

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอแบบเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพีชคณิต
และจินเนติกอัลกอริทึม

นางสาวสุนิศา สอนเมือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

**OPTIMAL DESIGN OF PIDA CONTROLLERS
VIA ALGEBRAIC METHOD AND
GENETIC ALGORITHMS**

Sunisa Sornmuang

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2010**

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพีชคณิตและจินเนติกอัลกอริทึม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย)

ประธานกรรมการ

(ศ. น.ท. ดร.ศราวุฒิ สุจิตจร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ คำนกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุณิศา สอนเมือง : การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพีชคณิต
และจินเนติกอัลกอริทึม (OPTIMAL DESIGN OF PIDA CONTROLLERS VIA
ALGEBRAIC METHOD AND GENETIC ALGORITHMS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 212 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยหลักการจัด
วางตำแหน่งโพลเพื่อหาค่าโพลที่เหมาะสมต่อระบบที่สุดโดยแยกเป็นสองกรณี กรณีแรกออกแบบ
ตัวควบคุมพีไอดีดำเนินการด้วยระเบียบวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด และกรณี
ที่สองออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้การค้นหาคำตอบอย่างชาญฉลาดด้วยระเบียบวิธีจินเนติก
อัลกอริทึม วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสองกรณีดำเนินงานบนระบบเอส ซึ่งทำการ
ออกแบบตัวควบคุมกับพลาต้ายกทั้งเจ็ดพลาต้ายกตามที่นำเสนอไว้ในปี ค.ศ. 2000 โดย Astrom and
Hagglund ผลการออกแบบเป็นไปในทิศทางที่น่าพึงพอใจอย่างมาก นอกจากนี้ยังได้นำมาประยุกต์ใช้
กับการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในทางปฏิบัติ ได้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจมาก

SUNISA SORNMUANG : OPTIMAL DESIGN OF PIDA CONTROLLERS
VIA ALGEBRAIC METHOD AND GENETIC ALGORITHMS. THESIS

ADVISOR : PROF. WNG. CMDR. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D., 212 PP.

PIDA-CONTROLLER/ POLE-PLACEMENT/ ALGEBRAIC METHOD/
GENETIC ALGORITHMS

This thesis is concerned with the development of an optimal pole-placement design of PIDA-controller. Firstly, the work employs an optimal algebraic computation to obtain the designed PIDA-controller. Secondly, the work utilizes the genetic algorithms instead. Both approaches are conducted on the s-plane. The concepts are tested against seven difficult-to-be-controlled plants proposed by Astrom and Hagglund (2000). The results are very promising. Furthermore, the proposed approach is applied to practical speed control of a 3-phase induction motor. The practical results are very satisfactory.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุธ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความบริบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ รวมทั้งเป็นกำลังใจและแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตแก่ผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณสุกษัย ชุมแวงวาปี และบริษัทพีเอ็มอีร์ ออโตเมชัน เซ็นเตอร์ จำกัด ที่สนับสนุนเกี่ยวกับเครื่องมือในการทดสอบอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวิเวก ภาชีรักษ์ ที่ได้สร้างผลงานทางด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอัญชลี รักด่านกลาง คุณภัทรวรรณ เคนพะนาน เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการดำเนินชีวิต

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณครูและอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่บุญทัน และคุณพ่อแสวง สอนเมือง รวมถึงญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

สุนิสา สอนเมือง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อาศัยหลักการ โพลเด่น เชิงซ้อน 1 คู่.....	7
2.3 ตัวอย่างการออกแบบ.....	8
2.4 ผลการจำลองสถานการณ์.....	13
2.5 สรุป.....	40
3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด.....	41
3.1 บทนำ.....	41
3.2 ความสัมพันธ์ทางพีชคณิตสำหรับการออกแบบ.....	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางพีชคณิต อย่างเหมาะสมที่สุด.....	49
3.4	ผลการจำลองสถานการณ์.....	54
3.5	สรุป.....	82
4	วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยจินเนติกอัลกอริทึม.....	83
4.1	บทนำ.....	83
4.2	จินเนติกอัลกอริทึม.....	83
4.3	วิธีการออกแบบ.....	88
4.4	ผลการจำลองสถานการณ์.....	90
4.5	สรุป.....	120
5	การอนุรักษ์และทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	122
5.1	บทนำ.....	122
5.2	ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อก.....	122
5.3	การทดสอบตัวควบคุม.....	125
5.4	การทดสอบและอภิปรายผล.....	141
6	การควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	147
6.1	บทนำ.....	147
6.2	การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์สามเฟส.....	148
6.2.1	ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์สามเฟส.....	148
6.2.2	การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์สามเฟส.....	150
6.3	การออกแบบและจำลองสถานการณ์.....	157
6.4	ผลการทดสอบมอเตอร์และอภิปราย.....	164
6.5	สรุป.....	168
7	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	169
7.1	สรุป.....	170
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	173

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	174
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ทบทวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองกล่องคำเชิงเส้น.....	176
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	187
ประวัติผู้เขียน.....	212

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมพี.....	128
5.2 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมไอ.....	132
5.3 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมดี.....	136
5.4 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมเอ.....	140

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ	3
2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ	6
2.2 ความสัมพันธ์ทางตำแหน่งโพลเด่นบนระนาบเอส	7
2.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิด	
เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม	12
(ข) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ	12
2.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)	14
(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)	15
(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)	15
(ง) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม	16
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 1)	16
2.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)	18
(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)	19
(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)	19
(ง) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม	20
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 2)	20
2.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)	22
(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)	22
(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)	23
(ง) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม	23
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 3)	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	25
(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่).....	26
(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	26
(ง) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม.....	27
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 4).....	27
2.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	29
(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่).....	30
(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	30
(ง) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม.....	31
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 5).....	31
2.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	33
(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่).....	33
(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	34
(ง) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม.....	34
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 6).....	35
2.10 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	36
(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่).....	37
(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา).....	37
(ง) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม.....	38
(จ) แผนภาพล็อกสราของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	38
(ฉ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 7).....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอโดยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล
	ดำเนินการโดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด.....53
3.2	การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ
(ก)	การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....55
(ข)	แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....55
(ค)	การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ.....56
(ง)	ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....56
(จ)	$ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 1).....57
3.3	การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ
(ก)	การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....59
(ข)	แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....59
(ค)	การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ.....60
(ง)	ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....60
(จ)	$ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 2).....61
3.4	การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ
(ก)	การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....63
(ข)	แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....63
(ค)	การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ.....64
(ง)	ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....64
(จ)	$ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 3).....65
3.5	การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ
(ก)	การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....67
(ข)	แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....67
(ค)	การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ.....68
(ง)	ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....68
(จ)	$ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 4).....69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	71
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	71
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	72
(ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	72
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 5).....	73
3.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	75
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	75
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	76
(ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	76
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 6).....	77
3.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	79
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	79
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	80
(ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	80
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 7).....	81
4.1 ขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึมกับการเชื่อมโยงเข้ากับระบบ.....	86
4.2 แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสมที่สุด ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม.....	91
4.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	92
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	92
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	93
(ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 1).....	94
4.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	97
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	97
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	98
(ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	98
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 2).....	99
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลา.....	99
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	100
(ช) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	100
(ฉ) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	101
(พ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 2).....	101
4.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	104
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	104
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	105
(ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	105
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 3).....	106
4.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	107
(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม.....	107
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	108
(ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก.....	108
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 4).....	109
4.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม.....	111
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	112
(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก.....	112
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 5).....	113
4.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	114
(ข) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม.....	114
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	115
(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก.....	115
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 6).....	116
4.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ	
(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ.....	118
(ข) แผนภาพโบลของระบบที่มีตัวควบคุม.....	118
(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ.....	119
(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก.....	119
(จ) $ S_G^T $ แสดงเป็น dB (พลานต์ 7).....	120
5.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก.....	123
5.2 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได	
(ก) $K_p = 0.4$	125
(ข) $K_p = 1$	126
(ค) $K_p = 2$	126
5.3 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง	
(ก) $K_p = 0.4$	127
(ข) $K_p = 1$	127
(ค) $K_p = 2$	128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได	
(ก) $K_I = 2.63 \times 10^3$	129
(ข) $K_I = 1.18 \times 10^3$	129
(ค) $K_I = 580.7$	130
5.5 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง	
(ก) $K_I = 2.63 \times 10^3$	131
(ข) $K_I = 1.18 \times 10^3$	131
(ค) $K_I = 580.7$	132
5.6 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได	
(ก) $K_D = 0.69 \times 10^{-3}$	133
(ข) $K_D = 1.6 \times 10^{-3}$	133
(ค) $K_D = 2.8 \times 10^{-3}$	134
5.7 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง	
(ก) $K_D = 0.69 \times 10^{-3}$	135
(ข) $K_D = 1.6 \times 10^{-3}$	135
(ค) $K_D = 2.8 \times 10^{-3}$	136
5.8 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได	
(ก) $K_A = 1.57 \times 10^{-6}$	137
(ข) $K_A = 3.3 \times 10^{-6}$	137
(ค) $K_A = 7.2 \times 10^{-7}$	138
5.9 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง	
(ก) $K_A = 1.57 \times 10^{-6}$	139
(ข) $K_A = 3.3 \times 10^{-6}$	139
(ค) $K_A = 7.2 \times 10^{-7}$	140
5.10 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได	
(ก) ตัวควบคุมพี	141
(ข) ตัวควบคุมไอ	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ค) ตัวควบคุมดี.....	141
(ง) ตัวควบคุมเอ.....	142
(จ) ตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	142
5.11 ผลตอบสนองต่อสัญญาณลาดเอียง	
(ก) ตัวควบคุมพี.....	143
(ข) ตัวควบคุมไอ.....	143
(ค) ตัวควบคุมดี.....	143
(ง) ตัวควบคุมเอ.....	144
(จ) ตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	144
6.1 โครงสร้างระบบควบคุมวงปิดสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบมอเตอร์ เหนี่ยวนำสามเฟส.....	147
6.2 การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์สามเฟส	
(ก) ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์.....	149
(ข) ผลการตรวจสอบความถูกต้อง.....	149
6.3 โครงสร้างระบบวงเปิดในการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองของมอเตอร์.....	150
6.4 ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์	
(ก) ชุดข้อมูลที่ 2.....	151
(ข) ชุดข้อมูลที่ 3.....	151
(ค) ชุดข้อมูลที่ 4.....	152
(ง) ชุดข้อมูลที่ 6.....	152
(จ) ชุดข้อมูลที่ 7.....	153
(ฉ) ชุดข้อมูลที่ 8.....	153
6.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้อง	
(ก) ชุดข้อมูลที่ 1.....	154
(ข) ชุดข้อมูลที่ 5.....	154
(ค) ชุดข้อมูลที่ 9.....	155

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบวงปิด	
(ก) ผลตอบสนองทางโดเมนเวลา.....	156
(ข) ผลตอบสนองทางโดเมนความถี่.....	156
6.7 วงจรตัวควบคุม.....	157
6.8 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ.....	158
6.9 ผลตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยในกรณีอุดมคติ.....	159
6.10 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ของ PSIM.....	159
6.11 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM	
(ก) สัญญาณจากตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	160
(ข) อัตราเร็วรอบของมอเตอร์.....	160
6.12 ผลตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยเมื่อพิจารณาผลกระทบจากการอิ่มตัวในออปแอมป์.....	162
6.13 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ของ PSIM.....	162
6.14 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM	
(ก) สัญญาณจากตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	163
(ข) อัตราเร็วรอบของมอเตอร์.....	163
6.15 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบอัตราเร็วรอบมอเตอร์สามเฟส.....	164
6.16 ชุดวงจรถดถอยหาค่าสวิตช์	
(ก) แผงวงจรถดถอยหาค่าสวิตช์.....	165
(ข) แกบสวิตช์.....	165
6.17 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (f/v).....	166
6.18 ผลการทดสอบมอเตอร์	
(ก) ก่อนมีตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	167
(ข) เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอ.....	168

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การควบคุมกระบวนการและเครื่องจักรทางอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) กันอย่างกว้างขวาง (Ang, Chong, and Li, 2005) จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวให้วิศวกรได้ใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายและมีอยู่เป็นจำนวนมาก ในทางทฤษฎีและปฏิบัติได้พบว่าตัวควบคุมพีไอดีมีข้อจำกัดด้านสมรรถนะ เช่น ใช้กับพลานต์อันดับสูง ๆ ได้ไม่ค่อยดี เป็นต้น จึงได้มีผู้คิดค้นตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA controller) ขึ้น มีรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ดังนี้

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{(s+f)} + \frac{K_A s^2}{(s+d)(s+e)} \quad (1.1)$$

โดยที่ PIDA เป็นตัวย่อของ Proportional-Integral-Derivative-Acceleration ตัวควบคุมจึงมีพารามิเตอร์ K_P K_I K_D และ K_A และมีพารามิเตอร์ของตัวกรองคือ d e และ f การออกแบบตัวควบคุมจะต้องให้คำตอบเป็นค่าพารามิเตอร์ทั้ง 7 ที่เหมาะสม ตัวควบคุมพีไอดีเอดังกล่าวนี้สามารถใช้กับพลานต์อันดับสูงกว่าสองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Dorf and Jung (1996) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ เพื่อให้สามารถใช้กับระบบอันดับสามได้อย่างมีประสิทธิภาพ และต่อมา Young, Yong, Seung, Do, and Kwi (2001) ได้พิจารณาถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ โดยมีตัวชดเชยอินพุตในระบบด้วย งานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอผลจำลองสถานการณ์ที่ยืนยันว่าแนวคิดนั้นใช้ได้ผลดีกับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่มีปัญหาเกี่ยวกับพลานต์บางอันดับ เช่น อันดับสูงกว่าสาม ผลงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อนแล้วได้รับการทบทวนในรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบไว้ในบทที่ 2

ผลงานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ให้ความสนใจการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอกับพลานต์ที่มีอันดับสูงกว่าสามและพลานต์ที่มีความซับซ้อน ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมความเร็วของเอชเอ็มเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีให้ได้ผลดีขึ้น
2. พัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมอัตราเร็วรอบของเอชเอ็มเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอดี

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การคำนวณใด ๆ ที่มีความซับซ้อน ตลอดจนการค้นหาคำตอบด้วยจินเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ อาศัยโปรแกรม MATLAB และ Toolboxes
2. การจำลองสถานการณ์ใช้โปรแกรม MATLAB และ Toolboxes ในการดำเนินงาน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวควบคุมพีไอดี มีรูปแบบ $G_C(s)$ ตามสมการ (1.1)
2. พลานต์ $G_P(s)$ ที่ใช้เพื่อศึกษาข้อจำกัดของวิธีการเก่า และสมรรถนะของวิธีการที่ปรับปรุงแล้ว มีจำนวน 7 พลานต์ ตามที่นำเสนอไว้โดย Astrom and Hagglund (2000) ดังกล่าวมีดังนี้

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

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

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

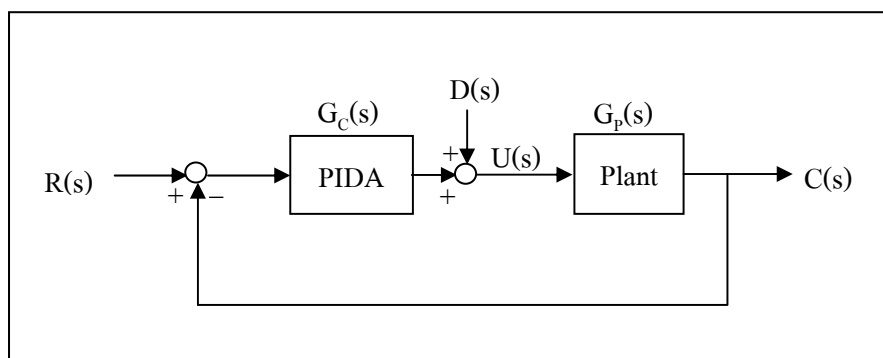
$$\text{พลานต์ 4: } G_P(s) = \frac{1}{(Ts+1)} e^{-s}, T=10$$

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

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

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

3. ระบบควบคุมป้อนกลับมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.1
4. วิธีการออกแบบดำเนินงานในระนาบเอส ซึ่งเป็นการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับพารามิเตอร์ K_P K_I K_D และ K_A ของตัวควบคุม โดยการดำเนินงานจะแยกเป็นสองกรณี กรณีแรกเป็นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลดำเนินการโดยใช้การค้นหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีจินเนติกอัลกอริทึม กรณีที่สองเป็นการออกแบบตัวควบคุมด้วยระเบียบวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนท์ ซึ่งเป็นวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลโดยอาศัยการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ

5. สมรรถนะการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีเอ พิจารณาที่การตอบสนองต่ออินพุต $R(s)$ แบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย และความสามารถในการกำจัดการรบกวน $D(s)$ ตามโครงสร้างในแผนภาพรูปที่ 1.1

6. ศึกษาวิเคราะห์ความคงทน (Robustness) ของระบบวงปิด เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอในระบบด้วยการพิจารณาความไว S_G^T GM และ PM

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิเคราะห์ข้อจำกัดในวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดั้งเดิม ด้วยแนวทางการวิเคราะห์บนระนาบเอสและการจำลองสถานการณ์
2. จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดที่ใช้วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดั้งเดิม กับพลานต์ที่ควบคุมยากทั้ง 7 แบบ
3. ศึกษาวิธีการปรับปรุงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล โดยใช้วิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด และการค้นหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีการค้นหาด้วยเกรเดียนท์
4. ปรับปรุงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล โดยใช้วิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด และการค้นหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีจินเนติกอัลกอริทึม
5. จำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดีเอที่ออกแบบด้วยวิธีการเดิม และวิธีการที่นำเสนอ
6. พัฒนาวิธีการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอ โดยใช้สัญญาณทดสอบแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step) และแบบลาดเอียงหนึ่งหน่วย (unit-ramp)
7. พัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมความเร็วของเอซีมอเตอร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ใหม่ด้านออกแบบและข้อจำกัดของตัวควบคุมพีไอดีเอ
2. ได้เทคโนโลยีการควบคุมความเร็วของเอซีมอเตอร์

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 8 บท บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสั่งเขยที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

บทที่ 5 กล่าวถึงการอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีเอ โดยใช้สัญญาณทดสอบแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step) และแบบลาดเอียงหนึ่งหน่วย (unit-ramp)

บทที่ 6 กล่าวถึงการพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมความเร็วของเอซีมอเตอร์

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. ทบทวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่อาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่

2.1 บทนำ

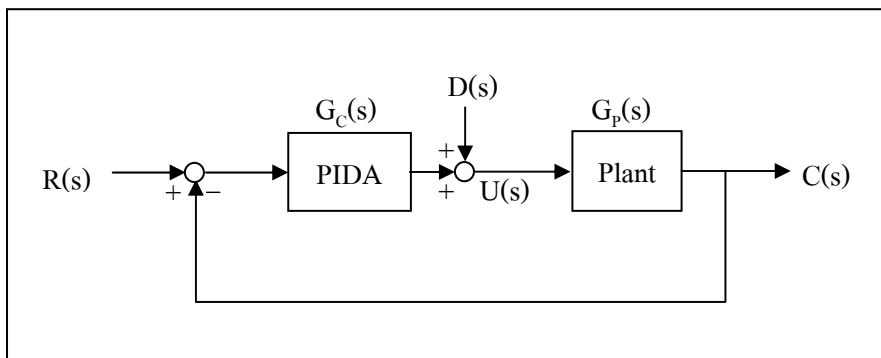
การควบคุมกระบวนการและเครื่องจักรทางอุตสาหกรรม มีความต้องการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเอกันอย่างกว้างขวาง จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวให้วิศวกรได้ใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายและมีอยู่เป็นจำนวนมาก ในทางทฤษฎีและปฏิบัติได้พบว่าตัวควบคุมพีไอดีเอมีข้อจำกัดด้านสมรรถนะ เช่น ใช้กับพลานต์อันดับสูง ๆ ได้ไม่ค่อยดี เป็นต้น จึงได้มีผู้คิดค้นตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA controller) ขึ้น Dorf and Jung (1996) 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

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

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



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ

จากโครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับดังรูปที่ 2.1 อาจเขียนแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดได้ดังนี้

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

จึงมีสมการลักษณะเฉพาะคือ

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

ในการคำนวณความเร็วของการตอบสนองของระบบ สามารถพิจารณาได้จากสมการ อัตราส่วนการหน่วง (ζ) และความถี่ธรรมชาติ (ω_n) ดังต่อไปนี้

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

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

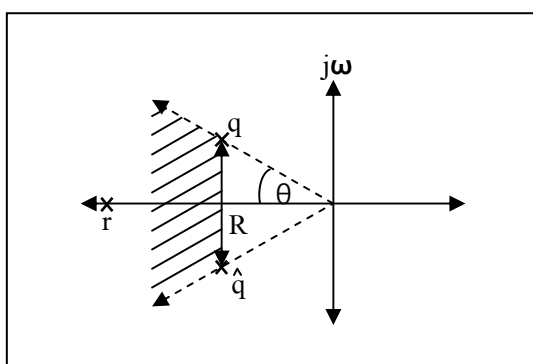
เมื่อ T_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) (วินาที)

L คือ เปอร์เซนต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot)

จากสมการ (2.5) และ (2.6) เราสามารถคำนวณตำแหน่งของโพลเด่น $q, \hat{q}$ บนระนาบเอส ได้ตามสมการ (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 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอทีอาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่

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

ขั้นตอนที่ 2 เลือกค่าจริงของโพลเด่นที่ตำแหน่ง R (ดูรูปที่ 2.2) โดยเลือกจากสมการ

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

ขั้นตอนที่ 3 เลือกค่าจริงของโพลด้อยที่ตำแหน่ง r (ดูรูปที่ 2.2) โดยที่ $r \ll -\zeta\omega_n$

ขั้นตอนที่ 4 เขียนสมการลักษณะเฉพาะ $1 + G_C G_P(s) = 0$ และ

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

ขั้นตอนที่ 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

ขั้นตอนที่ 6 แก้สมการที่เกิดขึ้นจากการนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการมาเท่ากัน

ขั้นตอนที่ 7 พล็อตกราฟการตอบสนองในโดเมนเวลา สำหรับเอาต์พุต $c(t)$ โดยให้อินพุต $r(t)$ เป็นแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

ถ้าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงเกินไป ให้เพิ่มอัตราขยายคาสเคด K

2.3 ตัวอย่างการออกแบบ

ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ็กับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 1 ใน 7 พลาเน็ต ดังที่ได้ ทบทวนไว้แล้วในบทที่ 1 โดยได้กำหนดความต้องการ $P.O. \leq 5\%$ และ $T_s \leq 2s$ ซึ่งทำการเลือก พลาเน็ตดังนี้

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

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดหาตำแหน่งของโพลเด่น
 - o จากสมการ (2.5) เมื่อ $L = P.O. \leq 5\%$ จะได้ $\zeta \geq 0.69$
 - o จากสมการ (2.6) เมื่อ $T_s \leq 2s$ จะได้ $\omega_n \leq 2.90$
 - o จากสมการ (2.7) แทนค่า ζ, ω_n จะได้ $q, \hat{q} \leq -2 \pm j2.9\sqrt{1-(0.69)^2}$
 ดังนั้น $q, \hat{q} \leq -2 \pm j2.1$
- ขั้นตอนที่ 2 และ 3 เลือกค่าจำนวนจริงของโพลเด่นที่ตำแหน่ง R ซึ่ง $R \leq \text{Re}[q, \hat{q}]$
 และเลือกค่าจำนวนจริงของโพลด้อยที่ตำแหน่ง r
 - o เลือก $q, \hat{q} \leq -2 \pm j2.1$ ดังนั้น $R = -2.1$
 - o และเลือกค่า $r = -30$
- ขั้นตอนที่ 4 และ 5 เขียนสมการลักษณะเฉพาะ และนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสอง สมการนี้มาเท่ากัน จากสมการ (2.2) เมื่อไม่พิจารณาโพล d, e เมื่อ $a, b, z \ll d, e$ จะได้

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

และจากสมการลักษณะเฉพาะ $1 + G_C G_P(s) = 0$ ดังนั้นได้ความสัมพันธ์ว่า

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

และจากสมการลักษณะเฉพาะ $(s + r)(s + R)(s + q)(s + \hat{q}) = 0$ เมื่อ $q, \hat{q} \leq -2 \pm j2.1$, $R = -2.1$ 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

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

- ขั้นตอนที่ 6 ด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ตามความสัมพันธ์ (2.10) สามารถแยกเป็นสมการพีชคณิตได้ 4 สมการดังต่อไปนี้

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

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

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

$$Kabz = 529.83 \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.11) จะได้ $K = 35.1$ แทนค่า $K = 35.1$ ลงในสมการที่ (2.12) จะได้

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

แทนค่า $K = 35.1$ ลงในสมการที่ (2.14) จะได้

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

แทนค่า K $a + b$ และ ab ลงในสมการที่ (2.13) จะได้ $-z^3 + 5.84z^2 - 15.2z + 15.10 = 0$

ดังนั้น $z = 2.02, 1.91 \pm j1.96$ เลือก $z = 2.02$ หาค่า a โดยแทนค่า $z = 2.02$ ลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$b = 3.82 - a$ แทนค่า $z = 2.02$ และแทนค่า b ลงในสมการที่ (2.16) จะได้ $-a^2 + 3.82a - 7.49 = 0$

ดังนั้น $a = 1.91 \pm j1.96$ หาค่า b โดยแทนค่า $z = 2.02$ ลงในสมการที่ (2.15) จะได้ $a = 3.82 - b$

แทนค่า $z = 2.02$ และ a ลงในสมการที่ (2.16) จะได้ $-b^2 + 3.82b - 7.49 = 0$

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

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

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

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

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด

$$T(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)} = \frac{34.9s^3 + 198.6s^2 + 521s + 529.8}{s^4 + 36.1s^3 + 199.8s^2 + 522s + 529.8}$$

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) จัดรูปใหม่จะได้

$$G_C(s) = \frac{\left\{ (K_P + K_D + K_A)s^3 + (K_I + K_P e + K_P d + K_D e)s^2 + (K_I e + K_I d + K_P d e)s + K_I d e \right\}}{s(s+d)(s+e)}; f=d \quad (2.17)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอดีเออย่างง่าย สมการที่(2.1) จัดรูปใหม่จะได้

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

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

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

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ (2.17) และ (2.18) ได้ความสัมพันธ์ทางพีชคณิตดังนี้

$$K_P + K_D + K_A = 35.1$$

$$K_I + K_P(d+e) + K_De = 204.98$$

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

$$K_Ide = 531.03$$

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

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

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

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

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

จากสมการที่ (2.22) จะได้ $K_I = 1.30$ แทนค่า K_I ลงในสมการ (2.21) จะได้

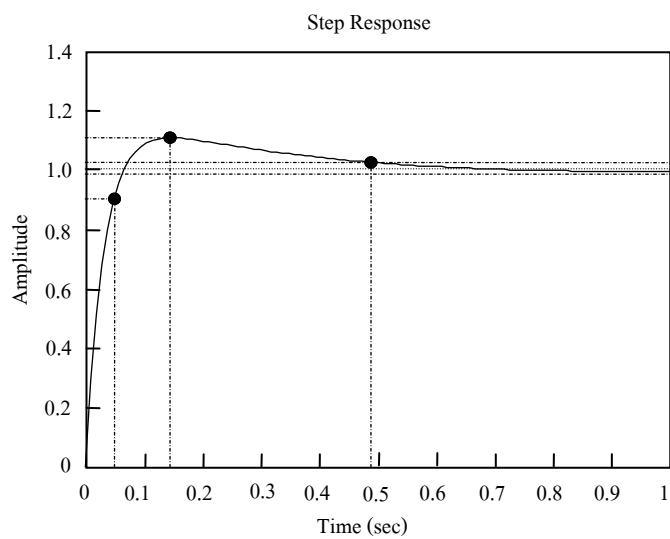
$$K_P = \frac{533.73 - (40.4)(1.3)}{408.04} = 1.18$$

$$\text{และแทนค่า } K_I \text{ และ } K_P \text{ ลงในสมการที่ (2.20) จะได้ } K_D = \frac{204.98 - 1.3 - (40.4)(1.18)}{20.2} = 7.72$$

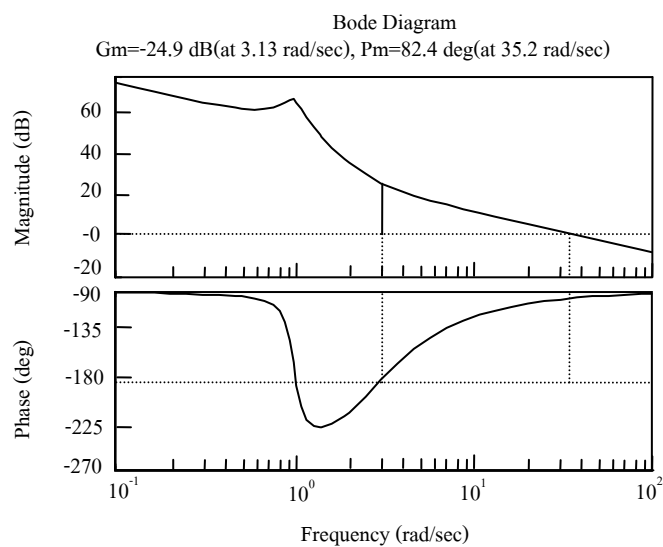
$$\text{แทนค่า } K_D \text{ และ } K_P \text{ ลงในสมการที่ (2.19) จะได้ } K_A = 35.1 - 1.18 - 7.72 = 26.2$$

ดังนั้นจะได้ว่า $K_P = 1.18$, $K_I = 1.30$, $K_D = 7.72$ และ $K_A = 26.2$

- ขั้นตอนที่ 7 จำลองผลตอบแทนต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย



(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม



(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

รูปที่ 2.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

จากรูปที่ 2.3 แสดงการตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดของระบบวงปิด อาจสังเกตเห็นได้ว่า $P.O.=10.1\%$ ซึ่งมากกว่าเงื่อนไขที่กำหนดไว้ว่า $P.O.\leq 5\%$ และเมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ เสถียรภาพของระบบวงปิดเป็นแบบมีเงื่อนไข จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในการปรับอัตราขยายวงควบคุม อาจสังเกตได้ว่าในขั้นตอนการออกแบบต้องเลือกค่าต่าง ๆ ตามประสบการณ์ของผู้ออกแบบ เช่น การเลือกค่า R และ r การกำหนดให้ d และ e เป็น 10 เท่าของ z เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ผลลัพธ์ในขั้นสุดท้ายนั้นคือการตอบสนองของระบบวงปิดไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง

2.4 ผลการจำลองสถานการณ์

ทำการออกแบบตัวควบคุมให้กับพลานต์ที่ควบคุมยากทั้ง 7 ที่กล่าวข้างต้น มีผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิด เพื่อศึกษาสมรรถนะการตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย เสถียรภาพและความไว เนื่องจากการดำเนินงานเน้นการทำซ้ำขั้นตอนทั้ง 7 ดังที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 2.3 ที่ผ่านมา ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงละเว้นการแสดงรายละเอียดบางส่วนไว้เพื่อความกระชับของเนื้อหา

พลานต์ 1 ต้องการ $P.O.\leq 5\%$ และ $T_s\leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม

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

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

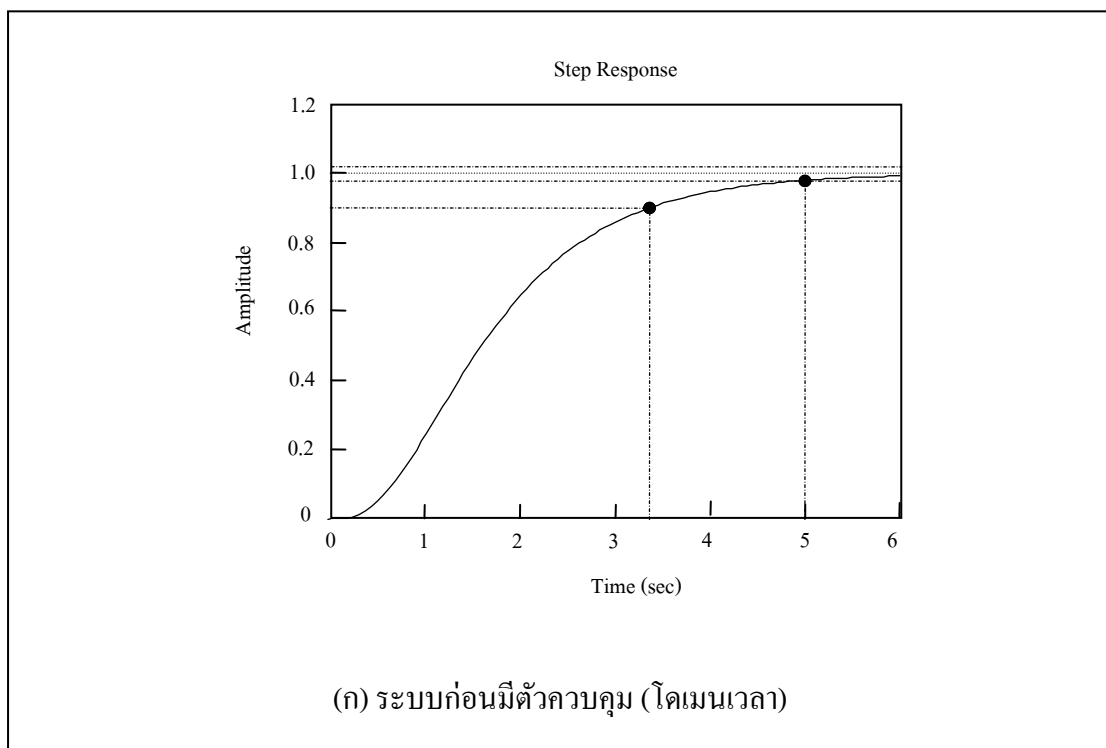
$$T(s) = \frac{3022s^3 + 27690s^2 + 106900s + 153600}{s^5 + 4s^4 + 3028s^3 + 27700s^2 + 106900s + 153600}$$

