแบบตึง (tight control) และผลตอบสนองแบบเรียบ (smooth control) ตามลำดับ หน่วยปรับถ่วงจะทำหน้าที่คำนวณสัญญาณถ่วงน้ำหนักแบบออนไลน์ และนำสัญญาณถ่วงน้ำหนักนี้มาคูณกับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อหาแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสม และพัฒนาการใช้ตัวควบคุมพีไอดีมากกว่าหนึ่งตัว (สองตัว) ที่เชื่อมต่อแบบขนานและทำงานพร้อมกัน รวมถึงการชดเชยกระบวนการหรือพลานต์ที่มีการประวิงเวลา

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การคำนวณที่มีความซับซ้อนในงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และ Control System Toolbox เป็นเครื่องมือในการคำนวณ

1.3.2 การจำลองสถานการณ์จะใช้ โปรแกรม MATLAB/Simulink และ Control System Toolbox

1.3.3 การทดสอบแนวทางและวิธีการควบคุมที่นำเสนอ จะดำเนินการชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก (พลาเน็ตมาตรฐาน) 7 รูปแบบ ซึ่งได้จากคำแนะนำของ Astrom และ Hagglund (2000)

1.3.4 พิจารณาการควบคุมตามรอยอินพุต (tracking control) ซึ่งมีจุดปรับตั้ง (set point) หรือสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit step)

1.3.5 พิจารณาระบบเวลาต่อเนื่อง และไม่พิจารณาการรบกวนภายนอก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ตัวควบคุมพีไอดีมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G_c(s)$ ในสมการที่ (1-1)

1.4.2 พลาเน็ตหรือกระบวนการ $G_p(s)$ ที่พิจารณามีจำนวน 7 พลาเน็ต ตามคำแนะนำของ Astrom and Hagglund (2000) พลาเน็ต $G_p(s)$ ที่ควบคุมยากมีดังนี้

$$\text{พลาเน็ต 1: } G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(\alpha s+1)(\alpha^2 s+1)(\alpha^3 s+1)}, \alpha = 0.5$$

$$\text{พลาเน็ต 2: } G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^4}$$

$$\text{พลาเน็ต 3: } G_p(s) = \frac{-\alpha s+1}{(s+1)^3}, \alpha = 0.5$$

$$\text{พลาเน็ต 4: } G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)} e^{-s}, T = 10$$

$$\text{พลาเน็ต 5: } G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}, T = 10$$

$$\text{พลาเน็ต 6: } G_p(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)}$$

$$\text{พลาเน็ต 7: } G_p(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2)}, \omega_0 = 1, \zeta = 0.1$$

1.4.3 สมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดี จะได้รับการพิจารณาจากผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย รวมถึงการพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ และสัญญาณควบคุม (control signal)

1.4.4 นำแนวทางที่ดีที่สุดจากผลการศึกษา ไปใช้ควบคุมและชดเชยพลาเน็ตหรือกระบวนการที่มีการประวิงเวลาซึ่งเกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรม

1.4.5 วิเคราะห์เงื่อนไขที่ทำให้เกิดเสถียรภาพ เมื่อระบบวงปิดมีตัวควบคุมพีไอดี เชื่อมต่อแบบขนานที่ทำหน้าที่ชดเชยกระบวนการหรือพลาเน็ตมาตรฐาน เช่น พลาเน็ตอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา (FOPDT) และพลาเน็ตอันดับสองที่มีการประวิงเวลา (SOPDT)

1.4.6 พัฒนาหรือปรับปรุงการออกแบบด้วยวิธีที่เหมาะสมในวิธีใดวิธีหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นการสร้างแผนการใหม่

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าการใช้งานตัวควบคุมที่เชื่อมต่อแบบขนานและตัวควบคุมที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมที่นำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้

1.5.2 จำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของระบบวงปิดที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียวและผลตอบสนองของระบบวงปิดที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและทำงานพร้อมกัน รวมถึงการวิเคราะห์ผลตอบสนอง

1.5.3 ศึกษาวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบและกฎการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว (เพียงลำพัง) ที่ทำหน้าที่ชดเชยพลาเน็ตในระบบวงปิด

1.5.4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อชดเชยพลาเน็ตที่ควบคุมยาก (พลาเน็ตมาตรฐาน) 7 แบบ แล้วนำวิธีหรือกฎการปรับจูนที่แตกต่างกันและให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่ดีหรือที่พอใช้ได้ มาปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีตัวแรกและตัวที่สองที่เชื่อมต่อแบบขนานกัน รวมถึงการเลือกแผนการอื่น ๆ เพิ่มเติมที่เหมาะสมนำมาชดเชยกระบวนการหรือพลาเน็ตที่มีการประวิงเวลา

1.5.5 วิเคราะห์เงื่อนไขที่ทำให้เกิดเสถียรภาพของระบบวงปิดที่ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน และกระบวนการมาตรฐาน เช่น พลาเน็ตอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา (FOPDT) และพลาเน็ตอันดับสองที่มีการประวิงเวลา (SOPDT) เป็นต้น

1.5.6 พัฒนารูปแบบการออกแบบหรือแผนการที่เหมาะสม

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบและข้อจำกัดของตัวควบคุมพีไอดีที่เชื่อมต่อแบบขนาน

1.6.2 ได้แผนการที่ชดเชยกระบวนการที่มีการประวิงเวลา

1.6.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการถ่วงน้ำหนักของแผนการแบบปรับตัว

1.6.4 ได้บทความวิจัยตีพิมพ์ เผยแพร่ในระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาประกอบไปด้วย 6 บท

บทที่ 1 คือบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย รวมถึงเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นของตัวควบคุมพีไอดี รวมถึงอธิบายกฎการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดี 5 กฎคือ Ziegler-Nichols, Integral of Absolute Error, Some-Overshoot Rule, No-Overshoot Rule, Integral of Squared Time Weighted Error พร้อมกับการใช้ตัวทำนายของสมิท (Smith predictor) นำมาหาคะพจน์การประวิงเวลาของพลาเน็ตที่มีการประวิงเวลา และแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิดที่มีพลาเน็ตมาตรฐาน 7 แบบและตัวควบคุมพีไอดี (เพียงตัวเดียว) ซึ่งได้รับการปรับจูนค่าเกณฑ์จากกฎการปรับจูน 5 กฎ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร

บทที่ 4 กล่าวถึงการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ตมาตรฐาน ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อกัน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ตมาตรฐาน ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อกัน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในขณะที่กำลังศึกษา

บทที่ 2

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

2.1 บทนำ

ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) เป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม ค่าที่ใช้ในการคำนวณคือความผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างผลตอบสนอง และสัญญาณอ้างอิง (หรือจุดปรับตั้ง) ของระบบวงปิด (ระบบป้อนกลับ) ตัวควบคุมดังกล่าวจะลดความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุม (สัญญาณขาเข้า) ของกระบวนการ (พลานต์) ค่าเกน (อัตราขยาย) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้งานจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะ (พลวัตหรือพฤติกรรม) ของกระบวนการ ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วยหน่วยสัดส่วน หน่วยปริพันธ์ และหน่วยอนุพันธ์ของความผิดพลาด หน่วยทั้งสามนี้จะดำเนินการทางคณิตศาสตร์กับความผิดพลาดแบบแยกส่วนกันและนำผลการคำนวณที่ได้มารวม (บวก) เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมในโดเมนเวลาอย่างเหมาะสม ทำให้เกิดกลไกการควบคุมอัตโนมัติ ผู้ใช้งานอาจจะไม่ได้ใช้หน่วยทั้งสามนี้ของตัวควบคุมพร้อมกัน กล่าวคือผู้ใช้งานอาจจะใช้หน่วยสัดส่วน (พี) เพียงหน่วยเดียว หรืออาจจะใช้หน่วยสัดส่วนและหน่วยปริพันธ์ (พีไอ) พร้อมกัน เป็นต้น

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่พิจารณาค่าอัตราขยายวิกฤต (critical gain method) ซึ่งประกอบไปด้วยกฎการปรับจูน (เกณฑ์การปรับจูน) แบบต่าง ๆ เช่น การปรับจูนแบบซิกเลอร์และนิโคลส์ (Ziegler and Nichols, 1942) การปรับจูนแบบอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Integral of Absolute Error: IAE) (Pessen, 1994) การปรับจูนแบบไร้การพุ่งเกิน (No-Overshoot Rule: NOR) (Seborg et al, 2004) การปรับจูนแบบการพุ่งเกินเล็กน้อย (Some-Overshoot Rule: SOR) (Seborg et al, 2004) และการปรับจูนแบบอินทิกรัลของการถ่วงน้ำหนักกำลังสองของความผิดพลาดด้วยเวลา (Integral of Squared Time Weighted Error: ISTWE) (Zhuang and Atherton, 1993) กฎการปรับจูนดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้งานได้ดีกับพลานต์ที่ทราบแบบจำลอง และผู้ใช้งานสามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้ นอกจากนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีกับพลานต์ควบคุมยาก 7 รูปแบบตามคำแนะนำของ Astrom และ Hagglund (2000) และผลการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิด การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี รวมถึงสรุปผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีตามลำดับ กฎการ

ปรับจูนหรือเกณฑ์การปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีแสดงได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กฎการปรับจูน (เกณฑ์การปรับจูน) ตัวควบคุมพีไอดี (V. Zakian, 2005)

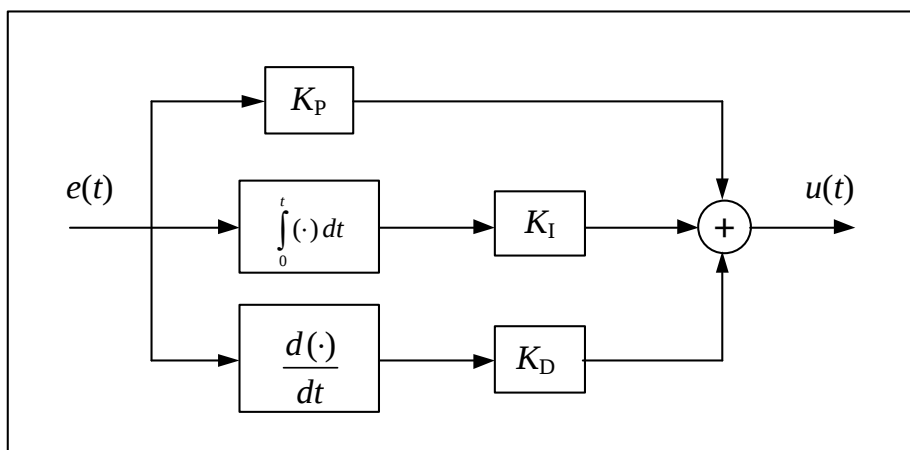
PID Rule	PID Parameters (PID Gains)
Ziegler – Nichols (ZN)	$K_p = 0.6K_u$
	$T_i = 0.50T_u$
	$T_d = 0.125T_u$
integral of absolute error (IAE)	$K_p = 0.7K_u$
	$T_i = 0.4T_u$
	$T_d = 0.15T_u$
some – overshoot rule (SOR)	$K_p = 0.33K_u$
	$T_i = 0.50T_u$
	$T_d = 0.33T_u$
no – overshoot rule (NOR)	$K_p = 0.2K_u$
	$T_i = 0.50T_u$
	$T_d = 0.33T_u$
integral of squared time weighted error (ISTWE)	$K_p = 0.509K_u$
	$T_i = 0.05(3.302K_pK_u + 1)T_u$
	$T_d = 0.125T_u$

2.2 ตัวควบคุมพีไอดี

ในการออกแบบหรือการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ผู้ใช้งานสามารถปรับจูนหรือปรับเลือกค่าเกนดังกล่าวได้ด้วยตนเองแบบลองผิดลองถูก (trial and error) หรือสามารถใช้กฎการปรับจูนต่าง ๆ ได้ ตัวควบคุมพีไอดีมีโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.1 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งประกอบด้วยหน่วยสัดส่วนที่มีค่าเกน K_p หน่วยปริพันธ์ที่มีค่าเกน K_I และหน่วยอนุพันธ์ที่มีค่าเกน K_D ดังนี้

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.1)$$

โดยที่ $e(t)$ และ $u(t)$ คือความผิดพลาด และสัญญาณควบคุม ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี

หน่วยทั้งสามของตัวควบคุมพีไอดีมีคุณสมบัติหรือพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังนี้

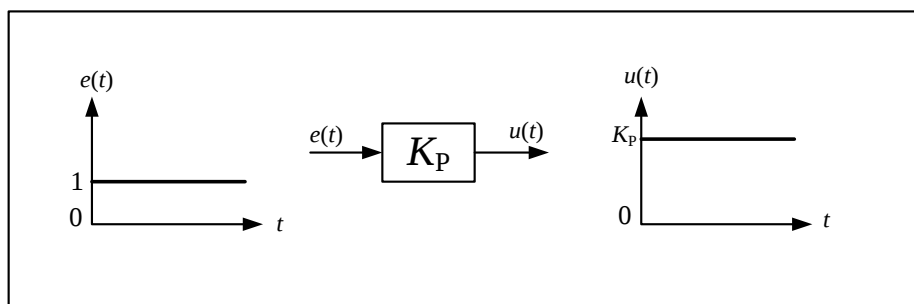
2.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

ในระบบควบคุมวงปิดที่ใช้หน่วยสัดส่วนเพียงอย่างเดียว หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมดังกล่าวจะได้รับความผิดพลาด ($e(t)$) ระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนอง และนำความผิดพลาดนี้มาคูณกับค่าเกน K_p เพื่อขยายความผิดพลาด ทำให้เกิดสัญญาณควบคุม ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.2)$$

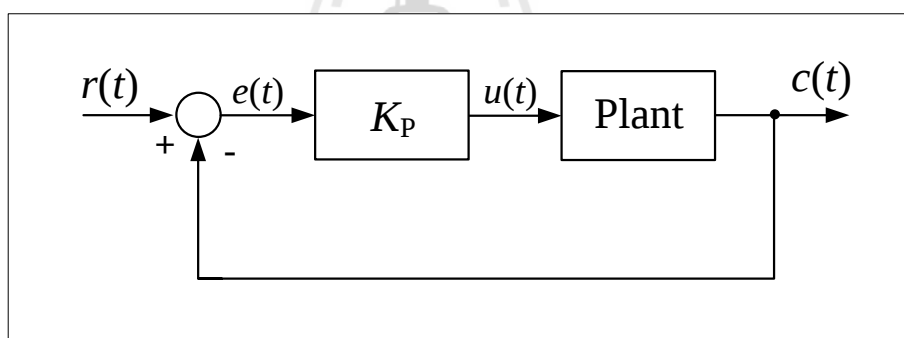
นั่นคือสัญญาณควบคุมจะแปรผันโดยตรงกับความผิดพลาด ตัวควบคุมแบบสัดส่วนมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G_c(s) = K_p \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วนต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

เนื่องจากสัญญาณควบคุมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความผิดพลาด ถ้าความผิดพลาดคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สัญญาณควบคุมคือสัญญาณขั้นบันไดที่มีค่าเท่ากับ K_p ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 ในระบบวงปิด ถ้าตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของพลานต์คือตัวควบคุมแบบสัดส่วน เมื่อค่าเกน K_p เพิ่มขึ้น สัญญาณควบคุมจะมีค่ายอด (peak) และขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้ผลตอบสนองมีความรวดเร็วมากขึ้น



รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

เมื่อตัวควบคุมแบบสัดส่วนชดเชยพลวัตของพลานต์ที่เป็นระบบแบบชนิดศูนย์ (Type 0 System) ตัวควบคุมดังกล่าวจะไม่สามารถกำจัดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ ถ้าต้องการลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ค่าเกน K_p จะต้องมีการเพิ่มขึ้น แต่ถ้าพลานต์คือระบบที่มีอันดับสองขึ้นไป การเพิ่มค่าเกนมากเกินไป อาจจะทำให้ผลตอบสนองเกิดการพุ่งเกิน (overshoot) หรือเกิดการแกว่ง (oscillation) ที่มีขนาดมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพได้ และในทางปฏิบัติ การเลือกใช้ค่าเกน K_p ที่มีค่าสูงมากอาจจะเป็นการดำเนินการไม่ได้ เพราะสัญญาณควบคุมทางกายภาพมีขอบเขตจำกัด กล่าวคือสัญญาณควบคุมทางกายภาพมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่แน่นอน

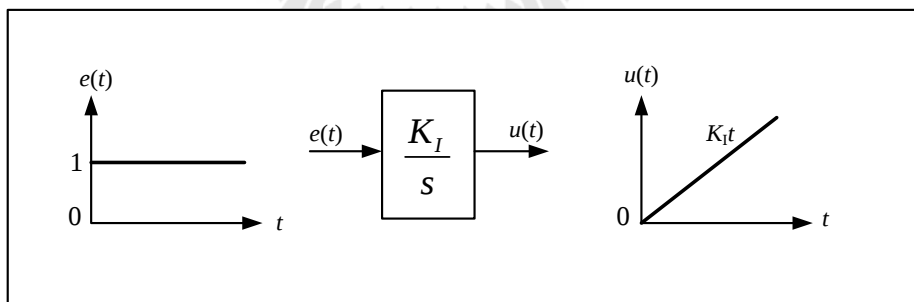
ค่าหนึ่ง ถ้าสัญญาณควบคุมที่ได้จากการคำนวณมีขนาดมากกว่าขอบเขตของสัญญาณทางกายภาพ จะทำให้สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุมเกิดการอิ่มตัว (Saturation)

2.2.2 การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

ในระบบควบคุมวงปิดที่ใช้หน่วยปริพันธ์เพียงอย่างเดียวหรือตัวควบคุมแบบปริพันธ์ ตัวควบคุมดังกล่าวจะได้รับความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนอง และนำความผิดพลาดนี้มาหาปริพันธ์ (อินทิเกรต) เทียบกับเวลาดังแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาปัจจุบัน จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้คูณกับค่าเกน K_I ที่มีหน่วยต่อวินาที ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมดังนี้

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.4)$$

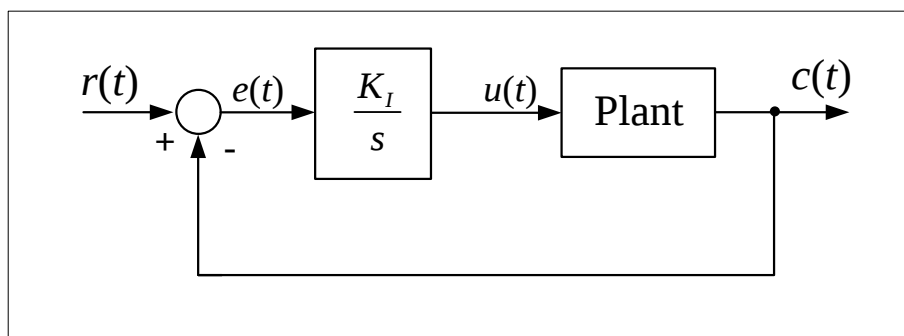
เมื่อตัวควบคุมแบบปริพันธ์ได้รับสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 ค่าปริพันธ์ของความผิดพลาดตั้งแต่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ จนถึงเวลา t ปัจจุบัน หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของความผิดพลาดตั้งแต่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ จนถึงเวลา t ปัจจุบัน ดังนั้นถ้าความผิดพลาดมีค่าบวกคงที่ สัญญาณควบคุมจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นด้วยอัตราคงที่ (ความชันคงที่) เทียบกับเวลาที่ผ่านมา



รูปที่ 2.4 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

ในระบบวงปิด ถ้าตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของพลานต์คือตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และพลานต์คือระบบแบบชนิดศูนย์ (Type 0 System) ตัวควบคุมดังกล่าวจะกำจัดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ ถ้าต้องการใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์เพียงอย่างเดียว ค่าเกน K_I จะต้องได้รับการปรับจนให้มีค่าเหมาะสม ตัวควบคุมแบบปริพันธ์มีจุดด้อยคือการเพิ่มการพุ่งเกินของผลตอบสนอง การใช้ค่าเกน K_I ที่ไม่เหมาะสมอาจเกิดการแกว่งของผลตอบสนองได้ ถ้าเป็นพลานต์หรือระบบที่มีอันดับสูง ผลตอบสนองที่ได้อาจจะมีสมรรถนะที่น่าพอใจหรือไม่สามารถยอมรับได้

2.2.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

ในระบบควบคุมวงปิดที่ใช้หน่วยอนุพันธ์เพียงอย่างเดียวหรือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตัวควบคุมดังกล่าวจะได้รับความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนอง และนำความผิดพลาดนี้มาหาอนุพันธ์ที่เวลาปัจจุบัน จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้คูณกับค่าเกน K_D ที่มีหน่วยวินาที ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมดังนี้

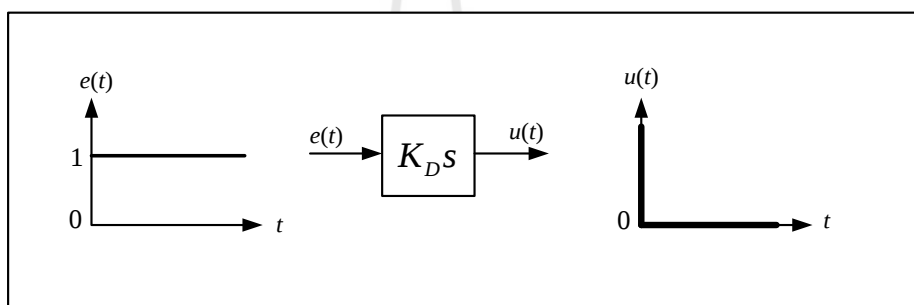
$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะให้สัญญาณควบคุมที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด ถ้าความผิดพลาดมีค่าคงที่ สัญญาณควบคุมจะเท่ากับศูนย์ เมื่อตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ได้รับสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 สัญญาณควบคุมจะเป็นสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse) ที่เวลา $t = 0$ เท่านั้น ต่อมาสัญญาณควบคุมจะเป็นศูนย์ ทำให้ไม่สามารถใช้งานตัวควบคุมแบบอนุพันธ์เพียงลำพังตัวเดียวได้ และต้องใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

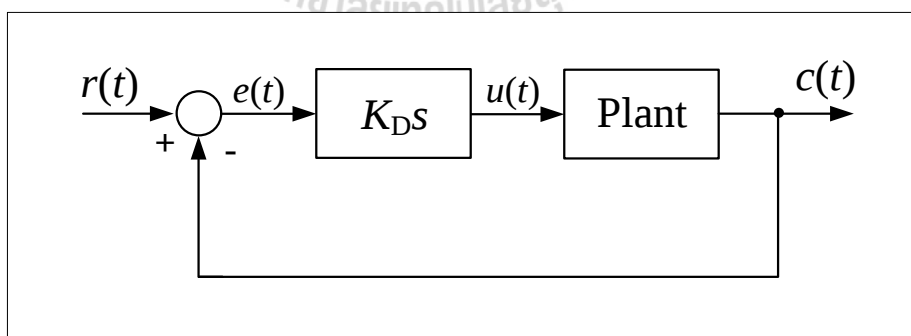
พร้อมกับตัวควบคุมแบบอื่น ๆ เช่น ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีฟังก์ชันง่าย ๆ โนคือ

$$G_c(s) = K_D s \quad (2.7)$$

ในระบบวงปิด ถ้าตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของพลานต์คือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์และพลานต์คือระบบแบบชนิดหนึ่ง (Type 1 System) หรือระบบแบบชนิดสอง (Type 2 System) ตัวควบคุมดังกล่าวจะหักล้างโพลศูนย์ ($s = 0$) หนึ่งตัวหรือหักล้างตัวปรีพันธ์ของพลานต์หนึ่งตัว ทำให้ระบบมีแบบลดลงหนึ่งตัวเลข การใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะเพิ่มความรวดเร็วของผลตอบสนองต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ถ้าตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีค่าเกน K_D ที่เหมาะสม ผลตอบสนองจะมีการพุ่งเกินและขนาดของการแกว่งลดลง ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีจุดด้อยคือ การไม่สามารถใช้งานเพียงลำพังตัว

เดียวได้ ทำให้ต้องใช้งานพร้อมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนเสมอ การไม่สามารถกำจัดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ รวมถึงการทำให้ระบบมีผลตอบสนองช้าลง

ตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้งานมีหลายรูปแบบ เช่น ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีดี ตัวควบคุมพี หรือตัวควบคุมไอ การเพิ่มค่าเกน K_p K_I และ K_D มีผลกระทบถึงพฤติกรรมของผลตอบสนอง ซึ่งสรุปได้ในตารางที่ 2.2 (Ang, Chong, and Li, 2005)

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มค่าเกน K_p K_I และ K_D

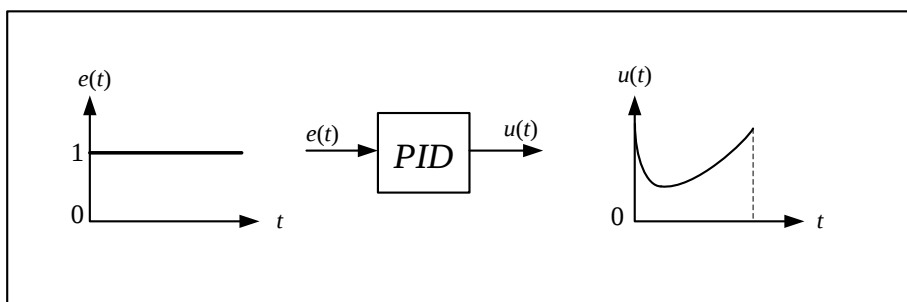
ผลตอบสนอง วงปิด (Closed- Loop Response)	ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)	การพุ่งเกิน (Overshoot)	ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time)	ความ ผิดพลาดใน สถานะอยู่ตัว (Steady-state error)	เสถียรภาพ (Stability)
K_p เพิ่ม	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น เล็กน้อย	ลดลง	ไม่ปรับปรุง
K_I เพิ่ม	ลดลงเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลงมาก	ไม่ปรับปรุง
K_D เพิ่ม	ลดลงเล็กน้อย	ลดลง	ลดลง	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ปรับปรุงดี ขึ้น

2.2.4 การควบคุมแบบสัดส่วน – ปริพันธ์ – อนุพันธ์ (ตัวควบคุมพีไอดี)

เมื่อผู้ใช้งานได้นำการควบคุมแบบสัดส่วน การควบคุมแบบปริพันธ์ และการควบคุมแบบอนุพันธ์ มาใช้ประโยชน์พร้อมกัน จะเกิดวิธีการควบคุมและตัวชดเชยที่เรียกว่า “การควบคุมแบบพีไอดี” และ “ตัวควบคุมพีไอดี” ตามลำดับ ทำให้ได้รับผลดีในการชดเชยระบบ (พลานต์) ซึ่งระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีเป็นระบบแบบป้อนกลับ และสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีจะเกิดจากการนำสัญญาณควบคุมของหน่วยสัดส่วน สัญญาณควบคุมของหน่วยปริพันธ์ และสัญญาณควบคุมของหน่วยอนุพันธ์ มารวม (บวก) กันในเวลาปัจจุบัน กล่าวคือ

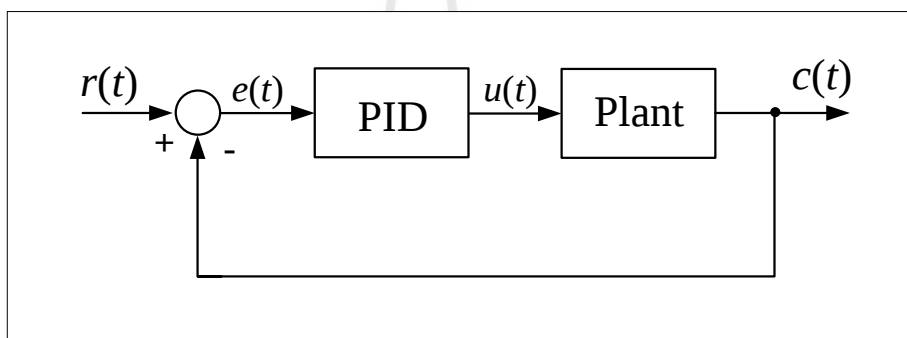
$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

และตัวควบคุมพีไอดีมีฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ (2.1) เมื่อความผิดพลาดคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีจะแสดงได้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพีไอดีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

ตัวควบคุมพีไอดี จะเพิ่มซีโรในจำนวน 2 ตัวและเพิ่มโพลในจำนวน 1 ตัว นอกจากนี้ระบบมีชนิดเพิ่มขึ้น 1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีแสดงได้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี

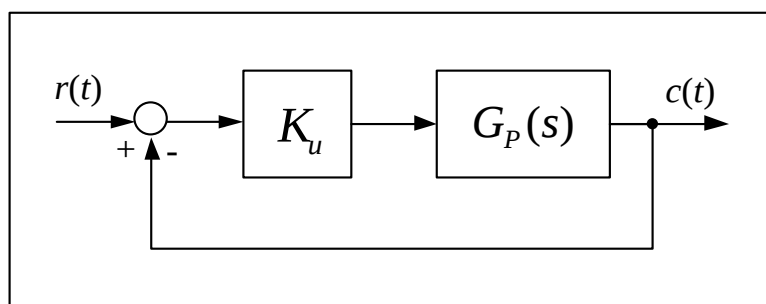
2.3 ขั้นตอนการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดี

การใช้ผลตอบสนองของระบบวงปิดมาปรับจูนตัวควบคุมพีไอดี เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมอย่างแพร่หลาย และการปรับจูนดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้งานได้จริงในกรณีที่ทราบแบบจำลอง ของพลานต์ นอกจากนี้ผู้ใช้งานสามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้ ตัวควบคุมพีไอดีมี ฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.9)$$

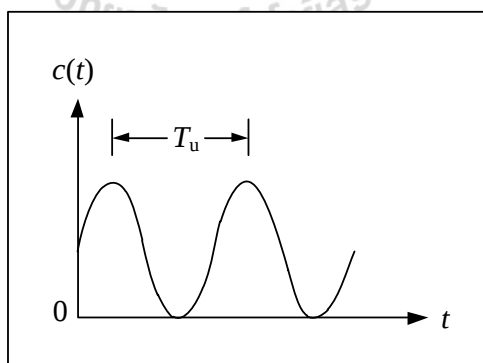
โดยที่ $K_I = (K_P / T_i)$, $K_D = K_P T_d$, T_i คือค่าคงที่เวลาในหน่วยปริพันธ์และ T_d คือค่าคงที่เวลาในหน่วยอนุพันธ์ กฎการปรับจูนได้แสดงในตารางที่ 2.1 และการใช้คอมพิวเตอร์ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี มีขั้นตอนดังนี้

1. นำตัวควบคุมแบบสัดส่วน (ตัวควบคุมพี) ที่มีค่าเกน K_u ต่ำ ๆ มาเชื่อมต่อเข้ากับพลานต์ $G_P(s)$ ที่ทราบฟังก์ชันถ่ายโอนในลักษณะของระบบแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วย (unity-feedback system) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยที่ใช้ตัวควบคุมพี

2. กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย และปรับเปลี่ยน (เพิ่ม) ค่าเกน (อัตราขยาย) K_u จนได้ผลตอบสนองที่เกิดการแกว่งที่มีขนาดคงตัว ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีการแกว่งคงตัว

3. บันทึกค่าเกนวิกฤต (อัตราขยายวิกฤต) K_u และวัดคาบเวลาวิกฤตของการแกว่ง T_u จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี

ขั้นตอนการปรับจูนดังกล่าวจะนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตที่มีการประวิงเวลาหรือระบบพลวัตอันดับสามและระบบพลวัตที่มีอันดับมากกว่าสาม ขั้นตอนการปรับจูนนี้ไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยระบบหรือพลาเน็ตที่มีตัวอินทิเกรต ระบบอันดับหนึ่ง หรือระบบอันดับสองได้ เพราะเมื่อเพิ่มค่าเกน K_u ระบบที่กล่าวถึงนี้ไม่สามารถให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีการแกว่งคงตัวได้

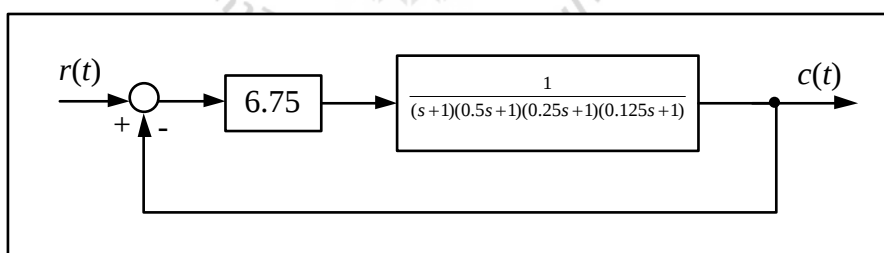
2.4 ตัวอย่างการออกแบบ

หัวข้อนี้จะอธิบายตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 1 พลาเน็ต ดังต่อไปนี้

พลาเน็ต 1: เป็นพลาเน็ตที่ไม่มีซีโรและมีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบที่แตกต่างกัน 4 ค่า พลาเน็ตดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

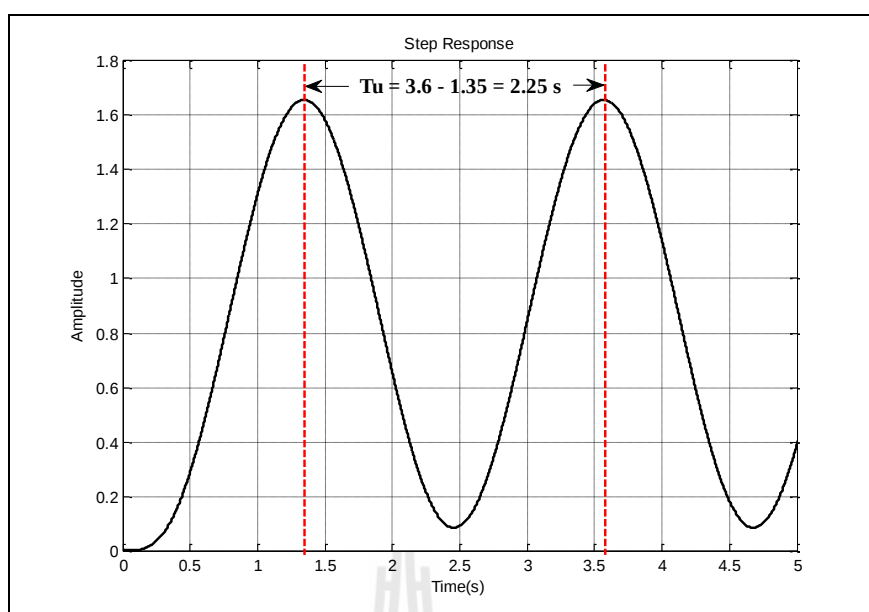
$$G_{P1}(s) = \frac{1}{(s+1)(\beta s+1)(\beta^2 s+1)(\beta^3 s+1)}, \quad \beta = 0.5$$

ขั้นตอนที่ 1 นำตัวควบคุมแบบสัดส่วน (ตัวควบคุมพี) ที่มีค่าเกน K_u ต่ำ ๆ มาเชื่อมต่อเข้ากับพลาเน็ต 1 ในลักษณะของระบบแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยที่แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต 1 ในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย และเพิ่มค่าเกน (อัตราขยาย) K_u เมื่อ $K_u = 6.75$ ผลตอบสนองจะเกิดการแกว่งที่มีขนาด (แอมพลิจูด) คงตัวและมีคาบเวลา $T_u = 2.25$ วินาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองของระบบวงปิดในสภาวะแกว่งคงตัว

ขั้นตอนที่ 3 บันทึกค่าเกณฑ์วิกฤต (อัตราขยายวิกฤต) $K_u = 6.75$ และคาบเวลาวิกฤต $T_u = 2.25$ วินาที จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกณฑ์) ของตัวควบคุมพีไอดีซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 2.3

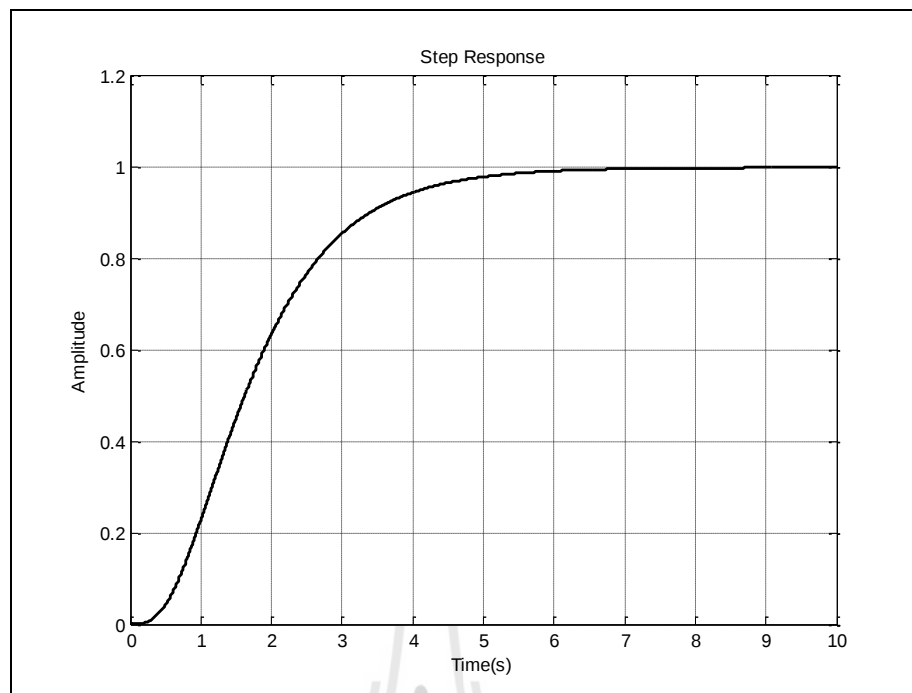
ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)

กฎการ ปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	4.0500	3.6000	1.1391
IAE	4.7250	5.2500	1.5947
SOR	2.2275	1.9800	1.6539
NOR	1.3500	1.2000	1.0024
ISTWE	3.4358	0.3937	0.9663

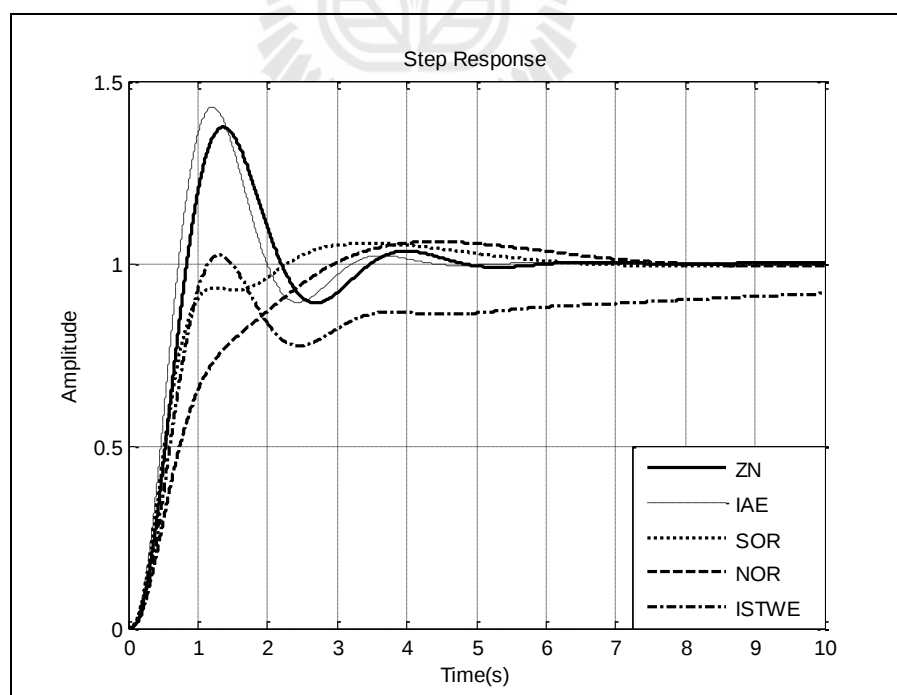
ตารางที่ 2.4 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลานต์ 1)

กฎการ ปรับจูน	ฟังก์ชันถ่ายโอน โพล และซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี	
ZN	วงปิด	$\frac{1.139s^2 + 4.05s + 3.6}{0.01563s^5 + 0.2344s^4 + 1.094s^3 + 3.014s^2 + 5.05s + 3.6}$
	ซีโร	-1.791, -1.7647
	โพล	-9.3527, -0.8963 ± j2.3932, -1.9257 ± j0.2499
IAE	วงปิด	$\frac{1.595s^2 + 4.725s + 5.25}{0.01563s^5 + 0.2344s^4 + 1.094s^3 + 3.47s^2 + 5.725s + 5.25}$
	ซีโร	-1.4812 ± j1.0477
	โพล	-9.821, -1.1476 ± j2.6898, -1.4403 ± j1.3874
SOR	วงปิด	$\frac{1.654s^2 + 2.2275s + 1.98}{0.01563s^5 + 0.2344s^4 + 1.094s^3 + 3.53s^2 + 3.228s + 1.98}$
	ซีโร	-0.6734 ± j0.8624
	โพล	-10.09, -1.9402 ± j3.4538, -0.5136 ± j0.7323
NOR	วงปิด	$\frac{1.0024s^2 + 1.35s + 1.2}{0.01563s^5 + 0.2344s^4 + 1.094s^3 + 2.877s^2 + 2.35s + 1.2}$
	ซีโร	-0.6734 ± j0.8624
	โพล	-9.5044, -2.276 ± j2.7756, -0.47 ± j0.6371
ISTWE	วงปิด	$\frac{0.9663s^2 + 3.4358s + 0.3937}{0.01563s^5 + 0.2344s^4 + 1.094s^3 + 2.841s^2 + 4.436s + 0.4}$
	ซีโร	-3.4371, -0.1185
	โพล	-9.1528, -3.5685, -1.09 ± j2.6434, -0.0958

เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ดังนี้



รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 1)



รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)

ตารางที่ 2.5 สมรรถนะของผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 1)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	2.7	5.02	0	1	16.6	180
ZN	0.527	4.42	37.3	1	12.3	35.2
IAE	0.451	3.79	42.9	1	11.6	37.7
SOR	0.767	5.33	5.45	1	16.0	82.7
NOR	1.93	6.59	5.96	1	20.3	76.0
ISTWE	0.701	25.1	2.26	1	14.2	55.3

เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.14 รูปที่ 2.15 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในตารางที่ 2.3 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 2.5 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ ZN ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองทางโดเมนเวลาเร็วขึ้น โดยผลตอบสนองมีช่วงเวลาดำเนินเท่ากับ 0.527 วินาที ซึ่งน้อยกว่า 2.7 วินาที (ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) และมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่า ($t_s = 4.42$ วินาที) แต่ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินมากถึง 37.3 % ในขณะที่ส่วนเฟสอัตรายาย (GM) และส่วนเฟส (PM) มีค่าเท่ากับ 12.3 dB และ 35.2 องศา ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ดี เพราะส่วนเฟสมีค่าน้อย ถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก อาจทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ IAE ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองคล้ายกับเกณฑ์ของ ZN กล่าวคือผลตอบสนองมีช่วงเวลาดำเนิน เวลาเข้าที่ การพุ่งเกิน ส่วนเฟส และส่วนเฟสอัตรายายที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ดี และถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก อาจทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ SOR ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนอง ที่มีช่วงเวลาดำเนินเท่ากับ 0.767 วินาที ซึ่งน้อยกว่า 2.7 วินาที (ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) แต่ยังมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่า ($t_s = 5.33$ วินาที) แต่ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของ ZN และ IAE กล่าวคือมีการพุ่งเกิน 5.45 % ในขณะที่ส่วนเฟสอัตรายายและส่วนเฟสมีค่าเท่ากับ 16 dB และ 82.7 องศา ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ NOR ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองช้ากว่าทุกเกณฑ์การปรับจูน กล่าวคือผลตอบสนองมีช่วงเวลาดำเนินเท่ากับ 1.93 วินาที แต่มีช่วงเวลาเข้าที่นานมาก ($t_s = 6.59$ วินาที) แต่มีการพุ่งเกินน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของ ZN และ IAE ในขณะที่ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสมีค่าเท่ากับ 20.3 dB และ 76 องศา ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ ISTWE ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาดำเนินเท่ากับ 0.701 วินาที ซึ่งน้อยกว่า 2.7 วินาที (ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) แต่ยังมีช่วงเวลาเข้าที่นานมาก ($t_s = 25.1$ วินาที) ซึ่งนานกว่าทุกเกณฑ์การปรับจูน แต่วิธีนี้มีการพุ่งเกินน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับทุกเกณฑ์การปรับจูน ในขณะที่ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสมีค่าเท่ากับ 14.2 dB และ 55.3 deg ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

