



รายงานการวิจัย

วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอในระนาบเอสและการอนุวัต  
(s-Plane PIDA Controller Design Techniques and Implementation)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ นาวอากาศโท ดร. สราวุฒิ สุจิตจร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2552

ก

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการสนับสนุนงบประมาณการวิจัย และ  
ขอบคุณคุณสุนิศา สอนเมือง เป็นอย่างยิ่งในความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ  
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวก ในการใช้  
ห้องปฏิบัติการ

ผู้วิจัย

ตุลาคม 2552



### บทคัดย่อ

ตัวควบคุมพีไอดีใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ในทางทฤษฎีและปฏิบัติพบว่าตัวควบคุมพีไอดีมีข้อจำกัดด้านสมรรถนะ ไม่สามารถใช้กับพลานต์อันดับสูง ๆ ได้ จึงได้มีผู้คิดค้นตัวควบคุมพีไอดีเอชขึ้น วิธีการออกแบบแต่เริ่มแรกอิงหลักการโพลเด่น 1 คู่ พบว่าเหมาะกับระบบอันดับ 3 ระบบที่มีอันดับสูงและมีความซับซ้อนมาก การออกแบบด้วยแนวทางเดิม อาจส่งผลให้ระบบวงปิดขาดเสถียรได้ โครงการวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอชในระนาบเอสอย่างเหมาะสมที่สุด อาศัยหลักการจัดวางตำแหน่งโพลอย่างเหมาะสมที่สุด สามารถนำไปใช้กับพลานต์อันดับสูงๆ และมีความซับซ้อนได้ งานวิจัยได้นำเสนอการอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีเอชแบบดิจิตอลด้วยภาษาซี แบบแอนะล็อกด้วยวงจรรอปแอมป์ อีกทั้งผลทดสอบด้วยสัญญาณทดสอบแบบขั้นบันได ตลอดจนพัฒนาโปรแกรม CAD เพื่อช่วยออกแบบตัวควบคุมใช้ภาษา MATLAB และ GUI

### Abstract

It has been found theoretically and practically that a PID-controller widely applied has a performance limitation of being unable to handle a high-order plant. Some researchers have thus proposed a PIDA-controller more suitable to handle a third-order plant. The originally proposed design method is not effective for a high-order system with complex dynamic. Moreover, it occasionally results in an unstable closed-loop of such systems. This research project has developed an optimal s-domain design for a PIDA-controller based on an optimal pole-placement. The method as demonstrated by this report effectively handle such high-order plants with complex dynamics. The implementation of a digital PIDA-controller using C is reported. An analog implementation using op-amps is also revealed with some test results obtained from using step-transient test. In addition, a CAD program has been developed successfully using MATLAB and GUI.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อาศัยหลักการโพลเด่น	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่	5
2.3 ตัวอย่างการออกแบบ	6
2.4 สรุป	12
บทที่ 3 การศึกษาผลออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอตามวิธีการเดิมสำหรับพลาเน็ตลวคุมยาก	13
3.1 กล่าวนำ	13
3.2 ผลการจำลองสถานการณ์	13
3.3 วิเคราะห์ผล	28
บทที่ 4 วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอในระนาบเอสและผลการจำลองสถานการณ์	29
4.1 กล่าวนำ	29
4.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอในระนาบเอส	29
4.3 ผลการจำลองสถานการณ์	39
4.4 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก	48
4.5 ความไวของระบบวงปิด	50
4.6 วิเคราะห์ผล	53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การอนุรักษ์ตัวควบคุมพีไอดีเอ	54
5.1 กล่าวนำ	54
5.2 การอนุรักษ์ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบคิจิคอล	54
5.2.1 คณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดีเอ	54
5.2.2 การอนุรักษ์ตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	56
5.3 การอนุรักษ์ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อก	59
5.4 วิเคราะห์ผล	64
5.5 สรุป	66
บทที่ 6 การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ อย่างเหมาะสมที่สุด	67
6.1 กล่าวนำ	67
6.2 รายละเอียดทางกราฟฟิก	67
6.3 การใช้งาน	70
6.4 สรุป	73
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	74
7.1 สรุป	74
7.2 ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารอ้างอิง	76
ภาคผนวก ก โปรแกรมการอนุรักษ์ตัวควบคุมพีไอดีเอ (ภาษาซี)	77
ภาคผนวก ข โปรแกรมการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุม พีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด	82
ประวัติผู้วิจัย	128

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ	4
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ทางตำแหน่ง โพลเด่นบนระนาบเอส	5
รูปที่ 2.3 การตอบสนองของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม (โพลเด่น $q, \hat{q} = -2 \pm j2.1$ )	10
รูปที่ 2.4 การตอบสนองของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม (โพลเด่น $q, \hat{q} = -10 \pm j10.5$ )	11
รูปที่ 2.5 การตอบสนองของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม (โพลเด่น $q, \hat{q} = -20 \pm j2.1$ )	12
รูปที่ 3.1 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 1)	14
รูปที่ 3.1 (ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 1)	14
รูปที่ 3.1 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 1)	14
รูปที่ 3.1 (ง) แผนภาพโขดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต 1)	14
รูปที่ 3.2 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 1)	15
รูปที่ 3.3 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 2)	16
รูปที่ 3.3 (ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 2)	16
รูปที่ 3.3 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 2)	16
รูปที่ 3.3 (ง) แผนภาพโขดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต 2)	16
รูปที่ 3.4 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 2)	17
รูปที่ 3.5 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 3)	18
รูปที่ 3.5 (ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 3)	18
รูปที่ 3.5 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 3)	18
รูปที่ 3.5 (ง) แผนภาพโขดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต 3)	18
รูปที่ 3.6 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 3)	19
รูปที่ 3.7 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 4)	20
รูปที่ 3.7 (ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต 4)	20

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบ ตัวควบคุม (พลาเน็ต4)	20
รูปที่ 3.7 (ง) แผนภาพ โปลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต4)	20
รูปที่ 3.8 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต4)	21
รูปที่ 3.9 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต5)	22
รูปที่ 3.9 (ข) การการตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบ ตัวควบคุม (พลาเน็ต5)	22
รูปที่ 3.9 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบ ตัวควบคุม (พลาเน็ต5)	22
รูปที่ 3.9 (ง) แผนภาพ โปลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต5)	22
รูปที่ 3.10 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต5)	23
รูปที่ 3.11 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม(พลาเน็ต6)	24
รูปที่ 3.11 (ข) การการตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบ ตัวควบคุม (พลาเน็ต6)	24
รูปที่ 3.11 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบ ตัวควบคุม (พลาเน็ต6)	24
รูปที่ 3.11 (ง) แผนภาพ โปลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต6)	24
รูปที่ 3.12 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต6)	25
รูปที่ 3.13 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม(พลาเน็ต7)	26
รูปที่ 3.13 (ข) การการตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบ ตัวควบคุม (พลาเน็ต7)	26
รูปที่ 3.13 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบ ตัวควบคุม (พลาเน็ต7)	26
รูปที่ 3.13 (ง) แผนภาพ โปลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต7)	26
รูปที่ 3.14 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต7)	27
รูปที่ 4.1 แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอโดยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล ดำเนินการ โดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด	38
รูปที่ 4.2 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ (พลาเน็ต 1)	39
รูปที่ 4.2 (ข) แผนภาพ โปลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ (พลาเน็ต1)	39



สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 (จ) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 5)	48
รูปที่ 4.9 (ฉ) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 6)	48
รูปที่ 4.9 (ช) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 7)	49
รูปที่ 4.10 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 1)	50
รูปที่ 4.11 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 2)	50
รูปที่ 4.12 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 3)	51
รูปที่ 4.13 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 4)	51
รูปที่ 4.14 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 5)	51
รูปที่ 4.15 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 6)	52
รูปที่ 4.16 $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 7)	52
รูปที่ 5.1 ระบบป้อนกลับมีตัวควบคุมแบบพีไอดีเอ	53
รูปที่ 5.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Z180	56
รูปที่ 5.3 ชุดอุปกรณ์การทดลอง	57
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมพี ( $K_p = 5$ )	58
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบตัวควบคุมไอ ( $K_I = 62$ )	58
รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบตัวควบคุมดี ( $K_D = 70$ )	58
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบตัวควบคุมเอ ( $K_A = 0.5$ )	59
รูปที่ 5.8 ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะลอกโครงสร้างขนาน	59
รูปที่ 5.9 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_p = 0.4$ )	62
รูปที่ 5.9 (ข) ผลการทดสอบ ( $K_p = 1$ )	62
รูปที่ 5.9 (ค) ผลการทดสอบ ( $K_p = 2$ )	62
รูปที่ 5.10 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_I = 74$ )	62
รูปที่ 5.10 (ข) ผลการทดสอบ ( $K_I = 165$ )	62
รูปที่ 5.10 (ค) ผลการทดสอบ ( $K_I = 359$ )	62
รูปที่ 5.11 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_D = 0.00069$ )	63
รูปที่ 5.11 (ข) ผลการทดสอบ ( $K_D = 0.00069$ )	63
รูปที่ 5.11 (ค) ผลการทดสอบ ( $K_D = 0.00069$ )	63
รูปที่ 5.12 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_A = 3.1 \times 10^{-7}$ )	63
รูปที่ 5.12 (ข) ผลการทดสอบ ( $K_A = 7.56 \times 10^{-7}$ )	63



สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.12 (ค) ผลการทดสอบ ( $K_a = 21.13 \times 10^{-7}$ )	63
รูปที่ 5.13 (ก) แสดงผลการตอบสนองของตัวควบคุมพี	64
รูปที่ 5.13 (ข) แสดงผลการตอบสนองของตัวควบคุมไอ	64
รูปที่ 5.13 (ค) แสดงผลการตอบสนองของตัวควบคุมดี	64
รูปที่ 5.13 (ง) แสดงผลการตอบสนองของตัวควบคุมเอ	64
รูปที่ 5.13 (จ) แสดงผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีเอ	64
รูปที่ 6.1 โครงสร้างทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด	67
รูปที่ 6.2 กล้องไคอะลึอกผิดพลาด กรณีจำนวนซีโรมากกว่าจำนวนโพล	68
รูปที่ 6.3 กล้องไคอะลึอกผิดพลาด กรณีระบบมีอันดับมากกว่า 10	69
รูปที่ 6.4 กล้องไคอะลึอกผิดพลาด กรณีจำนวนของค่าเริ่มต้น $m \neq n + 3$	69
รูปที่ 6.5 กล้องไคอะลึอกผิดพลาด กรณีกำหนดจำนวนรอบมากกว่าหรือเท่ากับ 100,000 รอบ	69
รูปที่ 6.6 ขั้นตอนการเรียกกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุม	70
รูปที่ 6.7 แผนภาพไคอะลึอกกับผู้ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม	70
รูปที่ 6.8 แสดงผลเมื่อรัน โปรแกรมแล้ว	71
รูปที่ 6.9 แสดงผลเมื่อกดปุ่มวงจรวจรตัวควบคุม	71
รูปที่ 6.10 แสดงผลเมื่อกดปุ่มโปรแกรม C	72
รูปที่ 6.11 แสดงผล โปรแกรมภาษาซีของตัวควบคุม	72

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การควบคุมกระบวนการและเครื่องจักรทางอุตสาหกรรม มีความต้องการใช้ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) กันอย่างกว้างขวาง[1] จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวให้วิศวกรได้ใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายและมีอยู่เป็นจำนวนมาก ในทางทฤษฎีและปฏิบัติได้พบว่าตัวควบคุมพีไอดีมีข้อจำกัดด้านสมรรถนะ เช่น ใช้กับพลาตันต์อันดับสูง ๆ ได้ไม่ค่อยดี เป็นต้น จึงได้มีผู้คิดค้นตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA controller) ขึ้น[2] มีรูปแบบเป็น  $G_C(s)$  ดังนี้

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{(s+f)} + \frac{K_A s^2}{(s+d)(s+e)} \quad (1)$$

โดยที่ PIDA เป็นตัวย่อของ proportional – integral – derivative – acceleration ตัวควบคุมจึงมีพารามิเตอร์  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  และ  $K_A$  และมีพารามิเตอร์ของตัวกรองคือ  $d$  และ  $e$  การออกแบบตัวควบคุมจะต้องให้ค่าตอบเป็นค่าพารามิเตอร์ทั้ง 7 ที่เหมาะสม ตัวควบคุมพีไอดีเอดังกล่าวนี้สามารถใช้กับพลาตันต์อันดับสูงกว่าสองได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การนำเสนอของ Dorf ใน[2] จำกัดการพิจารณาเพียงพลาตันต์อันดับสาม นอกจากนั้นได้สมมุติให้พารามิเตอร์บางค่าของตัวกรองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงยังคงเป็นประเด็นที่เปิดอยู่ว่า สมรรถนะของตัวควบคุมชนิดนี้ดีเพียงใด หากพลาตันต์มีอันดับสูงเกินอันดับสามตลอดจนเป็นพลาตันต์ที่ควบคุมได้ยาก[4,5] และการออกแบบตัวกรองที่เหมาะสมควรเป็นอย่างไร

การพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมจะมีประโยชน์อย่างมากต่อวิศวกรภาคสนาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเป็นวิธีการที่ใช้้งานง่าย เข้าใจง่าย และคำนวณง่าย แนวทางการออกแบบที่เป็นไปได้มีทั้งการดำเนินงานในโดเมนความถี่ การใช้เทคนิคพีชคณิตเชิงเส้น และการดำเนินงานในระนาบเอส เป็นต้น โครงการวิจัยนี้จะดำเนินงานด้วยเทคนิควิธีของระนาบเอส และผสมผสานด้วยการคำนวณทางพีชคณิต เพราะเป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายต่อวิศวกรภาคสนาม อีกทั้งเป็นการวิจัยต่อยอดจากงานที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาข้อจำกัดในงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว ในเรื่องการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอในระนาบเอส
- เพื่อปรับปรุงพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอให้ได้ผลดีขึ้นสำหรับใช้งาน
- เพื่อพัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบตัวควบคุมด้วย MATLAB

- เพื่อพัฒนาตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัลด้วยภาษา C สำหรับภาคอุตสาหกรรมใช้ประโยชน์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ตัวควบคุมพีไอดีเอ มีรูปแบบ  $G_C(s)$  ตามสมการ (1)  
 - พลานต์  $G_P(s)$  ที่จะพิจารณาศึกษาข้อจำกัดของวิธีการเก่า และสมรรถนะของวิธีการที่ปรับปรุงแล้ว มีจำนวน 7 พลานต์ ตามข้อแนะนำของ Prof. K.J. Astrom ดังปรากฏในเอกสารอ้างอิง [4,5] รายการของพลานต์  $G_P(s)$  ที่ควบคุมยากมีดังนี้

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

$$2. \quad G_P(s) = \frac{1}{(s+1)^4}$$

$$3. \quad G_P(s) = \frac{-\alpha s+1}{(s+1)^3}, \alpha = 0.5$$

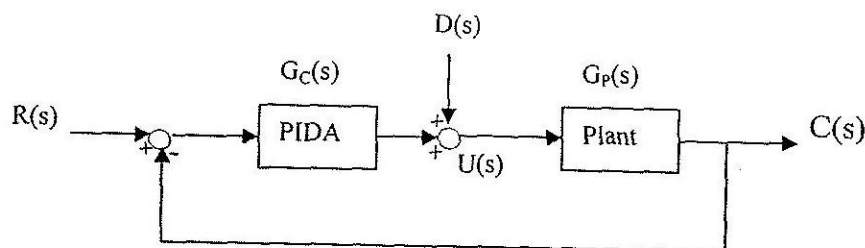
$$4. \quad G_P(s) = \frac{1}{(Ts+1)} e^{-s}, T = 10$$

$$5. \quad G_P(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}, T = 10$$

$$6. \quad G_P(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)}$$

$$7. \quad G_P(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2+2\zeta\omega_0 s+\omega_0^2)}, \omega_0 = 1, \zeta = 0.1$$

- ระบบควบคุมป้อนกลับมีโครงสร้างดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ

- วิธีการออกแบบดำเนินงานในระนาบเอสแบบจัดวางตำแหน่งโพล (pole-placement) และใช้การคำนวณพีชคณิตเชิงเส้น เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพารามิเตอร์  $K_p, K_i, K_D$  และ  $K_f$  ของตัวควบคุม

- สมรรถนะการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีเอ พิจารณาที่การตอบสนองต่ออินพุต  $R(s)$  แบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย และความสามารถในการกำจัดกรรบกวน  $D(s)$  ตามโครงสร้างในแผนภาพรูปที่ 1.1

- ศึกษาวิเคราะห์ความไว (sensitivity)  $S_G^T$  เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดีเอในระบบ

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- ศึกษาวิเคราะห์ข้อจำกัดในวิธีการออกแบบดั้งเดิม [1] ด้วยการวิเคราะห์บนระนาบเอสและการจำลองผล
- ปรับปรุงวิธีการออกแบบบนระนาบเอส ซึ่งผสมผสานด้วยการคำนวณทางพีชคณิต
- จำลองผลเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมจากตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการเดิมและวิธีการที่นำเสนอ
- พัฒนาวิธีทดสอบตัวควบคุมด้วยสัญญาณทดสอบมาตรฐาน
- พัฒนาโปรแกรมCAD ช่วยออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยภาษาMATLAB

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้องค์ความรู้ใหม่ด้านออกแบบและข้อจำกัดของตัวควบคุมพีไอดีเอ
- ได้โปรแกรม CAD สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ
- ได้ต้นแบบตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัลเพื่อใช้งาน
- ได้เผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับชาติ และ/หรือนานาชาติ
- องค์ความรู้ด้านการออกแบบและสมรรถนะของตัวควบคุมจะได้นำไปสอนในรายวิชาการระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาค่อยไป

## บทที่ 2

### การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อาศัยหลักการโพลเด่น

#### 2.1 กล่าวนำ

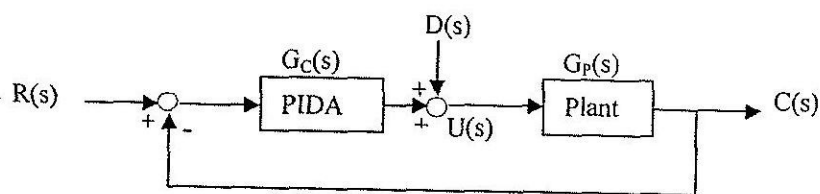
การควบคุมกระบวนการและเครื่องจักรทางอุตสาหกรรม มีความต้องการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเอกันอย่างกว้างขวาง[1] จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวให้วิศวกรได้ใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายและมีอยู่เป็นจำนวนมาก ในทางทฤษฎีและปฏิบัติได้พบว่าตัวควบคุมพีไอดีเอมีข้อจำกัดด้านสมรรถนะ เช่น ใช้กับพลาตันอันดับสูง ๆ ได้ไม่ค่อยดี เป็นต้น จึงได้มีผู้คิดค้นตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA controller) ขึ้น Dorf และ Jung [2] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ เพื่อให้สามารถใช้กับระบบอันดับสามได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบอาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ ซึ่งคำว่า PIDA นี้ย่อมาจาก proportional - integral - derivative - acceleration ตัวควบคุมมีรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_C(s)$  ดังนี้

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{(s+f)} + \frac{K_A s^2}{(s+d)(s+e)} \quad (2.1)$$

สามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบง่าย ๆ ได้ดังนี้

$$G_C(s) = K \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s(s+d)(s+e)} ; f=d \quad (2.2)$$

โดยที่  $a, b, z$  คือซีโร และ  $d, e$  คือโพลของตัวควบคุมพีไอดีเอ ซึ่งในที่นี้เราพิจารณาเฉพาะโพลและซีโรอยู่บนฝั่งซ้ายของระนาบเอส และอาจยอมได้บ้างเป็นบางกรณีที่อาจมีโพลหรือซีโรปรากฏที่จุด  $(0, 0)$  หรือบนแกน  $j\omega$  เมื่อ  $a, b, z \ll d, e$  เราอาจไม่พิจารณาโพล  $d, e$  ได้ โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ

จากโครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับดังรูปที่ 2.1 อาจเขียนแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด  $\frac{C}{R}(s)$  หรือ  $T(s)$  ได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1+G_C(s)G_P(s)} \quad (2.3)$$

จึงมีสมการลักษณะเฉพาะคือ

$$1+G_C(s)G_P(s)=0 \quad (2.4)$$

ในการคำนวณความเร็วของการตอบสนองของระบบ สามารถพิจารณาได้จากสมการ อัตราส่วนการหน่วง ( $\zeta$ ) และความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) ดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราส่วนการหน่วง} \quad \zeta = \frac{\left(\ln \frac{L}{100}\right)^2}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{L}{100}\right)^2}} \quad (2.5)$$

$$\text{ความถี่ธรรมชาติ} \quad \omega_n = \frac{4}{\zeta T_s} \quad (2.6)$$

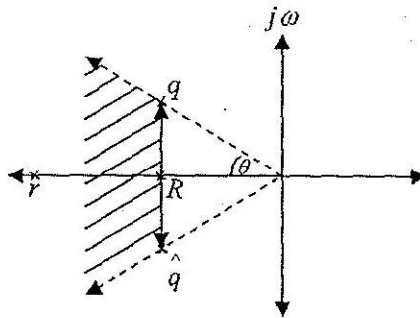
เมื่อ  $T_s$  = ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) (วินาที)

$L$  = เปอร์เซนต์การพุ่งเกิน (percent overshoot)

จากสมการ (2.5) และ (2.6) เราสามารถคำนวณตำแหน่งของโพลเด่น  $q, \hat{q}$  บนระนาบเอสได้ตามสมการ (2.7)

$$q, \hat{q} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.7)$$

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของโพลเด่นบนระนาบเอส ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ทางตำแหน่งโพลเด่นบนระนาบเอส

## 2.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเพื่ออาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่

Step 1 : คำนวณหาตำแหน่งของโพลเด่น  $q, \hat{q}$  บนระนาบเอส จากสมการ (2.7)

Step 2 : เลือกค่าจริงของโพลเด่นที่ตำแหน่ง  $R$  (ดูรูปที่ 2.2) โดยเลือกจากสมการ

$$R = \text{Re} \{ \text{dominant root} \} \leq -\zeta\omega_n$$

Step 3 : เลือกค่าจริงของโพลค้อยที่ตำแหน่ง  $r$  (ดูรูปที่ 2.2) โดยที่  $r \ll -\zeta\omega_n$

Step 4 : เขียนสมการลักษณะเฉพาะ

$$1 + G_c G_p(s) = 0 \quad \text{และ} \quad (s+r)(s+R)(s+q)(s+\hat{q}) = 0$$

Step 5 : นำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการนี้มาเท่ากัน เพื่อนำไปดำเนินการแก้สมการต่อไป

$$1 + G_c G_p(s) = (s+r)(s+R)(s+q)(s+\hat{q})$$

จากความสัมพันธ์ต่าง ๆ ข้างต้น จะเกิดสมการ 4 สมการ และตัวแปร 4 ตัว

Step 6 : แก้สมการที่เกิดขึ้นจากการนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการมาเท่ากัน

Step 7 : พล็อตกราฟการตอบสนองในโดเมนเวลา

- ก. สำหรับเอาต์พุต  $c(t)$  โดยให้อินพุต  $r(t)$  เป็นแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย  
 ข. สำหรับเอาต์พุต  $c(t)$  โดยให้อินพุต  $r(t)=0$  และการรบกวนภายนอก  $d(t)$  เป็นแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย  
 ถ้าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงเกินไป ให้เพิ่มอัตราขยายคาสเทด  $K$

### 2.3 ตัวอย่างการออกแบบ

ทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีให้กับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 1 ใน 7 พลาเน็ต ตามข้อแนะนำ โดย Prof. K.J. Astrom ดังปรากฏในเอกสารอ้างอิง [4,5]

เลือกพลาเน็ต  $G_p(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2)}$ ,  $\omega_0 = 1, \zeta = 0.1$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$

และ  $T_s \leq 2s$

Step 1 : คำนวณหาค่าตำแหน่งของโพลเด่น

จากสมการ (2.5) เมื่อ  $L = P.O. \leq 5\%$  จะได้

$$\zeta \geq \frac{\left(\ln \frac{5}{100}\right)^2}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{5}{100}\right)^2}} \geq 0.69$$

จากสมการ (2.6) เมื่อ  $T_s \leq 2\text{sec}$  จะได้

$$\zeta\omega_n \leq \frac{4}{2} \leq 2$$

ดังนั้น

$$\omega_n \leq \frac{2}{0.69} \leq 2.90$$

จากสมการ (2.7) แทนค่า  $\zeta, \omega_n$  จะได้

$$q, \hat{q} \leq -2 \pm j2.9\sqrt{1 - (0.69)^2}$$

ดังนั้น

$$q, \hat{q} \leq -2 \pm j2.1$$

Step 2,3 : เลือกค่าจำนวนจริงของโพลเด่นที่ตำแหน่ง  $R$  และเลือกค่าจำนวนจริงของโพลด้อยที่ตำแหน่ง  $r$

เลือก  $q, \hat{q} = -2 \pm j2.1$  ดังนั้น

$$R = -2.1$$

และเลือกค่า

$$r = -30$$

Step 4,5 : เขียนสมการลักษณะเฉพาะ และนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการนี้มาเท่ากัน จากสมการ (2.2) เมื่อไม่พิจารณาโพล  $d, e$  เมื่อ  $a, b, z \ll d, e$  จะได้

$$G_c(s) = K \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s}$$

ดังนั้น 
$$G_c(s) = \frac{Ks^3 + Kas^2 + Kbs^2 + Kzs^2 + Kabz + Kazs + Kbz + Kabz}{s}$$

และจากสมการลักษณะเฉพาะ 
$$1 + G_c G_p(s) = 0$$

ดังนั้นได้ความสัมพันธ์ว่า

$$1 + \left( \frac{Ks^3 + Kas^2 + Kbs^2 + Kzs^2 + Kabz + Kazs + Kbz + Kabz}{s} \right) \left( \frac{1}{s^3 + 1.2s^2 + 1.2s + 1} \right) = 0$$

จะได้ 
$$s^4 + 1.2s^3 + 1.2s^2 + s + Ks^3 + Kas^2 + Kbs^2 + Kzs^2 + Kabz + Kazs + Kbz + Kabz = 0$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$s^4 + (1.2 + K)s^3 + (1.2 + K(a + b + z))s^2 + (1 + K(ab + z(a + b)))s + Kabz = 0 \quad (2.8)$$

และจากสมการลักษณะเฉพาะ 
$$(s + r)(s + R)(s + q)(s + \hat{q}) = 0$$

โดยที่  $q, \hat{q} = -2 \pm j2.1$ ,  $R = -2.1$  และ  $r = -30$  ดังนั้นจะได้

$$s^4 + 36.3s^3 + 206.23s^2 + 534.56s + 529.83 = 0 \quad (2.9)$$

สามารถเขียนสมการ(2.10) ได้จากสมการ (2.8) และ (2.9) ว่า

$$\begin{aligned} s^4 + (1.2 + K)s^3 + (1.2 + K(a + b + z))s^2 + (1 + K(ab + z(a + b)))s + Kabz = \\ s^4 + 36.3s^3 + 206.23s^2 + 534.56s + 529.83 \end{aligned} \quad (2.10)$$

**Step 6 :** คำนวณเทียบสัมประสิทธิ์ตามความสัมพันธ์ (2.10) สามารถแยกเป็นสมการพีชคณิตได้ 4 สมการดังต่อไปนี้

$$1.2 + K = 36.3 \quad (2.11)$$

$$1.2 + K(a + b + z) = 206.23 \quad (2.12)$$

$$1 + K(ab + z(a + b)) = 534.56 \quad (2.13)$$

และ 
$$Kabz = 529.83 \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.11) 
$$K = 36.3 - 1.2 = 35.1$$

แทนค่า  $K = 35.1$  ลงในสมการที่ (2.12) จะได้ 
$$a + b = \left( \frac{206.23 - 1.2}{35.1} \right) - z$$

$$a + b = 5.84 - z \quad (2.15)$$

แทนค่า  $K = 35.1$  ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ 
$$ab = \frac{529.83}{35.1z}$$

$$ab = \frac{15.10}{z} \quad (2.16)$$

แทนค่า  $K, a + b$  และ  $ab$  ลงในสมการที่ (2.13) จะได้ 
$$\frac{15.10}{z} + z(5.84 - z) = \frac{534.56 - 1}{35.1}$$

$$-z^3 + 5.84z^2 - 15.2z + 15.10 = 0$$

ดังนั้น 
$$z = 2.02, 1.91 \pm j1.96$$



เลือก  $z = 2.02$

หาค่า  $a$

แทนค่า  $z = 2.02$  ลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$$a + b = 5.84 - 2.02$$

$$b = 3.82 - a$$

แทนค่า  $z = 2.02$  และ  $b$  ลงในสมการที่ (2.16) จะได้

$$a(3.82 - a) = \frac{15.10}{2.02}$$

$$-a^2 + 3.82a - 7.49 = 0$$

ดังนั้น

$$a = 1.91 \pm j1.96$$

หาค่า  $b$

แทนค่า  $z = 2.02$  ลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$$a + b = 5.84 - 2.02$$

$$a = 3.82 - b$$

แทนค่า  $z = 2.02$  และ  $a$  ลงในสมการที่ (2.16) จะได้

$$b(3.82 - b) = \frac{15.10}{2.02}$$

$$-b^2 + 3.82b - 7.49 = 0$$

ดังนั้น

$$b = 1.91 \pm j1.96$$

ดังนั้นจะได้ค่า  $z = 2.02$  และ  $a, b = 1.91 \pm j1.96$

จากสมการ  $G_c(s) = K \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s}$  แทนค่า  $z = 2.02$  และ  $a, b = 1.91 \pm j1.96$  จะได้

$$G_c(s) = K \frac{(s+1.91+j1.96)(s+1.91-j1.96)(s+2.02)}{s}$$

เมื่อ  $K = 35.1$  จะได้

$$G_c(s) = \frac{35.1(s^3 + 5.84s^2 + 15.2s + 15.13)}{s}$$

$$G_c(s) = \frac{34.9s^3 + 198.6s^2 + 521s + 529.8}{s}$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

$$G_c G_p H(s) = \frac{34.9(s^3 + 5.84s^2 + 15.2s + 15.13)}{s^4 + 1.2s^3 + 1.2s^2 + s}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$-2.02, -1.91 \pm j1.96$$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$0, -1, -0.1 \pm j1$$

และจากสมการ  $T(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)}$  (ระบบป้อนกลับมีเกนเท่ากับ 1 ในวิถีป้อนกลับ)

$$T(s) = \frac{34.9s^3 + 198.6s^2 + 521s + 529.8}{s^4 + 36.1s^3 + 199.8s^2 + 522s + 529.8}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ  $-2.02, -1.83 \pm j2.04$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ  $-2.1, -30, -2.0 \pm j2.1$

คำนวณค่า  $K_p, K_I, K_D, K_A, d, e$

จากสมการ(2.1)  $G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{(s+f)} + \frac{K_A s^2}{(s+d)(s+e)}$

$$= \frac{[K_p s(s+d)(s+e)] + [K_I (s+d)(s+e)] + [K_D s^2 (s+e)] [K_A s^3]}{s(s+d)(s+e)}; f=d$$

$$G_c(s) = \frac{(K_p + K_D + K_A)s^3 + (K_I + K_p e + K_p d + K_D e)s^2 + (K_I e + K_I d + K_p d e)s + K_I d e}{s(s+d)(s+e)} \quad (2.17)$$