- ความไวของระบบ

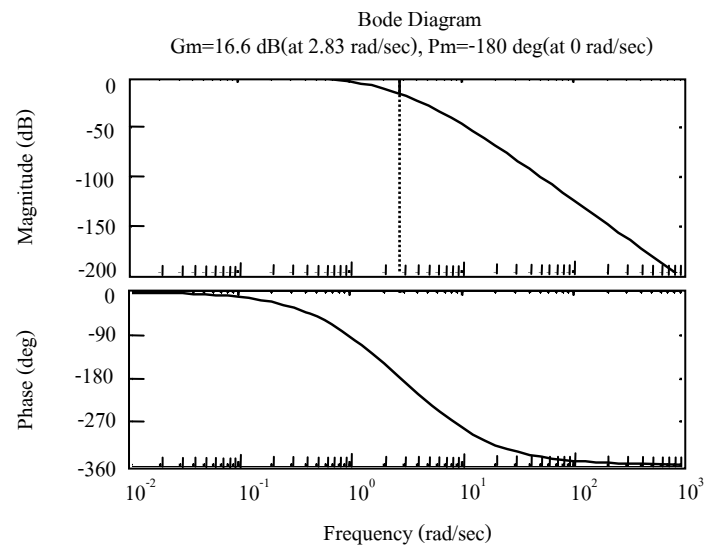
$$S_G^T = \frac{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s}{s^5 + 4s^4 + 3028s^3 + 2.77 \times 10^4 s^2 + 1.07 \times 10^5 s + 1.54 \times 10^5}$$

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

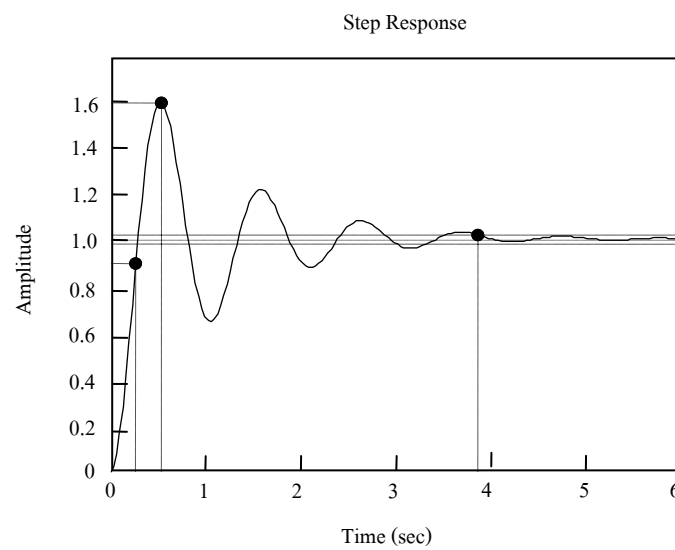
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : $-3.03 \quad 2.58 \pm j55.08 \quad -3.06 \pm j2.70$



รูปที่ 2.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

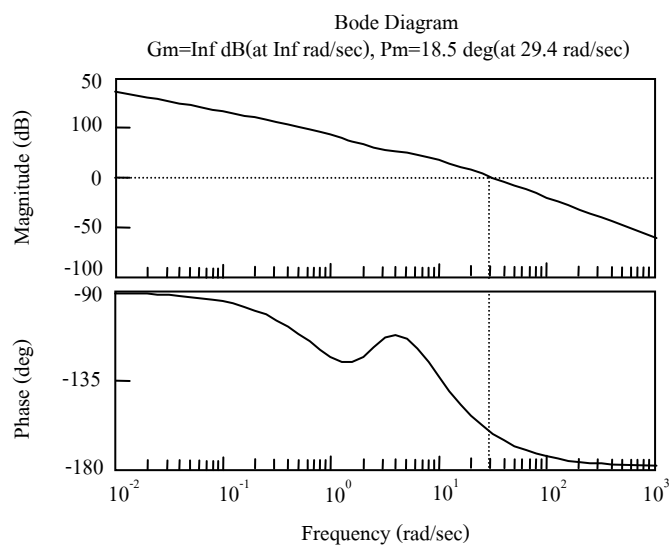


(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)

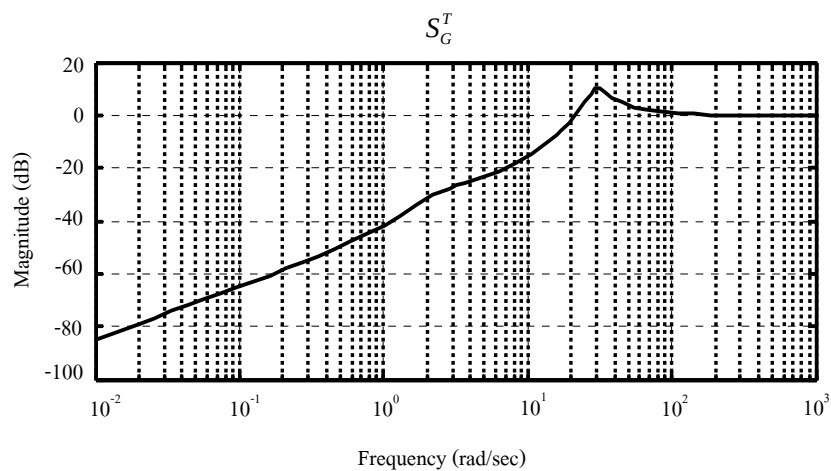


(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)

รูปที่ 2.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม



(จ) $|S_G^T|$ แสดงเป็น dB (พลานต์ 1)

รูปที่ 2.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 (ก)-(ง) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมแล้ว ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาที่รวดเร็วมากโดยมี $T_S = 0.773s < 2s$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด แต่ $P.O. = 59.1\% > 5\%$ ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดมาก และเมื่อพิจารณาจากแผนภาพโพลดังรูปที่ 2.4 (ง) จะเห็นได้ว่า $PM = 18.4 \text{ deg}$ และ $GM = \text{Inf}$ ค่า PM ดังกล่าวนี้นี้ต่ำกว่าข้อกำหนดโดยทั่วไปมาก ระบบวงรอบปิดยังมีเสถียรสัมพัทธ์ที่ไม่ดีนัก พิจารณาความไวรูปที่ 2.4 (จ) อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่ต่ำกว่า 15 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่สูงกว่า 15 rad/sec ระบบวงปิดมีขนาดของความไวเพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 0 dB ในย่านความถี่สูง ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ว่าระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดกรรบกวนจากภายนอกและสามารถตามรอยอินพุตได้ดี ในย่านความถี่สูงค่าคอมพลิเมนต์ของความไวจะมีขนาดน้อย ๆ นั้นหมายความว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมจะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลาเน็ต

พลาเน็ต 2 ต้องการ $P.O. \leq 5\%$ และ $T_S \leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม

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

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

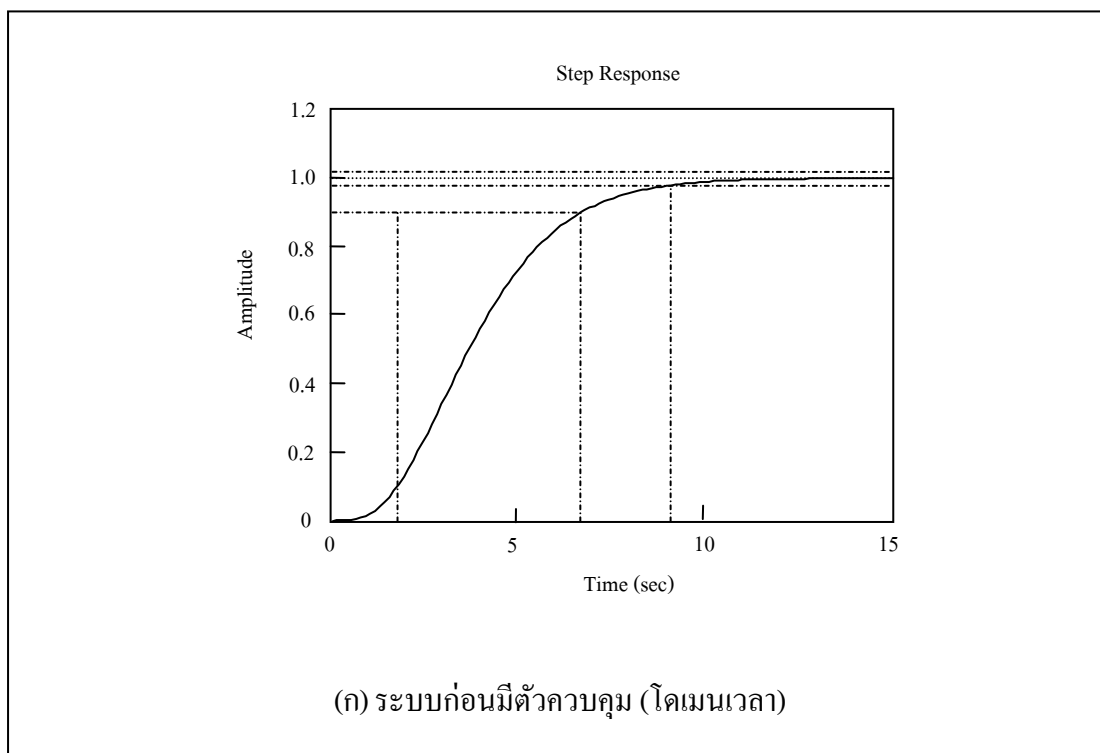
$$T(s) = \frac{3022s^3 + 27690s^2 + 106900s + 153600}{s^5 + 4s^4 + 3028s^3 + 27700s^2 + 106900s + 153600}$$

- ความไวของระบบ

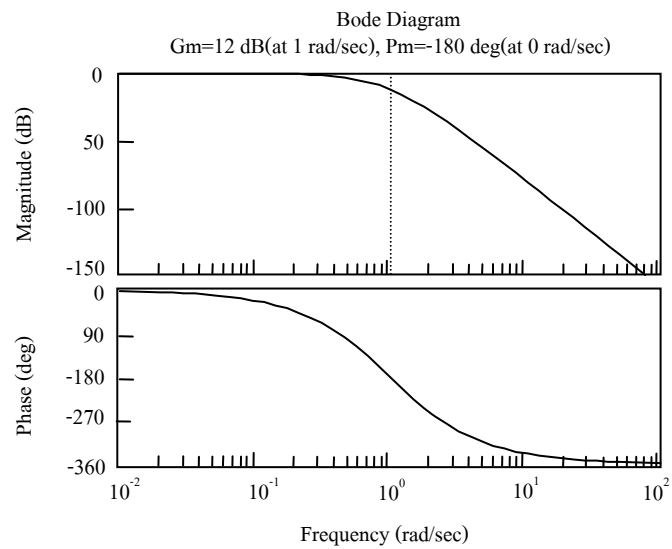
$$S_G^T = \frac{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s}{s^5 + 4s^4 + 3028s^3 + 2.77 \times 10^4 s^2 + 1.07 \times 10^5 s + 1.54 \times 10^5}$$

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

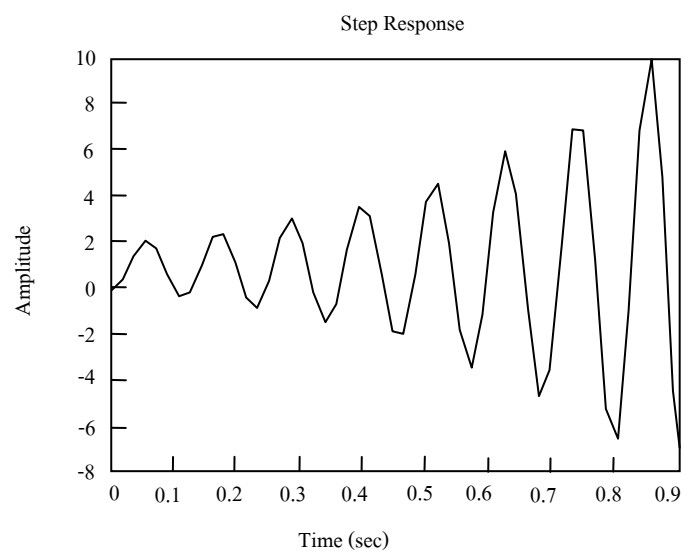
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : $-3.03 \quad 2.58 \pm j55.08 \quad -3.06 \pm j2.70$



รูปที่ 2.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

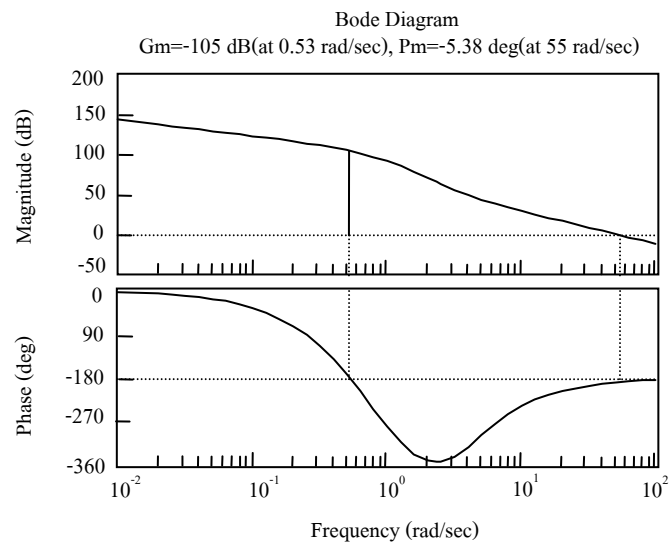


(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)

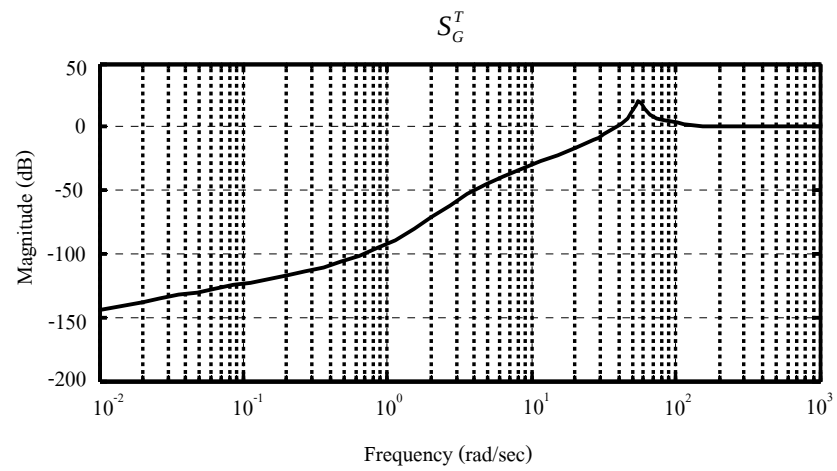


(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)

รูปที่ 2.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



(ง) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม



(จ) $|S_G^T|$ แสดงเป็น dB (พลานต์ 2)

รูปที่ 2.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 2 ซึ่งมีอันดับ 4 มีโพลซ้ำกัน 4 ตัว โดยที่ระบบวงรอบปิดมีอันดับ 5 ดังแสดงผลไว้ในรูปที่ 2.5 (ก-ง) ผลการออกแบบเมื่อมีตัวควบคุมส่งผลให้ระบบขาดเสถียร เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ พบว่า PM และ GM มีค่าติดลบ จากความไวแสดงดังรูปที่ 2.5 (จ) อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่น้อยกว่าและมากกว่า 25 rad/sec พฤติภาพของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลาเน็ต 1 (ดูรูปที่ 2.4 (จ)) การอภิปรายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีแรกตามรูปที่ 2.4 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่า 25 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 25 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดี สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลาเน็ต แต่อย่างไรก็ตามระบบวงปิดขาดเสถียรจึงไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้จริง

พลาเน็ต 3 ต้องการ $P.O. \leq 5\%$ และ $T_s \leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม

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

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

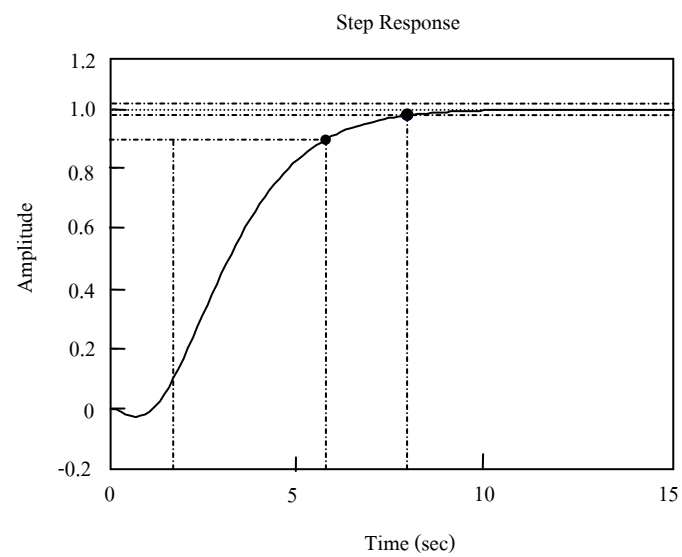
$$T(s) = \frac{-0.98s^4 - 2.28s^3 + 1.08s^2 + 9.58s + 10.48}{0.02s^4 + 0.72s^3 + 4.08s^2 + 10.57s + 10.48}$$

- ความไวของระบบ

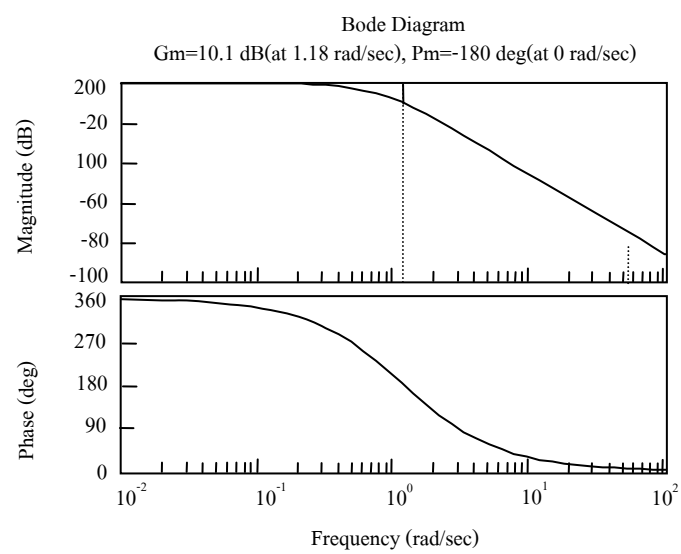
$$S_G^T = \frac{s^4 + 3s^3 + 3s^2 + s}{0.02s^4 + 0.72s^3 + 4.08s^2 + 10.57s + 10.48}$$

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

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : $-2.1 \pm j30, -2.1 \pm j2$

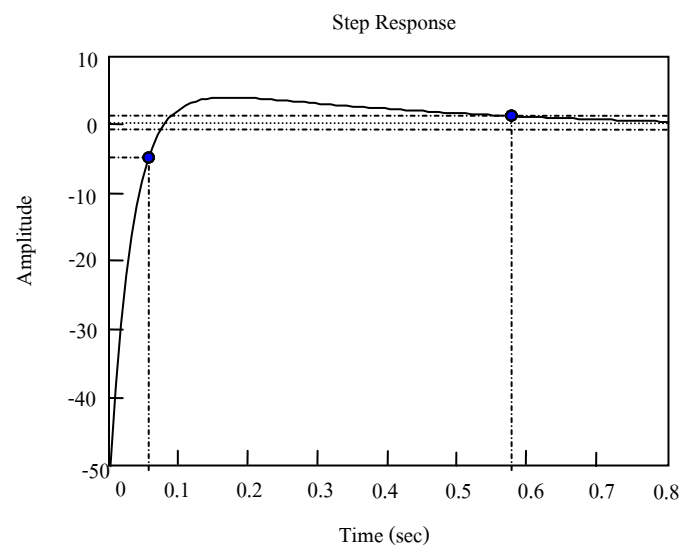


(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)

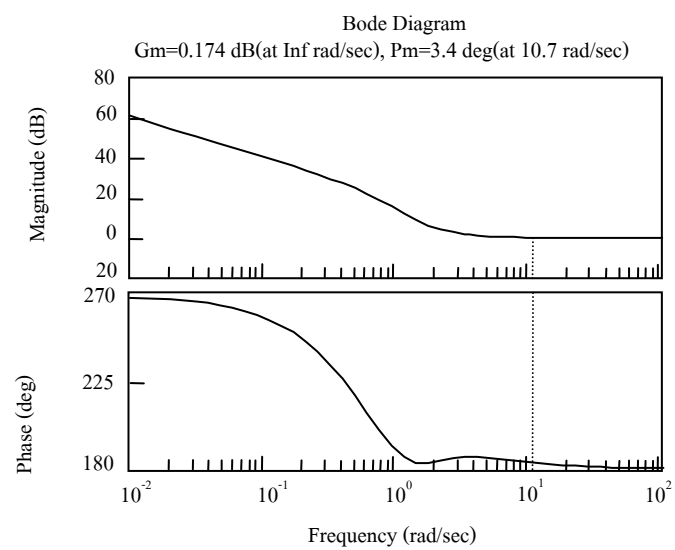


(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)

รูปที่ 2.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

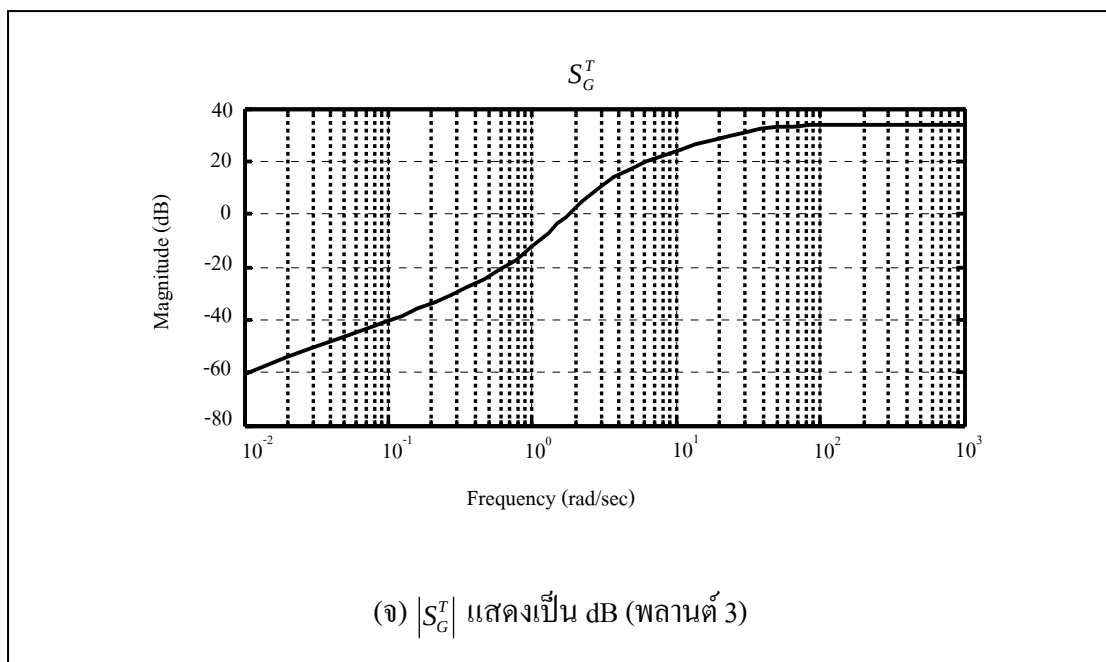


(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)



(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 2.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 2.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์ 3 ผลการออกแบบเมื่อมีตัวควบคุมส่งผลให้ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาดังรูปที่ 2.6 (ค) ซึ่งจะเห็นว่าระบบตอบสนองรวดเร็วมากกว่าเดิมหลายเท่าตัว มี $P.O. < 5\%$ เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์พบว่า $PM = 3.4 \text{ deg}$ และ $GM = 0.174 \text{ dB}$ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ระบบอาจขาดเสถียรได้ง่ายหากมีการรบกวนเกิดกับระบบจากความไวดังแสดงในรูปที่ 2.6 (จ) อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่น้อยกว่า 1 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 1 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ มีรูปลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแรก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบของพลานต์ 3 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

พลานต์ 4 ต้องการ $P.O. \leq 5\%$ และ $T_s \leq 2 \text{ s}$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม

$$G(s) = \frac{-0.5s+1}{5s^2+10.5s+1}; \quad e^{-s} \cong \frac{1-\frac{s}{2}}{1+\frac{s}{2}}$$

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” ทั้งนี้เป็นผลจากการประมาณพจน์
ประวิงเวลา และการพิจารณาใช้ G_c ในรูปแบบเชิงทฤษฎี

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

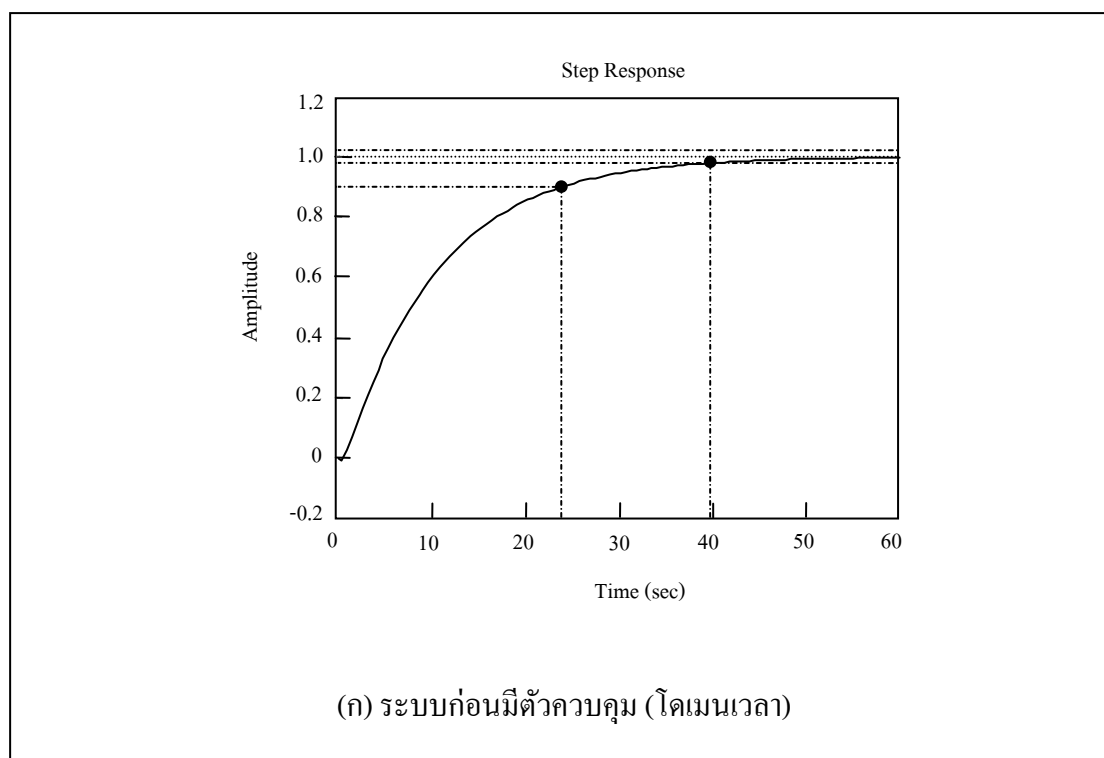
$$T(s) = \frac{0.03s^4 - 3.88s^3 + 4.16s^2 + 15.45s + 16.3}{0.03s^4 + 1.12s^3 + 6.35s^2 + 16.45s + 16.3}$$

- ความไวของระบบ

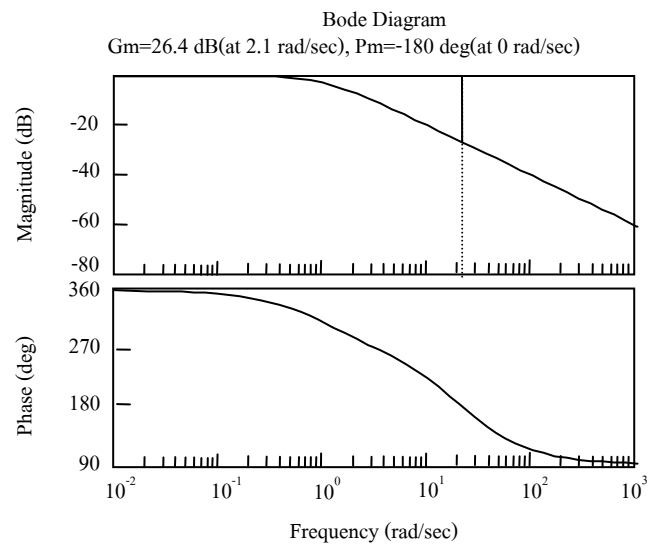
$$S_G^T = \frac{5s^3 + 10.5s^2 + s}{0.03s^4 + 1.12s^3 + 6.35s^2 + 16.44s + 16.29}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : 2 127.25 -1.98 -1.05

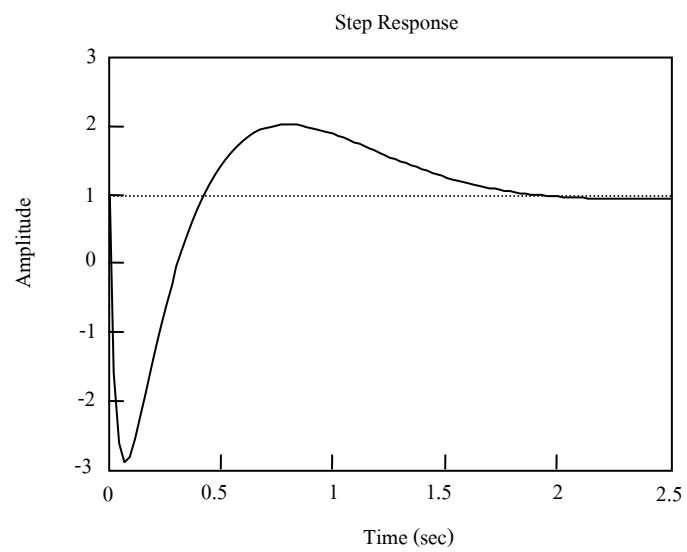
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -2.1±j2 -2.1 -30



รูปที่ 2.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

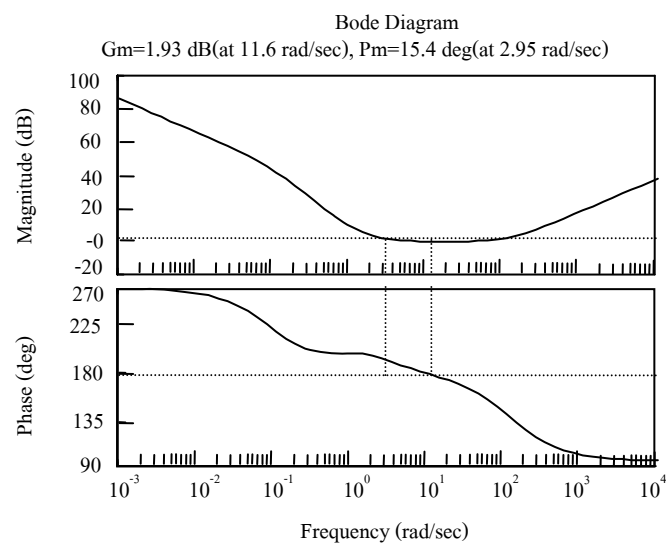


(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)

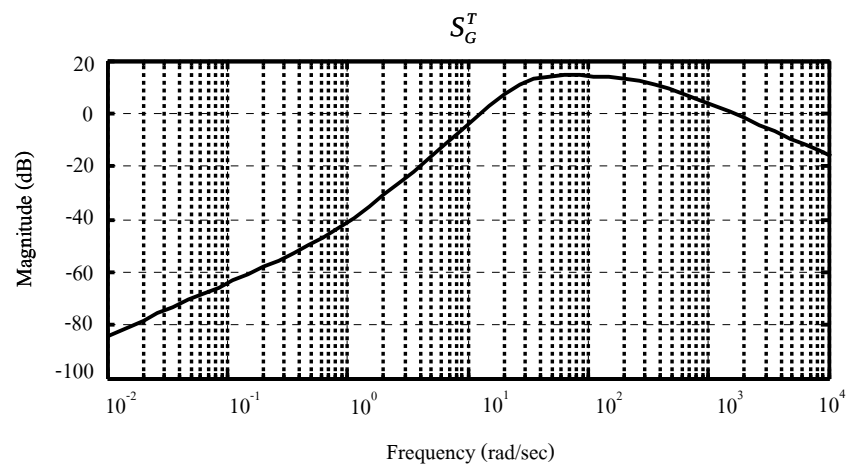


(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)

รูปที่ 2.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม



(จ) $|S_G^T|$ แสดงเป็น dB (พลานต์ 4)