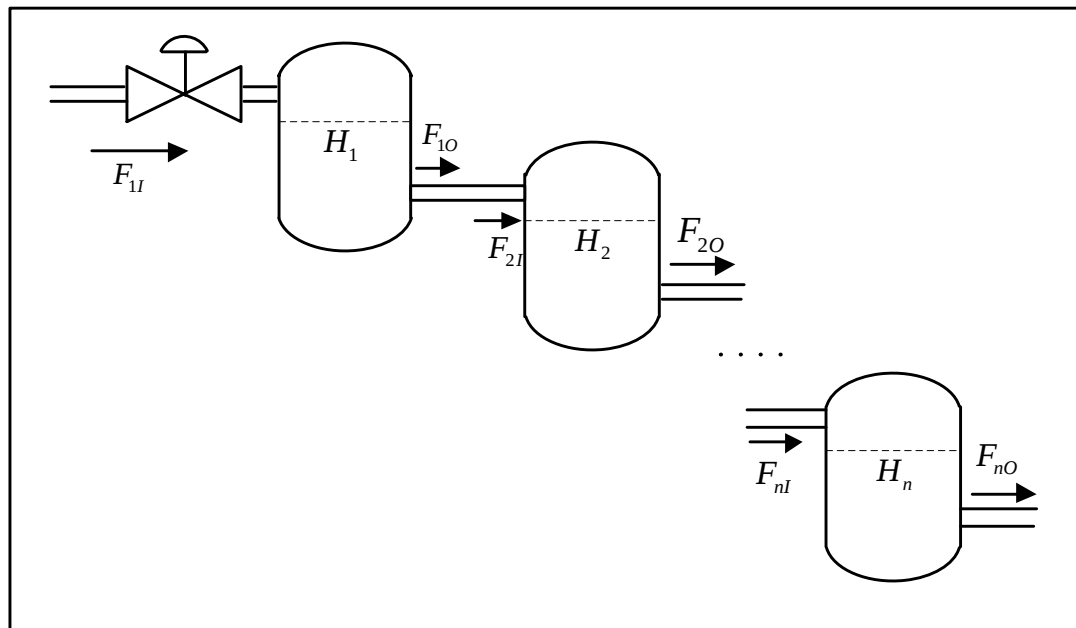
จากผลตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อมีการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีทั้ง 5 เกณฑ์สำหรับพลาเน็ต 1 อาจจัดกลุ่มแนวทางการควบคุมดังกล่าวเป็น 2 กลุ่มคือ การควบคุมแบบตึง (tight control) และการควบคุมแบบเรียบ (smooth control) เกณฑ์ของ ZN และ IAE จะจัดอยู่ในกลุ่มการควบคุมแบบตึง การควบคุมแบบตึงหมายความว่า จะให้ความสำคัญกับช่วงเวลาดำเนินและช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่า ซึ่งมีความสำคัญมากกว่าการพุ่งเกิน เกณฑ์ของ SOR, NOR และ ISTWE จัดอยู่ในกลุ่มการควบคุมแบบเรียบ ซึ่งการควบคุมแบบเรียบหมายความว่า จะให้ความสำคัญต่อการพุ่งเกินในผลตอบสนองว่าจะต้องมีปริมาณน้อย ซึ่งยอมให้ระบบมีช่วงเวลาดำเนินและช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าได้

2.5 ผลการจำลองสถานการณ์

หัวข้อนี้กล่าวถึงการปรับจูนค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่หาค่าพลาเน็ตควบคุมยาก 6 รูปแบบ ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม และผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย และพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ เนื่องจากขั้นตอนการปรับจูนในแต่ละเกณฑ์เป็นขั้นตอนที่ซ้ำกัน การอธิบายในหัวข้อนี้จึงไม่มีรายละเอียดบางส่วน

เมื่อพิจารณาพลาเน็ตควบคุมยากที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม พลาเน็ต 2 คือระบบถังทรงกระบอกที่มีอากาศอยู่ภายใน (cylinder atmospheric tanks) ซึ่งบรรจุของเหลวที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศ ระบบถังทรงกระบอกดังกล่าวมีจำนวน n ใบที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม (J.E. Normey-Rico and E.F. Camacho, 2007) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.16 ถึงที่ i จ่ายเอาต์พุต (F_{iO}) ถึงอินพุตของถังที่ $i + 1$

$(F_{(i+1)I})$ (ถังที่ $i + 1$ มีอินพุตที่ได้รับจากเอาต์พุตของถังที่ i) หรือ $F_{(i+1)I} = F_{iO}$ โดยที่ $F_{(i+1)I}$ คืออัตราการไหลของอินพุตของถังที่ $i + 1$ และ F_{iO} คืออัตราการไหลของเอาต์พุตของถังที่ i ซึ่งมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s)



รูปที่ 2.16 ระบบถังทรงกระบอกบรรจุของเหลวจำนวน n ถังที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม

เมื่อถังหรือภาชนะในแต่ละถังมีของเหลวเพิ่มขึ้นหรือลดลงอยู่ในระดับใกล้เคียงกับจุดทำงาน (Operating point) การเปลี่ยนแปลงระดับของของเหลว (H_i) (H_i มีหน่วยเป็นเมตร (m)) มีพลวัตที่อธิบายเป็นแบบจำลองของระบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$A \frac{dH_i}{dt} = F_{iI} - F_{iO} \quad (2.10)$$

$$F_{iO} = KH_i \quad (2.11)$$

โดยที่ t คือเวลาที่มีหน่วยเป็นวินาที (s) A คือพื้นที่ด้านล่างของถังหรือภาชนะ (A มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)) ซึ่งถังแต่ละใบต้องมีรูปทรง มิติ หรือลักษณะทางกายภาพเหมือนกันทุกถัง และ K คือค่าคงที่ที่มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที (m^2/s) ค่าคงที่ K จะขึ้นอยู่กับรูปทรง มิติ หรือ

ลักษณะทางกายภาพของถัง ถังที่ i มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอินพุตและระดับของเหลวที่อธิบายเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$H_i(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{ii}(s) \quad (2.12)$$

โดยที่ $\tau = (A / K)$ คือค่าเวลาคงตัวของถังหรือภาชนะที่มีหน่วยเป็นวินาที (s) ถังที่ 1 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$H_1(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{1i}(s) \quad (2.13)$$

ถังที่ 2 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$H_2(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{2i}(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{1o}(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} K H_1(s) \quad (2.14)$$

ต่อมาแทนค่า $H_1(s)$ จากสมการที่ (2.13) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ว่า

$$H_2(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \times \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{1i}(s) = \frac{(1/K)}{(\tau s + 1)^2} F_{1i}(s) \quad (2.15)$$

จากนั้นดำเนินการซ้ำ เพื่อเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s)$ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $F_{1i}(s)$ และ $H_n(s)$ ได้ดังนี้

$$H_n(s) = G(s)F_{1i}(s) = \frac{K_e}{(\tau s + 1)^n} F_{1i}(s) \quad (2.16)$$

โดยที่ $K_e = (1 / K)$ กำหนดให้ถังทุกใบมีค่าเวลาคงตัวเท่ากัน ถ้า $n = 4$, $K = 1$ ตารางเมตรต่อวินาที และ $\tau = 1$ วินาที จะได้ว่าระบบถังบรรจุของเหลว 4 ถังมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)^4} \quad (2.17)$$

ดังนั้นพลาเน็ต 2 มีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดคือ

$$G_{P2}(s) = \frac{1}{(s+1)^4} = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1}$$

จากผลการปรับจูน บันทึกลำค่าอัตราขยายวิกฤตได้ $K_u = 4$ และคาบเวลาวิกฤต $T_u = 6.27$ วินาที จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 2.6

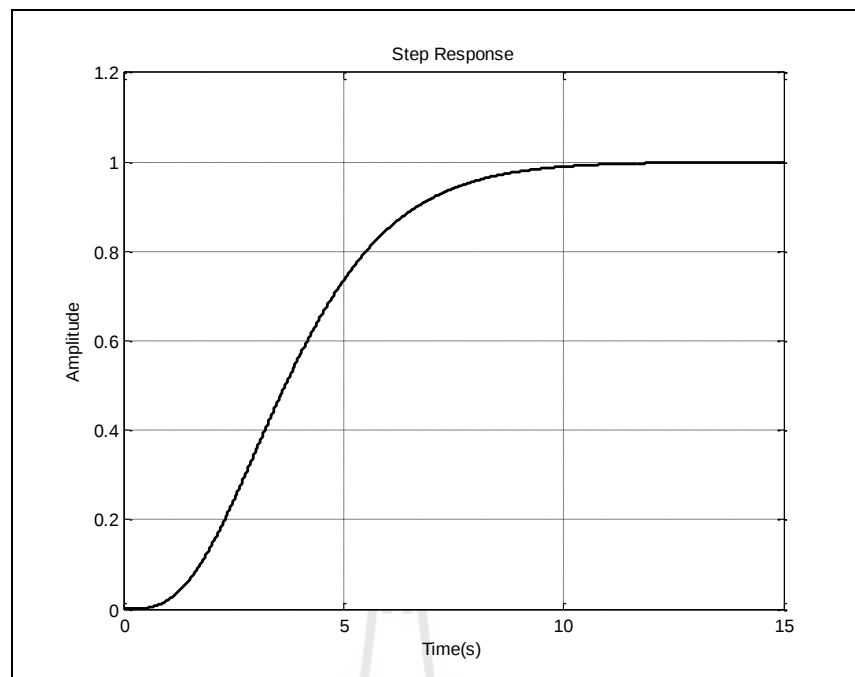
ตารางที่ 2.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2)

กฎการ ปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	2.4000	0.7656	1.881
IAE	2.8000	1.1164	2.6334
SOR	1.3200	0.4211	2.7312
NOR	0.8000	0.2552	1.6553
ISTWE	2.0306	0.2328	1.5957

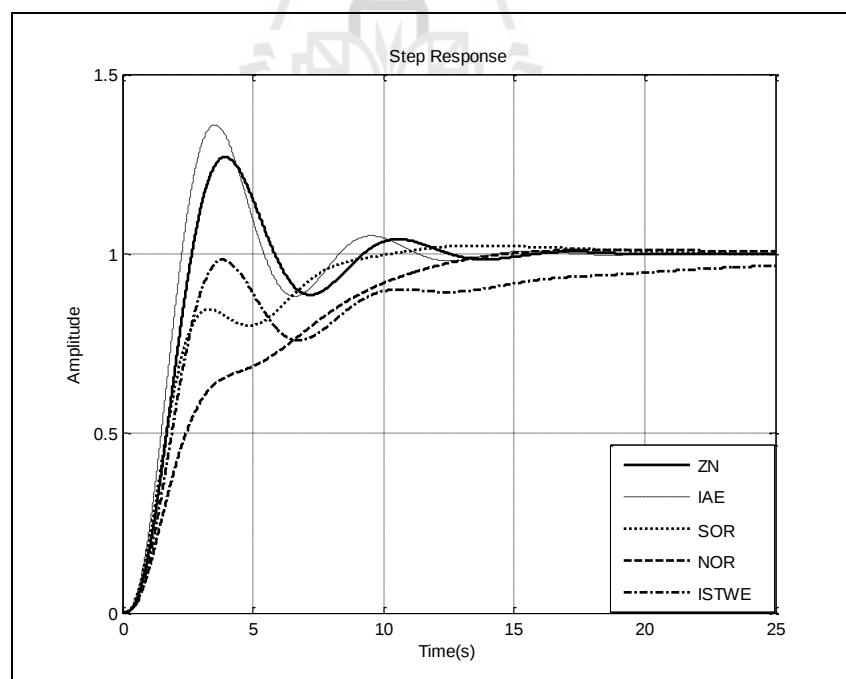
ตารางที่ 2.7 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2)

กฎการ ปรับจูน	ฟังก์ชันถ่ายโอน โพล และซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี	
ZN	วงปิด	$\frac{1.881s^2 + 2.4s + 0.7656}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 5.81s^2 + 3.4s + 0.7656}$
	ซีโร	$-0.638 \pm j0.0051$
	โพล	$-2.2024, -0.3 \pm j0.941, -0.69, -0.515$
IAE	วงปิด	$\frac{2.6334s^2 + 2.8s + 1.1164}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 6.633s^2 + 3.8s + 1.1164}$
	ซีโร	$-0.5316 \pm j0.376$
	โพล	$-2.42, -0.3115 \pm j1.043, -0.48 \pm j0.4$
SOR	วงปิด	$\frac{2.7312s^2 + 1.32s + 0.4211}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 6.731s^2 + 2.32s + 0.4211}$
	ซีโร	$-0.2417 \pm j0.31$
	โพล	$-2.55, -0.513 \pm j1.232, -0.21 \pm j0.22$
NOR	วงปิด	$\frac{1.6553s^2 + 0.8s + 0.2552}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 5.655s^2 + 1.8s + 0.2552}$
	ซีโร	$-0.2417 \pm j0.31$
	โพล	$-2.335, -0.624 \pm j1.063, -0.21 \pm j0.168$
ISTWE	วงปิด	$\frac{1.5957s^2 + 2.0306s + 0.2328}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 5.596s^2 + 3.036s + 0.2328}$
	ซีโร	$-1.149, -0.127$
	โพล	$-2.09, -0.3353 \pm j0.98, -1.15, -0.1$

เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ดังนี้



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 2)



รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2)

ตารางที่ 2.8 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 2)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	4.94	9.08	0	1	12.00	180.0
ZN	1.62	11.8	27	1	9.66	41.9
IAE	1.38	12.7	35.9	1	8.86	37.0
SOR	6.03	15.3	2.26	1	13.8	94.0
NOR	8.51	12.9	1.15	1	18.2	85.7
ISTWE	2.16	30.6	0	1	16.5	62.3

เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.17 รูปที่ 2.18 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในตารางที่ 2.6 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 2.8 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ ZN ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่มีช่วงเวลายื่นเท่ากับ 1.62 วินาที ซึ่งน้อยกว่า 4.94 วินาที (ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) แต่มีช่วงเวลายื่นที่นานกว่า ($t_s = 11.8$ วินาที) อีกทั้งระบบมีการพุ่งเกินสูงถึง 27 % ในขณะที่ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสมีค่าเท่ากับ 9.66 dB และ 41.9 deg ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ไม่ค่อยดี เนื่องจากส่วนเพื่อเฟสมีค่าน้อย

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ IAE ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองคล้าย ๆ กับเกณฑ์ของ ZN กล่าวคือมีช่วงเวลายื่น เวลายื่นที่ การพุ่งเกิน ส่วนเพื่อเฟส และส่วนเพื่ออัตราขยายที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ดี เนื่องจากส่วนเพื่อเฟสมีค่าน้อย และถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก อาจทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ SOR และ NOR ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่คล้ายกัน กล่าวคือ ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลายื่นและช่วงเวลายื่นที่นานกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต อีกทั้งสองวิธีดังกล่าวมีการพุ่งเกินน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของ ZN และ IAE ในขณะที่ทั้งสองวิธีนี้มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่สูง ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก สามารถทนต่อการรบกวนจากภายนอกได้ดี

ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากเกณฑ์การปรับจูน ISTWE จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีช่วงเวลายื่น 2.16 วินาที ซึ่งน้อยกว่า 4.94 วินาที (ผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต)

แต่มีช่วงเวลาที่ 30.6 วินาที ซึ่งนานกว่าช่วงเวลาที่ของผลตอบสนองที่เกิดจากเกณฑ์การปรับ
จูนทุกเกณฑ์ และผลตอบสนองไม่มีการพุ่งเกิน ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ให้ส่วนเพื่อ
อัตราขยายและส่วนเฟสที่มีค่าเท่ากับ 16.5 dB และ 62.3 deg ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าระบบ
วงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีมาก นั่นคือระบบวงปิดมีความทนทานต่อการรบกวนจากภายนอกได้ดี

พลาเน็ต 3: เป็นพลาเน็ตที่มีซีโรอยู่ทางด้านขวามือของระนาบเอส (ซีโรเป็นจำนวนจริงบวก) ทำให้
ให้ผลตอบสนองเกิดการพุ่งต่ำ (undershoot) และมีโพลเป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 3 ค่า พลาเน็ต
ดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{P3}(s) = \frac{-\alpha s + 1}{(s+1)^3} = \frac{-0.5s + 1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

จากผลการปรับจูน บันทึกค่าอัตราขยายวิกฤตได้ $K_u = 3.2$ และคาบเวลาวิกฤต
 $T_u = 5.31$ วินาที จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่ง
แสดงได้ในตารางที่ 2.9

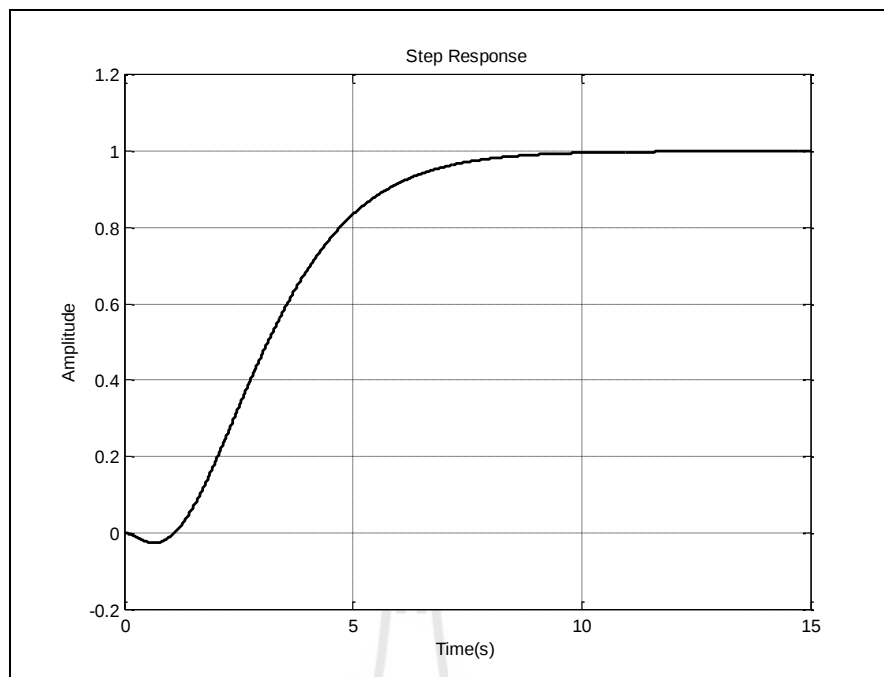
ตารางที่ 2.9 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3)

กฎการ ปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	1.9200	0.7232	1.2744
IAE	2.2400	1.0546	1.7842
SOR	1.0560	0.3977	1.8504
NOR	0.6400	0.2411	1.1215
ISTWE	1.6288	0.3369	1.0811

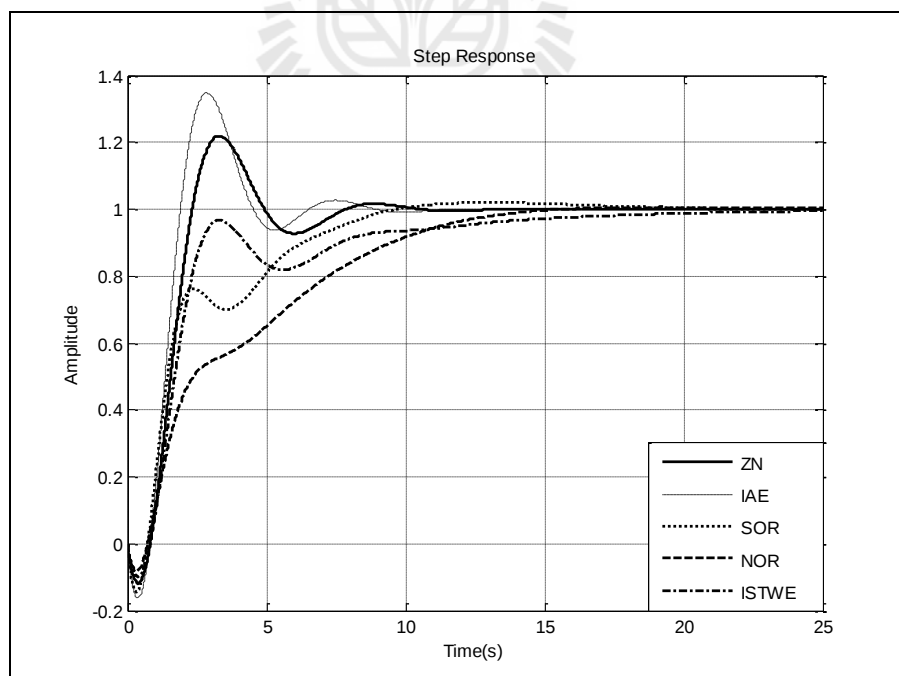
ตารางที่ 2.10 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3)

กฎการ ปรับจูน	ฟังก์ชันถ่ายโอน โพล และซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี	
ZN	วงปิด	$\frac{-0.6372s^3 + 0.3144s^2 + 1.558s + 0.7232}{s^4 + 2.363s^3 + 3.314s^2 + 2.558s + 0.7232}$
	ซีโร	2.00, $-0.7533 \pm j0.0053$
	โพล	$-0.4758 \pm j1.122$, -0.8091 , -0.6022
IAE	วงปิด	$\frac{-0.8921s^3 + 0.6642s^2 + 1.731s + 1.055}{s^4 + 2.108s^3 + 3.664s^2 + 2.713s + 1.055}$
	ซีโร	2.00, $-0.6277 \pm j0.444$
	โพล	$-0.52 \pm j1.3286$, $-0.534 \pm j0.483$
SOR	วงปิด	$\frac{-0.9252s^3 + 1.322s^2 + 0.8572s + 0.3977}{s^4 + 2.075s^3 + 4.322s^2 + 1.857s + 0.3977}$
	ซีโร	2.00, $-0.2853 \pm j0.3654$
	โพล	$-0.8 \pm j1.674$, $-0.244 \pm j0.2376$
NOR	วงปิด	$\frac{-0.5607s^3 + 0.8015s^2 + 0.5194s + 0.2411}{s^4 + 2.439s^3 + 3.801s^2 + 1.519s + 0.2411}$
	ซีโร	2.00, $-0.2853 \pm j0.3655$
	โพล	$-0.9753 \pm j1.3453$, $-0.2443 \pm j0.1662$
ISTWE	วงปิด	$\frac{-0.5405s^3 + 0.2667s^2 + 1.46s + 0.3369}{s^4 + 2.459s^3 + 3.267s^2 + 2.46s + 0.3369}$
	ซีโร	2.00, -1.26 , -0.2475
	โพล	$-0.52 \pm j1.143$, -1.2482 , -0.1712

เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ดังนี้



รูปที่ 2.19 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 3)



รูปที่ 2.20 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3)

ตารางที่ 2.11 สมรรถนะของผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 3)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	4.10	7.91	0	1	10.1	180
ZN	1.14	7.35	21.9	1	7.59	46.3
IAE	0.85	7.89	34.7	1	6.17	39.6
SOR	5.46	8.61	2.02	1	8.57	87.3
NOR	8.52	13.0	0.616	1	12.9	83.5
ISTWE	1.64	16.5	0	1	9.02	68.2

เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.19 รูปที่ 2.20 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในตารางที่ 2.9 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 2.11 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ ZN ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองทางโดเมนเวลาเร็วขึ้น โดยผลตอบสนองมีช่วงเวลาดำเนินการเท่ากับ 1.14 วินาที ซึ่งน้อยกว่า 4.10 วินาที (ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) และมีช่วงเวลาที่สั้นกว่า ($t_s = 7.35$ วินาที) แต่ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินมากถึง 21.9 % ในขณะที่ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสมีค่าเท่ากับ 7.59 dB และ 46.3 deg ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ค่อยดี เนื่องจากส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสมีค่าน้อย ถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก อาจทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนด้วยเกณฑ์ของ IAE ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองทางโดเมนเวลาเร็วขึ้น โดยผลตอบสนองมีช่วงเวลาดำเนินการเท่ากับ 0.85 วินาที ซึ่งน้อยกว่า 4.10 วินาที (ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) และมีช่วงเวลาที่สั้นกว่า ($t_s = 7.89$ วินาที) แต่ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินมากถึง 34.7 % ซึ่งมากกว่าทุกเกณฑ์การปรับจูน ในขณะที่ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสยังมีค่าน้อย ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ค่อยดี ถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก อาจทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากกฎการปรับจูน SOR และ NOR จะทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่คล้ายกัน (คล้ายกับเกณฑ์การปรับจูน SOR และ NOR ที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 2)

ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากเกณฑ์การปรับจูน ISTWE จะทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่คล้ายกับผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 2 (คล้ายกับเกณฑ์การปรับจูน ISTWE ที่ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพลาเน็ต 2)

ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากการเกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์ จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งต่ำ เพราะระบบวงปิดมีชิโรที่เป็นจำนวนจริงบวกที่แสดงได้ในตารางที่ 2.10

พลาเน็ต 4: เป็นพลาเน็ตอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา พลาเน็ตดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

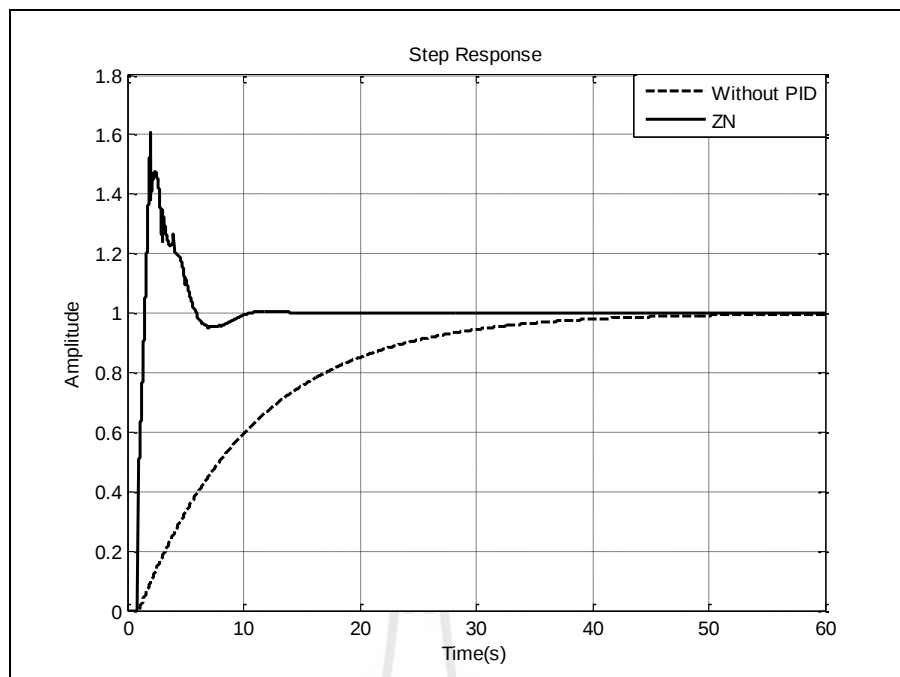
$$G_{P4}(s) = \frac{1}{(Ts+1)} e^{-s}, T = 10$$

จากผลการปรับจูน บันทึกค่าอัตราขยายวิกฤตได้ $K_u = 16.346$ และคาบเวลาวิกฤต $T_u = 3.89$ วินาที จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 2.12

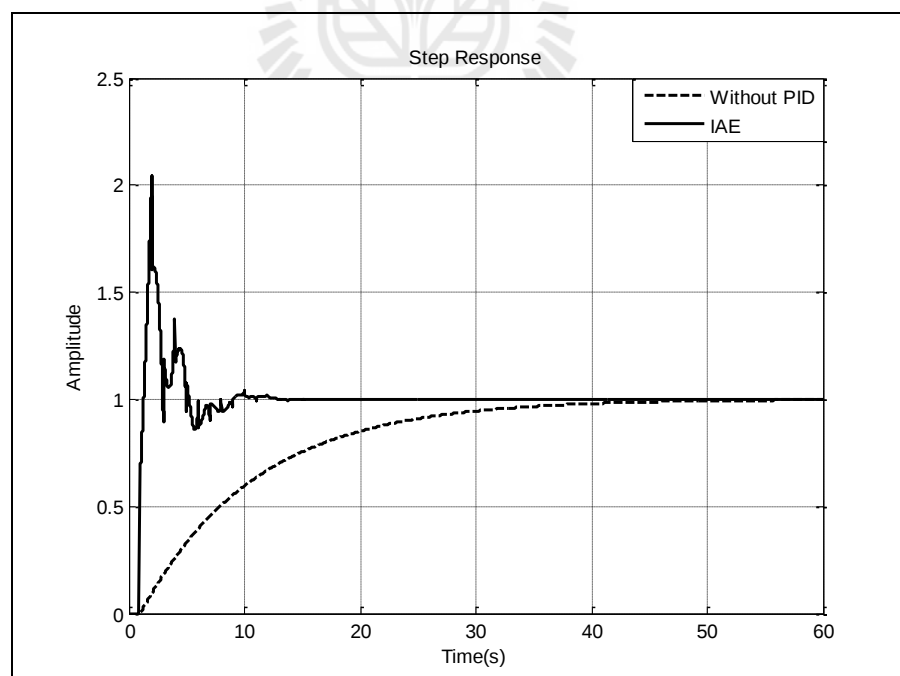
ตารางที่ 2.12 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 4)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	9.8076	5.0425	4.7689
IAE	11.4422	7.3536	6.6765
SOR	5.3942	2.7734	6.9245
NOR	3.2692	1.6808	4.1967
ISTWE	8.3201	0.0950	4.0457

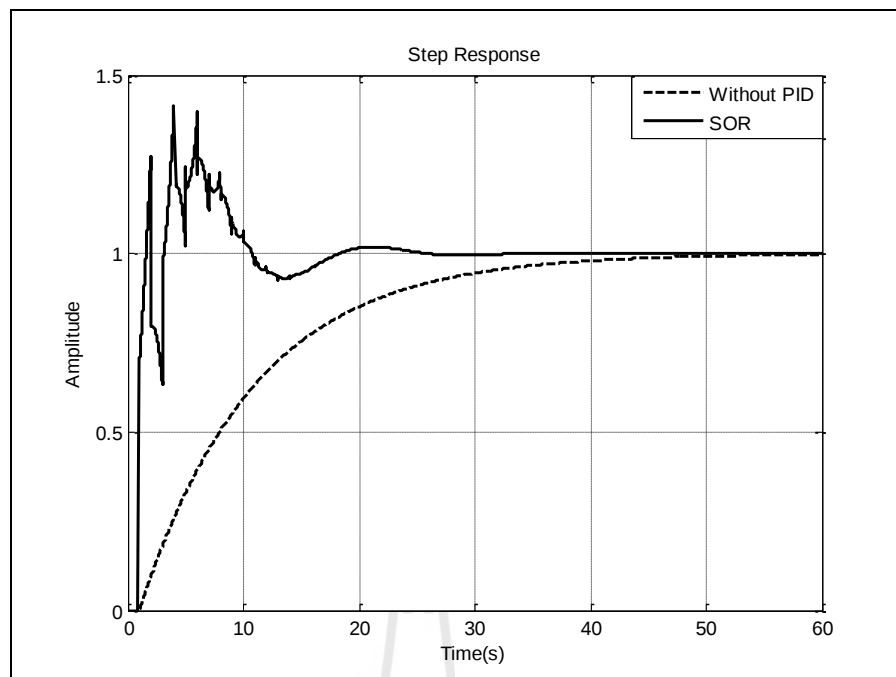
เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ดังนี้



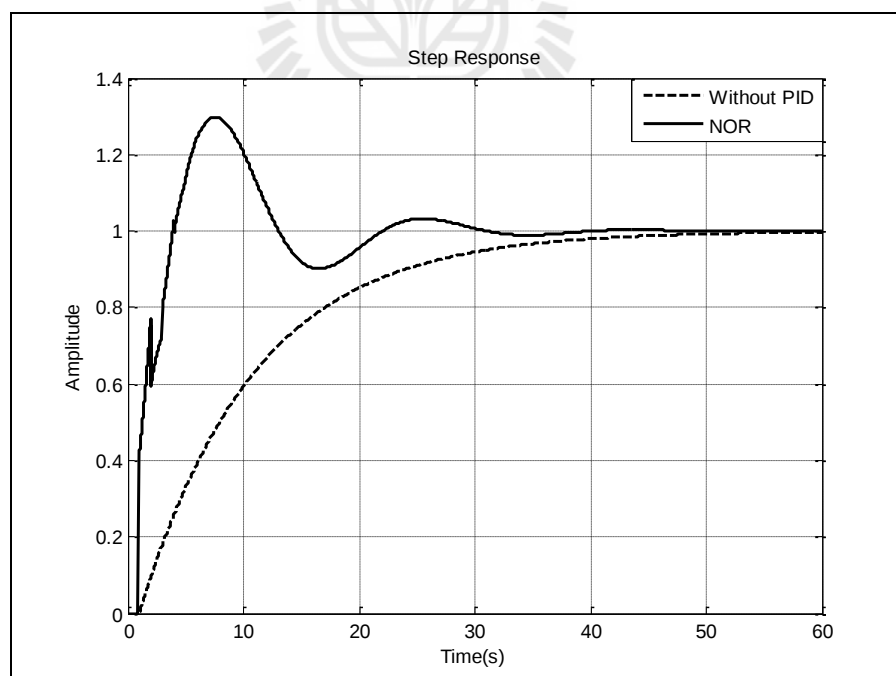
รูปที่ 2.21 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ ZN (พลาเน็ต 4)



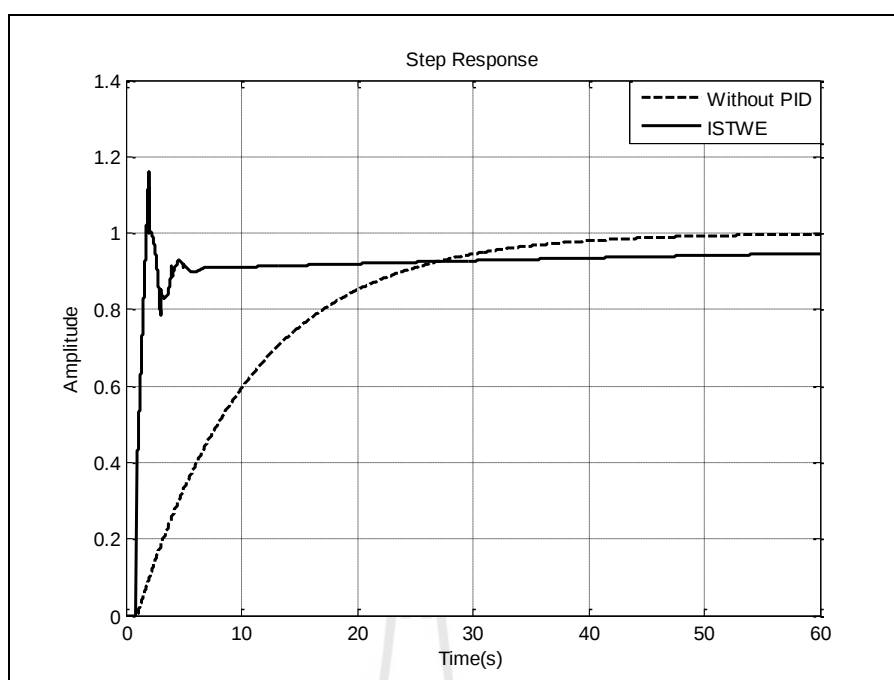
รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ IAE (พลาเน็ต 4)



รูปที่ 2.23 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ SOR (พลาเน็ต 4)



รูปที่ 2.24 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ NOR (พลาเน็ต 4)



รูปที่ 2.25 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีแบบ ISTWE (พลาเน็ต 4)

ตารางที่ 2.13 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 4)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	22.00	40.1	0	1	24.3	180
ZN	0.416	9.35	60.9	1	4.93	36.9
IAE	0.204	10.0	105	1	2.91	35.5
SOR	0.401	17.0	41.4	1	3.19	55.5
NOR	2.460	28.4	29.8	1	7.54	43.5
ISTWE	0.647	154	16.2	1	5.63	67.9

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 4 ซึ่งเป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.21 – รูปที่ 2.25 สมรรถนะของผลตอบสนองแสดงได้ในตารางที่ 2.13 จะได้ว่าทุกเกณฑ์การปรับจูน ส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่คล้ายกัน กล่าวคือผลตอบสนองมีช่วงเวลารั้งขึ้นและเวลาเข้าที่สั้นกว่า (ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) ยกเว้นกรณีเกณฑ์ของ ISTWE ซึ่งมีช่วงเวลารั้งขึ้นที่นานกว่ามาก ๆ (154 วินาที > 40.1 วินาที) นอกจากนี้เกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์ให้

ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีการพุ่งเกินค่อนข้างสูงมาก (ยกเว้นเกณฑ์ของ ISTWE ที่ให้การพุ่งเกินไม่สูงมาก) เมื่อพิจารณาผลตอบสนองที่ได้จากเกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์ จะได้ว่าระบบวงปิดมีการหน่วงเวลา 1 วินาทีก่อนเริ่มเกิดผลตอบสนอง และผลตอบสนองมีลักษณะไม่เรียบ เพราะผลกระทบที่เกิดจากพจน์การประวิงเวลา (e^{-s}) ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ได้จากเกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์มีค่าน้อย กล่าวคือส่วนเพื่ออัตราขยายมีค่าน้อยกว่า 8 dB และส่วนเพื่อเฟสมีค่าน้อยกว่า 50 deg (ยกเว้นเกณฑ์การปรับจูน SOR และ ISTWE) ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ดี ถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบวงปิดอาจจะขาดเสถียรภาพได้ง่าย

พลาเน็ต 5: เป็นพลาเน็ตอันดับสองที่มีการประวิงเวลา พลาเน็ตดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

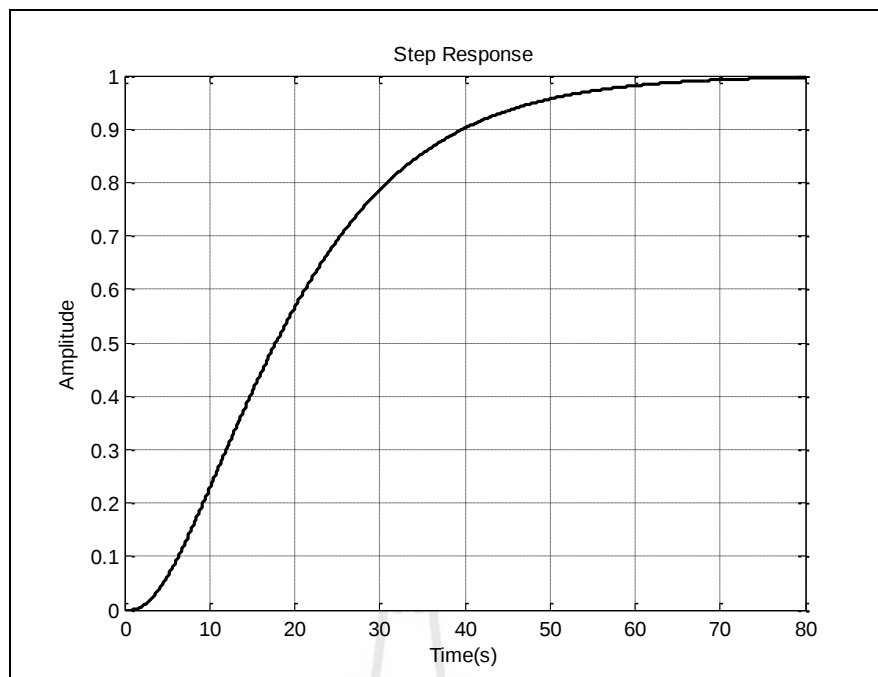
$$G_{P5}(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}, T = 10$$

จากผลการปรับจูน บันทึกค่าอัตราขยายวิกฤตได้ $K_u = 20.68$ และคาบเวลาวิกฤต $T_u = 14.1$ วินาที จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 2.14

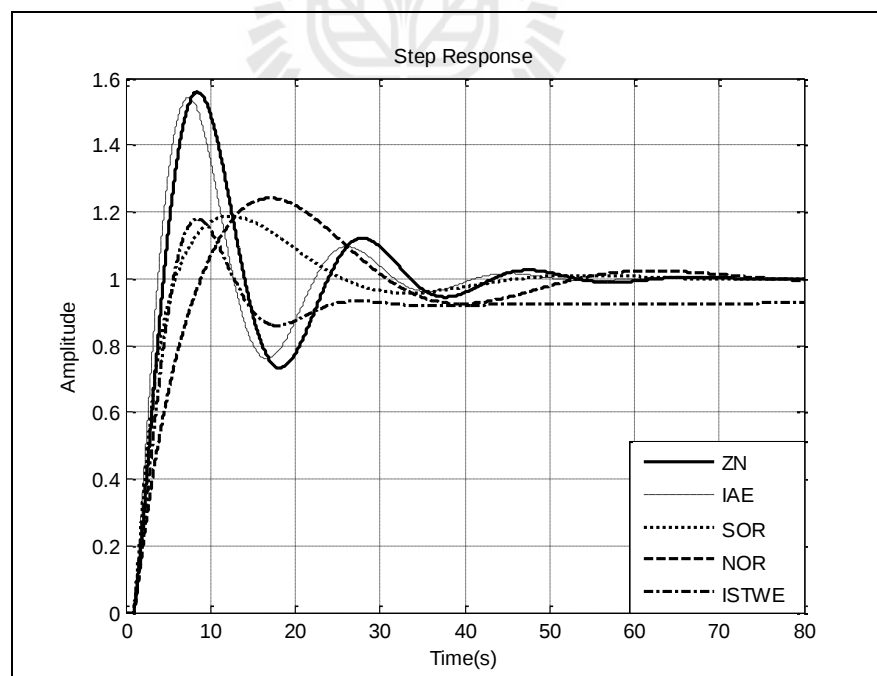
ตารางที่ 2.14 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 5)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	12.408	1.760	21.869
IAE	14.476	2.566	30.616
SOR	6.824	0.968	31.753
NOR	4.136	0.586	19.244
ISTWE	10.526	0.021	18.552

เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ดังนี้



รูปที่ 2.26 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 5)



รูปที่ 2.27 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 5)

ตารางที่ 2.15 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 5)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	33.6	59.3	0	1	26.3	180
ZN	2.69	49.7	55.8	1	15.1	23.6
IAE	2.18	39.0	54.2	1	12.9	26.2
SOR	3.49	41.2	18.7	1	13.9	61.6
NOR	5.98	66.3	24.1	1	18.2	50.1
ISTWE	3.52	786	17.9	1	16.3	44.4

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 5 เป็นระบบอันดับสองที่มีการประวิงเวลา เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.26 และรูปที่ 2.27 สมรรถนะของผลตอบสนองแสดงได้ในตารางที่ 2.15 จะได้ว่าทุกเกณฑ์การปรับจูนส่งผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาขึ้นสั้นกว่าผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม ในกรณีเกณฑ์ของ ZN IAE และ SOR ส่งผลให้ระบบวงปิดมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม สำหรับเกณฑ์ของ NOR และ ISTWE ส่งผลให้ระบบวงปิดมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม และนานกว่ามาก ๆ สำหรับเกณฑ์ของ ISTWE (786 วินาที >> 59.3 วินาที) นอกจากนี้เกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินค่อนข้างสูง เกณฑ์การปรับจูน ZN และ IAE ให้ผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินสูงมาก เกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์ให้ส่วนเพื่ออัตราขยายมีค่ามาก เกณฑ์การปรับจูน SOR และ NOR ให้ส่วนเพื่อเฟสที่มีค่ามาก ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดี เกณฑ์การปรับจูน ZN IAE และ ISTWE ให้ส่วนเพื่อเฟสที่มีค่าน้อย ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ดี ถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก ระบบวงปิดอาจจะขาดเสถียรภาพได้ง่าย

พลาเน็ต 6: เป็นพลาเน็ตที่ไม่เสถียร เพราะพลาเน็ตมีโพลที่จุดกำเนิด (มีตัวอินทิเกรต) มีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 2 ค่าที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพ และมีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบ 1 ค่าที่อยู่ไกลจากแกนจินตภาพ นอกจากนี้พลาเน็ตมีซีโรที่เป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 2 ค่า พลาเน็ตดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{P6}(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)}$$

จากผลการปรับจูน บันทึกลำอัตราขยายวิกฤตได้ $K_u = 6.045$ และคาบเวลาวิกฤต $T_u = 3.7$ วินาที จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 6)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	3.627	1.9605	1.6775
IAE	4.2315	2.8591	2.3458
SOR	1.9949	1.0783	2.4357
NOR	1.209	0.6535	1.4762
ISTWE	3.0769	0.2665	1.4231

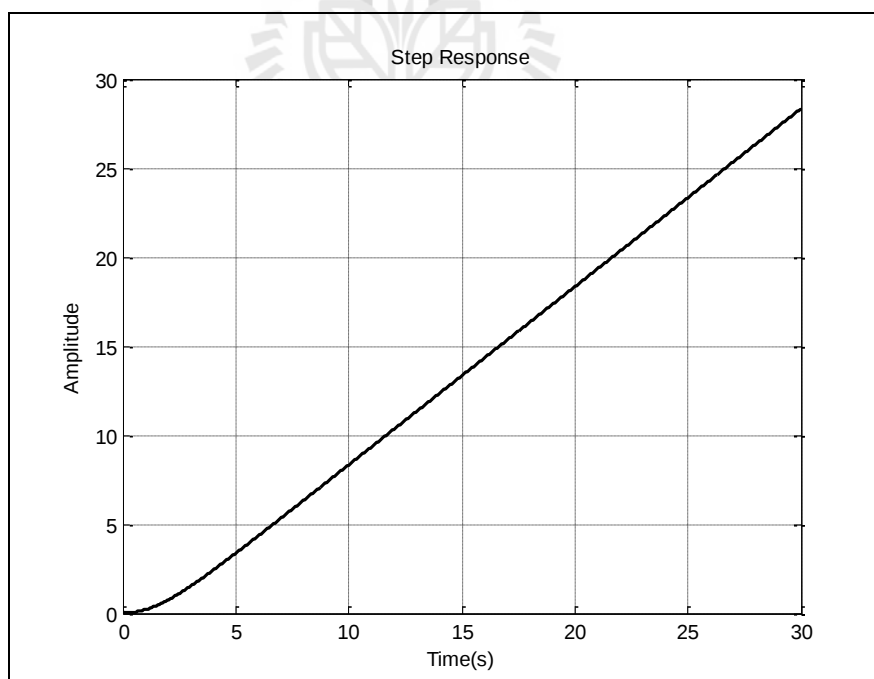
ตารางที่ 2.17 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 6)