จากสมการอย่างง่าย  $G_c(s) = K \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s(s+d)(s+e)}$

$$= \frac{Ks^3 + K(a+b+z)s^2 + K(ab+az+bz)s + Kabz}{s(s+d)(s+e)}$$

จากค่า  $K = 35.1, z = 2.02$  และ  $a, b = 1.91 \pm j1.96$

ดังนั้น  $G_c(s) = \frac{35.1s^3 + 204.98s^2 + 533.73s + 531.03}{s(s+d)(s+e)} \quad (2.18)$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ (2.17) และ (2.18) จะได้ความสัมพันธ์ทางพีชคณิตดังนี้

$$35.1 = K_p + K_D + K_A$$

$$204.98 = K_I + K_p(d+e) + K_p e$$

$$533.73 = K_I(d+e) + K_p d e$$

$$531.03 = K_I d e$$

จากเงื่อนไข  $d, e \gg a, b, z$  และ  $d, e$  จะต้องเป็นค่าจริง จึงกำหนดให้  $d, e = 10z = 20.2$  จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$35.1 = K_p + K_D + K_A \quad (2.19)$$

$$204.98 = K_I + 40.4K_p + 20.2K_D \quad (2.20)$$

$$533.73 = 40.4K_I + 408.04K_p \quad (2.21)$$

$$531.03 = 408.04K_I \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) จะได้

$$K_I = \frac{531.03}{408.04} = 1.30$$

แทนค่า  $K_I$  ลงในสมการ (2.21) จะได้

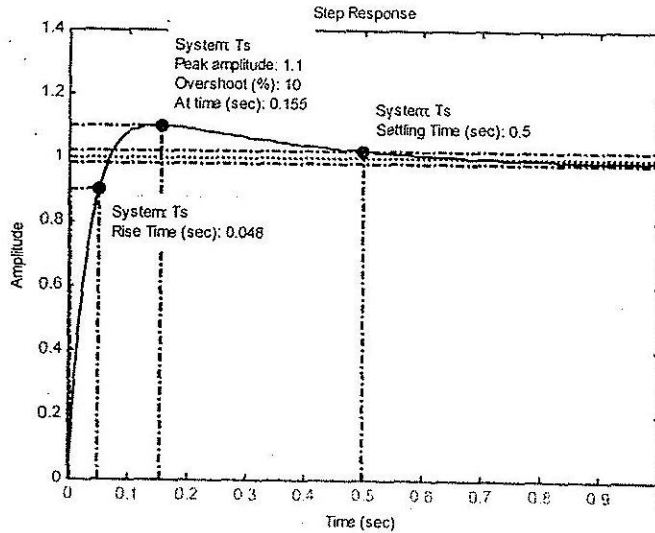
$$K_p = \frac{533.73 - (40.4)(1.3)}{408.04} = 1.18$$

แทนค่า  $K_I$  และ  $K_p$  ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$K_D = \frac{204.98 - 1.3 - (40.4)(1.18)}{20.2} = 7.72$$

แทนค่า  $K_D$  และ  $K_p$  ลงในสมการที่ (2.19) จะได้  $K_A = 35.1 - 1.18 - 7.72 = 26.2$   
 ดังนั้นจะได้ว่า  $K_p = 1.18, K_I = 1.30, K_D = 7.72$  และ  $K_A = 26.2$

Step 7: จำลองผลตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย



รูปที่ 2.3 การตอบสนองของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม (กรณี โพลเด่น  $q, \hat{q} = -2 \pm j2.1$ )

รูปที่ 2.3 แสดงการตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดของระบบวงปิด อาจสังเกตเห็นได้ว่า  $P.O. = 10\%$  มากกว่าข้อกำหนดทางเทคนิคที่ตั้งไว้ จึงได้ทำการทดลองปรับแต่งค่าโพลเด่น และคำนวณพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชุดใหม่ ดังผลการดำเนินงานต่อไป

ทดลองเปลี่ยนตำแหน่งโพลเด่นครั้งที่ 1

เลือกโพลเด่น  $q, \hat{q} = -10 \pm j10.5$  ดังนั้น  $R = -10$

และเลือกค่า  $r = -30$

จากการแก้กันของสมการลักษณะเฉพาะสองสมการ จะได้  $z = 8.31$  และ  $a, b = 6.98 \pm j8.97$

คำนวณค่า  $K_p, K_I, K_D, K_A, d, e$  ได้ผลการคำนวณดังนี้

$$K_p = 1.88, K_I = 9.14, K_D = 11.91, K_A = 45.02, d = 83.1 \text{ และ } e = 83.1$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด  $G_c G_p H(s) = \frac{58.8(s^3 + 22.27s^2 + 245.2s + 1073)}{s^4 + 1.2s^3 + 1.2s^2 + s}$

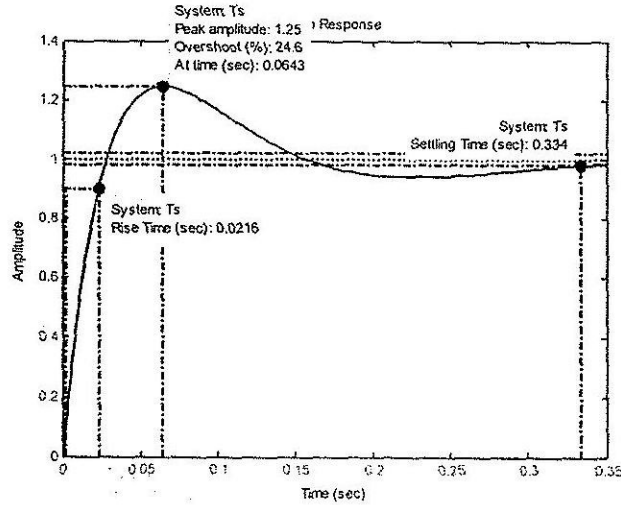
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ  $-8.3, -6.98 \pm j8.97$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ  $0, -1, -0.1 \pm j1$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด  $T(s) = \frac{58.8s^3 + 1309s^2 + 14420s + 63120}{s^4 + 60s^3 + 1311s^2 + 14420s + 63120}$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ  $-8.3, -6.98 \pm j8.97$   
 โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ  $-10, -29, -10.01 \pm j10.49$

มีผลการตอบสนองโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การตอบสนองของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม (กรณี โพลเด่น  $q, \hat{q} = -10 \pm j10.5$ )

สามารถสังเกตได้จากผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 2.4 ว่า ถึงแม้  $T_s$  จะได้ตามข้อกำหนด นั่นคือ  $T_s = 0.334s < 2s$  แต่  $P.O. = 24.6\% > 5\%$  ตามที่กำหนด จึงทดลองปรับค่าโพลเด่นและจำนวนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามกระบวนการเดิมอีกครั้งหนึ่ง ได้ผลดังต่อไปนี้

ทดลองเปลี่ยนตำแหน่งโพลเด่นครั้งที่ 2

เลือกโพลเด่น  $q, \hat{q} = -20 \pm j2.1$       ดังนั้น  $R = -20$   
 และเลือกค่า  $r = -30$

จากการเท่ากันของสมการลักษณะเฉพาะสองสมการ จะได้  $z = 11.14$  และ  $a, b = 11.34 \pm j10.8$   
 จำนวนค่า  $K_p, K_I, K_D, K_A, d, e$  ได้ดังนี้

$$K_p = 3.21, K_I = 91.55, K_D = 20.36, K_A = 65.23, d = 111.4 \text{ และ } e = 111.4$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด  $G_c G_p H(s) = \frac{88.8(s^3 + 33.82s^2 + 497.9s + 2732)}{s^4 + 1.2s^3 + 1.2s^2 + s}$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ  $-11.13, -11.34 \pm j10.8$

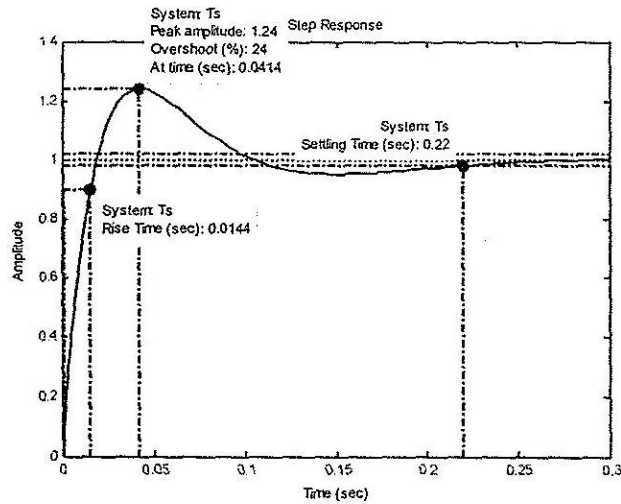
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ  $0, -1, -0.1 \pm j1$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด  $T(s) = \frac{88.8s^3 + 3003s^2 + 44210s + 242600}{s^4 + 90s^3 + 3004s^2 + 44210s + 242600}$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ  $-11.13, -11.34 \pm j10.8$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ  $-20, -30.09, -19.95 \pm j2.23$

มีผลการตอบสนองในโดเมนเวลาดังที่แสดงคในรูปที่ 2.5 ซึ่งยังคงพบว่าการตอบสนองมี P.O. เกินกว่าความต้องการที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.5 การตอบสนองของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม  
(กรณี โพลเด่น  $q, \hat{q} = -20 \pm j2.1$ )

## 2.4 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้ให้การทบทวนขั้นตอนดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ตามแนวทางเดิมที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว ซึ่งแนวทางนี้อาศัยหลักการ โพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ในระบบวงปิด วิธีการเดิมนี้อาจใช้ได้ผลดีกับพลาเน็ตอันดับ 3 ที่มีพลวัตไม่ซับซ้อนดังการนำเสนอใน [2]

การสาธิตวิธีการออกแบบตามแนวทางเดิมนำเสนอในบทที่ 2 นี้ได้ใช้พลาเน็ตที่ควบคุมยากอันดับ 3 ตามที่เสนอโดย Astrom [4,5] พบว่าผลการออกแบบให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ไม่อาจสร้างผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิด เป็นไปตามข้อกำหนดด้าน P.O. ได้ แม้ว่าจะได้มีการทำซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยกำหนดตำแหน่งโพลเด่นแปรเปลี่ยนไป จึงสะท้อนข้อเท็จจริงว่า ถ้าพลาเน็ตมีพลวัตที่ซับซ้อน การออกแบบตามวิธีการเดิมนี้อาจต้องดำเนินการออกแบบซ้ำหลายครั้ง และอาจไม่ประสบผลสำเร็จตามเป้าหมายข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องการ เพื่อให้มีผลการศึกษาที่มากและชัดเจนขึ้น จึงได้ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมตามวิธีการเดิมนี้อีก เพื่อควบคุมพลาเน็ต 7 พลาเน็ตที่ควบคุมยาก [4,5] ดังได้นำเสนอผลดำเนินงานไว้ในบทที่ 3 ต่อไป

### บทที่ 3

#### การศึกษาผลออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอตามวิธีการเดิมสำหรับพลาเน็ตควบคุมยาก

##### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิด ที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ ดำเนินการออกแบบตามวิธีการเดิมโดยอาศัยหลักการ โพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ ซึ่งรายละเอียดของวิธีการออกแบบได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 โดยจะดำเนินการออกแบบกับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 7 พลาเน็ต ซึ่งมีรายการของพลาเน็ต  $G_p(s)$  ที่ควบคุมยากดังต่อไปนี้

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(\alpha s+1)(\alpha^2 s+1)(\alpha^3 s+1)}, \alpha = 0.5 \quad (3.1)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (3.2)$$

$$G_p(s) = \frac{-\alpha s+1}{(s+1)^3}, \alpha = 0.5 \quad (3.3)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)} e^{-s}, T = 10 \quad (3.4)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}, T = 10 \quad (3.5)$$

$$G_p(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)} \quad (3.6)$$

$$G_p(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2+2\zeta\omega_0 s+\omega_0^2)}, \omega_0 = 1, \zeta = 0.1 \quad (3.7)$$

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ผลจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอกับพลาเน็ตทั้ง 7 พลาเน็ต โดยได้พิจารณาสมรรถนะใน โดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย เสถียรภาพ และความไว

##### 3.2 ผลการจำลองสถานการณ์

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิด เพื่อศึกษาสมรรถนะการตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย เสถียรภาพ และความไว ดังมีรายละเอียดปรากฏต่อไปนี้

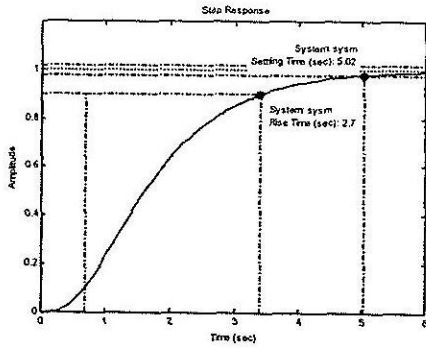
พลาเน็ต 1.  $G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(\alpha s+1)(\alpha^2 s+1)(\alpha^3 s+1)}, \alpha = 0.5$  โดยที่ ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$  และ  $T_s \leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

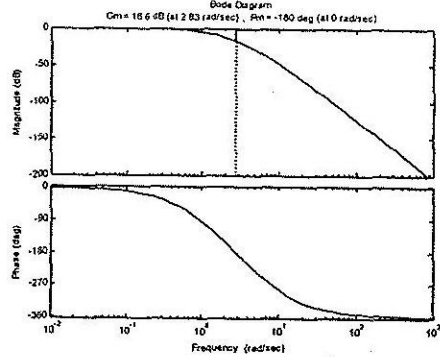
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม :

$$G(s) = \frac{1}{0.0156s^4 + 0.2344s^3 + 1.094s^2 + 1.875s + 1}$$

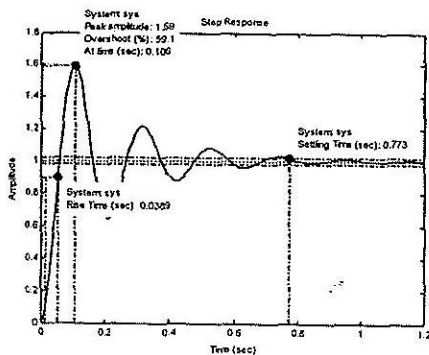
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ :  $-8.04, -3.98, -2, -1$



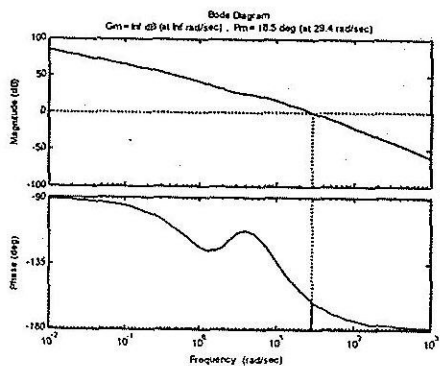
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

- รูปที่ 3.1 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต)
- (ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม (พลาเน็ต)
- (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม
- (ง) แผนภาพ โปลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี) :  $G_c(s) = \frac{14.17s^3 + 74.91s^2 + 185.7s + 175.8}{s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{14.17s^3 + 74.91s^2 + 185.7s + 175.8}{0.0156s^5 + 0.2344s^4 + 1.094s^3 + 1.875s^2 + s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

$$T(s) = \frac{14.17s^3 + 74.91s^2 + 185.7s + 175.8}{0.0156s^5 + 0.2344s^4 + 15.26s^3 + 76.78s^2 + 186.7s + 175.8}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-1.83, -1.73 \pm j1.95$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-1.83, -4.90 \pm j29.84, -1.70 \pm j1.96$

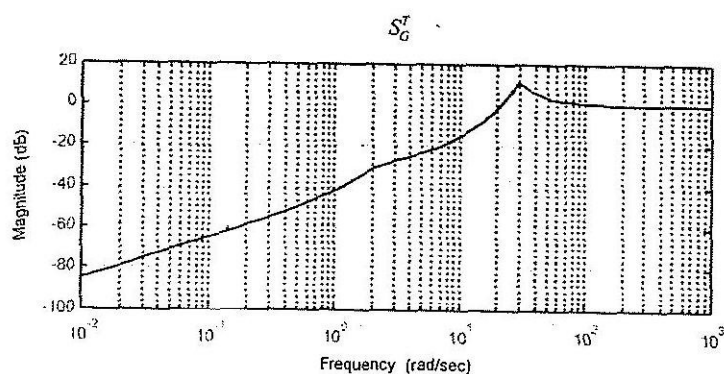
จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 1 ซึ่งมีอันดับ 4 และระบบวงรอบปิดมีอันดับ 5 ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1(ก) - (ง) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมแล้ว ระบบมีผล

การตอบสนองทางโดเมนเวลาที่รวดเร็วมากโดยมี  $T_s = 0.773s < 2s$  ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด แต่  $P.O. = 59.1\% > 5\%$  ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดมาก และเมื่อพิจารณาจากแผนภาพโบลด์รูปที่ 3.1(ง) จะเห็นว่า  $P_m = 18.4 \text{ deg}$  และ  $G_m = \text{Inf}$  ค่า  $P_m$  ดังกล่าวนี้นี้ต่ำกว่าข้อกำหนดโดยทั่วไปมาก ระบบวงรอบปิดยังมีเสถียรสัมพัทธ์ที่ไม่ดีนัก

### ความไวของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม

พิจารณาความไวของระบบจากสมการ  $S_G^r = \frac{1}{1+GH(s)}$  (3.8)

ดังนั้น ความไวของระบบ :  $S_G^r = \frac{0.0156s^5 + 0.2344s^4 + 1.094s^3 + 1.875s^2 + s}{0.0156s^5 + 0.2344s^4 + 15.26s^3 + 76.79s^2 + 186.7s + 175.8}$



รูปที่ 3.2  $|S_G^r|$  แสดงเป็น dB

จากรูปที่ 3.2 อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำกว่า 15 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่สูงกว่า 15 rad/sec ระบบวงปิดมีขนาดของความไวเพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 0 dB ในย่านความถี่สูง ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ว่าระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดการรบกวนจากภายนอกและสามารถตามรอยอินพุตได้ดี ในย่านความถี่สูงค่าคอมพลิเมนต์ของความไว (complimentary sensitivity) จะมีขนาดน้อยๆ (ต่อไปจะใช้สัญลักษณ์  $|M_u|$  แทนขนาดของค่าคอมพลิเมนต์ของความไว) นั่นหมายความว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมจะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลาเน็ต

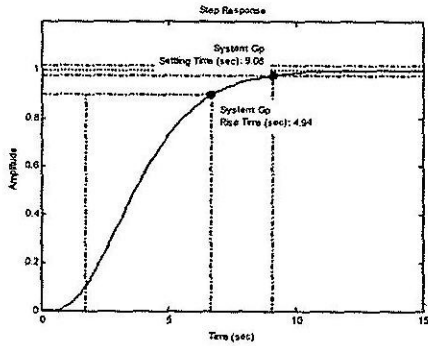


พลาเน็ต 2.  $G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^4}$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$  และ  $T_s \leq 2s$

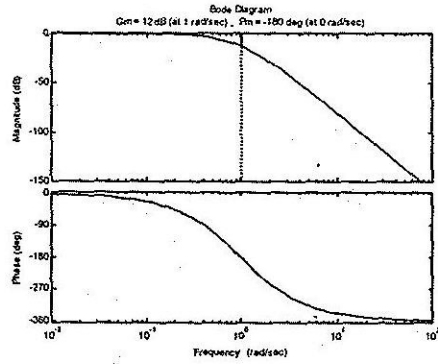
ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม :  $G(s) = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1}$

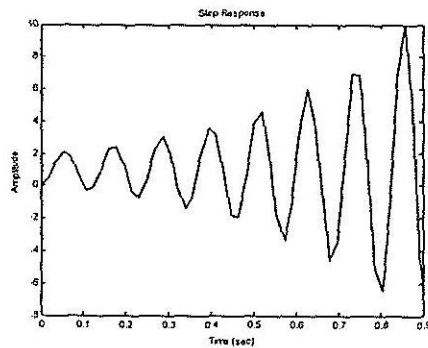
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ :  $-1$  ซ้ำกัน 4 ตัว



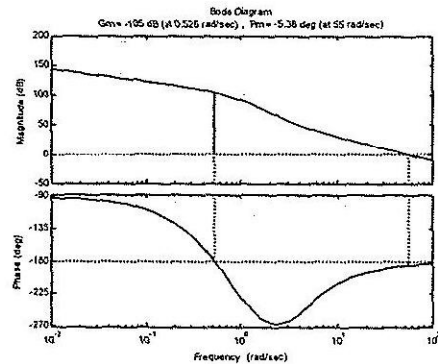
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.3 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

(ง) แผนภาพโพลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี) :

$$G_c(s) = \frac{3022s^3 + 27690s^2 + 106900s + 153600}{s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{3022s^3 + 27690s^2 + 106900s + 153600}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

$$T(s) = \frac{3022s^3 + 27690s^2 + 106900s + 153600}{s^5 + 4s^4 + 3028s^3 + 27700s^2 + 106900s + 153600}$$

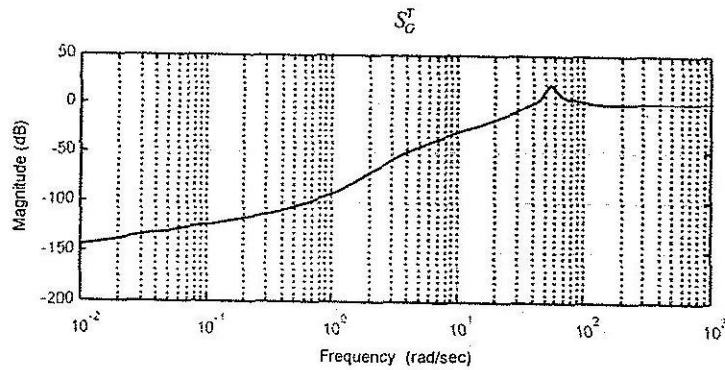
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-3.03, -3.07 \pm j2.72$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-3.03, 2.58 \pm j55.08, -3.06 \pm j2.70$

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 2 ซึ่งมีอันดับ 4 มีโพลซ้ำกัน 4 ตัว โดยที่ระบบวงรอบปิดมีอันดับ 5 ดังแสดงผลไว้ในรูปที่ 3.3 (ก) – (ง) ผลการออกแบบเมื่อมีตัวควบคุมส่งผลให้ระบบขาดเสถียร เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ พบว่า  $Pm$  และ  $Gm$  มีค่าติดลบ

ความไวของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม

ความไวของระบบ : 
$$S_G^r = \frac{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s}{s^5 + 4s^4 + 3028s^3 + 2.77 \times 10^4 s^2 + 1.07 \times 10^5 s + 1.54 \times 10^5}$$



รูปที่ 3.4  $|S_G^r|$  แสดงเป็น dB

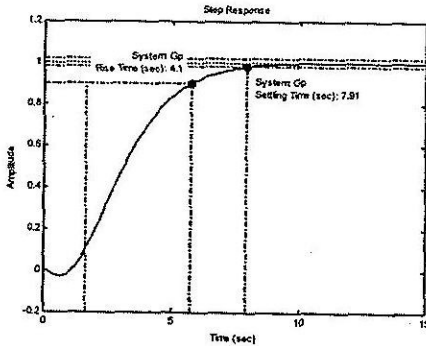
จากรูปที่ 3.4 อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่น้อยกว่าและมากกว่า 25 rad/sec พฤติภาพของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลาเน็ต 1 (ดูรูปที่ 3.2) การอภิปรายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีแรกตามรูปที่ 3.2 จึงไม่ขอกล่าวซ้ำอีก แต่อย่างไรก็ตาม ระบบวงปิดขาดเสถียรจึงไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้จริง

พลาเน็ต 3.  $G_p(s) = \frac{-\alpha s + 1}{(s+1)^3}$ ,  $\alpha = 0.5$  โดยที่ ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$  และ  $T_s \leq 2s$

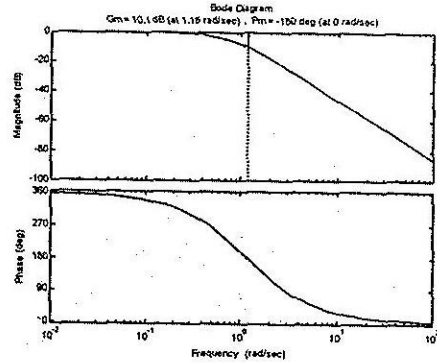
ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม :  $G(s) = \frac{-0.5s + 1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$

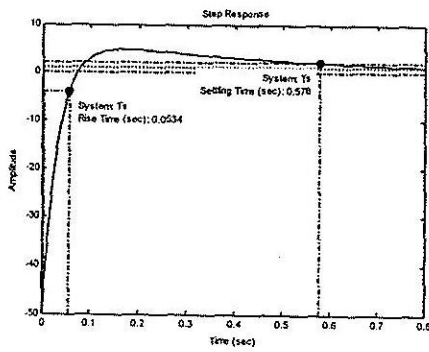
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ : -1 ซ้ำกัน 3 ตัว



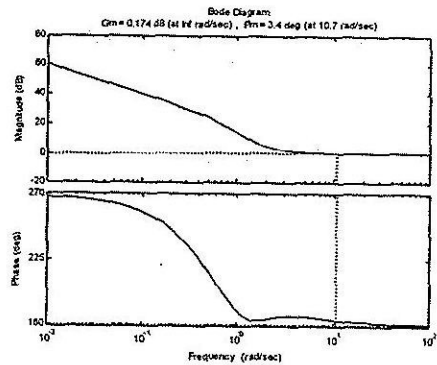
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

- รูปที่ 3.5 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม  
 (ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม  
 (ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม  
 (ง) แผนภาพโพลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี) :  $G_c(s) = \frac{1.96s^3 + 8.49s^2 + 14.81s + 10.48}{s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{-0.98s^4 - 2.28s^3 + 1.08s^2 + 9.58s + 10.48}{s^4 + 3s^3 + 3s^2 + s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $T(s) = \frac{-0.98s^4 - 2.28s^3 + 1.08s^2 + 9.58s + 10.48}{0.02s^4 + 0.72s^3 + 4.08s^2 + 10.57s + 10.48}$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $2, -1.76, -1.28 \pm j1.18$

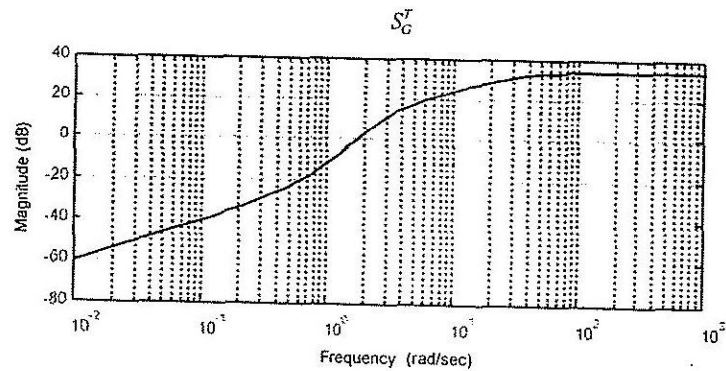
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-2.1, -30, -2.1 \pm j2$

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 3 ซึ่งมีอันดับ 3 มีซีโรอยู่ฝั่งขวาของระนาบเอส และมีโพลซ้ายกัน 3 ตัว ระบบวงรอบปิดจึงมีอันดับ 4 ผลการออกแบบเมื่อมีตัวควบคุมส่งผลให้ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาดังรูปที่ 3.5 (ก) ซึ่งจะเห็นว่าระบบตอบสนองรวดเร็วมากกว่าเดิมหลายเท่าตัว มี  $P.O. < 5\%$  เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ พบว่า  $Pm = 3.4 \text{ deg}$  และ  $Gm = 0.174 \text{ dB}$  ซึ่งมีค่าน้อยมาก ระบบอาจขาดเสถียรได้ง่ายหากมีการรบกวนเกิดกับระบบ

### ความไวของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม

ความไวของระบบ :

$$S_G^T = \frac{s^4 + 3s^3 + 3s^2 + s}{0.02s^4 + 0.72s^3 + 4.08s^2 + 10.57s + 10.48}$$



รูปที่ 3.6  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

จากรูปที่ 3.6 อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่น้อยกว่า 1 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 1 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB)  $|M_w|$  มีรูปลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแรก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบของพลาเน็ต 3 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

พลาเน็ต 4.  $G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)}e^{-s}$ ,  $T=10$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$  และ  $T_s \leq 2s$

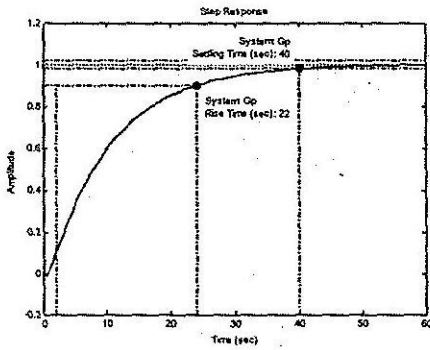
ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม :  $G(s) = \frac{-0.5s+1}{5s^2+10.5s+1}$

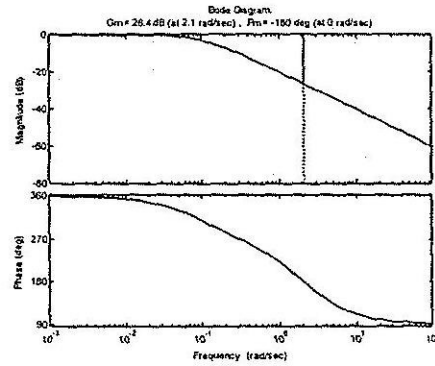
ซึ่งพจน์  $e^{-s}$  ประมาณได้ด้วย :

$$e^{-s} \approx \frac{1-\frac{s}{2}}{1+\frac{s}{2}}$$

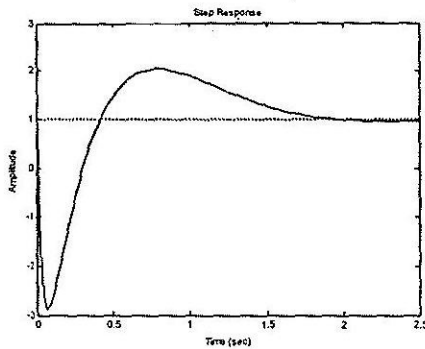
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ :  $-0.1, -2$



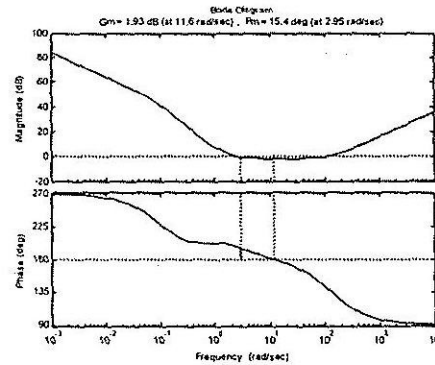
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.7 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี) :  $G_c(s) = \frac{-0.06s^3 + 7.64s^2 + 23.6s + 16.3}{s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{0.03s^4 - 3.88s^3 + 4.16s^2 + 15.45s + 16.3}{5s^3 + 10.5s^2 + s}$$

ซึ่งปรากฏรูป "irrational function" ทั้งนี้เป็นผลจากการประมาณพจน์ประวิงเวลา และการพิจารณาใช้  $G_c$  ในรูปแบบเชิงทฤษฎี

$$\text{ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : } T(s) = \frac{0.03s^4 - 3.88s^3 + 4.16s^2 + 15.45s + 16.3}{0.03s^4 + 1.12s^3 + 6.35s^2 + 16.45s + 16.3}$$

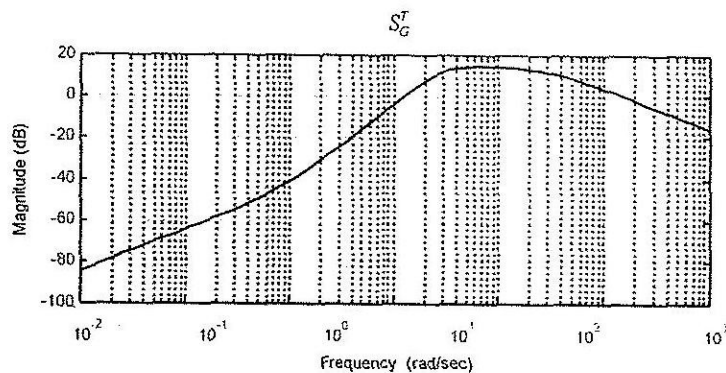
$$\text{ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : } 2, 127.25, -1.98, -1.05$$

$$\text{โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : } -2.1 \pm j2, -2.1, -30$$