รูปที่ 2.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 4 เป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีพจน์ของการประวิงเวลา (e^{-s}) ในการออกแบบตัวควบคุมใช้สูตรการประมาณค่าแบบพาเคอันดับหนึ่ง ซึ่งมีอันดับเดียวกับอันดับของพลาเน็ต ทำให้เมื่อออกแบบเสร็จ ระบบวงรอบปิดมีอันดับ 4 ส่งผลให้ระบบวงรอบปิดมีผลการตอบสนองทางโคเมนเวลาดังรูปที่ 2.7 (ค) อันเดอร์ชู้ตที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการประมาณพจน์ประวิงเวลา ซึ่งให้ความหมายว่าระบบวงรอบปิดเกิดการประวิงเวลาประมาณ 0.5 วินาทีในการตอบสนอง และจะเห็นว่า $P.O. = 20\%$ ซึ่งค่อนข้างสูง แม้ว่า T_s จะสั้นเพียง 2 วินาทีก็ตาม เมื่อพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ พบว่า $PM = 15.4 \text{ deg}$ และ $GM = 1.93 \text{ dB}$ ซึ่งมีค่าน้อยมากและเป็นเสถียรภาพแบบมีเงื่อนไข ระบบอาจขาดเสถียรได้ง่าย พิจารณาความไวคังแสดงในรูปที่ 2.7 (จ) มีโครงสร้างโดยส่วนใหญ่คล้ายกับกรณีที่ผ่านมา แตกต่างตรงที่ในย่านความถี่สูง $|S_G^T|$ มีแนวโน้มลดลง นั่นหมายความว่า $|M_\omega|$ จะสูงขึ้นในย่านความถี่สูง ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อระบบเพราะระบบวงรอบปิดจะขยายสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูง

พลาเน็ต 5 ต้องการ $P.O. \leq 5\%$ และ $T_s \leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม

$$G(s) = \frac{0.083s^2 - 0.5s + 1}{8.3s^4 + 51.66s^3 + 110.1s^2 + 20.5s + 1} ; \quad e^{-s} \cong \frac{1 - \frac{s}{2} + \frac{s^2}{12}}{1 + \frac{s}{2} + \frac{s^2}{12}}$$

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

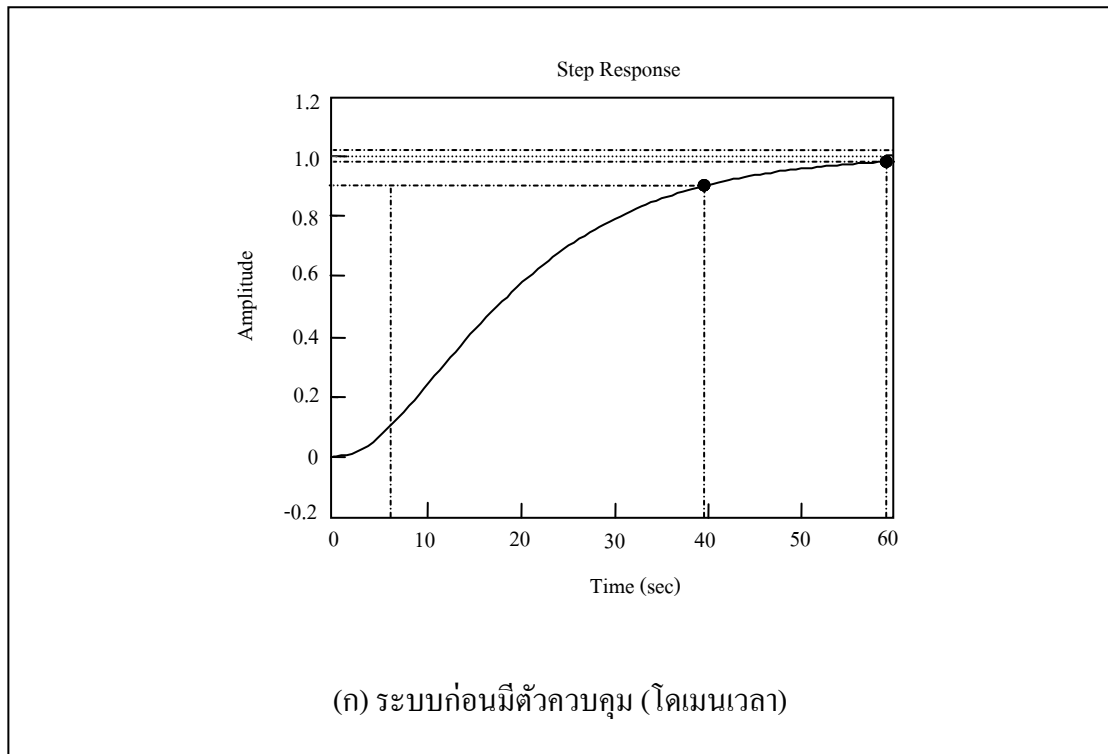
$$T(s) = \frac{-6.94s^5 - 5.06s^4 + 65.64s^3 + 109s^2 - 832.4s - 1540}{1.36s^5 + 46.6s^4 + 175.7s^3 + 129.5s^2 - 831.4s - 1540}$$

- ความไวของระบบ

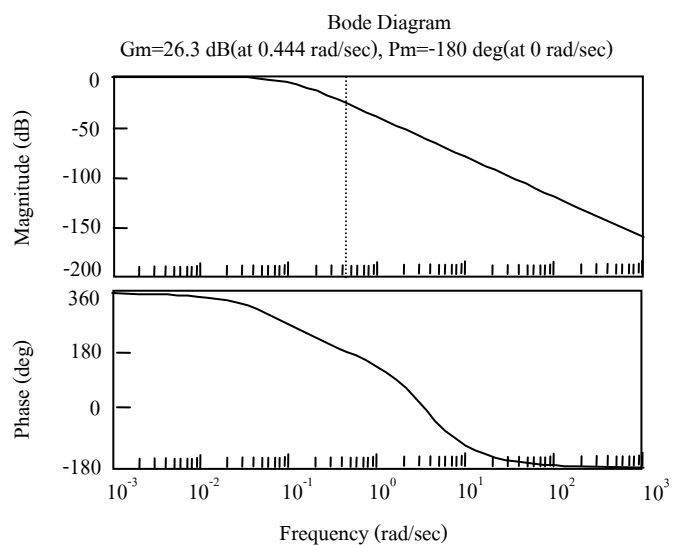
$$S_G^T = \frac{8.3s^5 + 51.66s^4 + 110.1s^3 + 20.5s^2 + s}{1.36s^5 + 46.6s^4 + 175.7s^3 + 129.5s^2 - 831.4s - 1540}$$

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

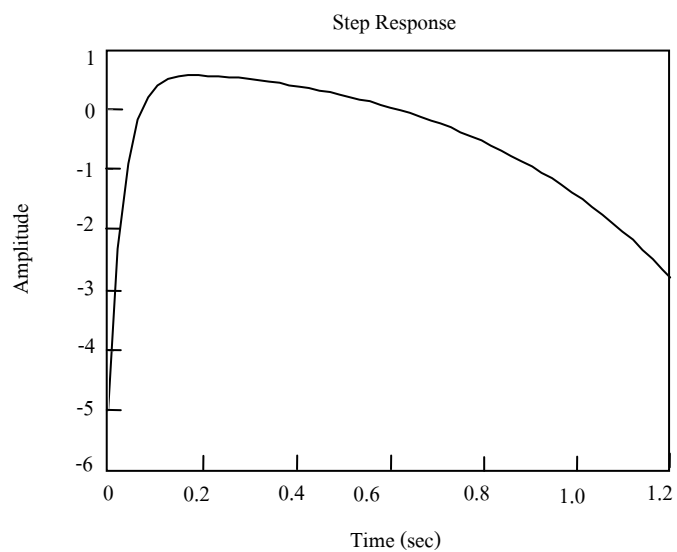
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : $-2.1 \pm j2$ -2.1 -30 2.13



รูปที่ 2.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

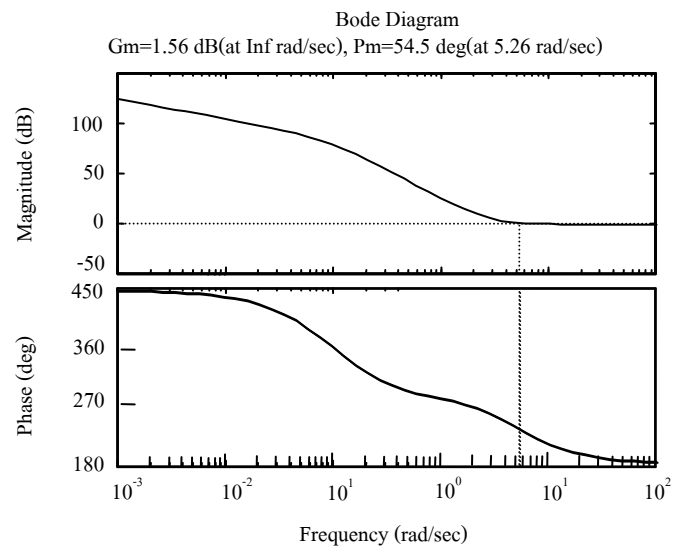


(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)

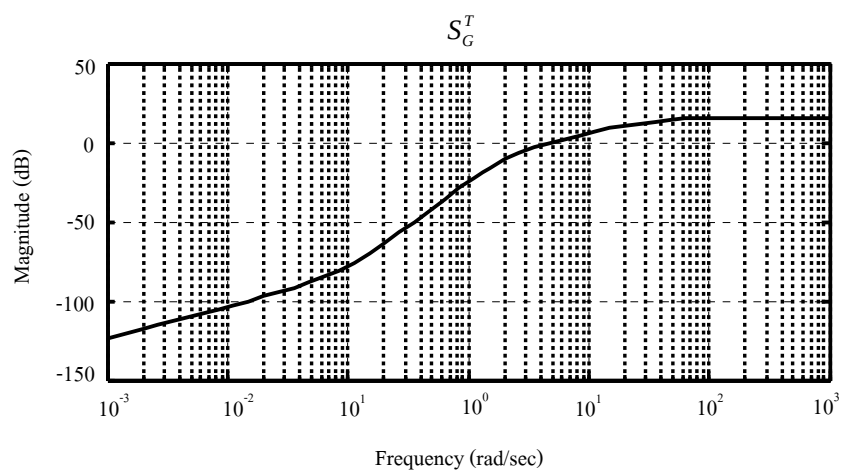


(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)

รูปที่ 2.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม



(จ) $|S_G^T|$ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 5)

รูปที่ 2.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

สำหรับกรณีนี้ เมื่อออกแบบแล้วเสร็จพบว่าระบบวงรอบปิดขาดเสถียร และเมื่อพิจารณาความไวคั้งที่แสดงในรูปที่ 2.8 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่า 2 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 2 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_{\omega}|$ เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดี สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลาเน็ต แต่อย่างไรก็ตามระบบวงปิดขาดเสถียรจึงไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้จริง

พลาเน็ต 6 ต้องการ $P.O. \leq 5\%$ และ $T_s \leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม

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

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี)

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

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

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

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

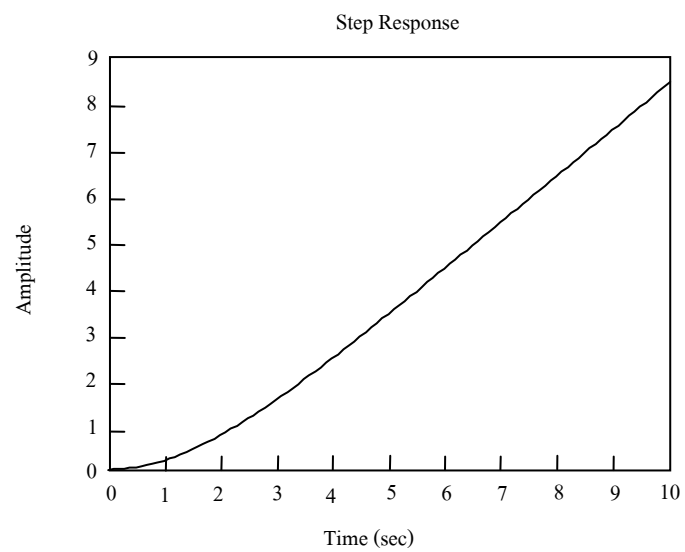
$$T(s) = \frac{0.19s^5 - 2.70s^4 - 113.7s^3 - 1025s^2 - 3581s - 4174}{1.19s^5 + 35.3s^4 - 40.68s^3 - 989s^2 - 3581s - 4174}$$

- ความไวของระบบ

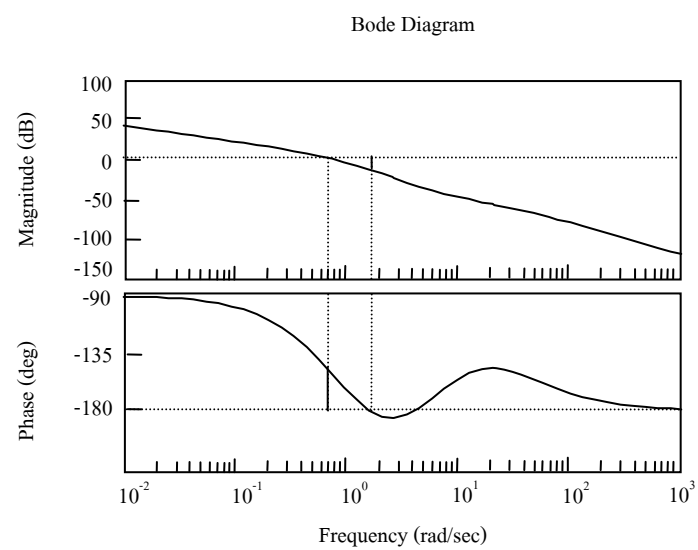
$$S_G^T = \frac{s^5 + 38s^4 + 73s^3 + 36s^2}{1.19s^5 + 35.3s^4 - 40.71s^3 - 989.2s^2 - 3582s - 4175}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : 35.70 -7.03 -6 -6 -2.44

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -2.1±j2 -2.1 -30 6.62

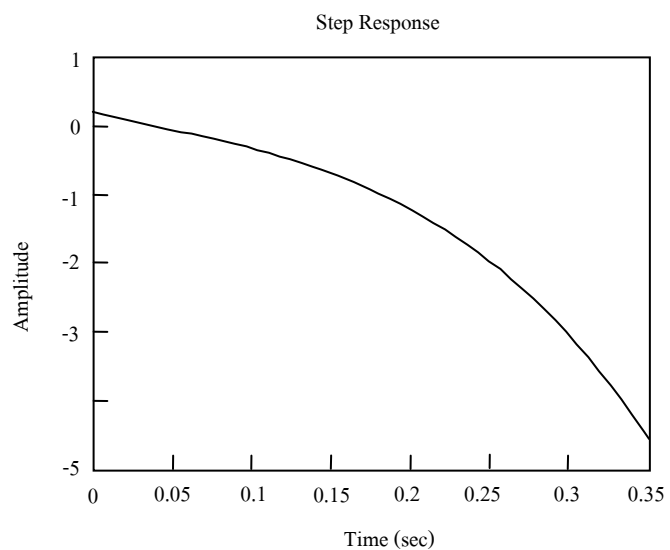


(ก) ระบบก่อนมีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)

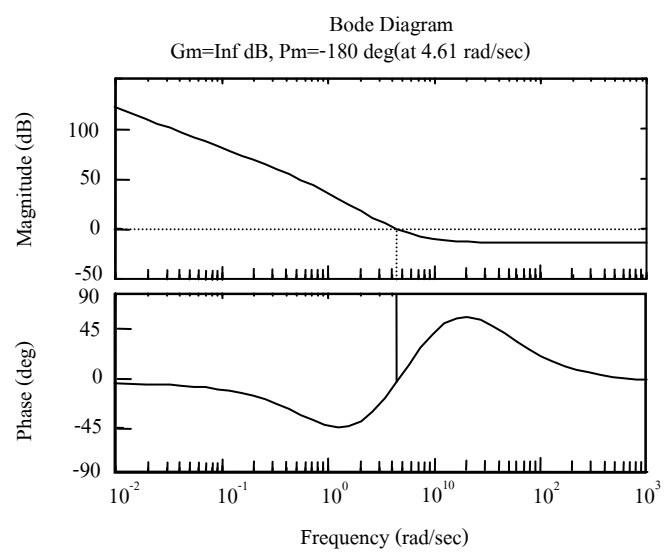


(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)

รูปที่ 2.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

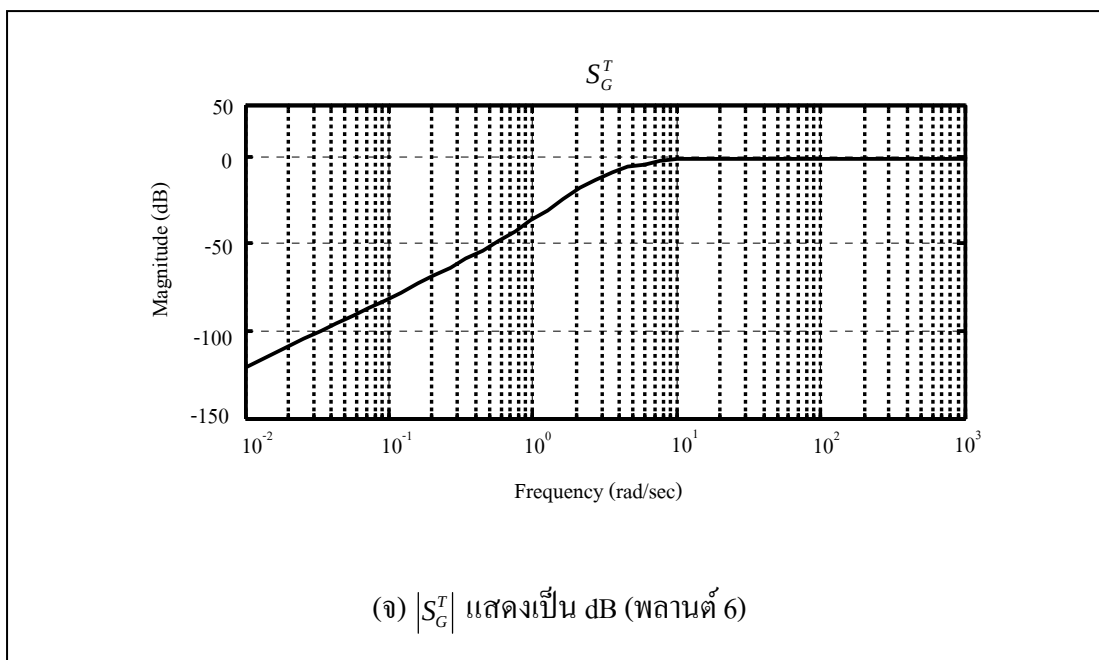


(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)



(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 2.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 2.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

สำหรับกรณีนี้ เมื่อออกแบบแล้วเสร็จพบว่าระบบวงรอบปิดขาดเสถียร และเมื่อพิจารณาความไวดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่า 3 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 3 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดี สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลานต์ แต่อย่างไรก็ตามระบบวงปิดขาดเสถียรจึงไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้จริง

พลานต์ 7 ต้องการ $P.O. \leq 5\%$ และ $T_s \leq 2s$

ก่อนมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก่อนมีตัวควบคุม

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

เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (เชิงทฤษฎี)

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

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

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

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

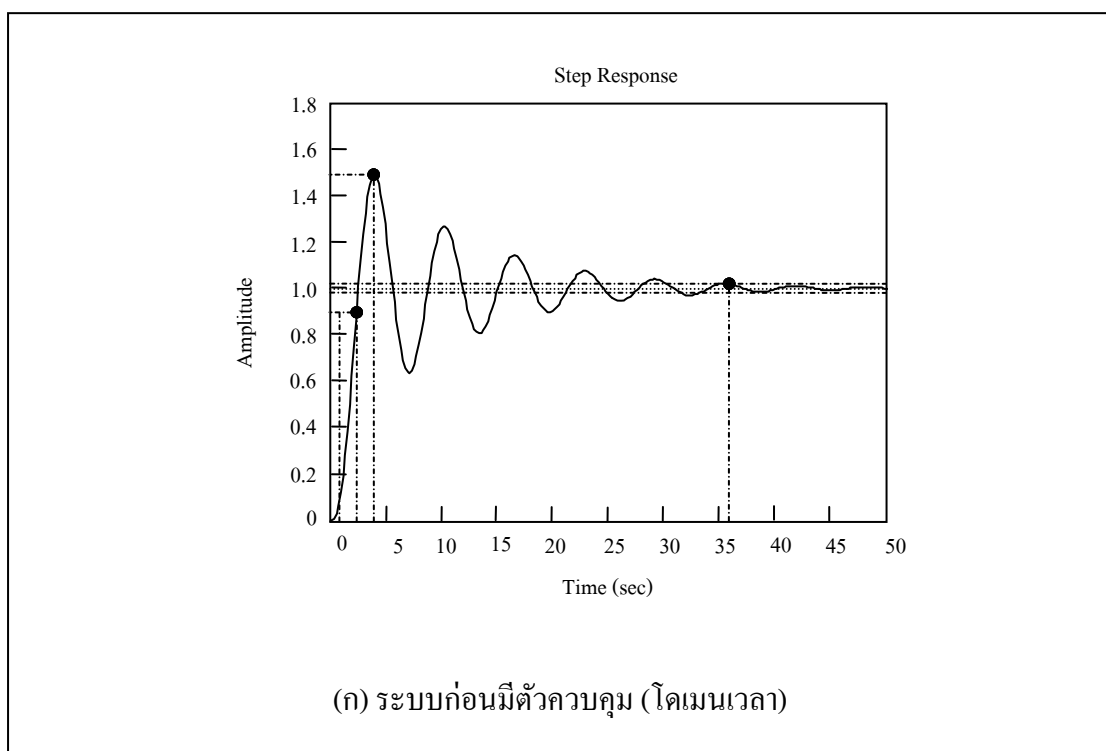
$$T(s) = \frac{35.1s^3 + 205s^2 + 533.6s + 529.8}{s^4 + 36.3s^3 + 206.2s^2 + 534.6s + 529.8}$$

- ความไวของระบบ

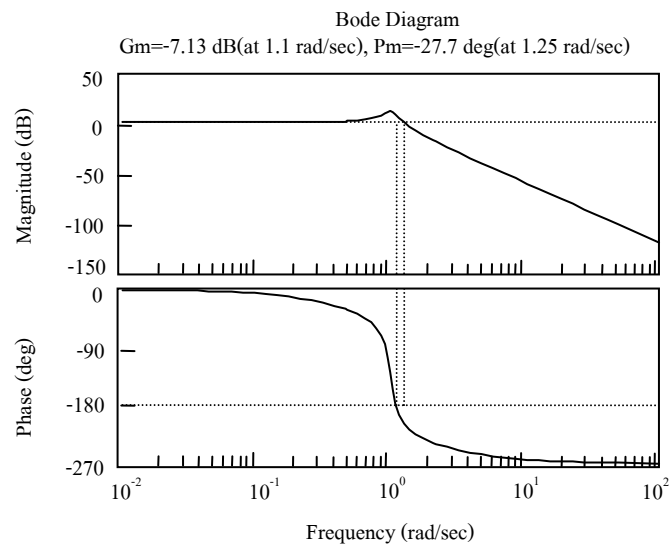
$$S_G^T = \frac{s^4 + 1.2s^3 + 1.2s^2 + s}{s^4 + 36.3s^3 + 206.2s^2 + 534.6s + 529.8}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : $-1.91 \pm j1.96$ -2.02

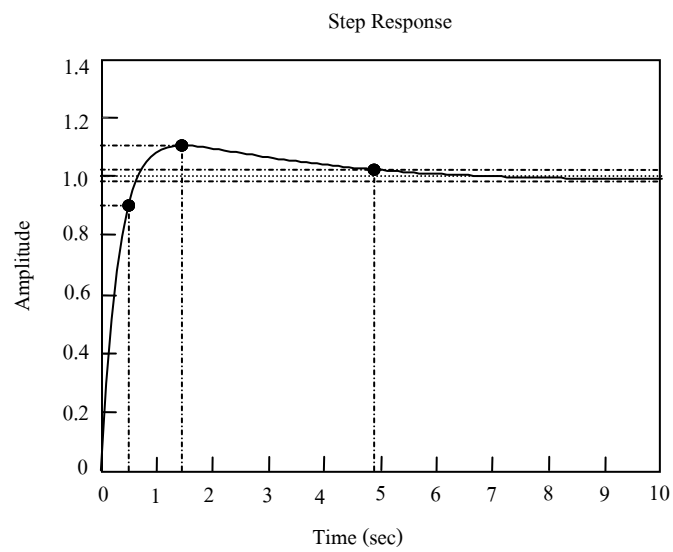
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : $-2.1 \pm j2$ -2.1 -30



รูปที่ 2.10 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

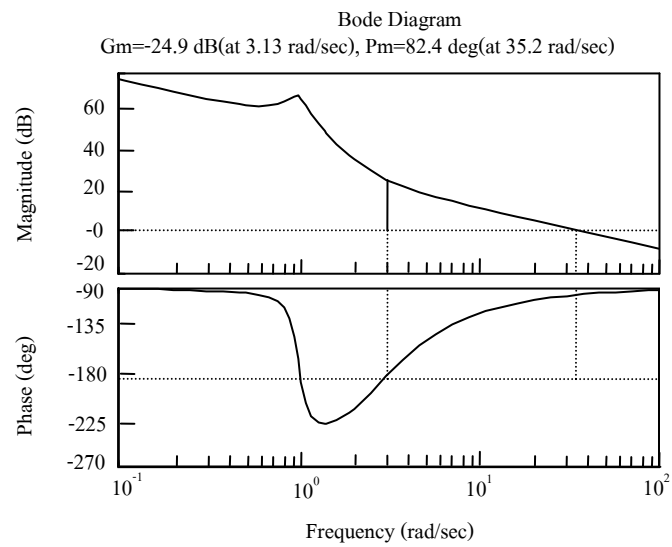


(ข) ระบบก่อนตัวควบคุม (โดเมนความถี่)

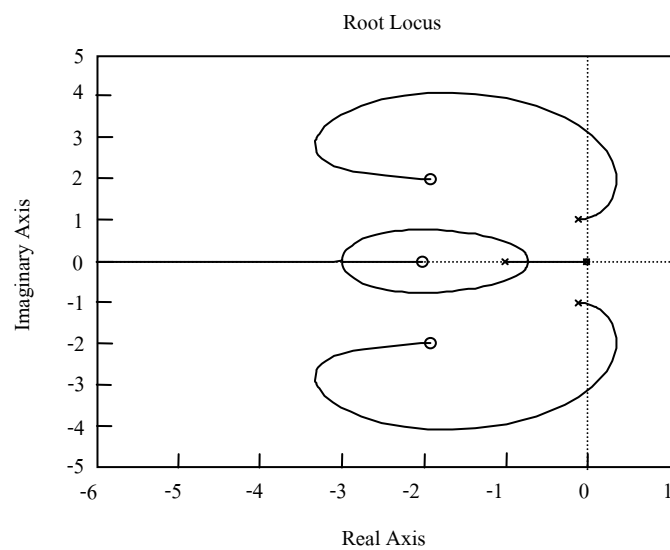


(ค) ระบบที่มีตัวควบคุม (โดเมนเวลา)

รูปที่ 2.10 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

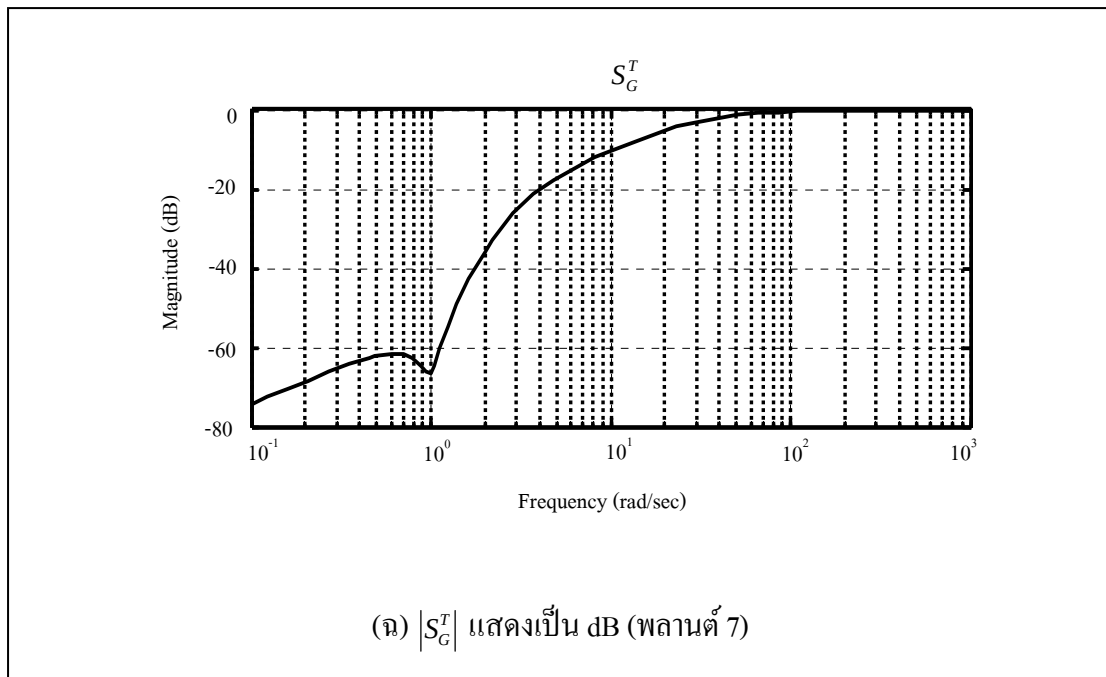


(ง) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม



(จ) แผนภาพโกล์สตราคของระบบที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ

รูปที่ 2.10 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 2.10 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ต 7 ซึ่งมีอันดับ 3 และระบบวงรอบปิดมีอันดับ 4 อาจสังเกตเห็นได้ว่า การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงรอบปิดมี $T_S = 0.488s < 2s$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด แต่ $P.O. = 10.1\% > 5\%$ ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดพอสมควร และเมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางความถี่ของระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม $PM = 82.4 \text{ deg}$ และ $GM = -24.9 \text{ dB}$ ระบบวงปิดมีเสถียรภาพแบบมีเงื่อนไข ซึ่งแผนภาพโกล์สราคแสดงให้เห็นได้อย่างเด่นชัด การใช้ระบบวงรอบปิดจำเป็นต้องเลือกค่าเกณฑ์ของวงควบคุมอย่างเหมาะสมมิให้ขาดเสถียร พิจารณาจากความไวดังแสดงในรูปที่ 2.10 (จ) อาจสังเกตเห็นได้ว่า ในย่านความถี่น้อยกว่า 10 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 10 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดี สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลาเน็ต

2.5 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้ให้การทบทวนขั้นตอนดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ตามแนวทางเดิมที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว ซึ่งแนวทางนี้อาศัยหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ในระบบวงปิด พร้อมทั้งนำเสนอผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอกับพลาเน็ตยาคทั้ง 7 พลาเน็ต จากผลการออกแบบพบว่า ภูมิของพลาเน็ตที่ควบคุมยากที่มีอันดับสาม ผลการตอบสนองของระบบที่มีการออกแบบตัวควบคุมบางพลาเน็ต มีผลการตอบสนองดีกว่าพลาเน็ตที่ไม่มีการออกแบบตัวควบคุม แต่ในบางกรณี ผลการตอบสนองกลับมีคุณภาพด้อยกว่า ส่วนภูมิของพลาเน็ตที่ควบคุมยากที่มีอันดับมากกว่าอันดับสาม ผลของการตอบสนองของระบบที่มีการออกแบบตัวควบคุมจะไม่ค่อยดีนัก บางพลาเน็ตส่งผลให้ระบบป้อนกลับขาดเสถียร และเมื่อพิจารณาความไวของระบบพบว่า พลาเน็ตที่ควบคุมยาก 7 พลาเน็ตนี้ เมื่อมีการใช้งานตัวควบคุมพีไอดีเอจะมีความสามารถในการตามรอยอินพุตและการกำจัดการรบกวนจากภายนอก ตลอดจนสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงได้ดีอีกด้วย

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีการเลือกโพลเด่น 1 คู่ มีข้อดีคือ ในระบบที่มีอันดับไม่สูงและมีความซับซ้อนไม่มาก ถ้าเลือกค่าโพลเด่นที่เหมาะสม จะส่งผลให้ระบบมีผลการตอบสนองที่ดีขึ้น ในทางกลับกันการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้หากนำมาใช้กับระบบที่มีอันดับสูง มักได้ผลไม่ค่อยดีนัก บางระบบที่มีความซับซ้อนมากอาจทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรได้

ดังนั้น โพลมีความสำคัญในการออกแบบ หากเลือกตำแหน่งโพลของระบบวงปิดไม่เหมาะสม จะส่งผลให้การตอบสนองของระบบไม่ดี หากใช้วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล เพื่อทำการหาตำแหน่งโพลที่เหมาะสมต่อระบบที่สุด จะส่งผลให้ผลการตอบสนองของระบบดีขึ้น และระบบป้อนกลับจะยังคงมีเสถียรภาพอยู่เสมอ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่นำเสนอในบทที่ 3 และบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด

3.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีในระนาบเอส ด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล ดำเนินการโดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งแสดงรายละเอียดของความสัมพันธ์ทางสมการพีชคณิตสำหรับการออกแบบ นอกจากนี้ยังนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีกับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 7 แบบ ตามข้อเสนอแนะของ Astrom and Haggglund (2000) อีกทั้งผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการออกแบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งกำหนดให้การรบกวนจากภายนอกมีขนาด 10% ของอินพุต และเป็นการรบกวนเชิงหักล้าง (ลบ) ตลอดจนผลการจำลองสถานการณ์ความไวของระบบ ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และสรุปผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ตามลำดับ

3.2 ความสัมพันธ์ทางพีชคณิตสำหรับการออกแบบ

ในอันดับแรกนี้ เป็นการนำเสนอที่มาของระบบสมการพีชคณิตเพื่อการออกแบบตัวควบคุม ในการพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะของระบบได้แยกเป็น 2 กรณี กล่าวคือ

กรณีที่ 1 ระบบ $G_p(s)$ มีกำลังของพหุนาม $p(s)$ เท่ากับกำลังของพหุนาม $q(s)$ ($a_0 \neq 0$)