กฎการปรับจูน	ฟังก์ชันถ่ายโอน โพล และซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี	
ZN	วงปิด	$\frac{1.678s^4 + 23.76s^3 + 106s^2 + 154.1s + 70.58}{s^5 + 39.68s^4 + 96.76s^3 + 142s^2 + 154.1s + 70.58}$
	ซีโร	-6, -6, -1.085, -1.0771
	โพล	-37.174, -0.2094 ± j1.3046, -1.0421 ± j0.0386
IAE	วงปิด	$\frac{2.349s^4 + 32.41s^3 + 138.2s^2 + 186.6s + 103}{s^5 + 40.35s^4 + 105.4s^3 + 147.2s^2 + 186.6s + 103}$
	ซีโร	-6, -6, -0.901 ± j0.637
	โพล	-37.67, -0.2686 ± j1.3605, -1.071 ± j0.5233
SOR	วงปิด	$\frac{2.436s^4 + 31.22s^3 + 112.7s^2 + 84.76s + 38.82}{s^5 + 40.44s^4 + 104.2s^3 + 148.7s^2 + 84.76s + 38.82}$
	ซีโร	-6, -6, -0.4095 ± j0.5244
	โพล	-37.78, -1.0482 ± j1.0714, -0.2798 ± j0.6157

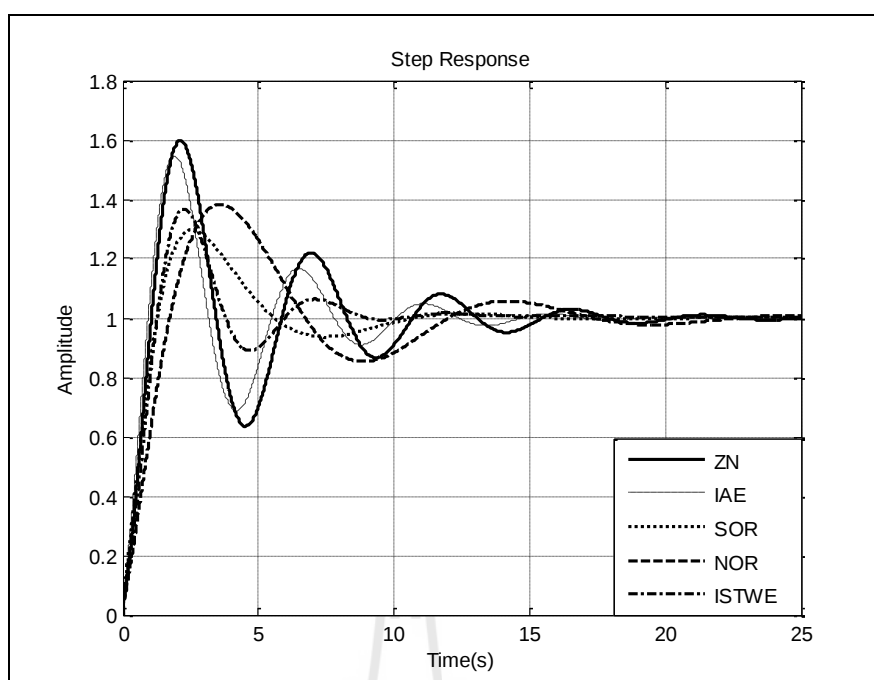
ตารางที่ 2.17 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 6) (ต่อ)

กฎการ ปรับจูน	ฟังก์ชันถ่ายโอน โพล และซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี	
NOR	วงปิด	$\frac{1.476s^4 + 18.92s^3 + 68.3s^2 + 51.37s + 23.53}{s^5 + 39.48s^4 + 91.92s^3 + 104.3s^2 + 51.37s + 23.53}$
	ซีโร	-6, -6, -0.4095 ± j0.5244
	โพล	-37.07, -1.026 ± j0.788, -0.1764 ± j0.59
ISTWE	วงปิด	$\frac{1.423s^4 + 20.15s^3 + 88.42s^2 + 114s + 9.594}{s^5 + 39.42s^4 + 93.15s^3 + 124.4s^2 + 114s + 9.594}$
	ซีโร	-6, -6, -2.0717, -0.0904
	โพล	-37, -1.5267, -0.405 ± j1.2895, -0.093

เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ดังนี้



รูปที่ 2.28 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 6)



รูปที่ 2.29 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 6)

ตารางที่ 2.18 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 6)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	-	-	-	inf	-	-
ZN	0.839	17.2	59.9	1	inf	19.2
IAE	0.76	14	54.7	1	inf	23.7
SOR	1.03	9.81	29.6	1	inf	55.9
NOR	1.37	20.3	38.2	1	inf	42.6
ISTWE	0.987	8.42	36.7	1	inf	35.6

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 6 เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 สมรรถนะของผลตอบสนองแสดงได้ในตารางที่ 2.18 จะได้ว่า ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุมมีลักษณะขาดเสถียรด้วยความเป็นระบบแบบชนิดหนึ่ง (Type 1 System) เมื่อมีการชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนทั้ง 5 เกณฑ์ จะได้ว่าทุกเกณฑ์การปรับจูนส่งผลให้ผลตอบสนองระบบวงปิดมีเสถียรภาพขึ้น เกณฑ์ของ ZN IAE SOR และ ISTWE ให้ช่วงเวลาขึ้นที่ใกล้เคียงกัน ส่วนเกณฑ์ของ NOR ให้ช่วงเวลา

จื๋นนานกว่าเกณธ์ดั่งกล่าว เกณธ์การปรับจูน SOR และ ISTWE ให้ช่วงเวลาเข้าที่มีค่าใกล้เคียงกัน และเกณธ์การปรับจูน ZN IAE และ NOR ให้ช่วงเวลาเข้าที่มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เกณธ์การปรับจูนทุกเกณธ์จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินสูง โดยเฉพาะเกณธ์การปรับจูน ZN และ IAE ส่วนเพื่ออัตราขยายมีค่านันต์ และเกณธ์การปรับจูน SOR ให้ส่วนเพื่อเฟสที่มีค่ามาก ($PM = 55.9 \text{ deg}$) ซึ่งหมายความว่าเกณธ์การปรับจูน SOR จะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก แต่เกณธ์การปรับจูนอื่นให้ส่วนเพื่อเฟสค่อนข้างน้อย ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ดี ถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก ระบบอาจจะขาดเสถียรภาพได้ง่าย

พลาณฑ์ 7: เป็นพลาณฑ์อันดับสามที่ให้ผลตอบสนองที่มีการแกว่งมาก พลาณฑ์ดั่งกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{P7}(s) = \frac{1}{s^3 + 1.2s^2 + 1.2s + 1}$$

จากผลการปรับจูน บันทึกค่าอัตราขยายวิกฤตได้ $K_u = 0.44$ และคาบเวลาวิกฤต $T_u = 5.736$ วินาที จากนั้นใช้สูตรในตารางที่ 2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 2.19

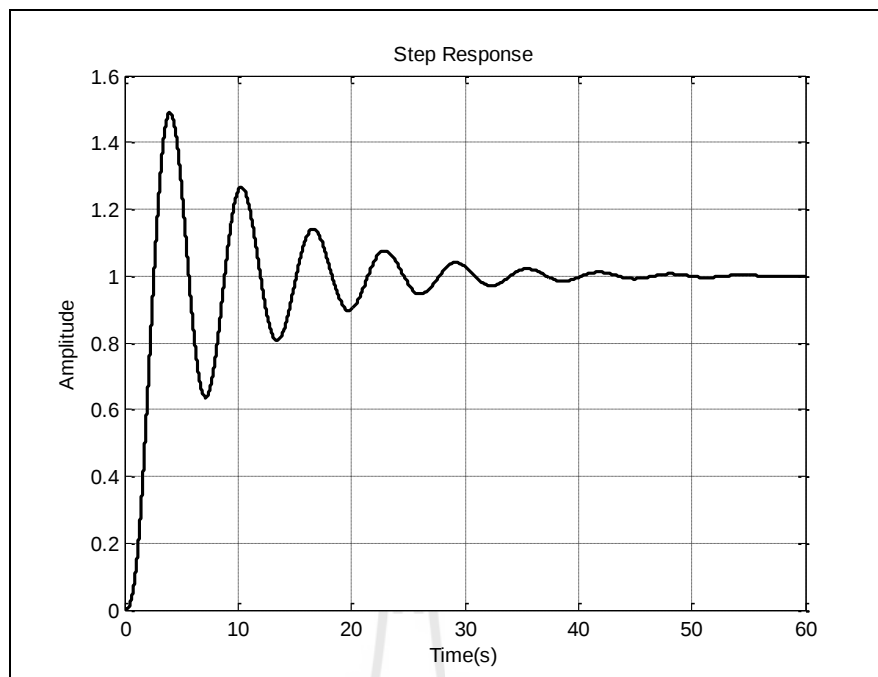
ตารางที่ 2.19 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (พลาณฑ์ 7)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	0.264	0.0921	0.1893
IAE	0.308	0.1342	0.265
SOR	0.1452	0.0506	0.2748
NOR	0.088	0.0307	0.1667
ISTWE	0.224	0.5892	0.1606

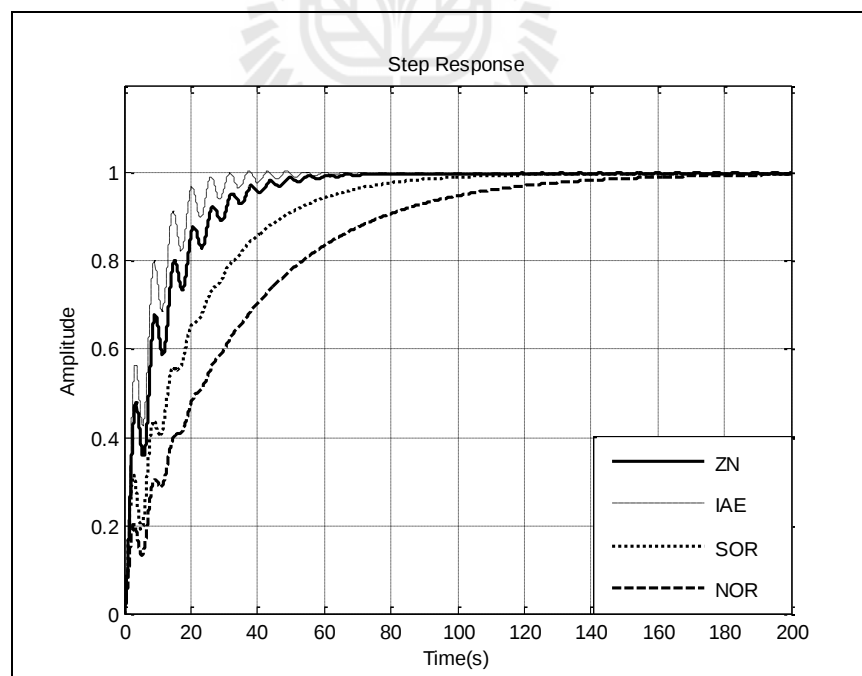
ตารางที่ 2.20 ฟังก์ชันถ่ายโอน โพลและซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลานต์ 7)

กฎการ ปรับจูน	ฟังก์ชันถ่ายโอน โพล และซีโรของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี	
ZN	วงปิด	$\frac{0.1893s^2 + 0.264s + 0.0921}{s^4 + 1.2s^3 + 1.389s^2 + 1.264s + 0.0921}$
	ซีโร	$-0.6973 \pm j0.0171$
	โพล	$-0.065 \pm j1.0805, -0.9907, -0.0793$
IAE	วงปิด	$\frac{0.265s^2 + 0.308s + 0.1342}{s^4 + 1.2s^3 + 1.462s^2 + 1.308s + 0.1342}$
	ซีโร	$-0.5811 \pm j0.4107$
	โพล	$-0.0666 \pm j1.099, -0.9504, -0.1165$
SOR	วงปิด	$\frac{0.2748s^2 + 0.1452s + 0.0506}{s^4 + 1.2s^3 + 1.475s^2 + 1.1452s + 0.0506}$
	ซีโร	$-0.2642 \pm j0.3381$
	โพล	$-0.1252 \pm j1.0858, -0.9028, -0.0469$
NOR	วงปิด	$\frac{0.1667s^2 + 0.088s + 0.0307}{s^4 + 1.2s^3 + 1.368s^2 + 1.088s + 0.0307}$
	ซีโร	$-0.2641 \pm j0.3384$
	โพล	$-0.1152 \pm j1.05, -0.9403, -0.0293$
ISTWE	วงปิด	$\frac{0.1606s^2 + 0.224s + 0.5892}{s^4 + 1.2s^3 + 1.361s^2 + 1.224s + 0.5892}$
	ซีโร	$-0.6974 \pm j1.7839$
	โพล	$0.08 \pm j0.9842, -0.68 \pm j0.3798$

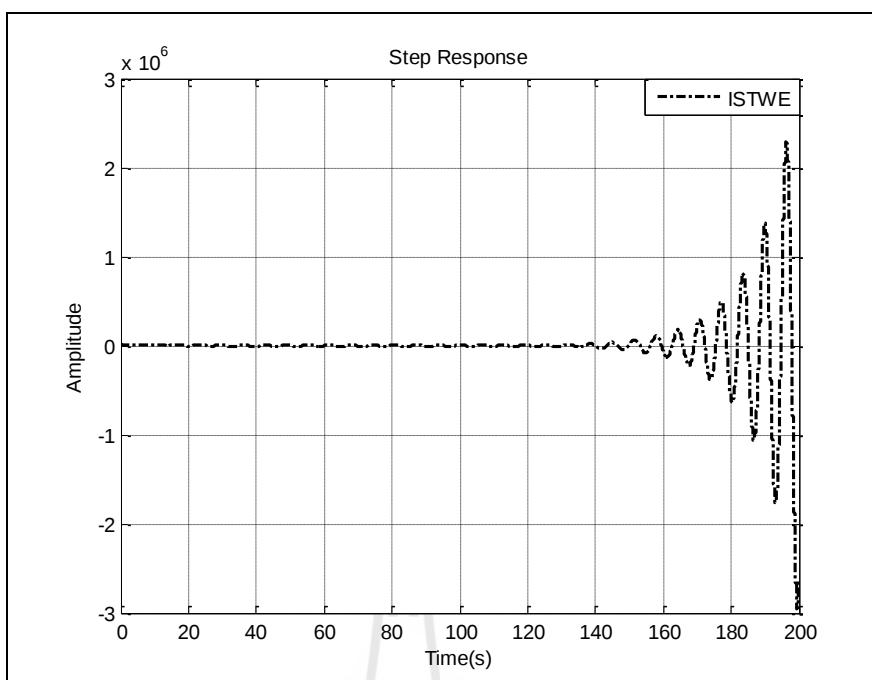
เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ผลตอบสนองที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ดังนี้



รูปที่ 2.30 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม (พลาเน็ต 7)



รูปที่ 2.31 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 7)



รูปที่ 2.32 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสำหรับเกณฑ์ ISTWE (พลาเน็ต 7)

ตารางที่ 2.21 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 7)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	1.5	35.9	49	1	7.13	27.7
ZN	24.5	48.2	0	1	13.1	68.8
IAE	13.3	40.6	0.522	1	inf	42.6
SOR	46.6	81.9	0	1	inf	94.9
NOR	75.8	132	0	1	inf	92.9
ISTWE	-	-	-	-	-5.03	-57.0

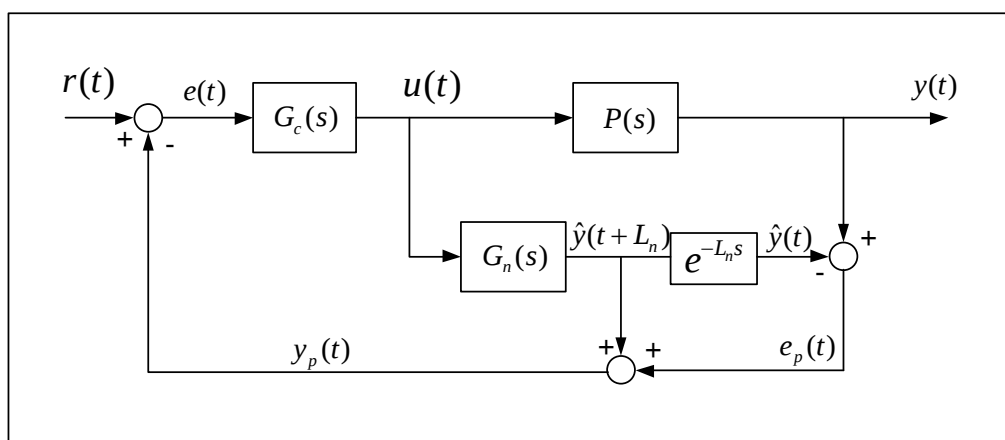
เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย พลาเน็ต 7 และระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่แสดงได้ในรูปที่ 2.30 รูปที่ 2.31 และรูปที่ 2.32 ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่แสดงได้ในตารางที่ 2.18 พลาเน็ตให้ผลตอบสนองที่มีการแกว่งและการพุ่งเกินที่สูงมาก เมื่อตัวควบคุมพีไอดีมีค่าเกณฑ์ที่กำหนดได้จากกฎการปรับจูน 5 เกณฑ์ ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะไม่ดี กล่าวคือเกณฑ์การปรับจูน ZN IAE SOR และ NOR ให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่นานมาก (นานกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต) แต่มีการพุ่งเกินน้อยมากหรือไม่มี

ผลตอบแทนในสถานะชั่วครู่มีการแกว่ง ผลตอบแทนในโดเมนความถี่ให้ส่วนเพื่ออัตราขยาย และส่วนเพื่อเฟสที่มีค่ามาก ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดี แต่เกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์ให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะไม่ดี เกณฑ์การปรับจูน ISTWE จะทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.32 และระบบวงปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่เป็นค่าลบซึ่งแสดงในตารางที่ 2.21

2.6 ตัวทำนายสมิธ

เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีมีข้อจำกัดถึงกระบวนการหรือพลานต์ที่มีการประวิงเวลา ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อ 2.5 วิธีการหนึ่งที่สามารถชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการประวิงเวลานี้เรียกว่า “ตัวทำนายสมิธ” (The Smith Predictor) หรือเรียกโดยย่อว่า ‘SP’ ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและชดเชยการประวิงเวลาที่เกิดขึ้นในพลานต์ต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม (J.E. Normey-Rico and E.F. Camacho, 2007)

ตัวทำนายสมิธมีโครงสร้างที่แสดงได้ในรูปที่ 2.33 ประกอบด้วยสองส่วน คือตัวควบคุม ($G_c(s)$) และตัวทำนาย ตัวควบคุมโดยทั่วไปคือตัวควบคุมพีไอดี ตัวทำนายประกอบด้วยแบบจำลองของพลานต์ที่ไม่มีการประวิงเวลา ($G_n(s)$) หรือเรียกว่าแบบจำลองแบบเร็ว (fast model) และแบบจำลองของพจน์การประวิงเวลา ($e^{-L_n s}$) ทำให้พลานต์ที่มีการประวิงเวลามีแบบจำลองคือ $P_n(s) = G_n(s)e^{-L_n s}$ แบบจำลอง $G_n(s)$ ให้ผลตอบแทนของพลานต์ที่ไม่มีการประวิงเวลา ถ้าการสร้างแบบจำลอง $G_n(s)$ และพจน์การประวิงเวลา $e^{-L_n s}$ ไม่มีความผิดพลาด ($e_p(t) = 0$) ผลตอบแทนของระบบวงปิดที่ไม่มีการประวิงเวลาและที่ได้จากการทำนาย ($y_p(t)$) คือสัญญาณป้อนกลับถึงตัวควบคุมที่เป็นอิสระกับการประวิงเวลา



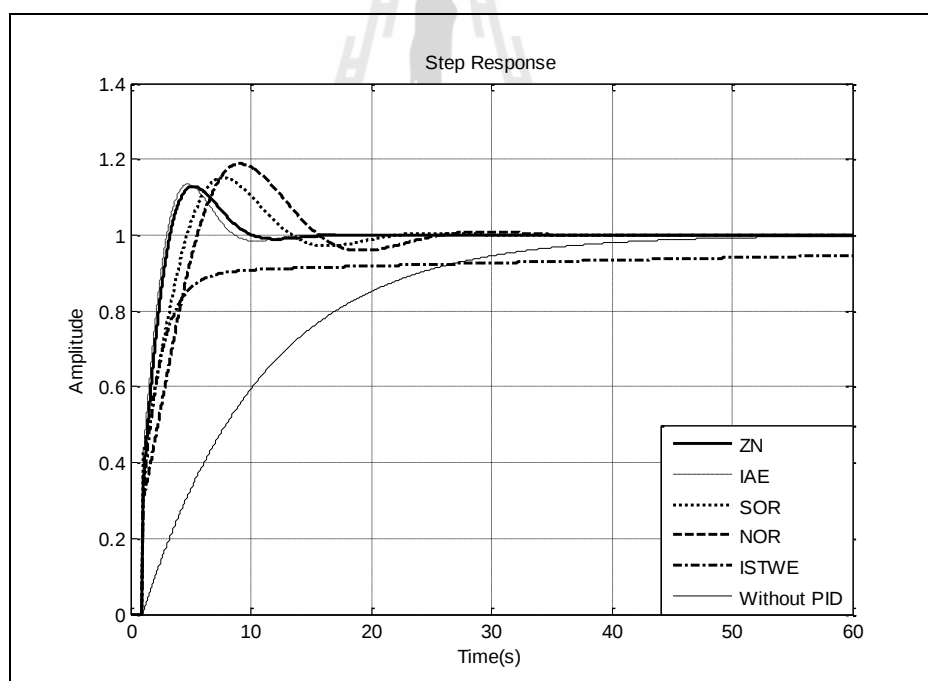
รูปที่ 2.33 โครงสร้างของตัวทำนายแบบสมิธ

ตัวทำนยสมิระจะชดเชยพลาณต์ที่มีการประวิงเวลา ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่า เมื่อพลาณต์มีการประวิงเวลาที่ยาวนาน ระบบวงปิดที่มีตัวทำนยสมิระและไม่มีตัวทำนยสมิระจะให้ผลตอบสนองที่แตกต่างกันชัดเจนมากขึ้น ต่อมาพิจารณาบบวงปิดที่มีพลาณต์ 4 และพลาณต์ 5

พลาณต์ 4: ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{P4}(s) = \frac{1}{(Ts+1)} e^{-s}, T = 10$$

กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ระบบวงปิดที่มีตัวทำนยสมิระให้ผลตองสนองที่แสดงได้ในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีกับตัวทำนยสมิระ (พลาณต์ 4)

ตารางที่ 2.22 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบที่มีตัวทำนายสมิธ (พลาเน็ต 4)

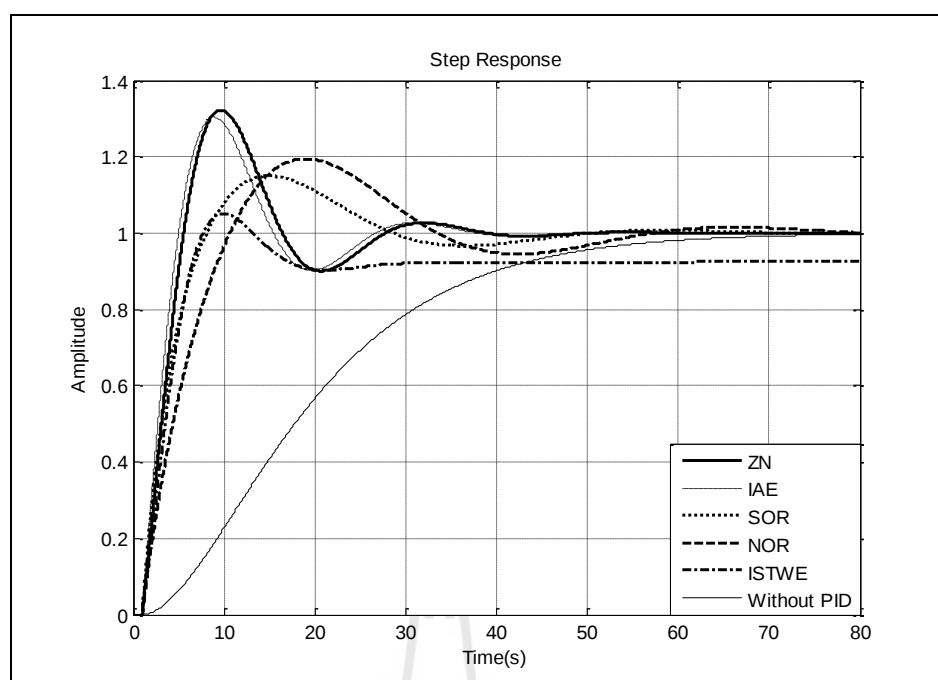
กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	22.00	40.1	0	1	24.3	180
ZN	1.75	9.07	12.9	1	8.54	109
IAE	1.53	7.99	13.5	1	7.30	105
SOR	2.90	18.8	15.1	1	7.76	116
NOR	3.75	23.1	18.8	1	10.6	106
ISTWE	6.84	156	0	1	9.06	Inf

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 4 ซึ่งเป็นพลาเน็ตอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา และนำมาใช้ร่วมกับตัวทำนายสมิธ เพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการประวิงเวลา เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.34 สมรรถนะของผลตอบสนองแสดงได้ในตารางที่ 2.22 จะได้ว่าผลตอบสนองมีสมรรถนะที่เรียบมากกว่า ระบบวงปิดที่มีตัวทำนายสมิธให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าผลตอบสนองของระบบวงปิดที่ไม่มีตัวทำนายสมิธ กล่าวคือเกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์ให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าและมีการฟุ้งเกินที่ต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่มีตัวทำนายสมิธ จะได้ว่าเกณฑ์การปรับจูนทุกเกณฑ์ให้ส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟสที่สูงกว่า นั่นคือการใช้ตัวทำนายสมิธที่ชดเชยการประวิงเวลา จะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีกว่า

พลาเน็ต 5: ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{PS}(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}, T = 10$$

กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ระบบวงปิดที่มีตัวทำนายสมิธให้ผลตอบสนองที่แสดงได้ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีกับตัวทำนายสมิธ (พลาเน็ต 5)

ตารางที่ 2.23 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบที่มีตัวทำนายสมิธ (พลาเน็ต 5)

กฎการ ปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่					
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}	GM(dB)	PM(deg)
Without PID	33.6	59.3	0	1	26.3	180
ZN	3.55	34.8	32.2	1	16.1	73.1
IAE	3.12	33.7	30.4	1	14.1	81.2
SOR	5.19	43.4	15.0	1	14.9	123
NOR	7.37	52.6	19.5	1	18.9	111
ISTWE	4.81	788	5.19	1	17.2	114

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 5 ซึ่งเป็นพลาเน็ตอันดับสองที่มีการประวิงเวลา และนำมาใช้ร่วมกับตัวทำนายสมิธ เพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการประวิงเวลา เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.35 สมรรถนะของผลตอบสนองแสดงได้ในตารางที่ 2.23 จะได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวทำนายสมิธให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าผลตอบสนองของระบบวงปิดที่ไม่มีตัวทำนายสมิธ การพุ่งเกินมีค่าลดลง แต่สำหรับช่วงเวลายื่นกับช่วงเวลาเข้าที่ยังใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีตัวทำนายสมิธ ในขณะที่ส่วนเพื่ออันตรรกยะและ

ส่วนเฟื่อเฟสที่ได้จากกรณีที่มีตัวทำนายสมิธมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีตัวทำนายสมิธ ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดในกรณีที่มีตัวทำนายสมิธมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีกว่ากรณีที่ไม่มีตัวทำนายสมิธ (สำหรับทุกเกณฑ์การปรับจูนการปรับจูน)

2.7 สรุป

บทที่ 2 ได้อธิบายตัวควบคุมพีไอดี และกฎการปรับจูน 5 เกณฑ์ที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดี กฎการปรับจูนดังกล่าวใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแบบวงปิด 2 ค่าคือ อัตราขยายวิกฤตและคาบเวลาวิกฤต ระบบวงปิดแต่ละระบบประกอบด้วยพลาเน็ตควบคุมยาก 7 รูปแบบพลาเน็ตใดพลาเน็ตหนึ่ง และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูน เมื่อพิจารณา ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยากอันดับสาม (พลาเน็ต 3 และพลาเน็ต 7) ระบบวงปิดให้ ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต แต่เกณฑ์การปรับจูนบางเกณฑ์ทำให้ ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ไม่ดี เกณฑ์การปรับจูนบางเกณฑ์ทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ เมื่อพิจารณา ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยากที่มีอันดับมากกว่าสาม (พลาเน็ต 1 พลาเน็ต 2 และ พลาเน็ต 6) ระบบวงปิดที่มีการปรับจูนตัวควบคุมให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่า ผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต แต่เกณฑ์การปรับจูนบางเกณฑ์ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะไม่ดี เมื่อพิจารณา ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ตที่มีการประวิงเวลา (พลาเน็ต 4 และพลาเน็ต 5) ระบบวงปิดต้องมีตัวทำนายสมิธ เพื่อชดเชยการประวิงเวลา ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะ ดีกว่าผลตอบสนองของระบบวงปิดที่ไม่มีตัวทำนายสมิธ นั่นคือระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มี สมรรถนะที่ขึ้นอยู่กับกฎการปรับจูนแต่ละเกณฑ์ ระบบที่มีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดี จะต้องให้ผล ตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $GM \geq 8 \text{ dB}$ และ $PM \geq 50 \text{ deg}$

บทที่ 3

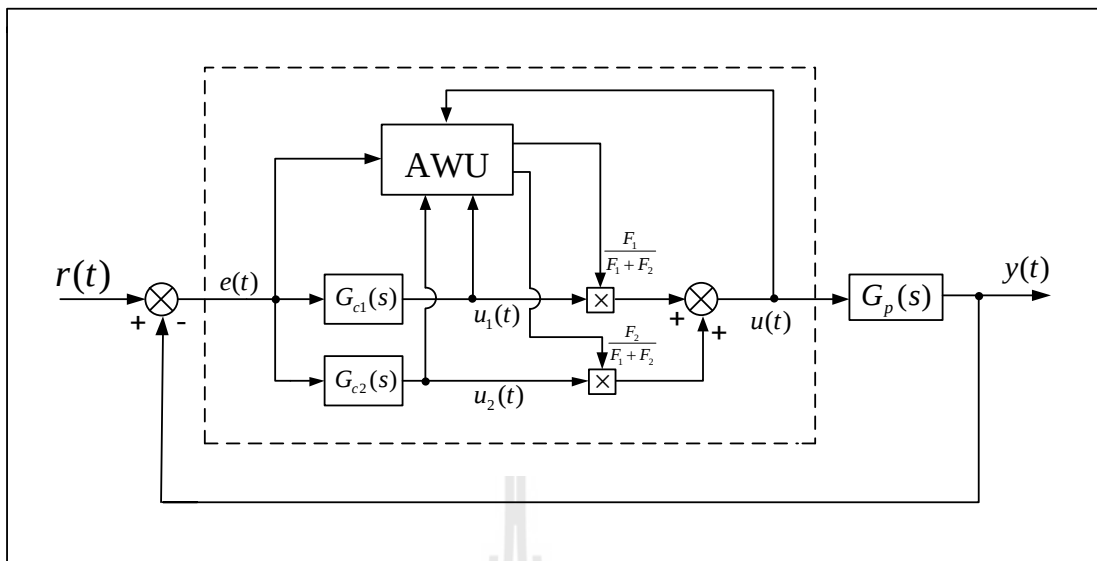
การออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก

3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (Adaptive Weighting Unit) หรือเรียกโดยย่อว่า “AWU” ซึ่งเป็นแผนการใหม่ที่ไม่ซ้ำกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ แผนการที่น่าเสนอนี้ใช้ความผิดพลาดของผลตอบสนองระบบวงปิด สัญญาณควบคุมย่อยที่เป็นเอาต์พุตของตัวควบคุมสองตัวที่เชื่อมต่อกัน และสัญญาณควบคุมรวมที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนัก เพื่อถ่วงน้ำหนักหรือปรับเปลี่ยนเอาต์พุตของตัวควบคุมทั้งสองในลักษณะที่เน้นหนักและผ่อนคลायพลวัตของตัวควบคุมแต่ละตัวให้เหมาะสม จากนั้นนำสัญญาณควบคุมที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักมารวมกัน ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมรวม และนำไปป้อนถึงพลานต์ ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีความผิดพลาดลดลงเข้าหาศูนย์ นั่นคือหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักจะบังคับให้สัญญาณควบคุมรวมที่ได้จากตัวควบคุมทั้งสองที่เชื่อมต่อกัน มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเหมาะสมในโดเมนเวลา

3.2 โครงสร้างของระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก

ระบบวงปิดหรือระบบควบคุมป้อนกลับที่แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยพลานต์ $G_p(s)$ ตัวควบคุม $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ ที่เชื่อมต่อกัน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก $F'_1 = \frac{F_1}{F_1 + F_2}$ และ $F'_2 = \frac{F_2}{F_1 + F_2}$ คือสัญญาณถ่วงน้ำหนักที่คูณกับสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุม $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ ตามลำดับ ตัวควบคุม $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ จะได้รับความผิดพลาด $e(t)$ ค่าเดียวกัน จากนั้นตัวควบคุมแต่ละตัวจะสร้างสัญญาณควบคุมย่อย $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ ในขณะเดียวกันหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักจะใช้เวลาผิดพลาด $e(t)$ สัญญาณควบคุมย่อย $u_1(t)$, $u_2(t)$ และสัญญาณควบคุมรวม $u(t)$ กำหนดค่า F_1 และ F_2 ต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยแต่ละสัญญาณจะคูณเข้ากับสัญญาณถ่วงน้ำหนักที่ได้จากหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จากนั้นนำสัญญาณควบคุมที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักมารวมกันกลายเป็นสัญญาณควบคุมรวม $u(t) = F'_1 u_1(t) + F'_2 u_2(t)$ และนำไปป้อนถึงพลานต์ต่อไป



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั (AWU)

$$\text{โดยที่ } F_1' = \frac{F_1}{F_1 + F_2} \text{ และ } F_2' = \frac{F_2}{F_1 + F_2}$$

3.3 การออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก

หลังจากการใช้เกณฑ์ (กฎการปรับจูน) สองเกณฑ์ที่แตกต่างกันปรับจูนค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว ($G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$) จนทำให้ระบบวงปิดแต่ละระบบที่มีพลานต์เดียวกัน ($G_p(s)$) สร้างผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่เป็นแบบคิงและแบบเรียบ ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทก่อนหน้านี้ และเกณฑ์การปรับจูนทั้งสองเกณฑ์จะต้องทำให้ระบบวงปิดแต่ละระบบมีเสถียรภาพ ขั้นตอนต่อไปคือการนำตัวควบคุมพีไอดีสองตัวดังกล่าวมาเชื่อมต่อกัน และการนำหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (AWU) มาเชื่อมต่อเข้ากับตัวควบคุมพีไอดีสองตัวนี้ เพื่อให้ได้ระบบควบคุมป้อนกลับหรือระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.1 ต่อมากำหนดให้

$$V = \frac{1}{2}e^2 \quad (3.1)$$

โดยที่ V คือฟังก์ชันกำลังสองของความผิดพลาด เนื่องจากระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีความผิดพลาดเป็นค่าบวกและค่าลบ การยกกำลังสองความผิดพลาดดังกล่าวจะทำให้ V มีค่าเป็นบวกหรือเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา นั่นคือถ้า V มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง V จะมีค่าไม่น้อยกว่าศูนย์ (หรือ V ไม่มีค่าเป็นลบ) และ V จะมีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์ นั่นคือ $e^2(t)$ จะมีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์ และ $e(t)$ มีขนาดลดลง ซึ่งหมายถึงความผิดพลาดมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ศูนย์ V ที่มีค่าไม่เพิ่มขึ้นจากเดิม

หรือการลดลงของ V จะเกิดจากเงื่อนไข $\dot{V} \leq 0$ กล่าวคือ ถ้า $\dot{V} < 0$ V จะมีค่าลดลง หรือถ้า $\dot{V} = 0$ V จะมีค่าคงที่หรือมีค่าไม่เพิ่มขึ้นจากเดิม (ถ้า $e(t)$ ในสมการที่ (3.1) มีเลขชี้กำลังเป็นเลขคู่เลขอื่นที่มากกว่า 2 จะทำให้ $\dot{V}$ ที่ได้มีรูปแบบที่ซับซ้อน และการหาเงื่อนไข $\dot{V} \leq 0$ คืองานที่มีความยากและมีต้นทุนของเวลาสูง) จากนั้นหาอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (3.1) เทียบกับเวลาจะได้

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2}e^2\right)}{dt} = e \frac{de}{dt} \quad \text{หรือ} \quad \dot{V} = e\dot{e} \quad (3.2)$$

เมื่อพิจารณาว่าความผิดพลาด $e(t)$ ขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุมรวม $u(t)$ และจากสมการที่ (3.2) จะได้ว่า

$$\dot{V} = e \frac{de}{du} \frac{du}{dt} = e \frac{de}{du} \dot{u} = e \frac{\partial e}{\partial u} \dot{u} \quad (3.3)$$

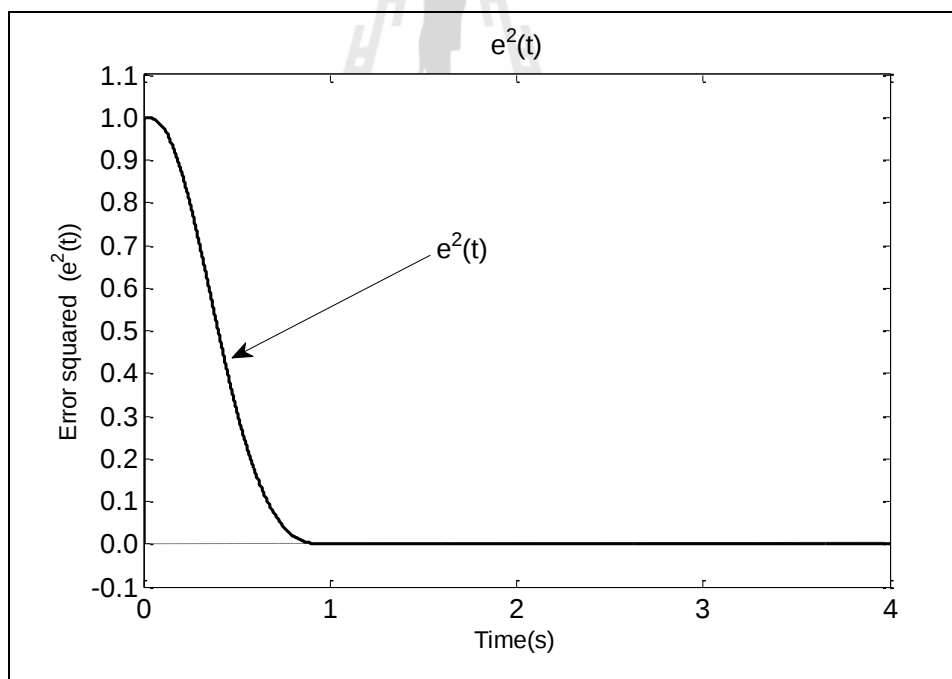
ถ้าต้องการให้เกิดเงื่อนไข $\dot{V} \leq 0$ ตลอดเวลา จะได้ว่า $e \frac{\partial e}{\partial u} \dot{u} \leq 0$ ตลอดเวลา นั่นคือ ถ้า $e \frac{\partial e}{\partial u} \leq 0$ จะได้ว่า $\dot{u} \geq 0$ ในเวลาเดียวกัน และถ้า $e \frac{\partial e}{\partial u} \geq 0$ จะได้ว่า $\dot{u} \leq 0$ ในเวลาเดียวกัน ซึ่งมีความหมายว่า $e \frac{\partial e}{\partial u}$ และ $\dot{u}$ ต้องมีเครื่องหมายตรงข้ามกันเสมอ แต่ $e \frac{\partial e}{\partial u}$ และ $\dot{u}$ ไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากัน จึงกำหนดให้อนุพันธ์ของสัญญาณควบคุมรวมเทียบกับเวลาเป็น

$$\dot{u} = -ke \frac{\partial e}{\partial u} \quad (3.4)$$

โดยที่ k คือค่าคงที่บวก ($k > 0$) และจะได้ว่า $e \frac{\partial e}{\partial u}$ และ $-ke \frac{\partial e}{\partial u}$ มีเครื่องหมายตรงข้ามกันเสมอ การกำหนดค่า $\dot{u}$ ในสมการที่ (3.4) เป็นเพียงรูปแบบหนึ่งเท่านั้นที่ทำให้ $\dot{V} \leq 0$ ตลอดเวลา แต่ถ้าเลือก $\dot{u} \neq -ke \frac{\partial e}{\partial u}$ เช่น เลือก $\dot{u} = -k$ หรือ $\dot{u} = -e$ หรือ $\dot{u} = -\frac{\partial e}{\partial u}$ จะไม่ทำให้เกิดเงื่อนไข $\dot{V} \leq 0$ ได้ตลอดเวลา เพราะ $e \frac{\partial e}{\partial u}$ และ $-k$ หรือ $e \frac{\partial e}{\partial u}$ และ $-e$ หรือ $e \frac{\partial e}{\partial u}$ และ $-\frac{\partial e}{\partial u}$ อาจจะไม่มีความหมายตรงข้ามกันในเวลาเดียวกัน (อาจจะมีเครื่องหมายเหมือนกัน) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.3) จะได้ว่า

$$\dot{V} = e \frac{\partial e}{\partial u} \left(-k e \frac{\partial e}{\partial u} \right) = -k \left(e \frac{\partial e}{\partial u} \right)^2 \leq 0 \quad (3.5)$$

เมื่อเงื่อนไข $\dot{V} \leq 0$ เกิดขึ้นตลอดเวลา (ค่าของ $\dot{V}$ จะต้องเป็นกึ่งจำกัดลบ) จะทำให้ $V(t) \leq V(0)$ ตลอดเวลา นั่นคือ V มีค่าไม่เพิ่มขึ้นจากเดิมหรือ V มีค่าลดลง $\dot{V}$ คือความชัน (slope) ของกราฟระหว่าง $e^2(t)$ และเวลา t ที่ผ่านไป ถ้า $\dot{V} \leq 0$ จะได้ว่ากราฟระหว่าง $e^2(t)$ และเวลา t มีความชันเป็นลบหรือมีความชันเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา ทำให้ $e^2(t)$ มีค่าไม่เพิ่มขึ้นจากเดิมหรือมีค่าลดลง ถ้า $\dot{V} < 0$ จะได้ว่ากราฟระหว่าง $e^2(t)$ และ t มีความชันเป็นลบตลอดเวลา ทำให้ $e^2(t)$ มีค่าลดลงจนลู่เข้าหาศูนย์ ดังนั้นความผิดพลาด $e(t)$ จะมีขนาดไม่เพิ่มขึ้นจากเดิมหรือมีขนาดลดลงจนเท่ากับศูนย์ในสถานะอยู่ตัวซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3.2 เมื่อ V มีค่าลดลงในสถานะชั่วครู่ จะได้ว่า $\dot{V} < 0$ และเมื่อ $e^2(t)$ มีค่าลดลงจนลู่เข้าหาศูนย์ในสถานะอยู่ตัว จะได้ว่า V มีค่าลดลงจนลู่เข้าหาศูนย์เช่นเดียวกัน และ $\dot{V} \rightarrow 0$ นั่นคือ $e(t) \rightarrow 0$



รูปที่ 3.2 กราฟ $e^2(t)$ ที่ได้จากระบบวงปิดหรือระบบควบคุมป้อนกลับที่มีพลาเน็ต 1 ตัวควบคุมฟิโอดีสองตัวที่เชื่อมต่อกัน และมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมป้อนกลับที่แสดงในรูปที่ 3.1 จะได้ว่าสัญญาณควบคุมรวม $u(t)$ เกิดจากการถ่วงน้ำหนักหรือการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุมย่อย $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ กล่าวคือ

$$u = \frac{F_1 u_1 + F_2 u_2}{F_1 + F_2} \quad (3.6)$$

โดยที่ พจน์ที่อยู่ด้านขวาของสมการที่ (3.6) ต้องมีตัวส่วนที่ไม่เป็นศูนย์ ($F_1 + F_2 \neq 0$) ต่อมาหาอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (3.6) เทียบกับเวลา จะได้

$$\dot{u} = \frac{(F_1 + F_2)(\dot{F}_1 u_1 + F_1 \dot{u}_1 + \dot{F}_2 u_2 + F_2 \dot{u}_2) - (F_1 u_1 + F_2 u_2)(\dot{F}_1 + \dot{F}_2)}{(F_1 + F_2)^2} \quad (3.7)$$

และจัดรูปสมการที่ (3.7) ใหม่ จะได้

$$\dot{u} = \frac{\dot{F}_1 F_2 (u_1 - u_2) - F_1 \dot{F}_2 (u_1 - u_2) + F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2}{(F_1 + F_2)^2} \quad (3.8)$$