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 4 เป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีพจน์ของการประวิงเวลา ( $e^{-s}$ ) ในการออกแบบตัวควบคุมใช้สูตรการประมาณค่าแบบพาดอันดับหนึ่ง ซึ่งมีอันดับเดียวกับอันดับของพลาเน็ต ทำให้เมื่อออกแบบเสร็จ ระบบวงรอบปิดมีอันดับ 4 ส่งผลให้ระบบวงรอบปิดมีผลการตอบสนองทางโคเมนเวลาดังรูปที่ 3.7 (ก) อันเดอร์ชู้ตที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการประมาณพจน์ประวิงเวลา ซึ่งให้ความหมายว่าระบบวงรอบปิดเกิดการประวิงเวลาประมาณ 0.5 วินาทีในการตอบสนอง และจะเห็นว่า  $P.O. = 20\%$  ซึ่งค่อนข้างสูง แม้ว่า  $T_r$  จะสั้นเพียง 2 วินาทีก็ตาม เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ พบว่า  $P_m = 15.4 \text{ deg}$  และ  $G_m = 1.93 \text{ dB}$  ซึ่งมีค่าน้อยมากและเป็นเสถียรภาพแบบมีเงื่อนไข (conditional stability) ระบบอาจขาดเสถียรได้ง่าย

#### ความไวของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม

$$\text{ความไวของระบบ : } S_G^T = \frac{5s^3 + 10.5s^2 + s}{0.03s^4 + 1.12s^3 + 6.35s^2 + 16.44s + 16.29}$$



รูปที่ 3.8  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

$|S_G^T|$  ดังแสดงในรูปที่ 3.8 มีโครงรูปโดยส่วนใหญ่คล้ายกับกรณีที่ผ่านมา แตกต่างตรงที่ในย่านความถี่สูง  $|S_G^T|$  มีแนวโน้มลดลง นั่นหมายความว่า  $|M_o|$  จะสูงขึ้นในย่านความถี่สูง ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อระบบเพราะระบบวงรอบปิดจะขยายสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูง

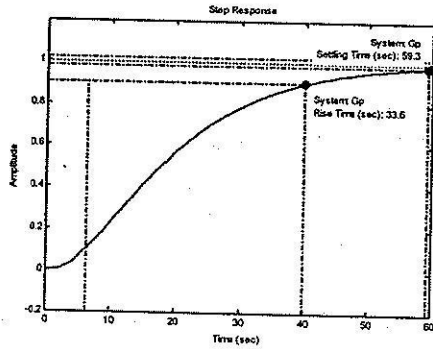
พลาเน็ต 5.  $G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}$ ,  $T=10$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$  และ  $T_s \leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

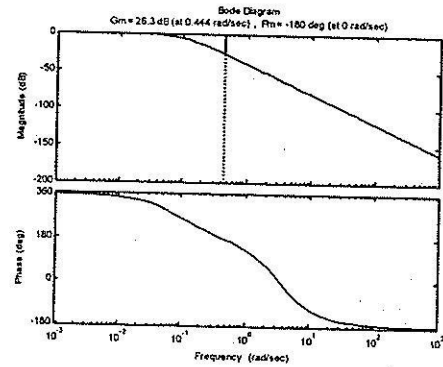
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม :  $G(s) = \frac{0.083s^2 - 0.5s + 1}{8.3s^4 + 51.66s^3 + 110.1s^2 + 20.5s + 1}$

ซึ่งประมาณพจน์ประวิงเวลาด้วย :  $e^{-s} \approx \frac{1 - \frac{s}{2} + \frac{s^2}{12}}{1 + \frac{s}{2} + \frac{s^2}{12}}$  อันดับ 2 (ตามอันดับของพลาเน็ต)

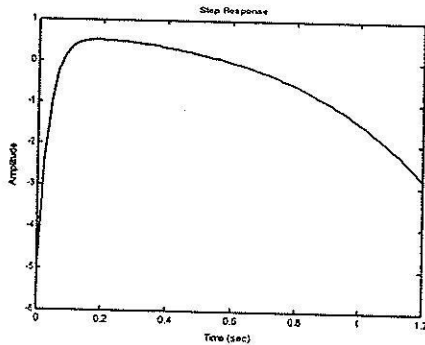
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ :  $-3.01 \pm j1.73$  และ  $-0.1$  ซ้ำกัน 2 ตัว



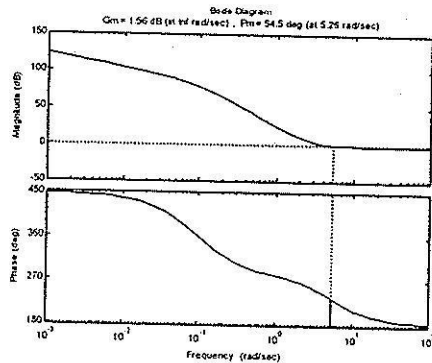
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.9 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี) :  $G_c(s) = \frac{-83.57s^3 - 564.4s^2 - 1603s - 1540}{s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{-6.94s^5 - 5.06s^4 + 65.64s^3 + 109s^2 - 832.4s - 1540}{8.3s^5 + 51.66s^4 + 110.1s^3 + 20.5s^2 + s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

$$T(s) = \frac{-6.94s^5 - 5.06s^4 + 65.64s^3 + 109s^2 - 832.4s - 1540}{1.36s^5 + 46.6s^4 + 175.7s^3 + 129.5s^2 - 831.4s - 1540}$$

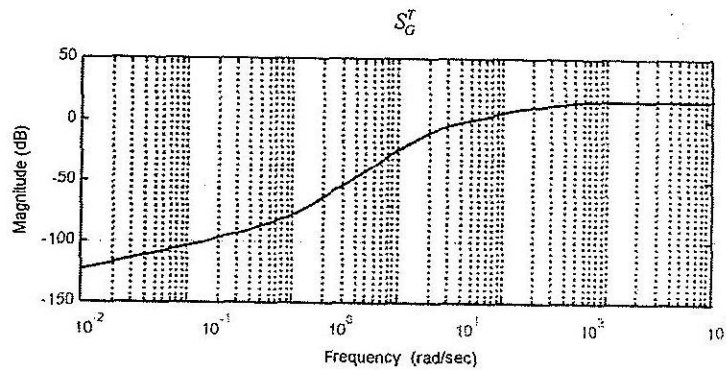
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $3.01 \pm j1.73, -2.48 \pm j2.03, -1.79$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-2.1 \pm j2, -2.1, -30, 2.13$

สำหรับกรณีนี้ เมื่อออกแบบแล้วเสร็จพบว่าระบบวงรอบปิดขาดเสถียร นอกจากนั้น  $|S_G^r|$  ดังที่แสดงในรูปที่ 3.10 ยังมีรูปแบบในทำนองเดียวกับกรณีอื่นๆที่ผ่านมา จึงขอ ไม่อธิบายซ้ำอีก

ความไวของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม

ความไวของระบบ : 
$$S_G^r = \frac{8.3s^5 + 51.66s^4 + 110.1s^3 + 20.5s^2 + s}{1.36s^5 + 46.6s^4 + 175.7s^3 + 129.5s^2 - 831.4s - 1540}$$



รูปที่ 3.10  $|S_G^r|$  แสดงเป็น dB

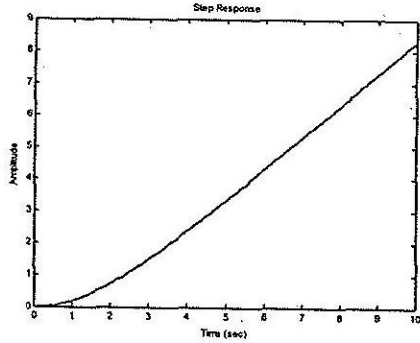


พลาเน็ต 6.  $G_p(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)}$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$  และ  $T_s \leq 2s$

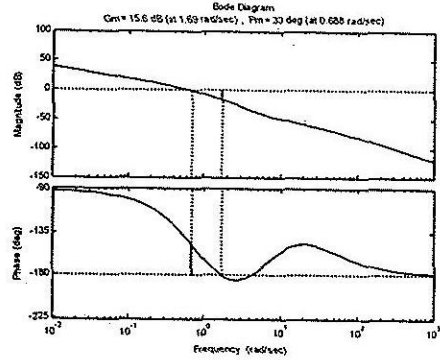
ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม :  $G(s) = \frac{s^2 + 12s + 36}{s^4 + 38s^3 + 73s^2 + 36s}$

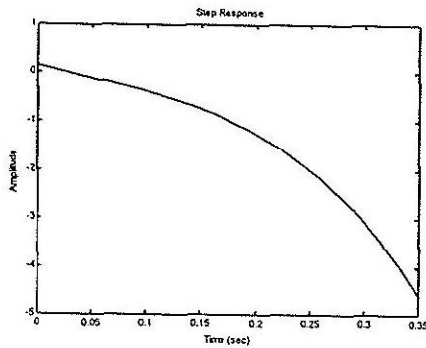
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ : 0, -36 และ -1 ซ้ำกัน 2 ตัว



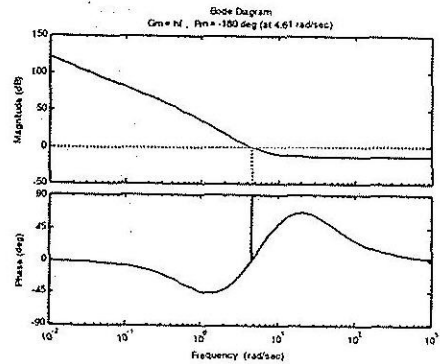
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.11 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

(ง) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี) :  $G_c(s) = \frac{0.19s^3 - 4.97s^2 - 60.83s - 116}{s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{0.19s^5 - 2.70s^4 - 113.7s^3 - 1025s^2 - 3581s - 4174}{s^5 + 38s^4 + 73s^3 + 36s^2}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด :

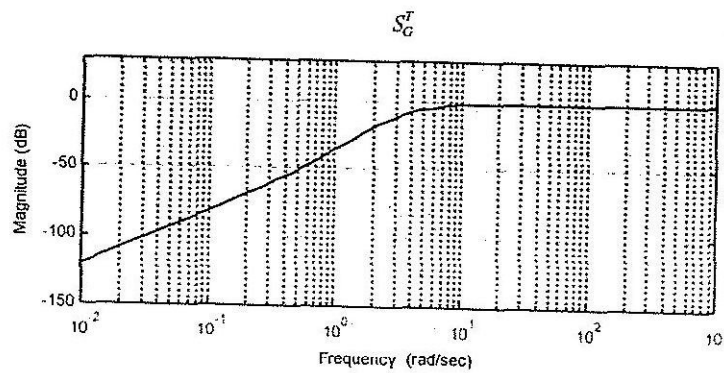
$$T(s) = \frac{0.19s^5 - 2.70s^4 - 113.7s^3 - 1025s^2 - 35.81s - 4174}{1.19s^5 + 35.3s^4 - 40.68s^3 - 989s^2 - 3581s - 4174}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $35.70, -7.03, -6, -6, -2.4365$   
 โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-2.1 \pm j2, -2.1, -30, 6.62$

สำหรับกรณีนี้ เมื่อออกแบบแล้วเสร็จพบว่าระบบวงรอบปิดขาดเสถียร นอกจากนั้น  $|S_G^T|$  ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 ยังมีรูปแบบในทำนองเดียวกับกรณีอื่นๆที่ผ่านมา จึงขอไม่อธิบายซ้ำอีก

ความไวของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม

ความไวของระบบ : 
$$S_G^T = \frac{s^5 + 38s^4 + 73s^3 + 36s^2}{1.19s^5 + 35.3s^4 - 40.71s^3 - 989.2s^2 - 3582s - 4175}$$

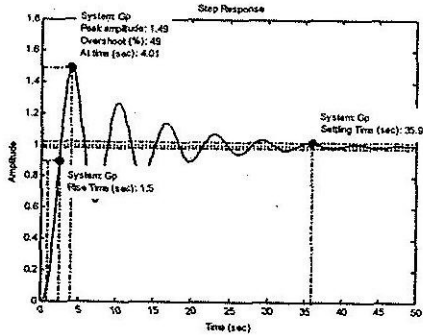


รูปที่ 3.12  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

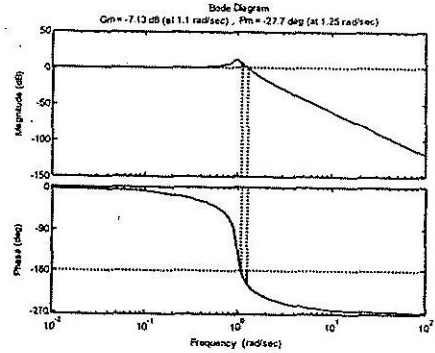
พลานต์ 7.  $G_p(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2)}$ ,  $\omega_0 = 1, \zeta = 0.1$  โดยที่ ต้องการ  $P.O. \leq 5\%$  และ  $T_s \leq 2s$   
ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม :  $G(s) = \frac{1}{s^3 + 1.2s^2 + 1.2s + 1}$

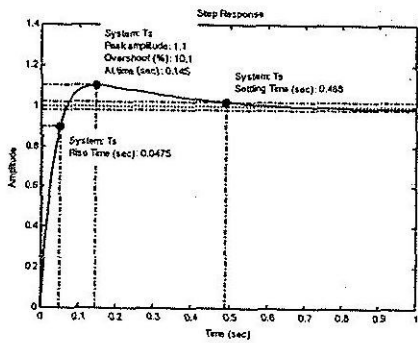
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ :  $-1, -0.1 \pm j1$



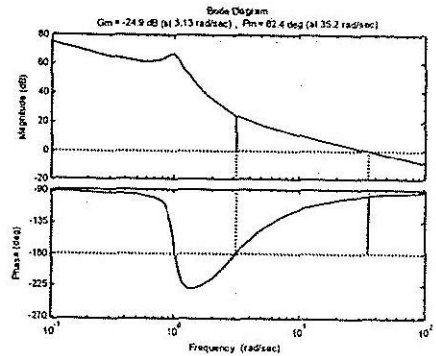
(ก)



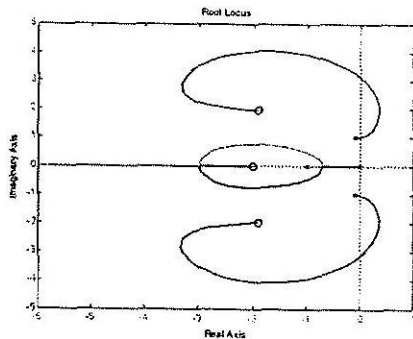
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 3.13 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ข) การตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

(ค) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

(ง) แผนภาพ โบลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

(จ) แผนภาพ โลกัศรากลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

### เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

$$\text{ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี)} : G_c(s) = \frac{35.1s^3 + 205s^2 + 533.6s + 529.8}{s}$$

$$\text{ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม} : GH(s) = \frac{35.1s^3 + 205s^2 + 533.6s + 529.8}{s^4 + 1.2s^3 + 1.2s^2 + s}$$

$$\text{ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด} : T(s) = \frac{35.1s^3 + 205s^2 + 533.6s + 529.8}{s^4 + 36.3s^3 + 206.2s^2 + 534.6s + 529.8}$$

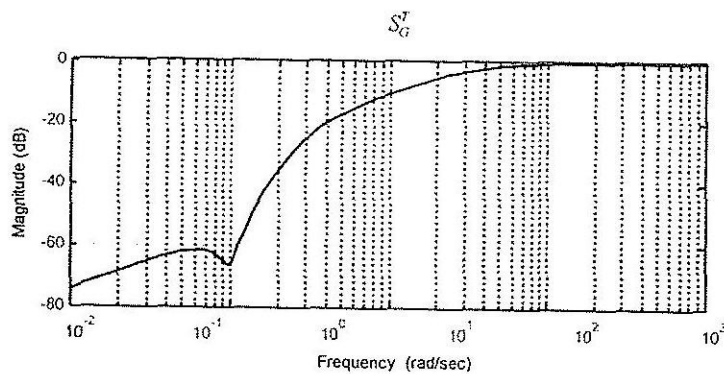
$$\text{ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด} : -1.91 \pm j1.96, -2.02$$

$$\text{โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด} : -2.1 \pm j2, -2.1, -30$$

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 7 ซึ่งมีอันดับ 3 และระบบวงรอบปิดมีอันดับ 4 อาจสังเกตเห็นได้ว่า การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดมี  $T_s = 0.488s < 2s$  ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด แต่  $P.O. = 10.1\% > 5\%$  ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดพอสมควร และเมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางความถี่ของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม  $P_m = 82.4 \text{ deg}$  และ  $G_m = -24.9 \text{ dB}$  ระบบวงปิดมีเสถียรภาพแบบมีเงื่อนไข ซึ่งแผนภาพโพลก็ตรรกแสดงให้เห็นได้อย่างเด่นชัด การใช้งานระบบวงรอบปิดจำเป็นต้องเลือกค่าเกณฑ์ของวงควบคุมอย่างเหมาะสมมิให้ขาดเสถียร

### ความไวของระบบวงรอบปิดเมื่อมีตัวควบคุม

$$\text{ความไวของระบบ} : S_G^T = \frac{s^4 + 1.2s^3 + 1.2s^2 + s}{s^4 + 36.3s^3 + 206.2s^2 + 534.6s + 529.8}$$



รูปที่ 3.14  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

จากรูปที่ 3.14 อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่น้อยกว่า 10 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 10 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) ซึ่งมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับกรณีที่ 1 เป็นอย่างมาก จึงไม่อธิบายซ้ำอีก

### 3.3 วิเคราะห์ผล

บทนี้ได้นำเสนอผลของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อิงบนหลักการ โพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ จากผลการออกแบบพบว่ากรณีของพลาเน็ตที่ควบคุมยากที่มีอันดับสาม ผลการตอบสนองของระบบที่มีการออกแบบตัวควบคุม บางพลาเน็ตมีผลการตอบสนองดีกว่าพลาเน็ตที่ไม่มีการออกแบบตัวควบคุม แต่ในบางกรณีผลการตอบสนองกลับมีคุณภาพด้อยกว่า ส่วนกรณีของพลาเน็ตที่ควบคุมยากที่มีอันดับมากกว่าอันดับสาม ผลของการตอบสนองของระบบที่มีการออกแบบตัวควบคุมจะไม่ค่อยดีนัก บางพลาเน็ตส่งผลให้ระบบป้อนกลับขาดเสถียร และเมื่อพิจารณาความไวของระบบพบว่าพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 7 พลาเน็ตนี้ เมื่อมีการใช้งานตัวควบคุมพีไอดีเอจะมีความสามารถดีในการตามรอยอินพุตและการกำจัดการรบกวนจากภายนอก ตลอดจนสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงได้ดีอีกด้วย

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีการเลือกโพลเด่น 1 คู่ มีข้อดีคือ ในระบบที่มีอันดับไม่สูงและมีความซับซ้อนไม่มาก ถ้าเลือกค่าโพลเด่นที่เหมาะสม จะส่งผลให้ระบบมีผลการตอบสนองที่ดีขึ้น ในทางกลับกันการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้หากนำมาใช้กับระบบที่มีอันดับสูง มักได้ผลไม่ค่อยดีนัก บางระบบที่มีความซับซ้อนมากอาจทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรได้

ดังนั้น โพลมีความสำคัญในการออกแบบ หากเลือกตำแหน่งโพลของระบบวงปิดไม่เหมาะสม จะส่งผลให้การตอบสนองของระบบไม่ดี หากใช้วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล เพื่อทำการหาตำแหน่งโพลที่เหมาะสมต่อระบบที่สุด จะส่งผลให้ผลการตอบสนองของระบบดีขึ้น และระบบป้อนกลับจะยังคงมีเสถียรภาพอยู่เสมอ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่นำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

### วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีเอในระนาบเอสและผลการจำลองสถานการณ์

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะแสดงขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีเอในระนาบเอสด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลดำเนินการโดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุดและผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบตัวควบคุม ซึ่งทำการออกแบบตัวควบคุมกับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 7 พลาเน็ตตามข้อเสนอแนะของ Prof. K.J. Astrom ดังปรากฏในเอกสารอ้างอิง [4,5] อีกทั้งผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการออกแบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีเอ ในการดำเนินงานอาศัยสมการพีชคณิต ซึ่งที่มาของสมการได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 4.2

#### 4.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีเอในระนาบเอส

ในอันดับแรกนี้ เป็นการนำเสนอที่มาของระบบสมการพีชคณิตเพื่อการออกแบบตัวควบคุม

##### พิจารณาอันดับ $n$

$$\text{ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับ } n \quad G_p(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n} \quad (4.1)$$

$$\text{สมการตัวควบคุมพีโอดีเอ} \quad G_c(s) = \frac{k(s+a)(s+b)(s+z)}{s(s+d)(s+e)} \quad (4.2)$$

$$\text{สมการลักษณะเฉพาะของโพล} \quad s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{สมการลักษณะเฉพาะของระบบ} \quad 1 + G_c G_p H(s) = 0 \quad (4.4)$$

ในการพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะของระบบ สามารถคิดแยกเป็น 2 กรณี กล่าวคือ

$$\text{กรณี 1: ระบบ } G_p(s) \text{ มีกำลัง/ของพหุนาม } p(s) \text{ เท่ากับกำลัง } n \text{ ของพหุนาม } q(s) \\ (a_0 \neq 0)$$

$$\text{กรณี 2: ระบบ } G_p(s) \text{ มีกำลัง/ของพหุนาม } p(s) \text{ น้อยกว่ากำลัง } n \text{ ของพหุนาม } q(s) \\ (a_0 = 0)$$

##### ❖ กรณีที่ 1 ( $a_0 \neq 0$ )

$$\text{กรณีที่ 1 } (a_0 \neq 0) \text{ ดังนั้นมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ } G_p(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n}$$

ดังนั้นระบบมีสมการลักษณะเฉพาะดังนี้

$$\begin{aligned}
& s^n + \left[ \frac{p_1 + d + e + (a+b+z)ka_0 + ka_1}{1 + ka_0} \right] s^{n-1} \\
& + \left[ \frac{p_2 + (d+e)p_1 + de + (ab+z(b+a))ka_0 + (a+b+z)ka_1 + ka_2}{1 + ka_0} \right] s^{n-2} \\
& + \left[ \frac{p_3 + (d+e)p_2 + dep_1 + abzka_0 + (ab+z(b+a))ka_1 + (a+b+z)ka_2 + ka_3}{1 + ka_0} \right] s^{n-3} \\
& \vdots \\
& + \left[ \frac{p_n + (d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab+z(b+a))ka_{n-2} + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n}{1 + ka_0} \right] s^3 \\
& + \left[ \frac{(d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-1} + (a+b+z)ka_n}{1 + ka_0} \right] s^2 \\
& + \left[ \frac{dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n}{1 + ka_0} \right] s + \left[ \frac{abzka_n}{1 + ka_0} \right] = 0 \tag{4.5}
\end{aligned}$$

จากสมการลักษณะเฉพาะของโพล  $s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$  (โดยที่  $m = n+3$  และ  $n$  คืออันดับของระบบ) นำสมการลักษณะเฉพาะของระบบและสมการลักษณะเฉพาะของโพล มาเข้ากระบวนการแก้สมการด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ จะได้

$$\frac{p_1 + (d+e) + (a+b+z)ka_0 + ka_1}{1 + ka_0} = \alpha_1 \tag{4.6}$$

$$\frac{p_2 + (d+e)p_1 + de + (ab+z(b+a))ka_0 + (a+b+z)ka_1 + ka_2}{1 + ka_0} = \alpha_2 \tag{4.7}$$

$$\frac{p_3 + (d+e)p_2 + dep_1 + abzka_0 + (ab+z(b+a))ka_1 + (a+b+z)ka_2 + ka_3}{1 + ka_0} = \alpha_3 \tag{4.8}$$

$$\frac{p_n + (d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab+z(b+a))ka_{n-2} + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n}{1 + ka_0} = \alpha_n \tag{4.9}$$

$$\frac{(d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-1} + (a+b+z)ka_n}{1 + ka_0} = \alpha_{n+1} \tag{4.10}$$

$$\frac{dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n}{1 + ka_0} = \alpha_{n+2} \tag{4.11}$$

และ 
$$\frac{abzka_n}{1 + ka_0} = \alpha_{n+3} \tag{4.12}$$

จากการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการข้างต้น สามารถจัดสมการทั้ง 6 สมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_2 & p_1 & 1 & 0 & a_0 & a_1 & a_2 \\ p_3 & p_2 & p_1 & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_n & p_{n-1} & p_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & p_n & p_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{1+ka_0} \\ \frac{d+e}{1+ka_0} \\ \frac{de}{1+ka_0} \\ \frac{abzk}{1+ka_0} \\ \frac{k(ab+z(a+b))}{1+ka_0} \\ \frac{k(a+b+z)}{1+ka_0} \\ \frac{k}{1+ka_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

จัดรูปแบบสมการ (4.13) ให้อยู่ในรูป  $Ax=B$  เพื่อง่ายต่อการคำนวณ โดยกำหนดให้

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+ka_0} \\ \frac{d+e}{1+ka_0} \\ \frac{de}{1+ka_0} \\ \frac{abzk}{1+ka_0} \\ \frac{k(ab+z(a+b))}{1+ka_0} \\ \frac{k(a+b+z)}{1+ka_0} \\ \frac{k}{1+ka_0} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

ดังนั้นจะได้สมการที่อยู่ในรูป  $Ax=B$  ดังนี้

$$\begin{bmatrix} p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_2 & p_1 & 1 & 0 & a_0 & a_1 & a_2 \\ p_3 & p_2 & p_1 & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_n & p_{n-1} & p_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & p_n & p_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$



โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_2 & p_1 & 1 & 0 & a_0 & a_1 & a_2 \\ p_3 & p_2 & p_1 & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_n & p_{n-1} & p_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & p_n & p_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4.15) สามารถทำการหาคำตอบของเมตริกซ์  $x$  ได้ด้วยโปรแกรม MATLAB ขั้นตอนนี้จะมีจำนวน  $n+3$  สมการ 7 ตัวแปร ซึ่งคำตอบที่ได้คือเมตริกซ์  $x$  ( $x_1$  ถึง  $x_7$ ) เมื่อได้คำตอบของเมตริกซ์  $x$  จะนำไปแทนในสมการที่ (4.14) เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์  $k, a, b, z, d, e$  ซึ่งขั้นตอนนี้มีจำนวนสมการ 7 สมการ และมีจำนวนตัวแปร 6 ตัว

หาค่าพารามิเตอร์  $k, a, b, z, d, e$

จากสมการที่ (4.14) ได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$x_1 = \frac{1}{1+ka_0} \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad a_0 = \frac{1-x_1}{x_1 k} \quad (4.16)$$

$$x_2 = \frac{d+e}{1+ka_0} \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad d = x_2 + x_2 ka_0 - e \quad (4.17)$$

$$x_3 = \frac{de}{1+ka_0} \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad e = \frac{x_3 + kx_3 a_0}{x_2 + kx_2 a_0 - e} \quad (4.18)$$

$$x_4 = \frac{abzk}{1+ka_0} \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad abzk = x_4 + x_4 ka_0 \quad (4.19)$$

$$x_5 = \frac{k(ab+z(a+b))}{1+ka_0} \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad k(ab+z(a+b)) = x_5 + x_5 ka_0 \quad (4.20)$$

$$x_6 = \frac{k(a+b+z)}{1+ka_0} \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad k(a+b+z) = x_6 + x_6 ka_0 \quad (4.21)$$

$$x_7 = \frac{k}{1+ka_0} \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad a_0 = \frac{k-x_7}{x_7 k} \quad (4.22)$$

นำสมการ (4.16) = (4.22) ได้

$$\frac{1-x_1}{x_1 k} = \frac{k-x_7}{x_7 k}$$

ได้คำตอบของค่า  $k$  คือ

$$k = \frac{x_7}{x_1} \quad (4.23)$$

แทนค่า  $d$  จากสมการ(4.17) ลงในสมการที่ (4.18) จะได้

$$e^2 - \left( \frac{x_1 x_2 + x_2 x_7 a_0}{x_1} \right) e + \left( \frac{x_1 x_3 + x_3 x_7 a_0}{x_1} \right) = 0 \quad (4.24)$$

จากสมการที่ (4.24) จะได้คำตอบของค่า  $d, e$

แทนค่า  $k$  ลงในสมการที่ (4.19)

$$ab = \frac{x_1 x_4 + x_4 x_7 a_0}{z x_7} \quad (4.25)$$

แทนค่า  $k$  ลงในสมการที่ (4.21)

$$a+b = \left( \frac{x_1x_6 + x_6x_7a_0}{x_7} \right) - z \quad (4.26)$$

แทนค่า  $k$  ลงในสมการที่ (4.20)

$$ab + z(a+b) = \frac{x_5 + x_5x_7a_0}{x_7} \quad (4.27)$$

แทนค่า  $ab$  และ  $a+b$  ลงในสมการ (4.27)

$$\frac{x_5 + x_5x_7a_0}{x_7} = \left[ \frac{x_1x_4 + x_4x_7a_0}{zx_7} \right] + z \left[ \left( \frac{x_1x_6 + x_6x_7a_0}{x_7} \right) - z \right]$$

$$x_7z^3 - (x_1x_6 + x_6x_7a_0)z^2 + (x_5 + x_5x_7a_0)z + (x_4 + x_4x_7a_0) = 0 \quad (4.28)$$

จากสมการที่ (4.28) จะได้คำตอบของค่า  $a, b, z$

### ❖ กรณีที่ 2 ( $a_0 = 0$ )

กรณีที่ 2 ( $a_0 = 0$ ) ดังนั้นมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ  $G_p(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_1s^l + a_2s^{l-1} + \dots + a_l}{s^n + p_1s^{n-1} + \dots + p_n}$

ดังนั้นระบบมีสมการลักษณะเฉพาะดังนี้

$$s^n + (p_1 + d + e + ka_1)s^{n-1} + (p_2 + (d+e)p_1 + de + (a+b+z)ka_1 + ka_2)s^{n-2}$$

$$+ (p_3 + (d+e)p_2 + dep_1 + (ab+z(b+a))ka_1 + (a+b+z)ka_2 + ka_3)s^{n-3}$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$+ (p_n + (d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab+z(b+a))ka_{n-2} + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n)s^3$$

$$+ ((d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-1} + (a+b+z)ka_n)s^2$$

$$+ (dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n)s + abzka_n = 0 \quad (4.29)$$

จากสมการลักษณะเฉพาะของโพล  $s^m + \alpha_1s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$  (โดยที่  $m = n+3$  และ  $n$  คืออันดับของระบบ) นำสมการลักษณะเฉพาะของระบบและสมการลักษณะเฉพาะของโพล มาเข้ากระบวนการแก้สมการด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ จะได้

$$(d+e) + ka_1 = \alpha_1 - p_1 \quad (4.30)$$

$$(d+e)p_1 + de + (a+b+z)ka_1 + ka_2 = \alpha_2 - p_2 \quad (4.31)$$

$$(d+e)p_2 + dep_1 + (ab+z(b+a))ka_1 + (a+b+z)ka_2 + ka_3 = \alpha_3 - p_3 \quad (4.32)$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$(d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab+z(b+a))ka_{n-2} + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n = \alpha_n - p_n \quad (4.33)$$

$$(d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-1} + (a+b+z)ka_n = \alpha_{n+1} \quad (4.34)$$

$$dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n = \alpha_{n+2} \quad (4.35)$$

และ

$$abzka_n = \alpha_{n+3} \quad (4.36)$$

จากการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการข้างต้น สามารถจัดสมการทั้ง 6 สมการให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ p_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ p_2 & p_1 & 0 & a_1 & a_2 & \vdots \\ \vdots & p_2 & a_1 & a_2 & \vdots & a_{n-1} \\ p_{n-1} & \vdots & a_2 & \vdots & a_{n-1} & a_n \\ p_n & p_{n-1} & \vdots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d+e \\ de \\ abz k \\ k(ab+z(a+b)) \\ k(a+b+z) \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - p_1 \\ \alpha_2 - p_2 \\ \vdots \\ \alpha_n - p_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

จัดรูปแบบสมการ (4.37) ให้อยู่ในรูป  $Ax=B$  เพื่อง่ายต่อการคำนวณ โดยกำหนดให้

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d+e \\ de \\ abz k \\ k(ab+z(a+b)) \\ k(a+b+z) \\ k \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