กรณีที่ 2 ระบบ $G_p(s)$ มีกำลังของพหุนาม $p(s)$ น้อยกว่ากำลังของพหุนาม $q(s)$ ($a_0 = 0$)

กรณีที่ 1 ($a_0 \neq 0$) มีฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ตคือ

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

ดังนั้น ระบบวงปิดมีสมการลักษณะเฉพาะดังนี้

$$\begin{aligned}
& s^n + \left[\frac{p_1 + d + e + (a + b + z)ka_0 + ka_1}{1 + ka_0} \right] s^{n-1} \\
& + \left[\frac{p_2 + (d + e)p_1 + de + (ab + z(b + a))ka_0 + (a + b + z)ka_1 + ka_2}{1 + ka_0} \right] s^{n-2} \\
& + \left[\frac{p_3 + (d + e)p_2 + dep_1 + abzka_0 + (ab + z(b + a))ka_1 + (a + b + z)ka_2 + ka_3}{1 + ka_0} \right] s^{n-3} \\
& \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
& \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
& \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
& + \left[\frac{p_n + (d + e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab + z(b + a))ka_{n-2} + (a + b + z)ka_{n-1} + ka_n}{1 + ka_0} \right] s^3 \\
& + \left[\frac{(d + e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab + z(b + a))ka_{n-1} + (a + b + z)ka_n}{1 + ka_0} \right] s^2 \\
& + \left[\frac{dep_n + abzka_{n-1} + (ab + z(b + a))ka_n}{1 + ka_0} \right] s + \left[\frac{abzka_n}{1 + ka_0} \right] = 0 \tag{3.1}
\end{aligned}$$

จากสมการลักษณะเฉพาะของโพล $s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$ (โดยที่ $m = n+3$ และ n คืออันดับของพลาเน็ต) นำสมการลักษณะเฉพาะของระบบวงปิด และสมการลักษณะเฉพาะของโพลมาแก้สมการด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์จะได้

$$\begin{aligned}
& \frac{p_1 + (d + e) + (a + b + z)ka_0 + ka_1}{1 + ka_0} = \alpha_1 \\
& \frac{p_2 + (d + e)p_1 + de + (ab + z(b + a))ka_0 + (a + b + z)ka_1 + ka_2}{1 + ka_0} = \alpha_2 \\
& \frac{p_3 + (d + e)p_2 + dep_1 + abzka_0 + (ab + z(b + a))ka_1 + (a + b + z)ka_2 + ka_3}{1 + ka_0} = \alpha_3 \\
& \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
& \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
& \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
& \frac{p_n + (d + e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab + z(b + a))ka_{n-2} + (a + b + z)ka_{n-1} + ka_n}{1 + ka_0} = \alpha_n \\
& \frac{(d + e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab + z(b + a))ka_{n-1} + (a + b + z)ka_n}{1 + ka_0} = \alpha_{n+1}
\end{aligned}$$

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

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

จากการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการข้างต้นสามารถจัดสมการทั้ง 7 สมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_2 & p_1 & 1 & 0 & a_0 & a_1 & a_2 \\ p_3 & p_2 & p_1 & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_n & p_{n-1} & p_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & p_n & p_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{1+ka_0} \\ \frac{d+e}{1+ka_0} \\ \frac{de}{1+ka_0} \\ \frac{abzk}{1+ka_0} \\ \frac{k(ab+z(a+b))}{1+ka_0} \\ \frac{k(a+b+z))}{1+ka_0} \\ \frac{k}{1+ka_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

จัดรูปแบบสมการ (3.2) ให้อยู่ในรูป $Ax = B$ เพื่อง่ายต่อการคำนวณ โดยกำหนดให้

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+ka_0} \\ \frac{d+e}{1+ka_0} \\ \frac{de}{1+ka_0} \\ \frac{abzk}{1+ka_0} \\ \frac{k(ab+z(a+b))}{1+ka_0} \\ \frac{k(a+b+z))}{1+ka_0} \\ \frac{k}{1+ka_0} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ดังนั้นจะได้สมการที่อยู่ในรูป $Ax = B$ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_2 & p_1 & 1 & 0 & a_0 & a_1 & a_2 \\ p_3 & p_2 & p_1 & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_n & p_{n-1} & p_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & p_n & p_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

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 (3.4) สามารถทำการหาคำตอบของเมตริกซ์ x ได้ด้วยโปรแกรม MATLAB ขึ้นตอนนี้จะมียังจำนวน $n+3$ สมการ 7 ตัวแปร ซึ่งคำตอบที่ได้คือเมตริกซ์ x (x_1 ถึง x_7) เมื่อได้คำตอบของเมตริกซ์ x จะนำไปแทนในสมการที่ (3.3) เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ k, a, b, z, d, e ซึ่งขึ้นตอนนี้มีจำนวนสมการ 7 สมการ และมีจำนวนตัวแปร 6 ตัว

- หาค่าพารามิเตอร์ k, a, b, z, d, e

จากสมการที่ (3.3) ได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$a_0 = \frac{1 - x_1}{x_1 k} \quad (3.5)$$

$$d = x_2 + x_2 k a_0 - e \quad (3.6)$$

$$e = \frac{x_3 + k x_3 a_0}{x_2 + k x_2 a_0 - e} \quad (3.7)$$

$$abzk = x_4 + x_4ka_0 \quad (3.8)$$

$$k(ab + z(a + b)) = x_5 + x_5ka_0 \quad (3.9)$$

$$k(a + b + z) = x_6 + x_6ka_0 \quad (3.10)$$

$$a_0 = \frac{k - x_7}{x_7k} \quad (3.11)$$

นำสมการ (3.5) = (3.11) ได้คำตอบของค่า k คือ

$$k = \frac{x_7}{x_1} \quad (3.12)$$

แทนค่า d จากสมการ (3.6) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$e^2 - \left(\frac{x_1x_2 + x_2x_7a_0}{x_1} \right) e + \left(\frac{x_1x_3 + x_3x_7a_0}{x_1} \right) = 0 \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) จะได้คำตอบของค่า d, e ที่จะต้องเลือกเฉพาะค่าที่เป็นบวก และทำให้สมการหาค่า a, b และ z เป็นจริงเท่านั้น แทนค่า k ลงในสมการที่ (3.8) สมการที่ (3.10) และสมการที่ (3.9) จะได้

$$ab = \frac{x_1x_4 + x_4x_7a_0}{zx_7} \quad (3.14)$$

$$a + b = \left(\frac{x_1x_6 + x_6x_7a_0}{x_7} \right) - z \quad (3.15)$$

$$ab + z(a + b) = \frac{x_5 + x_5 x_7 a_0}{x_7} \quad (3.16)$$

แทนค่า ab และ $a + b$ ลงในสมการ (3.16) พบว่า

$$\frac{x_5 + x_5 x_7 a_0}{x_7} = \left[\frac{x_1 x_4 + x_4 x_7 a_0}{z x_7} \right] + z \left[\left(\frac{x_1 x_6 + x_6 x_7 a_0}{x_7} \right) - z \right]$$

หรือ

$$x_7 z^3 - (x_1 x_6 + x_6 x_7 a_0) z^2 + (x_5 + x_5 x_7 a_0) z + (x_1 x_4 + x_4 x_7 a_0) = 0 \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.17) จะได้คำตอบของค่า a, b, z ทั้งนี้เลือกใช้เฉพาะค่าจริงที่เป็นบวกและสอดคล้องกับค่า d และ e อย่างสมจริงเท่านั้น

กรณีที่ 2 ($a_0 = 0$) มีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

$$G_p(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_1 s^l + a_2 s^{l-1} + \dots + a_l}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n}$$

ดังนั้นระบบมีสมการลักษณะเฉพาะดังนี้

$$\begin{aligned} & s^n + (p_1 + d + e + ka_1) s^{n-1} + (p_2 + (d + e)p_1 + de + (a + b + z)ka_1 + ka_2) s^{n-2} \\ & + (p_3 + (d + e)p_2 + dep_1 + (ab + z(b + a))ka_1 + (a + b + z)ka_2 + ka_3) s^{n-3} \\ & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ & + \left(p_n + (d + e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab + z(b + a))ka_{n-2} \right) s^3 \\ & + \left((a + b + z)ka_{n-1} + ka_n \right) s^2 \\ & + ((d + e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab + z(b + a))ka_{n-1} + (a + b + z)ka_n) s^2 \\ & + (dep_n + abzka_{n-1} + (ab + z(b + a))ka_n) s + abzka_n = 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

จากสมการลักษณะเฉพาะของโพล $s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$ (เมื่อ $m = n+3$ และ n คืออันดับของพหุนาม) นำสมการลักษณะเฉพาะของระบบและสมการลักษณะเฉพาะของโพลมาแก้สมการด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์จะได้รับความสัมพันธ์

$$\begin{aligned}
(d+e) + ka_1 &= \alpha_1 - p_1 \\
(d+e)p_1 + de + (a+b+z)ka_1 + ka_2 &= \alpha_2 - p_2 \\
(d+e)p_2 + dep_1 + (ab+z(b+a))ka_1 + (a+b+z)ka_2 + ka_3 &= \alpha_3 - p_3 \\
\cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
\cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
\cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
(d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab+z(b+a))ka_{n-2} + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n &= \alpha_n - p_n \\
(d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-1} + (a+b+z)ka_n &= \alpha_{n+1} \\
dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n &= \alpha_{n+2} \\
abzka_n &= \alpha_{n+3}
\end{aligned}$$

จากการเทียบสัมประสิทธิ์ข้างต้น สามารถจัดสมการทั้ง 6 ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ p_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ p_2 & p_1 & 0 & a_1 & a_2 & \vdots \\ \vdots & p_2 & a_1 & a_2 & \vdots & a_{n-1} \\ p_{n-1} & \vdots & a_2 & \vdots & a_{n-1} & a_n \\ p_n & p_{n-1} & \vdots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d+e \\ de \\ abzk \\ k(ab+z(a+b)) \\ k(a+b+z) \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - p_1 \\ \alpha_2 - p_2 \\ \vdots \\ \alpha_n - p_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

จัดรูปแบบสมการ (3.19) ให้อยู่ในรูป $Ax = B$ เพื่อง่ายต่อการคำนวณ โดยกำหนดให้

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d+e \\ de \\ abzk \\ k(ab+z(a+b)) \\ k(a+b+z) \\ k \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

ดังนั้นจะได้สมการที่อยู่ในรูป $Ax = B$ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ p_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ p_2 & p_1 & 0 & a_1 & a_2 & \vdots \\ \vdots & p_2 & a_1 & a_2 & \vdots & a_{n-1} \\ p_{n-1} & \vdots & a_2 & \vdots & a_{n-1} & a_n \\ p_n & p_{n-1} & \vdots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - p_1 \\ \alpha_2 - p_2 \\ \vdots \\ \alpha_n - p_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

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 (3.21) สามารถทำการหาคำตอบของเมตริกซ์ x ได้ด้วยโปรแกรม MATLAB ขั้นตอน
 นี้จะมีจำนวนสมการ $n+3$ สมการและ 6 ตัวแปร ซึ่งคำตอบที่ได้คือเมตริกซ์ x (x_1 ถึง x_6) เมื่อได้
 คำตอบของเมตริกซ์ x จะนำไปแทนในสมการที่ (3.20) เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ k, a, b, z, d, e
 ซึ่งขั้นตอนนี้มีจำนวนสมการ 6 สมการ และมีจำนวนตัวแปร 6 ตัว

- หาค่าพารามิเตอร์ k, a, b, z, d, e

จากสมการที่ (3.20) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$d = x_1 - e \quad (3.22)$$

$$e = \frac{x_2}{d} \quad (3.23)$$

$$ab = \frac{x_3}{zk} \quad (3.24)$$

$$ab + z(a + b) = \frac{x_4}{k} \quad (3.25)$$

$$a+b=\frac{x_5}{k}-z \quad (3.26)$$

$$x_6=k$$

แทนค่า d จากสมการ(3.22) ลงในสมการที่ (3.23) จะได้

$$-e^2+x_1e-x_2=0 \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.27) จะได้คำตอบของค่า d, e แทนค่า k, ab และ $a+b$ ลงในสมการ (3.25) ได้

$$-x_6z^3+x_5z^2-x_4z+x_3=0 \quad (3.28)$$

จากสมการที่ (3.28) จะได้คำตอบของค่า a, b, z การเลือกค่า d, e นั้นเลือกเฉพาะค่าจริงบวกและสมจริงต่อการแก้สมการเพื่อหาค่า a, b, z ส่วนค่า a, b, z นั้นเลือกเฉพาะค่าจริงบวกที่สอดคล้องกันเท่านั้น

3.3 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอนในระนาบเอสนี่ เป็นการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลดำเนินการโดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด เพื่อหาดำแหน่งโพลที่เหมาะสมกับระบบที่สุด ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้น $k=0$ กำหนดจำนวนรอบ กำหนดค่าเริ่มต้นของ $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ ด้วยการสุ่มค่า ทั้งนี้ $m=n+3$ และ n คืออันดับของพหุนาม ในการกำหนดขอบเขต ใช้วิธีการกำหนดขอบเขตวงกว้าง โดยกำหนดขอบเขตให้อยู่ในช่วงสูง ๆ ก่อน เช่น $[0, 1000]$ จากนั้นพิจารณาผลเฉลยของคำตอบที่ได้ หากผลเฉลยของคำตอบอยู่ในขอบเขตที่กำหนด จะทำการปรับขอบเขตให้แคบลงเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ดีขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 สร้างสมการลักษณะเฉพาะ $1+G_C G_P H(s)=0$ และ $s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$ โดยที่

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

ขั้นตอนที่ 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 พหุนาม $G_p(s)$ มีกำลังของพหุนาม $p(s)$ เท่ากับกำลังของพหุนาม $q(s)$ ($a_0 \neq 0$)

กรณี 2 พหุนาม $G_p(s)$ มีกำลังของพหุนาม $p(s)$ น้อยกว่ากำลังของพหุนาม $q(s)$ ($a_0 = 0$)

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการแก้สมการ 2 กรณีดังกล่าวข้างต้น

กรณี 1 $a_0 \neq 0$ (พิจารณาพหุนามอันดับ n)

จากการนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการมาเท่ากัน สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.4) การแก้สมการจะทำการแก้สมการ 2 ครั้ง การแก้สมการครั้งที่ 1 จะทำการแก้สมการ (3.4) เพื่อหาค่า x_1 ถึง x_7 การแก้สมการครั้งที่ 2 จะนำค่า x_1 ถึง x_7 ที่ได้แทนลงในสมการ (3.3) เพื่อนำไปคำนวณหาค่า k, a, b, z, d, e

กรณี 2 $a_0 = 0$ (พิจารณาพหุนามอันดับ n)

จากการนำสมการลักษณะเฉพาะทั้งสองสมการมาเท่ากัน สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.21) การแก้สมการจะทำการแก้สมการ 2 ครั้ง การแก้สมการครั้งที่ 1 จะทำการแก้สมการ (3.21) เพื่อหาค่า x_1 ถึง x_6 การแก้สมการครั้งที่ 2 จะนำค่า x_1 ถึง x_6 ที่ได้แทนลงในสมการ (3.20) เพื่อนำไปคำนวณหาค่า k, a, b, z, d, e

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากเกรเดียนต์น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดหรือไม่ ถ้า $\|\nabla J_k\| < \varepsilon$ สิ้นสุดการคำนวณ ข้ามไปขั้นตอนที่ 10 ตามขั้นตอนนี้พิจารณาการหาค่าเหมาะที่สุดดังนี้

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

$$\text{subject to } P.O_{\text{search}} - P.O_{\text{boundary}} \leq 0$$

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

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

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

จัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการปรับโทษดังนี้

$$\begin{aligned}
J = & f(x) + \rho \left[\min \left\{ (P.O_{boundary} - P.O_{search}), 0 \right\} \right]^2 \\
& + \rho \left[\min \left\{ (tr_{boundary} - tr_{search}), 0 \right\} \right]^2 \\
& + \rho \left[\min \left\{ (ts_{boundary} - ts_{search}), 0 \right\} \right]^2 \\
& + \rho \left[\min \left\{ (ess_{boundary} - ess_{search}), 0 \right\} \right]^2
\end{aligned} \tag{3.28}$$

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

ρ	คือ พารามิเตอร์การปรับโทษ (Penalty parameter)
$P.O_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน
$P.O_{search}$	คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา
$tr_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของช่วงเวลานั้น
tr_{search}	คือ ช่วงเวลานั้นของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา
$ts_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของช่วงเวลาเข้าที่
ts_{search}	คือ ช่วงเวลาเข้าที่ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา
$ess_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนของสถานะอยู่ตัว
ess_{search}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของสถานะอยู่ตัวของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา

ในการดำเนินงานได้กำหนดค่า $\varepsilon = 0.0001$ และ $\rho = 1,000$

ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงชุดคำตอบ โดยทำการสุ่มค่าของพารามิเตอร์ 4 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีพารามิเตอร์ m ตัว $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ จากนั้นจึงแก้สมการเพื่อหาค่า k, a, b, z, d, e ตามขั้นตอนที่ 2 3 และ 4

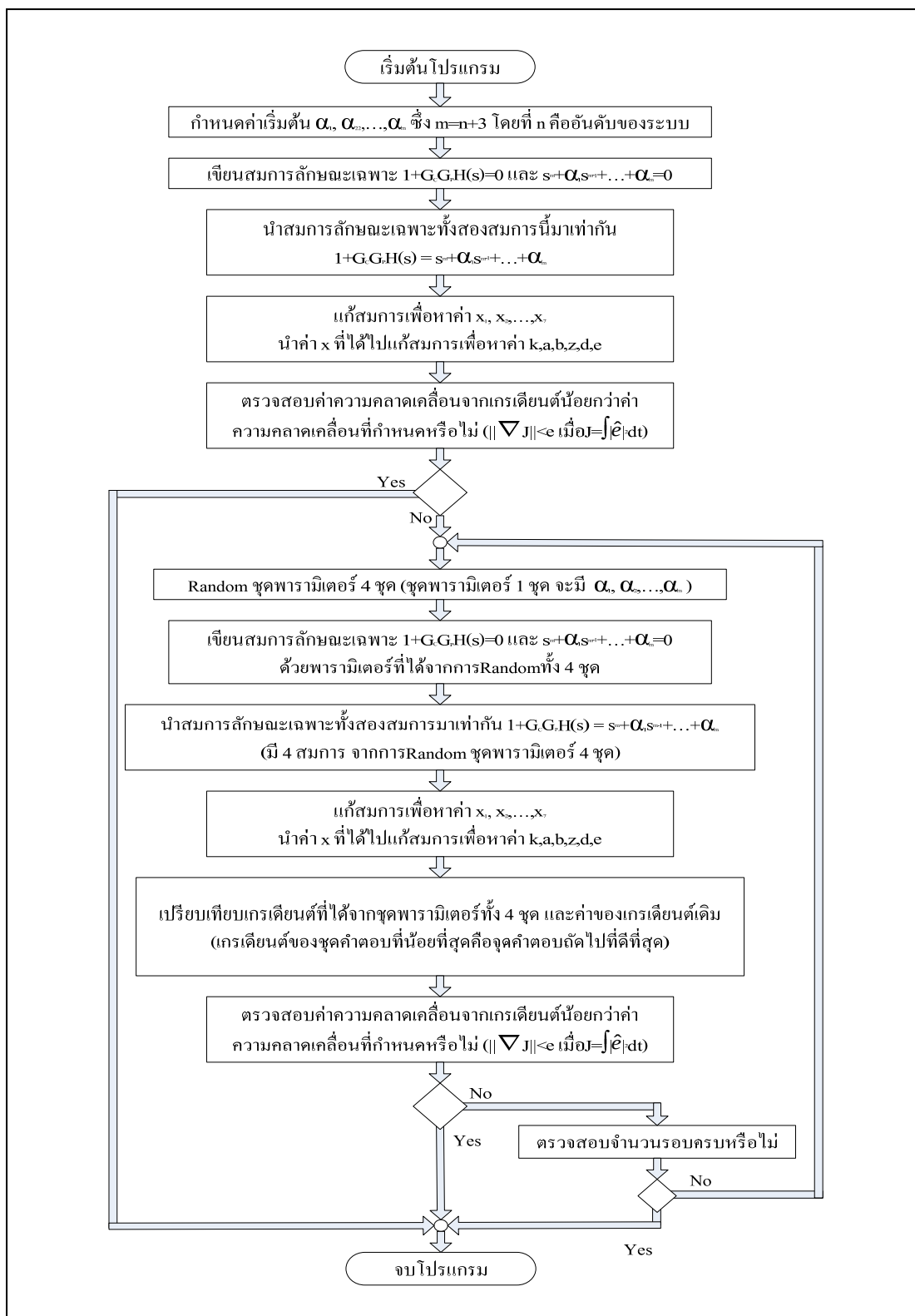
ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบเกรเดียนต์ของชุดคำตอบเดิมและชุดคำตอบใหม่ทั้ง 4 ชุด หากชุดคำตอบไหนมีค่าเกรเดียนต์น้อยที่สุด เลือกค่าพารามิเตอร์ของชุดคำตอบนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ในรอบการคำนวณถัดไป

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากเกรเดียนต์ของชุดคำตอบใหม่ว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดหรือไม่ ถ้า $\| \nabla J_k \| < \varepsilon$ สิ้นสุดการคำนวณ ข้ามไปขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 9 จำนวนรอบของการค้นหาคืบตามที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ใช่ให้เพิ่มตัวนับ $k = k+1$ ทำซ้ำขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 10 ได้ผลลัพธ์ $(\alpha^* = \alpha_{k+1})$

อาจสังเกตได้จากขั้นตอนที่ 5-8 ว่า การคำนวณค่าผิดพลาด (ϵ) ยึดอินพุต $r(t)$ เป็นเกณฑ์ นั้นหมายความว่าข้อกำหนดการออกแบบ (design specifications) ต้องการให้เอาต์พุตมีรูปทรง (รูปคลื่น) ใกล้เคียงกับรูปทรงของอินพุตมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการกำหนดขอบเขตการพุ่งเกิน เวลาขึ้น เวลาเข้าที่ และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว เพื่อให้กระบวนการคำนวณมีผลลัพธ์เป็นไปตามที่ต้องการอีกด้วย โดยการจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการปรับโทษ ดังสมการ(3.28) จากกระบวนการคำนวณจะให้ผลลัพธ์ที่ค่าต่าง ๆ เหล่านี้น้อยที่สุด แต่ทั้งนี้ก็มีข้อจำกัดที่ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเชิงตัวเลข ในกระบวนการประมาณคำตอบให้สมการกำหนดเกินหรือกำหนดขาด ซึ่งเป็นรูปแบบของปัญหา และจากที่การคำนวณอาศัยกระบวนการวนซ้ำ ค่าเกรเดียนต์ของความคลาดเคลื่อนเป็นตัวชี้ว่าในกระบวนการคำนวณวนซ้ำว่า คำตอบที่ได้กำลังมุ่งเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเกรเดียนต์มีค่าน้อยหรือแทบจะไม่แตกต่างแต่ละรอบของการวนซ้ำ มีความหมายว่าคำตอบหรือผลเฉลยเริ่มไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การคำนวณจึงเข้าสู่คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น จนกระทั่งการคำนวณสิ้นสุดลงด้วยเกณฑ์การยุติที่กำหนดเป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ϵ ของ $\|\nabla J_k\|$ การใช้ค่าเกรเดียนต์จะช่วยให้ไม่ต้องคำนวณด้วยจำนวนรอบการวนซ้ำที่มากจนเกินไป (Baldick, 2006) โดยการดำเนินงานตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นสามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธีจัดวางตำแหน่งโพล
ดำเนินการโดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด

3.4 ผลการจำลองสถานการณ์

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งกำหนดให้การรบกวนจากภายนอกมีขนาด 10% ของอินพุต และเป็นการรบกวนเชิงหักล้าง (ลบ) ในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้เกิดสัญญาณรบกวนหลังจากที่การตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว และแสดงผลการจำลองสถานการณ์ความไวของระบบวงปิดเมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอ ซึ่งได้มาจากการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลอย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งทำการออกแบบตัวควบคุมให้กับพลานต์ที่ควบคุมยาก 7 พลานต์ ตามข้อเสนอแนะของ Astrom and Hagglund (2000) มีผลการจำลองสถานการณ์ดังนี้

พลานต์ 1 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 2s$ และ $T_s \leq 5s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

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

ทั้งนี้ $K_p=0.58$ $K_I=0.89$ $K_D=2.55$ $K_A=-3.20$ $d=4.05$ และ $e=4.05$

- 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

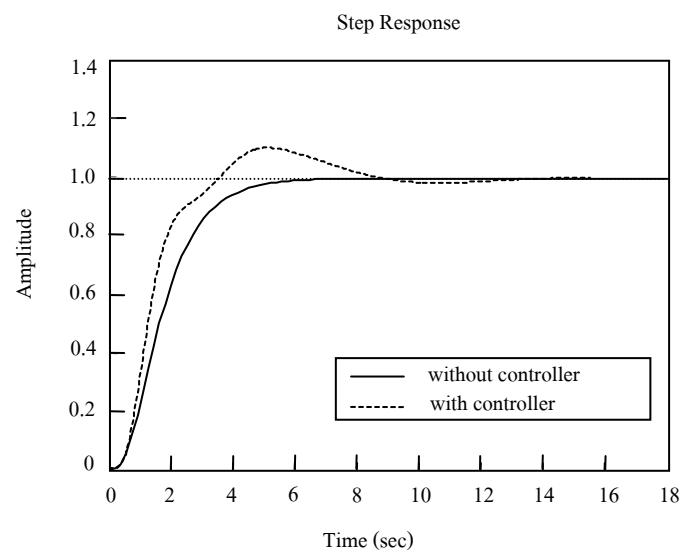
$$T(s) = \frac{-0.07s^3 + 15.92s^2 + 16.74s + 14.6}{0.016s^7 + 0.36s^6 + 3.25s^5 + 14.57s^4 + 34.03s^3 + 54.73s^2 + 33.12s + 14.6}$$

- มีความไวของระบบ

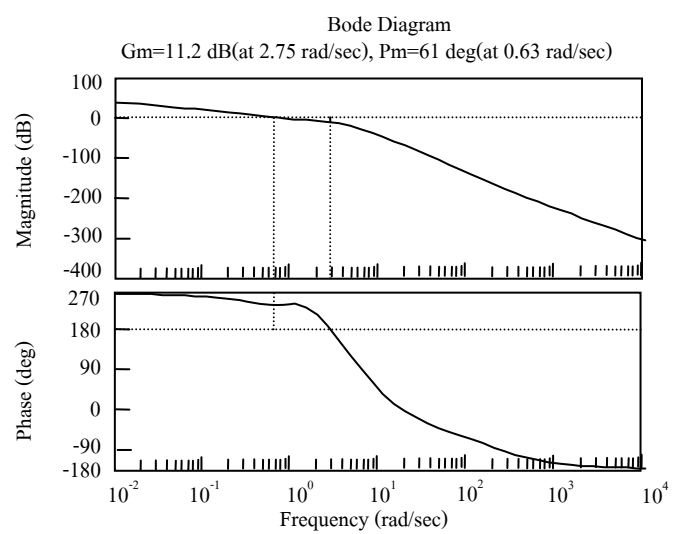
$$S_G^T = \frac{0.02s^7 + 0.36s^6 + 3.25s^5 + 14.57s^4 + 34.1s^3 + 38.82s^2 + 16.38s}{0.02s^7 + 0.36s^6 + 3.25s^5 + 14.57s^4 + 34.03s^3 + 54.73s^2 + 33.12s + 14.6}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -266 -0.53±j0.8

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -9.15 -5.66±j3.35 -0.98±j2.08 -0.34±j0.58

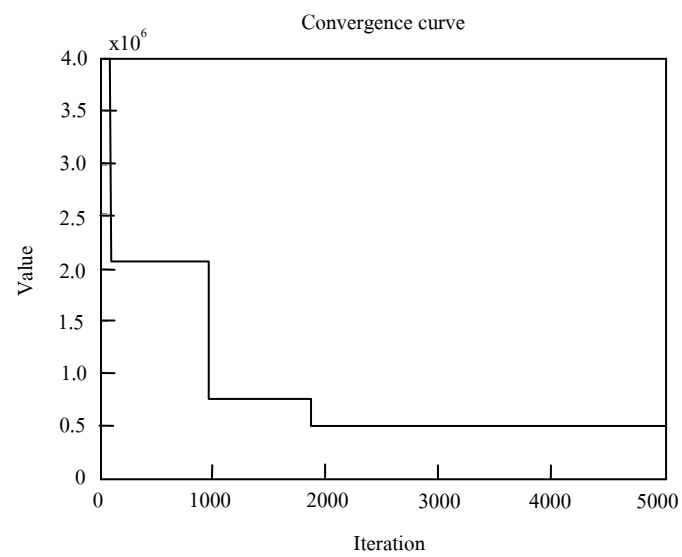


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

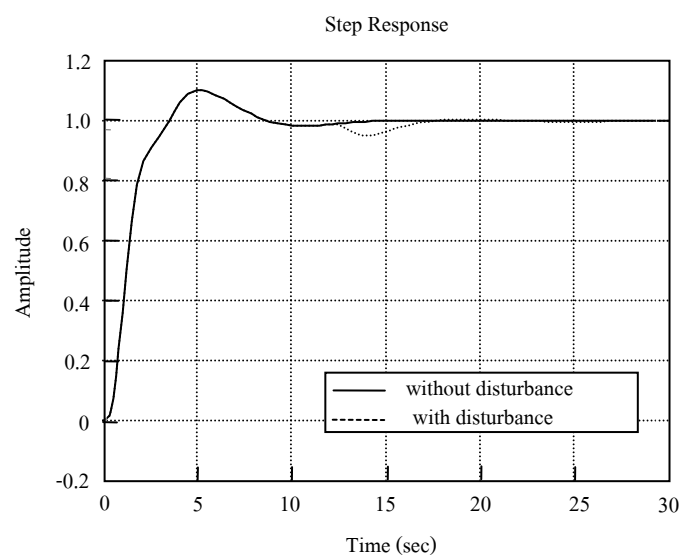


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 3.2 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

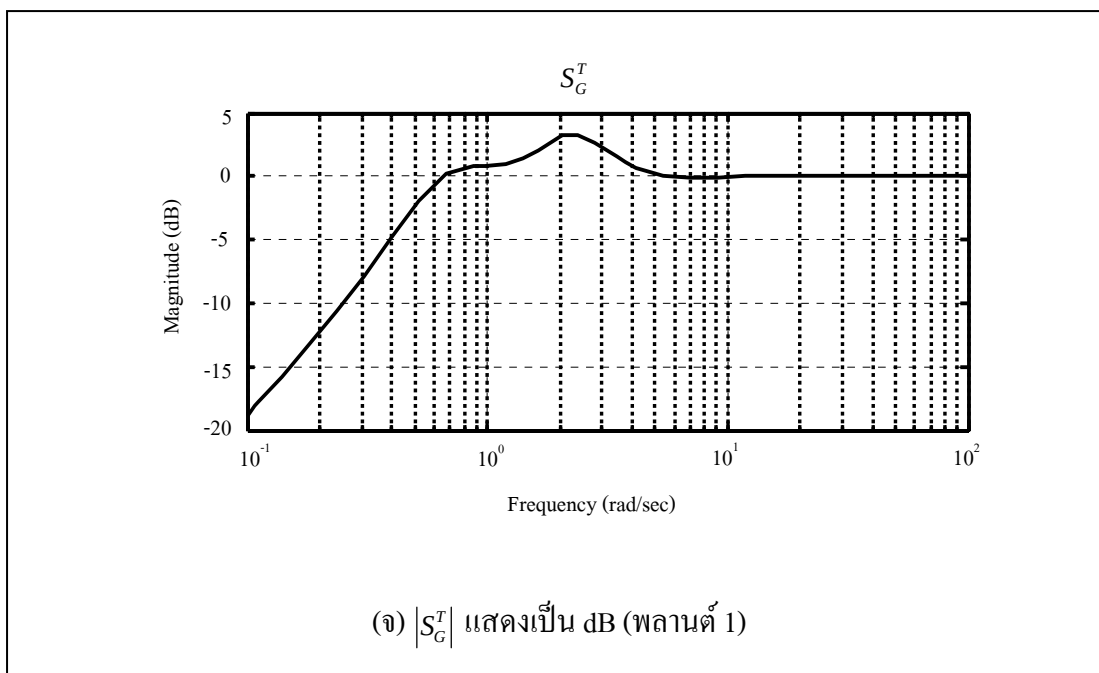


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 3.2 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 3.2 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.2 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่าการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา $P.O. = 10.5\% < 15\%$ และ $T_r = 1.8s < 2s$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด แต่ $T_s = 8.3s > 5s$ ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดอยู่บ้างไม่มากนัก พิจารณาแผนภาพโบดในรูปที่ 3.2 (ข) พบว่า $P_m = 61\text{deg}$ และ $G_m = 11.2\text{ dB}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบรักษาเสถียรภาพได้ดี พิจารณารูปที่ 3.2 (ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก เห็นได้ว่าระบบมีความสามารถในการฟื้นคืนระบบจากการถูกรบกวนจากภายนอกได้ดีมาก และเมื่อพิจารณาความไวดังรูปที่ 3.2 (จ) เห็นได้ว่าในย่านความถี่ต่ำกว่า 0.25 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่สูงกว่า 0.25 rad/sec ระบบวงปิดมีขนาดของความไวเพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 0 dB ในย่านความถี่สูง ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ว่าระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดการรบกวนจากภายนอกและสามารถตามรอยอินพุตได้ดี และยังสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดีอีกด้วย ตลอดจนจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลานต์

พลาเน็ต 2 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 5s$ และ $T_s \leq 10s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