กำหนดให้สมการที่ (3.8) เท่ากับสมการที่ (3.4) จะได้ว่า

$$\dot{F}_1 F_2 (u_1 - u_2) - F_1 \dot{F}_2 (u_1 - u_2) + F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2 = -k(F_1 + F_2)^2 e \frac{\partial e}{\partial u} \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.9) จะได้ว่า F_1 และ F_2 มีผลกระทบซึ่งกันและกัน ต่อมาแยกสมการที่ (3.9) ออกเป็นสองสมการ จะได้ว่า

$$\dot{F}_1 F_2 (u_1 - u_2) = -k(F_1 + F_2)^2 e \frac{\partial e}{\partial u} \quad (3.10)$$

$$F_1 \dot{F}_2 (u_1 - u_2) = F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2 \quad (3.11)$$

ดังนั้นจะคำนวณหา F_1 และ F_2 พร้อมกันได้ดังนี้

$$F_1 = -k \int_0^t \left(\frac{(F_1 + F_2)^2}{F_2(u_1 - u_2)} e \frac{\partial e}{\partial u} \right) dt + F_1(0) \quad (3.12)$$

$$F_2 = \int_0^t \left(\frac{1}{F_1(u_1 - u_2)} (F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2) \right) dt + F_2(0) \quad (3.13)$$

สมการที่ (3.12) และ (3.13) คือหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (AWU) ที่มี k คือค่าเกนปรับถ่วงน้ำหนัก $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ คือค่าเริ่มต้นของ F_1 และ F_2 ตามลำดับ และ u_1 จะต้องไม่ค่าไม่เท่ากับ u_2 ($u_1 \neq u_2$) ถ้า u_1 มีค่าเท่ากับ u_2 หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักจะไม่สามารถคำนวณ F_1 และ F_2 ต่อไปได้ เพราะตัวส่วน $F_1(u_1 - u_2)$ และ $F_2(u_1 - u_2)$ มีค่าเป็นศูนย์ การคำนวณย้อนกลับ (back-calculation) (Astrom and Hagglund, 1995) จะจำกัดค่า F_1 และ F_2 ที่คำนวณได้ให้มีค่าอยู่ในช่วงค่าบวกน้อย ๆ ค่าหนึ่ง จนถึง 1 เท่านั้น เพราะถ้า F_1 และ F_2 มีค่านอกเหนือจากช่วงนี้ (มากกว่าค่า 1 หรือน้อยกว่าค่าบวกน้อย ๆ ดังกล่าว) F_1 และ F_2 จะไม่มีความหมาย นั่นคือสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 เท่านั้น

การนำหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมาใช้งานกับพลาเน็ต 1 จะมีขั้นตอนดังนี้

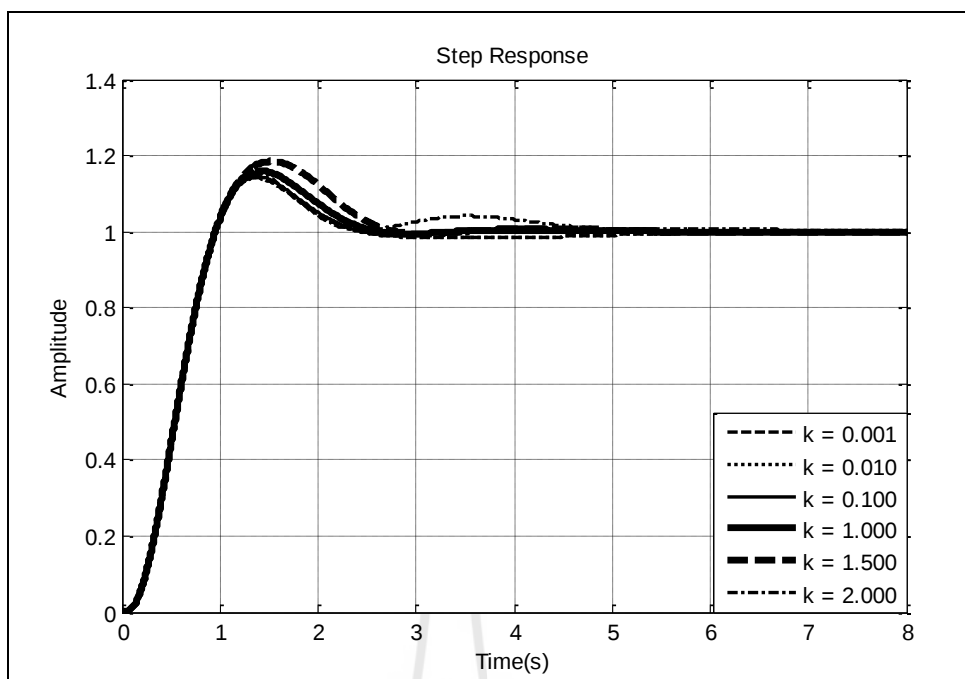
1. เลือกเกนซ์ (กฎ) การปรับจูน 2 เกนซ์ที่แตกต่างกัน เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลาเน็ต 1 ($G_p(s)$ หรือ $G_{p1}(s)$) และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกนที่ได้จากกฎการปรับจูนกฎแรก ($G_{c1}(s)$) ระบบวงปิดต้องมีความเป็นไปได้ในการสร้างผลตอบสนองแบบตึง (ผลตอบสนองแบบตึงคือผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาขึ้นสั้นและมีช่วงเวลาเข้าที่สั้น แต่อาจจะมีการพุ่งเกินสูง) และเมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลาเน็ต 1 ($G_p(s)$) และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกนที่ได้จากกฎการปรับจูนกฎที่สอง ($G_{c2}(s)$) ระบบวงปิดต้องมีความเป็นไปได้ในการสร้างผลตอบสนองแบบเรียบ (ผลตอบสนองแบบเรียบคือผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินต่ำ แต่อาจจะมีความล่าช้าและอาจจะมีความล่าช้าที่นาน) กฎการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4
2. พิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 1 ($G_p(s)$ หรือ $G_{p1}(s)$) และตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ ถ้าระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองในโดเมนเวลาแบบตึง ตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ จะเป็นส่วนหนึ่งของระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนที่ 4 และเรียกตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ นี้ว่าตัวควบคุมแบบตึง แต่ถ้าระบบวงปิดไม่ให้เกิดผลตอบสนองแบบตึง จะต้องเปลี่ยนกฎการปรับจูนและใช้กฎการปรับจูนกฎใหม่ คำนวณค่าเกนตัวควบคุมพีไอดี ต่อมานำตัวควบคุมนี้มาชดเชยพลาเน็ต 1 ถ้าระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองแบบตึง ตัวควบคุมนี้คือตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ และจะเป็น

ส่วนหนึ่งของระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร แต่ถ้ระบบวงปิดไม่ให้ผลตอบสนองแบบตึง จะต้องดำเนินการซ้ำต่อไปจนกว่าระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์ 1 ($G_p(s)$) และตัวควบคุมพีไอดีสร้างผลตอบสนองแบบตึง

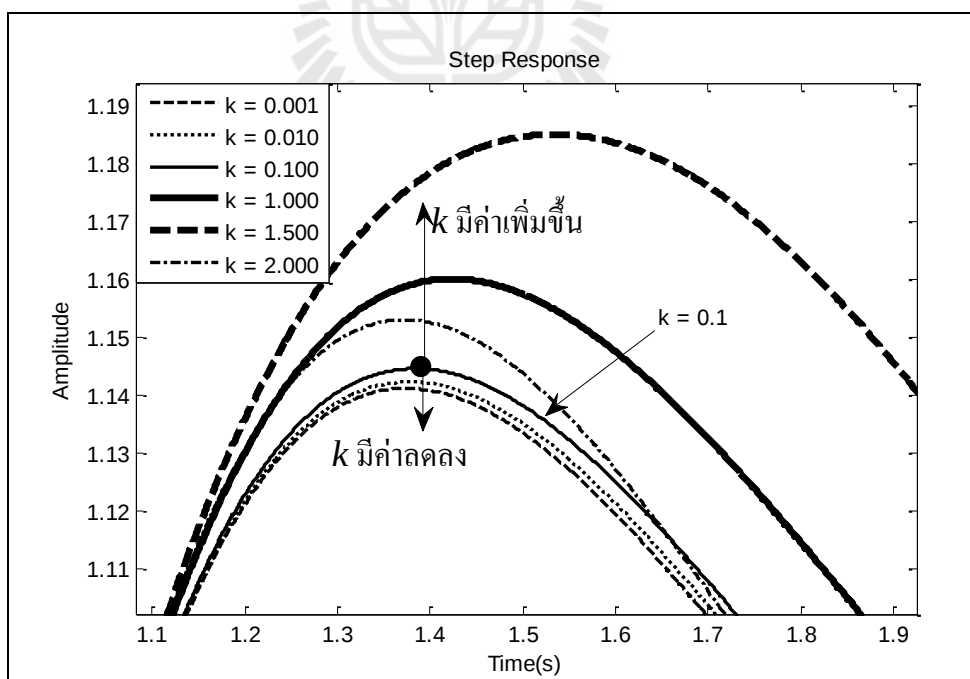
3. พิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์ 1 ($G_p(s)$ หรือ $G_{p1}(s)$) และตัวควบคุมพีไอดี $G_{c2}(s)$ ต่อมาดำเนินการเหมือนกับขั้นตอนที่ 2 แต่ระบบวงปิดต้องให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาแบบเรียบ และเรียกตัวควบคุมพีไอดี $G_{c2}(s)$ นี้ว่าตัวควบคุมแบบเรียบ
4. สร้างระบบควบคุมป้อนกลับหรือระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์ 1 ($G_p(s)$ หรือ $G_{p1}(s)$) ตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ ที่เชื่อมต่อขนานกัน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร (AWU) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3.1
5. ป้อนสัญญาณอ้างอิงที่เป็นสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยถึงระบบวงปิดในขั้นตอนที่ 4 และพิจารณาผลตอบสนอง ถ้าผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ไม่ดีหรือไม่น่าพอใจ ค่าเกนปรับถ่วงน้ำหนักร k จะต้องได้รับการปรับเปลี่ยนถึงค่าใหม่ ป้อนสัญญาณอ้างอิงและพิจารณาผลตอบสนองซ้ำ ก่อนการป้อนสัญญาณอ้างอิงแต่ละครั้ง ค่า k จะได้รับการปรับเปลี่ยนจนกว่าระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจ หรือมีสมรรถนะที่ดีกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว

3.4 แนวทางการเลือกค่าเกนปรับถ่วงน้ำหนักร

การเลือกค่า k (ค่าเกนปรับถ่วงน้ำหนักร) ไม่มีวิธีการที่แน่นอน เมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมด้วยเช่นเดียวกัน พลาตต์แต่ละพลาตต์จะมีค่า k เหมาะสมที่แตกต่างกันที่ทำให้เกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะที่ดีกว่า นั่นคือการเลือกค่า k ดังกล่าวจะใช้วิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์ 1 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อขนานกัน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร การเลือกค่า k จะมีแนวคิดให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะในสถานะชั่วคราวอยู่ระหว่างผลตอบสนองแบบตึงและผลตอบสนองแบบเรียบที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว (ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินต่ำกว่าผลตอบสนองแบบตึงและมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าผลตอบสนองแบบเรียบ นั่นคือผลตอบสนองมีสมรรถนะดีกว่า) และมีแนวคิดให้ผลตอบสนองไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ค่า k ที่แตกต่างกันจะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่แสดงได้ในรูปที่ 3.3

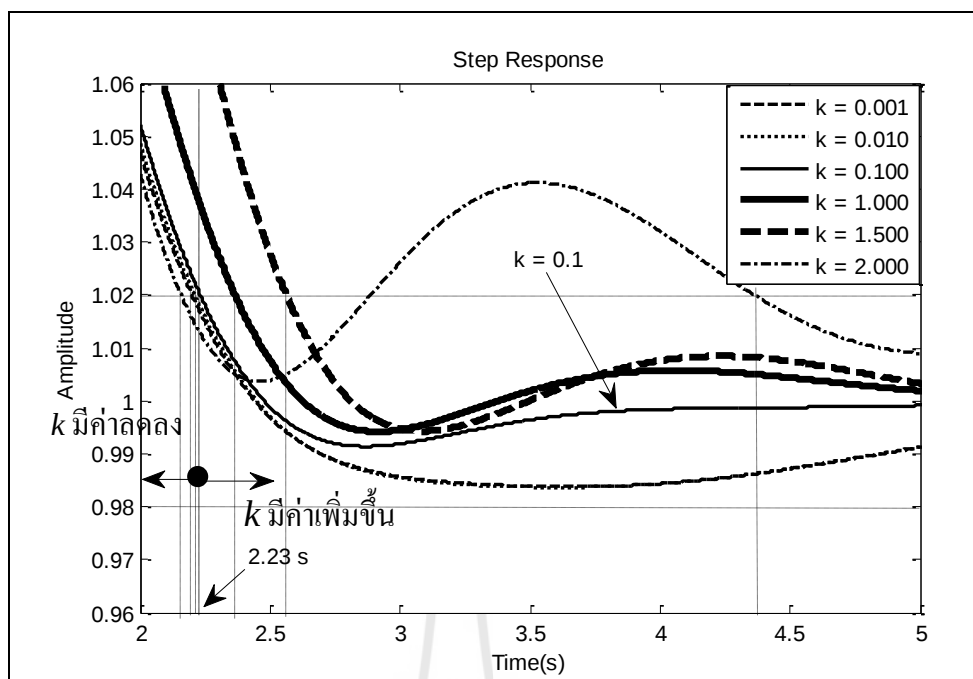


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า k ที่แตกต่างกัน (พลาเน็ต 1)



รูปที่ 3.4 การขยายภาพของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.3

ในช่วงเวลาระหว่างวินาทีที่ 1.1 ถึง 1.9



รูปที่ 3.5 การขยายภาพของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.3 ในช่วงเวลาระหว่างวินาทีที่ 2 ถึง 5

การปรับเปลี่ยนค่า k จาก 0.001 ถึง 2 จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อ k มีค่าเพิ่มขึ้น ช่วงเวลาขึ้นไม่เปลี่ยนแปลง ช่วงเวลาเข้าที่เพิ่มขึ้น และการพุ่งเกินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อค่า $k = 2$ ช่วงเวลาเข้าที่จะเพิ่มขึ้นมากแต่การพุ่งเกินจะลดลงที่แสดงได้ในรูปที่ 3.4 และ 3.5 การปรับเปลี่ยนค่า k จาก 2 ถึง 10 จะทำให้ผลตอบสนองไม่มีช่วงเวลาขึ้นเปลี่ยนแปลง และทำให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่ลดลงเล็กน้อย ค่า k บางค่าให้การพุ่งเกินเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ค่า k ค่าอื่นให้การพุ่งเกินลดลงเล็กน้อย กล่าวคือการปรับเปลี่ยนค่า k เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 3 จะทำให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่การปรับเปลี่ยนค่า k เพิ่มขึ้นจาก 3 ถึง 4 จะทำให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินลดลงเล็กน้อย และการปรับเปลี่ยนค่า k เพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 5 จะทำให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นั่นคือการปรับเปลี่ยนค่า k เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 10 จะทำให้ผลตอบสนองสร้างการพุ่งเกินที่ไม่มีแนวโน้มลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งที่แน่นอน การปรับเปลี่ยนค่า k มากกว่า 10 จะทำให้ผลตอบสนองไม่มีช่วงเวลาขึ้นเปลี่ยนแปลง ช่วงเวลาเข้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการพุ่งเกินเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การปรับเปลี่ยนค่า k เพิ่มขึ้นใน 3 ช่วงมีผลกระทบถึงสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงได้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลกระทบถึงสมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า k (พลาเน็ต 1)

ช่วงของค่า k	ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)	ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time)	การพุ่งเกิน (Overshoot)
เพิ่มจาก 0.001 ถึง 2	ไม่เปลี่ยนแปลง (0.599 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (2.2 ถึง 4.5 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (14 % ถึง 19 %)
เพิ่มจาก 2 ถึง 10	ไม่เปลี่ยนแปลง (0.599 วินาที)	ลดลงเล็กน้อย (5 ถึง 3 วินาที)	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (15 % ถึง 16 %)
มากกว่า 10	ไม่เปลี่ยนแปลง (0.599 วินาที)	มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (มากกว่า 5 วินาที)	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (15 % ถึง 20 %)

การปรับเปลี่ยนค่า k ให้มีค่าน้อยกว่า 0.001 แต่ค่า k ไม่เท่ากับศูนย์ จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่ลดลง ค่า k บางค่าให้การพุ่งเกินเพิ่มขึ้นแต่ค่า k ค่าอื่นให้การพุ่งเกินลดลง เมื่อ k มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.1 ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีที่สุด กล่าวคือผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่า และมีการพุ่งเกินต่ำกว่า แต่ช่วงเวลานี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อ k มีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะที่น่าพอใจ กล่าวคือผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าและการพุ่งเกินสูงกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า k ให้มีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 เล็กน้อย แต่ผลตอบสนองมีช่วงเวลาที่ขึ้นที่ไม่เปลี่ยนแปลง เพราะค่า k ที่อยู่ในสองช่วงนี้ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในสถานะชั่วคราวอยู่ระหว่างผลตอบสนองแบบตึงและผลตอบสนองแบบเรียบที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว เมื่อ k มีค่ามากกว่า 10 ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะไม่น่าพอใจ กล่าวคือผลตอบสนองให้ช่วงเวลาเข้าที่ที่มีแนวโน้มนานกว่า แต่ช่วงเวลานี้และการพุ่งเกินไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ทำให้ผลตอบสนองไม่มีสมรรถนะอยู่ระหว่างผลตอบสนองแบบตึงและแบบเรียบ

การปรับเปลี่ยนค่า k จาก 0.001 ถึง 2 จะทำให้สัญญาณถ่วงน้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แสดงได้ในรูปที่ 3.6 ตัวควบคุมแบบตึงจ่ายสัญญาณควบคุมย่อยที่คูณกับสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และตัวควบคุมแบบเรียบจ่ายสัญญาณควบคุมย่อยที่คูณกับสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_2' สัญญาณถ่วงน้ำหนักทั้งสองมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น เมื่อ k มีค่าเท่ากับ 0.001, 0.01 และ 0.1 ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกัน เพราะสัญญาณถ่วงน้ำหนักมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงหรือมีพฤติกรรมที่เหมือนกัน กล่าวคือในช่วงเวลาเริ่มต้น (ก่อนวินาทีที่ 1) สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักเท่ากัน ($F_1' = F_2' = 0.5$) นั่นคือตัวควบคุมทั้งสองจะมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเท่ากัน ต่อมาในช่วงวินาทีที่ 1.5 ถึง 2 สัญญาณ

ควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบจะได้รับการถ่วงน้ำหนักเกือบสมบูรณ์ ($F_2' \approx 1$) แต่สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบดิ่งแทบจะไม่ได้การถ่วงน้ำหนัก ($F_1' \approx 0$) ทำให้ตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเกือบสมบูรณ์ แต่ตัวควบคุมแบบดิ่งแทบไม่มีอิทธิพลถึงผลตอบสนอง ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินไม่สูงมาก (ประมาณ 14%) หลังจากวินาทีที่ 2 และในสถานะอยู่ตัว สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบได้รับการถ่วงน้ำหนักลดลงแต่ยังคงได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_2' มีค่ามากกว่า F_1') และสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบดิ่งได้รับการถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองลดลงแต่ยังคงมีอิทธิพลมากกว่าในสถานะอยู่ตัว และตัวควบคุมแบบดิ่งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่ไม่นานมาก (ประมาณ 2.2 วินาที) เมื่อ k มีค่าเพิ่มขึ้น สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_2' ในสถานะอยู่ตัวมีแนวโน้มลดลง และสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' ในสถานะอยู่ตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_2' มีค่ามากกว่า นั่นคือตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองน้อยลงแต่ยังคงมีอิทธิพลมากกว่า และตัวควบคุมแบบดิ่งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเพิ่มขึ้นในสถานะอยู่ตัว ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่ไม่นานมากเช่นเดียวกัน (ประมาณ 2.2 วินาที)

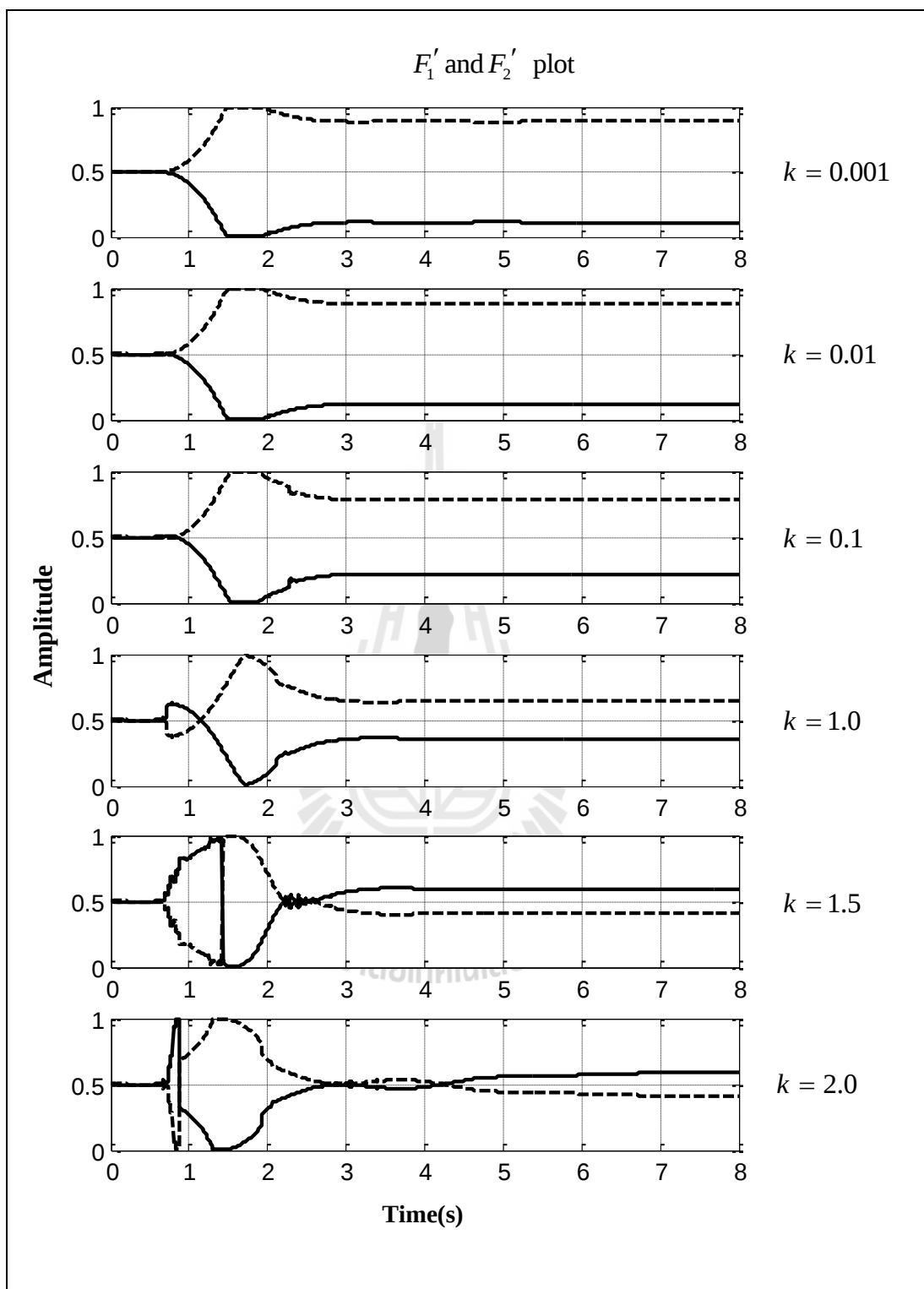
เมื่อ k มีค่าเท่ากับ 1 สัญญาณถ่วงน้ำหนักจะมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงหรือมีพฤติกรรมที่เริ่มแตกต่างจากสัญญาณถ่วงน้ำหนักที่เกิดจาก k มีค่าเท่ากับ 0.001, 0.01 และ 0.1 ในช่วงเวลาวินาทีที่ 0.7 ถึง 1.2 โดยประมาณ สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบดิ่งได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_1' มีค่ามากกว่า F_2') สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบ ทำให้ตัวควบคุมแบบดิ่งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า เป็นผลให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (การพุ่งเกินมีค่าประมาณ 16%) ต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบจะได้รับการถ่วงน้ำหนักเกือบสมบูรณ์ ($F_2' \approx 1$) ภายในช่วงเวลาสั้น ๆ แต่สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบดิ่งแทบจะไม่ได้การถ่วงน้ำหนัก ($F_1' \approx 0$) ทำให้ตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเกือบสมบูรณ์ภายในช่วงเวลาสั้น ๆ แต่ตัวควบคุมแบบดิ่งแทบไม่มีอิทธิพลถึงผลตอบสนอง เนื่องจากระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลตอบสนองจะมีช่วงเวลาเข้าที่นานขึ้น (ประมาณ 2.4 วินาที) และในสถานะอยู่ตัว สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบยังคงได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_2' มีค่ามากกว่า F_1') แต่สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_2' มีค่าลดลงและสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่าในสถานะอยู่ตัว แต่มีอิทธิพลลดลง และตัวควบคุมแบบดิ่งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองน้อยกว่า แต่มีอิทธิพลเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณา k ที่มีค่าเท่ากับ 1.5 ในช่วงเวลาเริ่มต้น (ก่อนวินาทีที่ 1) สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักเท่ากัน ($F'_1 = F'_2 = 0.5$) นั่นคือตัวควบคุมทั้งสองจะมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเท่ากัน ต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบตั้งจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F'_1 มีค่ามากกว่า F'_2) สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบในช่วงเวลาหนึ่ง (ในช่วงเวลาวินาทีที่ 0.7 ถึงวินาทีที่ 1.4 โดยประมาณ) ทำให้ตัวควบคุมแบบตั้งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า เป็นผลให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินสูงกว่า (ประมาณ 19%) จากนั้นมีการเปลี่ยนสลับการถ่วงน้ำหนักอีกสองครั้ง สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบตั้งจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F'_1 มีค่ามากกว่า F'_2) ทำให้ตัวควบคุมแบบตั้งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่าในสถานะอยู่ตัว เนื่องจากระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะมีช่วงเวลาเข้าที่นานขึ้น (ประมาณ 2.6 วินาที)

เมื่อพิจารณา k ที่มีค่าเท่ากับ 2 ในช่วงเวลาเริ่มต้น (ก่อนถึงวินาทีที่ 0.8) สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักเท่ากัน ($F'_1 = F'_2 = 0.5$) ทำให้ตัวควบคุมทั้งสองมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเท่ากัน ต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบตั้งจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F'_1 มีค่ามากกว่า F'_2) ในช่วงเวลาสั้น ๆ (ในช่วงเวลาวินาทีที่ 0.8 ถึงวินาทีที่ 0.9 โดยประมาณ) ทำให้ตัวควบคุมแบบตั้งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า จากนั้นสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F'_2 มีค่ามากกว่า F'_1 ในช่วงเวลาวินาทีที่ 0.9 ถึงวินาทีที่ 2.7) เป็นผลให้ตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า ทำให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินลดลง (ประมาณ 15%) และต่ำกว่าการพุ่งเกินของผลตอบสนองที่เกิดจาก k ที่มีค่าเท่ากับ 1.5 ต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักเกือบเท่ากัน ($F'_1 \approx F'_2 \approx 0.5$ ในช่วงเวลาวินาทีที่ 2.7 ถึงวินาทีที่ 3.2) ทำให้ตัวควบคุมทั้งสองมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเกือบเท่ากัน จากนั้นสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าเล็กน้อย (F'_2 มีค่ามากกว่า F'_1 เล็กน้อยในช่วงเวลาวินาทีที่ 3.2 ถึงวินาทีที่ 4.2 โดยประมาณ) ทำให้ตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่าเล็กน้อย และต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบตั้งจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F'_1 มีค่ามากกว่า F'_2) ทำให้ตัวควบคุมแบบตั้งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่าในสถานะอยู่ตัว นั่นคือสัญญาณถ่วงน้ำหนักที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาก่อนถึงสถานะอยู่ตัว จะทำให้ผลตอบสนองมีการแกว่งเล็กน้อย เป็นผลให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่า (ประมาณ 4.4 วินาที)

เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 1 ตัวควบคุมแบบตั้งและตัวควบคุมแบบเรียบที่เชื่อมต่อกัน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จะได้ว่าสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F'_1 และ F'_2

ต้องมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงหรือมีพฤติกรรมในโดเมนเวลาที่เหมือนกับการเปลี่ยนแปลงของ สัญญาณถ่วงน้ำหนักในกรณีที่ k มีค่าเท่ากับ 0.001, 0.01 และ 0.1 ผลตอบสนองจึงมีสมรรถนะที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะที่ดีกว่าผลตอบสนองแบบติ่งและผลตอบสนองแบบเรียบที่เกิดจากการใช้ ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว กล่าวคือ ในช่วงเวลาเริ่มต้น สัญญาณถ่วงน้ำหนักต้องมีค่าเท่ากัน ($F'_1 = F'_2 = 0.5$) ทำให้สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองได้รับการถ่วง น้ำหนักเท่ากันและตัวควบคุมทั้งสองมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเท่ากัน เป็นผลให้ระบบวงปิดสร้าง ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลานิ่งขึ้นอยู่ระหว่างช่วงเวลานิ่งขึ้นของผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุม แบบติ่งเพียงตัวเดียวและตัวควบคุมแบบเรียบเพียงตัวเดียว ต่อมาสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F'_2 ต้องมีค่า มากกว่า F'_1 ในสถานะชั่วครู่ สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F'_2 อาจจะมีค่าเกือบเท่ากับหนึ่งและ F'_1 อาจจะมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์พร้อมกันภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ทำให้สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้าง ได้จากตัวควบคุมแบบเรียบได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัว ควบคุมแบบติ่ง นั่นคือตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า ทำให้ระบบวงปิด สร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินต่ำกว่าการพุ่งเกินของผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุม แบบติ่งเพียงตัวเดียว จากนั้นก่อนถึงสถานะอยู่ตัว สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F'_2 ต้องมีค่าลดลงและ F'_1 ต้องมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ F'_2 ยังคงมีค่ามากกว่า F'_1 ทำให้สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัว ควบคุมแบบเรียบได้รับการถ่วงน้ำหนักลดลงแต่สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบ ติ่งได้รับการถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้น นั่นคือตัวควบคุมแบบเรียบมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองลดลงแต่ตัว ควบคุมแบบติ่งมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีช่วงเวลา เข้าที่สั้นกว่าช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมแบบเรียบเพียงตัวเดียว



รูปที่ 3.6 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' (—) และ F_2' (----) ที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า k ที่แตกต่างกัน (พลานต์ 1)

เมื่อพิจารณาระบบวงปิดแต่ละระบบที่ประกอบด้วยพลานต์ใดพลานต์หนึ่งตั้งแต่พลานต์ 2 ถึงพลานต์ 7 ตัวควบคุมแบบตั้งและตัวควบคุมแบบเรียบที่เชื่อมต่อกัน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จะได้ว่าระบบวงปิดแต่ละระบบมีค่า k ที่เหมาะสมที่แตกต่างกันซึ่งทำให้เกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะที่ดีกว่าผลตอบสนองแบบตั้งและผลตอบสนองแบบเรียบที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว ทำให้การเลือกค่า k ที่เหมาะสมไม่มีวิธีการที่แน่นอนซึ่งเหมือนกับการเลือกค่า k ของระบบวงปิดที่มีพลานต์ 1 นั่นคือการเลือกค่า k ดังกล่าวจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกเช่นเดียวกัน การเลือกใช้ค่า k ที่แตกต่างกัน จะทำให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสรุปได้ในตารางที่ 3.2 ระบบวงปิดแต่ละระบบจะมีค่า k ที่ได้จากการปรับเปลี่ยนภายในสองช่วง

ตารางที่ 3.2 สมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า k (พลานต์ 2 ถึงพลานต์ 7)

พลานต์	ช่วงของค่า k	ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)	ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time)	การพุ่งเกิน (Overshoot)
2	เพิ่มจาก 0.001 ถึง 0.6	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (1.89 ถึง 1.92 วินาที)	ลดลง (13.68 ถึง 7.53 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (5.12 ถึง 7.52 %)
	เพิ่มจาก 0.6 ถึง 4	ไม่เปลี่ยนแปลง (1.91 วินาที)	เพิ่มขึ้น (7.53 ถึง 32.3 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (7.52 ถึง 8.56 %)
3	เพิ่มจาก 0.001 ถึง 0.1	ลดลงเล็กน้อย (1.7 ถึง 1.52 วินาที)	ลดลง (10.44 ถึง 7.33 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (0.23 ถึง 0.67 %)
	เพิ่มจาก 0.1 ถึง 2	ลดลงเล็กน้อย (1.52 ถึง 1.49 วินาที)	เพิ่มขึ้น (7.33 ถึง > 20 วินาที)	เพิ่มขึ้น (0.67 ถึง > 10 %)
4	เพิ่มจาก 0.001 ถึง 0.5	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (2.13 ถึง 2.77 วินาที)	ลดลง (11.78 ถึง 5.99 วินาที)	ลดลง (12.8 ถึง 0 %)
	เพิ่มจาก 0.5 ถึง 3	ลดลงเล็กน้อย (2.77 ถึง 2.05 วินาที)	เพิ่มขึ้น (5.99 ถึง 12.5 วินาที)	เพิ่มขึ้น (0 ถึง 9.28 %)
5	เพิ่มจาก 0.001 ถึง 1.5	ไม่เปลี่ยนแปลง (4.28 วินาที)	ลดลง (32.3 ถึง 17.95 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (15.28 ถึง 17.3 %)
	เพิ่มจาก 1.5 ถึง 5	ไม่เปลี่ยนแปลง (4.28 วินาที)	เพิ่มขึ้น (17.95 ถึง 28 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (17.3 ถึง 20 %)

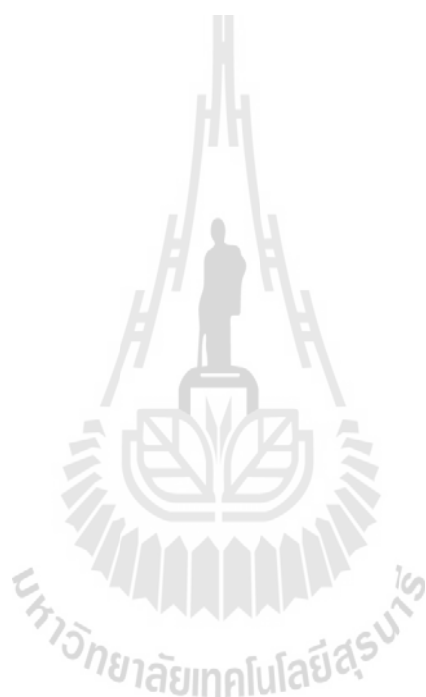
ตารางที่ 3.2 สมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า k (พลาเน็ต 2 ถึงพลาเน็ต 7)
(ต่อ)

พลาเน็ต	ช่วงของค่า k	ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)	ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time)	การพุ่งเกิน (Overshoot)
6	เพิ่มจาก 0.001 ถึง 1.0	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (0.98 ถึง 1.01 วินาที)	ลดลง (9.46 ถึง 4.28 วินาที)	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (25 ถึง 26 %)
	เพิ่มจาก 1 ถึง 10	ไม่เปลี่ยนแปลง (1.01 วินาที)	เพิ่มขึ้น (4.28 ถึง 8.4 วินาที)	ลดลงเล็กน้อย (26 ถึง 25 %)
7	เพิ่มจาก 10^{-10} ถึง 5×10^{-7}	ลดลง (1.84 ถึง 1.79 วินาที)	ลดลง (18.2 ถึง 5.81 วินาที)	เพิ่มขึ้น (7.52 ถึง 13 %)
	เพิ่มจาก 5×10^{-7} ถึง 0.1	เพิ่มขึ้น (1.79 ถึง 1.87 วินาที)	เพิ่มขึ้น (5.81 ถึง > 30 วินาที)	เพิ่มขึ้น (13 ถึง > 20 %)

3.5 สรุป

วิธีการออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักรุ่นที่นำเสนอได้ใช้ฟังก์ชัน $V = \frac{1}{2}e^2$ เป็นตัวแทนของความผิดพลาด $e(t)$ ในระบบวงปิด ฟังก์ชันนี้คือกำลังสองของความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($e^2(t)$) ต่อมาดำเนินการทางคณิตศาสตร์กับฟังก์ชันนี้และต้องการให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเป็นกึ่งจำกัดลบ การดำเนินการเริ่มต้นจากการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันเทียบกับเวลา ต่อมากำหนดให้อนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันต้องมิก่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา ($\dot{V} \leq 0$) ทำให้ฟังก์ชันมีค่าไม่เพิ่มขึ้นจากเดิมหรือลดลงเป็นศูนย์ในสถานะอยู่ตัว ซึ่งหมายความว่าความผิดพลาดของระบบวงปิดไม่มีขนาดเพิ่มขึ้นจากเดิมและอาจจะเป็นศูนย์ในสถานะอยู่ตัว เมื่อกำหนดให้สัญญาณควบคุมรวม $u(t)$ เกิดจากการถ่วงน้ำหนักหรือการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุมย่อยในสมการที่ 3.6 และพิจารณา $\dot{V} \leq 0$ จะได้รับสมการที่ 3.12 และ 3.13 ที่ใช้คำนวณหา F_1 และ F_2 เพื่อนำมาถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมสองตัวที่เชื่อมต่อกันกันต่อไป นอกจากนี้ได้อธิบายแนวทางการเลือกค่าเกณฑ์ปรับถ่วงน้ำหนักของหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักในระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 1 และตัวควบคุมแบบตั้งและตัวควบคุมแบบเรียบที่เชื่อมต่อกันกัน ค่าเกณฑ์ปรับถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมจะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะที่ดีกว่าผลตอบสนองแบบตั้งและผลตอบสนองแบบเรียบที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว ค่าเกณฑ์ปรับถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.1

เพราะค่าเกณฑ์ปรับถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในช่วงนี้ได้ให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจ
หรือมีสมรรถนะที่ดีกว่าผลตอบแทนที่เกิดจากค่าเกณฑ์ปรับถ่วงน้ำหนักค่าอื่น



บทที่ 4

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิด

4.1 บทนำ

ทฤษฎีเสถียรภาพมีบทบาทสำคัญกับการศึกษาระบบควบคุมในทางวิศวกรรม เพราะถ้าระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ จะเป็นสิ่งที่ไม่มีความหมายและอาจเกิดอันตรายในการปฏิบัติงานได้ ระบบที่ทำงานได้ต้องมีเสถียรภาพ นั่นคือถ้าระบบมีจุดเริ่มต้นที่อยู่ใกล้จุดสมดุล ระบบจะมีการทำงานอยู่รอบ ๆ บริเวณนั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เมื่ออินพุตมีค่าแน่นอนค่าหนึ่ง เอาต์พุตของระบบจะต้องมีค่าอยู่ในขอบเขตที่แน่นอน ซึ่งหมายความว่าเอาต์พุตที่ได้จะต้องไม่มีค่าเข้าสู่อนันต์ ในบทนี้ได้เสนอการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดโดยทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (linear time-varying system) (D.A. Sanchez, 1968)

4.2 ทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

พิจารณาระบบ (วงปิด) เชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในสมการที่ (4.1)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) \quad (4.1)$$

โดยที่ $\mathbf{x}(t)$ คือตัวแปรสถานะและ $\mathbf{A}(t)$ เป็นเมทริกซ์ต่อเนื่องตลอดช่วงเวลา $0 \leq t \leq \infty$ ทฤษฎีบทต่อไปนี้จะแสดงว่า ระบบในสมการที่ (4.1) มีเสถียรภาพ

ทฤษฎีบทที่ 1 ผลเฉลยทุกผลเฉลยของระบบ (ตัวแปรสถานะหรือผลตอบสนอง) ในสมการที่ (4.1) จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อผลเฉลยทุกผลเฉลย (ตัวแปรสถานะหรือผลตอบสนอง) ของระบบในสมการที่ (4.1) มีขอบเขตตลอดเวลา

ทฤษฎีบทที่ 2 กำหนดให้ $\mathbf{A}(t) = \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{C}(t)$ โดยที่ $\bar{\mathbf{A}}$ เป็นเมทริกซ์คงที่ของเมทริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ในสถานะอยู่ตัวและค่าไอเกน (Eigenvalues) ของ $\bar{\mathbf{A}}$ มีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า ($\text{Re}(\lambda(\bar{\mathbf{A}})) < 0$) และ $\mathbf{C}(t)$ เป็นเมทริกซ์ต่อเนื่องที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตลอดช่วงเวลา $0 \leq t \leq \infty$ ถ้า

$$\int_0^\infty \|\mathbf{C}(t)\| dt < \infty \quad (4.2)$$

มีค่าผู้หาค่าบวกคงที่ค่าหนึ่ง โดยที่ $\|C(t)\|$ คือ $\|C(t)\|_2$ (นอร์มสองของเมตริกซ์ $C(t)$) จะได้ว่าระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\bar{\mathbf{A}} + \mathbf{C}(t)]\mathbf{x}(t) \quad (4.3)$$

มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง (ผลเฉลยที่ไม่มีอินพุตหรือผลตอบสนองที่ไม่มีอินพุตและตัวแปรสถานะจะมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง)

4.3 การหาสมการสถานะของระบบวงปิด

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและมีค่าพารามิเตอร์บางค่าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จำเป็นที่จะต้องหาสมการสถานะ (state equation) จากระบบดังกล่าว ซึ่งมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการเลือกตัวแปรสถานะ พิจารณาระบบในสมการเชิงอนุพันธ์ ดังสมการที่ (4.4)

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_1\dot{y} + a_0y = b_{n-1}r^{(n-1)} + \dots + b_1\dot{r} + b_0r \quad (4.4)$$

โดยที่ r คืออินพุตของระบบ, y คือเอาต์พุตของระบบ และ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}$ คือสัมประสิทธิ์หรือค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ทุกค่าหรือบางค่า) จากสมการที่ (4.4) สามารถเขียนในรูปสมการสถานะได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_0 & b_1 & b_2 & \dots & b_{n-1} \end{bmatrix} \mathbf{r}(t) \quad (4.5)$$

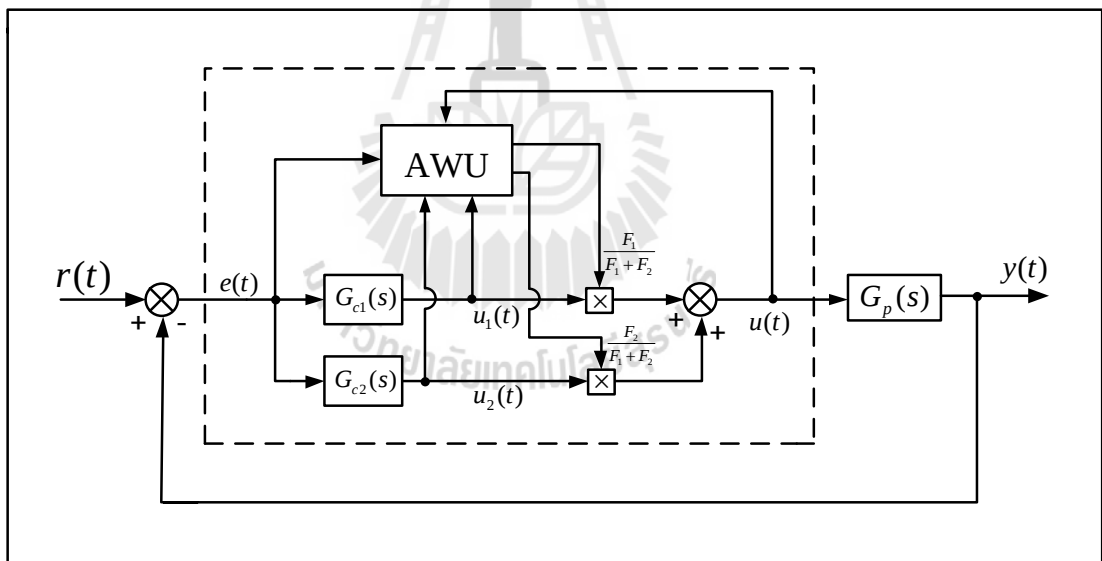
โดยที่ $\mathbf{x}(t) = [y \ \dot{y} \ \ddot{y} \ \dots \ y^{(n-1)}]^T$ และ $\mathbf{r}(t) = [r \ \dot{r} \ \ddot{r} \ \dots \ r^{(n-1)}]^T$ จากสมการที่ (4.5) สามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการเมตริกซ์-เวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{r}(t) \quad (4.6)$$

โดยที่เราต้องการเพียงแค่มเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ เพื่อใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพ ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

ในหัวข้อนี้จะทำการหาสมการสถานะจากสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวทำงานแบบขนานกับหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั โดยดำเนินการกับพลาเน็ตควบคุมยกทั้ง 7 รูปแบบ เมื่อได้สมการเชิงอนุพันธ์ของระบบวงปิดแล้ว ต่อมาเขียนสมการสถานะและหาเพียงเฉพาะเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ จากสมการที่ (4.7) เท่านั้น เพื่อนำไปตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิด สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัวจะได้รับการถ่วงน้ำหนักซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.1 และสัญญาณควบคุมรวมจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุมย่อยและสัญญาณถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (AWU)

จากโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 4.1 เขียนสมการของสัญญาณควบคุมรวม u ได้ดังนี้

$$u = \frac{F_1}{F_1 + F_2} u_1 + \frac{F_2}{F_1 + F_2} u_2 \quad (4.8)$$

และตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ ที่ต่อขนานกันมีสัญญาณควบคุมย่อย u_1 และ u_2 ดังนี้

$$\begin{aligned} u_1 &= K_{P1}e + K_{I1} \int_0^t e dt + K_{D1} \frac{de}{dt} \\ u_2 &= K_{P2}e + K_{I2} \int_0^t e dt + K_{D2} \frac{de}{dt} \end{aligned} \quad (4.9)$$

โดยที่ K_{P1} , K_{P2} , K_{I1} , K_{I2} , K_{D1} และ K_{D2} คือค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ ที่มีค่าคงที่ กำหนดให้ $\alpha = \frac{F_1}{F_1 + F_2}$ จะได้ว่า

$$\frac{F_2}{F_1 + F_2} = \frac{F_2 + F_1 - F_1}{F_1 + F_2} = \frac{F_1 + F_2}{F_1 + F_2} - \frac{F_1}{F_1 + F_2} = 1 - \alpha \quad \text{โดยที่ } 0 \leq \alpha \leq 1 \text{ และจากสมการที่ (4.8) จะได้ว่า}$$

$$u = \alpha u_1 + (1 - \alpha) u_2 \quad (4.10)$$

แทนค่า u_1 และ u_2 จากสมการที่ (4.9) ลงในสมการที่ (4.10) จะได้

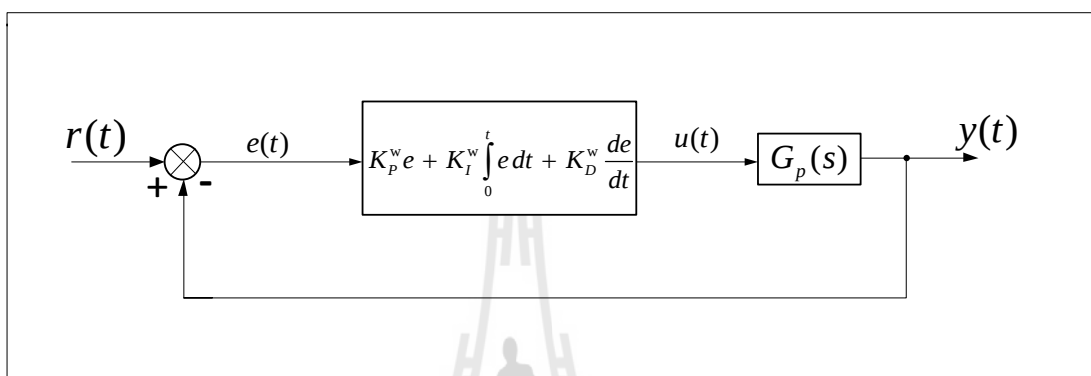
$$\begin{aligned} u &= \alpha K_{P1}e + \alpha K_{I1} \int_0^t e dt + \alpha K_{D1} \frac{de}{dt} + (1 - \alpha) K_{P2}e + (1 - \alpha) K_{I2} \int_0^t e dt + (1 - \alpha) K_{D2} \frac{de}{dt} \\ &= [\alpha K_{P1} + (1 - \alpha) K_{P2}]e + [\alpha K_{I1} + (1 - \alpha) K_{I2}] \int_0^t e dt + [\alpha K_{D1} + (1 - \alpha) K_{D2}] \frac{de}{dt} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$u = K_P^w e + K_I^w \int_0^t e dt + K_D^w \frac{de}{dt} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } K_P^w &= \alpha K_{P1} + (1 - \alpha) K_{P2} \\ K_I^w &= \alpha K_{I1} + (1 - \alpha) K_{I2} \\ \text{และ } K_D^w &= \alpha K_{D1} + (1 - \alpha) K_{D2} \end{aligned} \quad (4.12)$$

เมื่อ $K_p^w = K_p^w(t)$, $K_I^w = K_I^w(t)$ และ $K_D^w = K_D^w(t)$ คือค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ได้รับการถ่วงน้ำหนัก (ค่าพารามิเตอร์หรือค่าเกนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) และสามารถเขียนแผนภาพระบบควบคุมแบบวงปิดได้ในรูปที่ 4.2 ตัวควบคุมพีไอดี $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ มีตัวเลขของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเกณฑ์การปรับจูน (กฎการปรับจูน) แบบตั้งและแบบเรียนที่ใช้ชดเชยพลาเน็ต 7 รูปแบบที่แสดงได้ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีค่าเกนพีไอดีเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับพลาเน็ต 7 รูปแบบ

รายการพลาเน็ต	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
พลาเน็ต 1	$K_{p1} = 4.0500$	$K_{I1} = 3.6000$	$K_{D1} = 1.1391$
	$K_{p2} = 2.2275$	$K_{I2} = 1.9800$	$K_{D2} = 1.6539$
พลาเน็ต 2	$K_{p1} = 2.4000$	$K_{I1} = 0.7656$	$K_{D1} = 1.8810$
	$K_{p2} = 1.3200$	$K_{I2} = 0.4211$	$K_{D2} = 2.7312$
พลาเน็ต 3	$K_{p1} = 1.9200$	$K_{I1} = 0.7232$	$K_{D1} = 1.2744$
	$K_{p2} = 1.0560$	$K_{I2} = 0.3977$	$K_{D2} = 1.8504$
พลาเน็ต 4	$K_{p1} = 9.8076$	$K_{I1} = 5.0425$	$K_{D1} = 4.7689$
	$K_{p2} = 8.3201$	$K_{I2} = 0.0950$	$K_{D2} = 4.0457$
พลาเน็ต 5	$K_{p1} = 12.408$	$K_{I1} = 1.7600$	$K_{D1} = 21.869$
	$K_{p2} = 10.526$	$K_{I2} = 0.0210$	$K_{D2} = 18.552$
พลาเน็ต 6	$K_{p1} = 1.9949$	$K_{I1} = 1.0783$	$K_{D1} = 2.4357$
	$K_{p2} = 3.0769$	$K_{I2} = 0.2665$	$K_{D2} = 1.4231$

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับพลาเน็ต 7 รูปแบบ (ต่อ)

รายการพลาเน็ต	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
พลาเน็ต 7	$K_{p1} = 0.2384$	$K_{I1} = 1.2000$	$K_{D1} = 1.2004$
	$K_{p2} = 0.1527$	$K_{I2} = 0.5500$	$K_{D2} = 0.5727$

4.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของพลาเน็ต 1

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิด เริ่มต้นด้วยการหาสมการสถานะจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 เมื่อพลาเน็ต 1 มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned}
 G_{P1}(s) &= \frac{1}{(s+1)(\beta s+1)(\beta^2 s+1)(\beta^3 s+1)}, \beta = 0.5 \\
 \frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{1}{0.01563s^4 + 0.2344s^3 + 1.094s^2 + 1.875s + 1} \\
 &= \frac{1}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

โดยที่ $a_0 = 1$, $a_1 = 1.875$, $a_2 = 1.094$, $a_3 = 0.2344$ และ $a_4 = 0.01563$

สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดของพลาเน็ต 1 ตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ได้ดังต่อไปนี้

$$Y(s)[a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0] = U(s) \tag{4.14}$$

หรือเขียนในโดเมนเวลาได้เป็น

$$a_4y^{(4)} + a_3\ddot{y} + a_2\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = K_P^w e + K_I^w \int_0^t e dt + K_D^w \frac{de}{dt} \tag{4.15}$$

และกำหนดให้ $e = r - y$ จะได้

$$a_4y^{(4)} + a_3\ddot{y} + a_2\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = K_P^w (r - y) + K_I^w \int_0^t (r - y) dt + K_D^w (\dot{r} - \dot{y}) \tag{4.16}$$

จัดรูปใหม่ จะได้

$$y^{(4)} + \frac{a_3}{a_4} \ddot{y} + \frac{a_2}{a_4} \dot{y} + \frac{(a_1 + K_D^w)}{a_4} \dot{y} + \frac{(a_0 + K_P^w)}{a_4} y + \frac{K_I^w}{a_4} \int_0^t y dt = \frac{K_D^w}{a_4} \dot{r} + \frac{K_P^w}{a_4} r + \frac{K_I^w}{a_4} \int_0^t r dt \quad (4.17)$$

สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_I^w}{a_4} & -\frac{(a_0 + K_P^w)}{a_4} & -\frac{(a_1 + K_D^w)}{a_4} & -\frac{a_2}{a_4} & -\frac{a_3}{a_4} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_I^w}{a_4} & \frac{K_P^w}{a_4} & \frac{K_D^w}{a_4} \end{bmatrix} \mathbf{r}(t) \quad (4.18)$$

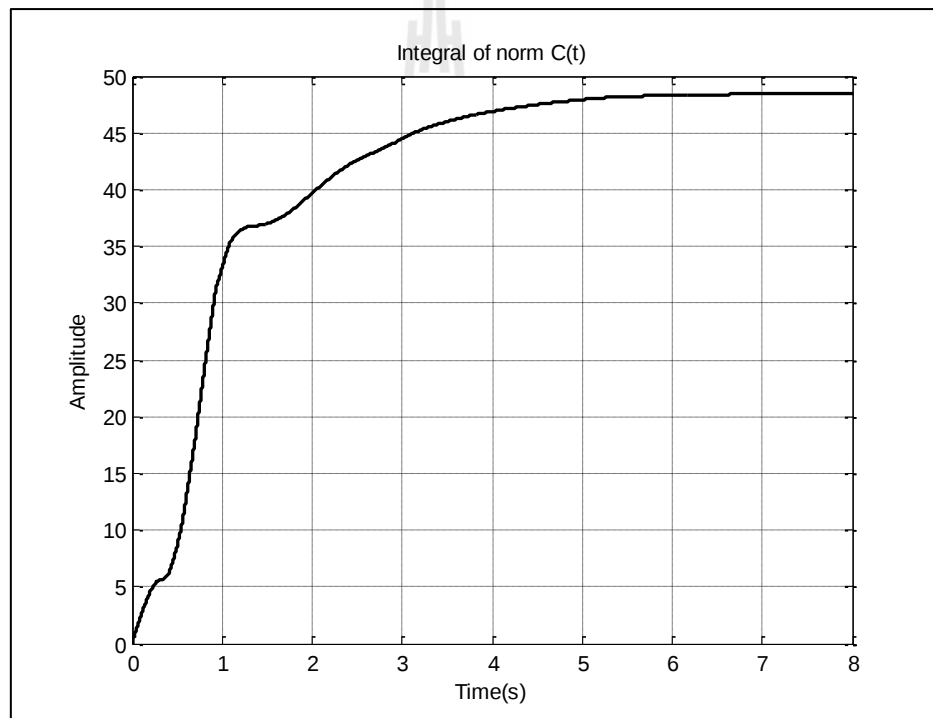
โดยที่ $\mathbf{x}(t) = [\int_0^t y dt \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad \ddot{\ddot{y}}]^T$ และ $\mathbf{r}(t) = [\int_0^t r dt \quad r \quad \dot{r}]^T$

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ เริ่มต้นจากการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิดในรูปที่ 4.1 โดยกำหนดให้ $\mathbf{r}(t) = 0$ (ระบบวงปิดไม่มีสัญญาณอ้างอิง) และค่าเริ่มต้นของ $\int_{-\infty}^0 e(t) dt$ เท่ากับ 1 จะได้ $\int_{-\infty}^0 y(t) dt$ เท่ากับ -1 และ $\mathbf{x}(0) = [-1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ แล้วสร้างเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ขึ้นมา โดยที่ค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w คำนวณได้ในสมการที่ (4.12) และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 และมีค่า $k = 0.1$ จากนั้นจำลองสถานการณ์จากเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ถึงเวลาที่สถานะอยู่ตัว (พิจารณาที่เวลา $t = 8$) ดังนั้นเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่เวลา $t = 8$ คือเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ($\bar{\mathbf{A}} \approx \mathbf{A}(8)$) โดยเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ และ $\bar{\mathbf{A}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_I^w}{a_4} & -\frac{(a_0 + K_P^w)}{a_4} & -\frac{(a_1 + K_D^w)}{a_4} & -\frac{a_2}{a_4} & -\frac{a_3}{a_4} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -163.47 & -247.89 & -214.08 & -70 & -15 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

เมื่อได้เมทริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำเพื่ออินทิเกรตค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 8 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 ค่าอินทิเกรตของ $\|\mathbf{C}(t)\|$ (พลาเน็ต 1)

ค่าไอเกนของเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ของระบบวงปิด สำหรับพลาเน็ต 1 คือ -9.8621 , $-1.8293 \pm j3.0423$ และ $-0.7397 \pm j0.8765$ ซึ่งมีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า การคำนวณค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ ใน SIMULINK จะใช้สมการ $\mathbf{C}(t) = \mathbf{A}(t) - \bar{\mathbf{A}}$ และใช้คุณสมบัติอินทิเกรตของเมทริกซ์คือ

$$\|\mathbf{C}(t)\| \leq \sqrt{\|\mathbf{C}(t)\|_1 \cdot \|\mathbf{C}(t)\|_\infty} \quad \text{โดยที่ } \|\mathbf{C}(t)\|_\infty = \|\mathbf{C}^T(t)\|_1 \quad (\text{Khalil, 2002})$$

เพราะไม่สามารถคำนวณหา $\|\mathbf{C}(t)\|$ ใน SIMULINK ได้โดยตรง และทำการอินทิเกรตค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 8 วินาที ซึ่งเป็นเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาในสถานะอยู่ตัวที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จะได้ว่า

$\int_0^8 \|C(t)\| dt = 48.49 < \infty$ และ $\int_0^\infty \|C(t)\| dt$ มีแนวโน้มลู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่งซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.3 นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

4.5 การตรวจสอบเสถียรภาพของพลาเน็ต 2

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิด เริ่มต้นด้วยการหาสมการสถานะจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 เมื่อพลาเน็ต 2 มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned} G_{P2}(s) &= \frac{1}{(s+1)^4} \\ \frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \\ &= \frac{1}{s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \end{aligned} \quad (4.21)$$

โดยที่ $a_0 = 1$, $a_1 = 4$, $a_2 = 6$ และ $a_3 = 4$

สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของพลาเน็ต 2 ตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ได้ดังต่อไปนี้

$$Y(s)[s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0] = U(s) \quad (4.22)$$

หรือเขียนในโดเมนเวลาได้เป็น

$$y^{(4)} + a_3\ddot{y} + a_2\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = K_P^w e + K_I^w \int_0^t e dt + K_D^w \frac{de}{dt} \quad (4.23)$$

และกำหนดให้ $e = r - y$ จะได้

$$y^{(4)} + a_3\ddot{y} + a_2\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = K_P^w (r - y) + K_I^w \int_0^t (r - y) dt + K_D^w (\dot{r} - \dot{y}) \quad (4.24)$$

จัดรูปจะได้

$$y^{(4)} + a_3\ddot{y} + a_2\dot{y} + (a_1 + K_D^w)\dot{y} + (a_0 + K_P^w)y + K_I^w \int_0^t y dt = K_D^w \dot{r} + K_P^w r + K_I^w \int_0^t r dt \quad (4.25)$$

สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_I^w & -(a_0 + K_P^w) & -(a_1 + K_D^w) & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ K_I^w & K_P^w & K_D^w \end{bmatrix} \mathbf{r}(t) \quad (4.26)$$

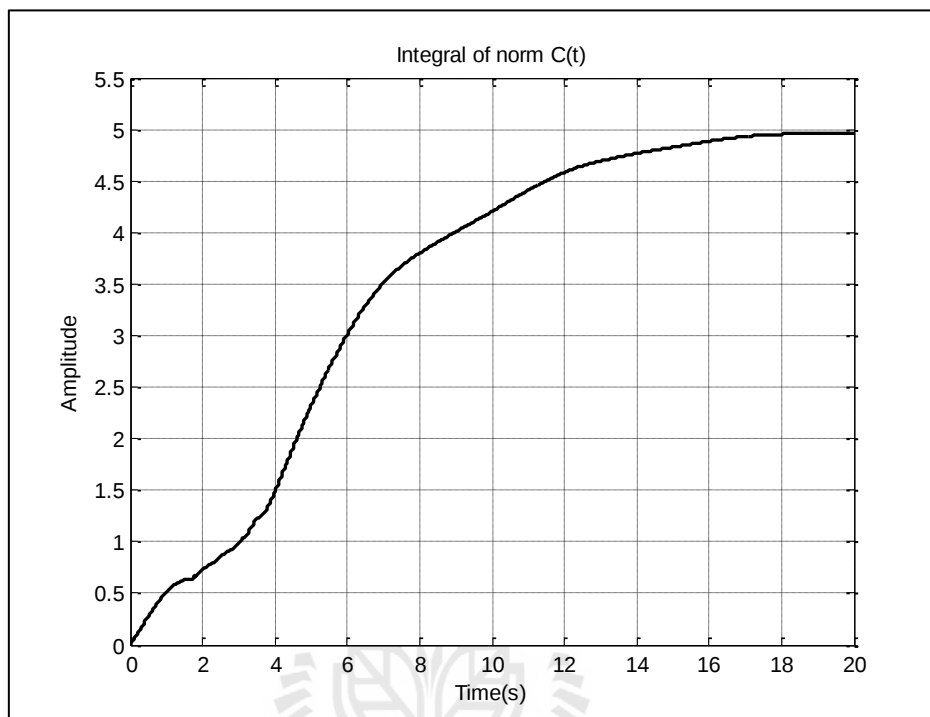
$$\text{โดยที่ } \mathbf{x}(t) = \left[\int_0^t y dt \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad \ddot{\ddot{y}} \right]^T \text{ และ } \mathbf{r}(t) = \left[\int_0^t r dt \quad r \quad \dot{r} \right]^T$$

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จะคล้ายกับพลานต์ 1 โดยกำหนดให้ $\mathbf{r}(t) = 0$ และค่าเริ่มต้นของ $\int_{-\infty}^0 e(t) dt$ เท่ากับ 1 จะได้ $\int_{-\infty}^0 y(t) dt$ เท่ากับ -1 และ $\mathbf{x}(0) = [-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ แล้วสร้างเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ขึ้นมา หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 และมีค่า $k = 0.6$ จากนั้นจำลองสถานการณ์จากเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ถึงเวลาที่สถานะอยู่ตัว (พิจารณาที่เวลา $t = 20$) ดังนั้นเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่เวลา $t = 20$ คือเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ($\bar{\mathbf{A}} \approx \mathbf{A}(20)$) โดยเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ และ $\bar{\mathbf{A}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_I^w & -(a_0 + K_P^w) & -(a_1 + K_D^w) & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.4719 & -2.4793 & -6.6058 & -6 & -4 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

เมื่อได้เมตริกซ์ $A(t)$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเมตริกซ์ $\bar{A}$ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำเพื่ออินทิเกรตค่า $\|C(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 20 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ค่าอินทิเกรตของ $\|C(t)\|$ (พลาเน็ต 2)

ค่าไอเกนของเมตริกซ์ $\bar{A}$ ของระบบวงปิด สำหรับพลาเน็ต 2 คือ -2.5145 , $-0.5039 \pm j1.1904$ และ $-0.2388 \pm j0.2351$ ซึ่งมีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า การคำนวณค่า $\|C(t)\|$ คล้ายกับกรณีพลาเน็ต 1 และมีค่า $\int_0^{20} \|C(t)\| dt = 4.959 < \infty$ และ $\int_0^{\infty} \|C(t)\| dt$ มีแนวโน้มลู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่งซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.4 นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

4.6 การตรวจสอบเสถียรภาพของพลาเน็ต 3

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดเริ่มต้นด้วยการหาสมการสถานะจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 เมื่อพลาเน็ต 3 มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned} G_{P3}(s) &= \frac{-0.5s+1}{(s+1)^3} \\ \frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{-0.5s+1}{s^3+3s^2+3s+1} \\ &= \frac{b_1s+b_0}{s^3+a_2s^2+a_1s+a_0} \end{aligned} \quad (4.29)$$

โดยที่ $a_0 = 1$, $a_1 = 3$, $a_2 = 3$, $b_0 = 1$ และ $b_1 = -0.5$

สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของพลาเน็ต 3 ตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ได้ดังต่อไปนี้

$$Y(s)[s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0] = U(s)[b_1s + b_0] = U(s)b_1s + U(s)b_0 \quad (4.30)$$

หรือเขียนในโดเมนเวลาได้เป็น

$$\begin{aligned} \ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1\dot{y} + a_0y &= b_1\dot{u} + b_0u \\ \ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1\dot{y} + a_0y &= b_1(K_P^w\dot{e} + K_I^we + K_D^w\ddot{e}) + b_1(\dot{K}_P^we + \dot{K}_I^w\int_0^t edt + \dot{K}_D^w\dot{e}) \\ &\quad + b_0(K_P^we + K_I^w\int_0^t edt + K_D^w\dot{e}) \end{aligned} \quad (4.31)$$

และกำหนดให้ $e = r - y$ จะได้

$$\begin{aligned} \ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1\dot{y} + a_0y &= b_1[K_P^w(\dot{r} - \dot{y}) + K_I^w(r - y) + K_D^w(\ddot{r} - \ddot{y})] \\ &\quad + b_1[\dot{K}_P^w(r - y) + \dot{K}_I^w\int_0^t (r - y)dt + \dot{K}_D^w(\dot{r} - \dot{y})] \\ &\quad + b_0[K_P^w(r - y) + K_I^w\int_0^t (r - y)dt + K_D^w(\dot{r} - \dot{y})] \end{aligned} \quad (4.32)$$

จัดรูปจะได้

$$\begin{aligned}
& \ddot{y} + (a_2 + K_D^w b_1) \dot{y} + (a_1 + K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + \dot{K}_D^w b_1) \dot{y} + (a_0 + K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + \dot{K}_P^w b_1) y \\
& + (K_I^w b_0 + \dot{K}_I^w b_1) \int_0^t y dt \\
& = K_D^w b_1 \ddot{r} + (K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + \dot{K}_D^w b_1) \dot{r} + (K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + \dot{K}_P^w b_1) r \\
& + (K_I^w b_0 + \dot{K}_I^w b_1) \int_0^t r dt
\end{aligned} \tag{4.33}$$

สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}}(t) = & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(K_I^w b_0 + \dot{K}_I^w b_1) & -(a_0 + K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + \dot{K}_P^w b_1) & -(a_1 + K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + \dot{K}_D^w b_1) & -(a_2 + K_D^w b_1) \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (K_I^w b_0 + \dot{K}_I^w b_1) & (K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + \dot{K}_P^w b_1) & (K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + \dot{K}_D^w b_1) & K_D^w b_1 \end{bmatrix} \mathbf{r}(t)
\end{aligned} \tag{4.34}$$

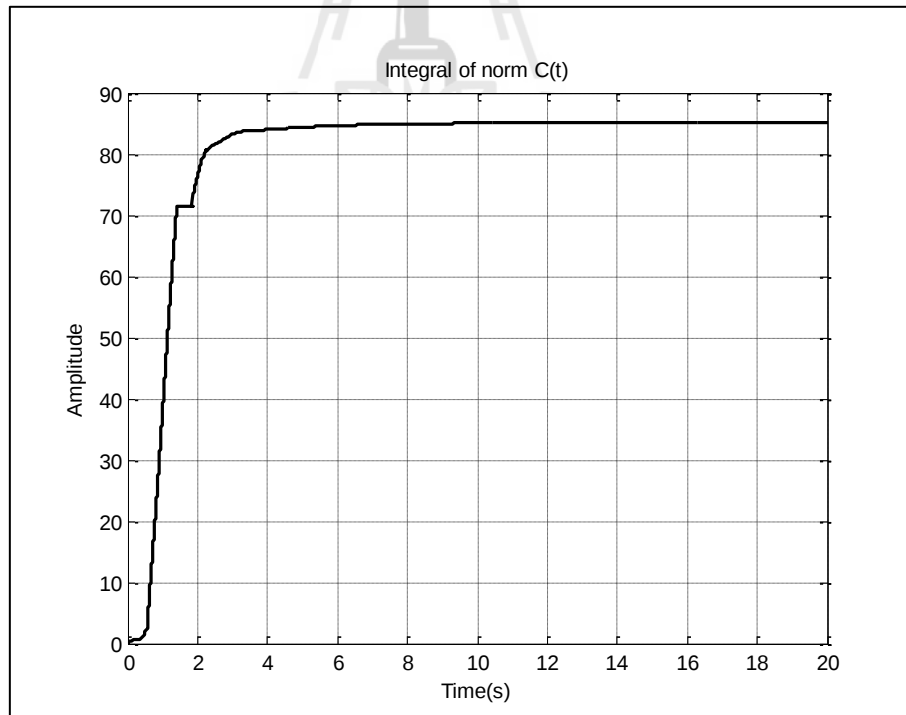
โดยที่ $\mathbf{x}(t) = [\int_0^t y dt \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y}]^T$ และ $\mathbf{r}(t) = [\int_0^t r dt \quad r \quad \dot{r} \quad \ddot{r}]^T$

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จะคล้ายกับพลานต์ 1 โดยกำหนดให้ $\mathbf{r}(t) = 0$ และค่าเริ่มต้นของ $\int_{-\infty}^0 e(t) dt$ เท่ากับ 1 จะได้ $\int_{-\infty}^0 y(t) dt$ เท่ากับ -1 และ $\mathbf{x}(0) = [-1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ แล้วสร้างเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ขึ้นมา หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 และมีค่า $k = 0.1$ จากนั้นจำลองสถานการณ์จากเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ถึงเวลาที่สถานะอยู่ตัว (พิจารณาที่เวลา $t = 20$) ดังนั้นเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่เวลา $t = 20$ คือเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ($\bar{\mathbf{A}} \approx \mathbf{A}(20)$) โดยเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ และ $\bar{\mathbf{A}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(K_I^w b_0 + \dot{K}_I^w b_1) & -(a_0 + K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + \dot{K}_P^w b_1) & -(a_1 + K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + \dot{K}_D^w b_1) & -(a_2 + K_D^w b_1) \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.4735 & -2.0204 & -4.0877 & -2.1419 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

เมื่อได้เมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำเพื่ออินทิเกรตค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 20 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 ค่าอินทิเกรตของ $\|\mathbf{C}(t)\|$ (พลาเน็ต 3)

ค่าไอเกนของเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ของระบบวงปิด สำหรับพลาเน็ต 3 คือ $-0.7764 \pm j1.5535$ และ $-0.2945 \pm j0.265$ ซึ่งมีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า การคำนวณค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ คล้ายกับกรณีพลาเน็ต 1 และ

มีค่า $\int_0^{20} \|C(t)\| dt = 85.18 < \infty$ และ $\int_0^{\infty} \|C(t)\| dt$ มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่บวกค่าหนึ่งซึ่งแสดงได้
 ในรูปที่ 4.5 นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

4.7 การตรวจสอบเสถียรภาพของพลาเน็ต 4

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดเริ่มต้นด้วยการหาสมการสถานะจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 เมื่อพลาเน็ต 4 มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned} G_{P4}(s) &= \frac{1}{10s+1} e^{-s} \\ &= \frac{1}{a_1s+a_0} e^{-s} \end{aligned} \quad (4.37)$$

โดยที่ $a_0 = 1$ และ $a_1 = 10$

เนื่องจากพจน์ของการประวิงเวลา (e^{-s}) จะถูกชดเชยด้วยตัวทำนายสมิธแล้ว จึงพิจารณาเพียง $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{a_1s+a_0}$ สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของพลาเน็ต 4 ตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ได้ดังต่อไปนี้

$$Y(s)[a_1s+a_0] = U(s) \quad (4.38)$$

หรือเขียนในโดเมนเวลาได้เป็น

$$a_1\dot{y} + a_0y = K_p^w e + K_I^w \int_0^t e dt + K_D^w \frac{de}{dt} \quad (4.39)$$

และกำหนดให้ $e = r - y$ จะได้

$$a_1\dot{y} + a_0y = K_p^w (r - y) + K_I^w \int_0^t (r - y) dt + K_D^w (\dot{r} - \dot{y}) \quad (4.40)$$

จัดรูปจะได้

$$\dot{y} + \left(\frac{a_0 + K_P^w}{a_1 + K_D^w} \right) y + \frac{K_I^w}{(a_1 + K_D^w)} \int_0^t y dt = \frac{K_D^w}{(a_1 + K_D^w)} \dot{r} + \frac{K_P^w}{(a_1 + K_D^w)} r + \frac{K_I^w}{(a_1 + K_D^w)} \int_0^t r dt \quad (4.41)$$

สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_I^w}{a_1 + K_D^w} & -\frac{a_0 + K_P^w}{a_1 + K_D^w} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_I^w}{(a_1 + K_D^w)} & \frac{K_P^w}{(a_1 + K_D^w)} & \frac{K_D^w}{(a_1 + K_D^w)} \end{bmatrix} \mathbf{r}(t) \quad (4.42)$$

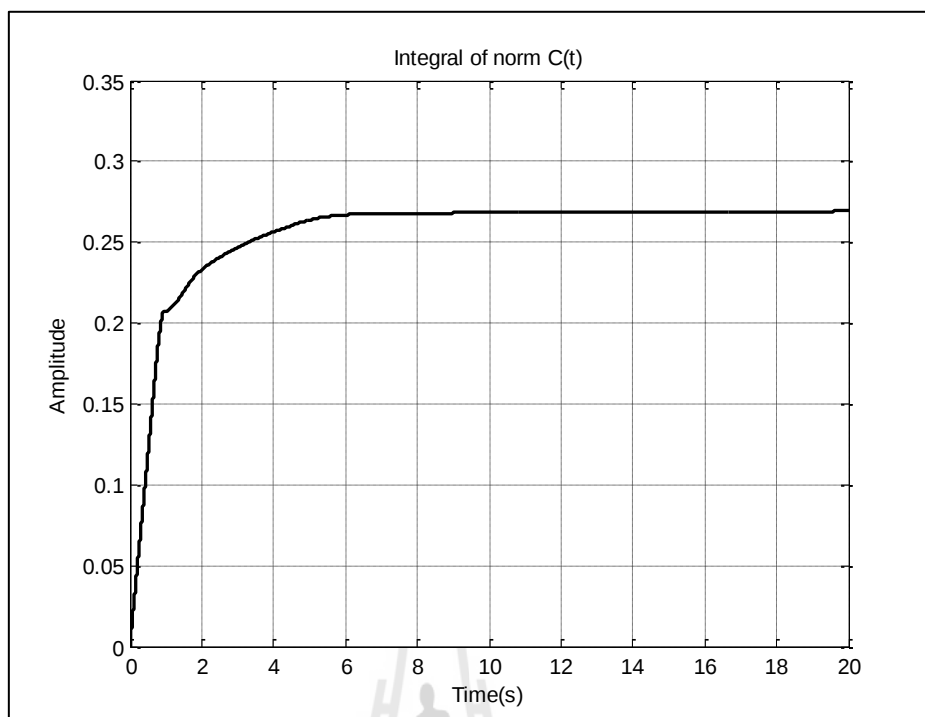
$$\text{โดยที่ } \mathbf{x}(t) = \left[\int_0^t y dt \quad y \right]^T \text{ และ } \mathbf{r}(t) = \left[\int_0^t r dt \quad r \quad \dot{r} \right]^T$$

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จะคล้ายกับพลานต์ 1 โดยกำหนดให้ $\mathbf{r}(t) = 0$ และค่าเริ่มต้นของ $\int_{-\infty}^0 e(t) dt$ เท่ากับ 1 จะได้ $\int_{-\infty}^0 y(t) dt$ เท่ากับ -1 และ $\mathbf{x}(0) = [-1 \quad 0]^T$ แล้วสร้างเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ขึ้นมา หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 และมีค่า $k = 0.5$ จากนั้นจำลองสถานการณ์จากเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ถึงเวลาที่สถานะอยู่ตัว (พิจารณาที่เวลา $t = 20$) ดังนั้นเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่เวลา $t = 20$ คือเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ($\bar{\mathbf{A}} \approx \mathbf{A}(20)$) โดยเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ และ $\bar{\mathbf{A}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_I^w}{a_1 + K_D^w} & -\frac{a_0 + K_P^w}{a_1 + K_D^w} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2415 & -0.7632 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

เมื่อได้เมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำเพื่ออินทิเกรตค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 20 วินาทีสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 ค่าอินทิเกรตของ $\|C(t)\|$ (พลาเน็ต 4)

ค่าไอเกนของเมตริกซ์ $\bar{A}$ ของระบบวงปิด สำหรับพลาเน็ต 4 คือ $-0.3816 \pm j0.3096$ ซึ่งมี
ส่วนจริงเป็นลบทุกค่า การคำนวณค่า $\|C(t)\|$ คล้ายกับกรณีพลาเน็ต 1 และมีค่า
 $\int_0^{20} \|C(t)\| dt = 0.2692 < \infty$ และ $\int_0^{\infty} \|C(t)\| dt$ มีแนวโน้มลู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่งซึ่งแสดงได้
ในรูปที่ 4.6 นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

4.8 การตรวจสอบเสถียรภาพของพลาเน็ต 5

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดเริ่มต้นด้วยการหาสมการสถานะจากฟังก์ชันถ่าย
โอนวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 เมื่อพลาเน็ต 5 มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned}
 G_{P5}(s) &= \frac{1}{(10s+1)^2} e^{-s} \\
 &= \frac{1}{100s^2 + 20s + 1} e^{-s} \\
 &= \frac{1}{a_2s^2 + a_1s + a_0} e^{-s}
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

โดยที่ $a_0 = 1$, $a_1 = 20$ และ $a_2 = 100$

เนื่องจากพจน์ของการประวิงเวลา (e^{-s}) จะถูกชดเชยด้วยตัวทำนายสมิธแล้ว จึงพิจารณาเพียงเฉพาะ

$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$ สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของพลานต์ 5 ตามโครงสร้างในรูปที่

4.2 ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ได้ดังต่อไปนี้

$$Y(s)[a_2 s^2 + a_1 s + a_0] = U(s) \quad (4.46)$$

หรือเขียนในโดเมนเวลาได้เป็น

$$a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = K_p^w e + K_I^w \int_0^t e dt + K_D^w \frac{de}{dt} \quad (4.47)$$

และกำหนดให้ $e = r - y$ จะได้

$$a_2 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = K_p^w (r - y) + K_I^w \int_0^t (r - y) dt + K_D^w (\dot{r} - \dot{y}) \quad (4.48)$$

จัดรูปจะได้

$$\ddot{y} + \frac{(a_1 + K_D^w)}{a_2} \dot{y} + \frac{(a_0 + K_P^w)}{a_2} y + \frac{K_I^w}{a_2} \int_0^t y dt = \frac{K_D^w}{a_2} \dot{r} + \frac{K_P^w}{a_2} r + \frac{K_I^w}{a_2} \int_0^t r dt \quad (4.49)$$

สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_I^w}{a_2} & -\frac{a_0 + K_P^w}{a_2} & -\frac{a_1 + K_D^w}{a_2} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_I^w}{a_2} & \frac{K_P^w}{a_2} & \frac{K_D^w}{a_2} \end{bmatrix} \mathbf{r}(t) \quad (4.50)$$

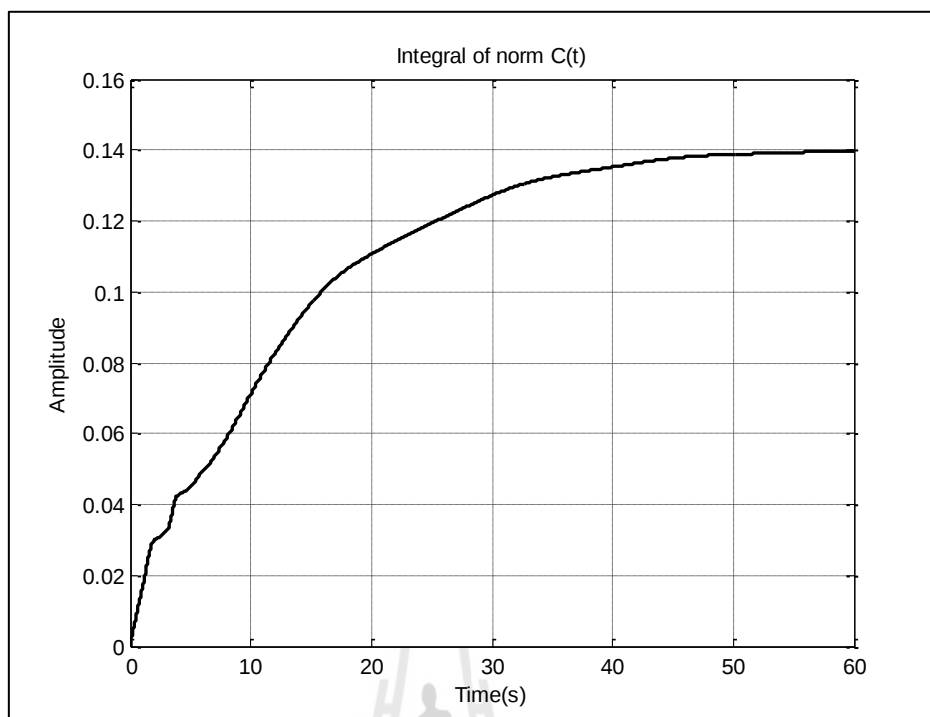
โดยที่ $\mathbf{x}(t) = [\int_0^t y dt \quad y \quad \dot{y}]^T$ และ $\mathbf{r}(t) = [\int_0^t r dt \quad r \quad \dot{r}]^T$

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จะคล้ายกับพลานต์ 1 โดยกำหนดให้ $\mathbf{r}(t) = 0$ และค่าเริ่มต้นของ $\int_{-\infty}^0 e(t) dt$ เท่ากับ 1 จะได้ $\int_{-\infty}^0 y(t) dt$ เท่ากับ -1 และ $\mathbf{x}(0) = [-1 \quad 0 \quad 0]^T$ แล้วสร้างเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ขึ้นมา หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 และมีค่า $k = 1.5$ จากนั้นจำลองสถานการณ์จากเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ถึงเวลาที่สถานะอยู่ตัว (พิจารณาที่เวลา $t = 60$) ดังนั้นเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่เวลา $t = 60$ คือเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ($\bar{\mathbf{A}} \approx \mathbf{A}(60)$) โดยเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ และ $\bar{\mathbf{A}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_I^w}{a_2} & -\frac{a_0 + K_P^w}{a_2} & -\frac{a_1 + K_D^w}{a_2} \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0.0061 & -0.1224 & -0.3973 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

เมื่อได้เมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำเพื่ออินทิเกรตค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 60 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 ค่าอินทิเกรตของ $\|C(t)\|$ (พลาเน็ต 5)

ค่าไอเกนของเมตริกซ์ $\bar{A}$ ของระบบวงปิด สำหรับพลาเน็ต 5 คือ -0.0601 และ $-0.1686 \pm j0.2715$ ซึ่งมีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า การคำนวณค่า $\|C(t)\|$ คล้ายกับกรณีพลาเน็ต 1 และมีค่า $\int_0^{60} \|C(t)\| dt = 0.1397 < \infty$ และ $\int_0^{\infty} \|C(t)\| dt$ มีแนวโน้มลู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่งซึ่งแสดงได้ ในรูปที่ 4.7 นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

4.9 การตรวจสอบเสถียรภาพของพลาเน็ต 6

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดเริ่มต้นด้วยการหาสมการสถานะจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 เมื่อพลาเน็ต 6 มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned}
 G_{P6}(s) &= \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)} \\
 \frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{s^2+12s+36}{s^4+38s^3+73s^2+36s} \\
 &= \frac{s^2+b_1s+b_0}{s^4+a_3s^3+a_2s^2+a_1s}
 \end{aligned} \tag{4.53}$$

โดยที่ $a_1 = 36$, $a_2 = 73$, $a_3 = 38$, $b_0 = 36$ และ $b_1 = 12$

สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของพลานต์ 6 ตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ได้ดังต่อไปนี้

$$Y(s)[s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s] = U(s)[s^2 + b_1s + b_0] = U(s)s^2 + U(s)b_1s + U(s)b_0 \quad (4.54)$$

หรือเขียนในโดเมนเวลาได้เป็น

$$\begin{aligned} y^{(4)} + a_3\ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1y &= \ddot{u} + b_1\dot{u} + b_0u \\ y^{(4)} + a_3\ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1y &= (K_p^w\ddot{e} + K_I^w\dot{e} + K_D^w\ddot{e}) + 2(\dot{K}_p^we + \dot{K}_I^we + \dot{K}_D^w\ddot{e}) \\ &\quad + (\ddot{K}_p^we + \ddot{K}_I^w\int_0^t edt + \ddot{K}_D^w\dot{e}) + b_1(K_p^w\dot{e} + K_I^we + K_D^w\ddot{e}) \\ &\quad + b_1(\dot{K}_p^we + \dot{K}_I^w\int_0^t edt + \dot{K}_D^w\dot{e}) \\ &\quad + b_0(K_p^w\dot{e} + K_I^w\int_0^t edt + K_D^w\ddot{e}) \end{aligned} \quad (4.55)$$

หมายเหตุ

$$\begin{aligned} u &= K_p^we + K_I^w\int_0^t edt + K_D^w\dot{e} \\ \dot{u} &= (K_p^w\dot{e} + K_I^we + K_D^w\ddot{e}) + (\dot{K}_p^we + \dot{K}_I^w\int_0^t edt + \dot{K}_D^w\dot{e}) \\ \ddot{u} &= (K_p^w\ddot{e} + K_I^w\dot{e} + K_D^w\ddot{e}) + (\dot{K}_p^w\dot{e} + \dot{K}_I^we + \dot{K}_D^w\ddot{e}) \\ &\quad + (\ddot{K}_p^we + \ddot{K}_I^w\int_0^t edt + \ddot{K}_D^w\dot{e}) \\ &= (K_p^w\ddot{e} + K_I^w\dot{e} + K_D^w\ddot{e}) + 2(\dot{K}_p^w\dot{e} + \dot{K}_I^we + \dot{K}_D^w\ddot{e}) + (\ddot{K}_p^we + \ddot{K}_I^w\int_0^t edt + \ddot{K}_D^w\dot{e}) \end{aligned}$$

และกำหนดให้ $e = r - y$ จะได้

$$\begin{aligned}
y^{(4)} + a_3 \ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 y &= [K_p^w (\ddot{r} - \ddot{y}) + K_I^w (\dot{r} - \dot{y}) + K_D^w (\ddot{r} - \ddot{y})] \\
&\quad + 2[\dot{K}_p^w (\dot{r} - \dot{y}) + \dot{K}_I^w (r - y) + \dot{K}_D^w (\ddot{r} - \ddot{y})] \\
&\quad + [\ddot{K}_p^w (r - y) + \ddot{K}_I^w \int_0^t (r - y) dt + \ddot{K}_D^w (\dot{r} - \dot{y})] \\
&\quad + b_1 [K_p^w (\dot{r} - \dot{y}) + K_I^w (r - y) + K_D^w (\ddot{r} - \ddot{y})] \\
&\quad + b_1 [\dot{K}_p^w (r - y) + \dot{K}_I^w \int_0^t (r - y) dt + \dot{K}_D^w (\dot{r} - \dot{y})] \\
&\quad + b_0 [K_p^w (r - y) + K_I^w \int_0^t (r - y) dt + K_D^w (\dot{r} - \dot{y})]
\end{aligned} \tag{4.56}$$

จัดรูปจะได้

$$\begin{aligned}
&y^{(4)} + (a_3 + K_D^w) \ddot{y} + (a_2 + K_p^w + K_D^w b_1 + 2\dot{K}_D^w) \dot{y} \\
&\quad + (a_1 + K_I^w + K_p^w b_1 + K_D^w b_0 + 2\dot{K}_p^w + \ddot{K}_D^w + \dot{K}_D^w b_1) y \\
&\quad + (K_I^w b_1 + K_p^w b_0 + 2\dot{K}_I^w + \ddot{K}_p^w + \dot{K}_p^w b_1) y + (K_I^w b_0 + \ddot{K}_I^w + \dot{K}_I^w b_1) \int_0^t y dt \\
&= K_D^w \ddot{r} + (K_p^w + K_D^w b_1 + 2\dot{K}_D^w) \dot{r} + (K_I^w + K_p^w b_1 + K_D^w b_0 + 2\dot{K}_p^w + \ddot{K}_D^w + \dot{K}_D^w b_1) r \\
&\quad + (K_I^w b_1 + K_p^w b_0 + 2\dot{K}_I^w + \ddot{K}_p^w + \dot{K}_p^w b_1) r + (K_I^w b_0 + \ddot{K}_I^w + \dot{K}_I^w b_1) \int_0^t r dt
\end{aligned} \tag{4.57}$$

สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}}(t) = & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(K_I^w b_0 + \ddot{K}_I^w + \dot{K}_I^w b_1) & -(K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + 2\dot{K}_I^w + \ddot{K}_P^w + \dot{K}_P^w b_1) & -(a_1 + K_I^w + K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + 2\dot{K}_P^w + \ddot{K}_D^w + \dot{K}_D^w b_1) & -(a_2 + K_P^w + K_D^w b_1 + 2\dot{K}_D^w) & -(a_3 + K_D^w) \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\
+ & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (K_I^w b_0 + \ddot{K}_I^w + \dot{K}_I^w b_1) & (K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + 2\dot{K}_I^w + \ddot{K}_P^w + \dot{K}_P^w b_1) & (K_I^w + K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + 2\dot{K}_P^w + \ddot{K}_D^w + \dot{K}_D^w b_1) & (K_P^w + K_D^w b_1 + 2\dot{K}_D^w) & K_D^w \end{bmatrix} \mathbf{r}(t)
\end{aligned} \tag{4.58}$$

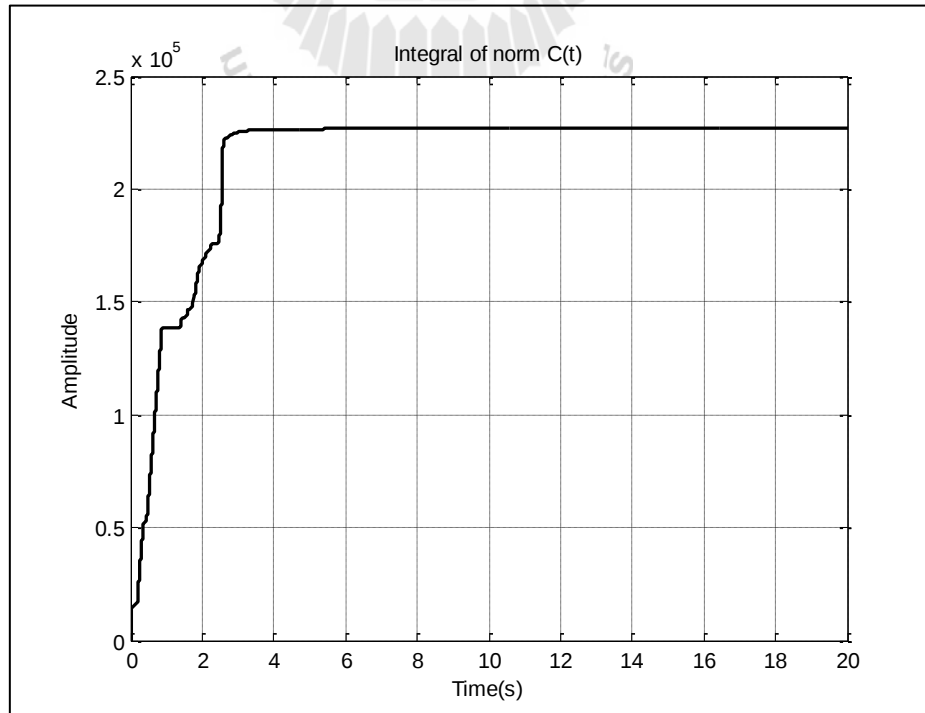
โดยที่ $\mathbf{x}(t) = [\int_0^t y dt \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad \ddot{\ddot{y}}]^T$ และ $\mathbf{r}(t) = [\int_0^t r dt \quad r \quad \dot{r} \quad \ddot{r} \quad \ddot{\ddot{r}}]^T$

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จะคล้ายกับพลานต์ 1 โดยกำหนดให้ $\mathbf{r}(t) = 0$ และค่าเริ่มต้นของ $\int_{-\infty}^0 e(t) dt$ เท่ากับ 1 จะได้ $\int_{-\infty}^0 y(t) dt$ เท่ากับ -1 และ $\mathbf{x}(0) = [-1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ แล้วสร้างเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ขึ้นมา หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 และมีค่า $k = 1$ จากนั้นจำลองสถานการณ์จากเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ถึงเวลาที่สถานะอยู่ตัว (พิจารณาที่เวลา $t = 20$) ดังนั้นเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่เวลา $t = 20$ คือเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ($\bar{\mathbf{A}} \approx \mathbf{A}(20)$) โดยเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ และ $\bar{\mathbf{A}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(K_I^w b_0 + \ddot{K}_I^w + \dot{K}_I^w b_1) & -(K_I^w b_1 + K_P^w b_0 + 2\dot{K}_I^w + \ddot{K}_P^w + \dot{K}_P^w b_1) & -(a_1 + K_I^w + K_P^w b_1 + K_D^w b_0 + 2\dot{K}_P^w + \ddot{K}_D^w + \dot{K}_D^w b_1) & -(a_2 + K_P^w + K_D^w b_1 + 2\dot{K}_D^w) & -(a_3 + K_D^w) \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -23.6383 & -100.1264 & -146.9051 & -102.0622 & -40.2083 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

เมื่อได้เมทริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำเพื่ออินทิเกรตค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 20 วินาทีสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 ค่าอินทิเกรตของ $\|\mathbf{C}(t)\|$ (พลาเน็ต 6)

ค่าไอเกนของเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ของระบบวงปิด สำหรับพลาเน็ต 7 คือ $-37.5956, -0.7057 \pm j1.1369, -0.6987$ และ -0.5026 ซึ่งมีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า การคำนวณค่า $\|\mathbf{C}(t)\|$ คล้ายกับกรณีพลาเน็ต 1 และมีค่า $\int_0^{20} \|\mathbf{C}(t)\| dt = 227,100 < \infty$ และ $\int_0^{\infty} \|\mathbf{C}(t)\| dt$ มีแนวโน้มลู่เข้าหาค่าคงที่บวกค่าหนึ่งซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.8 นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

4.10 การตรวจสอบเสถียรภาพของพลาเน็ต 7

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดเริ่มต้นด้วยการหาสมการสถานะจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 เมื่อพลาเน็ต 7 มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned} G_{p7}(s) &= \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2)}, \omega_0 = 1, \zeta = 0.1 \\ \frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{1}{s^3 + 1.2s^2 + 1.2s + 1} \\ &= \frac{1}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \end{aligned} \quad (4.61)$$

โดยที่ $a_0 = 1, a_1 = 1.2$ และ $a_2 = 1.2$

สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของพลาเน็ต 7 ตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) ได้ดังต่อไปนี้

$$Y(s)[s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0] = U(s) \quad (4.62)$$

หรือเขียนในโดเมนเวลาได้เป็น

$$\ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = K_p^w e + K_I^w \int_0^t e dt + K_D^w \frac{de}{dt} \quad (4.63)$$

และกำหนดให้ $e = r - y$ จะได้

$$\ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = K_p^w (r - y) + K_I^w \int_0^t (r - y) dt + K_D^w (\dot{r} - \dot{y}) \quad (4.64)$$

จัดรูปจะได้

$$\ddot{y} + a_2 \dot{y} + (a_1 + K_D^w) \dot{y} + (a_0 + K_P^w) y + K_I^w \int_0^t y dt = K_D^w \dot{r} + K_P^w r + K_I^w \int_0^t r dt \quad (4.65)$$

สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_I^w & -(a_0 + K_P^w) & -(a_1 + K_D^w) & -a_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ K_I^w & K_P^w & K_D^w \end{bmatrix} \mathbf{r}(t) \quad (4.66)$$

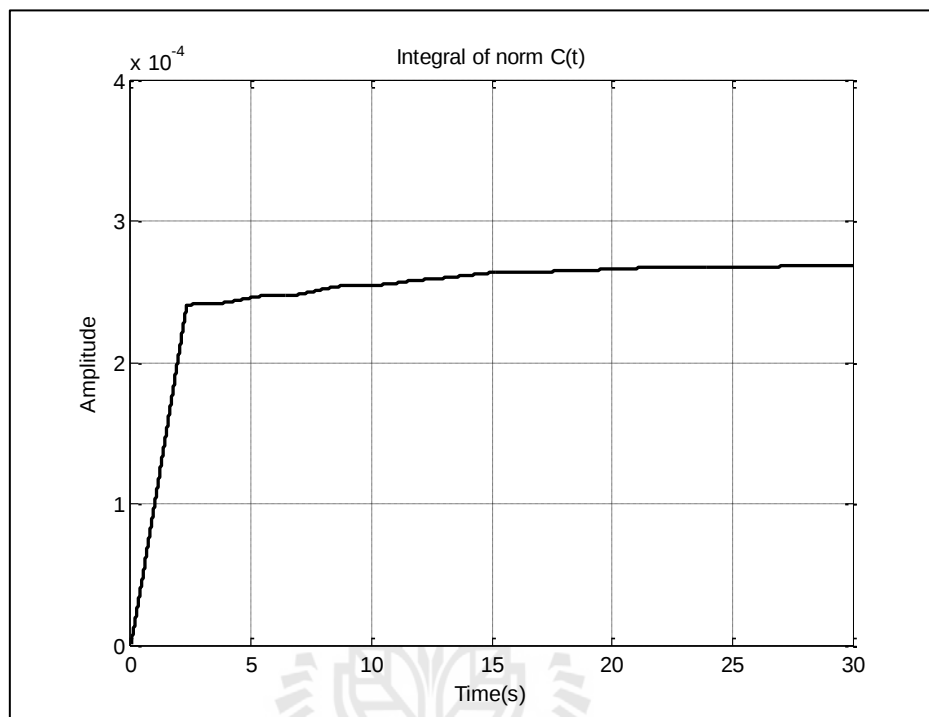
$$\text{โดยที่ } \mathbf{x}(t) = \left[\int_0^t y dt \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \right]^T \text{ และ } \mathbf{r}(t) = \left[\int_0^t r dt \quad r \quad \dot{r} \right]^T$$

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ จะคล้ายกับพลานต์ 1 โดยกำหนดให้ $\mathbf{r}(t) = 0$ และค่าเริ่มต้นของ $\int_{-\infty}^0 e(t) dt$ เท่ากับ 1 จะได้ $\int_{-\infty}^0 y(t) dt$ เท่ากับ -1 และ $\mathbf{x}(0) = [-1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ แล้วสร้างเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ขึ้นมา หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 และมีค่า $k = 0.000005$ จากนั้นจำลองสถานการณ์จากเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ถึงเวลาที่สถานะอยู่ตัว (พิจารณาที่เวลา $t = 30$) ดังนั้นเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ ที่เวลา $t = 30$ คือเมตริกซ์ $\bar{\mathbf{A}}$ ($\bar{\mathbf{A}} \approx \mathbf{A}(30)$) โดยเมตริกซ์ $\mathbf{A}(t)$ และ $\bar{\mathbf{A}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_I^w & -(a_0 + K_P^w) & -(a_1 + K_D^w) & -a_2 \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.8901 & -1.1956 & -2.0866 & -1.2 \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

เมื่อได้เมตริกซ์ $A(t)$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_P^w , K_I^w และ K_D^w ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเมตริกซ์ $\bar{A}$ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำเพื่ออินทิเกรตค่า $\|C(t)\|$ ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 30 วินาที สามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 ค่าอินทิเกรตของ $\|C(t)\|$ (พลาเน็ต 7)

ค่าไอเกนของเมตริกซ์ $\bar{A}$ ของระบบวงปิด สำหรับพลาเน็ต 7 คือ $-0.0963 \pm j1.0053$ และ $-0.5037 \pm j0.7867$ ซึ่งมีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า การคำนวณค่า $\|C(t)\|$ คล้ายกับกรณีพลาเน็ต 1 และมีค่า $\int_0^{30} \|C(t)\| dt = 0.000268 < \infty$ และ $\int_0^{\infty} \|C(t)\| dt$ มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่บวกค่าหนึ่ง ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.9 นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

4.11 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยไม่พิจารณาอินพุต (ระบบวงปิดไม่มีสัญญาณอ้างอิง) โดยเงื่อนไขที่ทำให้ระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มีเสถียรภาพพิจารณาจากหัวข้อที่ 4.2 มีผลสรุปค่าของ $\int_0^t \|C(t)\| dt$ ในสถานะอยู่ตัว ดังนี้

พลาเน็ต 1 มีค่า $\int_0^8 \|C(t)\| dt = 48.49$ พลาเน็ต 2 มีค่า $\int_0^{20} \|C(t)\| dt = 4.959$

พลาเน็ต 3 มีค่า $\int_0^{20} \|C(t)\| dt = 85.18$ พลาเน็ต 4 มีค่า $\int_0^{20} \|C(t)\| dt = 0.2692$

พลาเน็ต 5 มีค่า $\int_0^{60} \|C(t)\| dt = 0.1397$ พลาเน็ต 6 มีค่า $\int_0^{20} \|C(t)\| dt = 227100$ และ

พลาเน็ต 7 มีค่า $\int_0^{30} \|C(t)\| dt = 0.000268$

และทุกพลาเน็ตให้ค่า $\int_0^\infty \|C(t)\| dt < \infty$ ซึ่งมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่บวกค่าหนึ่ง
 นอกจากนี้ค่าไอเกนของ $\bar{A}$ มีส่วนจริงเป็นลบทุกค่า นั่นคือระบบวงปิดทุกระบบมีเสถียรภาพเชิงเส้น
 กำกับแบบวงกว้างตามทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา



บทที่ 5

ผลการจำลองสถานการณ์

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมวงปิดตามโครงสร้างในรูปที่ 4.1 ที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและทำงานพร้อมกับหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ซึ่งทำหน้าที่ชดเชยพลานต์ควบคุมยาก 7 รูปแบบ เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย รวมถึงแสดงสัญญาณควบคุมรวมที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมย่อย ซึ่งนำมาป้อนให้กับพลานต์ โดยจะเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียว (ที่ให้ผลตอบสนองแบบเรียบหรือแบบตึง ซึ่งเลือกมาจากการจำลองสถานการณ์ที่ได้แสดงในบทที่ 2) ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานซึ่งทำงานพร้อมกับหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก และผลตอบสนองของพลานต์เพียงลำพัง (ระบบวงเปิด) นอกจากนี้ได้สรุปสมรรถนะผลตอบสนองของระบบวงปิดและอธิบายการเปรียบเทียบผลตอบสนอง เนื่องจากพลานต์ 4 และพลานต์ 5 มีการประวิงเวลา จึงได้มีการนำตัวทำนายสมิธมาชดเชยหรือหักล้างผลกระทบที่เกิดจากพจน์ของการประวิงเวลา ทำให้พลานต์ 4 และพลานต์ 5 เทียบเท่าหรือสมมูลกับพลานต์ที่ไม่มีการประวิงเวลา

5.2 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์ 1

พลานต์ 1 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G_{P1}(s) = \frac{1}{(s+1)(\beta s+1)(\beta^2 s+1)(\beta^3 s+1)}, \beta = 0.5$$

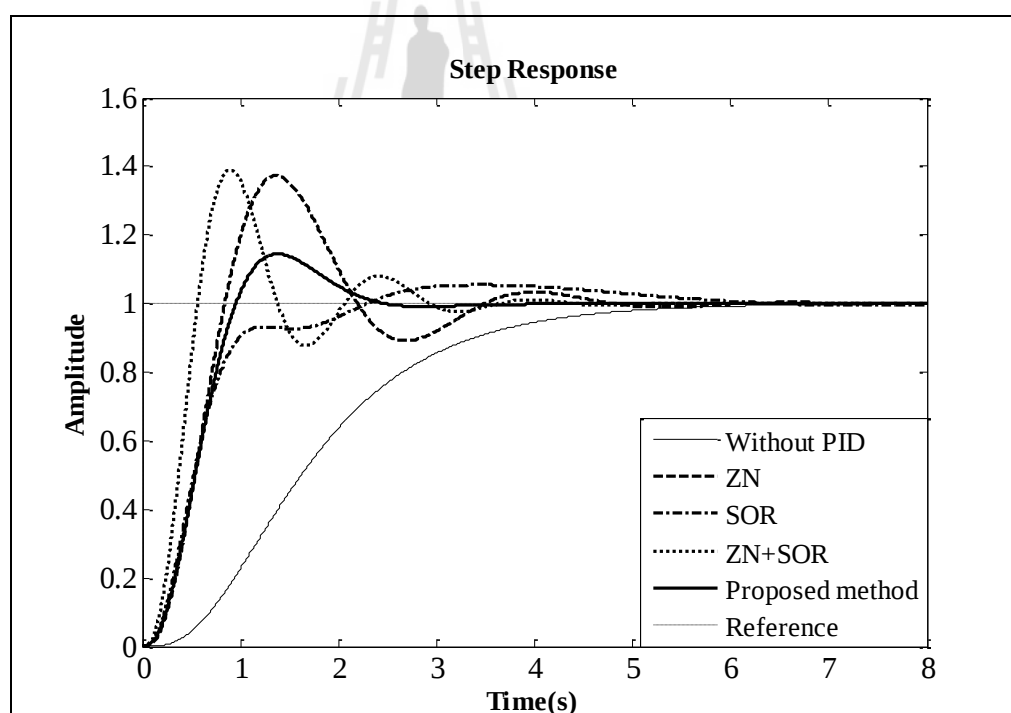
เกณฑ์การปรับจูน (กฎการปรับจูน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ชดเชยพลานต์ 1 ซึ่งแสดงในบทที่ 2 ได้เลือกมาพิจารณาเพียง 2 เกณฑ์คือ เกณฑ์ของ ZN และ SOR ซึ่งเป็นการควบคุมแบบตึงและการควบคุมแบบเรียบตามลำดับ หลังจากการปรับจูนเสร็จสิ้น นำตัวควบคุมพีไอดีสองตัวมาเชื่อมต่อแบบขนาน ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของพลานต์เพียงลำพัง (ระบบวงเปิด) ผลตอบสนองของระบบวงปิดในกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวและ

หน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ในกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก และในกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียว โดยที่ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกณฑ์) ของตัวควบคุมพีไอดีได้แสดงในตารางที่ 5.1

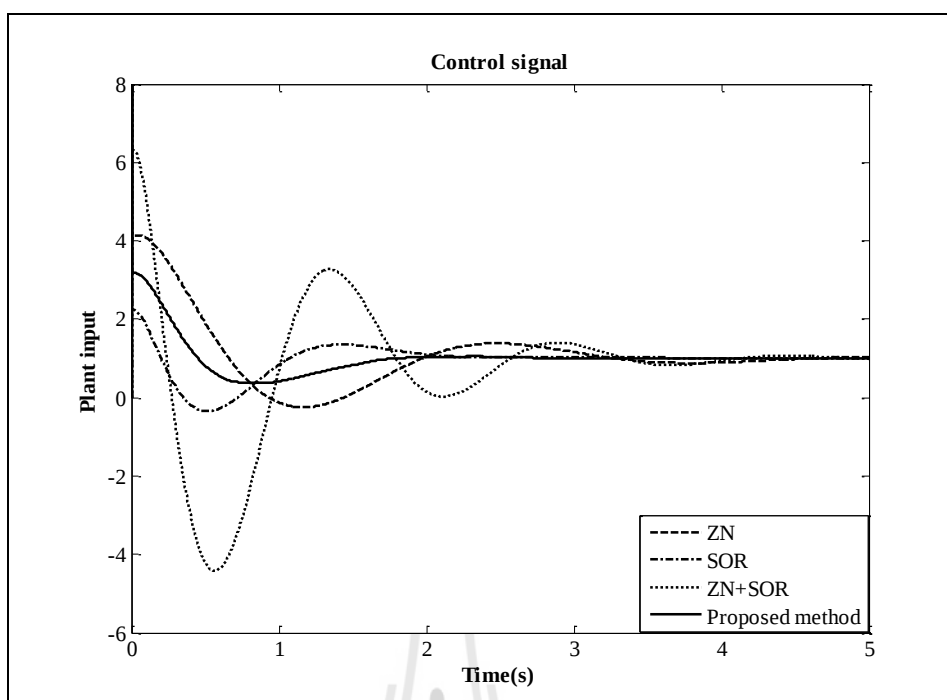
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกณฑ์) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ซัดเซพลานต์ 1)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	4.0500	3.6000	1.1391
SOR	2.2275	1.9800	1.6539

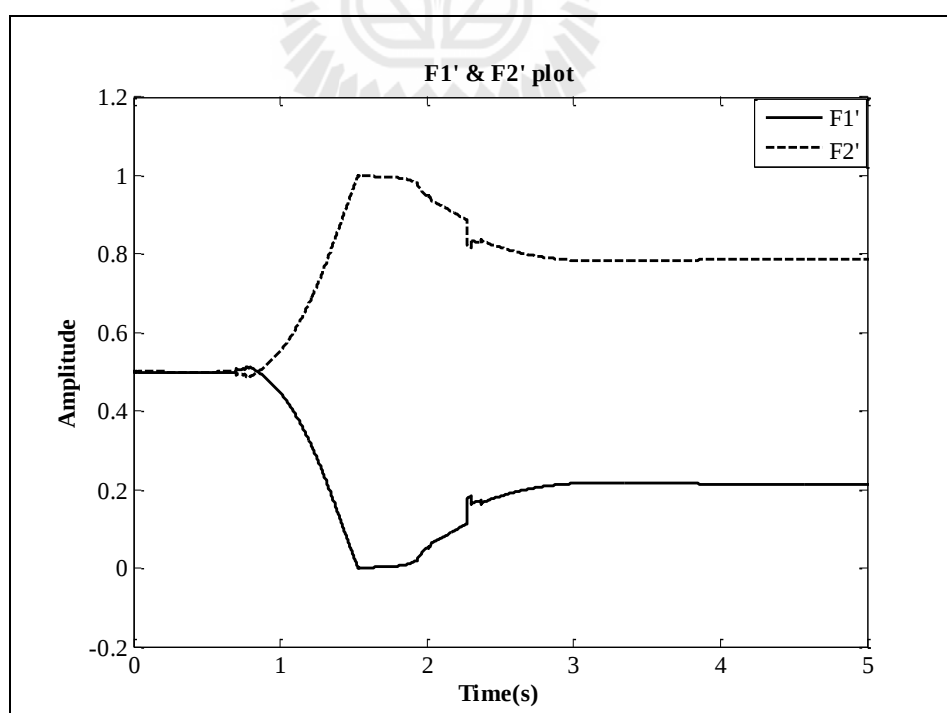
หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $k = 0.1$ และมีค่าเริ่มต้น $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณีแสดงได้ในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลานต์ 1)



รูปที่ 5.2 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลานต์ 1)



รูปที่ 5.3 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลานต์ 1)

ตารางที่ 5.2 สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 1)

กฎการปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา			
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}
Without PID	2.7	5.02	0	1
ZN	0.527	4.42	37.3	1
SOR	0.767	5.33	5.45	1
ZN + SOR	0.347	3.34	39.0	1
Proposed method	0.599	2.23	14.45	1

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.1 และสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงปิดและระบบวงเปิดที่แสดงในตารางที่ 5.2 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (Proposed method) ให้ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่เร็วกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (ระบบวงเปิด) และมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าทุกกรณี นอกจากนี้ระบบวงปิดที่ใช้หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีการพุ่งเกินน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และมีการพุ่งเกินน้อยกว่าการไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ZN + SOR) แต่มีการพุ่งเกินมากกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ SOR เมื่อพิจารณาช่วงเวลาขึ้น จะอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่ใช้หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีช่วงเวลาขึ้นสั้นกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุมและการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ SOR ระบบวงปิดที่ใช้หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีช่วงเวลาขึ้นและการพุ่งเกินอยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และ SOR เมื่อพิจารณารูปที่ 5.2 จะอธิบายได้ว่าสัญญาณควบคุมรวมในระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จะอยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว เพราะสัญญาณควบคุมรวมคือผลบวกของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนักเป็นผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองอยู่ระหว่างผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว และเมื่อพิจารณาสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' ที่แสดงในรูปที่ 5.3 จะอธิบายได้ว่าสัญญาณถ่วงน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น และจะถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว (สัญญาณถ่วงน้ำหนักคูณกับสัญญาณควบคุมย่อยที่ตรงกัน) ในช่วงเวลาเริ่มต้น สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักเท่ากัน ($F_1' = F_2' = 0.5$) ต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบ (ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ SOR) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_2' มีค่ามากกว่า) ในขณะที่สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบตึง (ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกนซึ่งได้

จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักน้อยกว่า (F_1' มีค่าน้อยกว่า) ทำให้สัญญาณควบคุมรวมแสดงลักษณะของ (หรือได้รับอิทธิพลจาก) สัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึง แต่สัญญาณควบคุมรวมประกอบด้วยสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบและแบบตึงที่ไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินอยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และ SOR และหลังจากนั้นสัญญาณควบคุมรวมยังคงได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าในสถานะอยู่ตัว จึงอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักให้ผลตอบสนองที่มีสัณฐานดีกว่า

5.3 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 2

พลาเน็ต 2 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

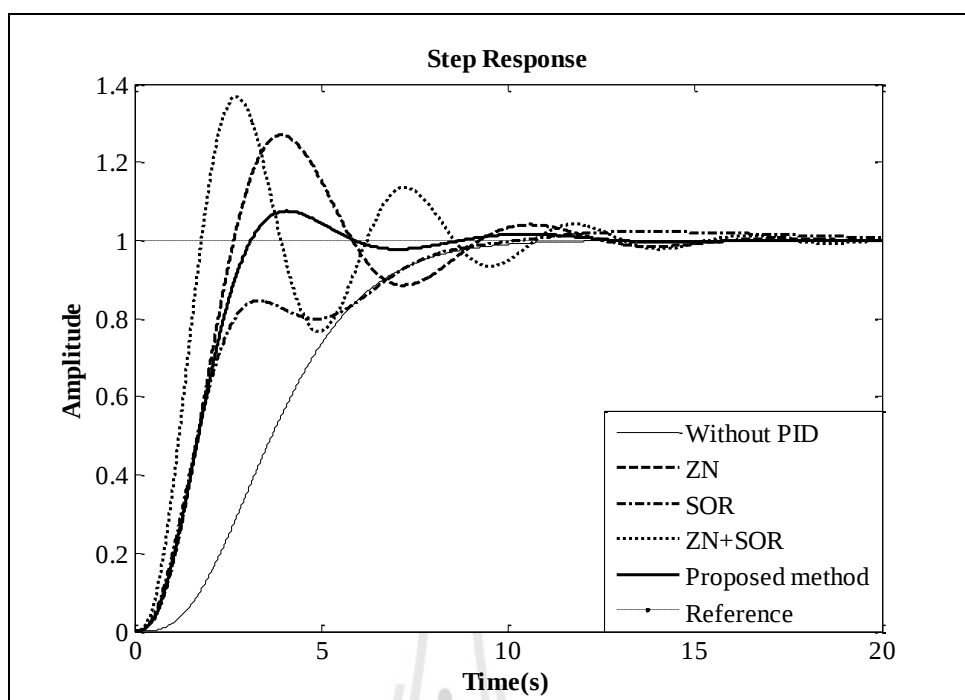
$$G_{p2}(s) = \frac{1}{(s+1)^4} = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1}$$

เกณฑ์การปรับจูน (กฎการปรับจูน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ชดเชยพลาเน็ต 2 ซึ่งแสดงในบทที่ 2 ได้เลือกมาพิจารณาเพียง 2 เกณฑ์คือ เกณฑ์ของ ZN และ SOR ซึ่งเป็นการควบคุมแบบตึงและการควบคุมแบบเรียบตามลำดับ หลังจากการปรับจูนเสร็จสิ้น นำตัวควบคุมพีไอดีสองตัวมาเชื่อมต่อแบบขนาน ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบกับลักษณะเดียวกันกับพลาเน็ต 1 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกณฑ์) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 2 ได้แสดงในตารางที่ 5.3

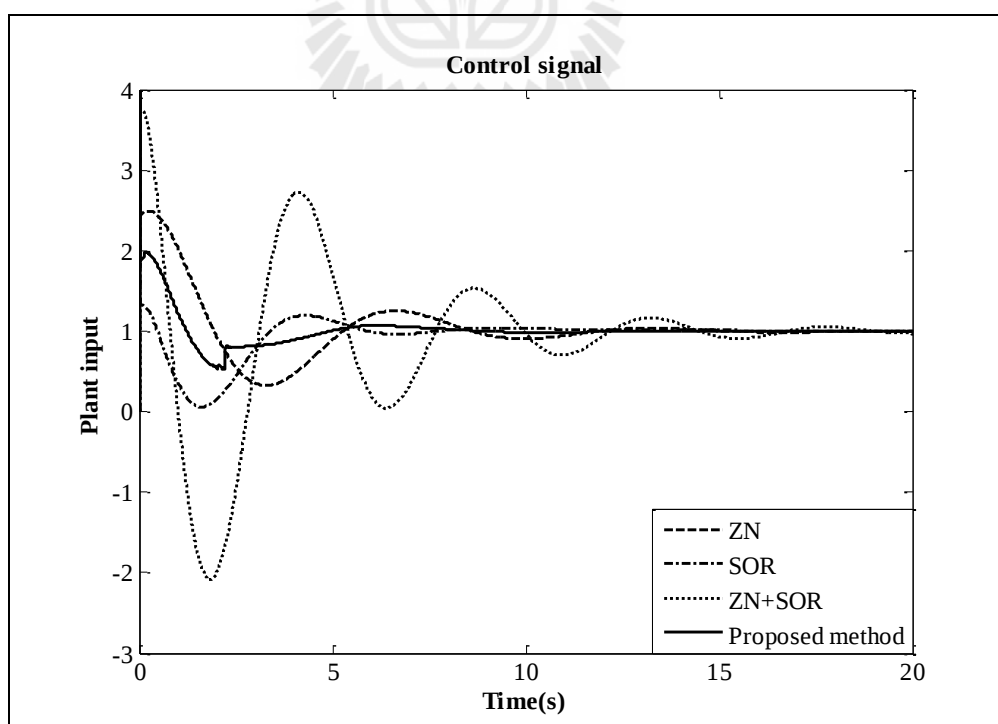
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกณฑ์) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชดเชยพลาเน็ต 2)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	2.4000	0.7656	1.8810
SOR	1.3200	0.4211	2.7312

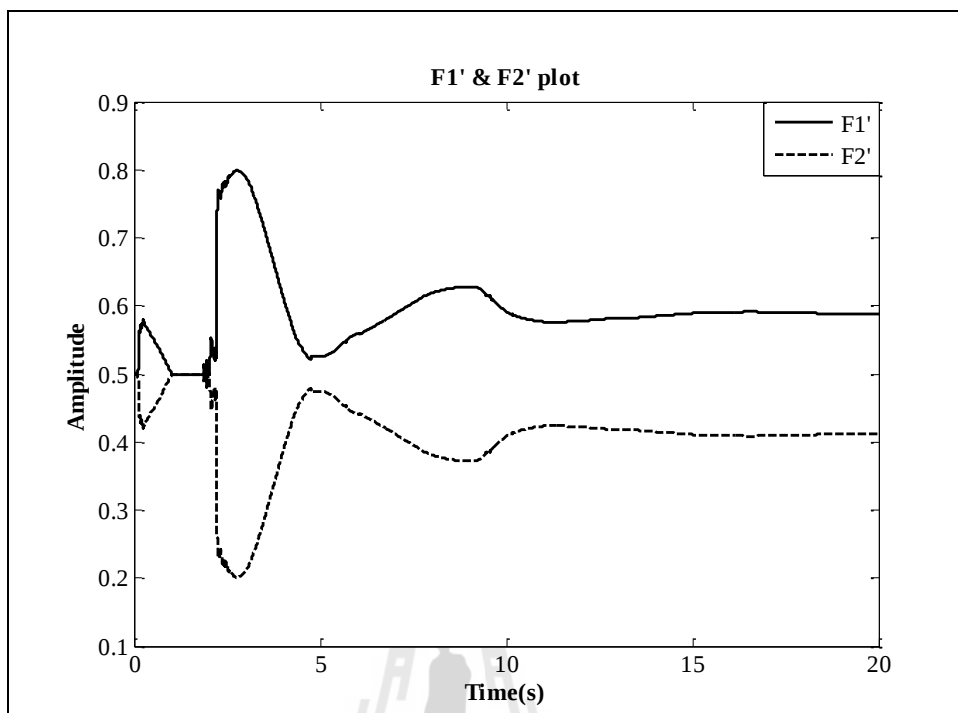
หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $k = 0.6$ และมีค่าเริ่มต้น $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณีแสดงได้ในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 2)



รูปที่ 5.5 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 2)



รูปที่ 5.6 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 2)

ตารางที่ 5.4 สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 2)

กฎการปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา			
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	C_{ss}
Without PID	4.94	9.08	0	1
ZN	1.62	11.8	27	1
SOR	6.03	15.3	2.26	1
ZN + SOR	1.07	14.4	36.8	1
Proposed method	1.89	7.53	7.52	1

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.4 และสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงปิด และระบบวงเปิดที่แสดงในตารางที่ 5.4 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัว เชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่เร็วกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (ระบบวงเปิด) และมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าทุกกรณี นอกจากนี้ระบบวงปิดที่ใช้ หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีการพุ่งเกินน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากการ ปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และมีการพุ่งเกินน้อยกว่าการไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ZN + SOR)

แต่มีการพุ่งเกินมากกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ SOR เมื่อพิจารณาช่วงเวลาขึ้น อธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่ใช้หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักรวมมีช่วงเวลาที่ขึ้นสั้นกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุมและการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ SOR ระบบวงปิดที่ใช้หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักรวมมีช่วงเวลาที่ขึ้นและการพุ่งเกินอยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และ SOR เมื่อพิจารณารูปที่ 5.5 จะอธิบายได้ว่าสัญญาณควบคุมรวมในระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักรวม จะอยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว เพราะสัญญาณควบคุมรวมคือผลบวกของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนักรวม เป็นผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองอยู่ระหว่างผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว และเมื่อพิจารณาสัญญาณถ่วงน้ำหนักรวม F_1' และ F_2' ที่แสดงในรูปที่ 5.6 อธิบายได้ว่าสัญญาณถ่วงน้ำหนักรวมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น และจะถ่วงน้ำหนักรวมสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว ในช่วงเวลาเริ่มต้นสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักรวมเท่ากัน ($F_1' = F_2' = 0.5$) ต่อมาในช่วงเวลาสั้น ๆ สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบตึง (ZN) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักรวมมากกว่า (F_1' มีค่ามากกว่า) ในขณะที่สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบ (SOR) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักรวมน้อยกว่า (F_2' มีค่าน้อยกว่า) และช่วงเวลาประมาณวินาทีที่ 1 ถึงวินาทีที่ 2 สัญญาณควบคุมย่อยทั้งสองมีการถ่วงน้ำหนักรวมเท่ากันอีกครั้ง ($F_1' = F_2' = 0.5$) หลังจากนั้นสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงจะได้รับการถ่วงน้ำหนักรวมมากกว่า ทำให้สัญญาณควบคุมรวมแสดงลักษณะของ (หรือได้รับอิทธิพลจาก) สัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบ แต่สัญญาณควบคุมรวมประกอบด้วยสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงและแบบเรียบที่ไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินอยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และ SOR และหลังจากนั้นสัญญาณควบคุมรวมยังคงได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงมากกว่าในสถานะอยู่ตัว จึงอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักรวมให้ผลตอบสนองที่มีสัณฐานดีกว่า

5.4 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 3

พลาเน็ต 3 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

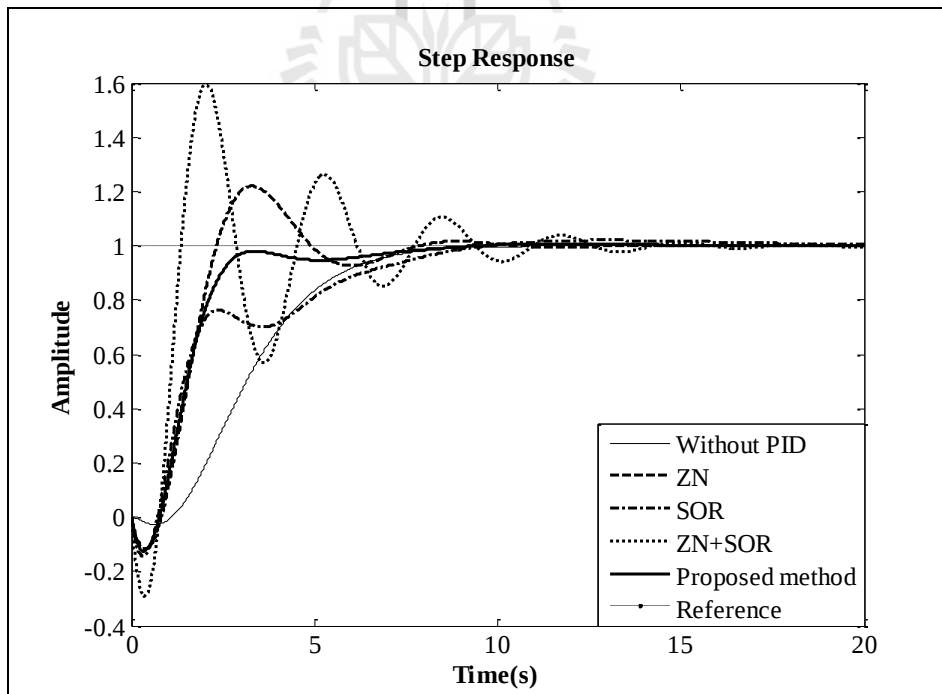
$$G_{P3}(s) = \frac{-\alpha s + 1}{(s+1)^3} = \frac{-0.5s + 1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

เกณฑ์การปรับจูน (กฎการปรับจูน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ซดเชยพลาเน็ต 3 ซึ่งแสดงในบทที่ 2 ได้เลือกมาพิจารณาเพียง 2 เกณฑ์คือ เกณฑ์ของ ZN และ SOR ซึ่งเป็นการควบคุมแบบตั้ง และการควบคุมแบบเรียบตามลำดับ หลังจากการปรับจูนเสร็จสิ้น นำตัวควบคุมพีไอดีสองตัวมาเชื่อมต่อแบบขนาน ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกันกับพลาเน็ต 1 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเชยพลาเน็ต 3 ได้แสดงในตารางที่ 5.5

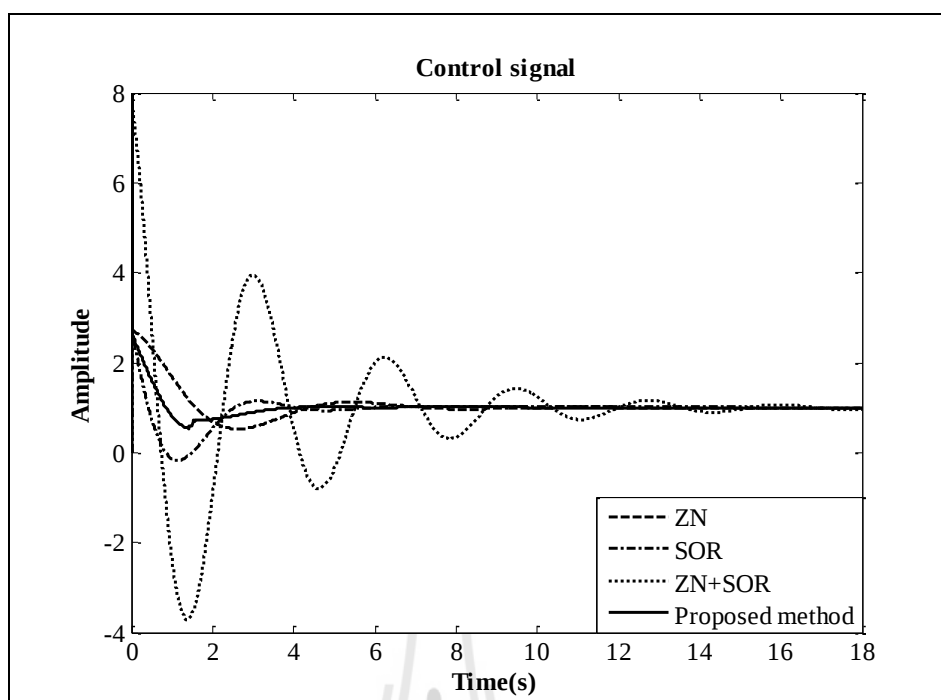
ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ซดเชยพลาเน็ต 3)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
ZN	1.9200	0.7232	1.2744
SOR	1.0560	0.3977	1.8504

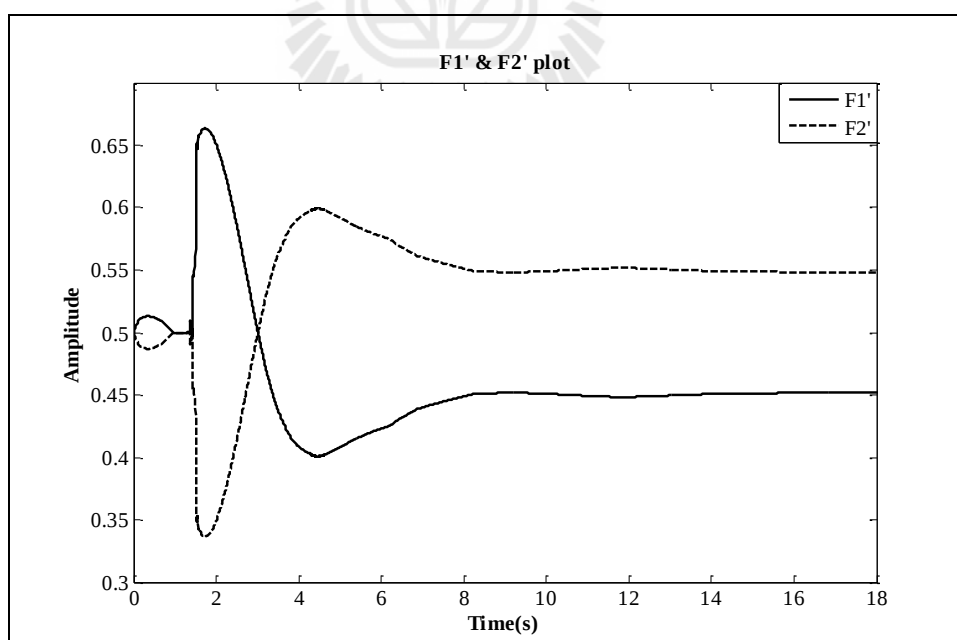
หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $k = 0.1$ และมีค่าเริ่มต้น $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณีแสดงได้ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 3)



รูปที่ 5.8 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลานต์ 3)



รูปที่ 5.9 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลานต์ 3)

ตารางที่ 5.6 สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 3)

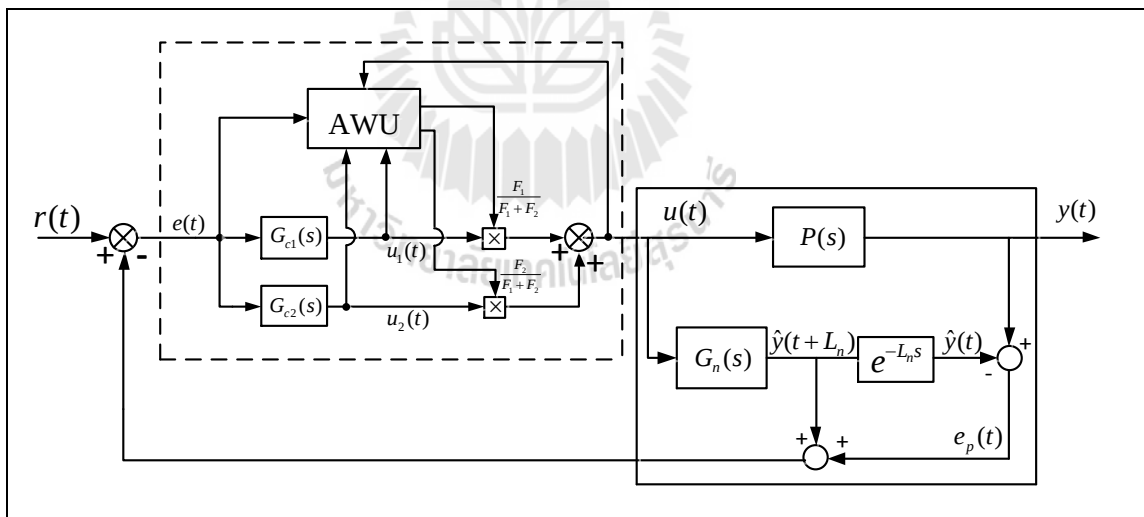
กฎการปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา			
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	c_{ss}
Without PID	4.10	7.91	0	1
ZN	1.14	7.35	21.9	1
SOR	5.46	8.61	2.02	1
ZN + SOR	0.467	12.2	59.1	1
Proposed method	1.52	7.33	0.67	1

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.7 และสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงเปิดและระบบวงปิดที่แสดงในตารางที่ 5.6 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่เร็วกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (ระบบวงเปิด) มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าทุกกรณี และมีการพุ่งเกินเกิดขึ้นน้อยมาก (มีการพุ่งเกินน้อยกว่าทุกกรณียกเว้นกรณีของระบบวงเปิด) เมื่อพิจารณาช่วงเวลานั้นจะอธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่ใช้หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีช่วงเวลานั้นสั้นกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุมและการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ SOR ระบบวงปิดที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ZN + SOR) มีการพุ่งเกินสูงมาก และมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าทุกกรณี แต่มีช่วงเวลานั้นสั้นกว่าทุกกรณี เมื่อพิจารณารูปที่ 5.8 อธิบายได้ว่าสัญญาณควบคุมรวมในระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักจะอยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียวแต่ละตัว เพราะสัญญาณควบคุมรวมคือผลบวกของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนัก เป็นผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองอยู่ระหว่างผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว และเมื่อพิจารณาสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' ที่แสดงในรูปที่ 5.9 อธิบายได้ว่าสัญญาณถ่วงน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น และจะถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว ในช่วงเวลาเริ่มต้นสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักแตกต่างกันเล็กน้อย ($F_1' \approx F_2' \approx 0.5$) หลังจากวินาทีที่ 1 สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบดิ่ง (ZN) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_1' มีค่ามากกว่า) สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบ (SOR) ทำให้สัญญาณควบคุมรวมแสดงลักษณะของ (หรือได้รับอิทธิพลจาก) สัญญาณควบคุมย่อยแบบดิ่งมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบ แต่หลังจากวินาทีที่ 3 สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบดิ่ง (F_2' มีค่ามากกว่า) ทำให้สัญญาณควบคุมรวมได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบดิ่ง เนื่องจากสัญญาณ