ดังนั้นจะได้สมการที่อยู่ในรูป  $Ax=B$  ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ p_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ p_2 & p_1 & 0 & a_1 & a_2 & \vdots \\ \vdots & p_2 & a_1 & a_2 & \vdots & a_{n-1} \\ p_{n-1} & \vdots & a_2 & \vdots & a_{n-1} & a_n \\ p_n & p_{n-1} & \vdots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - p_1 \\ \alpha_2 - p_2 \\ \vdots \\ \alpha_n - p_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ p_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ p_2 & p_1 & 0 & a_1 & a_2 & \vdots \\ \vdots & p_2 & a_1 & a_2 & \vdots & a_{n-1} \\ p_{n-1} & \vdots & a_2 & \vdots & a_{n-1} & a_n \\ p_n & p_{n-1} & \vdots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \alpha_1 - p_1 \\ \alpha_2 - p_2 \\ \vdots \\ \alpha_n - p_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4.39) สามารถทำการหาคำตอบของเมตริกซ์  $x$  ได้ด้วยโปรแกรม MATLAB ขั้นตอนนี้จะมีจำนวน  $n+3$  สมการ 6 ตัวแปร ซึ่งคำตอบที่ได้คือเมตริกซ์  $x$  ( $x_1$  ถึง  $x_6$ ) เมื่อได้คำตอบ

ของเมตริกซ์  $x$  จะนำไปแทนในสมการที่ (4.38) เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์  $k, a, b, z, d, e$  ซึ่งขั้นตอนนี้มีจำนวนสมการ 6 สมการ และมีจำนวนตัวแปร 6 ตัว

หาค่าพารามิเตอร์  $k, a, b, z, d, e$

จากสมการที่ (4.38) ได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$x_1 = d + e \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad d = x_1 - e \quad (4.40)$$

$$x_2 = de \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad e = \frac{x_2}{d} \quad (4.41)$$

$$x_3 = abz k \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad ab = \frac{x_3}{zk} \quad (4.42)$$

$$x_4 = k(ab + z(a + b)) \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad ab + z(a + b) = \frac{x_4}{k} \quad (4.43)$$

$$x_5 = k(a + b + z) \quad \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad a + b = \frac{x_5}{k} - z \quad (4.44)$$

$$x_6 = k$$

แทนค่า  $d$  จากสมการ(4.40) ลงในสมการที่ (4.41)  $-e^2 + x_1 e - x_2 = 0$  (4.45)

จากสมการที่ (4.45) จะได้คำตอบของค่า  $d, e$

แทนค่า  $k, ab$  และ  $a + b$  ลงในสมการ (4.43)  $-x_6 z^3 + x_5 z^2 - x_4 z + x_3 = 0$  (4.46)

จากสมการที่ (4.46) จะได้คำตอบของค่า  $a, b, z$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอในระนาบเอสนี่ เป็นการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล ดำเนินการโดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าตำแหน่งโพลที่เหมาะสมกับระบบที่สุด ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมมีดังนี้

**Step 1 :** กำหนดค่าเริ่มต้น  $k=0$  กำหนดจำนวนรอบ กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  ด้วยการสุ่มค่า โดยที่  $m = n+3$  และ  $n$  คืออันดับของระบบ

**Step 2 :** สร้างสมการลักษณะเฉพาะ  $1 + G_c G_p H(s) = 0$  และ  $s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$  โดยที่

$$G_c(s) = \frac{k(s+a)(s+b)(s+z)}{s(s+d)(s+e)} \quad \text{และ} \quad G_p(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_0 s^l + a_1 s^{l-1} + \dots + a_l}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n}$$

**Step 3 :** นำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการนี้มาเข้ากระบวนการแก้สมการด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ต่อไป

$$1 + G_c G_p H(s) = s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m$$

จากความสัมพันธ์ต่าง ๆ ข้างต้น สามารถแยกเป็น 2 กรณี กล่าวคือ

**กรณี 1:** ระบบ  $G_p(s)$  มีกำลัง/ของพหุนาม  $p(s)$  เท่ากับกำลัง  $n$  ของพหุนาม  $q(s)$

$$(a_0 \neq 0)$$

**กรณี 2:** ระบบ  $G_p(s)$  มีกำลัง/ของพหุนาม  $p(s)$  น้อยกว่ากำลัง  $n$  ของพหุนาม  $q(s)$

$$(a_0 = 0)$$

**Step 4 :** ดำเนินการแก้สมการ 2 กรณีดังกล่าวข้างต้น

กรณี 1:  $a_0 \neq 0$  (พิจารณาระบบอันดับ  $n$ )

จากการนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการมาเท่ากัน สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4.15) การแก้สมการจะทำการแก้สมการ 2 ครั้ง การแก้สมการครั้งที่ 1 จะทำการแก้สมการ (4.15) เพื่อหาค่า  $x_1$  ถึง  $x_7$ , การแก้สมการครั้งที่ 2 จะนำค่า  $x_1$  ถึง  $x_7$  ที่ได้แทนลงในสมการ (4.14) เพื่อนำไปคำนวณหาค่า  $k, a, b, z, d, e$

กรณี 2:  $a_0 = 0$  (พิจารณาระบบอันดับ  $n$ )

จากการนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการมาเท่ากัน สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4.39) การแก้สมการจะทำการแก้สมการ 2 ครั้ง การแก้สมการครั้งที่ 1 จะทำการแก้สมการ (4.39) เพื่อหาค่า  $x_1$  ถึง  $x_7$ , การแก้สมการครั้งที่ 2 จะนำค่า  $x_1$  ถึง  $x_7$  ที่ได้แทนลงในสมการ (4.38) เพื่อนำไปคำนวณหาค่า  $k, a, b, z, d, e$

**Step 5 :** ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากเกรเดียนต์น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดหรือไม่ ถ้า  $\| \nabla J_k \| < \varepsilon$  สิ้นสุดการคำนวณ ข้ามไปขั้นตอนที่ 10

ตามขั้นตอนนี้พิจารณาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังนี้

$$\text{Minimize } f(x) = \int |e|^2 dt \quad (4.47)$$

$$\text{subject to } P.O._{search} - P.O._{boundary} \leq 0 \quad (4.47)$$

$$tr_{search} - tr_{boundary} \leq 0$$

$$ts_{search} - ts_{boundary} \leq 0$$

$$ess_{search} - ess_{boundary} \leq 0$$

จัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการปรับโทษดังนี้

$$\begin{aligned} J = & f(x) + \rho \left[ \min \left\{ (P.O._{boundary} - P.O._{search}), 0 \right\} \right]^2 \\ & + \rho \left[ \min \left\{ (tr_{boundary} - tr_{search}), 0 \right\} \right]^2 \\ & + \rho \left[ \min \left\{ (ts_{boundary} - ts_{search}), 0 \right\} \right]^2 \\ & + \rho \left[ \min \left\{ (ess_{boundary} - ess_{search}), 0 \right\} \right]^2 \end{aligned} \quad (4.48)$$

โดยที่  $e(t)^2 = [r(t) - c(t)]^2$  เมื่อ  $r(t)$  และ  $c(t)$  คืออินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ

$\rho$  คือ พารามิเตอร์การปรับโทษ (penalty parameter)

$P.O._{boundary}$  คือ ค่าในการระบุขอบเขตของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน

$P.O._{search}$  คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา

$tr_{boundary}$  คือ ค่าในการระบุขอบเขตของช่วงเวลานั้น

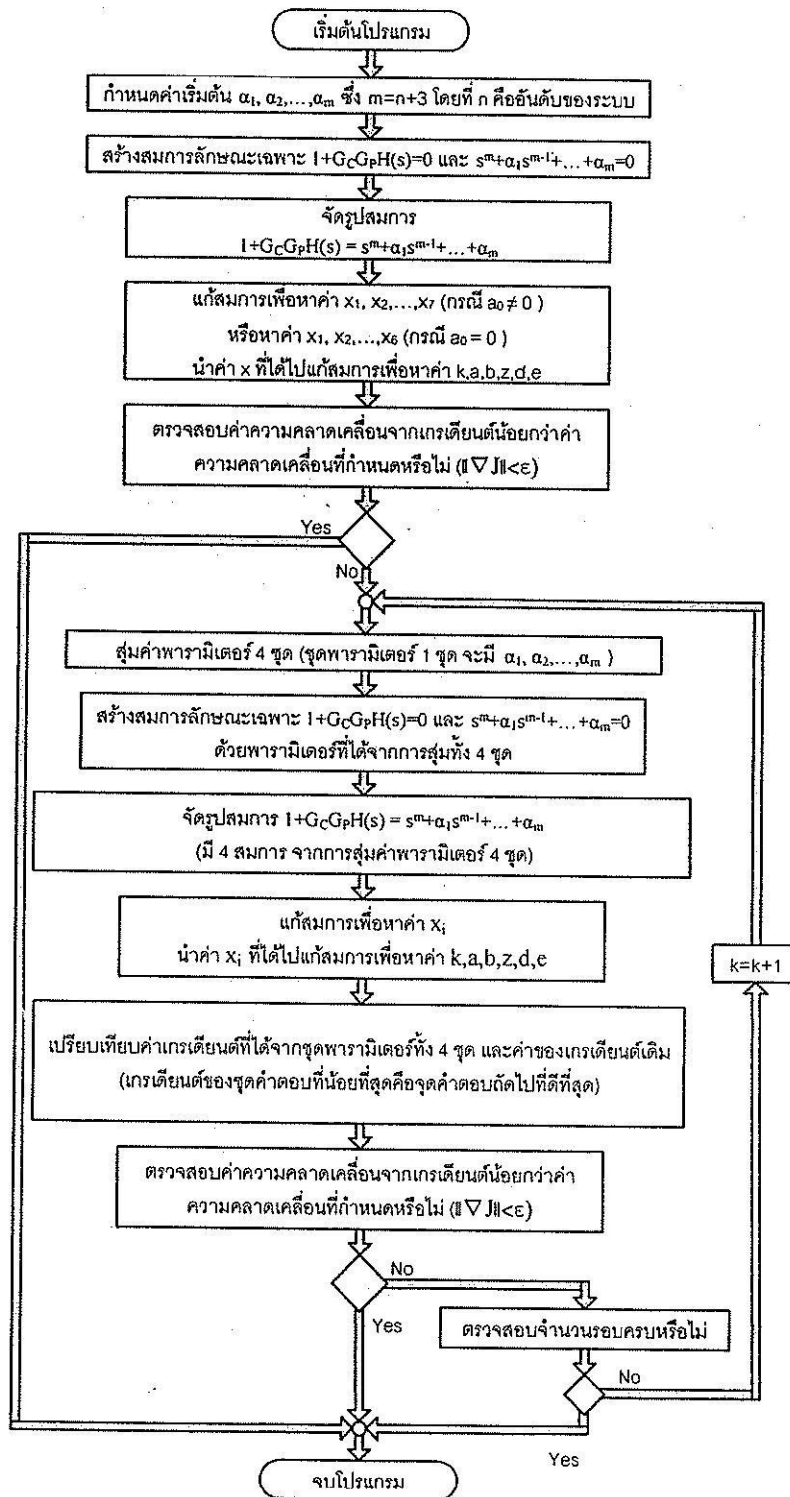
$tr_{search}$  คือ ช่วงเวลานั้นของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา

$IS_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของช่วงเวลาเข้าที่
$IS_{search}$	คือ ช่วงเวลาเข้าที่ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา
$ESS_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนของสถานะอยู่ตัว
$ESS_{search}$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของสถานะอยู่ตัวของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา

- Step 6 :** ปรับปรุงจุดคำตอบ โดยทำการสุ่มค่าของพารามิเตอร์ 4 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีพารามิเตอร์  $m$  ตัว  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  จากนั้นจึงแก้สมการเพื่อหาค่า  $k, a, b, z, d, e$  ตามขั้นตอนที่ 2, 3, 4
- Step 7 :** เปรียบเทียบเกรเดียนต์ของชุดคำตอบเดิมและชุดคำตอบใหม่ทั้ง 4 ชุด หากเกรเดียนต์ของชุดคำตอบไหนน้อยที่สุด เลือกค่าพารามิเตอร์ของชุดคำตอบนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ในรอบการคำนวณถัดไป
- Step 8 :** ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากเกรเดียนต์ของชุดคำตอบใหม่ว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดหรือไม่ ถ้า  $\| \nabla J_k \| < \varepsilon$  สิ้นสุดการคำนวณ ข้ามไปขั้นตอนที่ 10
- Step 9 :** จำนวนรอบครบตามที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ใช่ให้เพิ่มตัวนับ  $k=k+1$  ทำซ้ำขั้นตอนที่ 6
- Step 10 :** ได้ผลเฉลย  $(\alpha^* = \alpha_{k+1})$

อาจสังเกตได้จากขั้นตอนที่ 5 - 8 ว่า การคำนวณค่าผิดพลาด ( $e$ ) ยึดอินพุต  $r(t)$  เป็นเกณฑ์นั้นหมายความว่าข้อกำหนดการออกแบบ (design specifications) ต้องการให้เอาต์พุตมีรูปทรง (รูปคลื่น) ใกล้เคียงกับรูปทรงของอินพุตมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการกำหนดขอบเขตการพุ่งเกินเวลาขึ้น เวลาเข้าที่ และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว เพื่อให้กระบวนการคำนวณมีผลลัพธ์เป็นไปตามที่ต้องการอีกด้วย โดยการจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการปรับ โทซ ดังสมการ(4.48) จากกระบวนการคำนวณจะให้ผลลัพธ์ที่ค่าต่างๆ เหล่านี้น้อยที่สุด แต่ทั้งนี้ก็มีข้อจำกัดที่ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเชิงตัวเลข ในกระบวนการประมาณคำตอบให้สมการกำหนดเกินหรือกำหนดขาด ซึ่งเป็นรูปแบบของปัญหา และจากที่การคำนวณอาศัยกระบวนการวนซ้ำ ค่าเกรเดียนต์ของความคลาดเคลื่อนเป็นตัวชี้ว่า ในกระบวนการคำนวณวนซ้ำว่า คำตอบที่ได้กำลังมุ่งเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเกรเดียนต์มีค่าน้อยหรือแทบจะไม่ได้แตกต่างแต่ละรอบของการวนซ้ำ มีความหมายว่าคำตอบหรือผลเฉลยเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง ไปจากเดิม การคำนวณจึงเข้าสู่คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นจนกระทั่งการคำนวณสิ้นสุดลงด้วยเกณฑ์การยุติที่กำหนดเป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยน  $\varepsilon$  ของ  $\| \nabla J_k \|$  การใช้ค่าเกรเดียนต์จะช่วยให้ไม่ต้องคำนวณด้วยจำนวนรอบการวนซ้ำที่มากจนเกินไป[8]

การดำเนินงานตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น สามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ โดยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล  
 ดำเนินการ โดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด

### 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิด ที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอซึ่งได้มาจากการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลอย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งทำการออกแบบตัวควบคุมให้กับพลานต์ที่ควบคุมยาก 7 พลานต์ตามข้อแนะนำของ Prof. K.J. Astrom ดังปรากฏในเอกสารอ้างอิง [4, 5] มีผลการจำลองสถานการณ์ดังนี้

พลานต์ 1.  $G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(\alpha s+1)(\alpha^2 s+1)(\alpha^3 s+1)}$ ,  $\alpha = 0.5$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 15\%$ ,  $T_r \leq 2s$  และ

$T_s \leq 5s$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม :  $G_c(s) = \frac{-0.071s^3 + 15.92s^2 + 16.74s + 14.6}{s^3 + 8.1s^2 + 16.38s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{-0.071s^3 + 15.92s^2 + 16.74s + 14.6}{0.0156s^7 + 0.36s^6 + 3.25s^5 + 14.57s^4 + 34.1s^3 + 38.82s^2 + 16.38s}$$

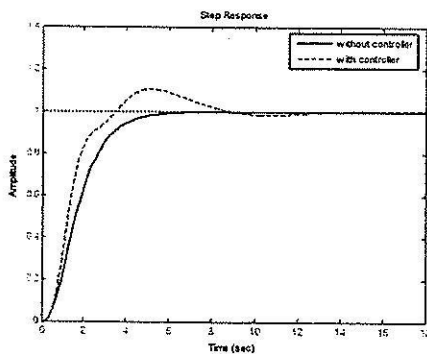
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

$$T(s) = \frac{-0.071s^3 + 15.92s^2 + 16.74s + 14.6}{0.0156s^7 + 0.36s^6 + 3.247s^5 + 14.57s^4 + 34.03s^3 + 54.73s^2 + 33.12s + 14.6}$$

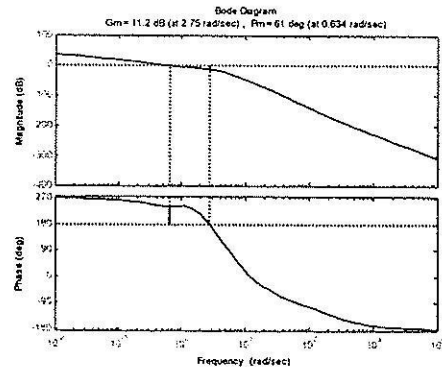
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-226, -0.53 \pm j0.8$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-9.15, -5.66 \pm j3.35, -0.98 \pm j2.08,$

$-0.34 \pm j0.58$

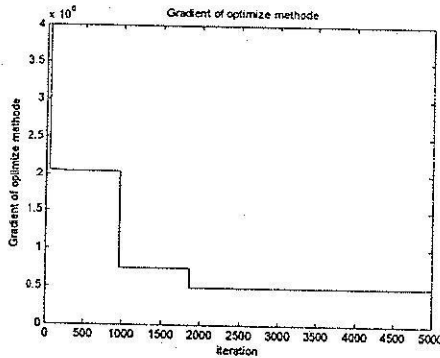


(ก)



(ข)





(ค)

รูปที่ 4.2 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ (พลาเน็ต 1)

(ข) แผนภาพ โปดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

(ค) เกรเดียนต์ของการวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.2 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา  $P.O. = 10.5\% < 15\%$  และ  $T_r = 1.8s < 2s$  ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด แต่  $T_s = 8.3s > 5s$  ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดอยู่บ้างไม่มากนัก พิจารณาแผนภาพโปดในรูปที่ 4.2 (ข) พบว่า  $P_m = 61 \text{ deg}$  และ  $G_m = 11.2 \text{ dB}$  ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบรักษาเสถียรภาพได้ดี

พลาเน็ต 2.  $G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^4}$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 15\%$ ,  $T_r \leq 5s$  และ  $T_s \leq 10s$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม :  $G_c(s) = \frac{673.8s^3 + 375.5s^2 + 854.9s + 231}{s^3 + 58.96s^2 + 869.1s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

$$GH(s) = \frac{673.8s^3 + 375.5s^2 + 854.9s + 231}{s^7 + 62.96s^6 + 1111s^5 + 3834s^4 + 5452s^3 + 33536s^2 + 869.1s}$$

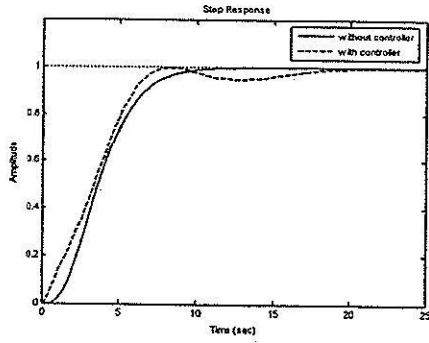
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

$$T(s) = \frac{673.8s^3 + 375.5s^2 + 854.9s + 231}{s^7 + 62.96s^6 + 1111s^5 + 3834s^4 + 6125s^3 + 3911s^2 + 1724s + 231}$$

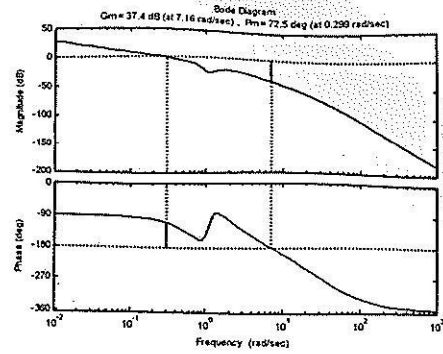
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-0.29, -0.14 \pm j1.08$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-0.2, 0.26 \pm j0.52, -1.61 \pm j1.17,$

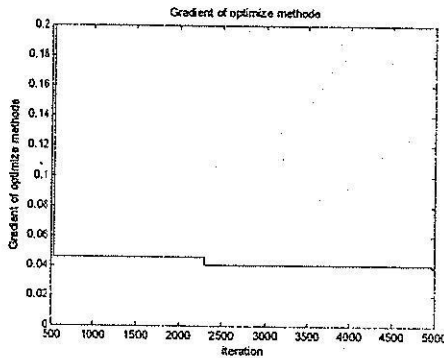
$$-29.51 \pm j0.93$$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ (พลาเน็ต 2)

(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

(ค) เกรเดียนต์ของการวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.3 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา  $P.O. = 0\% < 15\%$  เป็นไปตามข้อกำหนด และ  $T_r = 5.12s > 5s$  ตัวควบคุมสามารถแก้ไขการประวิงเวลาที่ปรากฏในพลวัตของพลาเน็ตได้ดี  $T_s = 9.78s > 8s$  ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดเพียงเล็กน้อย และแผนภาพโบคดังรูปที่ 4.3 (ข) เปิดเผยให้เห็นว่า  $Pm = 72.5 \text{ deg}$  และ  $Gm = 37.4 \text{ dB}$  ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

พลาเน็ต 3.  $G_p(s) = \frac{-\alpha s + 1}{(s+1)^3}$ ,  $\alpha = 0.5$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 15\%$ ,  $T_r \leq 4s$  และ  $T_s \leq 8s$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม : 
$$G_c(s) = \frac{174.3s^3 + 525.7s^2 + 848.3s + 379}{s^3 + 57.91s^2 + 838.5s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

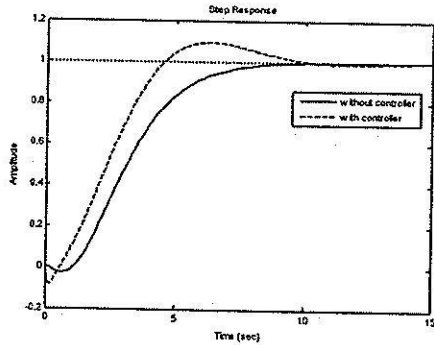
$$GH(s) = \frac{-87.17s^4 - 88.5s^3 + 101.5s^2 + 658.8s + 379}{s^6 + 60.91s^5 + 1015s^4 + 2690s^3 + 2573s^2 + 838.5s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

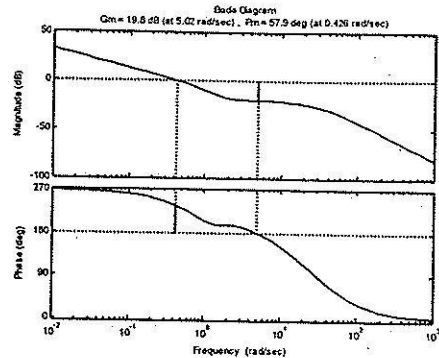
$$T(s) = \frac{-87.17s^4 - 88.5s^3 + 101.5s^2 + 658.8s + 379}{s^6 + 60.91s^5 + 928.1s^4 + 2602s^3 + 2675s^2 + 1497s + 379}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $2, -0.65, -1.18 \pm 1.39$

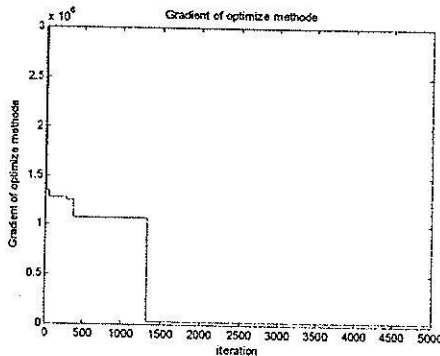
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-0.38 \pm j 0.56, -0.59, -1.91, -19.12, -38.54$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.4 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ (พลาเน็ต 3)

(ข) แผนภาพ โปดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

(ค) เกรเดียนต์ของการวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.4 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา  $P.O. = 9.26\% < 15\%$  และ  $T_r = 2.9s < 4s$  เป็นไปตามข้อกำหนด และ  $T_s = 9.04s > 8s$  ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม มีช่วงเวลาประวิงสั้นกว่าระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุมถึงเกือบเท่าตัว แผนภาพโปดในรูปที่ 4.4 (ข) เปิดเผยว่า  $Pm = 57.9 \text{ deg}$  และ  $Gm = 19.8 \text{ dB}$  ซึ่งถือว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

พลาเน็ต 4.  $G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)}e^{-s}$ ,  $T=10$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 15\%$ ,  $T_r \leq 22s$  และ  $T_s \leq 40s$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม :  $G_c(s) = \frac{79.53s^3 + 3.311 \times 10^{-15}s^2 + 3887s + 260}{s^3 + 63.14s^2 + 996.5s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

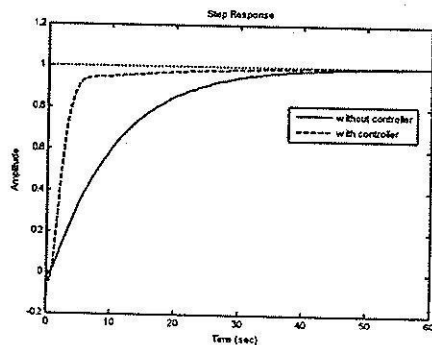
$$GH(s) = \frac{-39.74s^4 + 79.53s^3 - 1943s^2 + 3757s + 260}{5s^5 + 326.2s^4 + 5647s^3 + 1.05 \times 10^4 s^2 + 996.5s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด :

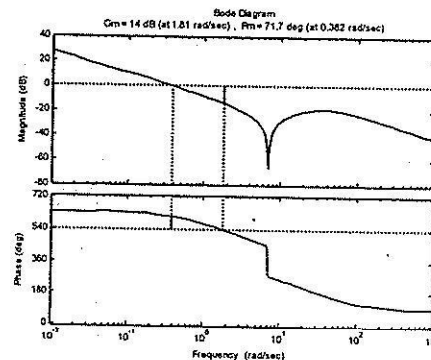
$$T(s) = \frac{-39.74s^4 + 79.53s^3 - 1943s^2 + 3757s + 260}{5s^5 + 286.4s^4 + 5726s^3 + 8583s^2 + 4753s + 260}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด :  $2, -0.07, -0.03 \pm j6.99$

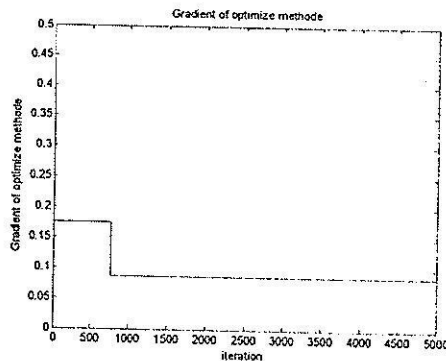
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด :  $-0.06, -27.85 \pm j 16.75, -0.76 \pm j 0.4$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ (พลาเน็ต 4)

(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

(ค) เกรเดียนต์ของการวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.5 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนด นั่นคือ  $P.O. = 0\% < 15\%$ ,  $T_r = 3.71s < 22s$  และ  $T_s = 25.4s < 40s$  พิจารณาแผนภาพโบดดังรูปที่ 4.5 (ข) พบว่า  $Pm = 71.7 \text{ deg}$  และ  $Gm = 14 \text{ dB}$  ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบวงปิดตอบสนองอย่างว่องไวมาก

พลาเน็ต 5.  $G_p(s) = \frac{1}{(Ts+1)^2} e^{-s}$ ,  $T = 10$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 15\%$ ,  $T_r \leq 30s$  และ  $T_s \leq 60s$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม :  $G_c(s) = \frac{-2477s^3 + 6207s^2 + 1894s + 107.6}{s^3 + 35.32s^2 + 311.8s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

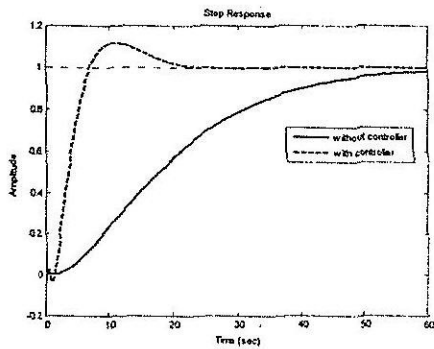
$$GH(s) = \frac{-205.6s^5 + 1753s^4 - 5423s^3 + 5269s^2 + 1840s + 107.6}{8.3s^7 + 344.8s^6 + 4523s^5 + 2.00 \times 10^4 s^4 + 3.51 \times 10^4 s^3 + 6428s^2 + 311.8s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

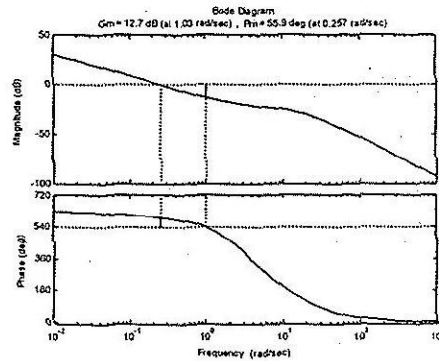
$$T(s) = \frac{-205.6s^5 + 1753s^4 - 5423s^3 + 5269s^2 + 1840s + 107.6}{8.3s^7 + 344.8s^6 + 4317s^5 + 2.18 \times 10^4 s^4 + 2.96 \times 10^4 s^3 + 1.17 \times 10^4 s^2 + 2152s + 107.6}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $2.79, -0.20, -0.08, -0.12 \pm j0.09,$   
 $3.01 \pm j1.73$

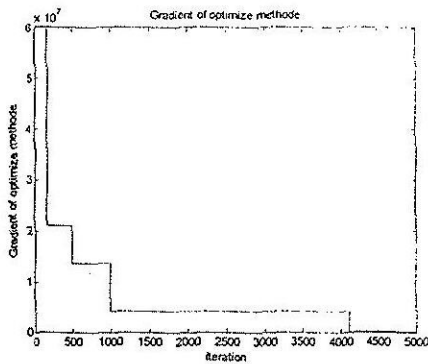
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-24.37, -1.32, -0.075, -7.68 \pm j3.78,$   
 $-0.21 \pm j0.17$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ (พลาเน็ต 5)

(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

(ค) เกรเดียนต์ของการวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.6 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนดนั่นคือ  $P.O. = 11.6\% < 15\%$ ,

$T_r = 4.06s < 30s$  และ  $T_s = 19.7s < 60s$  แสดงว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้การตอบสนองที่ว่องไวมาก และช่วงเวลาประวิงลดลงอย่างเห็นได้ชัด และแผนภาพโพลดังรูปที่ 4.2 (ข) เปิดเผยให้เห็นว่า  $P_m = 55.9 \text{ deg}$  และ  $G_m = 12.7 \text{ dB}$  ซึ่งถือว่ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

พลาณต์ 6.  $G_p(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)}$  โดยที่ต้อองการ  $P.O. \leq 15\%$ ,  $T_r \leq 10s$  และ  $T_s \leq 20s$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม :  $G_c(s) = \frac{6.66s^3 + 3.2s^2 + 2.6s + 0.03}{s^3 + 4.69s^2 + 5.5s}$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

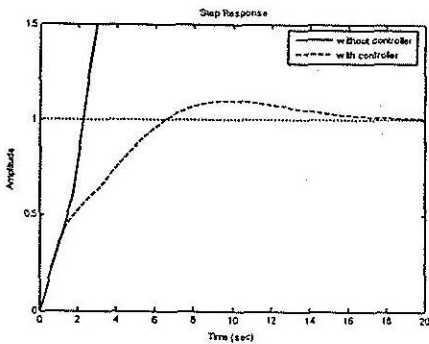
$$GH(s) = \frac{6.66s^5 + 83.17s^4 + 280.9s^3 + 146.4s^2 + 94s + 1.0}{s^7 + 42.69s^6 + 256.7s^5 + 587.3s^4 + 570.2s^3 + 197.9s^2}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