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

ทั้งนี้ $K_p=0.97$ $K_I=0.27$ $K_D=10.80$ $K_A=662.08$ $d=29.48$ และ $e=29.48$

- 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

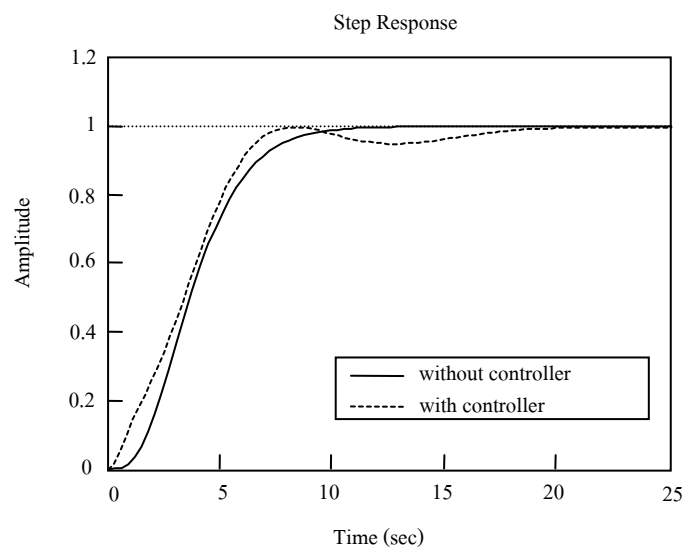
$$T(s) = \frac{673.8s^3 + 375.5s^2 + 854.9s + 231}{s^7 + 62.96s^6 + 1111s^5 + 3834s^4 + 6125s^3 + 3911s^2 + 1724s + 231}$$

- มีความไวของระบบ

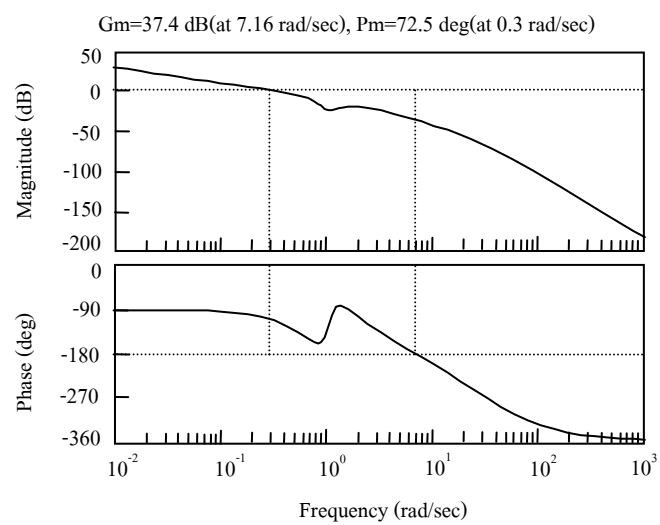
$$S_G^T = \frac{s^7 + 62.96s^6 + 1111s^5 + 3834s^4 + 5452s^3 + 3536s^2 + 869.1s}{s^7 + 62.96s^6 + 1111s^5 + 3834s^4 + 6125s^3 + 3911s^2 + 1724s + 231}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.29 -0.14±j1.08

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.2 0.26±j0.52 -1.61±j0.52 -29.51±j0.93

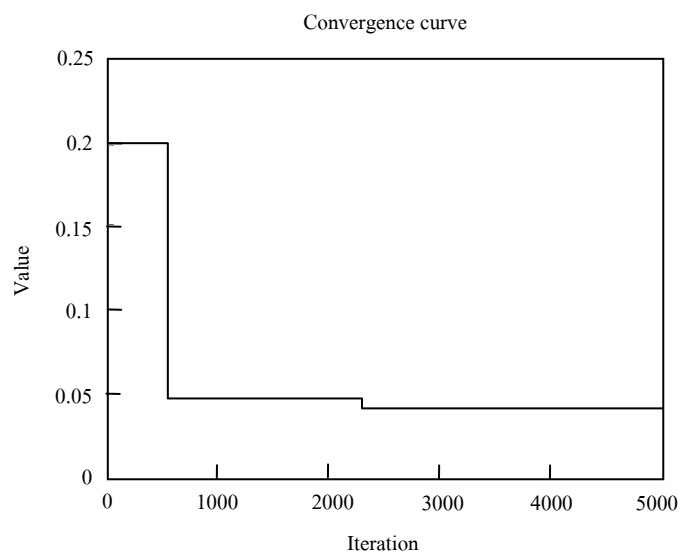


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

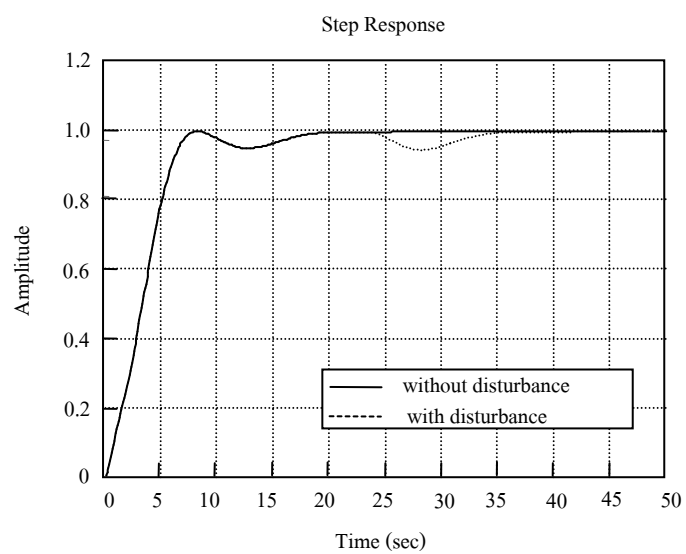


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 3.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

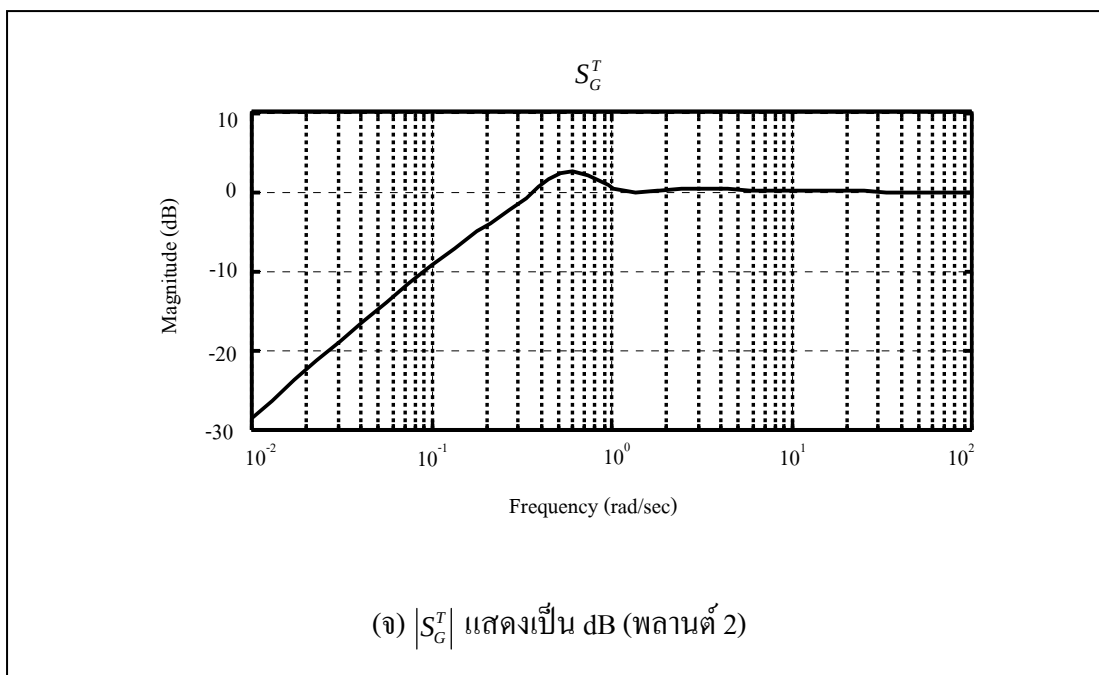


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 3.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 3.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.3 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา $P.O.=0\% < 15\%$ เป็นไปตามข้อกำหนด และ $T_r = 5.12s > 5s$ ตัวควบคุมสามารถแก้ไขการประวิงเวลาที่ปรากฏในพลวัตของพลานต์ได้ดี $T_s = 9.78s > 8s$ ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดเพียงเล็กน้อย และแผนภาพโบลด์รูปที่ 3.3 (ข) เปิดเผยให้เห็นว่า $P_m = 72.5 \text{ deg}$ และ $G_m = 37.4 \text{ dB}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก พิจารณาระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอกดังรูปที่ 3.3 (ง) เห็นได้ว่าระบบมีความสามารถในการฟื้นคืนระบบจากการถูกรบกวนจากภายนอกได้ดีมาก และเมื่อพิจารณาความไวดังรูปที่ 3.3 (จ) เห็นได้ว่าในย่านความถี่น้อยกว่าและมากกว่า 0.09 rad/sec พฤติภาพของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลานต์ 1 (ดูรูปที่ 3.2 (จ)) การอธิบายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีแรก ในย่านความถี่น้อยกว่า 0.09 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.15 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_{\omega}|$ เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดี สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลานต์

พลาเน็ต 3 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 4s$ และ $T_s \leq 8s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

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

ทั้งนี้ $K_p=0.98$ $K_I=0.45$ $K_D=16.18$ $K_A=157.18$ $d=28.96$ และ $e=28.96$

- 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

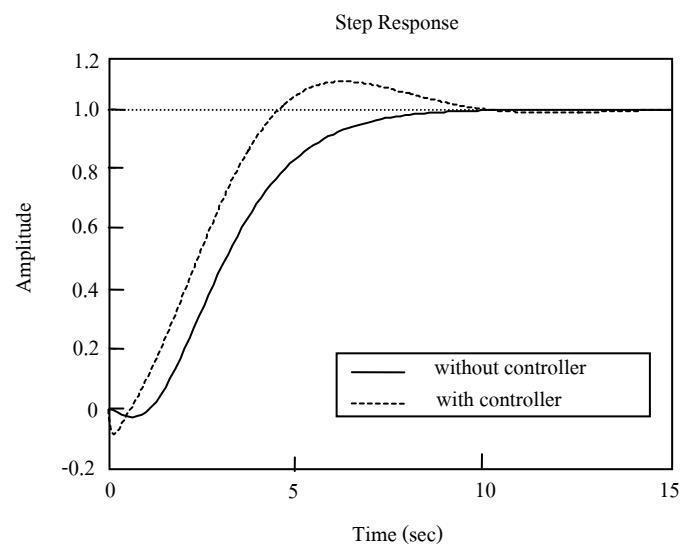
$$T(s) = \frac{-87.17s^4 - 88.5s^3 + 101.5s^2 + 658.8s + 379}{s^6 + 60.91s^5 + 928.1s^4 + 2602s^3 + 2675s^2 + 1497s + 379}$$

- มีความไวของระบบ

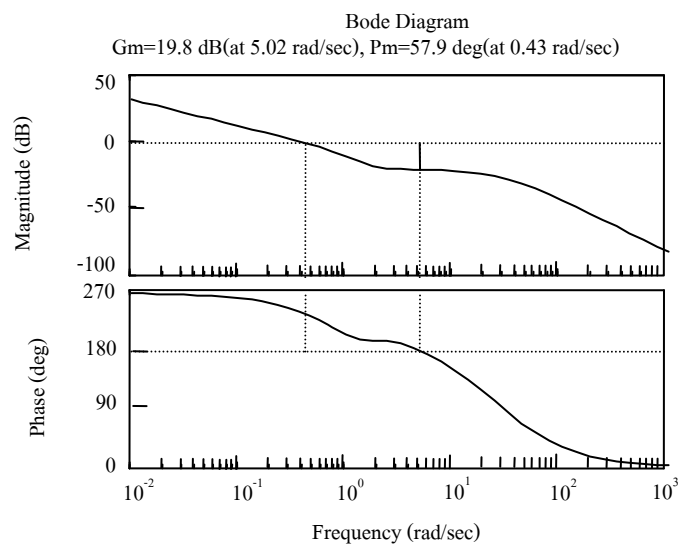
$$S_G^T = \frac{s^6 + 60.91s^5 + 1015s^4 + 2690s^3 + 2573s^2 + 838.5s}{s^6 + 60.91s^5 + 928.1s^4 + 2602s^3 + 2675s^2 + 1497s + 379}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : 2 -0.65 -1.18±1.39

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.38±j0.56 -0.59 -1.91 -19.12 -38.54

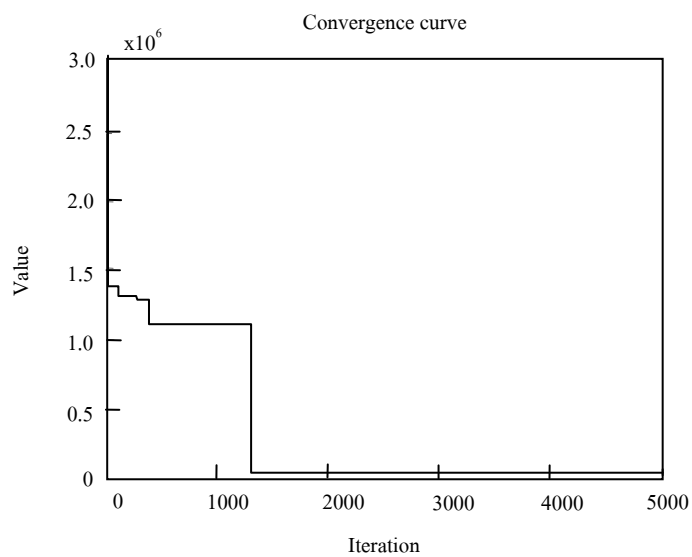


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

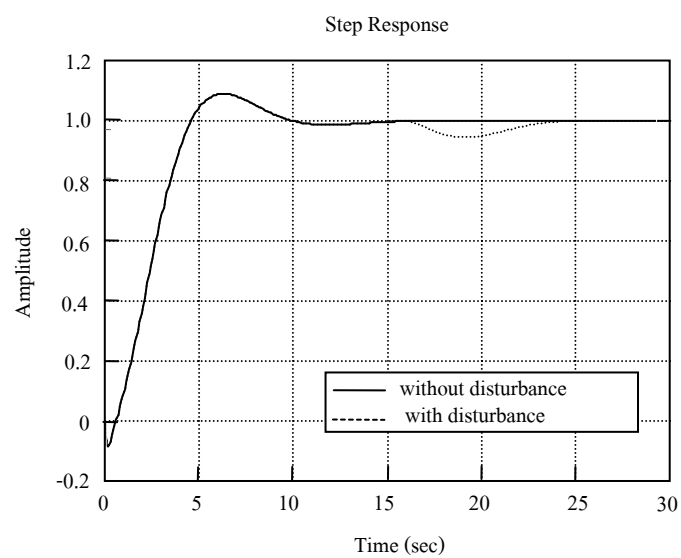


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 3.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

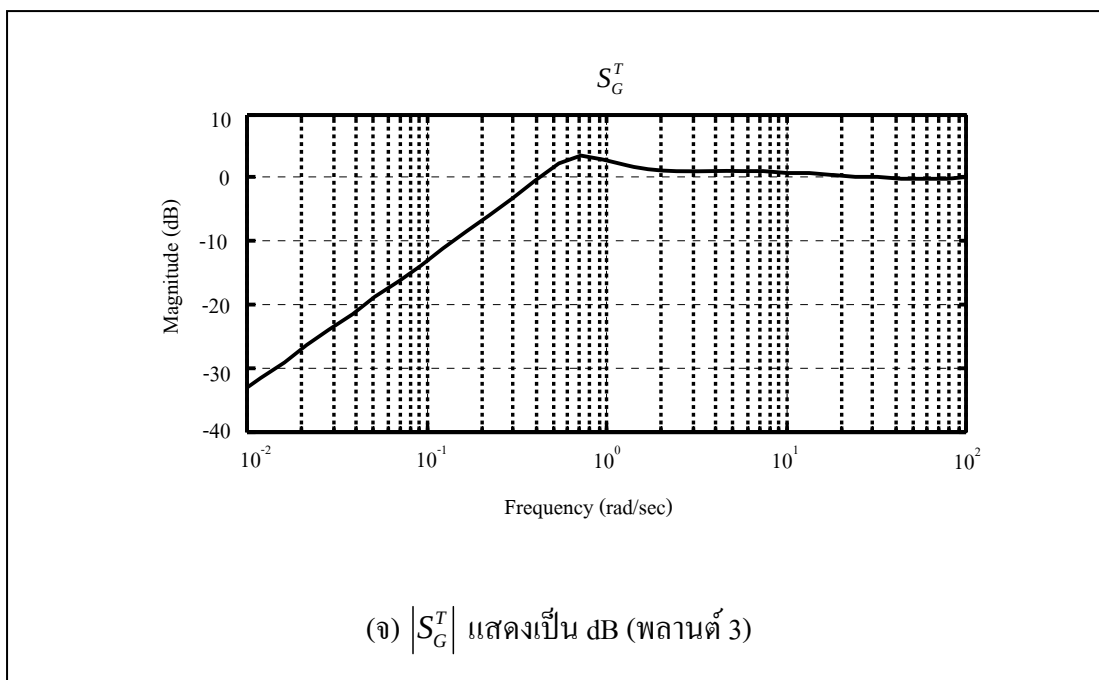


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 3.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 3.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.4 (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 แผนภาพโบดในรูปที่ 3.4 (ข) เปิดเผยว่า $Pm = 57.9\text{deg}$ และ $Gm = 19.8\text{dB}$ ซึ่งถือว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก จากรูปที่ 3.4 (ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก มีความสามารถในการฟื้นคืนระบบที่ดีมาก และจากผลการจำลองสถานการณ์ความไวคังแสดงในรูปที่ 3.4 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่า 0.15 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.15 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

พลาเน็ต 4 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 22s$ และ $T_s \leq 40s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

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

ทั้งนี้ $K_p=3.88$ $K_I=0.26$ $K_D=-7.77$ $K_A=83.42$ $d=31.57$ และ $e=31.57$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

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

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

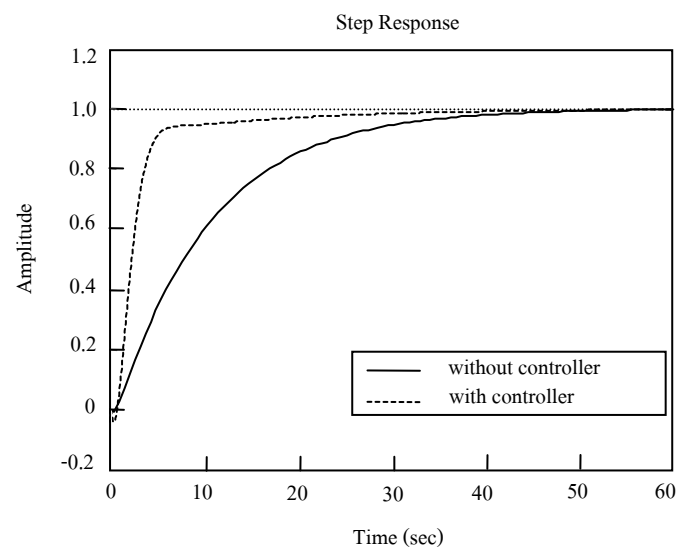
$$T(s) = \frac{-39.74s^4 + 79.53s^3 - 1943s^2 + 3757s + 260}{5s^5 + 286.4s^4 + 5726s^3 + 8583s^2 + 4753s + 260}$$

- มีความไวของระบบ

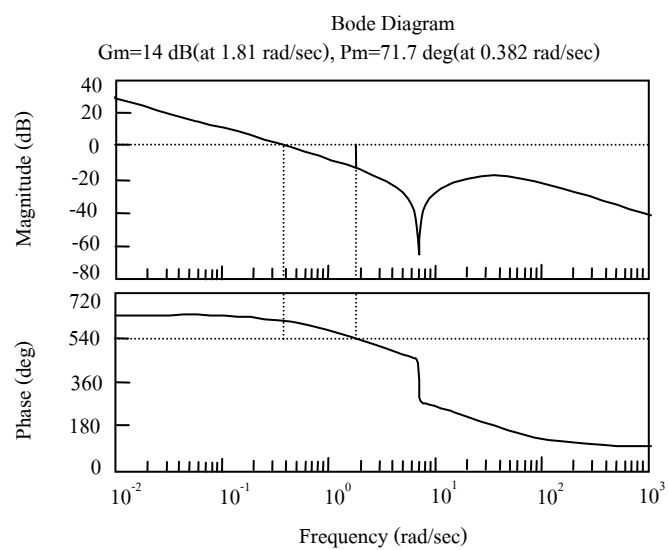
$$S_G^T = \frac{5s^5 + 326.2s^4 + 5647s^3 + 10530s^2 + 996.5s}{5s^5 + 286.4s^4 + 5726s^3 + 8583s^2 + 4753s + 260}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : 2 -0.07 -0.03±j6.99

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.06 -27.85±j16.75 -0.76±j0.48

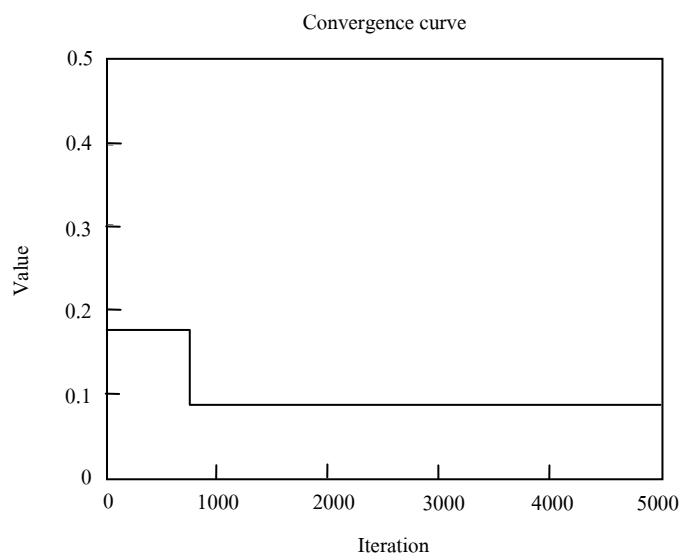


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

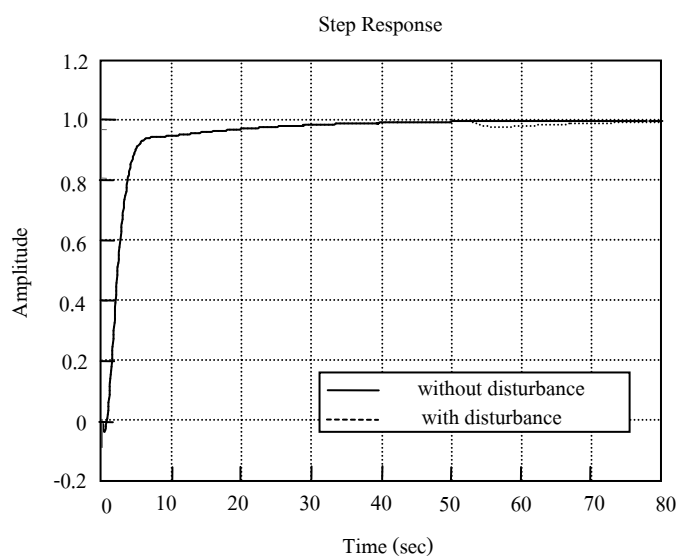


(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 3.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

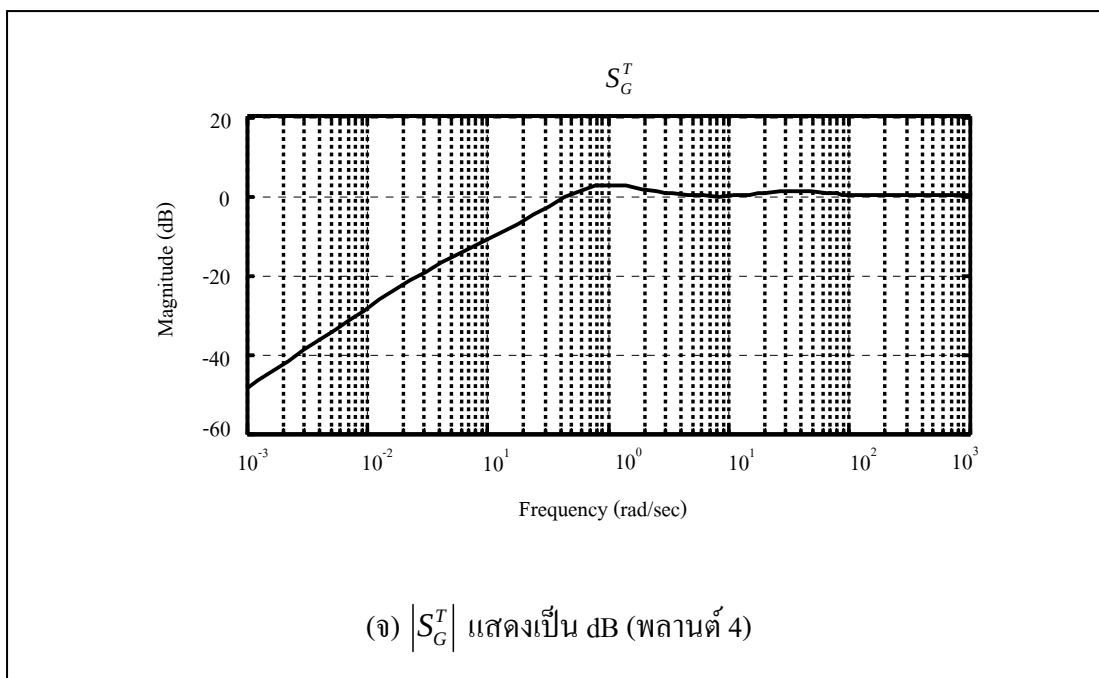


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 3.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 3.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.5 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนด นั่นคือ $P.O. = 0\% < 15\%$ $T_r = 3.71s < 22s$ และ $T_s = 25.4s < 40s$ พิจารณาแผนภาพโบลด์รูปที่ 3.5 (ข) พบว่า $P_m = 71.7 \text{ deg}$ และ $G_m = 14 \text{ dB}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบวงปิดตอบสนองอย่างว่องไวมาก จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.5 (ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก เห็นได้ว่าการรบกวนจากภายนอกแทบไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ นั้นแสดงให้เห็นว่า ระบบมีเสถียรภาพที่ดีมาก เมื่อพิจารณาความไวของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.5 (จ) พบว่าในย่านความถี่น้อยกว่า 0.15 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.15 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ มีรูปลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแรก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบของพลาเน็ต 4 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

พลาเน็ต 5 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 30s$ และ $T_s \leq 60s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

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

ทั้งนี้ $K_p=6.04$ $K_I=0.35$ $K_D=339.40$ $K_A=2822.10$ $d=17.66$ และ $e=17.66$

- 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

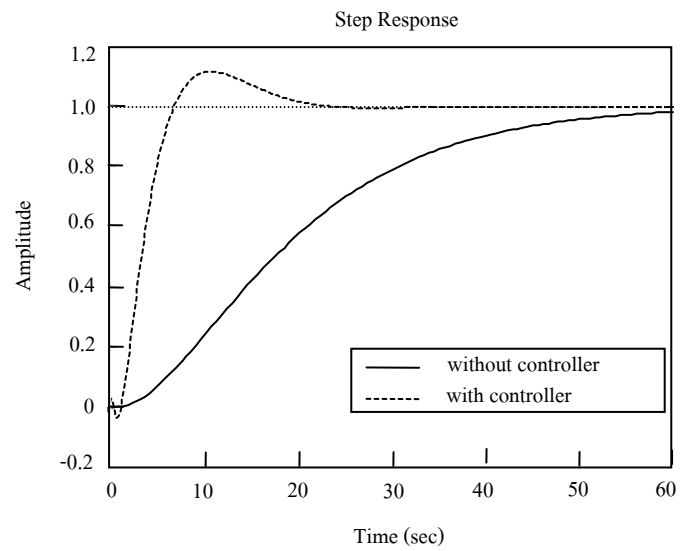
$$T(s) = \frac{-205.6s^5 + 1753s^4 - 5423s^3 + 5269s^2 + 1840s + 107.6}{8.3s^7 + 344.8s^6 + 4317s^5 + 2.18 \times 10^4 s^4 + 2.96 \times 10^4 s^3 + 1.17 \times 10^4 s^2 + 2152s + 107.6}$$

- มีความไวของระบบ

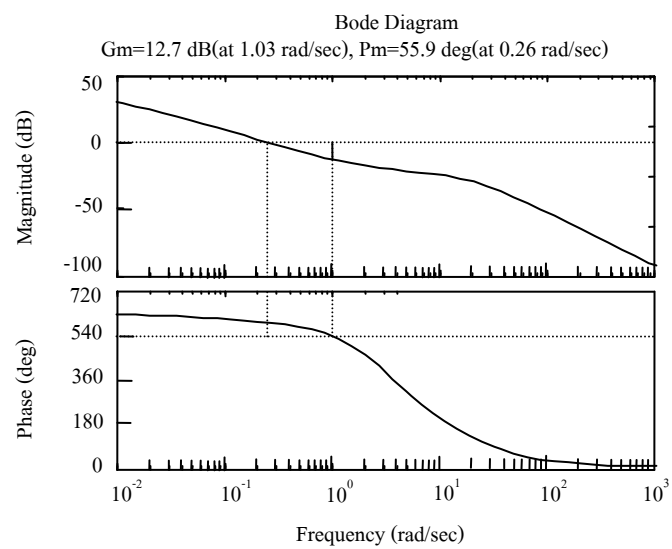
$$S_G^T = \frac{8.3s^7 + 344.8s^6 + 4523s^5 + 20020s^4 + 35050s^3 + 6428s^2 + 311.8s}{8.3s^7 + 344.8s^6 + 4317s^5 + 21770s^4 + 29630s^3 + 11700s^2 + 2152s + 107.6}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : 2.79 -0.20 -0.08 -0.12±j0.09 3±j1.73

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -24.37 -1.32 -0.075 -7.68±j3.78 -0.21±j0.17

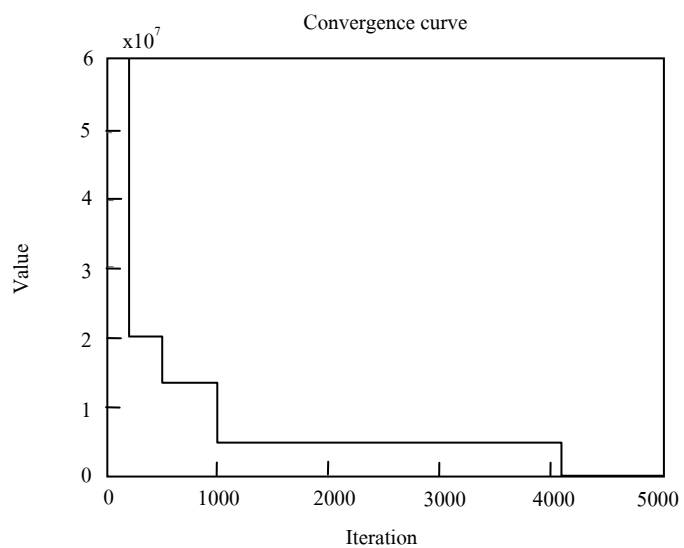


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

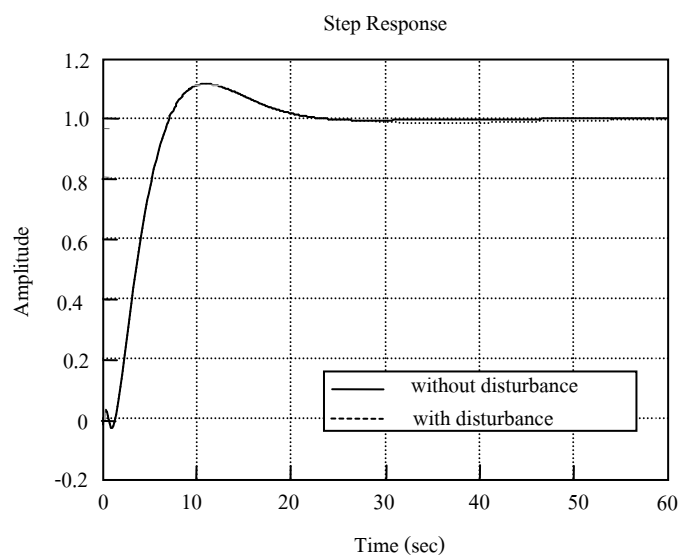


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 3.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