ควบคุมรวมประกอบด้วยสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงและแบบเรียบที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลตอบสนองมีพลวัตอยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และ SOR และหลังจากนั้นสัญญาณควบคุมรวมยังคงได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าในสถานะอยู่ตัว จึงอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักให้ผลตอบสนองที่มีสรรถนะดีกว่า นอกจากนี้ทุกกรณีให้ผลตอบสนองที่มีการพุ่งต่ำในช่วงเวลาเริ่มต้น

5.5 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 4

เนื่องจากพลาเน็ต 4 และพลาเน็ต 5 มีการประวิงเวลา จึงได้มีการนำตัวทำนายสมิธมาชดเชยหรือหักล้างผลกระทบ (พลวัตหรือคุณลักษณะ) ที่เกิดจากพจน์ของการประวิงเวลา ทำให้พลาเน็ต 4 และพลาเน็ต 5 เทียบเท่าหรือสมมูลกับพลาเน็ตที่ไม่มีการประวิงเวลา ระบบควบคุมวงปิดที่มีพลาเน็ต 4 หรือพลาเน็ต 5 และตัวทำนายสมิธแสดงได้ในรูปที่ 5.10 ในกรอบเส้นประคือตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ในกรอบเส้นทึบคือตัวทำนายสมิธและพลาเน็ตที่มีการประวิงเวลา $P(s)$ (พลาเน็ต 4 หรือพลาเน็ต 5)



รูปที่ 5.10 ระบบควบคุมวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักและตัวทำนายสมิธ

พลาเน็ต 4 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$P(s) = G_{P4}(s) = \frac{1}{Ts+1} e^{-s}, \quad T = 10$$

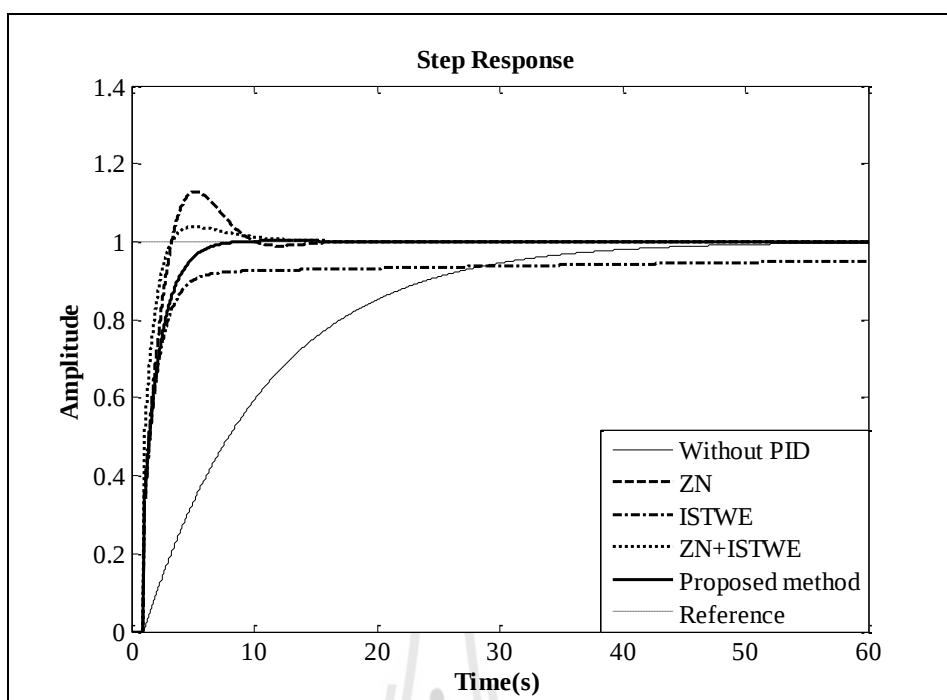
$$\text{ตัวทำนายนสุมิธิ } G_n(s) = \frac{1}{Ts+1} \quad \text{และ } L_n = 1$$

เกณฑ์การปรับจูน (กฎการปรับจูน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ชดเชยพลาแญต์ 4 ซึ่งอธิบายในบทที่ 2 ได้เลือกมาพิจารณาเพียง 2 เกณฑ์คือ เกณฑ์ของ ZN และ ISTWE ซึ่งเป็นการควบคุมแบบคั้ง และการควบคุมแบบเรียบตามลำดับ หลังจากการปรับจูนเสร็จสิ้น นำตัวควบคุมพีไอดีสองตัวมาเชื่อมต้อแบบขนาน ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของพลาแญต์เพียงลำพัง (ระบบวงเปิด) ผลตอบสนองของระบบวงปิดในกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่มีตัวทำนายนสุมิธิและหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั (Proposed method) ในกรณีที่มีตัวทำนายนสุมิธิแต่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนั (ZN + ISTWE) และในกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียว (ZN หรือ ISTWE) ที่มีตัวทำนายนสุมิธิ ตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาแญต์ 4 มีค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) แสดงได้ในตารางที่ 5.7

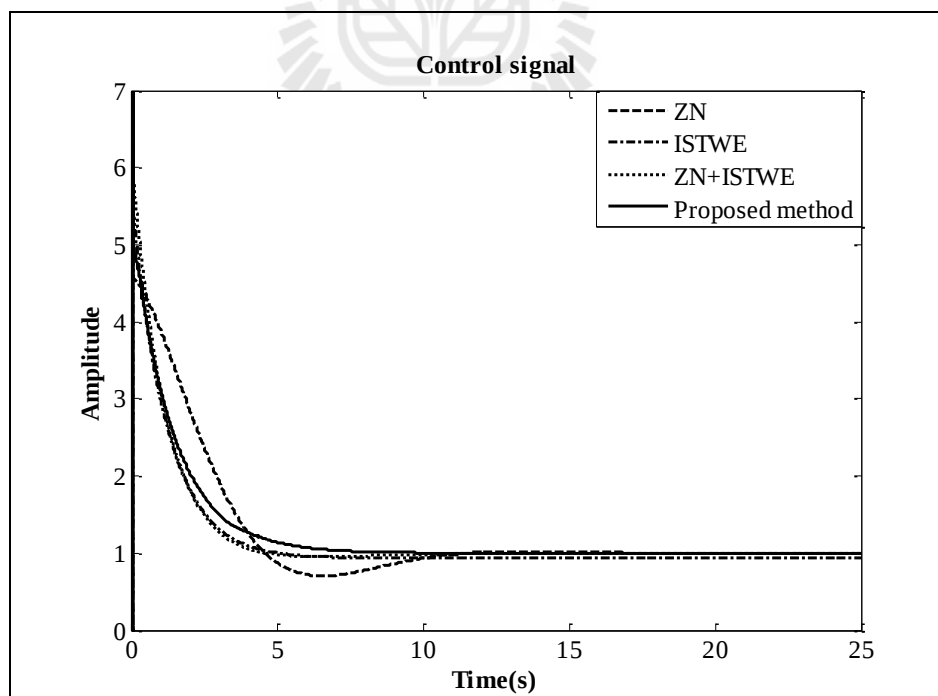
ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชดเชยพลาแญต์ 4)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_p	K_I	K_D
ZN	9.8076	5.0425	4.7689
ISTWE	8.3201	0.0950	4.0457

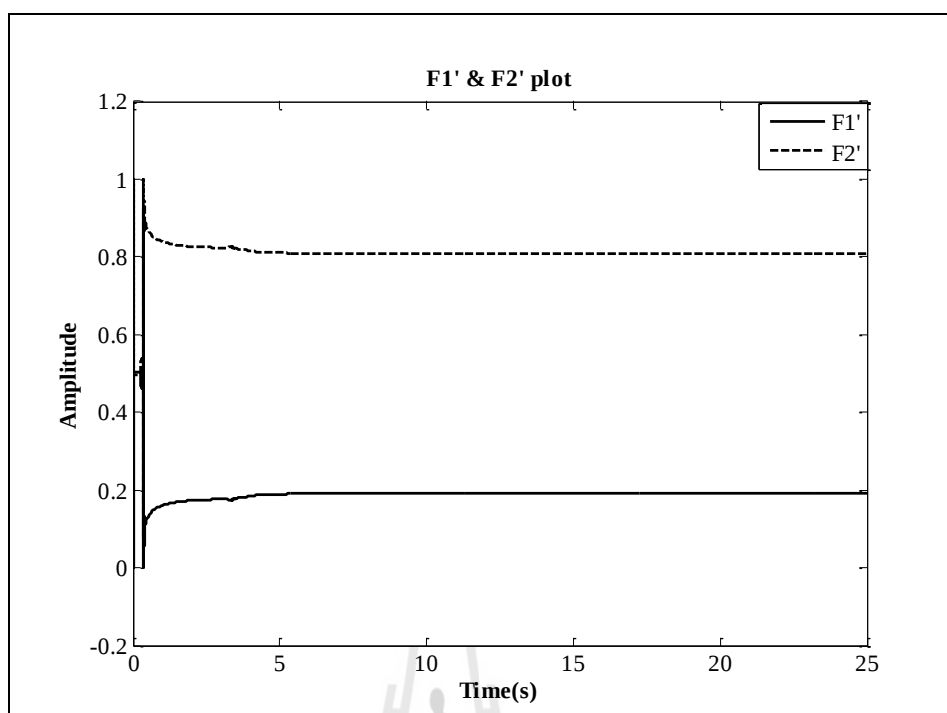
หน่วยปรับถ่วงน้ำหนัมีค่า $k = 0.5$ และมีค่าเริ่มต้น $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณีแสดงได้ในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลานต์ 4)



รูปที่ 5.12 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลานต์ 4)



รูปที่ 5.13 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 4)

ตารางที่ 5.8 สมรรถนะผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 4)

กฎการปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา			
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	c_{ss}
Without PID	22.00	40.1	0	1
ZN	1.75	9.07	12.9	1
ISTWE	6.84	156	0	1
ZN + ISTWE	1.34	8.41	3.85	1
Proposed method	2.77	5.99	0	1

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.11 และสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงเปิดและระบบวงปิดที่แสดงในตารางที่ 5.8 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมฟิโอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนาน หน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก และตัวทำนายสมิธ (Proposed method) ให้ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่เร็วกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (ระบบวงเปิด) และการใช้ตัวควบคุมฟิโอดีตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ISTWE มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าทุกกรณี มีช่วงเวลาริเริ่มสั้นกว่าการใช้ตัวควบคุมฟิโอดีตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ISTWE แต่นานกว่าการใช้ตัวควบคุมฟิโอดีตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ZN + ISTWE) นอกจากนี้ระบบวงปิดที่มี

ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนาน หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร และตัวทำนายสมิธ ให้ผลตอบสนองที่ไม่มีการพุ่งเกิน กรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร (ZN + ISTWE) ให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาดำเนินการสั้นกว่าทุกกรณี และมีการพุ่งเกินเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณารูปที่ 5.12 อธิบายได้ว่าสัญญาณควบคุมรวมในระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักรจะอยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียวแต่ละตัวในช่วงระยะเวลาหนึ่งของสถานะชั่วครู่เท่านั้น ต่อมาสัญญาณควบคุมรวมไม่ได้อยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมทั้งสอง เนื่องจากสัญญาณควบคุมรวมคือผลบวกของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนักร ทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองอยู่ระหว่างผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว และเมื่อพิจารณาสัญญาณถ่วงน้ำหนักร F_1' และ F_2' ที่แสดงในรูปที่ 5.13 สัญญาณถ่วงน้ำหนักรมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น และจะถ่วงน้ำหนักรสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมทั้งสองจะได้รับการถ่วงน้ำหนักรเท่ากัน ($F_1' = F_2' = 0.5$) ในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นสั้น ๆ หลังจากนั้นสัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบ (ISTWE) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักรมากกว่า (F_2' มีค่ามากกว่า) สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบตึง (ZN) ทำให้สัญญาณควบคุมรวมแสดงลักษณะของ (หรือได้รับอิทธิพลจาก) สัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึง แต่สัญญาณควบคุมรวมประกอบด้วยสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงและแบบเรียบที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลตอบสนองมีพลวัต (หรือช่วงเวลาดำเนินการ) อยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และ ISTWE และหลังจากนั้นสัญญาณควบคุมรวมยังคงได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าในสถานะอยู่ตัว จึงอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนาน หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร และตัวทำนายสมิธ ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่า

5.6 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 5

พลาเน็ต 5 คือพลาเน็ตอันดับสองที่มีการประวิงเวลา และมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$P(s) = G_{P5}(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}, \quad T = 10$$

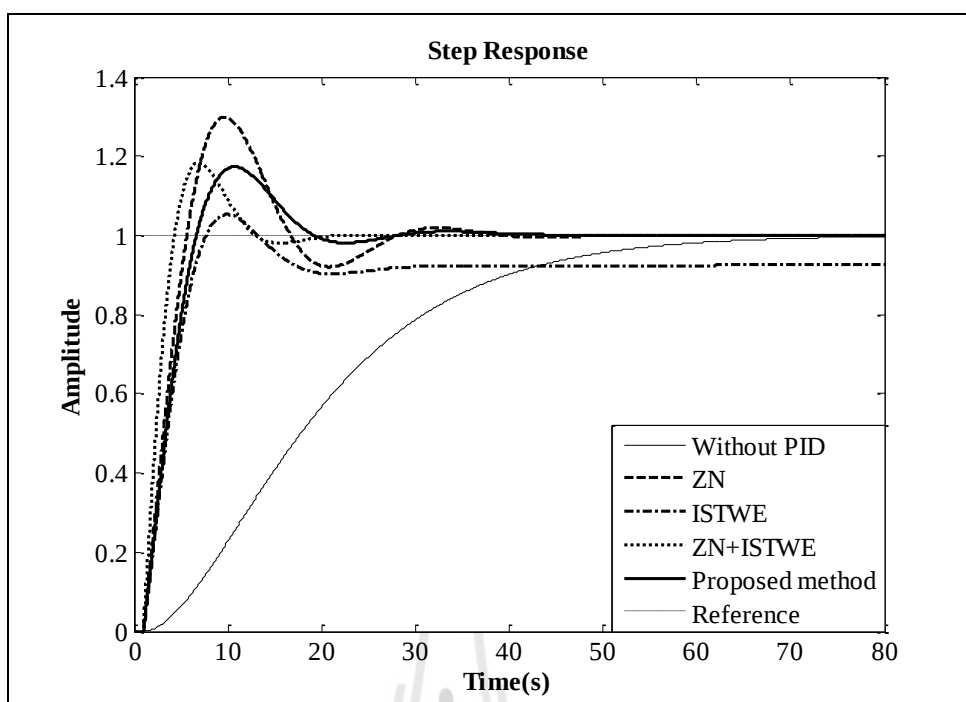
$$\text{ตัวทำนายสมิธมี } G_n(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} \quad \text{และ } L_n = 1$$

เกณฑ์การปรับจูน (กฎการปรับจูน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ซดเซพแลนด์ 5 ซึ่งอธิบายในบทที่ 2 ได้เลือกมาพิจารณาเพียง 2 เกณฑ์คือ เกณฑ์ของ ZN และ ISTWE ซึ่งเป็นการควบคุมแบบดิ่ง และการควบคุมแบบเรียบตามลำดับ หลังจากการปรับจูนเสร็จสิ้น นำตัวควบคุมพีไอดีสองตัวมาเชื่อมต่อแบบขนาน ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของพลานต์เพียงลำพัง (ระบบวงเปิด) ผลตอบสนองของระบบวงปิดในกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่มีตัวทำนายสมิธและหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร (Proposed method) ในกรณีที่ไม่มีตัวทำนายสมิธแต่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร (ZN + ISTWE) และในกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียว (ZN หรือ ISTWE) ที่มีตัวทำนายสมิธ ตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพแลนด์ 5 มีค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) แสดงได้ในตารางที่ 5.9

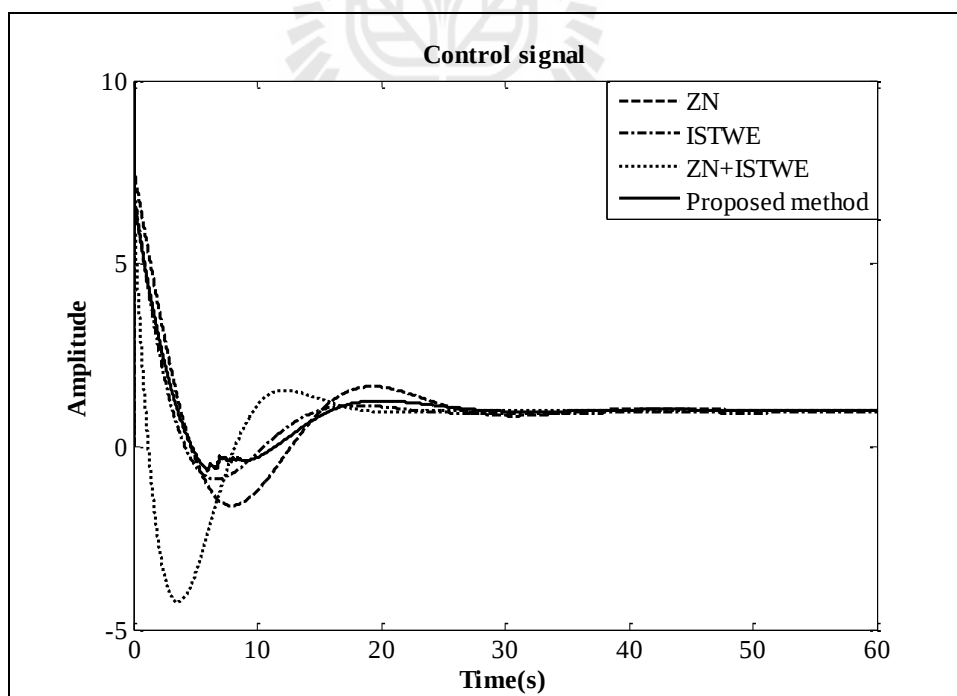
ตารางที่ 5.9 ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ซดเซพแลนด์ 5)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_p	K_I	K_D
ZN	12.408	1.760	21.869
ISTWE	10.526	0.021	18.552

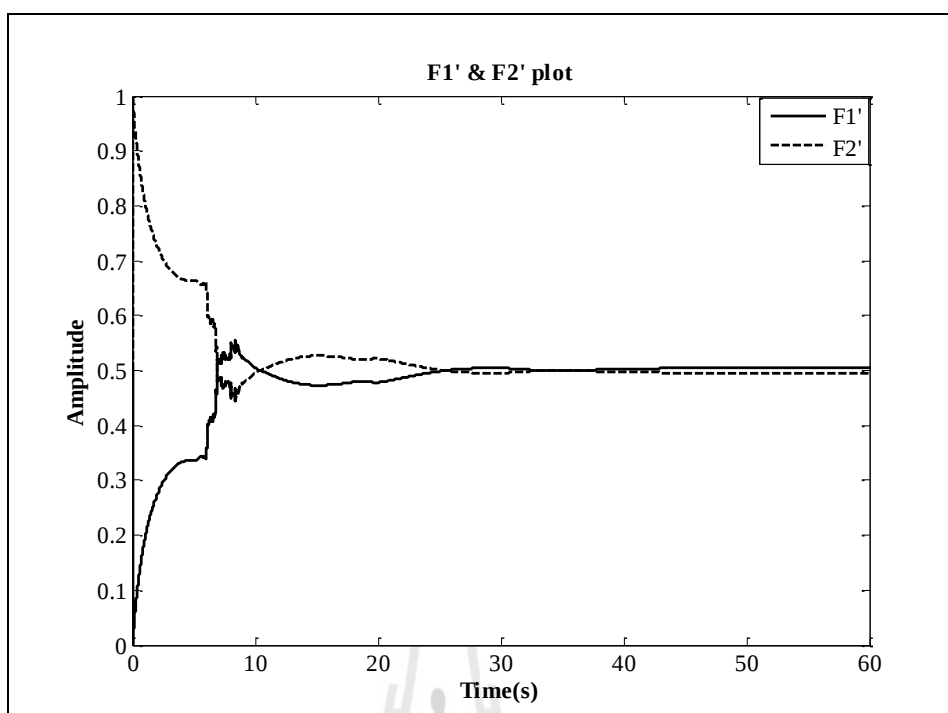
หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักรมีค่า $k = 1.5$ และมีค่าเริ่มต้น $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณีแสดงได้ในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 5)



รูปที่ 5.15 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 5)



รูปที่ 5.16 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 5)

ตารางที่ 5.10 สมรรถนะของผลตอบสนองระบบ (พลาเน็ต 5)

กฎการปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา			
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	c_{ss}
Without PID	33.6	59.3	0	1
ZN	3.55	34.8	32.2	1
ISTWE	4.81	788	5.19	1
ZN + ISTWE	2.54	12.07	18.29	1
Proposed method	4.28	17.95	17.30	1

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.14 และสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงเปิดและระบบวงปิดที่แสดงในตารางที่ 5.10 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนาน หน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก และตัวทำนายสมิท (Proposed method) ให้ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาที่เร็วกว่าระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (ระบบวงเปิด) มีช่วงเวลาขึ้นสั้นกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากกฎการปรับจูน ISTWE แต่นานกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากกฎการปรับจูน ZN และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ZN + ISTWE) มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว (ZN หรือ ISTWE)

แต่นานกว่ากรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก มีการพุ่งเกินเกิดขึ้น 17.3 เปอร์เซนต์ ซึ่งน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากการปรับจูน ZN และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก แต่มากกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากการปรับจูน ISTWE เมื่อพิจารณารูปที่ 5.15 อธิบายได้ว่าสัญญาณควบคุมรวมในระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จะอยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัวในช่วงเวลาเริ่มต้น จนถึงเวลาประมาณวินาทีที่ 5 ต่อมาสัญญาณควบคุมรวมไม่ได้อยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมรวมทั้งสอง และหลังจากประมาณวินาทีที่ 10 สัญญาณควบคุมรวมจะอยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัวอีกครั้ง เพราะสัญญาณควบคุมรวมคือผลบวกของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนัก เป็นผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองอยู่ระหว่างผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว และเมื่อพิจารณาสัญญาณถ่วงน้ำหนักที่แสดงในรูปที่ 5.16 อธิบายได้ว่าสัญญาณถ่วงน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น และจะถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว (สัญญาณถ่วงน้ำหนักคูณกับสัญญาณควบคุมย่อยที่ตรงกัน) ในช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาประมาณวินาทีที่ 7 สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบ (ISTWE) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_2' มีค่ามากกว่า) สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบตึง (ZN) ทำให้สัญญาณควบคุมรวมได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึง แต่เวลาประมาณวินาทีที่ 7 จนถึงวินาทีที่ 10 สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบตึงจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_1' มีค่ามากกว่า) สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบ ทำให้สัญญาณควบคุมรวมได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบ จากนั้นเวลาประมาณวินาทีที่ 10 จนถึงวินาทีที่ 27 สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบตึงอีกครั้ง และหลังจากประมาณวินาทีที่ 27 สัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบตึงจะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยของตัวควบคุมแบบเรียบเพียงเล็กน้อย ทำให้สัญญาณควบคุมรวมได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสัญญาณควบคุมรวมประกอบด้วยสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงและแบบเรียบที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลตอบสนองมีพลวัตอยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ZN และ ISTWE และหลังจากนั้นสัญญาณควบคุมรวมยังคงได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบตึงมากกว่าเพียงเล็กน้อยในสถานะอยู่ตัว เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในทุกกรณี จึงอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนาน ตัวทำนายสมิธ แต่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ได้ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่า และระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักได้ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจ

5.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 6

พลาเน็ต 6 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

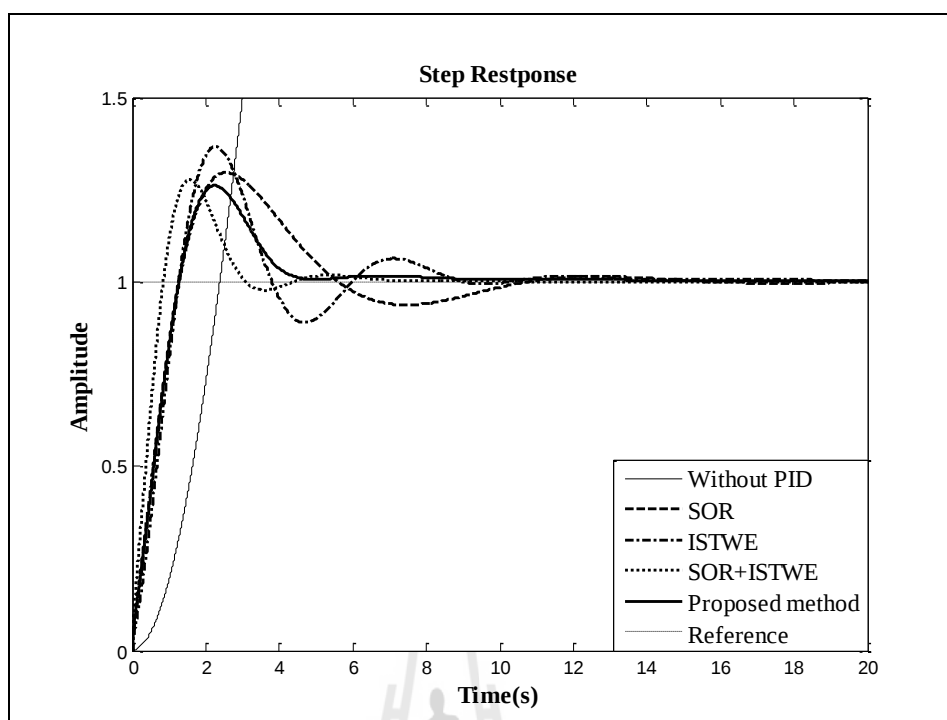
$$G_{P6}(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)}$$

บทที่ 2 ได้อธิบายเกณฑ์การปรับจูน (กฎการปรับจูน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ชดเชยพลาเน็ต 6 เนื่องจากระบบวงปิดที่มีค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีซึ่งได้จากกฎการปรับจูนทุกเกณฑ์ ให้ผลตอบสนองแบบตึงทั้งหมด ทำให้ไม่มีผลตอบสนองแบบเรียบ จึงเลือกกฎการปรับจูน SOR และ ISTWE หลังจากการปรับจูนเสร็จสิ้น นำตัวควบคุมพีไอดีสองตัวมาเชื่อมต่อแบบขนาน ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกันกับพลาเน็ต 1 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 6 แสดงได้ในตารางที่ 5.11

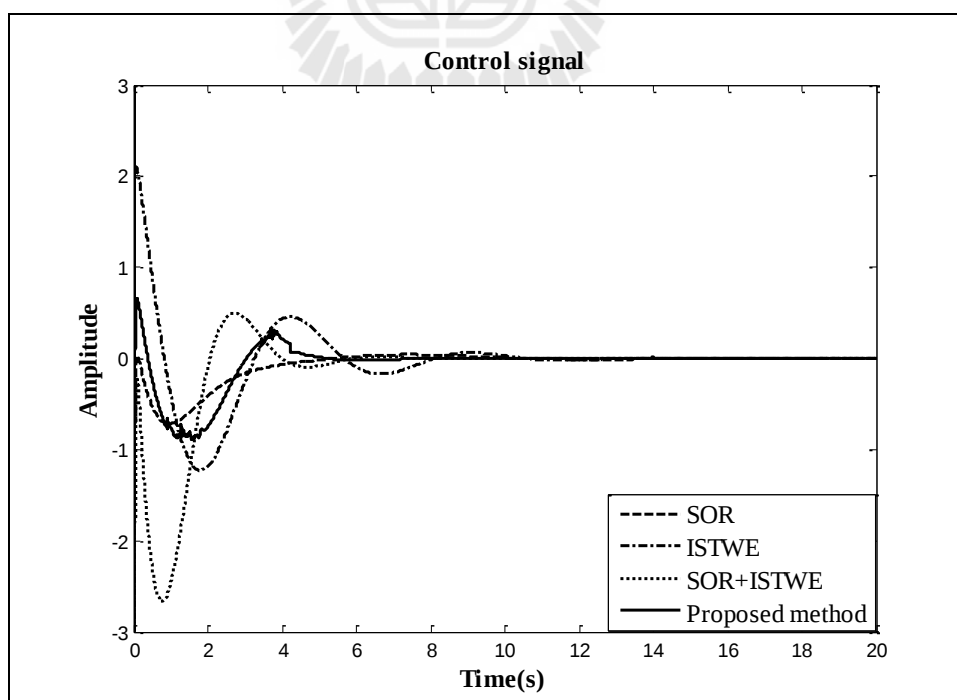
ตารางที่ 5.11 ค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) ของตัวควบคุมพีไอดี 2 ตัว (ที่ใช้ชดเชยพลาเน็ต 6)

กฎการปรับจูน	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี		
	K_P	K_I	K_D
SOR	1.9949	1.0783	2.4357
ISTWE	3.0769	0.2665	1.4231

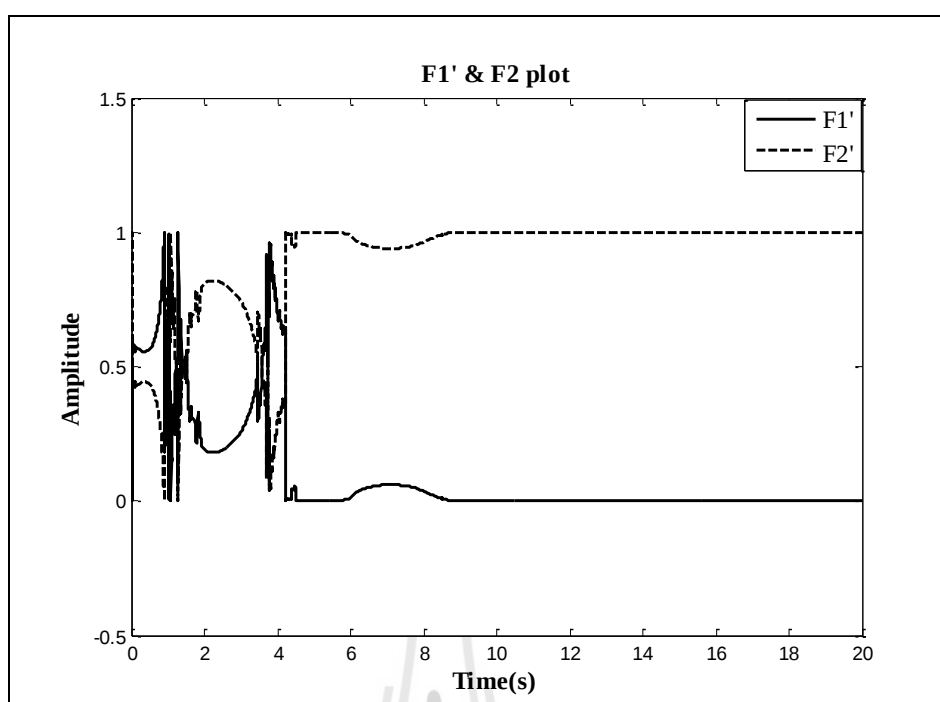
หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $k = 1.0$ และมีค่าเริ่มต้น $F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณีแสดงได้ในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 6)



รูปที่ 5.18 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 6)



รูปที่ 5.19 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 6)

ตารางที่ 5.12 สมรรถนะของผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 6)

กฎการปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา			
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	c_{ss}
Without PID	—	—	—	inf
SOR	1.03	9.81	29.60	1
ISTWE	0.98	8.42	36.70	1
SOR + ISTWE	0.69	3.82	27.63	1
Proposed method	1.01	4.28	26.08	1

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.17 และสมรรถนะของผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดที่แสดงในตารางที่ 5.12 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมฟuzzyสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (Proposed method) ให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลานิ่งขึ้นสั้นกว่าการใช้ตัวควบคุมฟuzzyตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ SOR เล็กน้อย แต่นานกว่าการใช้ตัวควบคุมฟuzzyตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับจูนตามเกณฑ์ของ ISTWE และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (SOR + ISTWE) มีช่วงเวลานิ่งขึ้นที่สั้นกว่าการใช้ตัวควบคุมฟuzzyตัวเดียวแต่ละตัว (SOR หรือ ISTWE) แต่นานกว่ากรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก

และมีการพุ่งเกินน้อยที่สุด นั่นคือผลตอบแทนมีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว กรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (SOR + ISTWE) จะให้ผลตอบแทนที่มีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าทุกกรณี เมื่อพิจารณารูปที่ 5.18 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักให้สัญญาณควบคุมรวมอยู่ในระหว่างสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว เพราะสัญญาณควบคุมรวมคือผลบวกของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนักเป็นผลให้ผลตอบแทนมีพลวัตอยู่ในระหว่างผลตอบแทนที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัวในช่วงระยะเวลาของสถานะชั่วครู่ และเมื่อพิจารณาสัญญาณถ่วงน้ำหนักที่แสดงในรูปที่ 5.19 อธิบายได้ว่าสัญญาณถ่วงน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น และจะถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว (สัญญาณถ่วงน้ำหนักคูณกับสัญญาณควบคุมย่อยที่ตรงกัน) ในช่วงเวลาเริ่มต้น สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกินซึ่งได้จากกฎการปรับจูน SOR ได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกินซึ่งได้จากกฎการปรับจูน ISTWE ต่อมาสัญญาณควบคุมย่อยที่ได้จาก ISTWE ได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยที่ได้จาก SOR จากนั้นเกิดการเปลี่ยนสลับการถ่วงน้ำหนักอีกสองครั้ง เป็นผลให้สัญญาณควบคุมย่อยที่ได้จาก ISTWE ได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่าในสถานะอยู่ตัว ทำให้สัญญาณควบคุมรวมแสดงลักษณะของ (ได้รับอิทธิพลจาก) สัญญาณควบคุมย่อยที่ได้จาก ISTWE มากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยที่ได้จาก SOR แต่สัญญาณควบคุมรวมประกอบด้วยสัญญาณควบคุมย่อยทั้งสองที่ไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้ผลตอบแทนมีแนวโน้มของพลวัตอยู่ในระหว่างผลตอบแทนที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัวในสถานะชั่วครู่ และหลังจากนั้นสัญญาณควบคุมรวมคือสัญญาณควบคุมย่อยที่ได้จาก ISTWE ในสถานะอยู่ตัว ($F'_2 = 1$ และ $F'_1 = 0$) เมื่อพิจารณาผลตอบแทนในทุกกรณี จึงอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อกับแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจ

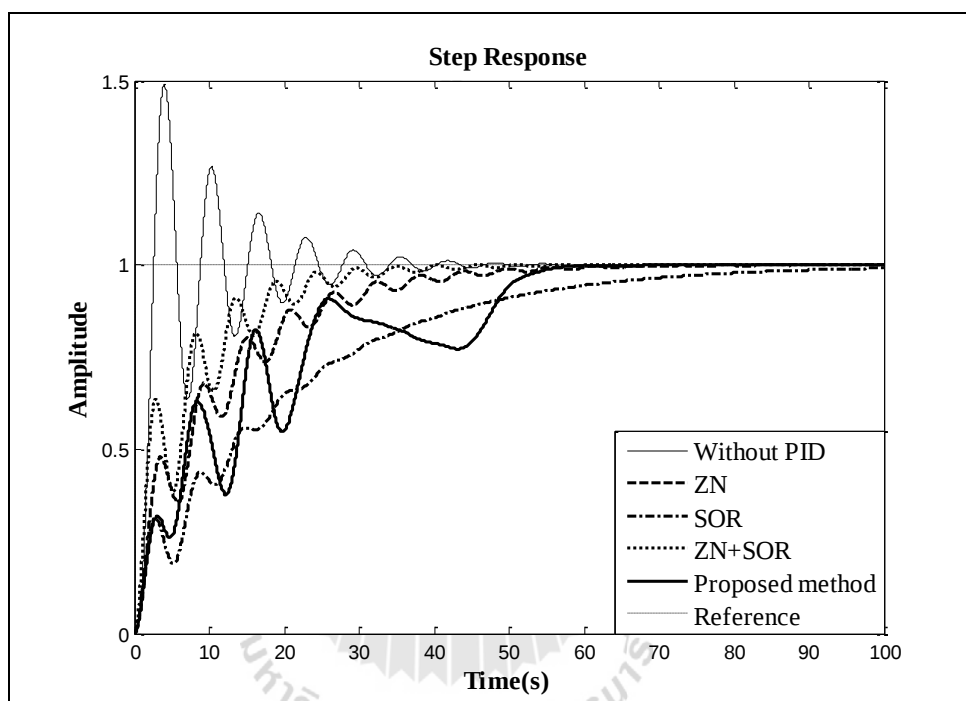
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 7

พลาเน็ต 7 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G_{p7}(s) = \frac{1}{s^3 + 1.2s^2 + 1.2s + 1}$$

ระบบควบคุมวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 7 และตัวควบคุมพีไอดีหนึ่งตัวที่มีค่าเกินที่ได้จากกฎการปรับจูนกฎใดกฎหนึ่งใน 5 กฎ ให้ผลตอบแทนที่มีการแกว่งในสถานะชั่วครู่และไม่เป็น

แบบตั้งและแบบเรียบที่ได้อธิบายในบทที่ 2 ดังนั้นระบบควบคุมวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 7 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากกฎการปรับจูน (เกณฑ์การปรับจูน) แตกต่างกันสองกฎ และมีหรือไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่ไม่น่าพอใจ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.20 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากกฎการปรับจูน ZN และ SOR และระบบวงปิดมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นมีการแกว่งมากในสถานะชั่วคราว



รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดในแต่ละกรณี ซึ่งกฎการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีคือ ZN และ SOR (พลาเน็ต 7)

ผลตอบสนองในรูปที่ 5.20 มีสมรรถนะในระดับที่ไม่น่าพอใจ จึงใช้สูตรวิธีเชิงวิเคราะห์ที่พิจารณาโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ คำนวณค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกณฑ์) ของตัวควบคุมพีไอดี (สราวุฒิ สุจิตจร, 2546) ซึ่งเริ่มต้นจากการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot: P.O.) และช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time: t_s) (วินาที) ของผลตอบสนอง (ข้อกำหนดสมรรถนะทางโดเมนเวลา) จากนั้นคำนวณอัตราส่วนการหน่วง (ζ) และความถี่ธรรมชาติ (ω_n) ดังต่อไปนี้

$$\zeta = \sqrt{\frac{(\ln \frac{P.O.}{100})^2}{\pi^2 + (\ln \frac{P.O.}{100})^2}} \quad (5.1)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta t_s} \quad (5.2)$$

โพลเด่นเชิงซ้อนบนระนาบเอสคือ

$$s_r = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (5.3)$$

ต่อมาใช้สูตรคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังต่อไปนี้

$$s_r = |s_r| \angle \theta \quad (5.4)$$

$$GH(s_r) = |GH(s_r)| \angle \phi \quad (5.5)$$

$$K_P = \frac{-\sin(\theta + \phi)}{|GH(s_r)| \sin \theta} - \frac{2K_I \cos \theta}{|s_r|} \quad (5.6)$$

$$K_D = \frac{\sin \phi}{|s_r| |GH(s_r)| \sin \theta} + \frac{K_I}{|s_r|^2} \quad (5.7)$$

โดยที่ $GH(s) = G(s)H(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่ไม่มีตัวควบคุมพีไอดี นั่นคือ $GH(s) = G_{p7}(s)$ เนื่องจากสมการที่ (5.6) และ (5.7) คือสมการสองสมการที่มีตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ K_P , K_I และ K_D สามตัวแปร จึงต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวเลขและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหลือสองตัวแปร

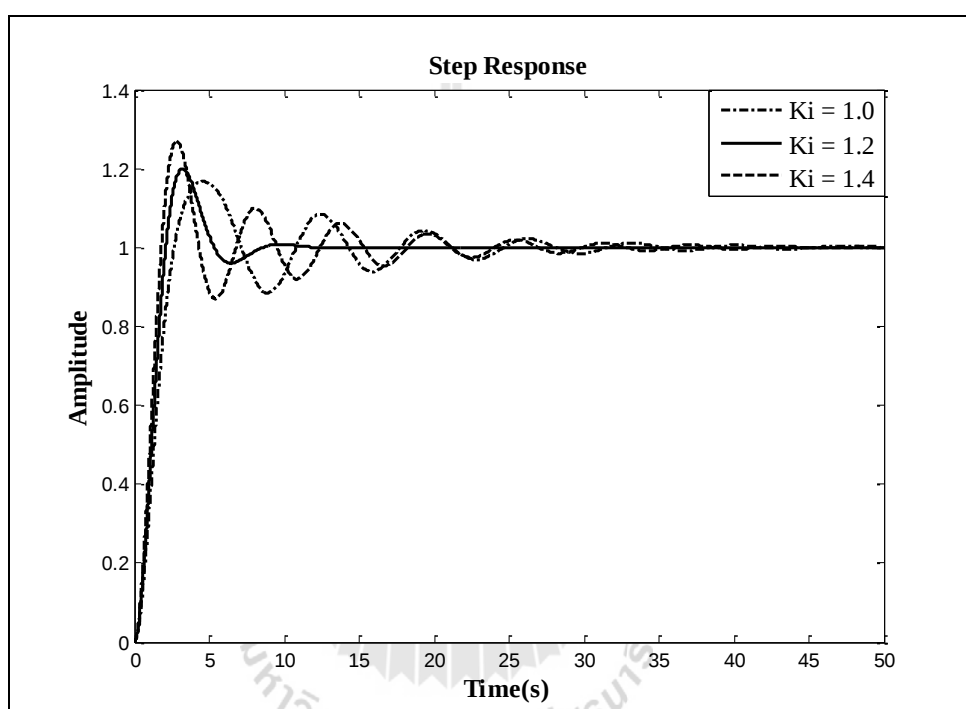
ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีตัวแรก ต้องการให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดมี $P.O. \leq 20\%$ และ $t_s \leq 8$ วินาที และเลือกค่า $K_I = 1.0$, 1.2 และ 1.4 จากนั้นคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหลือได้ดังนี้

เมื่อ $K_I = 1.0$ จะได้ว่า $K_P = 0.0721$ และ $K_D = 1.0341$ คือค่าเกณฑ์แรก

เมื่อ $K_I = 1.2$ จะได้ว่า $K_P = 0.2384$ และ $K_D = 1.2004$ คือค่าเกณฑ์ที่สอง

เมื่อ $K_I = 1.4$ จะได้ว่า $K_P = 0.4047$ และ $K_D = 1.3667$ คือค่าเกณฑ์ที่สาม

ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 7 และตัวควบคุมพีไอดีหนึ่งตัวที่มีค่าเกณฑ์แรก ชุดที่สอง และชุดที่สาม ให้ผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดี
เป็นค่าเกณฑ์แรก ชุดที่สอง และชุดที่สาม (พลาเน็ต 7)

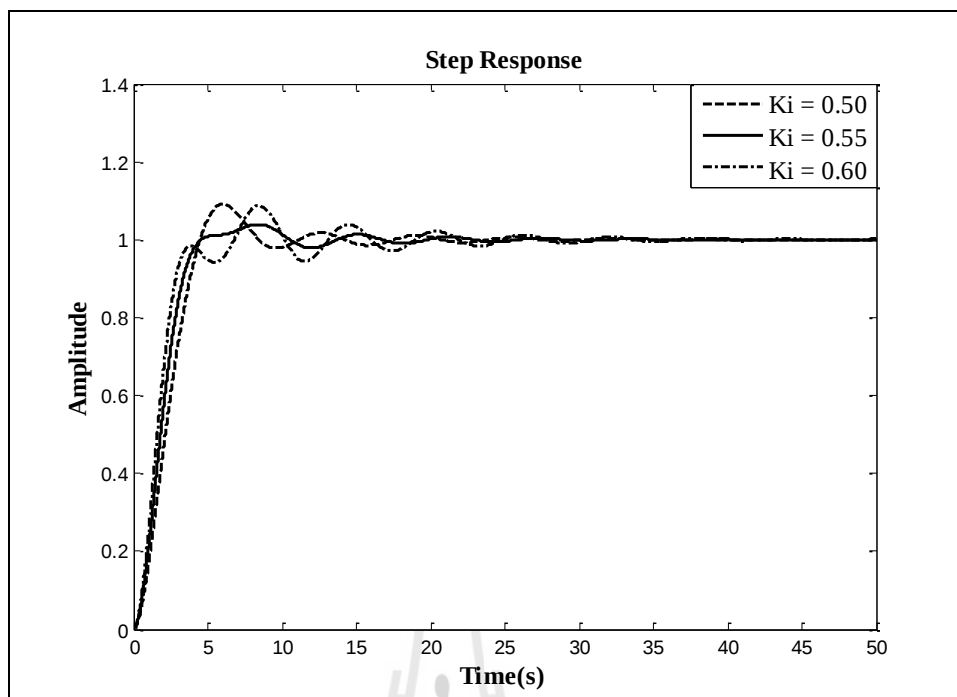
ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีตัวที่สอง ต้องการให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดมี $P.O. \leq 5\%$ และ $t_s \leq 8$ วินาที และเลือกค่า $K_I = 0.50$, 0.55 และ 0.60 จากนั้นคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหลือได้ดังนี้