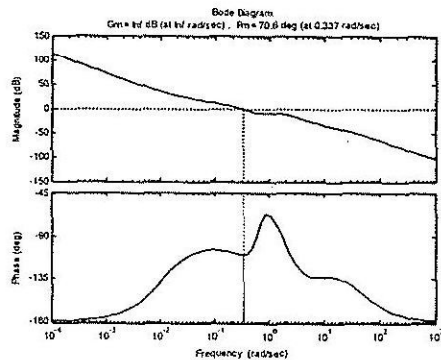
$$T(s) = \frac{6.66s^5 + 83.17s^4 + 280.9s^3 + 146.4s^2 + 94s + 1}{s^7 + 42.69s^6 + 263.4s^5 + 670.4s^4 + 851.1s^3 + 344.3s^2 + 94s + 1}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-0.01, -0.23 \pm j0.57$  และ  $-6$  ซ้ำกัน 2 ตัว

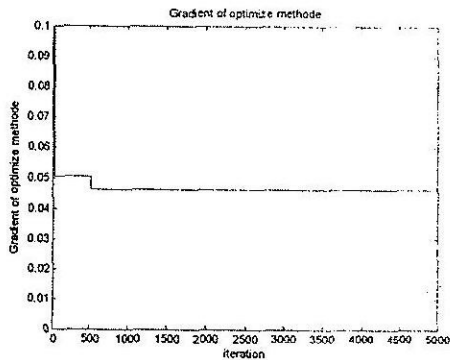
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-10.86, -4.64, -0.30, -10.98 \pm j 26.87, -0.13 \pm j 0.19$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.7 (ก) การตอบสนองทาง โดเมนเวลาของระบบ (พลาณต์ 6)

(ข) แผนภาพ โพลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

(ค) เกรเดียนต์ของการวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.7 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า พลานต์มีลักษณะขาดเสถียรด้วยความเป็น type - 1 เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมให้แล้ว ระบบวงปิดมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนดนั่นคือ  $P.O. = 9.91\% < 15\%$ ,  $T_r = 5s < 10s$  และ  $T_s = 16.3s < 20s$   $P_m = 70.6\text{deg}$  และ  $G_m = \text{Inf}$  ดังรูปที่ 4.7 (ข) ซึ่งแสดงว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

พลานต์ 7.  $G_p(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2)}$ ,  $\omega_0 = 1, \zeta = 0.1$  โดยที่ต้องการ  $P.O. \leq 15\%$ ,  $T_r \leq 1.5s$

และ  $T_s \leq 30s$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม :

$$G_c(s) = \frac{714.1s^3 + 1281s^2 + 423.4s + 331}{s^3 + 32.1s^2 + 257.6s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม :

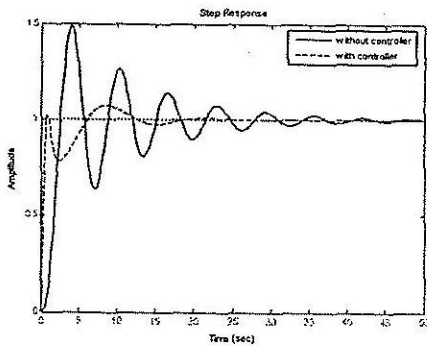
$$GH(s) = \frac{714s^3 + 1281s^2 + 423.4s + 331}{s^6 + 33.3s^5 + 297.4s^4 + 348.7s^3 + 341.3s^2 + 257.6s}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :

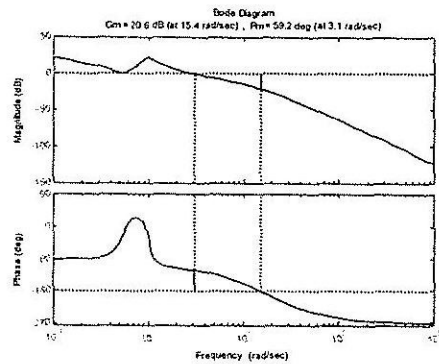
$$T(s) = \frac{714s^3 + 1281s^2 + 423.4s + 331}{s^6 + 33.3s^5 + 297.4s^4 + 1063s^3 + 1623s^2 + 681s + 331}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-1.61, -0.09 \pm j0.53$

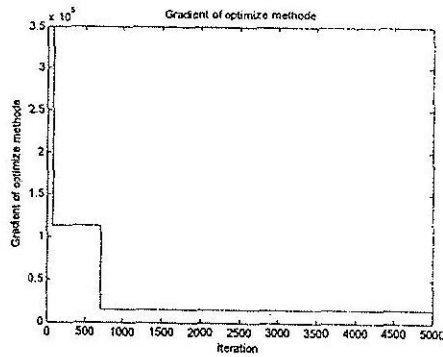
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด :  $-5.7, -21.7, -2.76 \pm j 1.46, -0.17 \pm j 0.49$



(ก)



(ข)



(ก)

รูปที่ 4.8 (ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ (พลาเน็ต 7)

(ข) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

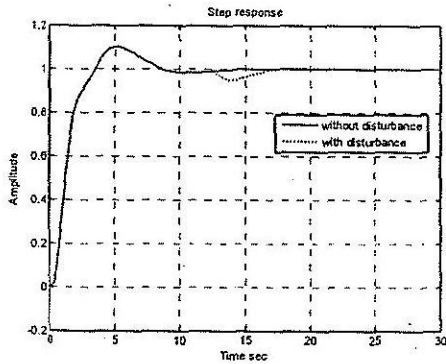
(ค) เกรเดียนต์ของการวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.8 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า พลาเน็ตมีการแกว่งในการตอบสนองที่สูงมาก เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมให้แล้ว ระบบวงปิดมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาที่ราบเรียบกว่าเดิมมากและเป็นไปตามข้อกำหนด นั่นคือ  $P.O. = 7.27\% < 15\%$ ,  $T_r = 0.44s < 1.5s$  และ  $T_s = 16.3s < 30s$  ตลอดจนมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก นั่นคือ  $P_m = 59.2\text{deg}$  และ  $G_m = 20.6\text{ dB}$  ตามรูปที่ 4.8 (ข)

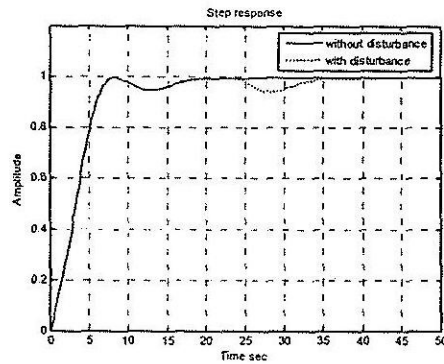


4.4 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก

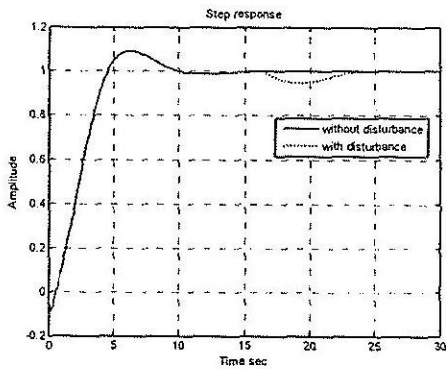
ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งกำหนดให้การรบกวนจากภายนอกมีขนาด 10 % ของอินพุต และเป็นการรบกวนเชิงหัดล้าง (ลบ) เกิดกับระบบที่มีตัวควบคุมคั้งรูปที่ 2.1 เมื่อระบบวงปิดเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว เพื่อพิจารณาความสามารถในการฟื้นคืนสู่การตอบสนองตามอินพุตอ้างอิง ผลการจำลองสถานการณ์สำหรับพลาตันต์กรีมีต่างๆ 7 แบบแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 (ก) – (ข)



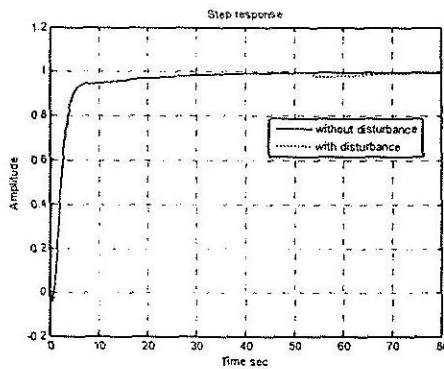
(ก)



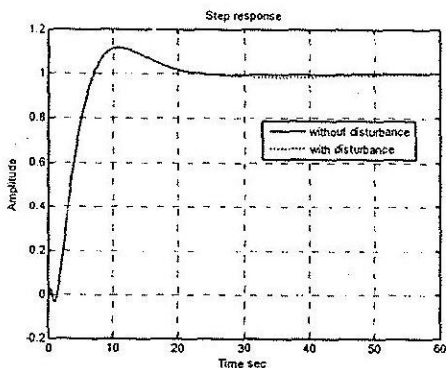
(ข)



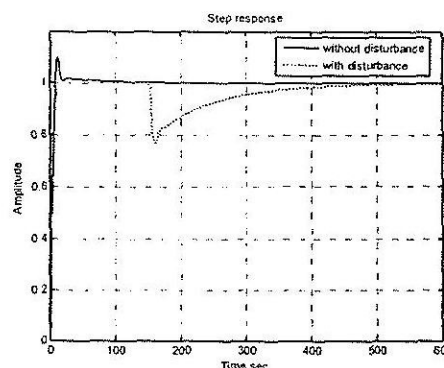
(ค)



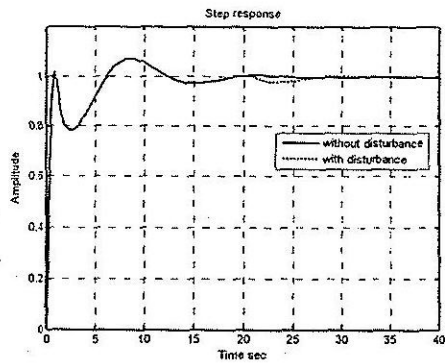
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

- รูปที่ 4.9 (ก) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 1)  
 (ข) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 2)  
 (ค) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 3)  
 (ง) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 4)  
 (จ) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 5)  
 (ฉ) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 6)  
 (ช) ผลการตอบสนองของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก (พลานต์ 7)

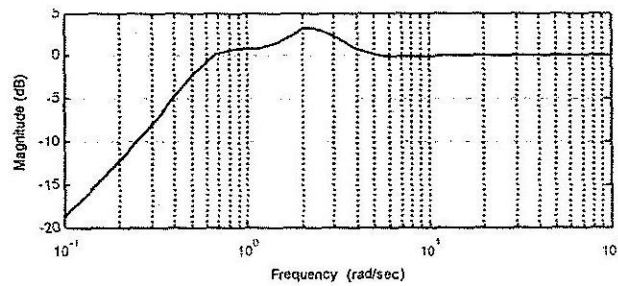
จากผลการจำลองสถานการณ์ที่น่าเสนอ สังเกตได้ว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอคือเอ ออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่ง โพลอย่างเหมาะสมที่สุดนั้น มีความสามารถในการฟื้นคืนระบบจากการถูกรบกวนจากภายนอกที่ดีมาก มีเพียงกรณีของพลานต์ 6 กรณีเดียวเท่านั้น ที่ระบบวงปิดฟื้นคืน การตอบสนองเมื่อถูกรบกวน ได้ช้า ทั้งนี้พลานต์ดังกล่าวมีรูปแบบของ type - 1 ซึ่งส่งผลกระทบต่อเชิง อินทิกรัล

## 4.5 ความไวของระบบวงปิด

พิจารณาความไวของระบบวงปิดเมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอใช้งานกับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก  
ทั้ง 7 พลาเน็ต ซึ่งพิจารณาตามสมการที่ (3.8) ได้ผลดังนี้

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

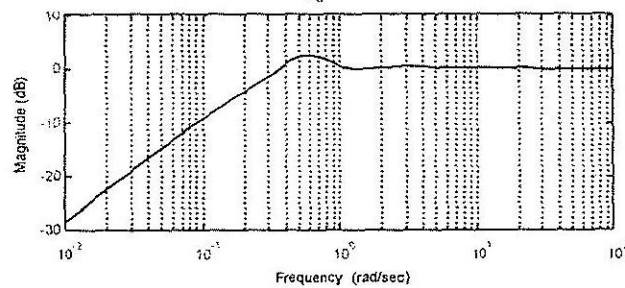
ความไวของระบบ :  $S_G^r = \frac{0.02s^7 + 0.36s^6 + 3.25s^5 + 14.57s^4 + 34.1s^3 + 38.82s^2 + 16.38s}{0.02s^7 + 0.36s^6 + 3.25s^5 + 14.57s^4 + 34.03s^3 + 54.73s^2 + 33.12s + 14.6}$



รูปที่ 4.10  $|S_G^r|$  แสดงเป็น dB

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

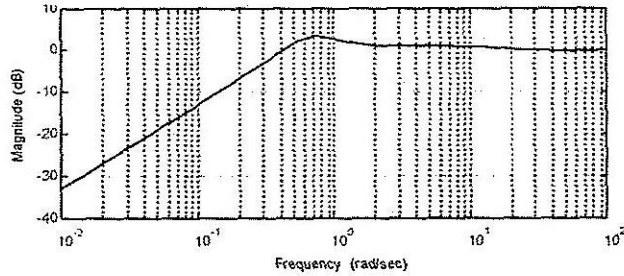
ความไวของระบบ :  $S_G^r = \frac{s^7 + 62.96s^6 + 1111s^5 + 3834s^4 + 5452s^3 + 3536s^2 + 869.1s}{s^7 + 62.96s^6 + 1111s^5 + 3834s^4 + 6125s^3 + 3911s^2 + 1724s + 231}$



รูปที่ 4.11  $|S_G^r|$  แสดงเป็น dB

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

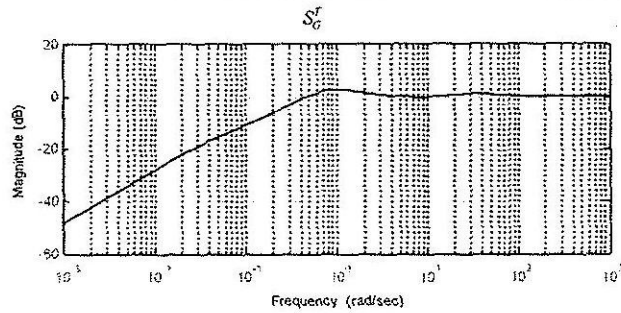
ความไวของระบบ :  $S_G^T = \frac{s^6 + 60.91s^5 + 1015s^4 + 2690s^3 + 2573s^2 + 838.5s}{s^6 + 60.91s^5 + 928.1s^4 + 2602s^3 + 2675s^2 + 1497s + 379}$



รูปที่ 4.12  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

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

ความไวของระบบ :  $S_G^T = \frac{5s^5 + 326.2s^4 + 5647s^3 + 10530s^2 + 996.5s}{5s^5 + 286.4s^4 + 5726s^3 + 8583s^2 + 4753s + 260}$

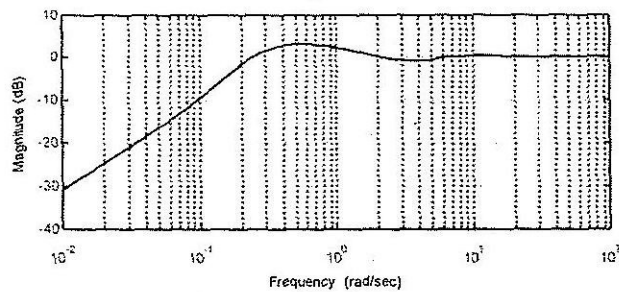


รูปที่ 4.13  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

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

ความไวของระบบ :

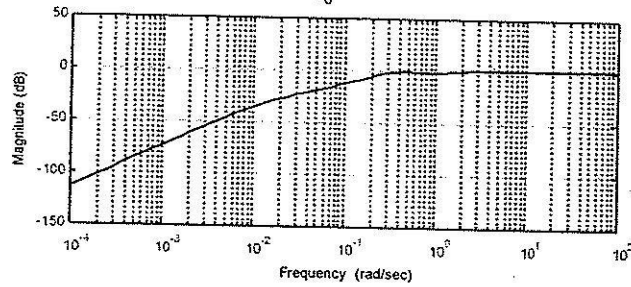
$S_G^T = \frac{8.3s^7 + 344.8s^6 + 4523s^5 + 20020s^4 + 35050s^3 + 6428s^2 + 311.8s}{8.3s^7 + 344.8s^6 + 4317s^5 + 21770s^4 + 29630s^3 + 11700s^2 + 2152s + 107.6}$



รูปที่ 4.14  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

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

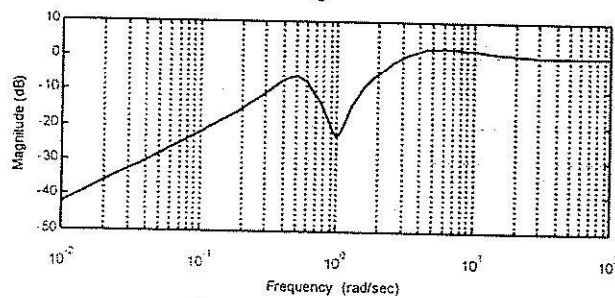
ความไวของระบบ :  $S_G^T = \frac{s^7 + 42.69s^6 + 256.7s^5 + 587.3s^4 + 570.2s^3 + 197.9s^2}{s^7 + 42.69s^6 + 263.4s^5 + 670.4s^4 + 851.1s^3 + 344.3s^2 + 94s + 1}$



รูปที่ 4.15  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

พลาเน็ต 7.  $G_p(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2)}$ ,  $\omega_0 = 1, \zeta = 0.1$

ความไวของระบบ :  $S_G^T = \frac{s^6 + 33.3s^5 + 297.4s^4 + 348.7s^3 + 341.3s^2 + 257.6s}{s^6 + 33.3s^5 + 297.4s^4 + 1063s^3 + 1623s^2 + 681s + 331}$



รูปที่ 4.16  $|S_G^T|$  แสดงเป็น dB

จากรูปที่ 4.10 - 4.16 ซึ่งเป็นกรณีของพลาเน็ตทั้ง 7 เห็นได้ว่าพฤติกรรมของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลาเน็ต 1 ในบทที่ 3 (ดูรูปที่ 3.2) การอธิบายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกัน จึงไม่ขอกล่าวซ้ำอีก

#### 4.6 วิเคราะห์ผล

บทที่ 4 นี้ได้นำเสนอขั้นตอนดำเนินการออกแบบตัวควบคุมในระบบเอส ด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลดำเนินการ โดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด และผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิด ตลอดจนผลการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งทำการออกแบบตัวควบคุมกับพลาเน็ตที่ควบคุมยกทั้ง 7 พลาเน็ต

ผลการออกแบบตัวควบคุม พบว่าบางพลาเน็ตเราสามารถออกแบบให้ผลการตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิด เป็นไปตามข้อกำหนดทั้งทางด้าน  $P.O.$ ,  $T_r$  และ  $T_s$  บางพลาเน็ตการออกแบบไม่สามารถเป็นไปตามข้อกำหนด แต่ผลการตอบสนองในภาพรวมของทั้ง 7 พลาเน็ตมีผลที่ค่อนข้างดี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการออกแบบตัวควบคุมดำเนินการด้วยวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ส่งผลให้คำตอบที่ได้ผู้เข้าสู่คำตอบเฉพาะถิ่น

จากการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก พบว่าพลาเน็ตทั้ง 7 เมื่อถูกรบกวนจากภายนอก ตัวควบคุมช่วยให้ระบบที่ถูกรบกวนฟื้นคืนสู่ระดับการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวได้ดี และใช้เวลาไม่นาน ตลอดจนมีความสามารถในการตามรอยอินพุตได้ดีมาก นอกจากนั้นระบบวงปิดทุกกรณีมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก อาจกล่าวได้ว่า วิธีการออกแบบด้วยการจัดวางตำแหน่งโพลอาศัยการคำนวณด้วยวิธีพีชคณิตเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจมาก

## บทที่ 5

### การนวัตต์ตัวควบคุมพีไอดีเอ

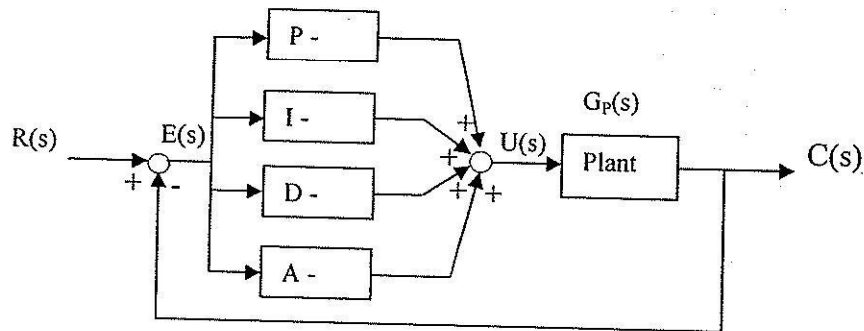
#### 5.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการนวัตต์ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัลด้วยภาษาซี เทคโนโลยีการสร้างตัวควบคุมพิจารณาในรูปแบบของการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Z180 และนวัตต์ตัวควบคุมด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อก โดยอาศัยออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก เชื่อมต่อตามโครงสร้างแบบขนาน รวมทั้งแสดงผลการทดสอบที่ได้ ตลอดจนวิเคราะห์ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอ

#### 5.2 การนวัตต์ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัล

##### 5.2.1 คณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดีเอ

ตัวควบคุมพีไอดีเอมีโครงสร้างทางคณิตศาสตร์สี่ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบฟังก์ชันประกอบไอ องค์ประกอบดี และองค์ประกอบเอ ดังแสดงด้วยสมการที่ (5.1) เมื่อถูกใช้งานในระบบป้อนกลับ มีโครงสร้างของระบบดังแผนภาพในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบป้อนกลับมีตัวควบคุมแบบพีไอดีเอ

$$u(t)_{PIDA} = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) + u_a(t)$$

$$u(t)_{PIDA} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_A(t) \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (5.1)$$

โดยที่  $e(t)$  คืออินพุตของตัวควบคุมพีไอดีเอ

$u(t)_{PIDA}$  คือเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีเอ

$K_p$  คือค่าคงที่ขององค์ประกอบพี

$K_i$  คือค่าคงที่ขององค์ประกอบไอ

$K_d$  คือค่าคงที่ขององค์ประกอบดีและ

$K_A$  คือค่าคงที่ขององค์ประกอบเอ

**ตัวควบคุมพี**

องค์ประกอบพีเป็นองค์ประกอบที่ใช้ปรับสัดส่วนสัญญาณ จากสมการ (5.1) สามารถแสดงสมการขององค์ประกอบพีได้ดังนี้

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (5.2)$$

ทำการแปลงลาปลาซจะได้ 
$$U_p(s) = K_p E(s) \quad (5.3)$$

ทำการแปลง z จะได้ 
$$U_p(z) = K_p E(z) \quad (5.4)$$

แปลงเป็นสมการผลต่างได้ 
$$u_p(i) = K_p e(i) \quad (5.5)$$

**ตัวควบคุมไอ**

องค์ประกอบไอเป็นองค์ประกอบของการอินทิเกรตสัญญาณ จากสมการ (5.1) สามารถแสดงสมการขององค์ประกอบไอได้ดังนี้

$$u_I(t) = K_I \int e(t) dt \quad (5.6)$$

ทำการแปลงลาปลาซจะได้ 
$$U_I(s) = \frac{K_I}{s} E(s) \quad (5.7)$$

ทำการแปลง z โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธี Tustin โดยที่  $\frac{1}{s} = \frac{T(z+1)}{2(z-1)}$

ดังนั้นจะได้ 
$$U_I(z) = \frac{K_I T}{2} \left( \frac{z+1}{z-1} \right) E(z) \quad (5.8)$$

แปลงเป็นสมการผลต่างได้ 
$$u_I(i) = u_I(i-1) + \frac{K_I T}{2} [e(i) + e(i-1)] \quad (5.9)$$

**ตัวควบคุมดี**

องค์ประกอบดีเป็นองค์ประกอบของการอนุพันธ์สัญญาณ จากสมการ (5.1) สามารถแสดงสมการขององค์ประกอบดีได้ดังนี้

$$u_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5.10)$$

ทำการแปลงลาปลาซจะได้ 
$$U_D(s) = \frac{K_D s}{s+f} E(s) \quad (5.11)$$

ทำการแปลง z โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธี Tustin เช่นเดียวกับตัวควบคุมไอ

ดังนั้นจะได้ 
$$U_D(z) = \frac{2K_D(z-1)}{2(z-1) + fT(z+1)} E(z) \quad (5.12)$$

แปลงเป็นสมการผลต่างได้ 
$$u_D(i) = \left( \frac{2K_D}{2+fT} \right) [e(i) - e(i-1)] + \left( \frac{2-fT}{2+fT} \right) u_D(i-1) \quad (5.13)$$

**ตัวควบคุมเอ**

องค์ประกอบเอเป็นองค์ประกอบของการอนุพันธ์สัญญาณสองครั้ง จากสมการ (5.1) สามารถแสดงสมการขององค์ประกอบเอได้ดังนี้

$$u_A(t) = K_A \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (5.14)$$



ทำการแปลงลาปลาซจะได้ 
$$U_A(s) = \frac{K_A s^2}{(s+d)(s+e)} E(s) \quad (5.15)$$

ทำการแปลง  $z$  โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธี Tustin เช่นกัน โดยที่  $\frac{1}{s^2} = \frac{T^2(z+1)^2}{4(z-1)^2}$

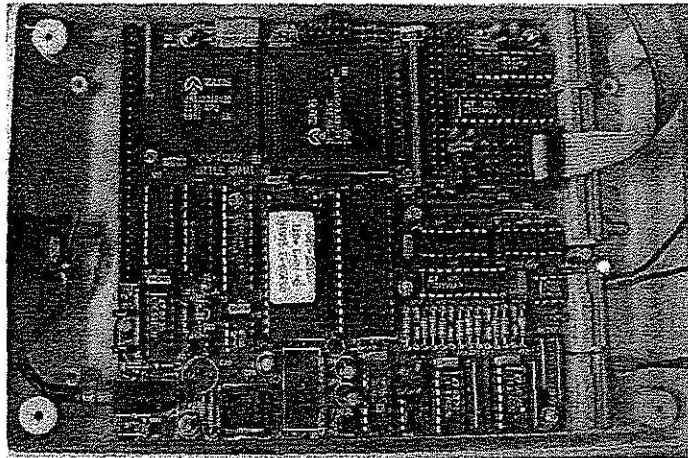
ดังนั้นจะได้ 
$$U_A(z) = \frac{4K_A(z-1)^2}{[2(z-1)+dT(z+1)][2(z-1)+eT(z+1)]} E(z) \quad (5.16)$$

แปลงเป็นสมการผลต่างได้

$$u_A(i) = \left[ \frac{8-2edT^2}{4+2dT+2eT+edT^2} \right] u_A(i-1) + \left[ \frac{-4+2dT+2eT-edT^2}{4+2dT+2eT+edT^2} \right] u_A(i-2) + 4K_A[e(i)-2e(i-1)+e(i-2)] \quad (5.17)$$

### 5.2.2 การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัลใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Z180 [6] ดังแผนภาพในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Z180

การอนุวัตตัวควบคุมดิจิทัล อาศัยปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดีเอ ซึ่งมีองค์ประกอบด้วยกันสี่ส่วน แต่ละองค์ประกอบมีปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ที่กระทำกับอินพุตที่แตกต่างกัน ในการอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยโปรแกรมภาษาซี เพื่อใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ จะอาศัยปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์เหล่านี้มาสร้างเป็นอัลกอริทึม รายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ข ขั้นตอนการทำงานสามารถแสดงได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดค่าคงที่ ที่ใช้ในโปรแกรมห้างนี้  $K_p, K_i, K_d, K_A, d, e, f$  และ  $T$  ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้สามารถกำหนดแบบไม่เจาะจงทั้งนี้เพื่อศึกษาผลการตอบสนองของตัวควบคุม

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรมดังนี้  $e(i-1)=0$ ,  $e(i-2)=0$ ,  $u_p(i-1)=0$ ,  $u_r(i-1)=0$ ,  $u_D(i-1)=0$ ,  $u_A(i-1)=0$  และ  $u_A(i-2)=0$

ขั้นตอนที่ 3 : รับค่าอินพุต  $e(i)$  จากนั้นทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณผลขององค์ประกอบพี เพื่อหาค่า  $u_p(i)$  ตามสมการ (5.5)

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณผลขององค์ประกอบไอ เพื่อหาค่า  $u_r(i)$  ตามสมการ (5.9)

ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณผลขององค์ประกอบดี เพื่อหาค่า  $u_D(i)$  ตามสมการ (5.13)

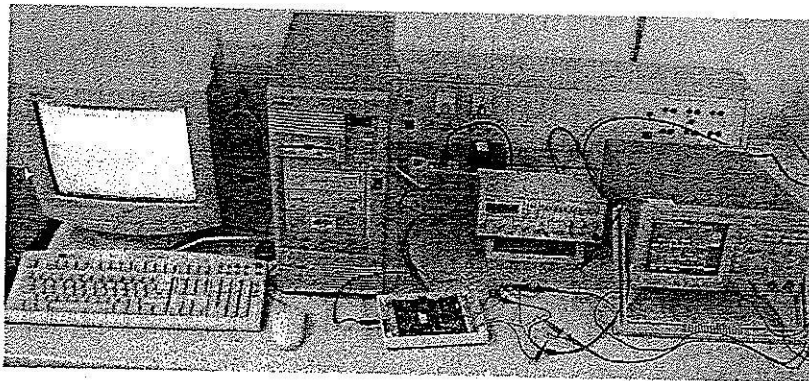
ขั้นตอนที่ 7 : คำนวณผลขององค์ประกอบเอ เพื่อหาค่า  $u_A(i)$  ตามสมการ (5.17)

ขั้นตอนที่ 8 : ส่งค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีเอ โดยทำการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

ขั้นตอนที่ 9 : ปรับค่าใหม่ให้กับตัวแปร  $e(i-1)=e(i)$ ,  $e(i-2)=(i-1)$ ,  $u_p(i-1)=u_p(i)$ ,  $u_r(i-1)=u_r(i)$ ,  $u_D(i-1)=u_D(i)$ ,  $u_A(i-1)=u_A(i)$  และ  $u_A(i-2)=u_A(i-1)$

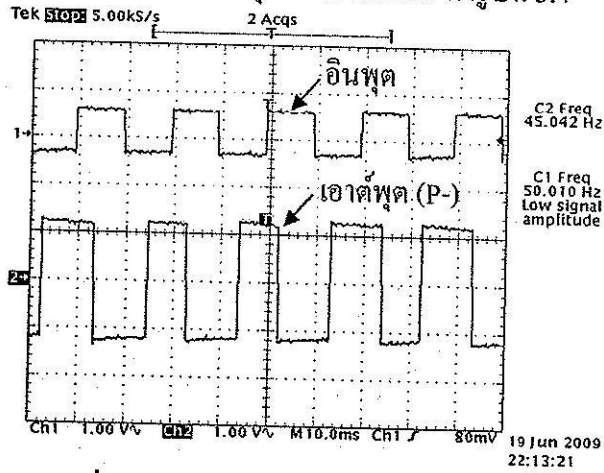
ขั้นตอนที่ 10 : วนกลับไปขั้นตอนที่ 3

การทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัลที่พัฒนาขึ้น ได้ทดสอบโดยใช้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับข้อมูลและแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล แล้วเข้าสู่กระบวนการคำนวณตามอัลกอริทึมของตัวควบคุมและส่งข้อมูลโดยแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ซึ่งจะถูกรวบรวมโดยออสซิลโลสโคปที่สามารถบันทึกภาพได้ ชุดอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.3



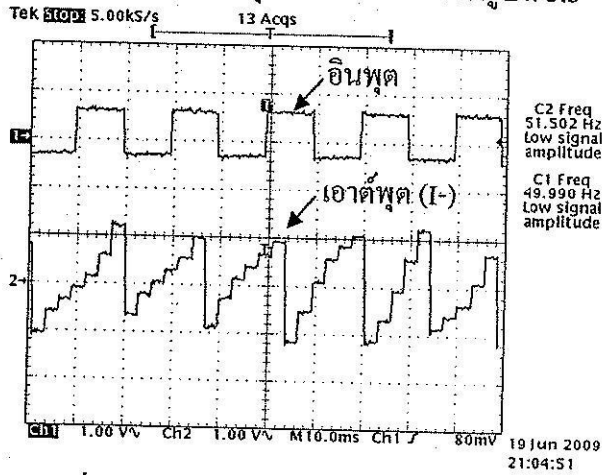
รูปที่ 5.3 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ตัวอย่างผลการทดสอบของตัวควบคุมพีแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 5.4