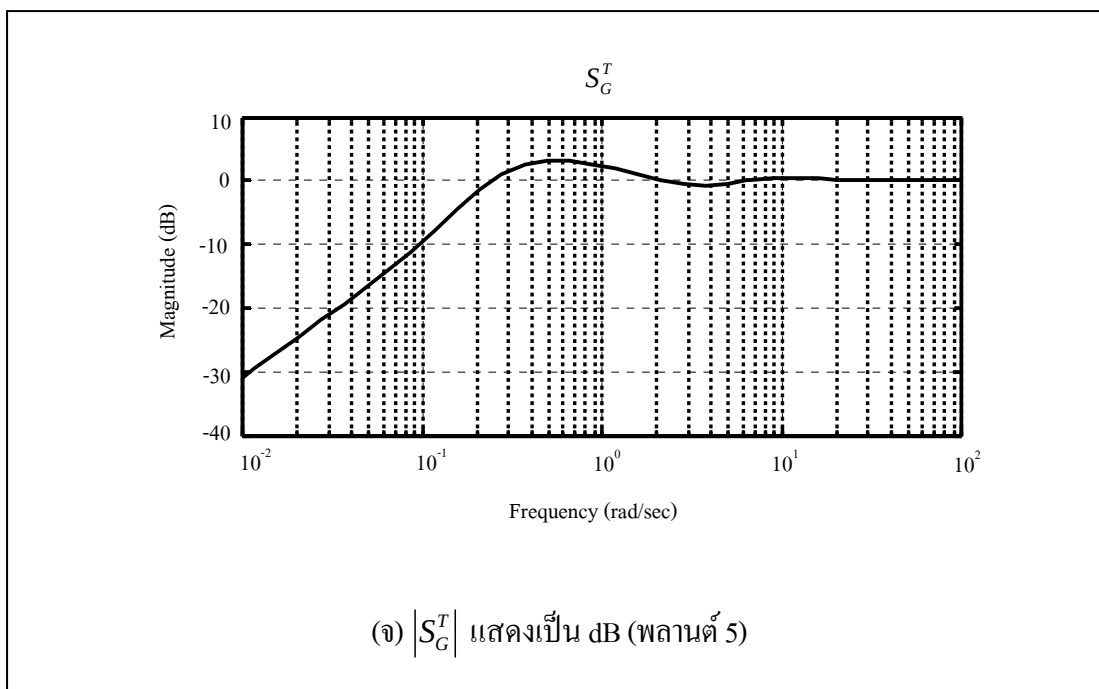


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 3.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 3.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.6 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนดนั่นคือ $P.O. = 11.6\% < 15\%$ $T_r = 4.06s < 30s$ และ $T_s = 19.7s < 60s$ แสดงว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้การตอบสนองที่ว่องไวมาก และช่วงเวลาประวิงลดลงอย่างเห็นได้ชัด และแผนภาพโพลดังรูปที่ 3.6 (ข) เปิดเผยให้เห็นว่า $P_m = 55.9\text{deg}$ และ $G_m = 12.7\text{ dB}$ ซึ่งถือว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.6 (ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก เห็นได้ว่าการรบกวนจากภายนอกแทบไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ นั้นแสดงให้เห็นว่า ระบบมีเสถียรภาพที่ดีมาก และเมื่อพิจารณาความไวของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.6 (จ) พบว่าในย่านความถี่น้อยกว่า 0.1 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.1 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบของพลาเน็ต 5 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

พลาณต์ 6 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 10s$ และ $T_s \leq 20s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

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

ทั้งนี้ $K_p=0.47$ $K_I=0.42$ $K_D=0.42$ $K_A=5.77$ $d=2.34$ และ $e=2.34$

- 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

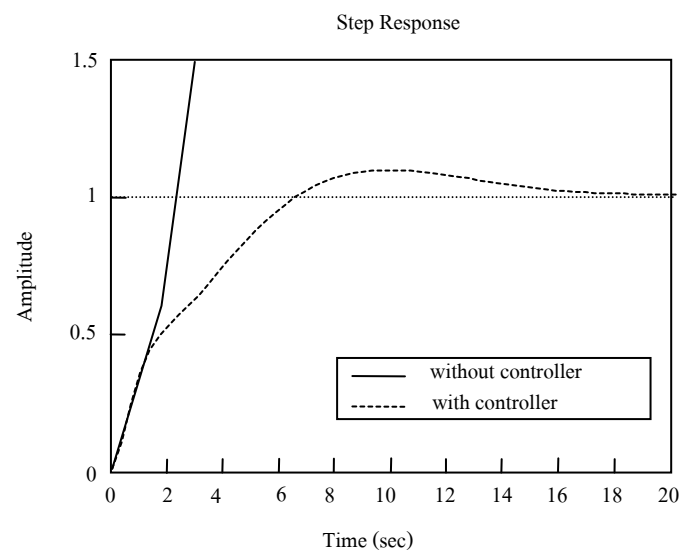
$$T(s) = \frac{6.66s^5 + 83.17s^4 + 280.9s^3 + 146.4s^2 + 94s + 1}{s^7 + 42.69s^6 + 263.4s^5 + 670.4s^4 + 851.1s^3 + 344.3s^2 + 94s + 1}$$

- มีความไวของระบบ

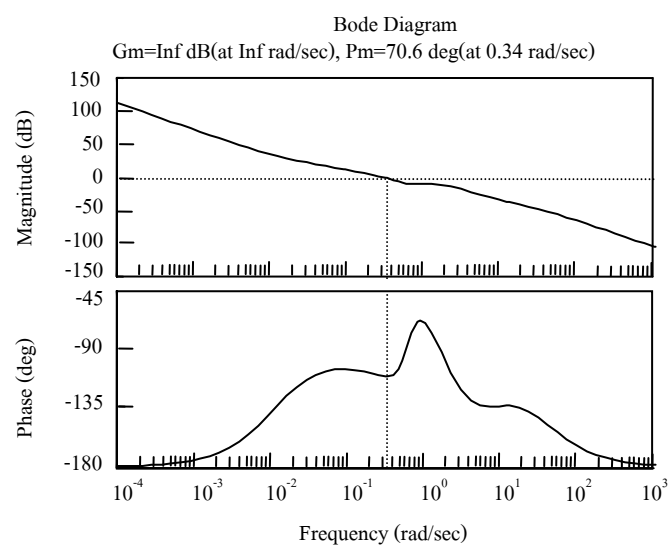
$$S_G^T = \frac{s^7 + 42.69s^6 + 256.7s^5 + 587.3s^4 + 570.2s^3 + 197.9s^2}{s^7 + 42.69s^6 + 263.4s^5 + 670.4s^4 + 851.1s^3 + 344.3s^2 + 94s + 1}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.01 -0.23±j0.57 และ -6 ซ้ำกัน 2 ตัว

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -10.86 -4.64 -0.3 -10.98±j26.87 -0.13±j0.19

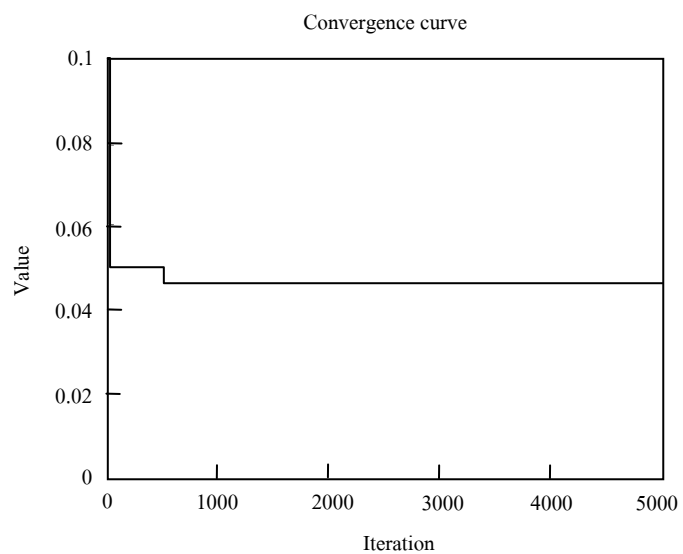


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

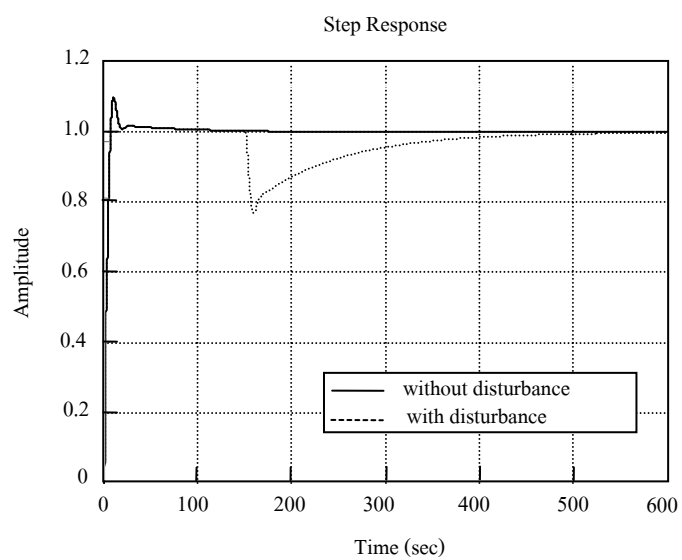


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 3.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

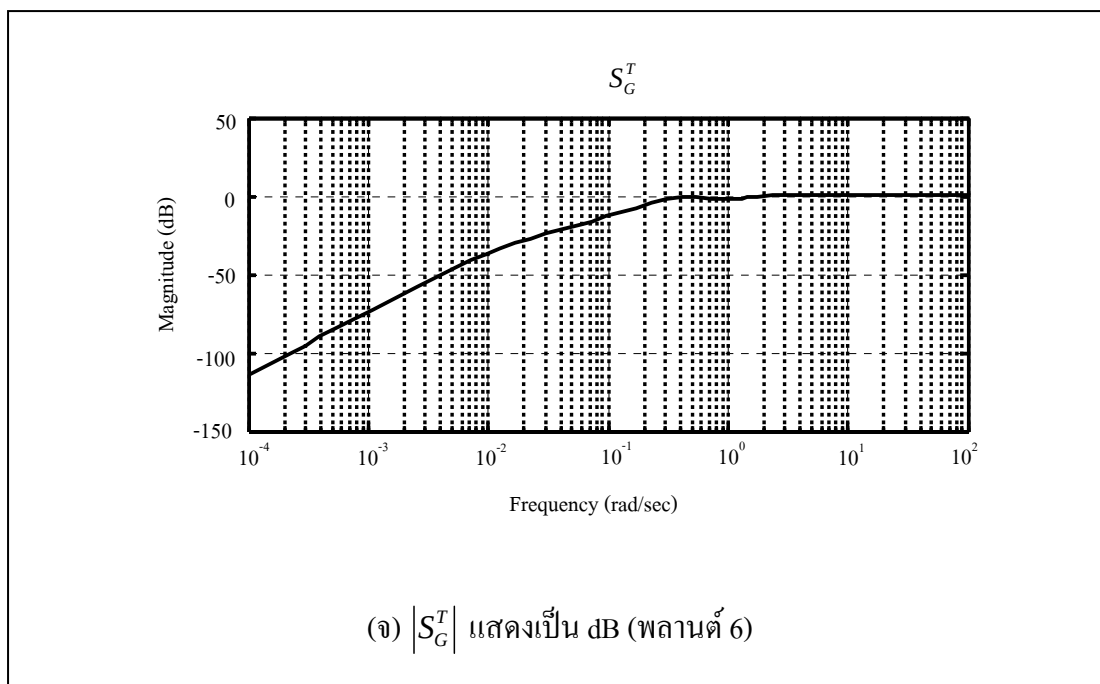


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 3.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 3.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.7 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า พลาเน็ตมีลักษณะขาดเสถียรด้วยความเป็น type – 1 เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมให้แล้ว ระบบวงปิดมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนดนั่นคือ $P.O. = 9.91\% < 15\%$ $T_r = 5s < 10s$ และ $T_s = 16.3s < 20s$ อีกทั้ง $Pm = 70.6\text{deg}$ และ $Gm = \text{Inf}$ ดังรูปที่ 3.7 (จ) ซึ่งแสดงว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก พิจารณาระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอกดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ง) เห็นได้ว่าระบบวงปิดฟื้นคืนการตอบสนองเมื่อถูกรบกวนได้ช้า ทั้งนี้พลาเน็ตดังกล่าวมีรูปแบบของ type-1 ซึ่งส่งผลกระทบเชิงอินทิกรัล และเมื่อพิจารณาความไวดังรูปที่ 3.7 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่าและมากกว่า 0.1 rad/sec พฤติภาพของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลาเน็ต 1 (ดูรูปที่ 3.2) การอภิปรายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีแรก ระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดกรบกวนจากภายนอก และสามารถตามรอยอินพุตได้ดี ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมจะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลาเน็ต

พลาเน็ต 7 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 1.5s$ และ $T_s \leq 30s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

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

ทั้งนี้ $K_p=1.48$ $K_I=1.28$ $K_D=76.80$ $K_A=635.80$ $d=16.05$ และ $e=16.05$

- 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

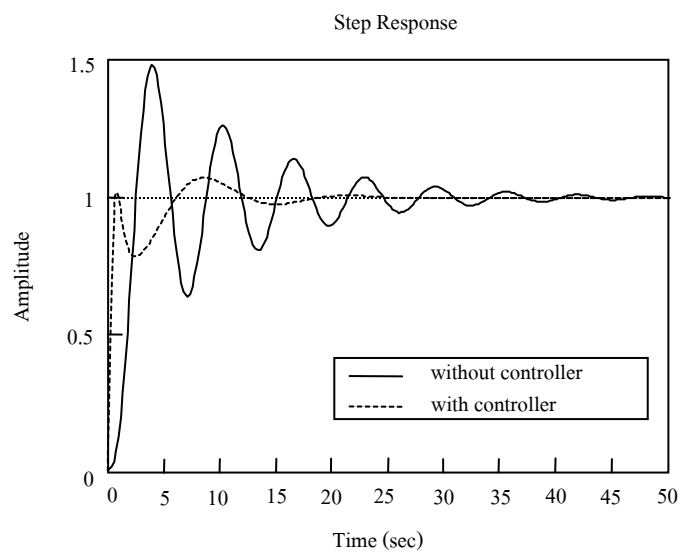
$$T(s) = \frac{714s^3 + 1281s^2 + 423.4s + 331}{s^6 + 33.3s^5 + 297.4s^4 + 1063s^3 + 1623s^2 + 681s + 331}$$

- มีความไวของระบบ

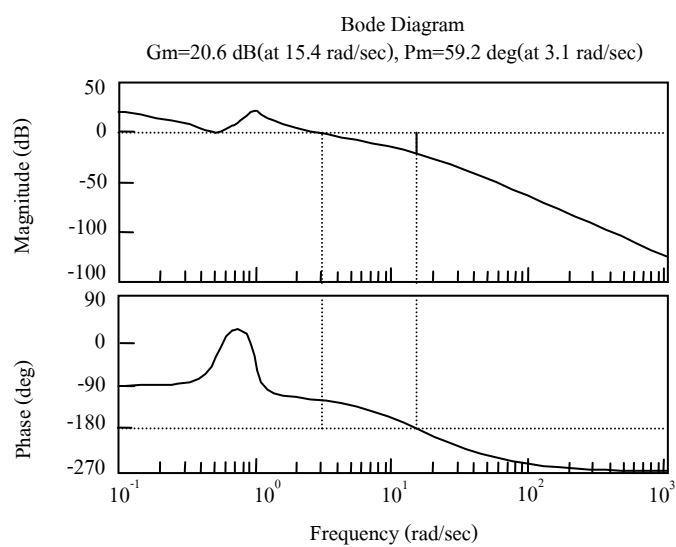
$$S_G^T = \frac{s^6 + 33.3s^5 + 297.4s^4 + 348.7s^3 + 341.3s^2 + 257.6s}{s^6 + 33.3s^5 + 297.4s^4 + 1063s^3 + 1623s^2 + 681s + 331}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -1.61 -0.09±j0.53

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -5.7 -21.7 -2.76±j1.46 -0.17±j0.49

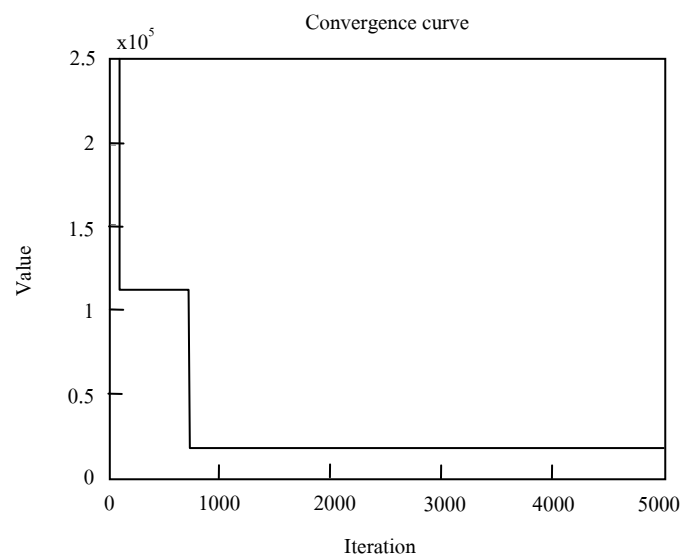


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

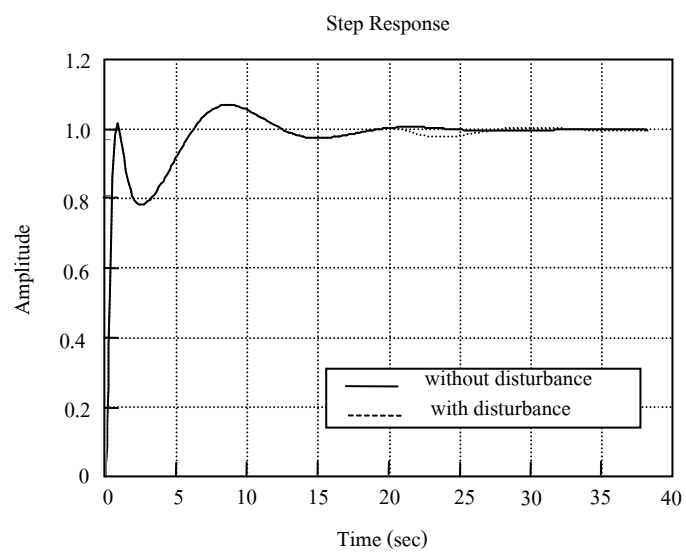


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 3.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

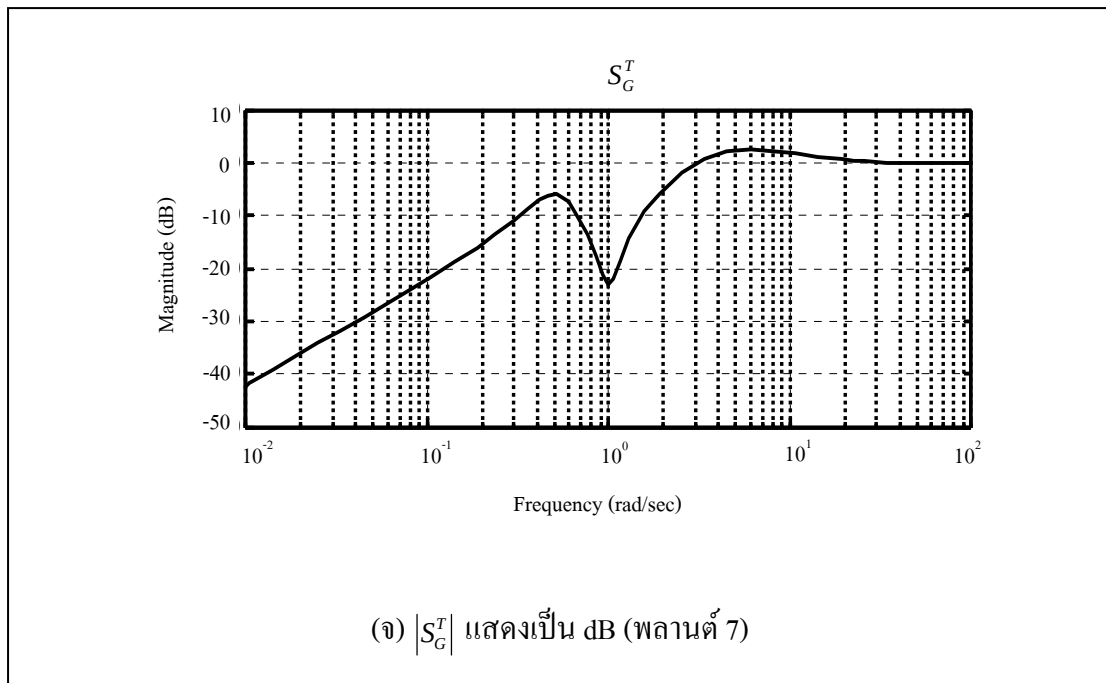


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 3.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 3.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 3.8 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า พลาเน็ตมีการแกว่งในการตอบสนองที่สูงมาก เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมให้แล้ว ระบบวงปิดมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาที่เราเรียกว่าดีมามากและเป็นไปตามข้อกำหนด 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 3.8 (ข) จากระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอกดังรูปที่ 3.8 (ง) มีความสามารถในการฟื้นคืนระบบที่ดีมาก และจากผลการจำลองสถานการณ์ความไวดังแสดงในรูปที่ 3.8 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่า 0.3 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.3 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบของพลาเน็ต 7 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

3.5 สรุป

บทที่ 3 นี้ได้นำเสนอขั้นตอนดำเนินการออกแบบตัวควบคุมในระบบเอส ด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลดำเนินการโดยใช้การคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด และผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิด ตลอดจนผลการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งทำการออกแบบตัวควบคุมกับพลาเน็ตที่ควบคุมยากทั้ง 7 พลาเน็ต

ผลการออกแบบตัวควบคุม พบว่าบางพลาเน็ตเราสามารถออกแบบให้ผลการตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิด เป็นไปตามข้อกำหนดทั้งทางด้านการพุ่งเกิน เวลาไต่ระดับ และเวลาเข้าที่ บางพลาเน็ตการออกแบบไม่สามารถเป็นไปตามข้อกำหนด แต่ผลการตอบสนองในภาพรวมของทั้ง 7 พลาเน็ตมีผลที่ค่อนข้างดี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการออกแบบตัวควบคุมดำเนินการด้วยวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ส่งผลให้คำตอบที่ได้ลู่เข้าสู่คำตอบเฉพาะถิ่นที่มีคุณภาพ จากการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก พบว่าพลาเน็ตทั้ง 7 เมื่อถูกรบกวนจากภายนอก ตัวควบคุมช่วยให้ระบบที่ถูกรบกวนฟื้นคืนสู่ระดับการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวได้ดีภายในเวลาอันสั้น ตลอดจนมีความสามารถในการตามรอยอินพุตได้ดีมาก นอกจากนั้นระบบวงปิดทุกกรณีมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก อาจกล่าวได้ว่า วิธีการออกแบบด้วยการจัดวางตำแหน่งโพลอาศัยการคำนวณด้วยวิธีพีชคณิตเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจมาก

บทที่ 4

วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมที่สุด ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

4.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งออกแบบโดยอาศัย Toolboxes จากโปรแกรม MATLAB โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต และมีการจำกัดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีให้กับพลานต์ที่ควบคุมยาก 7 แบบ ตามคำแนะนำของ Astrom and Hagglund (2000) เพื่อความเข้าใจในวิธีการออกแบบตัวควบคุมอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยจินเนติกอัลกอริทึมที่มากขึ้น บทนี้จึงมีการกล่าวอธิบายถึงเนื้อหาของวิธีจินเนติกอัลกอริทึมพอสังเขป นอกจากนี้ยังแสดงรายละเอียดวิธีการออกแบบ ซึ่งวิธีการออกแบบเป็นไปตามแผนภูมิการออกแบบดังรูปที่ 4.2 อีกทั้งมีการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการออกแบบกับพลานต์ที่ควบคุมยาก 7 แบบ ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งกำหนดให้การรบกวนจากภายนอกมีขนาด 10% ของอินพุต และเป็นการรบกวนเชิงหักล้าง (ลบ) ตลอดจนผลการจำลองสถานการณ์ความไวของระบบ และสรุปผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ตามลำดับ

4.2 จินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ จินเนติกอัลกอริทึมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามี “วิวัฒนาการ” อยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นขั้นตอนการค้นหาคำตอบให้กับระบบ เราสามารถมองจินเนติกอัลกอริทึมเป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณอย่างหนึ่งที่คอยทำงานอยู่ข้าง ๆ ระบบของเรา วัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึมโดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่

1. **การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection)** คือขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป

2. **ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation)** คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลาน ซึ่งได้จากการรวมพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีส่วนผสมผสานมาจากพ่อแม่ หรือได้จากการแปรผกผันของพ่อแม่เพื่อให้ได้ลูกหลานสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น

3. **การแทนที่ (Replacement)** คือขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน เป็นขบวนการในการคัดเลือกกว่าควรจะมีลูกหลานในกลุ่มใด จำนวนเท่าไร ไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด

วัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึม แสดงให้เห็นถึงการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ สิ่งมีชีวิตที่มีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าจะสามารถอยู่รอดได้ ในขณะที่สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่ไม่สามารถปรับตัวเองได้จะต้องสูญพันธุ์ไป การปรับตัวดังกล่าวแสดงว่าสิ่งมีชีวิตนั้นมีวิวัฒนาการเกิดขึ้น จินเนติกอัลกอริทึมของสิ่งมีชีวิตในระบบธรรมชาติ กล่าวคือกระบวนการภายในของจินเนติกทำให้คำตอบของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเองอันจะนำไปสู่การปรับตัวให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่าและดีที่สุดได้ รายละเอียดต่าง ๆ ขององค์ประกอบในวัฏจักรจินเนติกอัลกอริทึมมีดังนี้

- **ประชากร (Population)** ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม ซึ่งเป็นตัวแทนของคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา

- **ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (Parents)** กลุ่มประชากรที่ถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป ประชากรกลุ่มนี้จะเปรียบเสมือนกับเป็น “พ่อแม่” สำหรับใช้ในการสืบทอดสายพันธุ์ให้ลูกหลานต่อไป

- **สายพันธุ์ใหม่ (Offspring)** หรือ “ลูกหลาน” เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่ โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อ ๆ กันในประชากรรุ่นถัดไป

ขั้นตอนทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึมและการเชื่อมโยงเข้ากับระบบในโลกจริงเพื่อทำการค้นหาคำตอบที่ต้องการ คำตอบของระบบที่ต้องการให้จินเนติกอัลกอริทึมค้นหา อยู่ในรูปของโครโมโซมในกลุ่มของประชากร (แน่นอนว่าคำตอบที่ต้องการจะต้องเป็นโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่ม) ดังนั้นระบบจะสามารถรู้ได้ว่าคำตอบที่มีอยู่ในจินเนติกอัลกอริทึม ณ เวลานั้น ๆ นั้นดีหรือไม่อย่างไรด้วยการประเมินค่าของโครโมโซม ระบบจะมีการเชื่อมต่อกับจินเนติกอัลกอริทึมผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการประเมินค่าของโครโมโซม

ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึมมีดังต่อไปนี้

- 1) สร้างประชากร โดยปกติจะใช้การสุ่ม
- 2) ประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าใจค่าของโครโมโซมภายใน GA ดังนั้นโครโมโซมต้องผ่านการถอดรหัสก่อนที่จะนำไปทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 3) ค้นหาค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยังจินเนติกอัลกอริทึม
- 4) ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป
- 5) นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลาน ด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือโครโมโซมลูกหลาน
- 6) ค้นหาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับข้อ 3)
- 7) โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ได้จากข้อ 5) ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
- 8) เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2) ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ คำตอบที่ได้จะมากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชานั้นเอง โดยที่สามารถใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ต้องการแล้วหรือไม่

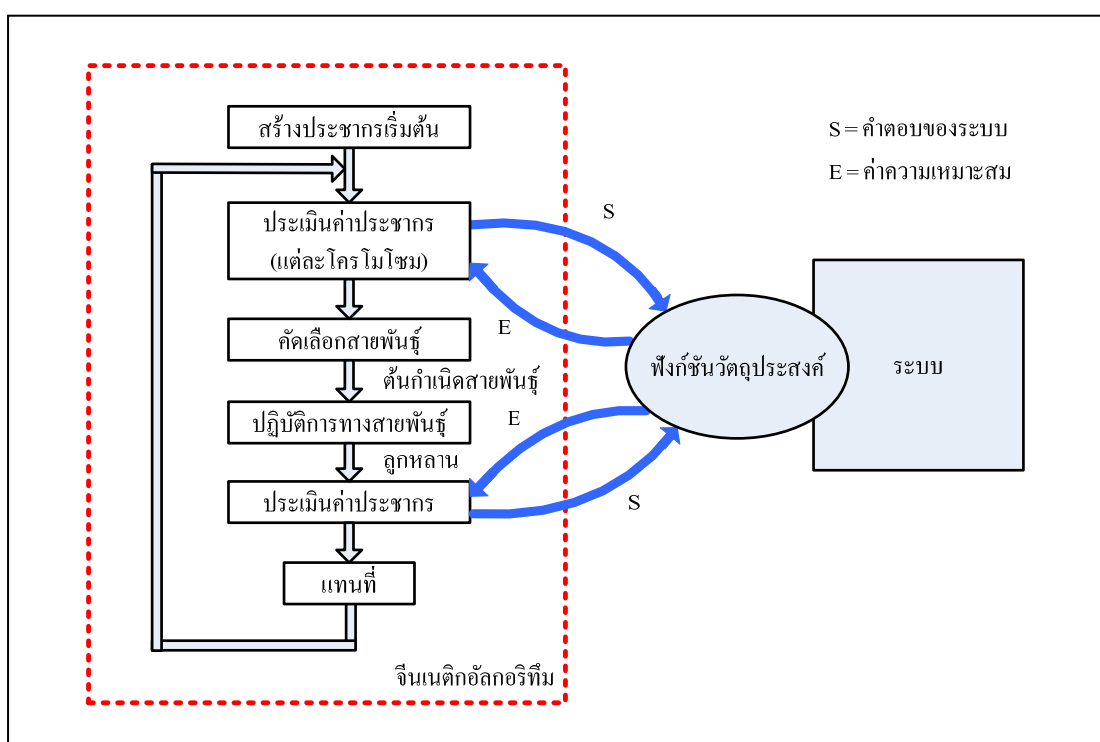
เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้น สามารถพิจารณาขั้นตอนทั่วไปข้างต้นของจินเนติกอัลกอริทึมโดยอาศัยแผนภาพดังรูปที่ 4.1 ประกอบ

จากกระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึม เห็นได้ว่าสิ่งที่จำเป็นต้องทำการออกแบบเพื่อนำจินเนติกอัลกอริทึมมาใช้คือ โครโมโซมประชากรและการเข้ารหัส การประเมินค่าความเหมาะสม การคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์และการแทนที่

โครโมโซมประชากรและการเข้ารหัส จินเนติกอัลกอริทึมพิจารณาคำตอบของปัญหาจากกลุ่มของคำตอบหรือประชากรของคำตอบ แต่ละคำตอบจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวซึ่งแสดงอยู่ในรูปของโครโมโซม หรือในรูปจีโนม การเข้ารหัสประชากรเป็นขั้นตอนแรกและเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะเป็นการออกแบบให้โครโมโซมเป็นตัวแทนของคำตอบจากระบบ ในการใช้งานจินเนติกอัลกอริทึม รูปแบบที่ง่ายที่สุดคือการกำหนดให้โครโมโซมอยู่ในรูปของตัวแปรแบบสตริง

$$S = [s_1, s_2, \dots, s_L] \quad (4.1)$$

โดยที่ S คือโครโมโซมหนึ่ง ๆ และแต่ละ $s_i, i=1,2,...,L$ คือแต่ละตัวแปรในชุดคำตอบของระบบ (แต่ละระบบมีจำนวนตัวแปรไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา ความซับซ้อนและการออกแบบการแก้ปัญหของระบบนั้น ๆ) ปกติแล้วในจินเนติกอัลกอริทึม จะใช้โครโมโซมหลาย ๆ ชุดแทนคำตอบของระบบคือ $S_i, i=1,2,...,N$ (N คือ โครโมโซม) นั่นคือในวัฏจักรหนึ่ง ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมจะมีชุดคำตอบอยู่หลาย ๆ ชุด



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนทั่วไปของเงินเนติกอัลกอริทึมกับการเชื่อมโยงเข้ากับระบบ

การประเมินค่าความเหมาะสม เป็นขั้นตอนในการประเมินว่าโครโมโซมหนึ่ง ๆ ดีหรือไม่อย่างไร เมื่อเทียบกับโครโมโซมอื่น ๆ ที่มีอยู่ในกลุ่มประชากรนั้น ๆ โดยปกติแล้วการประเมินค่าความเหมาะสมของโครโมโซม ประกอบไปด้วยการคำนวณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นส่วนสำคัญในกระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึม ที่ใช้ในการประเมินผลคำตอบของระบบว่าดีหรือไม่ดีแค่ไหน โดยทำการประเมินคำตอบจากโครโมโซมเทียบกับเป้าหมายของระบบ ในกรณีที่ระบบเป็นปัญหาของการค้นหาค่าน้อยที่สุด โครโมโซมที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของระบบ จะมีค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด ส่วนฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม เป็นฟังก์ชันที่ทำการจับคู่ค่าประเมิน

ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปเป็นค่าความเหมาะสม จุดประสงค์ของฟังก์ชันคือ เพื่อทำการกำหนดค่าความเหมาะสมให้กับโครโมโซมแต่ละตัว โดยทำการเปรียบเทียบกันเองภายในกลุ่มประชากร ค่าความเหมาะสมเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นมาตรฐาน เพื่อตัดสินคัดเลือกโครโมโซมที่จะใช้ในการสืบสายพันธุ์ในรุ่นต่อไป

การคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด จากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ได้คัดเลือก ถูกนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์หรือ “พ่อแม่” เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่สามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่น สำหรับจินเนติกอัลกอริทึมนี้ การคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้นโครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดี ย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและควรมีโอกาสที่ให้ลูกหลานในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากยิ่งขึ้นไปด้วย

ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ หลังจากจบวนการคัดเลือกได้ดำเนินไปจนเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมลูกหลานถูกสร้างขึ้นใหม่จากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยการนำเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์นั้นมาทำการเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา เกิดเป็นโครโมโซมลูกหลาน ขั้นตอนดังกล่าวนี้เป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในวัฏจักรจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดมานั้น จะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์ ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ที่เกิดขึ้นกับประชากรซึ่งเป็นคำตอบของระบบแล้ว เราสามารถเปรียบเทียบปฏิบัติการทางสายพันธุ์ได้กับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบนั่นเอง โดยปกติทั่วไปปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของจินเนติกอัลกอริทึมจะมี 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์และมิวเทชัน ซึ่งการทำครอสโอเวอร์เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไป เพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์นี้จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว ส่วนการทำมิวเทชันเป็นวิธีการแปรผกผันหรือส่วนย่อยของโครโมโซม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยา มิวเทชันเป็นการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามิวเทชันจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงตัวเลขของโครโมโซมนั่นเอง