เมื่อ $K_I = 0.50$ จะได้ว่า $K_P = 0.0575$ และ $K_D = 0.4774$ คือค่าเกณฑ์ที่สี่

เมื่อ $K_I = 0.55$ จะได้ว่า $K_P = 0.1527$ และ $K_D = 0.5727$ คือค่าเกณฑ์ที่ห้า

เมื่อ $K_I = 0.60$ จะได้ว่า $K_P = 0.2480$ และ $K_D = 0.6679$ คือค่าเกณฑ์ที่หก

ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 7 และตัวควบคุมพีไอดีหนึ่งตัวที่มีค่าเกณฑ์ที่สี่ ชุดที่ห้า และชุดที่หก ให้ผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 5.22

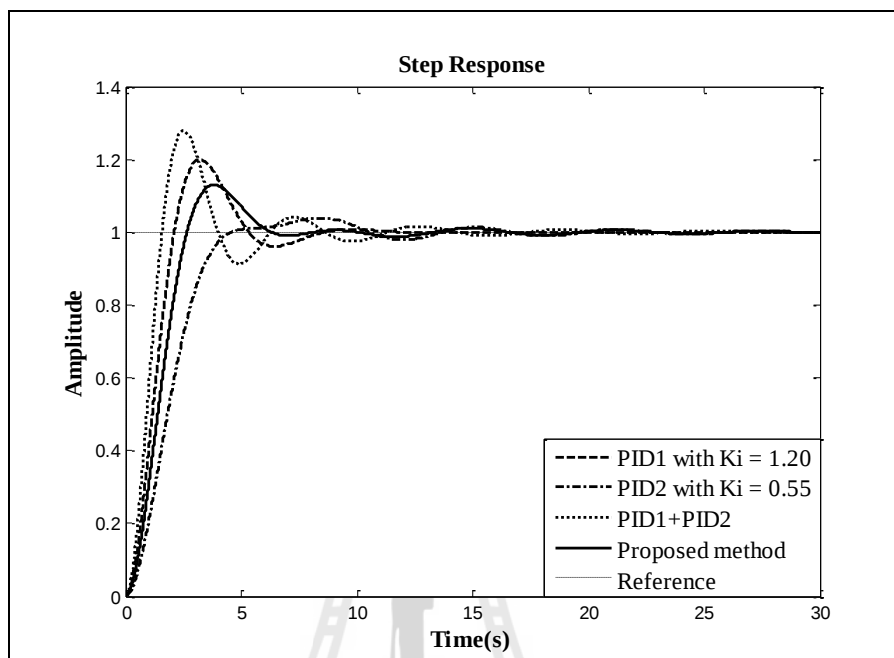


รูปที่ 5.22 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี
เป็นค่าเกนชุดที่สี่ ชุดที่ห้า และชุดที่หก (พลาเน็ต 7)

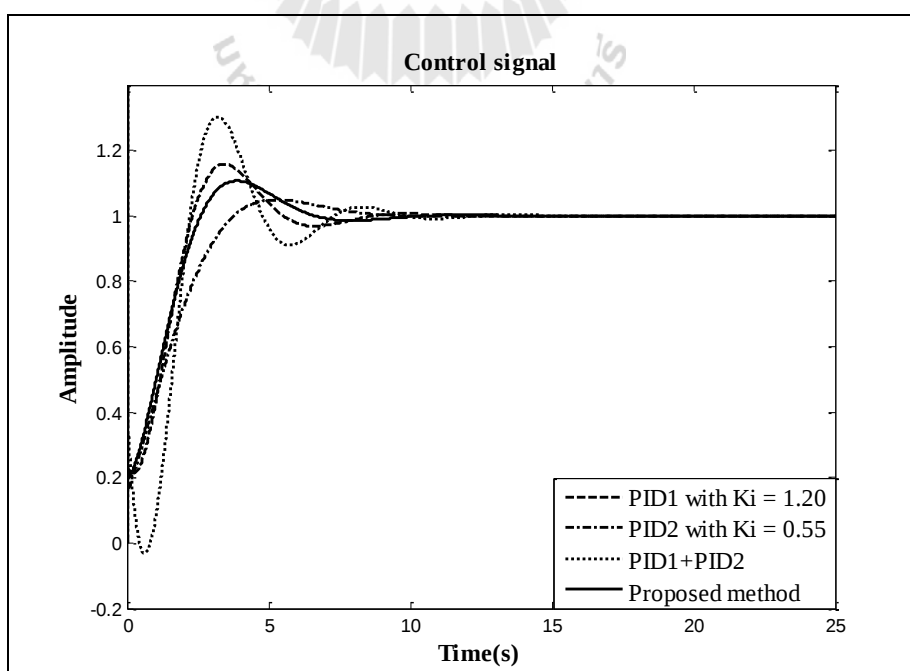
ในการใช้สูตรวิธีเชิงวิเคราะห์ที่พิจารณาโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี ข้อกำหนดสมรรถนะทางโดเมนเวลา (การพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่) ได้นำมาใช้ในการวางตำแหน่งของโพลเด่นเชิงซ้อนบนระนาบเอส เนื่องจากตำแหน่งของโพลเด่นมีผลกระทบถึงสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงปิด ถ้าโพลเด่นมีตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม ผลตอบสนองจะมีสมรรถนะเกินหรือมากกว่าข้อกำหนด หรือผลตอบสนองอาจจะมีช่วงเวลาเข้าที่นานมากเกินไป หรือมีการแกว่งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว หรือผลตอบสนองอาจจะมีเสถียรภาพได้ ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่ชดเชยพลาเน็ต 7 ตัวควบคุมตัวแรกทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบตึง ซึ่งได้จากข้อกำหนด $P.O. \leq 20\%$ และ $t_s \leq 8$ วินาที การเลือกค่าเกน $K_I = 1.2$ ทำให้เกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะตรงตามข้อกำหนด ตัวควบคุมตัวที่สองทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบเรียบ ซึ่งได้จากข้อกำหนด $P.O. \leq 5\%$ และ $t_s \leq 8$ วินาที เมื่อปรับเปลี่ยนค่าเกน K_I เป็นค่าที่แตกต่างกันหลายค่า ระบบวงปิดได้ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะมากกว่าข้อกำหนด การเลือกค่าเกน $K_I = 0.55$ ทำให้เกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับข้อกำหนด

กำหนดให้ตัวควบคุมพีไอดีตัวแรกที่มีค่าเกนชุดที่สองเป็นตัวควบคุมแบบตึง (PID1) และตัวควบคุมพีไอดีตัวที่สองที่มีค่าเกนชุดที่ห้าเป็นตัวควบคุมแบบเรียบ (PID2) ต่อมานำตัวควบคุมพีไอดีทั้งสองมาเชื่อมต่อแบบขนาน หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักมีค่า $k = 0.000005$ และมีค่าเริ่มต้น

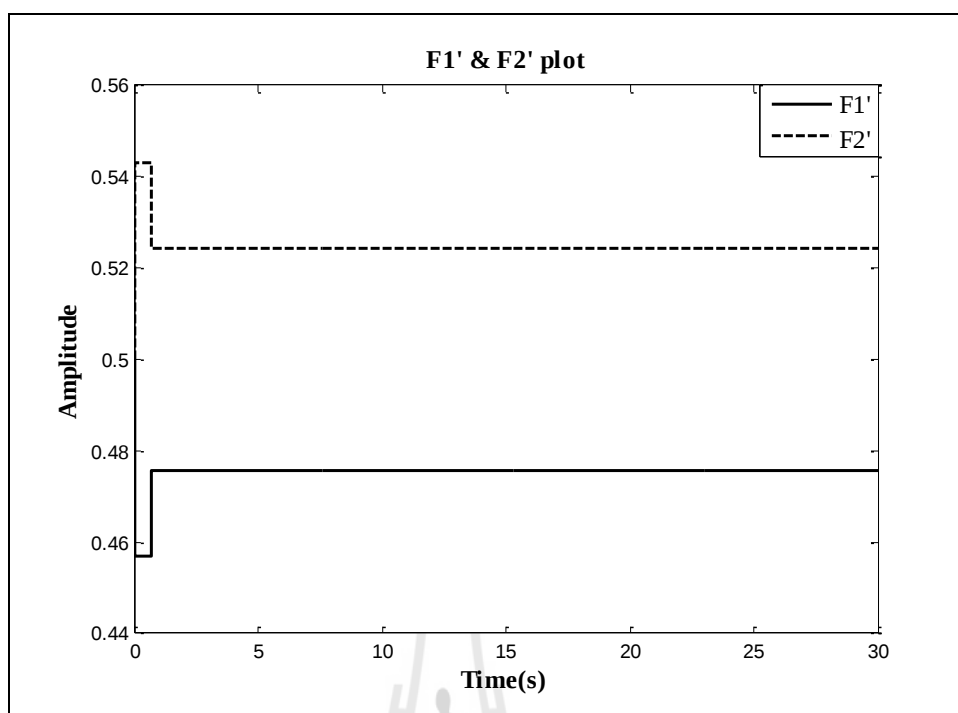
$F_1(0)$ และ $F_2(0)$ เท่ากับ 0.001 ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกันกับ พลาเน็ต 1 และผลตอบสนองของระบบวงปิดในแต่ละกรณีแสดงได้ในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองของระบบวงปิดในแต่ละกรณี (พลาเน็ต 7)



รูปที่ 5.24 สัญญาณควบคุมรวมและสัญญาณควบคุมในระบบวงปิด (พลาเน็ต 7)



รูปที่ 5.25 สัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' (พลาเน็ต 7)

ตารางที่ 5.13 สมรรถนะของผลตอบสนองของระบบ (พลาเน็ต 7)

กฎการปรับจูน	สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา			
	t_r (s)	t_s (s)	P.O. (%)	c_{ss}
Without PID	1.50	35.9	49.0	1
PID1 with $K_I = 1.20$	1.42	7.64	19.9	1
PID2 with $K_I = 0.55$	2.69	12.4	3.91	1
PID1 + PID2	1.07	10.45	27.9	1
Proposed method	1.79	5.81	13.0	1

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.23 และสมรรถนะของผลตอบสนองของระบบวงเปิดและระบบวงปิดที่แสดงในตารางที่ 5.13 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (Proposed method) ให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าทุกกรณี มีช่วงเวลาริเริ่มสั้นกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกน $K_I = 0.55$ (PID2) แต่นานกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกน $K_I = 1.2$ (PID1) และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (PID1 + PID2) มีการพุ่งเกินน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกน $K_I = 1.2$ (PID1) และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก แต่มากกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัว

เดียวที่มีค่าเกน $K_I = 0.55$ (PID2) เมื่อพิจารณารูปที่ 5.24 อธิบายได้ว่าสัญญาณควบคุมรวมในระบบวงปิดที่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักร จะอยู่ระหว่างสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว เพราะสัญญาณควบคุมรวมคือผลบวกของสัญญาณควบคุมย่อยแบบถ่วงน้ำหนัก ทำให้ผลตอบสนองมีพลวัตอยู่ระหว่างผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว และเมื่อพิจารณาสัญญาณถ่วงน้ำหนัก F_1' และ F_2' ที่แสดงในรูปที่ 5.25 อธิบายได้ว่าสัญญาณถ่วงน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น และจะถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว (สัญญาณถ่วงน้ำหนักคูณกับสัญญาณควบคุมย่อยที่ตรงกัน) ในช่วงเวลาเริ่มต้น สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบเรียบ (PID2) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักมากกว่า (F_2' มีค่ามากกว่า) ในขณะที่สัญญาณควบคุมย่อยที่สร้างได้จากตัวควบคุมแบบคิง (PID1) จะได้รับการถ่วงน้ำหนักน้อยกว่า (F_1' มีค่าน้อยกว่า) ทำให้สัญญาณควบคุมรวมแสดงลักษณะของ (หรือได้รับอิทธิพลจาก) สัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบมากกว่าสัญญาณควบคุมย่อยแบบคิง แต่สัญญาณควบคุมรวมประกอบด้วยสัญญาณควบคุมย่อยทั้งสองที่ไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้ผลตอบสนองมีการพุ่งเกินอยู่ระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวแต่ละตัว และหลังจากนั้นสัญญาณควบคุมรวมยังคงได้รับอิทธิพลจากสัญญาณควบคุมย่อยแบบเรียบ (PID2) มากกว่าในสถานะอยู่ตัว จึงอธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียว

5.9 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมแบบวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยาก 7 รูปแบบ หน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก และตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและมีค่าเกนซึ่งได้จากการกฎการปรับจูนที่แตกต่างกัน ถ้าระบบวงปิดที่ประกอบด้วยเฉพาะพลาเน็ตและตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว มีผลตอบสนองแบบคิงและแบบเรียบที่เกิดจากการใช้กฎการปรับจูนที่แตกต่างกัน จะได้ว่าระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ตเดียวกัน ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก มีแนวโน้มให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าหรืออยู่ในระดับที่น่าพอใจ ผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยากแต่ละพลาเน็ต จะเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว และกรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานที่มีและไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 1 พลาเน็ต 2 หรือพลาเน็ต 3 และตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าทุกกรณี เนื่องจากพลาเน็ต 4 และพลาเน็ต 5 คือพลาเน็ตอันดับหนึ่งและพลาเน็ตอันดับสองที่มีการประวิงเวลา จึงนำตัวทำนายสมิธมาชดเชยผลกระทบที่เกิดจากพจน์ของการประวิงเวลา ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 4 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและมี

หน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะดีกว่าทุกกรณี ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 5 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจ และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะดีกว่า ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 6 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจ และกรณีที่ไม่มีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะดีกว่า เนื่องจากระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 7 และตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกนซึ่งได้จากกฎการปรับจูน 5 เกณฑ์ ให้ผลตอบแทนที่มีการแกว่งในสถานะชั่วคราวหรือมีสมรรถนะที่ไม่น่าพอใจหรืออาจจะขาดเสถียรภาพได้ จึงนำสูตรวิธีเชิงวิเคราะห์หาคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีแทนการใช้กฎการปรับจูน หลังจากการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่ชัดเจนพลาเน็ต 7 และให้ผลตอบแทนที่เป็นแบบตั้งและแบบเรียบ ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 7 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวนี้ที่เชื่อมต่อแบบขนาน และมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จะให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงกฎการปรับจูน (เกณฑ์การปรับจูน) ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดี 5 กฎ ที่พิจารณาค่าอัตราขยายวิกฤต และวิธีการปรับจูนค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 7 รูปแบบที่ได้นำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Astrom และ Hagglund (2000) ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ตควบคุมยากพลาเน็ตไดพลานต์หนึ่งและตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์ได้จากกฎการปรับจูนบางกฎหรือสูตรวิธีเชิงวิเคราะห์ (ถ้าพลาเน็ตมีการประวิงเวลา ระบบวงปิดจะต้องมีตัวทำนายสมิธ) จะให้ผลตอบสนองแบบดิ่งหรือผลตอบสนองแบบเรียบ และงานวิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายแผนการใหม่ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่มีค่าเกณฑ์ได้จากกฎการปรับจูนที่แตกต่างกันและเชื่อมต่อแบบขนาน และมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัว จากนั้นนำเสนอสัญญาณควบคุมที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักมารวมกัน เพื่อป้อนถึงพลาเน็ตและชดเชยพลวัตของพลาเน็ต ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียวที่ให้ผลตอบสนองแบบดิ่งหรือแบบเรียบเท่านั้น หน่วยปรับถ่วงน้ำหนักจะทำหน้าที่คำนวณสัญญาณถ่วงน้ำหนักที่คูณกับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีแต่ละตัวแบบออนไลน์ เนื่องจากระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีสองตัวเชื่อมต่อแบบขนานและมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักคือระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกณฑ์เปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงได้นำทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่มีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามเวลา มาใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิดดังกล่าว และการตรวจสอบเสถียรภาพได้แสดงว่าระบบวงปิดทุกระบบมีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาผลการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ จะสรุปได้ดังนี้

บทที่ 1 ได้อธิบายความสำคัญและที่มาของปัญหา เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความสำคัญของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการควบคุมกระบวนการและเครื่องจักรกลเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของพลาเน็ตจะทำให้ระบบควบคุมวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะเกินข้อกำหนดหรือไม่ตรงตามความต้องการในโดเมนเวลา เพราะตัวควบคุมพีไอดีไม่สามารถชดเชยคุณลักษณะของพลาเน็ตได้อย่างสมบูรณ์ หรือตัวควบคุมพีไอดีอาจจะมีค่าเกณฑ์ที่ไม่เหมาะสม

ซึ่งค่าเกินของตัวควบคุมโดยส่วนใหญ่จะคำนวณได้จากกฎการปรับจูน นอกจากนี้ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพของงานวิจัยก่อนหน้านี้

บทที่ 2 ได้อธิบายความรู้พื้นฐานของตัวควบคุมพีไอดี กฎการปรับจูน (เกณฑ์การปรับจูน) ค่าเกินของตัวควบคุมพีไอดี 5 กฎคือ การปรับจูนของซิกเลอร์และนิโคลส์ การปรับจูนแบบอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Integral of Absolute Error: IAE) การปรับจูนแบบไร้การพุ่งเกิน (No-Overshoot Rule: NOR) การปรับจูนแบบการพุ่งเกินเล็กน้อย (Some-Overshoot Rule: SOR) และการปรับจูนแบบอินทิกรัลของการถ่วงน้ำหนักกำลังสองของความผิดพลาดด้วยเวลา (Integral of Squared Time Weighted Error: ISTWE) และการใช้ตัวทำนายสมิท (Smith predictor) ชดเชยผลกระทบที่เกิดจากพจน์ประวิงเวลาของพลานต์ นอกจากนี้ได้แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิดที่มีพลานต์ควบคุมยาก 7 รูปแบบและตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวที่มีค่าเกินที่ได้จากกฎการปรับจูน 5 กฎ และการพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกินที่ได้จากกฎการปรับจูนบางกฎ จะชดเชยคุณลักษณะของพลานต์ควบคุมยากบางพลานต์ได้ในระดับที่น่าพอใจ ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินต่ำหรือใช้เวลาเข้าที่สั้น แต่กฎการปรับจูนบางกฎได้ทำให้เกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะเกินข้อกำหนด กล่าวคือผลตอบสนองอาจจะมีการพุ่งเกินสูงหรือใช้เวลาเข้าที่นานมาก

บทที่ 3 ได้อธิบายการออกแบบหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเริ่มต้นจากการกำหนดฟังก์ชัน $V = 0.5e^2$ ให้เป็นตัวแทนของความผิดพลาด $e(t)$ ในระบบวงปิด ฟังก์ชันที่พิจารณาจะเป็นกำลังสองของความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($e^2(t)$) จากนั้นหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันเทียบกับเวลา ต่อมานิยามให้อนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา และกำหนดให้สัญญาณควบคุมรวมเกิดจากการถ่วงน้ำหนักหรือการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุมย่อย ทำให้ได้รับสมการที่ใช้คำนวณหาสัญญาณถ่วงน้ำหนัก นอกจากนี้ได้อธิบายแนวทางการเลือกค่า k ของหน่วยปรับถ่วงน้ำหนักในระบบวงปิดที่มีพลานต์ 1 และตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน ระบบวงปิดดังกล่าวมีค่า k ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะที่ดีกว่าผลตอบสนองแบบคิงและผลตอบสนองแบบเรียบที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่มีพลานต์ไคพลานต์หนึ่งตั้งแต่พลานต์ 2 ถึงพลานต์ 7 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก จะได้ว่าระบบวงปิดมีค่า k ที่เหมาะสมแตกต่างกันที่ทำให้เกิดผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะที่ดีกว่า และการเลือกค่า k ที่เหมาะสมต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก

บทที่ 4 ได้อธิบายการนำทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มาใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบควบคุมวงปิดที่ประกอบด้วยพลานต์ควบคุมยากพลานต์ไคพลานต์

หนึ่ง ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ถ้าพลาสต์มีการประวิงเวลา ระบบวงปิดจะต้องมีตัวทำนายสมิธ) การตรวจสอบเสถียรภาพได้แสดงว่าระบบวงปิดทุกระบบมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับแบบวงกว้าง

บทที่ 5 ได้อธิบายการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมวงปิดที่ประกอบด้วยพลาสต์ควบคุมยกพลาสต์ใดพลาสต์หนึ่ง ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ถ้าพลาสต์มีการประวิงเวลา ระบบวงปิดจะต้องมีตัวทำนายสมิธ) และผลการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิดระบบอื่นที่ประกอบด้วยพลาสต์ควบคุมยก และตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียวหรือตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน ถ้าพลาสต์ควบคุมยกคือพลาสต์ 7 ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกินซึ่งได้จากกฎการปรับจูน 5 กฎ จะทำให้เกิดผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีการแกว่งในสถานะชั่วคราวและไม่เป็นแบบตั้งและแบบเรียบเป็นผลให้ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาสต์ 7 ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่มีค่าเกินซึ่งได้จากกฎการปรับจูนที่แตกต่างกันสองกฎและเชื่อมต่อแบบขนาน และมีหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก สร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่ไม่น่าพอใจ จึงใช้สูตรวิธีเชิงวิเคราะห์ที่พิจารณาพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ คำนวณค่าเกินของตัวควบคุมพีไอดีแทนการใช้กฎการปรับจูน ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงว่าระบบควบคุมวงปิดที่ประกอบด้วยพลาสต์ควบคุมยก ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะในระดับที่น่าพอใจหรือมีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเพียงตัวเดียว

6.2 ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลการจำลองสถานการณ์ ทำให้เกิดแนวคิดหรือข้อเสนอแนะในการดำเนินงานต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

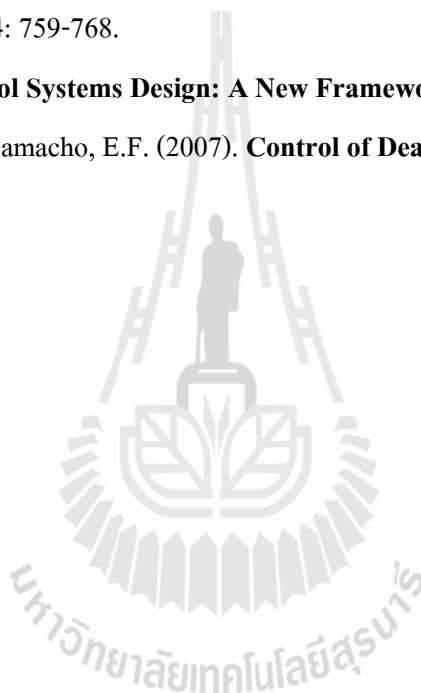
1. เนื่องจากระบบควบคุมวงปิดที่ประกอบด้วยพลาสต์ควบคุมยก ตัวควบคุมพีไอดีสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนาน และหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก (ถ้าพลาสต์มีการประวิงเวลา ระบบวงปิดจะต้องมีตัวทำนายสมิธ) ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะขึ้นอยู่กับกฎการปรับจูนที่แตกต่างกันสองกฎที่ใช้ คำนวณค่าเกินของตัวควบคุมพีไอดีสองตัว จึงต้องศึกษาและค้นหากฎการปรับจูนเพิ่มเติม นอกเหนือจาก 5 กฎนี้ ที่ทำให้ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาสต์ควบคุมยกและตัวควบคุมพีไอดีตัวเดียว สร้างผลตอบสนองแบบตั้งหรือผลตอบสนองแบบเรียบที่มีการพุ่งเกินต่ำและใช้เวลาเข้าที่สั้น

2. การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (ดีเอสพี) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอดีหรือตัวควบคุมชนิดอื่นสองตัวที่เชื่อมต่อแบบขนานและหน่วยปรับถ่วงน้ำหนัก เพื่อดำเนินการทดลองหาค่าพลาสต์หรือกระบวนการจริง

รายการอ้างอิง

- สราวุฒิ สุจิตจร. (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. Pearson Education Indochina.
- Ang, K.H., Chong, G., and Li, Y. (2005). PID Control System Analysis, Design, and Technology. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. 13(4): 559-576.
- Astrom, K.J., and Hagglud, T. (1995). PID Controllers : Theory Design and Tuning, 2nd, ed., **Instrument Society of America**.
- Astrom, K.J., and Hagglud, T. (2000). Benchmark System for PID Control. **Proceedings of IFAC Conference on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control**. 165-166.
- Bennett S. (1993), A History of Control Engineering 1930 – 1955, pp.28-69.
- Er, M.J., and Sun, Y.L. (2001). Hybrid Fuzzy Proportional-Integral Plus Conventional Derivative Control of Linear and Nonlinear Systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 48(6):1109-1117.
- Gopala Rao, K.A., Amaredra Reddy, B., and Durga Bhavani, P. (2010). Fuzzy PI and Integrating Type Fuzzy PID Controllers of Linear, Nonlinear and Time-Delay Systems. **International Journal of Computer Applications**. 1(6): 41-47.
- Kim, J.H., Kim, K.C., and Edwin K.P., C. (1994). Fuzzy Precompensated PID Controllers. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. 2(4): 406-411.
- Li, G., and Tsang K.M. (2007). Concurrent Relay-PID Control for Motor Position Servo Systems. **International Journal of Control, Automation, and Systems**. 5(3): 234-242.
- Li, W. (1998). Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**. 6(4): 449-463.
- Otsubo, A., Hayashi, K., Murakami, S., and Meada, M. (1998). Fuzzy Hybrid Control Using Simplified Indirect Inference Method. **Fuzzy Sets and Systems**. 99: 265-272.
- Pessen, D.W., (1994). A New Look at PID-Controller Tuning., **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**. 116: 553-557.

- Sanchez, D.A., (1968). **Ordinary Differential Equations and Stability Theory: An** Introduction, W.H. Freeman and Company.
- Seborg, D.E., Edgar T.F., and Mellichamp D.A. (2004). Process Dynamics and Control (2nd Edition). **John Wiley & Sons, Inc.** New Jersey.
- Zakian, V. (2005). **Control Systems Design: A New framework**. Springer, London.
- Zhuang, M., and Atherton D.P. (1993). Automatic tuning of optimum PID controllers. **IEE Proceedings - D**.140(3): 216-224.
- Ziegler, J.G., and Nichols N.B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. **Transactions of the ASME**. 64: 759-768.
- Zakian, V. (2005). **Control Systems Design: A New Framework**. Springer, London.
- Normey-Rico, J.E., and Camacho, E.F. (2007). **Control of Dead-time Processes**. Springer, London.



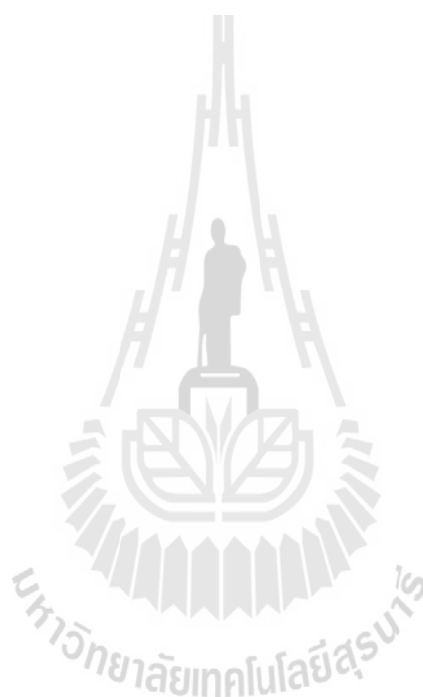
ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Sangtungtong W., and Dadthuyawat W. (2013). **The Two Parallel PID Controllers with Their Output-Weighting Adaptation**. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI-CON 2013). Krabi, Thailand.



The Two Parallel PID Controllers with Their Output-Weighting Adaptation

Wirote Sangtungtong*, Wuthitham Dadthuyawat

*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand*

cewirote@sut.ac.th

degton_@hotmail.com

*Corresponding author

Abstract—This paper aims to establish an innovative scheme for compensating the dynamics of the benchmark plant by employing especially two parallel PID controllers and their output-weighting method. These PID controllers are fitted by different tuning-rules and the multipliers for their output-weighting are on-line adapted so that the error of the closed-loop response disappears more rapidly than the cases of using each single PID controller alone. Simulation results confirm feasibility and effectiveness of the proposed methodology.

Keywords— Parallel PID controllers, Output-weighting method, Benchmark plant, Some-overshoot rule, Ziegler-Nichols tuning rule

I. INTRODUCTION

Nowadays, the PID controllers are employed widely for compensating process control and industrial machines such as servomotor system, robotics, electric vehicles, assembly automation and so on [1]. Although, from past to present time there have already been diversity of ready-made formulae introduced for tuning three terms of the conventional PID controllers but the resultant response of a closed-loop system often lacks satisfactory performance and exceeds desirable time-domain specifications. Hereupon, the recent works addressed some techniques combining with designing PID controller to obtain better performance. For instance, such concepts are PID precompensated with fuzzy in feedforward path for controlling DC servomotor [2], PID parallel with hybrid fuzzy for the lag first-order and second-order plants [3], ID controller parallel with P fuzzy for nonlinear plants [4], Hybrid controller between fuzzy and PID controllers for linear and nonlinear plants [5], PID controller parallel with phase-lead compensator cascaded by relay for DC servomotor [6], PI fuzzy plus PID fuzzy and conventional PID controllers in series for linear and nonlinear plants

as well as systems with time-delay [7]. Caused by these research, anyone can deduce that the single PID controller becomes insufficient for controlling some plants. It is further interesting whether or not more one conventional PID controllers in parallel connection with their different gains are able to tackle with the high-order or complex plant. If it is, how to they must cooperate in order to achieve the improved performance of closed-loop response.

This article explains a new methodology concerning exploiting two conventional PID controllers connected in parallel and manipulating plant concurrently. Their outputs are weighted by the supervisory unit in order to share capability of each corresponding controller into appropriate manner such that the response of the closed-loop system characterizes a better performance than the one arises from using a single controller alone. Three-term gains of these two PID controllers are tuned individually and independently with two different criteria provided by Ziegler-Nichols (ZN) [8] and some-overshoot rule (SOR) [9]. The supervisory unit serves as on-line dual-weight calculator and feeder allowing each output of controllers multiplied by these weights. Rather than the output of the single PID controller, the summation of the weighted outputs is delivered to plant. Therefore, the closed-loop system under verification consists of two PID controllers, the supervisory unit and the plant for benchmarking. Finally, the comparison between simulation results is considered to summarize the performance of the proposed scheme.

II. THE PROPOSED METHODOLOGY

Because of imperfection of employing just only one PID-tuning rule for controlling the benchmark plant, it is essential to gather benefits of two tuning rules having to be used together and simultaneously. This requirement leads to handling two PID controllers in parallel connection with their gains adjusted by different tuning rules. However, due to linear characteristics of them, such two controllers are reduced into form of a single controller with improper gains producing the closed-loop response unsatisfactory. In order to avoid collapse of these controllers, the proposed strategy arranges the supervisory unit and two parallel PID controllers (G_{c1} and G_{c2}) receiving the same error ($e(t)$) as shown in Fig. 1. In this work, the supervisory unit is the new concept utilizing the response error, total control signal ($u(t)$) and separate control signals ($u_1(t)$ and $u_2(t)$) occurring from each of controllers, for purpose of adapting dual weight (F_1 and F_2). When the supervisory unit yields reasonable dual weight dependent on plant behavior and stable controller dynamics, the superior closed-loop response should take place. Prior to creating such supervisory unit, each of the two PID controllers must be tuned with different criteria so that they feature heterogeneous useful characteristics for plant compensation.

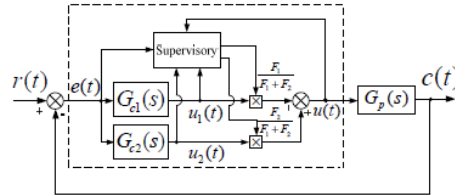


Fig. 1 Configuration of all closed-loop system

III. TUNING PID CONTROLLERS

Since the plant model is well known, two different criteria for tuning two parallel PID controllers apart are based on critical gain method. After the proportional controller is cascaded with plant in the unity feedback system, the proportional gain is increased from 0 to a critical value at which

the plant output first reveals sustained oscillations. Thus, the critical gain (K_u) and the corresponding oscillation period (T_u) are determined from the above examination. Ziegler and Nichols [8] suggested the tight control criterion with the parameters K_p , T_i , and T_d which are calculated according to the formula listed in Table I, while Seborg [9] offered the smooth control criterion with such three parameters which are computed from another formula in the same table. The tight control criterion gives more importance of the rise time and settling time than that of the overshoot in response. In other words, faster response with shorter rise-time and settling-time are found regardless of how large overshoot appears. In contrast to the previous one, the smooth control criterion, sometimes called the some-overshoot rule (SOR), dedicates little overshoot but more prolonged rise-time and settling-time. Later on, the parameter set K_p , T_i , and T_d have to be changed to the PID gains K_p , K_I , and K_D through the equation below.

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

where $K_I = K_p/T_i$ and $K_D = K_p T_d$

TABLE I
TWO TUNING RULES BASED ON CRITICAL GAIN AND CRITICAL PERIOD [10]

PID Rule	PID Parameters
Ziegler – Nichols (ZN)	$K_p = 0.6K_u$, $T_i = 0.5T_u$, $T_d = 0.125T_u$
some – overshoot rule (SOR)	$K_p = 0.33K_u$, $T_i = 0.5T_u$, $T_d = 0.33T_u$

IV. DESIGN OF THE SUPERVISORY UNIT

After both PID controllers connected in parallel are tuned by two different criteria, the supervisory unit is formulated to evaluate dual weight for simultaneously emphasizing output of the one controller and relaxing output of the other. Moreover, the mechanism for updating the dual weight has to maintain firmly the stable response of the closed-loop system. It is meaningful to choose

the square of response error related to such a plan as follows:

$$V = \frac{1}{2}e^2 \quad (2)$$

Differentiating eq. (2) with respect to time yields

$$\dot{V} = e\dot{e} \quad (3)$$

Because the total control signal influences the response error, eq. (3) is rewritten as

$$\dot{V} = e \frac{de}{du} \frac{du}{dt} = e \frac{de}{du} \dot{u} = e \frac{\partial e}{\partial u} \dot{u} \quad (4)$$

When the total control signal is prescribed as

$$\dot{u} = -k e \frac{\partial e}{\partial u} \quad (5)$$

where k is a positive constant. Subsequently, substituting eq. (5) into eq. (4) gives

$$\dot{V} = e \frac{\partial e}{\partial u} \left(-k e \frac{\partial e}{\partial u} \right) = -k \left(e \frac{\partial e}{\partial u} \right)^2 \leq 0 \quad (6)$$

This implies that $\dot{V}$ is always negative semi-definite and V becomes decreasing whenever $\dot{V}$ remains negative, i.e. $V(t) \leq V(0)$. Thereby, e^2 possibly declines and the response error decays to a small value in steady-state. The total control signal can be realized by distinctly collecting outputs of each PID controller.

$$u = \frac{F_1 u_1 + F_2 u_2}{F_1 + F_2} = F_1' u_1 + F_2' u_2 \quad (7)$$

The $F_1' = F_1/(F_1 + F_2)$ and $F_2' = F_2/(F_1 + F_2)$ are the multipliers for the outputs. The denominator of eq. (7) must be nonzero and both of the F_1 and F_2 have to be merely positive. Differentiating eq. (7) with respect to time and then rearranging it yields

$$\dot{u} = \frac{\dot{F}_1 F_2 (u_1 - u_2) - F_1 \dot{F}_2 (u_1 - u_2)}{(F_1 + F_2)^2} + \frac{F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2}{(F_1 + F_2)^2} \quad (8)$$

Eq. (5) and eq. (8) are the same derivative of the total control signal. The equality of these dictates

$$\begin{aligned} & \dot{F}_1 F_2 (u_1 - u_2) - F_1 \dot{F}_2 (u_1 - u_2) + F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2 \\ &= -k(F_1 + F_2)^2 e \frac{\partial e}{\partial u} \end{aligned} \quad (9)$$

Eq. (9) points out that F_1 and F_2 affects each other. Not any laws generalize about a certain assignment for $\dot{F}_1$ and $\dot{F}_2$. Herein, the $\dot{F}_1$ is partially involved in the response error while the $\dot{u}_1$ and $\dot{u}_2$ are decided to take part in $\dot{F}_2$. Consequently, eq. (9) is split into two parts as follows:

$$\dot{F}_1 F_2 (u_1 - u_2) = -k(F_1 + F_2)^2 e \frac{\partial e}{\partial u} \quad (10)$$

$$F_1 \dot{F}_2 (u_1 - u_2) = F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2 \quad (11)$$

Afterwards, eq. (10) and eq. (11) are both reformed into the integral type below.

$$F_1 = -k \int_0^t \left(\frac{(F_1 + F_2)^2}{F_2 (u_1 - u_2)} e \frac{\partial e}{\partial u} \right) dt + F_1(0) \quad (12)$$

$$F_2 = \int_0^t \left(\frac{1}{F_1 (u_1 - u_2)} (F_1 F_2 (\dot{u}_1 + \dot{u}_2) + F_1^2 \dot{u}_1 + F_2^2 \dot{u}_2) \right) dt + F_2(0) \quad (13)$$

The $F_1(0)$ and $F_2(0)$ are the initial values of the F_1 and F_2 . Beneath preventing u_1 not identical to u_2 the F_1 and F_2 could be evaluated over running. Nevertheless, the F_1 and F_2 should be preserved not to be greater than a unit value and not to be lower a slight positive one near zero because growth of the

F_1 and F_2 beyond this nominal range is insignificant. However, in order to cope with the F_1 and F_2 that both are restricted to be within this range and are frozen at two extreme limits during operation, the strong back-calculation [11] should be included in eq. (12) and eq. (13).

V. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

The plant under tests is the benchmark model that possesses its open-loop fourth-order transfer function as follows: [12]

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(\alpha s+1)(\alpha^2 s+1)(\alpha^3 s+1)}, \quad \alpha = 0.5 \quad (14)$$

The first PID controller is tuned by the tight control criterion (ZN). This procedure brings its gains to $K_p = 4.05$, $K_I = 3.6$ and $K_D = 1.1391$. The smooth control criterion (SOR) adjusts all the gains of the second PID one to $K_p = 2.2275$, $K_I = 1.98$ and $K_D = 1.6539$. The closed-loop system containing two PID controllers in parallel connection without the supervisory unit is stable because it has all its poles within the left side of the s -plane. They are $p_1 = -10.7$, $p_{2,3} = -1.12 \pm j4.05$ and $p_{4,5} = -1.12 \pm j0.857$. When the open-loop plant (uncompensated), the closed-loop system with only the first PID controller, the closed-loop system with only the second PID one and the closed-loop system with both the PID ones all are launched, their responses for unit-step set-point are plotted in Fig. 2. The response of the closed-loop system with only the first PID (ZN) manifests short rise-time at $t_r = 0.527$ s and yet long settling-time at $t_s = 4.42$ s and relatively large overshoot at $P.O. = 37.3\%$. The response in the case of only the second PID (SOR) exhibits both lightly longer rise-time at $t_r = 0.767$ s and settling-time at $t_s = 5.33$ s but much smaller overshoot at $P.O. = 5.45\%$. In the case of both the parallel PID ones (ZN plus SOR) relevant to adding their corresponding gains together, the response exposes the large overshoot at $P.O. = 39\%$ but both shorter rise-time at $t_r = 0.347$ s and settling-time at $t_s = 3.34$ s.

When the outputs of the supervisory unit with $k = 0.1$ intervene in each output of the two PID controllers, the notable response specifies rise-time at $t_r = 0.599$ s, the shortest settling-time at $t_s = 2.23$ s and somewhat suitable overshoot at $P.O. = 14.45\%$. The proposed method generates the total control signal whose curve lies midway between the two control signals acquired from using only the first PID controller and only the second PID one as shown in Fig. 3. The dual weight is normalized into the multipliers (F'_1 and F'_2) for each output of the PID ones as plotted in Fig. 4. In early transient-state both the PID controllers can regulate the plant to the same degree owing to $F'_1 = F'_2 = 0.5$. Then, the overshoot ensuing becomes not large. Thereafter, the second PID one (SOR) can govern the plant more than the first PID (ZN) does because F'_2 becomes greater than F'_1 . This makes the transient period of the closed-loop response lessen. The numeric transient performances of all the unit-step responses are listed in Table II.

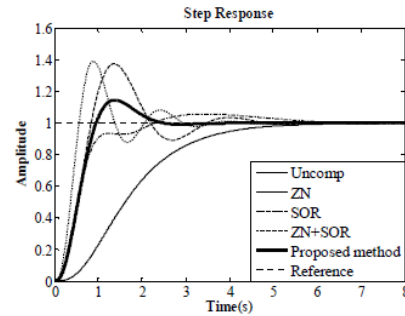


Fig. 2 The dynamic responses against unit-step in time-domain

VI. CONCLUSIONS

In this paper the methodology comprising two parallel PID controllers and their output-weighting technique is adopted to compensate the benchmark plant. The first PID controller is tuned by the tight control criterion while all the gains of the other one is adjusted by smooth control criterion. The supervisory unit is developed to on-line evaluate the dual weight for the sake of weighting their outputs in such a way that the error of the closed-loop

system tends to diminish. The proposed method produces the preferable performance of closed-loop response compared with the cases of each single PID controller alone.

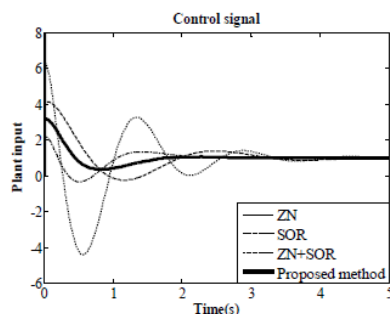


Fig. 3 The control signals fed to the benchmark plant

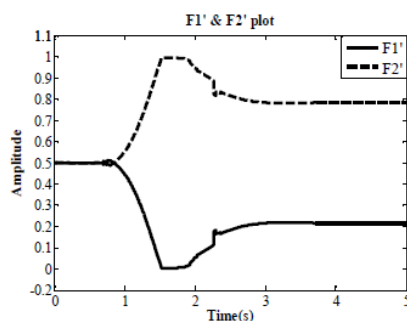


Fig. 4 The multipliers for each output of the PID controllers

ACKNOWLEDGMENT

This research is supported from Suranaree University of Technology (SUT) and by the office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand.

TABLE II
SUMMARY ON THE TRANSIENT PERFORMANCE OF ALL THE RESPONSES

Controller design methods	Transient performances		
	$t_r(s)$	$t_s(s)$	P.O. (%)
Uncomp	2.7	5.02	0
ZN	0.527	4.42	37.3
SOR	0.767	5.33	5.45
ZN+SOR	0.347	3.34	39.0
Proposed method	0.599	2.23	14.45

REFERENCES

- [1] K.H. Ang, G. Chong and Y. Li, "PID Control System Analysis, Design and Technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, pp. 559-576, Jul. 2005.
- [2] J.H. Kim, K.C. Kim, and K.P. Edwin, "Fuzzy Precompensated PID Controllers," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 2, pp. 406-411, Dec. 1994.
- [3] A. Otsubo, K. Hayashi, S. Murakami and M. Meada, "Fuzzy Hybrid Control Using Simplified Indirect Inference Method," *Fuzzy Sets and Systems*, 99, pp. 265-272, May. 1998.
- [4] W. Li, "Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 6, pp. 449-463, Nov. 1998.
- [5] M.J. Er, and Y.L. Sun, "Hybrid Fuzzy Proportional-Integral Plus Conventional Derivative Control of Linear and Nonlinear Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, pp. 1109-1117, Dec. 2001.
- [6] G. Li, and K.M. Tsang, "Concurrent Relay-PID Control for Motor Position Servo Systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, pp. 234-242, Jun. 2007.
- [7] K.A. Gopala Rao, B. Amarendra Reddy, and P. Durga Bhavani, "Fuzzy PI and Integrating Type Fuzzy PID Controllers of Linear, Nonlinear and Time-Delay Systems," *International Journal of Computer Applications*, vol. 1, pp. 41-47, 2010.
- [8] J.G. Ziegler, and N.B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Transactions of the ASME*, 64, pp. 759-768, 1942.
- [9] D.E. Seborg, T.F. Edgar, and D.A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, 2nd, ed., John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2004.
- [10] V. Zakian, *Control Systems Design: A New framework*, Springer, London, 2005.
- [11] K.J. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd, ed., Instrument Society of America, 1995.
- [12] K.J. Astrom and T. Hagglund, *Benchmark Systems for PID Control*, IFAC Digital Control: Past, Present and Future of PID Control, Terrassa, Spain, pp. 165-166, 2000.

ประวัติผู้เขียน

นายวุฒิชัยธรรม คัดชูชาวัตร เกิดเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2531 อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนบัวหลวงวิทยาคม จังหวัดบุรีรัมย์ และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 1 จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2553 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง

ปี พ.ศ. 2554 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยได้เป็นผู้สอน ปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 2 รายวิชา ได้แก่ 1. ปฏิบัติการการวงจรและอุปกรณ์ไฟฟ้า 2. ปฏิบัติการระบบควบคุม

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในขณะศึกษา: ได้นำเสนอบทความในการประชุม วิชาการระดับนานาชาติในงาน ECTI-CON 2013 ในหัวข้อ The Two Parallel PID Controllers with Their Output-Weighting Adaptation