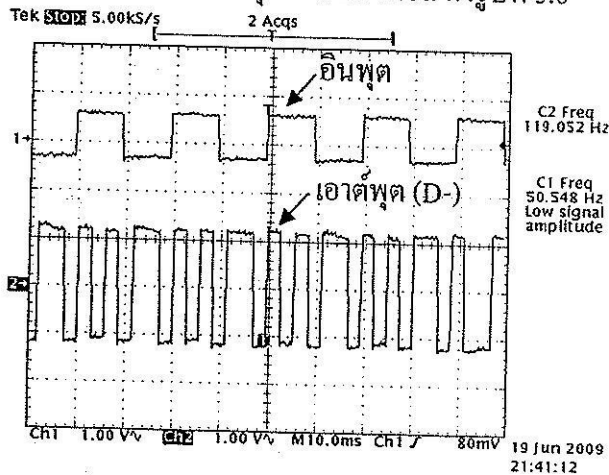
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมพี ( $K_p = 5$ )

ตัวอย่างผลการทดสอบของตัวควบคุมไอแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 5.5



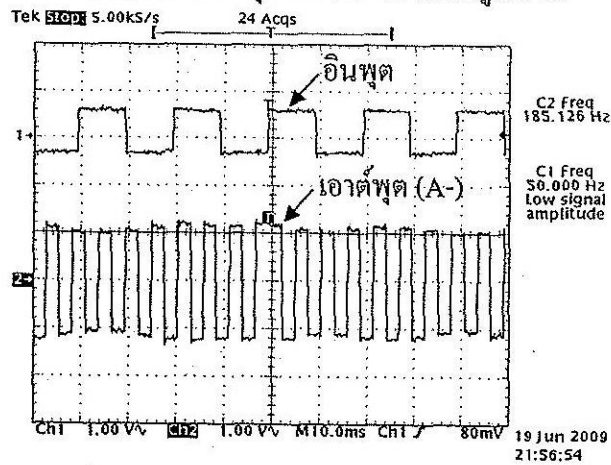
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบตัวควบคุมไอ ( $K_i = 62$ )

ตัวอย่างผลการทดสอบของตัวควบคุมดีแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบตัวควบคุมดี ( $K_d = 70$ )

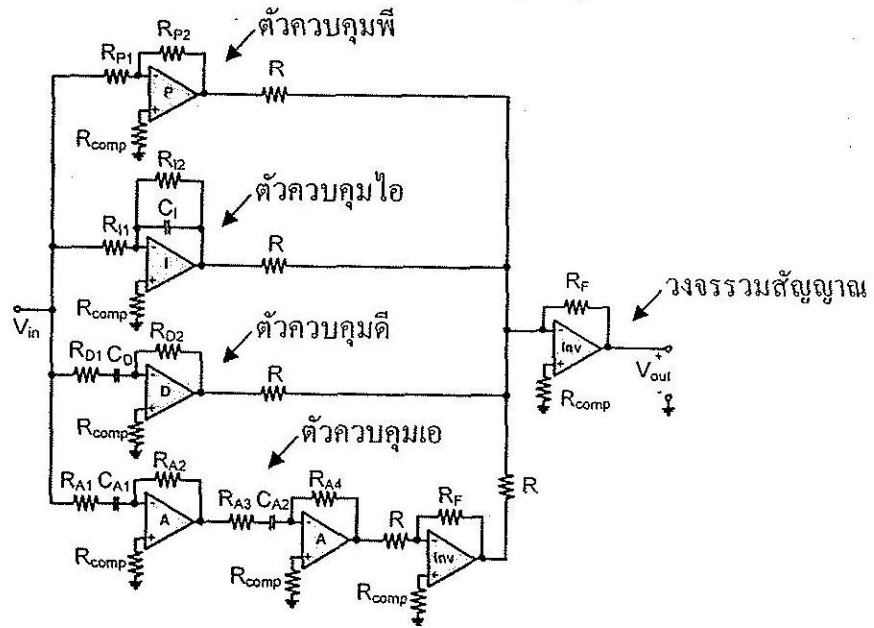
ตัวอย่างผลการทดสอบของตัวควบคุมแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบตัวควบคุมเอ (K<sub>A</sub> = 0.5)

5.3 การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก

การอนุวัตตัวควบคุมด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อก ด้วยการสร้างตัวควบคุมที่มีโครงสร้างแบบขนาน อาศัยออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก มีโครงสร้างของตัวควบคุมดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก โครงสร้างขนาน

จากโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีเออร์ูปที่ 5.8 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละองค์ประกอบได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

องค์ประกอบพี :

$$K_P = \frac{R_{P2}}{R_{P1}} \tag{5.18}$$

$$\text{องค์ประกอบไอ : } K_I = \frac{1}{R_{I1}C_I} \quad (5.19)$$

$$\text{องค์ประกอบดี : } K_D = R_{D2}C_D \quad (5.20)$$

$$\text{องค์ประกอบเอ : } K_A = R_{A2}C_{A1}R_{A4}C_{A2} \quad (5.21)$$

$R_{comp}$  มีหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าขาบวก

$R_{I2}$  ทำหน้าที่ช่วยให้  $C_I$  คายประจุเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตตอบสนองเร็วขึ้น ในวงจรตัวควบคุมอาจไม่จำเป็นต้องมีก็ได้ หากใช้ออปแอมป์ที่มีกระแสไบอัสต่ำ ( $\leq 1pA$ )

$R_{D1}$  เป็น low pass filter ของตัวควบคุมดี ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้าไปได้

$R_{A1}$  และ  $R_{A3}$  เป็น low pass filter ของตัวควบคุมเอ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้าไปได้

ออปแอมป์ Inv ในรูปที่ 5.8 ทำหน้าที่ช่วยในการกลับเฟส โดยมีค่าเกนของวงจรเท่ากับ 1 ( $R_f = R$ )

#### การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุม

ในการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุม จะทำการออกแบบโดยอิงจากการทดสอบจริง ซึ่งให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.9 (ก) – 5.12 (ค)

องค์ประกอบพี :

จากสมการที่ (5.18) หาค่า  $R_{p2}$  โดยที่กำหนดให้  $R_{p1} = 10k\Omega$

ดังนั้นจะได้

$$R_{p2} = K_p R_{p1}$$

$$R_{p2} = (10 \times 10^3) K_p \quad (5.22)$$

องค์ประกอบไอ :

จากสมการที่ (5.19) หาค่า  $R_{I1}$  โดยที่กำหนดค่าของ  $C_I$  จากการทดสอบคาพาซิเตอร์ที่เหมาะสมควรจะต้องมีค่ามากกว่า  $0.1 \mu F$  ในที่นี้จะกำหนดค่าของ  $C_I = 1 \mu F$

ดังนั้นหาค่า  $R_{I1}$  ได้จากสมการ

$$R_{I1} = \frac{1}{K_I C_I}$$

$$R_{I1} = \frac{1 \times 10^6}{K_I} \quad (5.23)$$

และหาค่า  $R_{I2}$  ได้จากสมการ

$$R_{I2} > 10R_{I1} \quad (5.24)$$

องค์ประกอบดี :

จากสมการที่ (5.20) หาค่า  $R_{D2}$  โดยที่กำหนดค่าของ  $C_f$  จากการทดสอบค่าของคาปาซิเตอร์ที่มีค่าเหมาะสม จะต้องมามีค่ามากกว่า  $0.1 \mu F$  โดยที่กำหนดให้  $C_D = 1 \mu F$

ดังนั้นจะได้

$$R_{D2} = \frac{K_D}{C_D}$$

$$R_{D2} = (1 \times 10^6) K_D \quad (5.25)$$

และหาค่า  $R_{D1}$  ได้จากสมการ

$$R_{D1} = \tau_1 \quad \text{โดยที่ } \tau_1 = d \quad (5.26)$$

องค์ประกอบเอ :

จากสมการที่ (5.21) ในการออกแบบกำหนดให้  $R_{A2} = R_{A4}$  และกำหนดให้  $C_{A1} = C_{A2}$  จากการทดสอบหากกำหนดค่าคาปาซิเตอร์ต่ำ (เช่น  $0.1 \mu F$ ) จะส่งผลให้เกิดการพุ่งลงที่สัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นจึงกำหนด  $C_{A1} = C_{A2} = 1 \mu F$

ดังนั้นจะได้

$$R_{A2} = \sqrt{\frac{K_A}{C_{A1} C_{A2}}}$$

$$R_{A2} = (1 \times 10^6) \sqrt{K_A} \quad (5.27)$$

และหาค่า  $R_{A1}$  ได้จากสมการ

$$R_{A1} = \tau_1 \quad \text{โดยที่ } \tau_1 = d \quad (5.28)$$

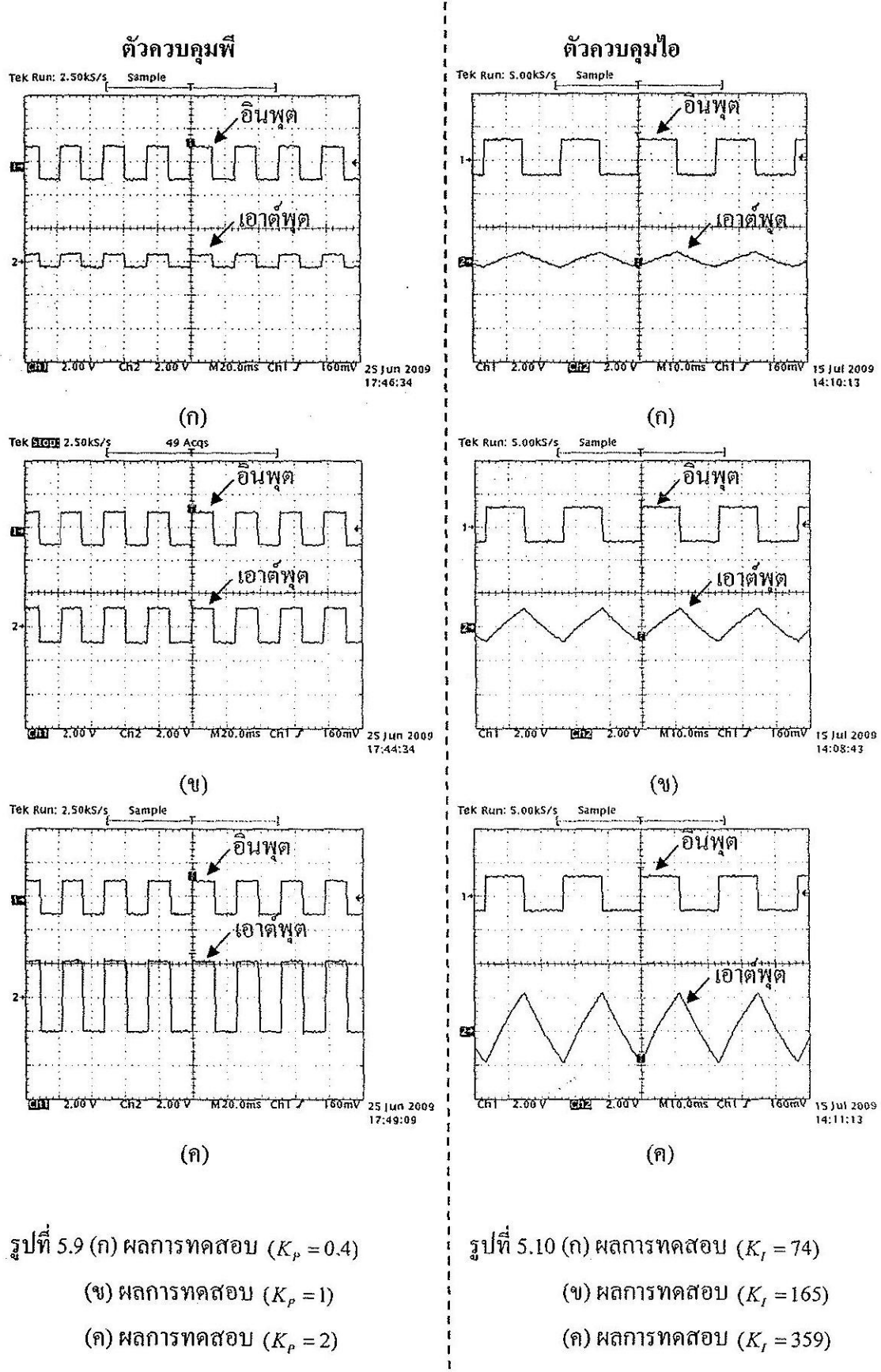
และหาค่า  $R_{A2}$  ได้จากสมการ

$$R_{A2} = \tau_2 \quad \text{โดยที่ } \tau_2 = e \quad (5.29)$$

เนื่องจาก  $R_{comp}$  ที่มีในวงจรตัวควบคุมดังรูปที่ 5.8 ใช้เพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าขาบวก

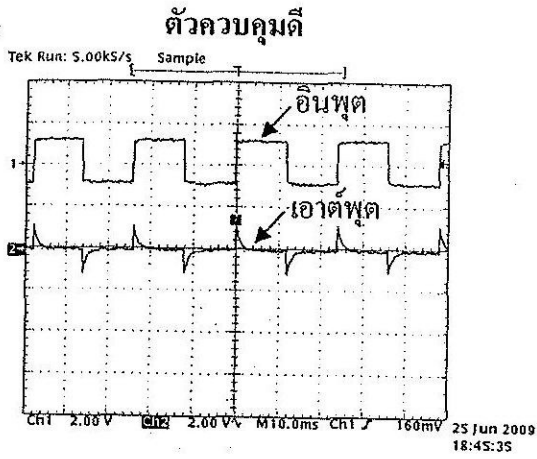
ดังนั้นจึงกำหนดค่า  $R_{comp} = 1k\Omega$  ดังนั้นจะได้  $R_f = R = 1k\Omega$

ผลการทดสอบตัวควบคุมด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อก โดยทดสอบด้วยสัญญาณอินพุตแบบ  
ขั้นบันได จากเครื่องกำเนิดสัญญาณมีผลการทดสอบดังนี้

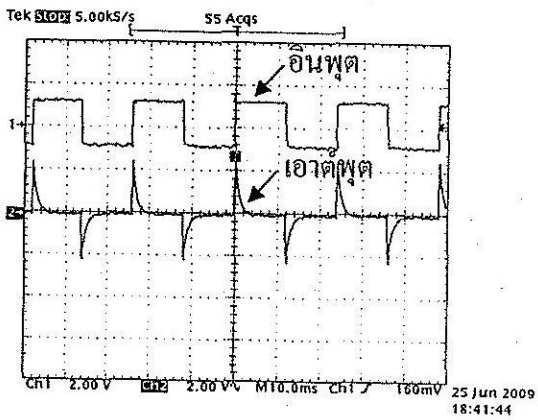


รูปที่ 5.9 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_p = 0.4$ )  
(ข) ผลการทดสอบ ( $K_p = 1$ )  
(ค) ผลการทดสอบ ( $K_p = 2$ )

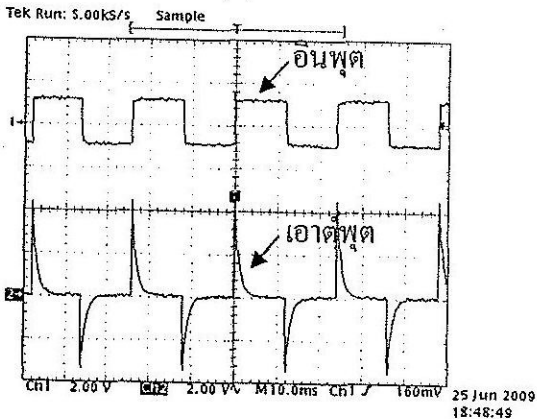
รูปที่ 5.10 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_i = 74$ )  
(ข) ผลการทดสอบ ( $K_i = 165$ )  
(ค) ผลการทดสอบ ( $K_i = 359$ )



(ก)



(ข)

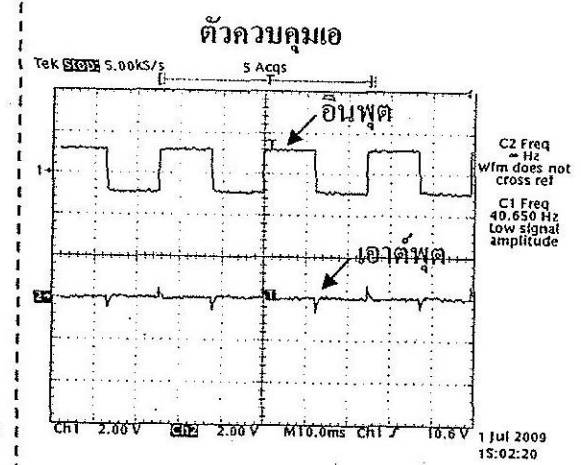


(ค)

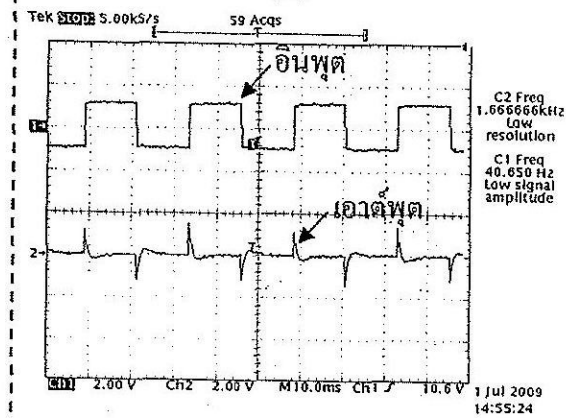
รูปที่ 5.11 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_D = 0.00069$ )

(ข) ผลการทดสอบ ( $K_D = 0.0016$ )

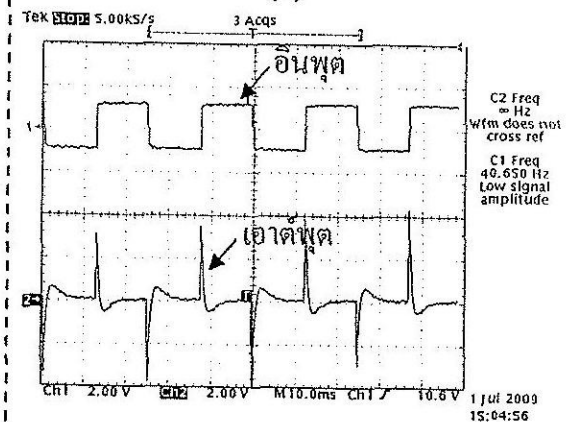
(ค) ผลการทดสอบ ( $K_D = 0.0028$ )



(ก)



(ข)



(ค)

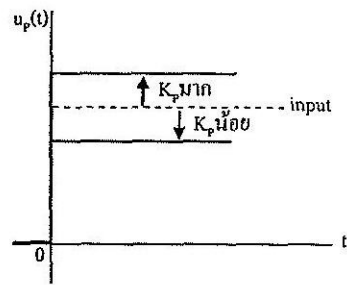
รูปที่ 5.12 (ก) ผลการทดสอบ ( $K_A = 3.1 \times 10^{-7}$ )

(ข) ผลการทดสอบ ( $K_A = 7.56 \times 10^{-7}$ )

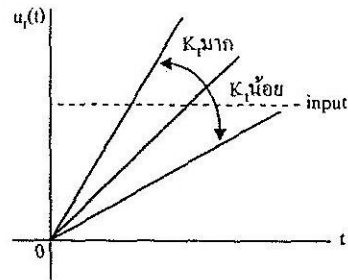
(ค) ผลการทดสอบ ( $K_A = 21.13 \times 10^{-7}$ )



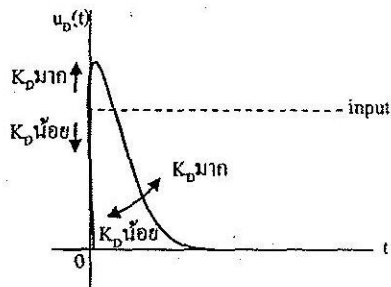
5.4 วิเคราะห์ผล



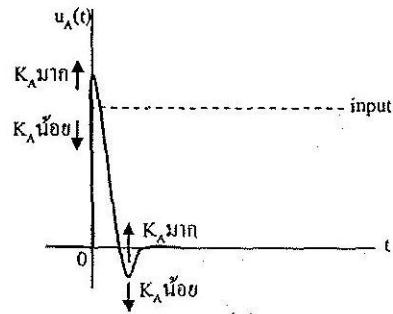
(ก)



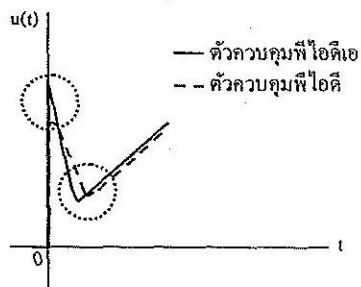
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได (ก) ตัวควบคุมพี

(ข) ตัวควบคุมไอ

(ค) ตัวควบคุมดี

(ง) ตัวควบคุมเอ

(จ) ตัวควบคุมพีไอดีเอ

จากการทดสอบตัวควบคุมแบบดิจิทัล ดังที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 เนื่องจากการมีความละเอียดจำกัดของ A/D และ D/A คอนเวอร์เตอร์ การรับส่งข้อมูลป้อนพอร์ต I/O ดำเนินการด้วยภาษาซีจึงใช้เวลาจำนวนมาก นอกจากนั้น การคำนวณค่าอนุพันธ์สัญญาณด้วยวิธีการทางดิจิทัลประสบปัญหาด้านสัญญาณรบกวนที่ปรากฏในสัญญาณทดสอบ ตัวควบคุมดีและเอมีความไวมากต่อการรบกวนดังกล่าว

การทดสอบตัวควบคุมทำได้อีกทางหนึ่งโดยใช้เทคโนโลยีแอนะล็อก ซึ่งได้ใช้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเป็นสัญญาณทดสอบ (test signal) ดังการนำเสนอผลทดสอบไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ตัวควบคุมพีจากวงจรแอนะล็อก เราสามารถปรับพจน์ของอิลิเมนต์พีได้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน ผลการทดสอบตัวควบคุมพี พบว่าเมื่อทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้  $K_p = 1$  ส่งผลให้เอาต์พุตมีขนาดเท่ากับอินพุต เมื่อทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้  $K_p < 1$  ส่งผลให้เอาต์พุตมีขนาดน้อยกว่าอินพุต และในทำนองเดียวกัน เมื่อทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้  $K_p > 1$  ส่งผลให้เอาต์พุตมีขนาดมากกว่าอินพุต พจน์ของอิลิเมนต์พีเป็นตัวปรับสัดส่วน ส่งผลต่อแอมพลิจูดของเอาต์พุต สามารถทำให้แอมพลิจูดของเอาต์พุตมากกว่า เท่ากับ หรือน้อยกว่าอินพุตได้ พิจารณาได้จากรูปที่ 5.13 (ก)

ตัวควบคุมไอจากวงจรแอนะล็อก เราสามารถปรับพจน์ของอิลิเมนต์ไอได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ผลของการทดสอบตัวควบคุมไอ พบว่าความต้านทานส่งผลต่อความชันและแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อปรับค่าความต้านทานมากขึ้น ส่งผลให้ความชันและแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตลดลง ส่วนคาปาซิเตอร์ส่งผลต่อความชันของสัญญาณเอาต์พุตอย่างเดียวกัน เมื่อปรับค่าคาปาซิเตอร์มากขึ้น ส่งผลให้ความชันของสัญญาณเอาต์พุตลดลง พจน์ของอิลิเมนต์ไอซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ที่ค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้  $K_i$  มีค่าน้อยลง เมื่อ  $K_i$  มีค่าน้อยลง ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตมีความชันและแอมพลิจูดน้อยลง พิจารณาได้จากรูปที่ 5.13 (ข)

ตัวควบคุมดีจากวงจรแอนะล็อก เราสามารถปรับพจน์ของอิลิเมนต์ดีได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ผลของการทดสอบตัวควบคุมดี พบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นขั้นบันได สัญญาณของเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งค่าความต้านทานส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์ เมื่อปรับค่าความต้านทานมากขึ้น ทำให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์มีขนาดสูงขึ้น ส่วนค่าคาปาซิเตอร์ ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณเอาต์พุต ที่คาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้ความกว้างของสัญญาณพัลส์มากขึ้น นั่นคืออัตราการสลายตัวของพจน์เอกซ์โปเนนเชียลน้อยลง พจน์ของอิลิเมนต์ดีซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ที่ค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้  $K_D$  มีค่ามากขึ้น เมื่อ  $K_D$  มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดสูงสุดและความกว้างของสัญญาณพัลส์มีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่าน้อยลง จะส่งผลให้  $K_D$  มีค่าน้อยลง ทำให้ขนาดสูงสุดและความกว้างของสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยลง นั่นคืออัตราการสลายตัวของพจน์เอกซ์โปเนนเชียลมากขึ้น พิจารณาได้จากรูปที่ 5.13 (ค)

ตัวควบคุมเอจากวงจรแอนะล็อก สามารถปรับพจน์ของอิลิเมนต์เอได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ผลของการทดสอบตัวควบคุมเอ พบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นขั้นบันได สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์คล้ายกับสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมดี แต่

สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเอมีความกว้างของสัญญาณพัลส์แคบกว่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมดี นอกจากนี้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเอมีการพุ่งลงอีกด้วย ซึ่งค่าความต้านทานส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์และการพุ่งลงนี้ เมื่อปรับค่าความต้านทานมากขึ้น ทำให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์และการพุ่งลงของสัญญาณมีแอมพลิจูดสูงขึ้น ส่วนค่าคาปาซิเตอร์ ส่งผลต่อการเกิดการพุ่งลงของสัญญาณ ถ้าคาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตมีการพุ่งลงลดลง เมื่อถึงค่าที่เหมาะสมสามารถกำจัดการพุ่งลงของสัญญาณได้ พจน์ของอิลิเมนต์เอซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ที่ค่าความความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้  $K_A$  มีค่ามากขึ้น เมื่อ  $K_A$  มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์มีค่ามากขึ้นและการพุ่งลงมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามหากค่าความความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้  $K_A$  มีค่าน้อยลง เมื่อ  $K_A$  มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยลงและการพุ่งลงมีค่ามากขึ้น พิจารณาได้จากรูปที่ 5.13 (ง)

สัญญาณควบคุมที่กำเนิดจากตัวควบคุมพีไอดีเอ สนองตอบต่ออินพุตขั้นบันได แสดงไว้ในรูปที่ 5.13 (จ) เปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดี ที่มีความคล้ายคลึงกันมาก เมื่อปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสม จะเห็นได้ถึงความแตกต่างในส่วน แอมพลิจูดของช่วงอนุพันธ์สัญญาณ ทั้งตอนพุ่งขึ้นและพุ่งลง อาจกล่าวได้ว่า ตัวควบคุมพีไอดีเอให้ผลกระทบด้านการอนุพันธ์สัญญาณที่รุนแรงและรวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของตัวควบคุมชนิดนี้

## 5.5 สรุป

บทที่ 5 ได้นำเสนอรายละเอียดการอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีเอ ทั้งแบบดิจิทัลและแอนะล็อก ในแบบดิจิทัลได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Z180 และ Dynamic C™ ในแบบแอนะล็อกใช้วงจร op-amp-RC การทดสอบได้ใช้สัญญาณขั้นบันไดเป็นสัญญาณทดสอบ (test signal) ตัวควบคุมแบบดิจิทัลซึ่งเขียนขึ้นด้วยภาษาซี ทำงานได้ช้าและประสบกับปัญหาด้านรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ต I/O ตลอดจนความละเอียดจำกัดตามธรรมชาติของ A/D และ D/A คอนเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก สามารถให้ภาพความเข้าใจกลไกการทำงานของอิลิเมนต์ต่างๆ ในตัวควบคุมได้ง่ายและชัดเจนกว่า เพราะทำงานแบบเวลาจริง (real-time) ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3 และ 5.4 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปคลื่นเอาต์พุตของตัวควบคุมเอว่า ตัวควบคุมเอสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการตอบสนองของพลานต์ได้คืออีกชั้นหนึ่ง เสริมการทำงานของตัวควบคุมดี นั้นหมายความว่าช่วงเวลานั้นในการตอบสนอง สามารถลดลงได้เมื่อมีการใช้ตัวควบคุมเอเสริมให้ตัวควบคุมพีไอดี

## บทที่ 6

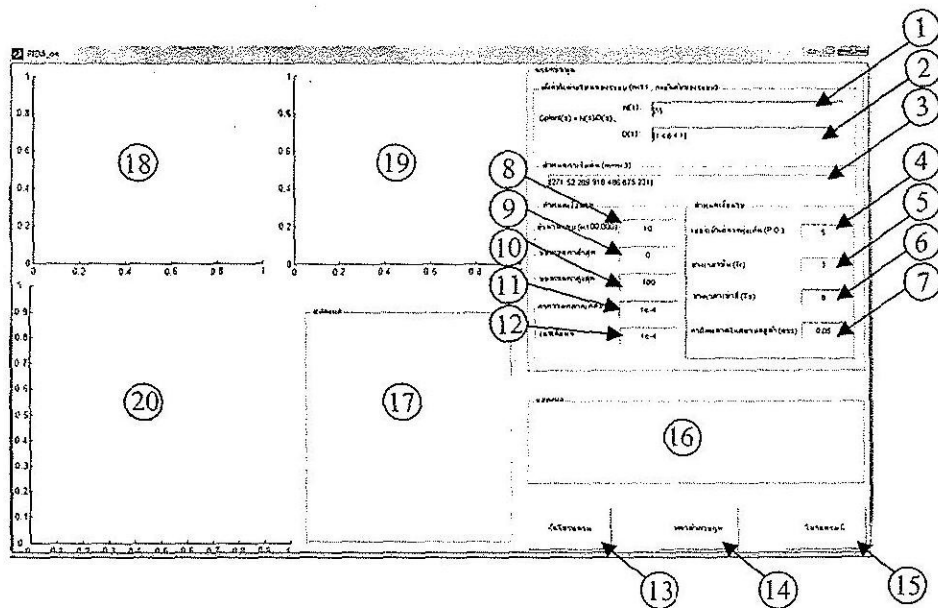
### การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมที่สุด

#### 6.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิก สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมที่สุด (รายละเอียดการออกแบบกล่าวไว้ในบทที่ 4) โดยทำการสร้างจาก Graphic user interface ในโปรแกรม MATLAB ทั้งนี้เพื่อความสะดวกกับผู้ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งผลที่ได้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แผนภาพผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา ของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดี ตลอดจนวงจรของตัวควบคุมซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุม และแสดงโปรแกรมภาษาซี อีกด้วย

#### 6.2 รายละเอียดทางกราฟฟิก

การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิก สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมที่สุดมี โครงสร้างดังรูปที่ 6.1 สำหรับรายละเอียดของโปรแกรมจะแสดงไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 6.1 โครงสร้างทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมที่สุด

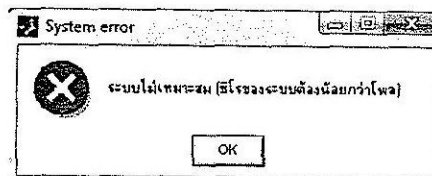
จากโครงสร้างทางกราฟฟิกรูปที่ 6.1 รูปแบบของกราฟฟิกแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนแรกเป็นส่วนของการกรอกข้อมูล (หมายเลข ① - ⑫) และส่วนที่สองคือส่วนของการแสดงผล (หมายเลข ⑬ - ⑳) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของส่วนต่างๆ ดังนี้

หมายเลข ① เป็นการกรอกข้อมูลซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานต์