การแทนที่ เป็นขั้นตอนหลังจากที่จินเนติกอัลกอริทึมได้โครโมโซมลูกหลานเรียบร้อยแล้ว และจะนำโครโมโซมลูกหลานนี้ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า จุดประสงค์ในการแทนที่นั้นค่อนข้างชัดเจน กล่าวคือการนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนประชากรรุ่นก่อน จะทำให้ประชากรรุ่นใหม่ประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเพราะได้สายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว

4.3 วิธีการออกแบบ

การออกแบบตัวควบคุมโดยการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยระเบียบวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ออกแบบโดยอาศัย Toolboxes ของ MATLAB ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบเป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต และมีการจำกัดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ในตอนแรกทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยจินเนติกอัลกอริทึม โดยขอบเขตของค่าเริ่มต้นกำหนดด้วยวิธีการสุ่มขอบเขตขึ้นมา ส่งผลให้ผลเฉลยไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากระบบเป็นระบบอันดับสูงที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ดี ดังนั้นจึงได้นำความรู้จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุดมาใช้ เพื่อช่วยกำหนดขอบเขตของค่าเริ่มต้น จึงทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุดก่อน เพื่อนำผลเฉลยจากวิธีการนี้มาช่วยกำหนดขอบเขตของค่าเริ่มต้นของวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยจินเนติกอัลกอริทึม เพื่อให้การค้นหาคำตอบเข้าสู่หาค่าที่เหมาะสมที่สุดเร็วขึ้นและได้คำตอบที่ดีขึ้นกว่าเดิม โดยขอบเขตของค่าเริ่มต้นกำหนดเป็นค่าจริง และโปรแกรมจะทำการสุ่มค่าเริ่มต้นจากขอบเขตที่กำหนดเป็นค่าจริง แล้วแปลงเป็นไบนารีเข้าสู่กระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึม ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ปรับตามค่าจัดตั้ง (default) ของ Toolboxes นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบปรับพารามิเตอร์ค่าอื่น ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมที่แตกต่างจากค่าจัดตั้งพบว่า ผลคำตอบที่ได้มีความแตกต่างกันน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการออกแบบด้วยจินเนติกอัลกอริทึมมีการกำหนดขอบเขตของค่าเริ่มต้น ด้วยคำตอบที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงใช้ค่าพารามิเตอร์ของจินเนติกอัลกอริทึมตามค่าจัดตั้ง นั่นคือ กำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมใช้เทคนิควิธีกำหนดอย่างเป็นสัดส่วน ทำการคัดเลือกสายพันธุ์ด้วยวิธีการชักตัวอย่างแบบกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล ใช้กระบวนการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ด้วยครอสโอเวอร์แบบสมำเสมอ และมิวเทชันแบบเกาเซียน ทำการแทนที่ประชากรเดิมด้วยประชากรลูกหลานแบบคงตัว โดยกำหนดให้โครโมโซมเก่าถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่ 2 ตัว ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ k, a, b, z, d และ e ซึ่งเป็นค่าจริง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยจินเนติกอัลกอริทึม มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างจำนวนชุดคำตอบจากการสุ่ม L ชุด (ใช้ $L=20$) ซึ่งแต่ละชุดมีพารามิเตอร์ k, a, b, z, d และ e

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินค่าความเหมาะสมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J โดยที่ J พิจารณาได้ดังนี้

$$J = \int |\dot{e}| dt + (P.O_{boundary} - P.O_{search}) + (tr_{boundary} - tr_{search}) + (ts_{boundary} - ts_{search}) + (ess_{boundary} - ess_{search}) \quad (4.2)$$

โดยที่ $\hat{e}(t) = [r(t) - c(t)]$

เมื่อ	$r(t)$ และ $c(t)$	คือ อินพุตและเอาต์พุตของระบบตามลำดับ
	$P.O_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน
	$P.O_{search}$	คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา
	$tr_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของช่วงเวลาขึ้น
	tr_{search}	คือ ช่วงเวลาขึ้นของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา
	$ts_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของช่วงเวลาเข้าที่
	ts_{search}	คือ ช่วงเวลาเข้าที่ของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา
	$ess_{boundary}$	คือ ค่าในการระบุขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนของสถานะอยู่ตัว
	ess_{search}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของสถานะอยู่ตัวของชุดคำตอบที่ทำการค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินค่าความเหมาะสมด้วยฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม F_i โดยที่

$$F_i = \frac{J_i}{\sum J_i}, i = 1, \dots, L \quad (4.3)$$

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดหรือไม่ ถ้า $F_i < \varepsilon$ สิ้นสุดการคำนวณ ข้ามไปขั้นตอนที่ 12 ทั้งนี้ในการดำเนินงานได้กำหนด $\varepsilon = 0.1$

ขั้นตอนที่ 5 แปลงชุดคำตอบจากค่าจริงเป็นไบนารี ทำการคัดเลือกสายพันธุ์ด้วยการใช้วิธีการชักตัวอย่างแบบกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล

ขั้นตอนที่ 6 เข้าสู่กระบวนการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ด้วยการครอสโอเวอร์และมิวเทชัน

ขั้นตอนที่ 7 ถอดรหัสของชุดคำตอบจากไบนารีเป็นค่าจริง

ขั้นตอนที่ 8 ทำการแทนที่ประชากรเดิมด้วยประชากรลูกหลาน

ขั้นตอนที่ 9 ประเมินค่าความเหมาะสมด้วยฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม F_i

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดหรือไม่ ถ้า $F_i < \varepsilon$ สิ้นสุดการคำนวณ ข้ามไปขั้นตอนที่ 12

ขั้นตอนที่ 11 จำนวนรอบของการค้นหาครบตามที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ใช่ให้เพิ่มตัวนับ iter=iter+1 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 และถ้าจำนวนรอบการวนซ้ำเท่ากับหรือมากกว่า $iter_{\max}$ (=5,000) ให้ไปขั้นตอนที่ 12

ขั้นตอนที่ 12 ได้ผลเฉลยค่าพารามิเตอร์ k, a, b, z, d และ e เพื่อความเข้าใจที่มากขึ้น สามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 4.2

4.4 ผลการจำลองสถานการณ์

หัวข้อนี้แสดงผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมวงปิด ที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอออกแบบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งทำการออกแบบตัวควบคุมกับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 7 แบบ ตลอดจนผลการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งกำหนดให้การรบกวนจากภายนอกมีขนาด 10% ของอินพุต และเป็นการรบกวนเชิงหักล้าง (ลบ) และผลการจำลองสถานการณ์ความไวของระบบวงปิด ซึ่งมีผลการจำลองสถานการณ์ดังนี้

พลาเน็ต 1 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 2s$ และ $T_s \leq 5s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{-74.45s^3 + 2.09 \times 10^4 s^2 + 5.12 \times 10^4 s + 3.11 \times 10^4}{s^3 + 288.9s^2 + 1.95 \times 10^4 s}$$

ทั้งนี้ $K_p=2.60$ $K_I=1.60$ $K_D=110.99$ $K_A=-188.04$ $d=107.13$ และ $e=181.76$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{-74.45s^3 + 2.09 \times 10^4 s^2 + 5.12 \times 10^4 s + 3.11 \times 10^4}{\begin{bmatrix} 0.02s^7 + 4.74s^6 + 372.6s^5 + 4882s^4 + 2.18 \times 10^4 s^3 + 3.68 \times 10^4 s^2 \\ + 1.95 \times 10^4 s \end{bmatrix}}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

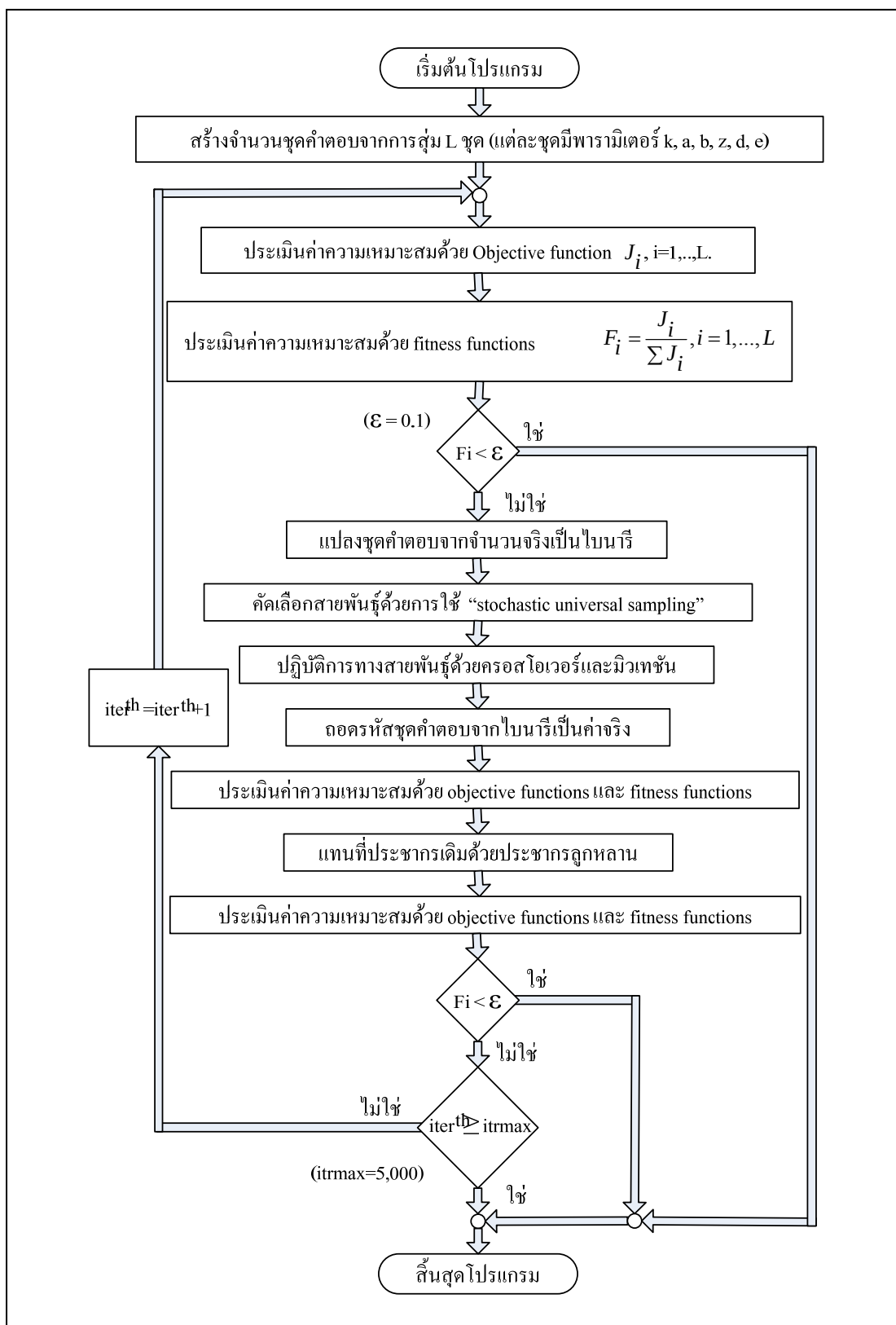
$$T(s) = \frac{-74.45s^3 + 2.09 \times 10^4 s^2 + 5.12 \times 10^4 s + 3.11 \times 10^4}{\begin{bmatrix} 0.02s^7 + 4.74s^6 + 372.6s^5 + 4882s^4 + 2.18 \times 10^4 s^3 + 5.77 \times 10^4 s^2 \\ + 7.06 \times 10^4 s + 3.11 \times 10^4 \end{bmatrix}}$$

- มีความไวของระบบ

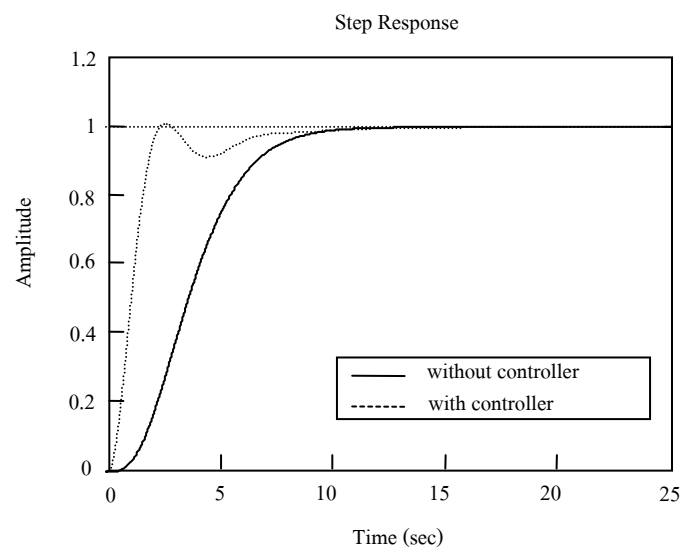
$$S_G^T = \frac{0.02s^7 + 4.74s^6 + 372.6s^5 + 4882s^4 + 21840s^3 + 36800s^2 + 19470s}{0.02s^7 + 4.74s^6 + 372.6s^5 + 4882s^4 + 21770s^3 + 57730s^2 + 70630s + 31130}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : 283.52 -1.22 -1.21

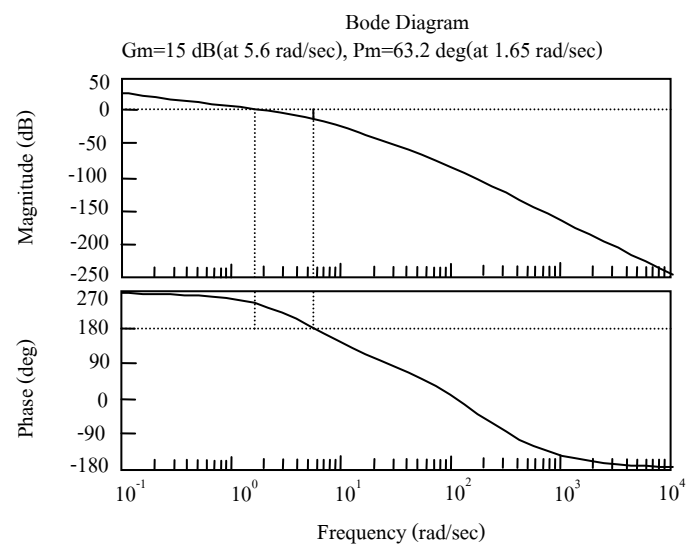
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -9.67 -107.1 -181.7 -1.07±j0.2 -1.61±j2.5



รูปที่ 4.2 แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyที่เหมาะสมที่สุดด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

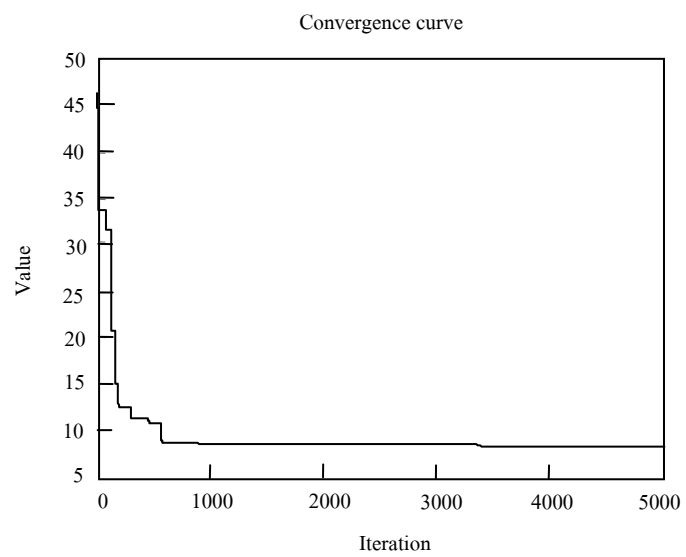


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

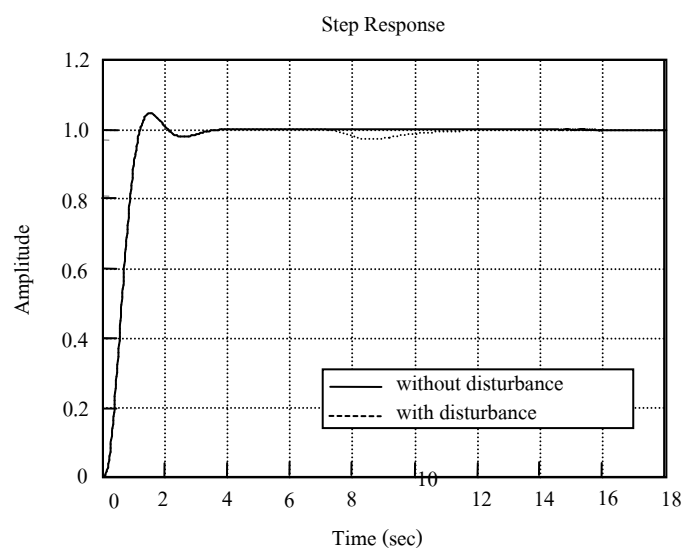


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

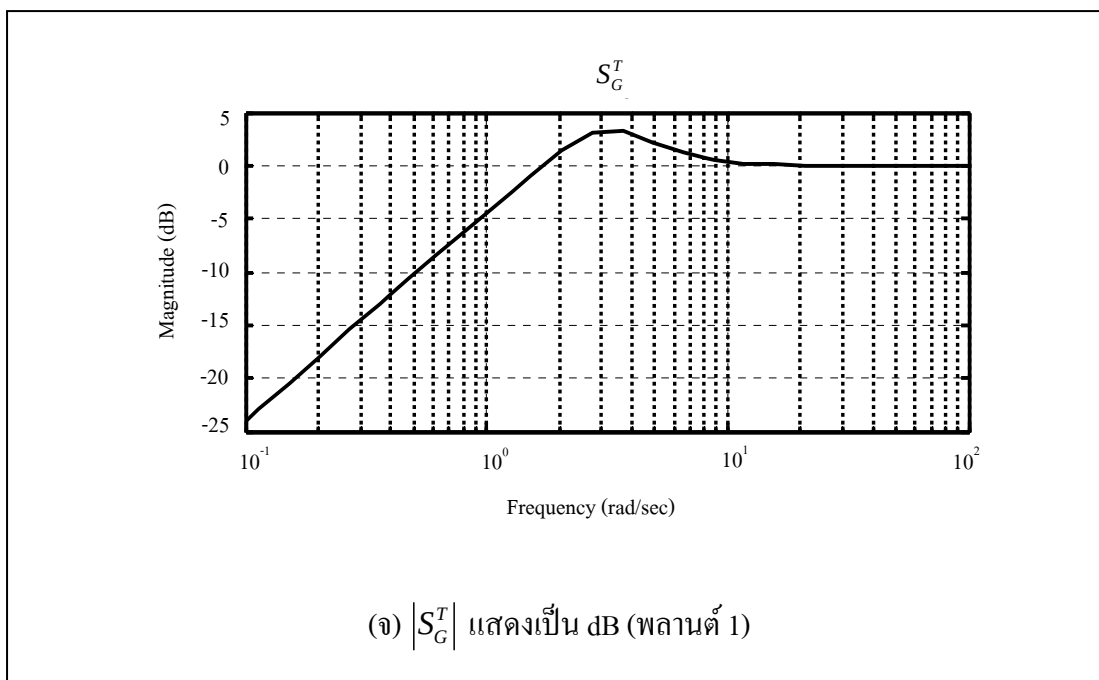


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 4.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 4.3 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.3 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา $P.O. = 4.77\% < 15\%$ $T_r = 0.73s < 2s$ และ $T_s = 1.9s < 5s$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดทุกประการและอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และเมื่อพิจารณาแผนภาพโบดในรูปที่ 4.3 (ข) พบว่า $P_m = 63.2\text{deg}$ และ $G_m = 15\text{ dB}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบรักษาเสถียรภาพได้ดี พิจารณารูปที่ 4.3 (ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก พบว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีเอ มีความสามารถในการฟื้นคืนระบบจากการถูกรบกวนจากภายนอกที่ดีมาก และเมื่อพิจารณาความไวดังรูปที่ 4.3 (จ) เห็นได้ว่าพฤติกรรมของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลานต์ 1 ในบทที่ 3 (ดูรูปที่ 3.2 (จ)) ในย่านความถี่ต่ำกว่า 0.5 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่สูงกว่า 0.5 rad/sec ระบบวงปิดมีขนาดของความไวเพิ่มสูงขึ้นจนเป็น 0 dB ในย่านความถี่สูง ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ว่าระบบวงปิดมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดกรบกวนจากภายนอกและสามารถตามรอยอินพุตได้ดี และยังสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดีอีกด้วย ตลอดจนจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลานต์

พลาตต์ 2 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 5s$ และ $T_s \leq 10s$

การออกแบบตัวควบคุมพลาตต์ 2 ดำเนินการสองครั้ง เนื่องจากผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอครั้งที่ 1 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยจินเนติกอัลกอริทึมหยุดการค้นหาคำตอบ ตามเงื่อนไขของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่กำหนด ($\varepsilon \leq 0.1$) พิจารณากราฟแสดงอัตราการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4.4 (ก) อาจสังเกตได้ว่าอัตราการลู่เข้าหาคำตอบยังไม่สิ้นสุด และสามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเดิมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่อาจดีกว่าเดิมได้อีก โดยผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบครั้งที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก-จ) จากนั้นจึงออกแบบตัวควบคุมครั้งที่ 2 โดยกำหนดเงื่อนไขหยุดการค้นหาคำตอบด้วยค่าความคลาดเคลื่อน $\varepsilon \leq 0.01$ ผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบครั้งที่ 2 จินเนติกอัลกอริทึมหยุดการค้นหาคำตอบด้วยเงื่อนไขจำนวนรอบสูงสุดคือ 5,000 รอบ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อน $\varepsilon \approx 0.03$ อย่างไรก็ตาม ได้ทำการทดลองเพิ่มจำนวนรอบสูงสุดไปเป็น 10,000 และ 12,000 รอบ จินเนติกอัลกอริทึมไม่สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่า ε น้อยกว่านี้ได้ อีกทั้ง พารามิเตอร์ของตัวควบคุมยังมีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีจำนวนรอบสูงสุดเป็น 5,000 รอบ ผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบครั้งที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.4 (ฉ-ฟ)

ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอครั้งที่ 1

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{89.52s^3 + 236.2s^2 + 203.4s + 56.93}{s^3 + 21.76s^2 + 118.4s}$$

ทั้งนี้ $K_p=1.63$ $K_I=0.48$ $K_D=18.41$ $K_A=69.48$ $d=10.88$ และ $e=10.88$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{89.52s^3 + 236.2s^2 + 203.4s + 56.93}{s^7 + 25.76s^6 + 211.5s^5 + 608.3s^4 + 798.6s^3 + 495.4s^2 + 118.4s}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

$$T(s) = \frac{89.52s^3 + 236.2s^2 + 203.4s + 56.93}{s^7 + 25.76s^6 + 211.5s^5 + 608.3s^4 + 888.1s^3 + 731.7s^2 + 321.8s + 56.93}$$

- มีความไวของระบบ

$$S_G^T = \frac{s^7 + 25.76s^6 + 211.5s^5 + 608.3s^4 + 798.6s^3 + 495.4s^2 + 118.4s}{s^7 + 25.76s^6 + 211.5s^5 + 608.3s^4 + 888.1s^3 + 731.7s^2 + 321.8s + 56.93}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -1.09 -0.91 -0.65

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -1.09 -0.91 -0.48 -0.68±j0.73 -10.96±j0.91

ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีครั้งที่ 2

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{275.3s^3 + 635.1s^2 + 447.6s + 99.75}{s^3 + 24.24s^2 + 146.9s}$$

ทั้งนี้ $K_p=2.93$ $K_I=0.68$ $K_D=46.48$ $K_A=225.93$ $d=12.12$ และ $e=12.12$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{275.3s^3 + 635.1s^2 + 447.6s + 99.75}{s^7 + 28.24s^6 + 249.9s^5 + 737s^4 + 979.3s^3 + 611.8s^2 + 146.9s}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

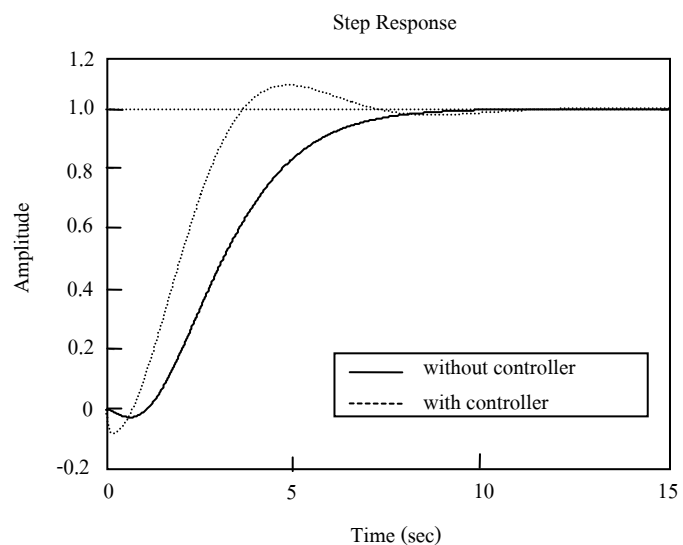
$$T(s) = \frac{275.3s^3 + 635.1s^2 + 447.6s + 99.75}{s^7 + 28.24s^6 + 249.9s^5 + 737s^4 + 1255s^3 + 1247s^2 + 594.5s + 99.75}$$

- มีความไวของระบบ

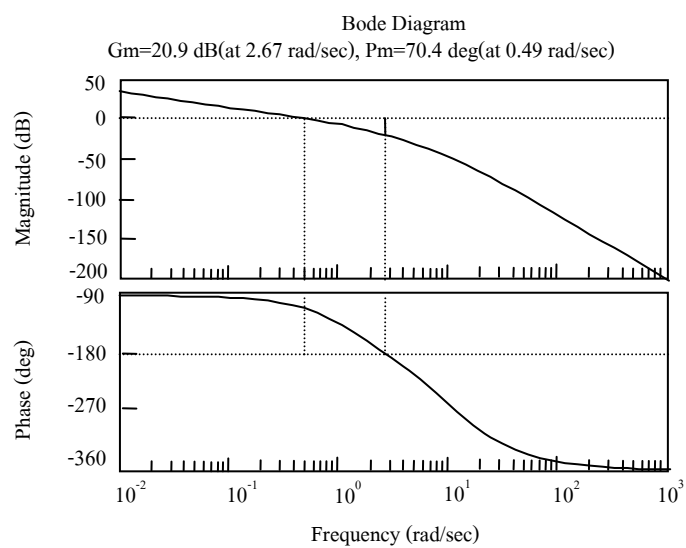
$$S_G^T = \frac{s^7 + 28.24s^6 + 249.9s^5 + 737s^4 + 979.3s^3 + 611.8s^2 + 146.9s}{s^7 + 28.24s^6 + 249.9s^5 + 737s^4 + 1255s^3 + 1247s^2 + 594.5s + 99.75}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -1.21 -0.57 -0.52

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -1.21 -0.64 -0.36 -0.72±j1.35 -12.30±j1.43

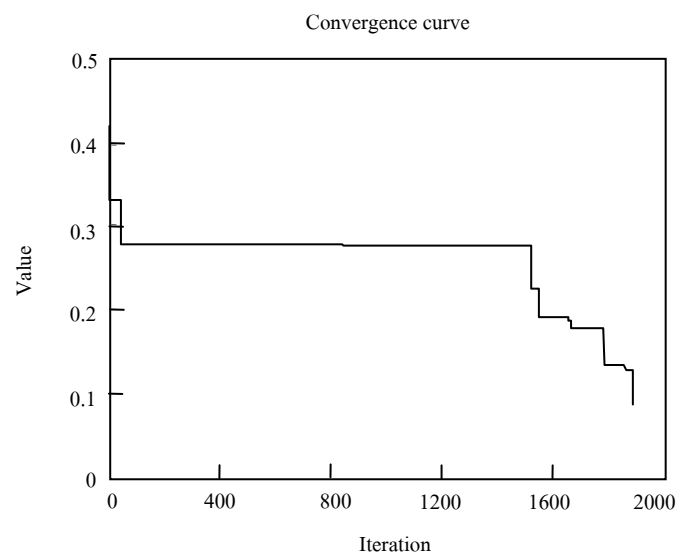


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

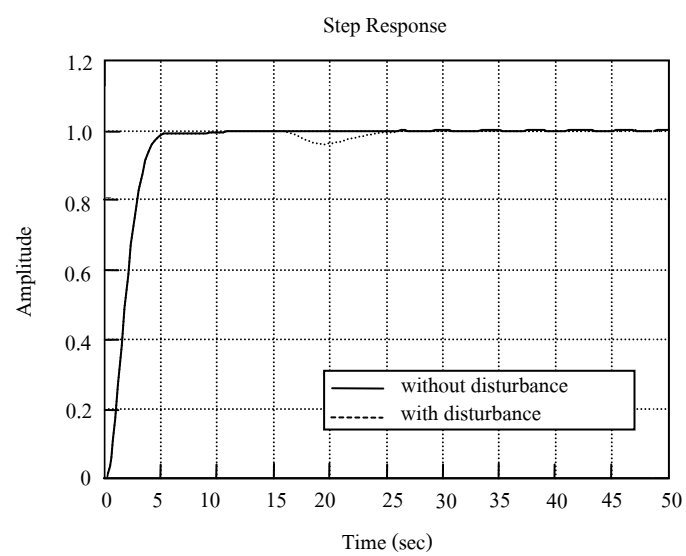


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

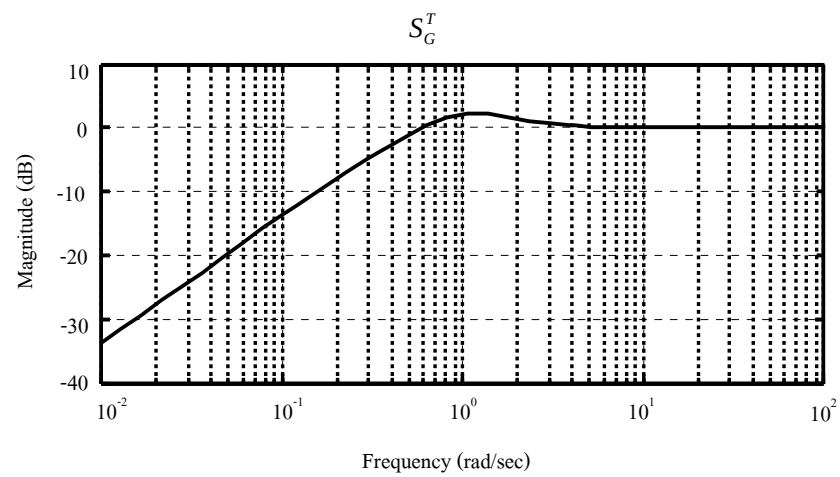


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ

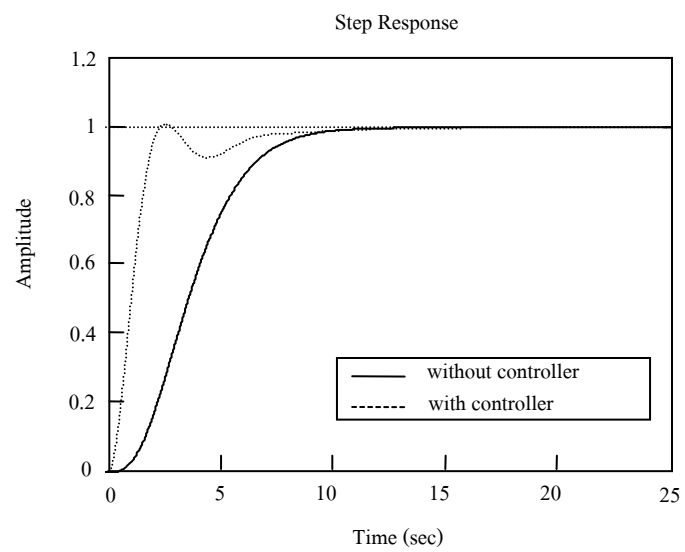


(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

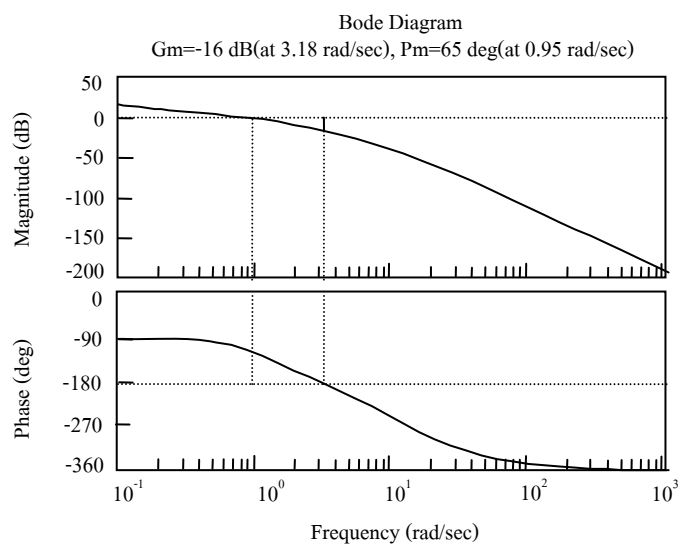


(จ) $|S_G^T|$ แสดงเป็น dB (พลาเน็ต 2)