- หมายเลข ② เป็นการกรอกข้อมูลโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ
- หมายเลข ③ กรอกข้อมูลค่าเริ่มต้นของผลเฉลย
- หมายเลข ④ ขอบเขตของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%)
- หมายเลข ⑤ ขอบเขตของช่วงเวลานิ่ง (s)
- หมายเลข ⑥ ขอบเขตของช่วงเวลาที่เข้าที่ (s)
- หมายเลข ⑦ ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว
- หมายเลข ⑧ จำนวนรอบการคำนวณซ้ำสูงสุด
- หมายเลข ⑨ ขอบเขตที่ต่ำที่สุดของผลเฉลย
- หมายเลข ⑩ ขอบเขตที่สูงที่สุดของผลเฉลย
- หมายเลข ⑪ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
- หมายเลข ⑫ ค่าเกรเดียนท์ที่ยอมรับได้
- หมายเลข ⑬ เป็นปุ่มกดเพื่อทำการรัน โปรแกรม
- หมายเลข ⑭ เป็นปุ่มกดเพื่อแสดงแผนภาพวงจรของตัวควบคุม
- หมายเลข ⑮ เป็นปุ่มกดเพื่อแสดง โปรแกรมภาษาซี
- หมายเลข ⑯ แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการรัน โปรแกรม
- หมายเลข ⑰ แสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมที่ได้จากการรัน โปรแกรม
- หมายเลข ⑱ แสดงผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบเมื่อมีตัวควบคุม
- หมายเลข ⑲ แผนภาพ โปดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ
- หมายเลข ⑳ แสดงแผนภาพของวงจรของตัวควบคุม

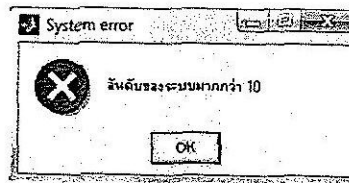
เงื่อนไขของการกรอกข้อมูล :

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ทำการกรอกข้อมูล ต้องมีจำนวนของซีโรน้อยกว่าจำนวนโพล หากกรอกข้อมูลของระบบที่มีจำนวนซีโรมากกว่าจำนวนโพล จะมีกล่องไดอะล็อกผิดพลาดเกิดขึ้นดังรูปที่ 6.2



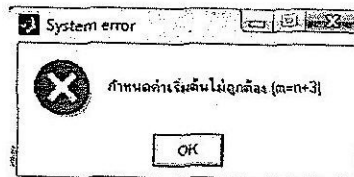
รูปที่ 6.2 กล่องไดอะล็อกผิดพลาด กรณีจำนวนซีโรมากกว่าจำนวนโพล

2. ระบบที่กำหนดต้องมีอันดับไม่เกิน 10 หากระบบมีอันดับมากกว่า 10 จะมีกล่องไดอะล็อกผิดพลาดเกิดขึ้นดังรูปที่ 6.3



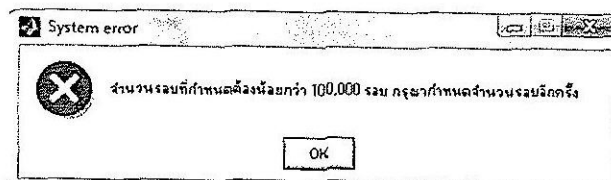
รูปที่ 6.3 กล่องไดอะล็อกผิดพลาด กรณีระบบมีอันดับมากกว่า 10

3. จำนวนค่าเริ่มต้นที่กำหนดคือ  $m = n + 3$  เมื่อ  $m$  คือจำนวนค่าเริ่มต้น  $n$  อันดับของระบบ หากกำหนดจำนวนของค่าเริ่มต้น  $m \neq n + 3$  จะเกิดกล่องไดอะล็อกผิดพลาดเกิดขึ้นดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 กล่องไดอะล็อกผิดพลาด กรณีจำนวนของค่าเริ่มต้น  $m \neq n + 3$

4. จำนวนรอบที่กำหนดต้องน้อยกว่า 100,000 รอบ หากกำหนดจำนวนรอบมากกว่าหรือเท่ากับ 100,000 รอบ จะเกิดกล่องไดอะล็อกผิดพลาดเกิดขึ้นดังรูปที่ 6.5

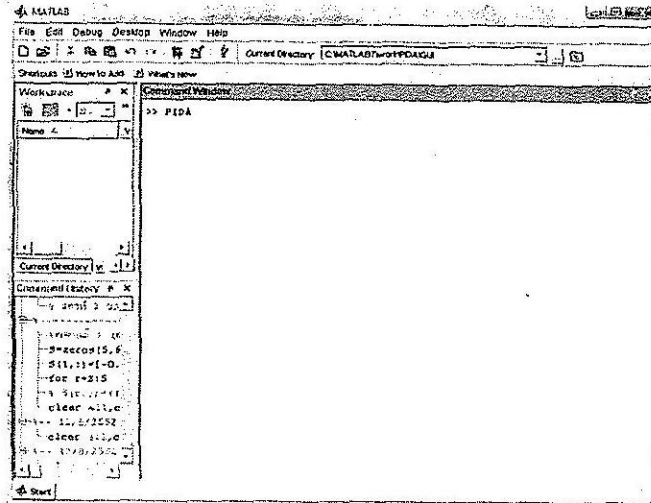


รูปที่ 6.5 กล่องไดอะล็อกผิดพลาด กรณีกำหนดจำนวนรอบมากกว่าหรือเท่ากับ 100,000 รอบ

6.3 การใช้งาน

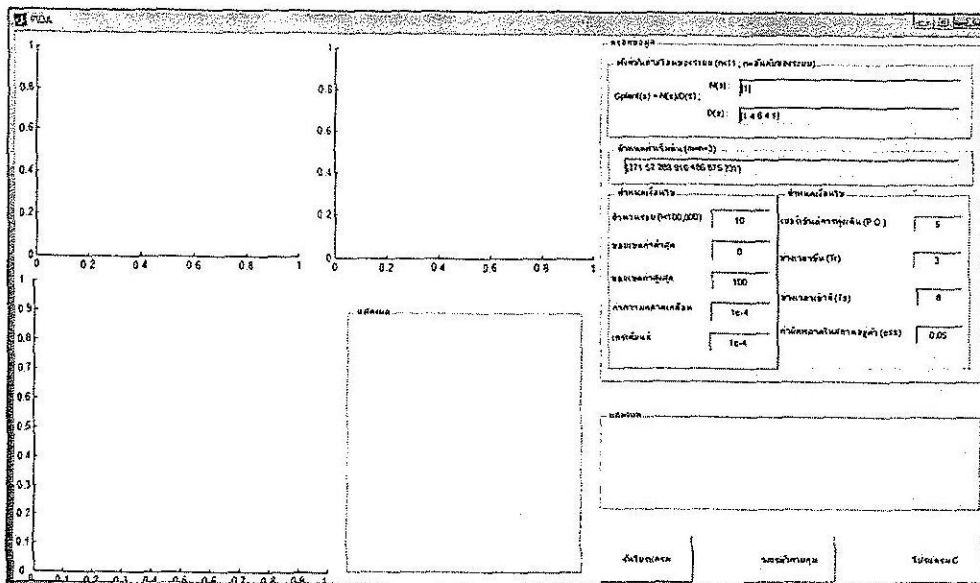
การใช้งานการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมมีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: พิมพ์ PIDA ลงใน Comman Window ของโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ขั้นตอนการเรียกกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุม

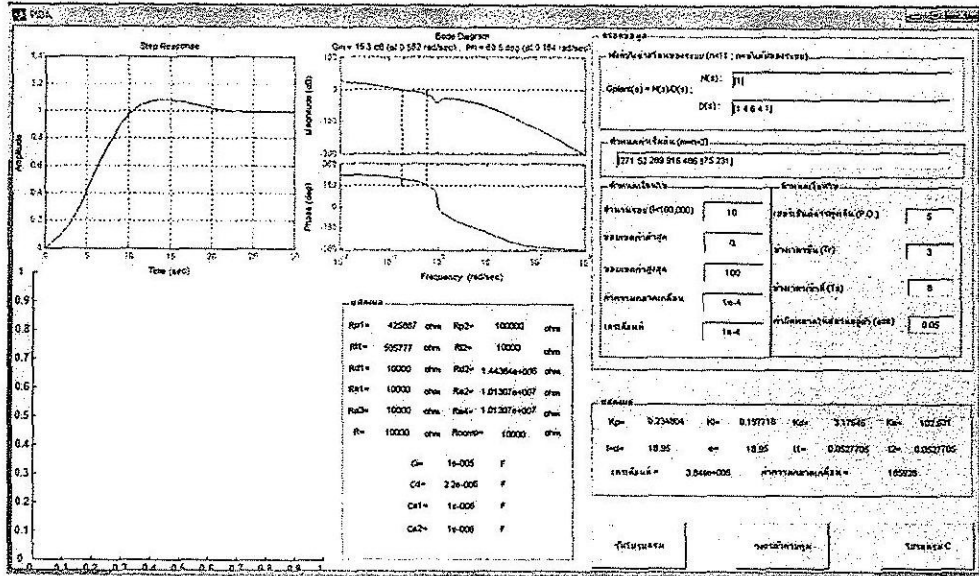
เมื่อทำการเรียกกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุม จะเกิดแผนภาพไคอะล็อกกับผู้ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุดดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 แผนภาพไคอะล็อกกับผู้ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม

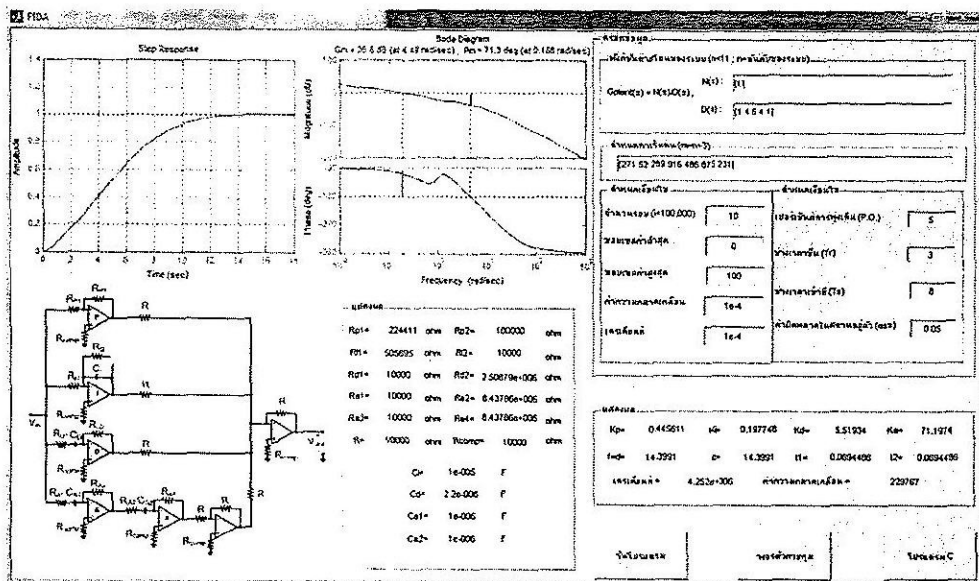


ขั้นตอนที่ 2: จากรูปที่ 6.1 กรอกข้อมูลต่างๆลงในส่วนที่ทำการกรอกข้อมูล (หมายเลข ① - ⑫) จากนั้นกดปุ่มรันโปรแกรมที่หมายเลข⑬ จะได้ผลการรันโปรแกรมดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แสดงผลเมื่อรันโปรแกรมแล้ว

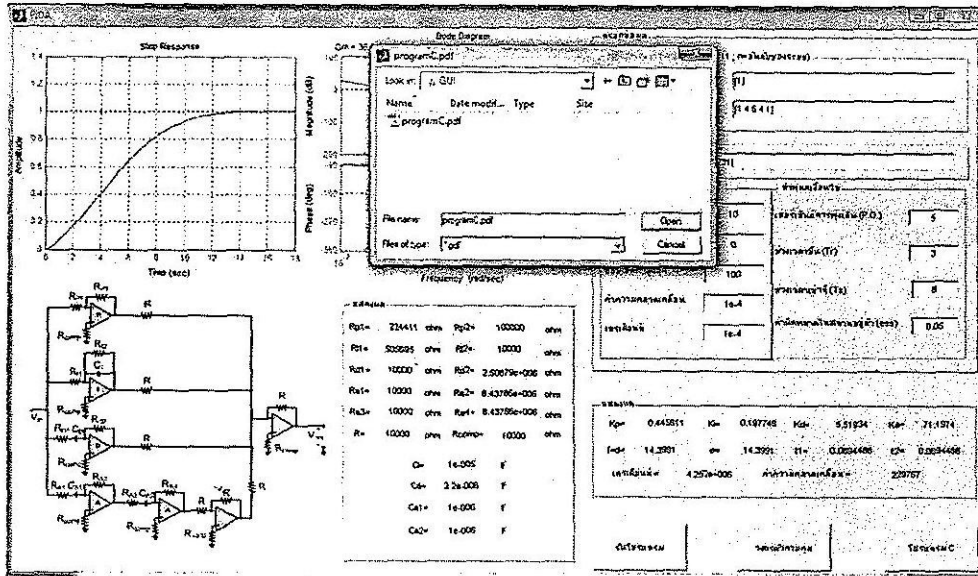
ขั้นตอนที่ 3: กดปุ่มวงจรวจรตัวควบคุมที่หมายเลข ⑭ ของรูปที่ 6.1 เมื่อต้องการดูรูปวงจรวจรของตัวควบคุม จะได้ผลดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดงผลเมื่อกดปุ่มวงจรวจรตัวควบคุม

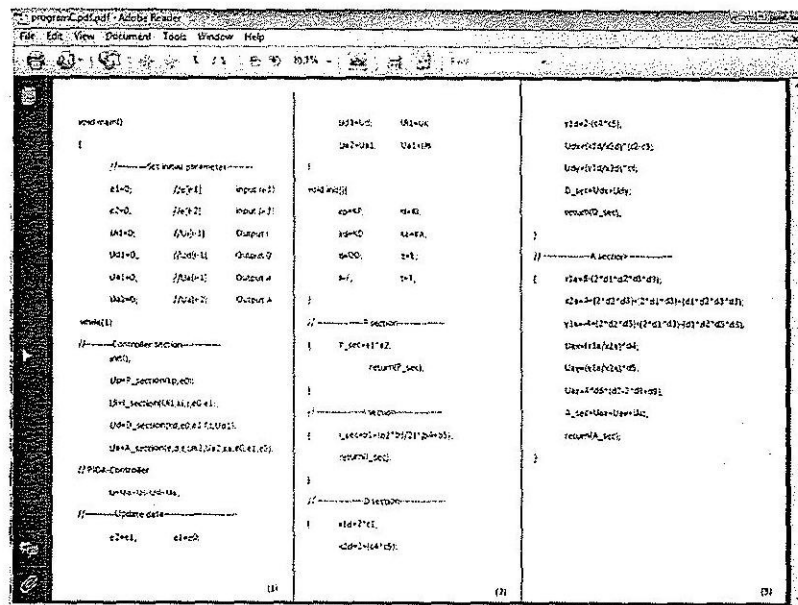


ขั้นตอนที่ 4 : เมื่อต้องการดูโปรแกรมภาษาซีของตัวควบคุมพีไอดีเอคกลุ่มโปรแกรม C ที่หมายเลข 15 ของรูปที่ 6.1 จะเกิดบล็อกให้เลือกไฟล์ จากนั้นเลือกที่ไฟล์ program.pdf แล้วกด open ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 แสดงผลเมื่อคลิกปุ่มโปรแกรม C

เมื่อเลือกไฟล์ program.pdf แล้วกด open จะ ได้ไฟล์ของโปรแกรมภาษาซีในรูปแบบของไฟล์ pdf ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 แสดงผลโปรแกรมภาษาซีของตัวควบคุม

#### 6.4 สรุป

การสร้างบล็อกการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิก สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุดมีประโยชน์ สะดวก และง่ายต่อการนำไปใช้งานเพื่อออกแบบตัวควบคุมอย่างมาก เนื่องจากผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูลเบื้องต้นให้กับโปรแกรม ตามเงื่อนไขของโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จนกว่าจะได้ค่าแอมพลิจูดและค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด หรือจนกว่าจะครบตามจำนวนรอบที่กำหนด ผลเฉลยที่ได้คือค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเอ ตลอดจนกราฟของผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา และแผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ เพื่อใช้ในการพิจารณาผลการตอบสนองที่ได้จากการออกแบบ อีกทั้งยังแสดงรูปวงจรวงจรตัวควบคุม พร้อมทั้งค่าพารามิเตอร์ของวงจรวงจรตัวควบคุม ซึ่งสามารถใช้ได้จริงหากต้องการนำไปใช้ควบคุม ตลอดจนแสดงโปรแกรมภาษาซีของตัวควบคุมอีกด้วย

บทที่ 7  
สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยและพัฒนานี้ ในขั้นแรกได้ศึกษาแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA ซึ่งย่อมาจาก proportional-integral-derivative-acceleration) ซึ่ง Dorf [2] ได้นำเสนอไว้เมื่อ ค.ศ. 1996 ตัวควบคุมดังกล่าวมีความน่าสนใจในด้านสมรรถนะการควบคุม ที่จะสามารถทำให้พลาเน็ตตอบสนองเร็วขึ้นกว่าการใช้เพียงตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอดียังเป็นเครื่องมือเพื่อการควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้งานอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งแนวทางการออกแบบตาม [2] ไม่ซับซ้อน เข้าใจง่าย โดยอาศัยข้อสมมุติฐานโพลเด่นของระบบวงปิด Dorf ได้แสดงผลการควบคุมพลาเน็ตอันดับสาม โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีเออย่าง ได้ผลดี ตัวควบคุมชนิดนี้ดังสมการ (1) ในบทที่ 1 จะเห็นว่ามิพารามิเตอร์ถึง 7 ตัว ได้แก่  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ,  $K_A$ ,  $d$ ,  $e$  และ  $f$  กระบวนการออกแบบที่สามารถดำเนินการด้วยมือจำเป็นต้องอาศัยการประมาณบางอย่าง จึงเป็นที่น่าสนใจว่า ถ้าดำเนินการตามขั้นตอนการออกแบบดั้งเดิมนี จะให้ผลดีต่อการควบคุมพลาเน็ตที่มีพลวัตซับซ้อน ดังการเสนอ โดย Astrom เพื่อการเทียบเคียงสมรรถนะหรือไม่ [4,5]

การทบทวนขั้นตอนการออกแบบดั้งเดิม จึงได้รับการนำเสนอโดยละเอียดไว้ในบทที่ 2 และได้ประยุกต์วิธีการดั้งเดิมเพื่อการออกแบบระบบควบคุมวงปิด ทำการควบคุม 7 พลาเน็ตที่มีพลวัตซับซ้อน ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งพบว่าในภาพรวมให้ผลได้ไม่ดีเท่าที่ควร ระบบวงปิดสำหรับบางระบบขาดเสถียร บางระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ต่ำ แต่ถึงกระนั้น ตัวควบคุมพีไอดีเอให้ผลดีมากในด้านความไว  $S_G^*$  กล่าวคือ ระบบวงปิดมีความสามารถที่ดีในการกำจัดกรรบกวนจากภายนอก และไม่ไวต่อความผิดพลาดของแบบจำลองในย่านความถี่ต่ำหรือความถี่ที่ใช้งานระบบวงปิด

การพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาคือเป็นจุดอ่อนของการออกแบบตามวิธีดั้งเดิม ให้สามารถใช้ได้ผลดีกับพลาเน็ตอันดับสูง และที่มีพลวัตซับซ้อน ได้เลือกดำเนินการด้วยวิธีพีชคณิตในแบบของการจัดวางตำแหน่งโพลอย่างเหมาะสมที่สุด (optimal pole-placement) ขั้นตอนการดำเนินงานได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ในการดำเนินงานต้องอาศัยความสัมพันธ์ทางพีชคณิต เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุม ให้เกิดการ จัดวางตำแหน่ง โพลตามต้องการ ที่มาของความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความซับซ้อน จึงได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ก. การแก้สมการพีชคณิตใช้โปรแกรม MATLAB ที่สามารถหาผลเฉลยของสมการทั้งในกรณีปกติ กรณีกำหนดเกิน และกำหนดขาดได้ การหาผลเฉลยที่เหมาะสมใช้วิธีมินิไมซ์ค่าเกรเดียนท์  $J = \int |e|^2 dt$  ตามเงื่อนไข  $\| \nabla J_k \| < \epsilon$  เพื่อยุติการคำนวณแบบวนซ้ำ รูปแบบการดำเนินงานหาค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด เป็นดังที่แสดงด้วยแผนภูมิในรูปที่ 4.1 ผลการดำเนินงานได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 พบว่า ระบบวงปิดทำการควบคุมทั้ง 7 พลาเน็ตที่

ควบคุมยากได้ผลเป็นอย่างดี ทั้งด้านการตอบสนองทางเวลา เสถียรภาพสัมพัทธ์ ความไว  $S_G^T$  และความสามารถในการฟื้นคืนระบบจากการถูกรบกวนด้วยสัญญาณภายนอกแบบขั้นบันได ที่เป็นการรบกวนขนาดเล็ก แนวทางการอนุวัตตัวควบคุมทั้งแบบคิจิตอลและแบบแอนะล็อก ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5 พร้อมผลทดสอบด้วยสัญญาณทดสอบแบบขั้นบันได แสดงให้เห็นถึงผลของการปรับค่าพารามิเตอร์  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  และ  $K_A$  ที่มีต่อสัญญาณควบคุม  $u(t)$  ของตัวควบคุม ซึ่งยืนยันได้ว่าตัวควบคุมเอเป็นตัวช่วยเร่งการตอบสนองของพลานต์ให้เร็วขึ้นได้ เสริมการทำงานของตัวควบคุมดี

เนื่องจากการออกแบบตามวิธีการที่นำเสนอ อาศัยการคำนวณซ้ำในกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุด จึงได้พัฒนาโปรแกรม CAD ขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน โปรแกรมใช้ MATLAB และ GUI มีรายละเอียดการใช้งานอธิบายไว้ในบทที่ 6 การออกแบบจำกัดอันดับของพลานต์อยู่ที่อันดับ 10 เมื่อโปรแกรมคำนวณเสร็จสิ้น จะให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม รายละเอียดโปรแกรมภาษาซีของตัวควบคุมแบบคิจิตอล ตลอดจนแผนภาพวงจรแอนะล็อกของตัวควบคุมพร้อมขนาด R และ C ต่างๆในวงจร ที่ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที

ผลการศึกษาวิจัยพบว่า แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอดั้งเดิมใช้ได้ผลดีกับระบบอันดับสาม ไม่สามารถใช้ได้ผลดีกับระบบอันดับที่สูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ที่สามารถใช้กับพลานต์ได้ทุกอันดับ อาศัยวิธีการคำนวณแบบวนซ้ำ โดยมีนิไมซ์ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดยกกำลังสอง และมีฟังก์ชันการปรับโทษ ค่าความผิดพลาดนี้เป็นผลต่างระหว่างอินพุตในอุดมคติแบบขั้นบันไดกับเอาต์พุตของระบบ การยุติการคำนวณพิจารณาตามเงื่อนไขของเกรเดียนท์  $\|\nabla J_k\| < \varepsilon$  ซึ่ง  $\varepsilon \approx 0$  พบว่าปัญหาการออกแบบเป็นปัญหาการคำนวณทางพีชคณิตที่จำนวนสมการไม่เท่ากับจำนวนตัวแปร ที่อาจเป็นแบบกำหนดเกินหรือกำหนดขาด ทำให้ต้องพึ่งพาการคำนวณโดยประมาณด้วยวิธีเชิงเลข จึงส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนในผลลัพธ์ที่ได้ในบางกรณีตามการนำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 ตลอดจนได้นำเสนอแนวทางแบบทั่วไปในการอนุวัตตัวควบคุมทั้งแบบคิจิตอลและแอนะล็อก และได้พัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบตัวควบคุมอีกด้วย

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในอนาคตควรจะได้พัฒนาเทคโนโลยีระบบควบคุมเพื่อใช้งานจริงขึ้น โดยมีตัวควบคุมพีไอดีเอเป็นตัวดำเนินการ และทดสอบสมรรถนะเพื่อรายงานผล

7.2.1 งานวิจัยเชิงทฤษฎี อาจได้รับการขยายผลไปในแนวทางการควบคุมคงทน การควบคุมเหมาะที่สุด โดยอิงพหุวัตถุประสงค์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] K.H. Ang, G.Chong and Y.Li, "PID Control System Analysis, Design and Technology", IEEE Trans. Control Systems Technology, 13(4), 559-576, 2005.
- [2] R.C. Dorf and S.Jung, "Analytical PIDA Controller Design Technique for a Third Order System", 35<sup>th</sup> IEEE Conf. Decision and Control, Kobe, Japan, 2513-2518, 1996.
- [3] H. Dal-Young et.al., "The Design of PIDA Controller with Pre-Compensator", IEEE Conf. ISIE, Pusan, Korea, 798-804, 2001.
- [4] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Benchmark Systems for PID Control", IFAC Digital Control : Past, Present and Future of PID Control, Terrassa, Spain, 165-166, 2000.
- [5] D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, "Obtaining an Optimum PID Controller Via Adaptive Tabu Search", Lecture Notes in Computer Science, 8<sup>th</sup> Int. Conf. Adaptive and Natural Computing Algorithms (ICANNGA 2007) - Part II, Warsaw, Poland, 4432, Springer, 2007.
- [6] Little Giant (Technical Reference Manual), Z-world Engineering, May 1, 1995.
- [7] K.J. Astrom and B.Wittenmark, Computer-Controlled Systems, Prentice-Hall, 1997.
- [8] R. Baldick, Applied Optimization, Cambridge University Press, 2006.

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรมการอนุรักษ์ตัวควบคุมพีไอดีเอ (ภาษาซี)

โปรแกรมการอนุรักษ์ตัวควบคุมพีไอดีเอ เป็น โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา ไคนามิคซี เพื่อใช้ กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Z180 ซึ่งอาศัยปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดีเอ โครงสร้างของโปรแกรมประกอบด้วย 4 ส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการประกาศข้อมูล ใช้ในการกำหนดค่าให้กับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ดีเอ ( $K_p, K_I, K_D, K_A, d, e, f$  และ  $T$ ) ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้สามารถกำหนดแบบไม่เจาะจงทั้งนี้เพื่อ ศึกษาผลการตอบสนองของตัวควบคุม

ส่วนที่ 2 เป็นการประกาศชื่อตัวแปรและชื่อของโปรแกรมย่อย ใช้ประกาศชื่อตัวแปรและ ชื่อโปรแกรมย่อยที่ใช้ในโปรแกรม

ส่วนที่ 3 ส่วนของโปรแกรมหลัก (main) ส่วนนี้เริ่มจากกำหนดค่าเริ่มต้นของสัญญาณให้ กับตัวแปร จากนั้นทำการรับค่าอินพุต  $e(i)$  แล้วแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล เรียกผลลัพธ์ที่ ได้จากฟังก์ชันย่อยของตัวควบคุมพี ตัวควบคุมไอ ตัวควบคุมดี และตัวควบคุมเอ มารวมเป็นตัว ควบคุมพีไอดีเอ จากนั้นส่งข้อมูลเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีเอ โดยทำการแปลงสัญญาณดิจิตอล เป็นแอนะล็อก ทำการอัปเดตข้อมูลของสัญญาณแล้วจึงวนกลับไปรับค่าอินพุต  $e(i)$  ใหม่

ส่วนที่ 4 ส่วนของโปรแกรมย่อย ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยของตัวควบคุมพี (P\_section) ตัวควบคุมไอ (I\_section) ตัวควบคุมดี (D\_section) และตัวควบคุมเอ (A\_section) โปรแกรมย่อย เหล่านี้จะทำการคำนวณผลขององค์ประกอบ ตามสมการ (5.5), (5.9), (5.13) และ (5.17) ในบทที่ 5 ตามลำดับ

```
//-----Z180 Microcontroller board-----
//-----BL1120/Little Giant(Zworld):Dynamic C-----
// Created by Miss Sunisa Sornmuang, 25 June 2009, (as a RA of this project under direction and
// supervision of Prof.S.Sujitjorn)
```

```
#include "stdio.h"
```

```
#use drivers.lib
```

```
#define KP 5
```

```
#define KI 63
```

```
#define KD 70
```

```
#define KA 0.5
```

```
#define DD 50
```

```
#define E 40
```

```
#define F 30
```

```
#define T 0.5
```

```
float kp,ki,kd,ka,d,e,f,t;
```

```
float e0,e1,e2;
```

```
float Up,Ui,Ui1,Ud,Ud1,Udx,Udy,Ua,Ua1,Ua2,Uax,Uay,Uaz;
```

```
float x1d,x2d,y1d,x1a,x2a,y1a;
```

```
float P_section(float,float);
```

```
float I_section(float,float,float,float,float);
```

```
float D_section(float,float,float,float,float,float);
```

```
float A_section(float,float,float,float,float,float,float,float);
```

```
void init();
```

```
void main()
```

```
{
```

```
    int Adcdata;
```

```
    float U;
```

```

//-----Set initial parameter-----
e1=0;           //e[i-1]       input (i-1)
e2=0;           //e[i-2]       input (i-2)
Ui1=0;          //Ui[i-1]      Output I
Ud1=0;          //Ud[i-1]      Output D
Ua1=0;          //Ua[i-1]      Output A
Ua2=0;          //Ua[i-2]      Output A

while(1)
{

//-----Receive input port 0(ADC)-----
Adcdata = ad_rd12(0);
    if(Adcdata<0){
        Adcdata *= -1; //Convert value of adc input
    }
    e0=Adcdata;

//-----Controller section-----
    init();
    Up=P_section(kp,e0);
    Ui=I_section(Ui1,ki,t,e0,e1);
    Ud=D_section(kd,e0,e1,f,t,Ud1);
    Ua=A_section(e,d,t,Ua1,Ua2,ka,e0,e1,e2);
    //U=Up;           // P-Controller
    //U=Ui;           // I-Controller
    //U=Ud;           // D-Controller
    //U=Ua;           // A-Controller
    //U=Up+Ui;        // PI-Controller
    //U=Up+Ud;        // PD-Controller
    //U=Up+Ui+Ud;     // PID-Controller
    U=Up+Ui+Ud+Ua;   // PIDA-Controller
}

```



```

//-----Sent data to output (DAC)-----
wdac(U);
hitwd();

//-----Update data-----
e2=e1;
e1=e0;
Ud1=Ud;
U11=Ui;
Ua2=Ua1;
Ua1=Ua;
}
}
void init(){
    kp=KP;
    ki=KI;
    kd=KD;
    ka=KA;
    d=DD;
    e=E;
    f=F;
    t=T;
}
// -----P section-----
float P_section(float a1,float a2){
    float P_sec;
    P_sec=a1*a2;
    return(P_sec);
}

```

```

//-----I section-----
float I_section(float b1,float b2,float b3,float b4,float b5){
    float I_sec;
    I_sec=b1+(b2*b3/2)*(b4+b5);
    return(I_sec);
}

//-----D section-----
float D_section(float c1,float c2,float c3,float c4,float c5,float c6){
    float D_sec,x1d,x2d,y1d,Udx,Udy;
    x1d=2*c1;
    x2d=2+(c4*c5);
    y1d=2-(c4*c5);
    Udx=(x1d/x2d)*(c2-c3);
    Udy=(y1d/x2d)*c6;
    D_sec=Udx+Udy;
    return(D_sec);
}

//-----A section-----
float A_section(float d1,float d2,float d3,float d4,float d5,float d6,float d7,float d8,float d9){
    float A_sec,x1a,x2a,y1a,Uax,Uay,Uaz;
    x1a=8-(2*d1*d2*d3*d3);
    x2a=4+(2*d2*d3)+(2*d1*d3)+(d1*d2*d3*d3);
    y1a=-4+(2*d2*d3)+(2*d1*d3)-(d1*d2*d3*d3);
    Uax=(x1a/x2a)*d4;
    Uay=(y1a/x2a)*d5;
    Uaz=4*d6*(d7-2*d8+d9);
    A_sec=Uax+Uay+Uaz;
    return(A_sec);
}

```

## ภาคผนวก ข

### โปรแกรมการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด

โปรแกรมการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด เป็นโปรแกรมที่ทำการสร้างจาก Graphic User Interface (GUI) ในโปรแกรม MATLAB ทั้งนี้เพื่อความสะดวกกับผู้ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ซึ่งผลที่ได้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แผนภาพผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ วงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ ตลอดจนวงจรของตัวควบคุมซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุม และแสดงโปรแกรมภาษาซีอีกด้วย โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 ส่วนหัวของโปรแกรม เป็นโปรแกรมที่มาพร้อมกับบล็อกที่เราจะทำการสร้าง

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของตัวโปรแกรมที่เราทำการสร้างเพื่อรับค่าพารามิเตอร์จากผู้ใช้เพื่อนำไปเข้ากระบวนการค้นหาตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด ตลอดจนแสดงผลลัพธ์ต่างๆเมื่อเข้ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เช่น แสดงข้อความ แสดงผลการคำนวณ แสดงแผนภาพ และแสดงโปรแกรมภาษาซีออกผ่านทางหน้าจอของผู้ใช้

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของกระบวนการคำนวณหาตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งอัลกอริทึมที่ใช้ได้แสดงเนื้อหาโดยละเอียดไว้ในบทที่ 4

```

% -----
% MATLAB (GUI) for Classical method
% Created by Miss Sunisa Sornmuang,13 August 2009, (as a RA of this project under direction
% and supervision of Prof.S.Sujitjorn)
% -----

% ส่วนที่หนึ่ง เป็นส่วนหัวของโปรแกรม
function varargout = PIDA(varargin)
% PIDA M-file for PIDA.fig
% PIDA, by itself, creates a new PIDA or raises the existing
% singleton*.
% H = PIDA returns the handle to a new PIDA or the handle to
% the existing singleton*.
% PIDA('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in PIDA.M with the given input arguments.
% PIDA('Property','Value',...) creates a new PIDA or raises
% the existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before PIDA_OpeningFunction gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to PIDA_OpeningFcn via varargin.
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Copyright 2002-2004 The MathWorks, Inc.
% Edit the above text to modify the response to help PIDA
% Last Modified by GUIDE v2.5 28-Jul-2009 12:59:48

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @PIDA_OpeningFcn, ...

```

```

        'gui_OutputFcn', @PIDA_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [] , ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before PIDA is made visible.
function PIDA_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to PIDA (see VARARGIN)

% Choose default command line output for PIDA
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% initialize_gui(hObject, handles, false);
% % UIWAIT makes PIDA wait for user response (see UIRESUME)
% % uiwait(handles.figure1);

```

```

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = PIDA_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% ส่วนที่ 2. เป็นส่วนของตัวโปรแกรม
function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit16 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit16 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit16 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit16 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function text26_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject  handle to text26 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of text26 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of text26 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text26_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to text26 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a double
%   min_rand=str2num(get(hObject,'String'));

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```



```

% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a double

% max_rand=str2num(get(hObject,'String'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit14 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit14 as a double

% error_min=str2num(get(hObject,'String'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit15 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit15 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit7 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text

```

```

%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else

```

```

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes on button press in pushbutton12.
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Find the state of the pushbutton12
state=get(handles.pushbutton12,'Value');

num=str2num(get(handles.edit16,'String'));
den=str2num(get(handles.text26,'String'));
aal=str2num(get(handles.edit6,'String'));
tr=str2num(get(handles.edit10,'String'));
ts=str2num(get(handles.edit9,'String'));
stdy=str2num(get(handles.edit8,'String'));
ov=str2num(get(handles.edit7,'String'));
norm_min=str2num(get(handles.edit15,'String'));
error_min=str2num(get(handles.edit14,'String'));
max_rand=str2num(get(handles.edit13,'String'));
min_rand=str2num(get(handles.edit12,'String'));
iter=str2num(get(handles.edit11,'String'));

if length(den)>11
    errordlg('อันดับของระบบมากกว่า 10 ','System error')
elseif length(num)>length(den)
    errordlg('ระบบไม่เหมาะสม (ซีโรของระบบต้องน้อยกว่าโพล)','System error')
elseif length(aal)~=length(den)+2
    errordlg('กำหนดค่าเริ่มต้น ไม่ถูกต้อง (m=n+3) ','System error')
elseif iter>=1e5

```

```
errorldg('จำนวนรอบที่กำหนดต้องน้อยกว่า 100,000 รอบ กรุณากำหนดจำนวนรอบอีก
ครั้ง','System error')
```

```
%ส่วนที่ 3. เป็นส่วนของกระบวนการค้นหาตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด
```

```
al=aal';
rang=0.01;          %Set step rang of step response
tt=100;            %Set max time of step response
para_set=4;        %Set count for parameter set(random)
rho=1000;          %Factor for fernalty
```

```
gp=tf(num,den);
disp('กำลังรัน โปรแกรม')
% disp(' Classical methode for PIDA controller')
% disp(' iter      Gradient      error(J)')
```

```
% Numerical for PIDA
```

```
%-----
```

```
%-----
```

```
kk=1;
alfa_new=al';
% check coefficient for den(1) of Plant.(must be =1)
```

```
if den(1)~=1
```

```
    nul=num/den(1);
```

```
    den1=den/den(1);
```

```
else
```

```
    nul=num;
```

```
    den1=den;
```

```
end
```

```
% Check order of plant
```

```
Lden=length(den);
```

```
Lnum=length(num);
```

```

n=Lden-1;          %order of plant
Lden1=Lden;
Lnum1=Lnum;

% check zero of plant
for i=1:Lden
    if i<=Lnum
        num1(Lden1)=nu1(Lnum1);
        Lnum1=Lnum-i;
    else
        num1(Lden1)=0;
    end
    Lden1=Lden-i;
end

% Check length between pole and zero
if Lnum<Lden

    % case1: zero of plant < pole of plant

    %create matrix A
    for i=1:1:n+3
        if i<=n+1
            A(i,1)=den1(i);
        else
            A(i,1)=0;
        end

        if i>1&i<=n+2
            A(i,2)=den1(i-1);
        else
            A(i,2)=0;
        end
    end
end

```



```
end

if i>3
    A(i,3)=num1(i-2);
else
    A(i,3)=0;
end

if i>2&i<n+3
    A(i,4)=num1(i-1);
else
    A(i,4)=0;
end

if i>1&i<n+2
    A(i,5)=num1(i);
else
    A(i,5)=0;
end

if i<n+1
    A(i,6)=num1(i+1);
else
    A(i,6)=0;
end

end

% Value of alfa
for i=1:1:n+3
    if i<=n
        alf(i)=al(i)-den1(i+1);
```

```
else
    alf(i)=al(i);
end
end
alfa=alf;

% Solve equation for find x
x=linsolve(A,alfa);

% Solve equation for find k,a,b,z
k=x(6);
u1=-x(6);
u2=x(5);
u3=-x(4);
u4=x(3);
z1=[u1 u2 u3 u4];
zz=roots(z1);
a=zz(1);
b=zz(2);
z=zz(3);

% Solve equation for find d,e
v1=-1;
v2=x(1);
v3=-x(2);
d1=[v1 v2 v3];
dd=roots(d1);
h2=length(dd);

else
```

```

% case2: zero of plant = pole of plant
% create matrix A
for i=1:n+3
    if i<=n
        A(i,1)=den1(i+1);    %column 1, row 1 to n+3
        A(i,7)=num1(i+1);    %column 7, row 1 to n+3
    else
        A(i,1)=0;           %column 1, row 1 to n+3
        A(i,7)=0;           %column 7, row 1 to n+3
    end

    if i<=n+1
        A(i,2)=den1(i);     %column 2, row 1 to n+3
        A(i,6)=num1(i);     %column 6, row 1 to n+3
    else
        A(i,2)=0;           %column 2, row 1 to n+3
        A(i,6)=0;           %column 6, row 1 to n+3
    end

    if (i==1)|(i==n+3)
        A(i,3)=0;           %column 3, row 1 to n+3
        A(i,5)=0;           %column 5, row 1 to n+3
    else
        A(i,3)=den1(i-1);   %column 3, row 1 to n+3
        A(i,5)=num1(i-1);   %column 5, row 1 to n+3
    end

    if i<=2
        A(i,4)=0;           %column 4, row 1 to n+3
    else
        A(i,4)=num1(i-2);   %column 4, row 1 to n+3
    end
end

```

```

end

% Solve equation for find x
alfa='al';
x=linsolve(A,alfa);

% Solve equation for find k,a,b,z
k=x(7)/x(1);
u1=-1;
u2=(x(1)*x(6)+x(6)*x(7)*num1(1))/x(7);
u3=-(x(1)*x(5)-x(7)*x(5)*num1(1))/x(7);
u4=(x(1)*x(4)+x(4)*x(7)*num1(1))/x(7);
z1=[u1 u2 u3 u4];
zz=roots(z1);
a=zz(1);
b=zz(2);
z=zz(3);

% Solve equation for find d,e
v1=1;
v2=-(x(1)*x(2)+x(2)*x(7)*num1(1))/x(1);
v3=(x(1)*x(3)+x(3)*x(7)*num1(1))/x(1);
d1=[v1 v2 v3];
dd=roots(d1);
h2=length(dd);
end

%Check condition a,b,z <<d,e
mm=[a b z];
ee=max(mm)*10;
ddd=max(dd);
if ee>=ddd

```

```

    d=real(ee);
else
    d=real(ddd);
end
e=d;

%-----
%-----

% Transfer function of PIDA controller
pida_nu=[k k*(a+b+z) k*(a*b+a*z+b*z) k*a*b*z];
pida_num=real(pida_nu);
pida_den=[1 e+d e*d 0];
pida_sys=tf(pida_num,pida_den);

% Close loop transfer function
sys_series=series(pida_sys,gp);
sys=feedback(sys_series,1);

% Plot step response of plant
t=[0:rang:tt];
[amplitude t]=step(sys,t);

%-----
%-----

% Find error (Lest mean square error)
for i=1:(tt/rang+1)
    J(i) = abs(1-amplitude(i))^2;
end
error_new1=sum(J);

```

```
% Find Overshoot
oversh=abs(1-max(amplitude));
P1=oversh;

% Find rise time (90%)
riset=find(amplitude>=0.9&amplitude<=0.95);

if length(riset)==0
    P2=rho;
else
    P2=t(riset(1),1);
end

% Find settling time (1+-0.05)
sett=find(amplitude>=0.95&amplitude<=0.98|amplitude>=1.02&amplitude<=1.05);

if length(sett)==0
    P3=rho;
else
    P3=t(sett(end),1);
end

% Find steady state error
sserror=abs(1-amplitude(end));
P4=sserror;

if (P1-ov)<=0
    P1=0;
end

if (P2-tr)<=0
    P2=0;
```

```

end

if (P3-ts)<=0
    P3=0;
end

if (P4-stddy)<=0
    P4=0;
end

%ถ้าความคลาดเคลื่อนจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการปรับโทษ
error_new=error_new1+rho*P1^2+rho*P2^2+rho*P3^2+rho*P4^2;
%-----
%-----

% Gradient of error
for i=1:(tt/rang)
    g(i)=amplitude(i+1)-amplitude(i);
end

% Find Overshoot
oversh=abs(1-max(amplitude));
P1=oversh;

% Find rise time (90%)
riset=find(amplitude>=0.9&amplitude<=0.95);

if length(riset)==0
    P2=rho;
else
    P2=t(riset(1),1);
end
end

```

```

% Find settling time (1+-0.05)
sett=find(amplitude>=0.95&amplitude<=0.98|amplitude<=1.02&amplitude>=1.05);

if length(sett)==0
    P3=rho;
else
    P3=t(sett(end),1);
end

% Find steady state error
sserror=abs(1-amplitude(end));
P4=sserror;

%เงื่อนไขแรก เปอร์เซ็นการพุ่งเกินของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาต้องมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด
if (P1-ov)<=0
    P1=0;
end

%เงื่อนไขที่สอง ช่วงเวลาขึ้นของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาต้องมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด
if (P2-tr)<=0
    P2=0;
End

%เงื่อนไขที่สาม ช่วงเวลาเข้าที่ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาต้องมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด
if (P3-ts)<=0
    P3=0;
end

%เงื่อนไขที่สี่ ค่าความคลาดเคลื่อนของสถานะอยู่ตัวของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาต้องน้อยกว่าที่
%กำหนด

if (P4-stddy)<=0

```



```

P4=0;
end

%หาค่าเกรเดียนท์ โดยพิจารณาจากฟังก์ชันการปรับโทษ แบ่งออกเป็น 16 กรณี ซึ่งพิจารณาจาก
P.O., tr, ts และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา มีค่าเป็นไปตามที่กำหนดหรือไม่

m=length(g);
%กรณีที่ 1 ค่า P.O., tr, ts และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหามีค่าน้อยกว่าที่กำหนด
if P1<=0&P2<=0&P3<=0&P4<=0      %case 1
    GJ=g;

%กรณีที่ 2 ค่า ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1<=0&P2<=0&P3<=0&P4>0      %case 2
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P4;
    end

%กรณีที่ 3 ค่า ts ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1<=0&P2<=0&P3>0&P4<=0      %case 3
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P3;
    end

%กรณีที่ 4 ค่า ts และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1<=0&P2<=0&P3>0&P4>0      %case 4
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P3+2*rho*P4;
    end

%กรณีที่ 5 ค่า tr ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1<=0&P2>0&P3<=0&P4<=0      %case 5
    for i=1:m

```

```

GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2;
end

%กรณีี่ 6 ค่า tr และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาว่ามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1<=0&P2>0&P3<=0&P4>0      %case 6
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2+2*rho*P4;
    end

%กรณีี่ 7 ค่า tr และ ts ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาว่ามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1<=0&P2>0&P3>0&P4<=0      %case 7
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2+2*rho*P3;
    end

%กรณีี่ 8 ค่า tr, ts และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาว่ามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1<=0&P2>0&P3>0&P4>0      %case 8
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2+2*rho*P3+2*rho*P4;
    end

%กรณีี่ 9 ค่า P.O. ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาว่ามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2<=0&P3<=0&P4<=0      %case 9
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1;
    end

%กรณีี่ 10 ค่า P.O. และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหาว่ามีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2<=0&P3<=0&P4>0      %case 10
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P4;
    end

```

```

%กรณีี่ 11 ค่า P.O. และ ts ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา มีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2<=0&P3>0&P4<=0      %case 11
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P3;
    end

%กรณีี่ 12 ค่า P.O. , ts และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา มีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2<=0&P3>0&P4>0      %case 12
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P3+2*rho*P4;
    end

%กรณีี่ 13 ค่า P.O. และ tr ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา มีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2>0&P3<=0&P4<=0      %case 13
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2;
    end

%กรณีี่ 14 ค่า P.O. , tr และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา มีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2>0&P3<=0&P4>0      %case 14
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2+2*rho*P4;
    end

%กรณีี่ 15 ค่า P.O. , tr และ ts ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา มีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2>0&P3>0&P4<=0      %case 15
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2+2*rho*P3;
    end

%กรณีี่ 16 ค่า P.O. , tr, ts และ ess ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา มีค่ามากกว่าที่กำหนด
elseif P1>0&P2>0&P3>0&P4>0      %case 16

```

```

for i=1:m
    GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2+2*rho*P3+2*rho*P4;
end

end

%Norm of gradient
jj=length(GJ);
normGJ=0;
for i=1:jj
    normGJ=normGJ+GJ(i)^2;
end
norm_new=sqrt(normGJ);

%-----
%-----
norm_history(kk)=norm_new;
error_obj_history(kk)=error_new;
% fprintf('%1f    %e    %e\n',kk,norm_new,error_new)
%-----
%-----

%Optimize loop(random)
Lx=length(a1);
for kkk=2:1:iter
    if norm_new>=norm_min&error_new>=error_min
        para_set_all=randint(para_set,Lx,[min_rand,max_rand]);
%        para_set_all=min_rand+(max_rand-min_rand)*rand(para_set,Lx);

        for ii=1:para_set
            alfa_rand=para_set_all(ii,:);
            alfa_rand=alfa_rand';

```

```

%-----
%-----
% numerical K,a,b,z,d,e,
% Check length between pole and zero
if Lnum<Lden

    % case1: zero of plant < pole of plant

    % Value of alfa
    for i=1:1:n+3
        if i<=n
            alf(i)=alfa_rand(i)-den1(i+1);
        else
            alf(i)=alfa_rand(i);
        end
    end
end
alfa=alf;

% Solve equation for find x
x=linsolve(A,alfa);

% Solve equation for find k,a,b,z
k=x(6);
u1=-x(6);
u2=x(5);
u3=-x(4);
u4=x(3);
z1=[u1 u2 u3 u4];
zz=roots(z1);
a=zz(1);
b=zz(2);

```

```

z=zz(3);

% Solve equation for find d,e
v1=-1;
v2=x(1);
v3=-x(2);
d1=[v1 v2 v3];
dd=roots(d1);
h2=length(dd);

else

% case2: zero of plant = pole of plant

% Solve equation for find x
alfa=alfa_rand';
x=linsolve(A,alfa);

% Solve equation for find k,a,b,z
k=x(7)/x(1);
u1=-1;
u2=(x(1)*x(6)+x(6)*x(7)*num1(1))/x(7);
u3=-(x(1)*x(5)-x(7)*x(5)*num1(1))/x(7);
u4=(x(1)*x(4)+x(4)*x(7)*num1(1))/x(7);
z1=[u1 u2 u3 u4];
zz=roots(z1);
a=zz(1);
b=zz(2);
z=zz(3);

% Solve equation for find d,e
v1=1;

```

```

v2=-(x(1)*x(2)+x(2)*x(7)*num1(1))/x(1);
v3=(x(1)*x(3)+x(3)*x(7)*num1(1))/x(1);
d1=[v1 v2 v3];
dd=roots(d1);
h2=length(dd);
end

%Check condition a,b,z <<d,e
mm=[a b z];
ee=max(mm)*10;
ddd=max(dd);
if ee>=ddd
    d=real(ee);
else
    d=real(ddd);
end
e=d;

%-----
%-----

% Transfer function of PIDA controller
pida_nu=[k k*(a+b+z) k*(a*b+a*z+b*z) k*a*b*z];
pida_num=real(pida_nu);
pida_den=[1 e+d e*d 0];
pida_sys=tf(pida_num,pida_den);

% Close loop transfer function
sys_series=series(pida_sys,gp);
sys=feedback(sys_series,1);

% Plot step response of plant

```

```

t=[0:rang:tt];
[amplitude t]=step(sys,t);

%-----
%-----

% Find error (Lest mean square error)
for i=1:(tt/rang+1)
    J(i) = abs(1-amplitude(i))^2;
end
error_rand1=sum(J);

% Find Overshoot
oversh=abs(1-max(amplitude));
P1=oversh;

% Find rise time (90%)
riset=find(amplitude>=0.9&amplitude<=0.95);

if length(riset)==0
    P2=rho;
else
    P2=t(riset(1),1);
end

% Find settling time (1+-0.05)
sett=find(amplitude>=0.95&amplitude<=0.98|amplitude>=1.02&amplitude<=1.05);

if length(sett)==0
    P3=rho;
else
    P3=t(sett(end),1);

```



```
end
```

```
% Find steady state error
```

```
sserror=abs(1-amplitude(end));
```

```
P4=sserror;
```

```
if (P1-ov)<=0
```

```
    P1=0;
```

```
end
```

```
if (P2-tr)<=0
```

```
    P2=0;
```

```
end
```

```
if (P3-ts)<=0
```

```
    P3=0;
```

```
end
```

```
if (P4-stddy)<=0
```

```
    P4=0;
```

```
end
```

```
error_rand=error_rand1+rho*P1^2+rho*P2^2+rho*P3^2+rho*P4^2;
```

```
%-----
```

```
%-----
```

```
% Gradient of error
```

```
for i=1:(tt/rang)
```

```
    g(i)=amplitude(i+1)-amplitude(i);
```

```
end
```

```
% Find Overshoot
oversh=abs(1-max(amplitude));
P1=oversh;

% Find rise time (90%)
riset=find(amplitude>=0.9&amplitude<=0.95);

if length(riset)==0
    P2=rho;
else
    P2=t(riset(1),1);
end

% Find settling time (1+-0.05)
sett=find(amplitude>=0.95&amplitude<=0.98|amplitude>=1.02&amplitude<=1.05);

if length(sett)==0
    P3=rho;
else
    P3=t(sett(end),1);
end

% Find steady state error
sseror=abs(1-amplitude(end));
P4=sseror;

if (P1-ov)<=0
    P1=0;
end

if (P2-tr)<=0
    P2=0;
```

```

end

if (P3-ts)<=0
    P3=0;
end

if (P4-stddy)<=0
    P4=0;
end

m=length(g);

if P1<=0&P2<=0&P3<=0&P4<=0           %case 1
    GJ=g;

elseif P1<=0&P2<=0&P3<=0&P4>0       %case 2
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P4;
    end

elseif P1<=0&P2<=0&P3>0&P4<=0       %case 3
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P3;
    end

elseif P1<=0&P2<=0&P3>0&P4>0       %case 4
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P3+2*rho*P4;
    end

elseif P1<=0&P2>0&P3<=0&P4<=0     %case 5
    for i=1:m

```

```

    GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2;
    end

elseif P1<=0&P2>0&P3<=0&P4>0      %case 6
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2+2*rho*P4;
    end

elseif P1<=0&P2>0&P3>0&P4<=0      %case 7
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2+2*rho*P3;
    end

elseif P1<=0&P2>0&P3>0&P4>0      %case 8
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P2+2*rho*P3+2*rho*P4;
    end

elseif P1>0&P2<=0&P3<=0&P4<=0    %case 9
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1;
    end

elseif P1>0&P2<=0&P3<=0&P4>0    %case 10
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P4;
    end

elseif P1>0&P2<=0&P3>0&P4<=0    %case 11
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P3;
    end
end

```

```

elseif P1>0&P2<=0&P3>0&P4>0      %case 12
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P3+2*rho*P4;
    end

elseif P1>0&P2>0&P3<=0&P4<=0      %case 13
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2;
    end

elseif P1>0&P2>0&P3<=0&P4>0      %case 14
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2+2*rho*P4;
    end

elseif P1>0&P2>0&P3>0&P4<=0      %case 15
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2+2*rho*P3;
    end

elseif P1>0&P2>0&P3>0&P4>0      %case 16
    for i=1:m
        GJ(1,i)=g(1,i)+2*rho*P1+2*rho*P2+2*rho*P3+2*rho*P4;
    end

end

%Norm of gradient
jj=length(GJ);
normGJ=0;
for i=1:jj
    normGJ=normGJ+GJ(i)^2;

```

```

end

norm_rand=sqrt(normGJ);

error_rand_all(ii)=error_rand;
norm_rand_all(ii)=norm_rand;

%-----
%-----

end

%Find best gradient for random alfa.
norm_rand_best=min(norm_rand_all);
norm_rand_best_posi=find(norm_rand_best==norm_rand_all);
alfa_rand_best=para_set_all(norm_rand_best_posi,:);
error_rand_best=error_rand_all(norm_rand_best_posi);

%Compare gradient for random alfa and old gradient.
if norm_rand_best<norm_new&error_rand_best<error_new
    norm_new=norm_rand_best;
    alfa_new=alfa_rand_best;
    error_new=error_rand_best;
else
    norm_new=norm_new;
    alfa_new=alfa_new;
    error_new=error_new;
end

% fprintf('%1f %e %e\n',kkk,norm_new,error_new)

norm_history(kkk)=norm_new;
error_obj_history(kkk)=error_new;

else

```

```

        break;
    end

end

end

end

disp('สิ้นสุดการรันโปรแกรม')
fprintf('Error of classical mehod is = %e \nGradient of classical mehod is =
    %e\n',error_new,norm_new);

%-----
%-----

% Numerical for find paameter of PIDA(k,a,b,z,k,d,e)

kk=1;
al=alfa_new';

% check coefficient for den(1) of Plant.(must be =1)
if den(1)~=1
    num1=num/den(1);
    den1=den/den(1);
else
    num1=num;
    den1=den;
end

% Check order of plant
Lden=length(dcn);
Lnum=length(num);
n=Lden-1;          %order of plant

% check pole of plant

```

```

for i=0:1:Lnum-1
    num1(Lden-i)=num(end-i);
    i=i+1;
end

% Check length between pole and zero
if Lnum<Lden

    % case1: zero of plant < pole of plant

    % Value of alfa
    for i=1:1:n+3
        if i<=n
            alf(i)=al(i)-den1(i+1);
        else
            alf(i)=al(i);
        end
    end
    end
    alfa=alf;

    % Solve equation for find x
    x=linsolve(A,alfa);

    % Solve equation for find k,a,b,z
    k=x(6);
    u1=-x(6);
    u2=x(5);
    u3=-x(4);
    u4=x(3);
    z1=[u1 u2 u3 u4];
    zz=roots(z1);
    a=zz(1);

```



```

b=zz(2);
z=zz(3);

% Solve equation for find d,e
v1=-1;
v2=x(1);
v3=-x(2);
d1=[v1 v2 v3];
dd=roots(d1);
h2=length(dd);

else

% case2: zero of plant = pole of plant

% Solve equation for find x
alfa=al';
x=linsolve(A,alfa);

% Solve equation for find k,a,b,z
k=x(7)/x(1);
u1=-1;
u2=(x(1)*x(6)+x(6)*x(7)*num1(1))/x(7);
u3=-(x(1)*x(5)-x(7)*x(5)*num1(1))/x(7);
u4=(x(1)*x(4)+x(4)*x(7)*num1(1))/x(7);
z1=[u1 u2 u3 u4];
zz=roots(z1);
a=zz(1);
b=zz(2);
z=zz(3);

% Solve equation for find d,e

```

```

v1=1;
v2=-(x(1)*x(2)+x(2)*x(7)*num1(1))/x(1);
v3=(x(1)*x(3)+x(3)*x(7)*num1(1))/x(1);
d1=[v1 v2 v3];
dd=roots(d1);
h2=length(dd);
end

%Check condition a,b,z <<d,e
mm=[a b z];
ee=max(mm)*10;
ddd=max(dd);
if ee>=ddd
    d=real(ee);
else
    d=real(ddd);
end
e=d;
t1=1/d;
t2=1/e;
%-----
%-----

% Calculate Kp Ki Kd Ka
AA=k;
BB=k*(a+b+z);
CC=k*(a*b+a*z+b*z);
DD=k*a*b*z;

Ki=DD/(d*e);
Kp=(CC-Ki*(d+e))/(d*e);
Kd=(BB-Ki-Kp*(d+e))/e;
Ka=AA-Kp-Kd;

```

```

% Transfer function of PIDA controller
pida_nu=[k k*(a+b+z) k*(a*b+a*z+b*z) k*a*b*z];
pida_num=real(pida_nu);
pida_den=[1 e+d e*d 0];
pida_sys=tf(pida_num,pida_den);

```

```

% Close loop transfer function
sys_series=series(pida_sys,gp);
sys=feedback(sys_series,1);
sys_pole=pole(sys);
sys_zero=zero(sys);

```

```

leng_pole=length(sys_pole);
leng_zero=length(sys_zero);

```

```

%Find Rp1 Rp2 for Kp
Rp1=10e3;
Rp2=Rp1*Kp;

```

```

%Find Ri1 Ci1 for Ki
Ci1=1e-6;
Ri1=1/(Ci1*Ki);
Ri2=11*Ri1;

```

```

%Find Rd2 Cd1 for Kd
Cd1=1e-6;
Rd2=Kd/Cd1;
Rd1=t1;

```

```

%Find Ra2 Ra4 Ca1 Ca2 for Ka
Kaa=sqrt(Ka);

```

```
Ca1=1e-6;
Ra2=Kaa/Ca1;
Ra4=Ra2;
Ca2=Ca1;
Ra1=t1;
Ra3=t2;

Rcomp=1e3;
R=1e3;
Rf=R;

% Place the value into the text field
if state==1
    set(handles.text54,'String','Rp1=');
    set(handles.text78,'String','Rp2=');
    set(handles.text55,'String','Ri1=');
    set(handles.text59,'String','Ri2=');
    set(handles.text83,'String','Rd1=');
    set(handles.text84,'String','Rd2=');
    set(handles.text89,'String','Ra1=');
    set(handles.text90,'String','Ra2=');
    set(handles.text95,'String','Ra3=');
    set(handles.text96,'String','Ra4=');
    set(handles.text101,'String','R=');
    set(handles.text175,'String','Rf=');
    set(handles.text104,'String','Rcomp=');
    set(handles.text79,'String','Ci=');
    set(handles.text86,'String','Cd=');
    set(handles.text92,'String','Ca1=');
    set(handles.text98,'String','Ca2=');
    set(handles.text105,'String','ohm');
    set(handles.text110,'String','ohm');
```

```
set(handles.text109,'String','ohm');
set(handles.text108,'String','ohm');
set(handles.text107,'String','ohm');
set(handles.text106,'String','ohm');
set(handles.text111,'String','ohm');
set(handles.text116,'String','ohm');
set(handles.text115,'String','ohm');
set(handles.text114,'String','ohm');
set(handles.text113,'String','ohm');
set(handles.text112,'String','ohm');
set(handles.text177,'String','ohm');
set(handles.text120,'String','F');
set(handles.text119,'String','F');
set(handles.text118,'String','F');
set(handles.text117,'String','F');

%Show parameter of analog circuit
set(handles.text66,'String',Rp1);
set(handles.text72,'String',Rp2);
set(handles.text73,'String',Ri1);
set(handles.text81,'String',Ri2);
set(handles.text85,'String',Rd1);
set(handles.text87,'String',Rd2);
set(handles.text91,'String',Ra1);
set(handles.text93,'String',Ra2);
set(handles.text97,'String',Ra3);
set(handles.text99,'String',Ra4);
set(handles.text102,'String',R);
set(handles.text176,'String',Rf);
set(handles.text103,'String',Rcomp);
set(handles.text82,'String',Ci1);
set(handles.text88,'String',Cd1);
```

```

set(handles.text94,'String',Ca1);
set(handles.text100,'String',Ca2);

set(handles.text28,'String','Kp=');
set(handles.text31,'String','Ki=');
set(handles.text32,'String','Kd=');
set(handles.text35,'String','Ka=');
set(handles.text29,'String','f=d=');
set(handles.text30,'String','e=');
set(handles.text33,'String','t1=');
set(handles.text34,'String','t2=');
set(handles.text170,'String','เกรเดียนท์ =');
set(handles.text172,'String','ค่าความคลาดเคลื่อน =');

```

```
% Show results for parameter of PIDA controller
```

```

set(handles.text40,'String',Kp);
set(handles.text46,'String',Ki);
set(handles.text44,'String',Kd);
set(handles.text42,'String',Ka);
set(handles.text47,'String',d);
set(handles.text45,'String',e);
set(handles.text43,'String',t1);
set(handles.text41,'String',t2);
set(handles.text173,'String',norm_new);
set(handles.text174,'String',error_new);

```

```
axes(handles.axes3)
```

```
step(sys)
```

```
grid
```

```
axes(handles.axes8)
```

```
bode(sys_series)
```

```

    margin(sys_series)
end

% --- Executes on button press in pushbutton16.
function pushbutton16_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton16 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton17.
function pushbutton17_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton17 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

state=get(handles.pushbutton17,'Value');

if state==1
    [Filename programC]=uigetfile({'*.pdf'},'programC.pdf');
    winopen(strcat(programC,Filename));
%    winopen('programC.doc','doc')
%    axes(handles.axes2)
%    b=imread('programC.pdf','pdf');
%    imshow(b);
end

% --- Executes on button press in pushbutton18.
function pushbutton18_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton18 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```
state=get(handles.pushbutton18,'Value');
```

```
if state==1
```

```
    axes(handles.axes2)
```

```
    a=imread('pida.jpg','jpg');
```

```
    imshow(a);
```

```
end
```



## ประวัติผู้วิจัย

นาวาอากาศโท ดร.สรารวุฒิ สุจิตจร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 1) จากโรงเรียนนายเรืออากาศ เมื่อ พ.ศ. 2527 และ PhD (Electronic and Electrical Engineering) จาก University of Birmingham, UK เมื่อ พ.ศ. 2530 ปัจจุบันเป็นศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญด้าน control system, applied signal processing, AI มีความชำนาญพิเศษด้านเครื่องสายไทย การเลี้ยงและฝึกสุนัข มีผลงานหนังสือและตำรา 3 รายการ บทความวิจัยกว่า 100 รายการ และได้จดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ไว้ 14 ผลงาน