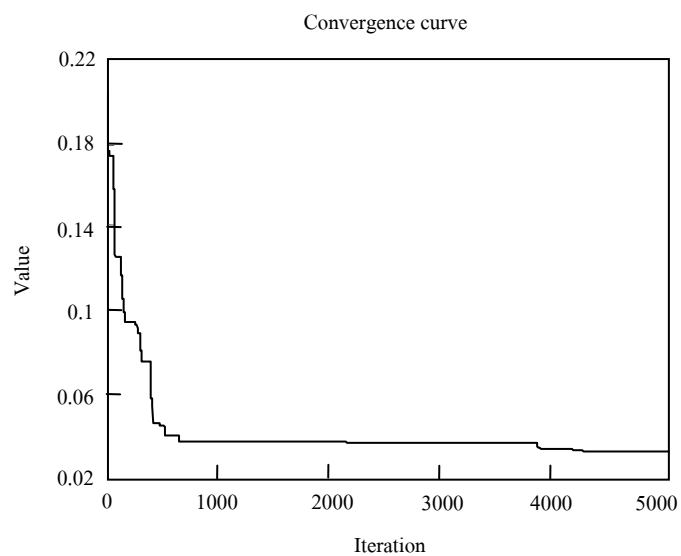


(ฉ) การตอบสนองทางโดเมนเวลา

รูปที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

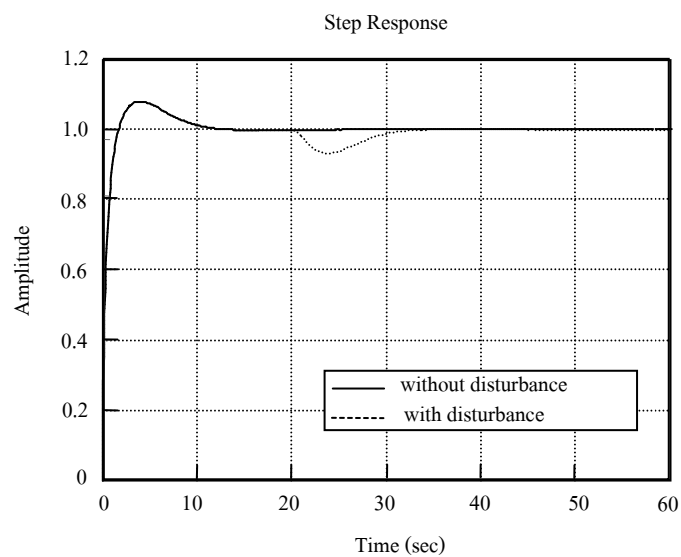


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

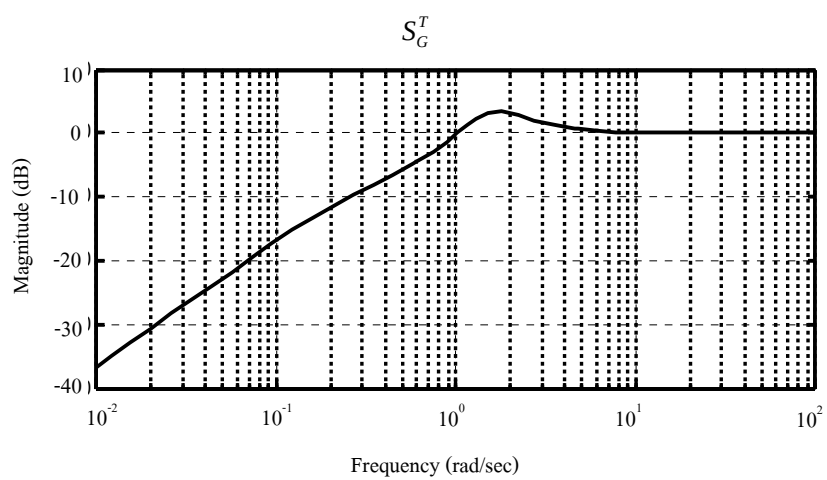


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ

รูปที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



(ฝ) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก



(ฟ) $|S_G^T|$ แสดงเป็น dB (พลานต์ 2)

รูปที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอครั้งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก-จ) แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา คือ $P.O.=0\% < 15\%$ $T_r=2.77s < 5s$ และ $T_s=4.69s < 10s$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด และตัวควบคุมสามารถแก้ไขการประวิงเวลาที่ปรากฏในพลวัตของพลานต์ได้ดี พิจารณาแผนภาพโบลด์รูปที่ 4.4 (ข) เผยให้เห็นว่า $P_m=70.4 \text{ deg}$ และ $G_m=20.9 \text{ dB}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และเมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอครั้งที่ 2 ดังรูปที่ 4.4 (ฉ-พ) พบว่าระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา คือ $P.O.=1\% < 15\%$ $T_r=1.41s < 5s$ และ $T_s=7.32s < 10s$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด และตัวควบคุมสามารถแก้ไขการประวิงเวลาที่ปรากฏในพลวัตของพลานต์ได้ดีเช่นกัน พิจารณาแผนภาพโบลด์รูปที่ 4.4 (ข) เผยให้เห็นว่า $P_m=65 \text{ deg}$ และ $G_m=16 \text{ dB}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก เมื่อพิจารณาระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอกของการออกแบบทั้งสองครั้งให้ผลคล้ายคลึงกัน เมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ระบบมีความสามารถในการฟื้นคืนสู่สภาวะคงตัวที่ดีมาก และเมื่อพิจารณาความไว การออกแบบทั้งสองครั้ง พฤติภาพของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน ซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีพลานต์ 1 (ดูรูปที่ 4.3 (จ)) การอภิปรายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกัน ระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดกรบกวนจากภายนอก และสามารถตามรอยอินพุตได้ดี ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมจะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลานต์

เมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบครั้งที่ 1 กับผลการออกแบบครั้งที่ 2 เห็นได้ว่า ผลการออกแบบตัวควบคุมครั้งที่ 1 ให้ผลที่ดีกว่าผลการออกแบบครั้งที่ 2 ทั้งทางด้านการตอบสนองทางโดเมนเวลาและความถี่ ผลการออกแบบตัวควบคุมครั้งที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ช่วงเวลาเข้าที่ดีกว่าผลการออกแบบครั้งที่ 2 และในภาพรวมมีการตอบสนองในโดเมนเวลาที่ราบเรียบกว่า นอกจากนี้ผลการออกแบบครั้งที่ 1 ยังมีผลของส่วนเฟสและส่วนแอมพลิจูดการขยายที่ดีกว่าผลการออกแบบครั้งที่ 2 อีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลการออกแบบครั้งที่ 1 ให้ผลที่ดีกว่า แม้ว่าผลการออกแบบครั้งที่ 2 จินเนติกอัลกอริทึมหยุดการค้นหาคำด้วยจำนวนรอบ โดยให้ผลค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าผลการออกแบบครั้งที่ 1 ก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้อาจอธิบายได้ว่ามีเหตุผลมาจากการถ่วงดุลน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เน้นไปทางด้านของช่วงเวลานั้น จึงส่งผลให้ผลการออกแบบที่ได้ในครั้งที่ 2 ให้ช่วงเวลานั้นสั้นมาก ทำให้ระบบเกิดการพุ่งเกินและสั่นไหวในการตอบสนองต่ออินพุตอ้างอิง และทำให้ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ทั้งนี้ระบบที่ใช้ตัวควบคุมทั้งสองกรณี สามารถฟื้นสภาพจากการถูกรบกวนจากภายนอก ได้ภายในเวลาประมาณ 10 วินาทีใกล้เคียงกัน

พลาเน็ต 3 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 4s$ และ $T_s \leq 8s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{146.7s^3 + 790.2s^2 + 1251s + 478.7}{s^3 + 63.28s^2 + 945.1s}$$

ทั้งนี้ $K_p=1.29$ $K_I=0.51$ $K_D=29.31$ $K_A=116.05$ $d=39.11$ และ $e=24.16$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{-73.33s^4 - 248.5s^3 + 164.6s^2 + 1012s + 478.7}{s^6 + 66.28s^5 + 1138s^4 + 3026s^3 + 2898s^2 + 945.1s}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

$$T(s) = \frac{-73.33s^4 - 248.5s^3 + 164.6s^2 + 1012s + 478.7}{s^6 + 66.28s^5 + 1065s^4 + 2778s^3 + 3063s^2 + 1957s + 478.7}$$

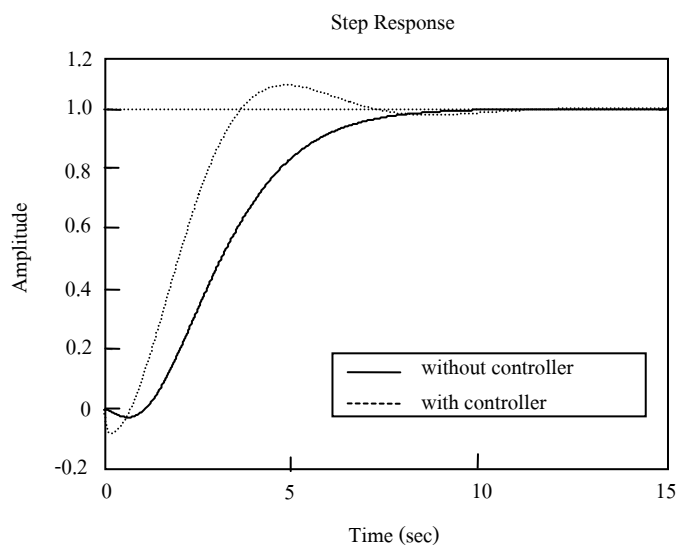
- มีความไวของระบบ

$$S_G^T = \frac{s^6 + 66.28s^5 + 1138s^4 + 3026s^3 + 2898s^2 + 945.1s}{s^6 + 66.28s^5 + 1065s^4 + 2778s^3 + 3063s^2 + 1957s + 478.7}$$

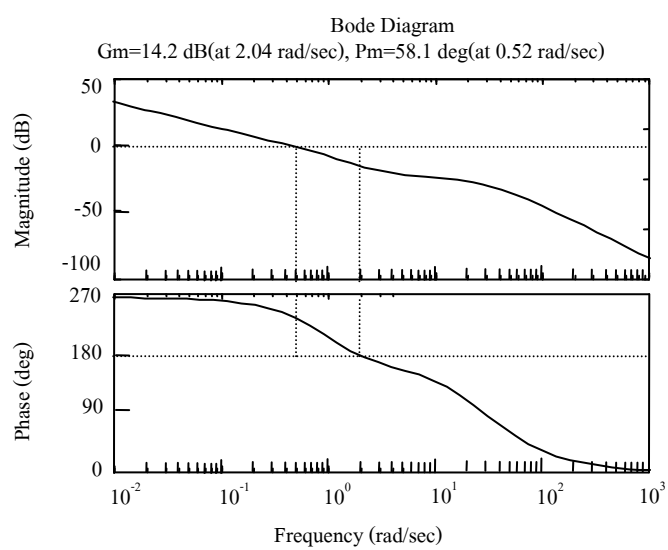
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : 2 -2.42 -2.41 -0.56

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -42.96 -20.38 -1.53 -0.47 -0.68±j0.73 -10.96±j0.91

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.5 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลา $P.O.=7.91\% < 15\%$ $T_r = 2.14s < 4s$ และ $T_s = 6.63s < 8s$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด นอกจากนี้ระบบเมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม มีช่วงเวลาประวิงสั้นกว่าระบบก่อนมีการออกแบบตัวควบคุมถึงเกือบเท่าตัว แผนภาพโพลในรูปที่ 4.5 (ข) เปิดเผยว่า $P_m=58.1\text{deg}$ และ $G_m=14.2\text{ dB}$ ซึ่งถือว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก จากรูปที่ 4.5 (ง) ระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอก มีความสามารถในการฟื้นคืนระบบที่ดีมาก และจากผลการจำลองสถานการณ์ความไวแสดงในรูปที่ 4.6 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่า 0.15 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.15 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

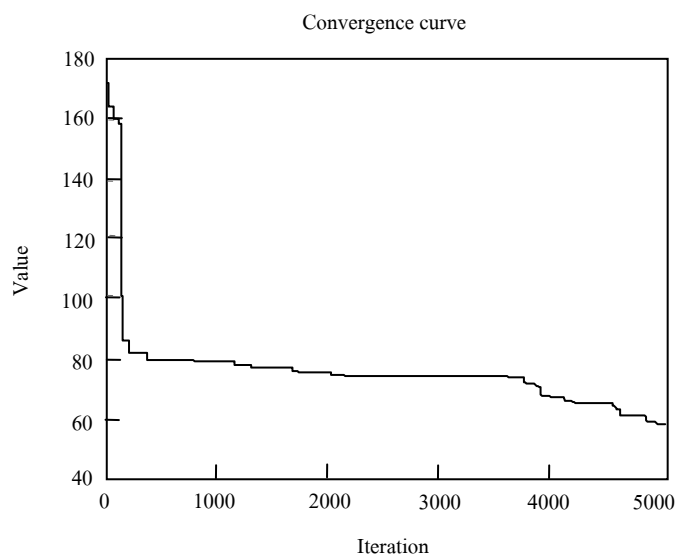


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

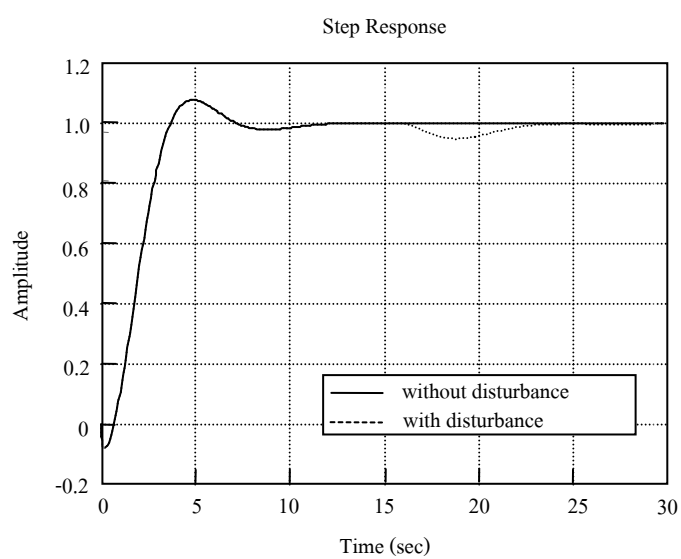


(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

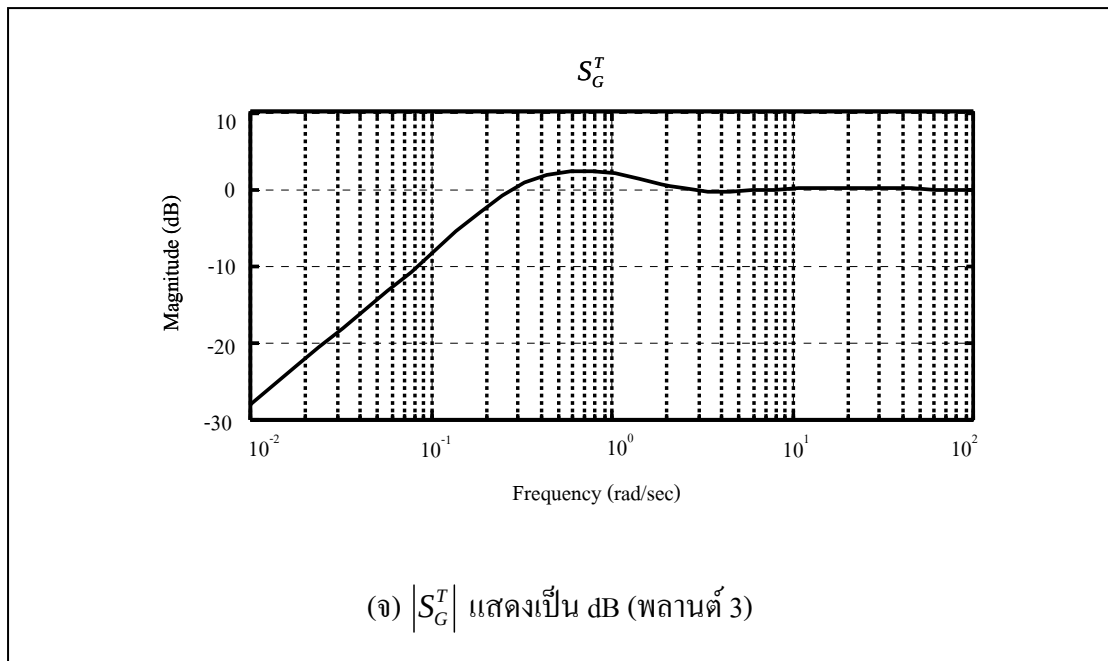


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 4.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 4.5 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

พลานต์ 4 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 22s$ และ $T_s \leq 40s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{29.9s^3 - 1.66 \times 10^4 s^2 + 2.15 \times 10^6 s + 1.99 \times 10^5}{s^3 + 1168s^2 + 3.27 \times 10^5 s}$$

ทั้งนี้ $K_p=6.58$ $K_I=0.61$ $K_D=-34.57$ $K_A=57.90$ $d=465.11$ และ $e=702.51$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{-14.95s^4 + 8335s^3 - 1.09 \times 10^6 s^2 + 2.05 \times 10^6 s + 1.99 \times 10^5}{5s^5 + 5834s^4 + 1.65 \times 10^6 s^3 + 3.43 \times 10^6 s^2 + 3.27 \times 10^6 s}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

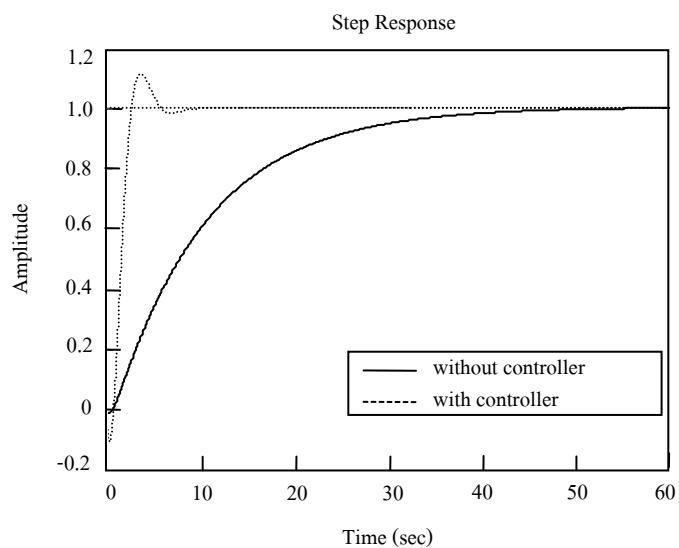
$$T(s) = \frac{-14.95s^4 + 8335s^3 - 1.09 \times 10^6 s^2 + 2.05 \times 10^6 s + 1.99 \times 10^5}{5s^5 + 5834s^4 + 1.65 \times 10^6 s^3 + 2.34 \times 10^6 s^2 + 2.38 \times 10^6 s + 1.99 \times 10^5}$$

- มีความไวของระบบ

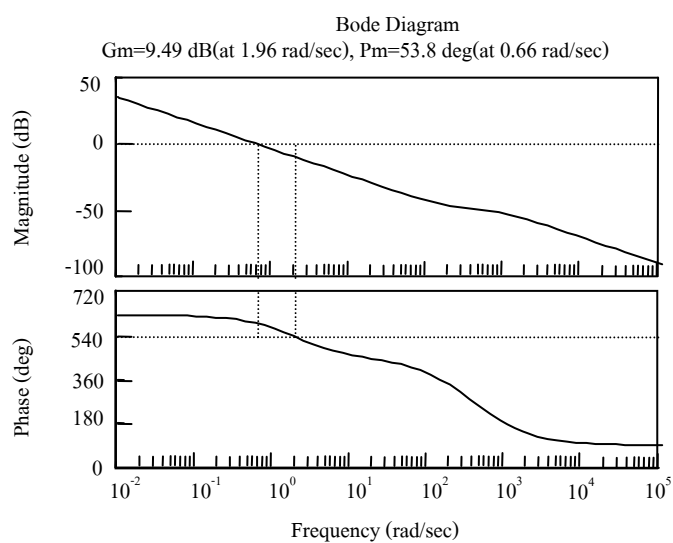
$$S_G^T = \frac{5s^5 + 5849s^4 + 1.65 \times 10^6 s^3 + 3.43 \times 10^6 s^2 + 3.27 \times 10^5 s}{5s^5 + 5834s^4 + 1.65 \times 10^6 s^3 + 2.34 \times 10^6 s^2 + 2.38 \times 10^6 s + 1.99 \times 10^5}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.09 2 205.56 349.95

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -684 -481.18 -0.09 -0.66 ± j0.94

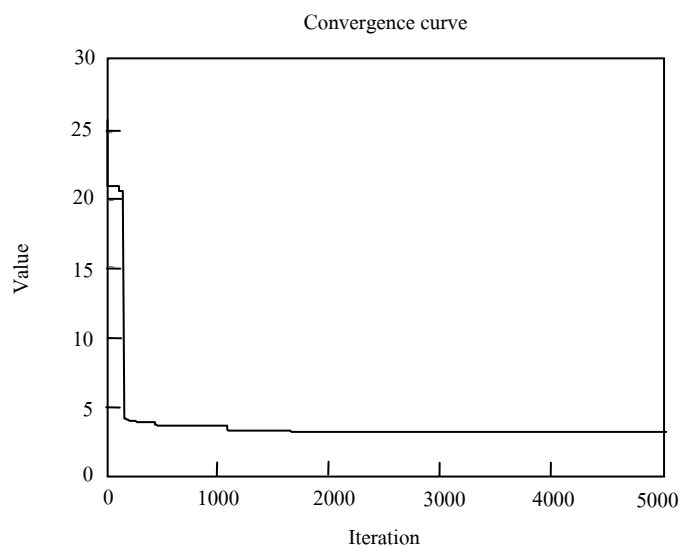


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

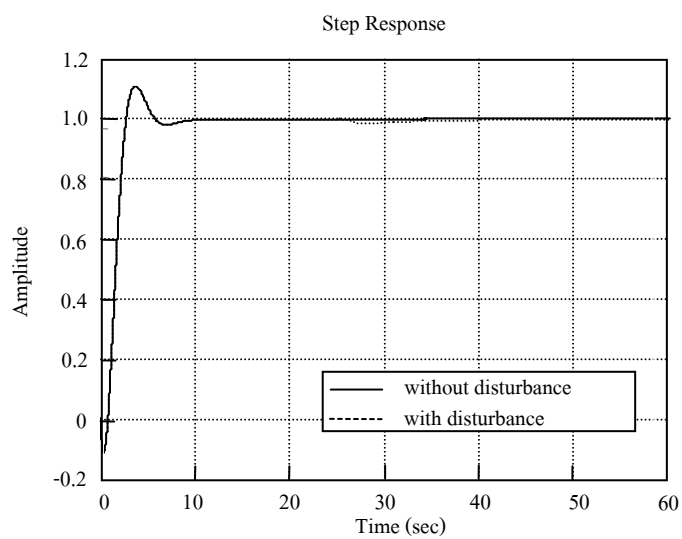


(ข) แผนภาพโบคของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

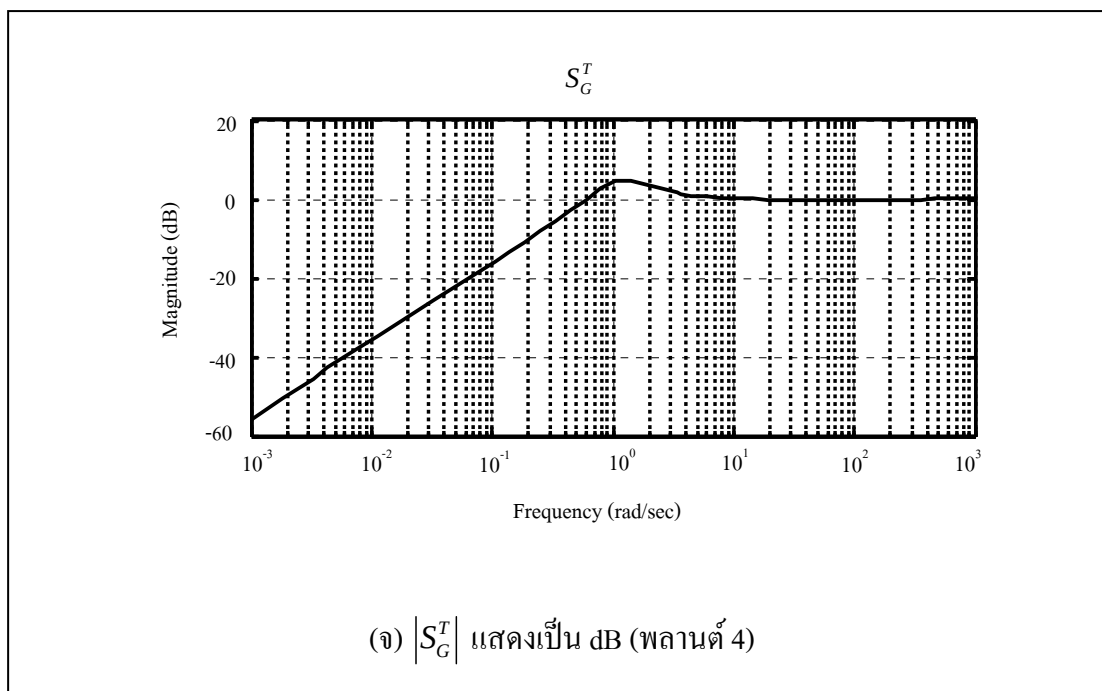


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 4.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 4.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.6 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนด นั่นคือ $P.O. = 0\% < 15\%$ $T_r = 3.71s < 22s$ และ $T_s = 25.4s < 40s$ พิจารณาแผนภาพโพลดังรูปที่ 4.6 (ข) เห็นได้ว่า $P_m = 53.8\text{deg}$ และ $G_m = 9.49\text{dB}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ระบบวงปิดตอบสนองอย่างว่องไวมาก จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.6 (ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก เห็นได้ว่าการรบกวนจากภายนอกแทบไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ นั้นแสดงให้เห็นว่า ระบบมีเสถียรภาพที่ดีมาก เมื่อพิจารณาความไวของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.6 (จ) พบว่าในย่านความถี่น้อยกว่า 0.2 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.2 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) $|M_\omega|$ มีรูปลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแรก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบของพลานต์ 4 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

พลาเน็ต 5 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 30s$ และ $T_s \leq 60s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{-47.49s^3 + 2849s^2 + 655.2s + 31.61}{s^3 + 33.76s^2 + 126.2s}$$

ทั้งนี้ $K_p=5.12$ $K_I=0.25$ $K_D=624.85$ $K_A=-677.47$ $d=29.48$ และ $e=4.28$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{-3.94s^5 + 260.2s^4 - 1418s^3 + 2524s^2 + 639.4s + 31.61}{\left[\begin{array}{l} 8.3s^7 + 331.9s^6 + 2902s^5 + 1.03 \times 10^4 s^4 + 1.46 \times 10^4 s^3 + 2622s^2 \\ + 126.2s \end{array} \right]}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

$$T(s) = \frac{-3.94s^5 + 260.2s^4 - 1418s^3 + 2524s^2 + 639.4s + 31.61}{\left[\begin{array}{l} 8.3s^7 + 331.9s^6 + 2898s^5 + 1.05 \times 10^4 s^4 + 1.32 \times 10^4 s^3 + 5146s^2 \\ + 765.7s + 31.61 \end{array} \right]}$$

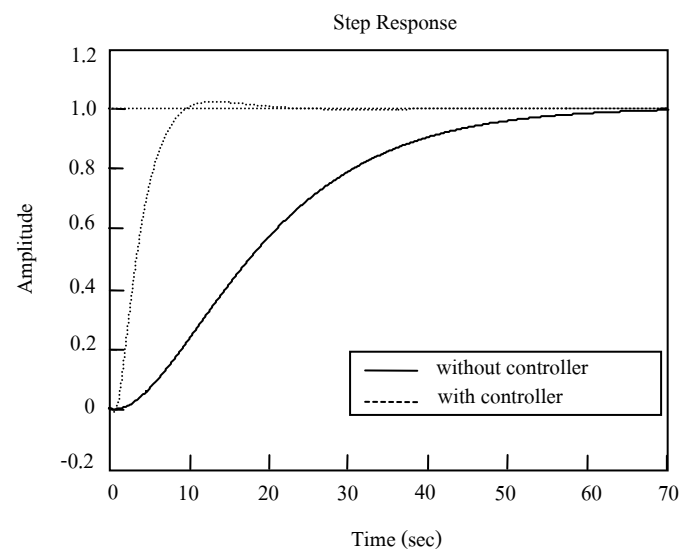
- มีความไวของระบบ

$$S_G^T = \frac{8.3s^7 + 331.9s^6 + 2902s^5 + 10260s^4 + 14590s^3 + 2622s^2 + 126.2s}{8.3s^7 + 331.9s^6 + 2898s^5 + 10520s^4 + 13170s^3 + 5146s^2 + 765.7s + 31.61}$$

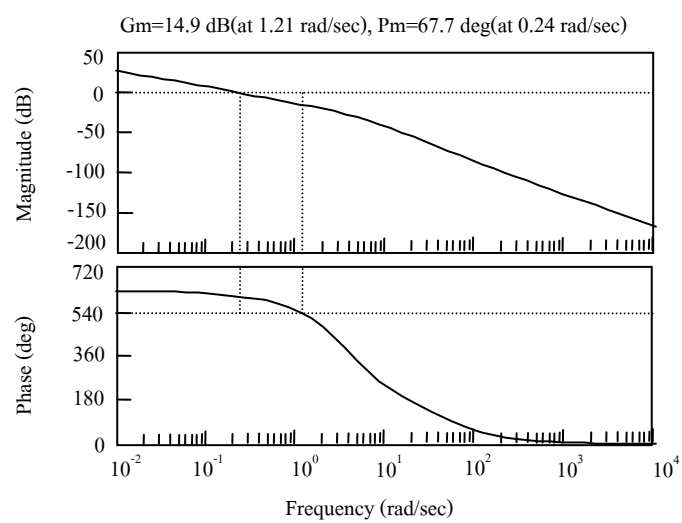
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.07 -0.16 60 3.01±j1.73

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -29.56 -1.38 -0.07 -4.26±j2.43 -0.23±j0.07

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.7 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุม ระบบมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนดนั่นคือ $P.O. = 2\% < 15\%$ $T_r = 5.36s < 30s$ และ $T_s = 9.07s < 60s$ แสดงว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้การตอบสนองที่ว่องไวมาก และช่วงเวลาระวังลดลงอย่างเห็นได้ชัด และแผนภาพโพลดังรูปที่ 4.7 (ข) เปิดเผยให้เห็นว่า $P_m = 67.7\text{deg}$ และ $G_m = 14.9\text{ dB}$ ซึ่งถือว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.7 (ง) ระบบเมื่อถูกระบกวนจากภายนอก เห็นได้ว่าการรบกวนจากภายนอกแทบไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ นั้นแสดงให้เห็นว่า ระบบมีเสถียรภาพที่ดีมาก และเมื่อพิจารณาความไวของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.7 (จ) พบว่าในย่านความถี่น้อยกว่า 0.085 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 0.085 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบของพลาเน็ต 5 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

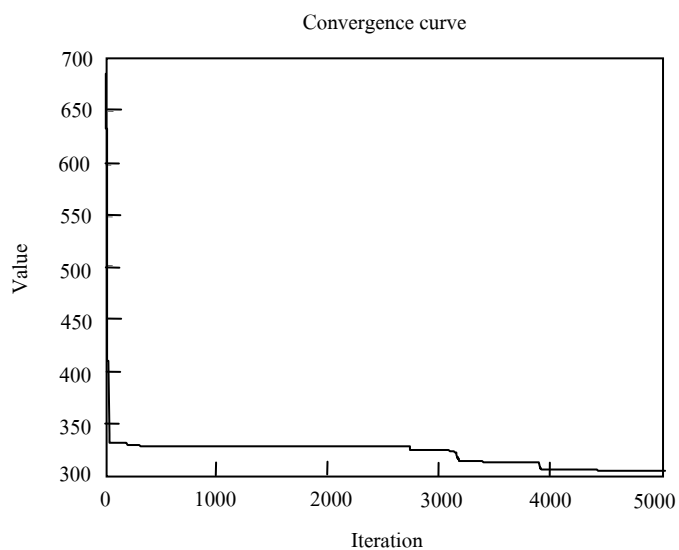


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

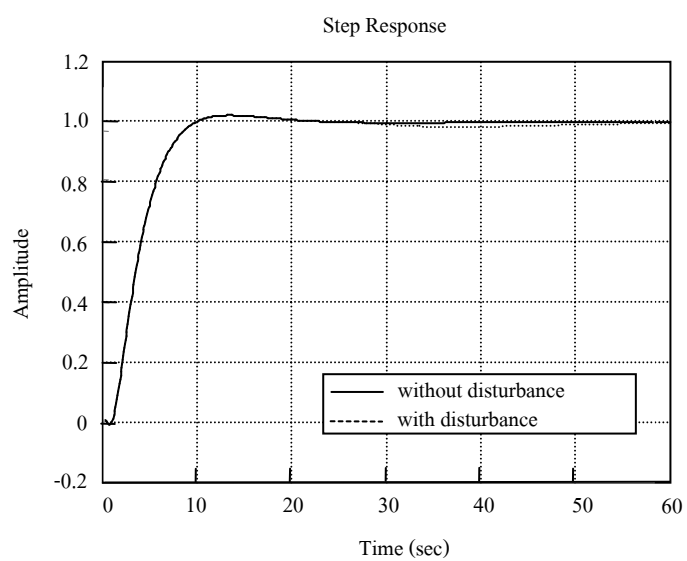


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

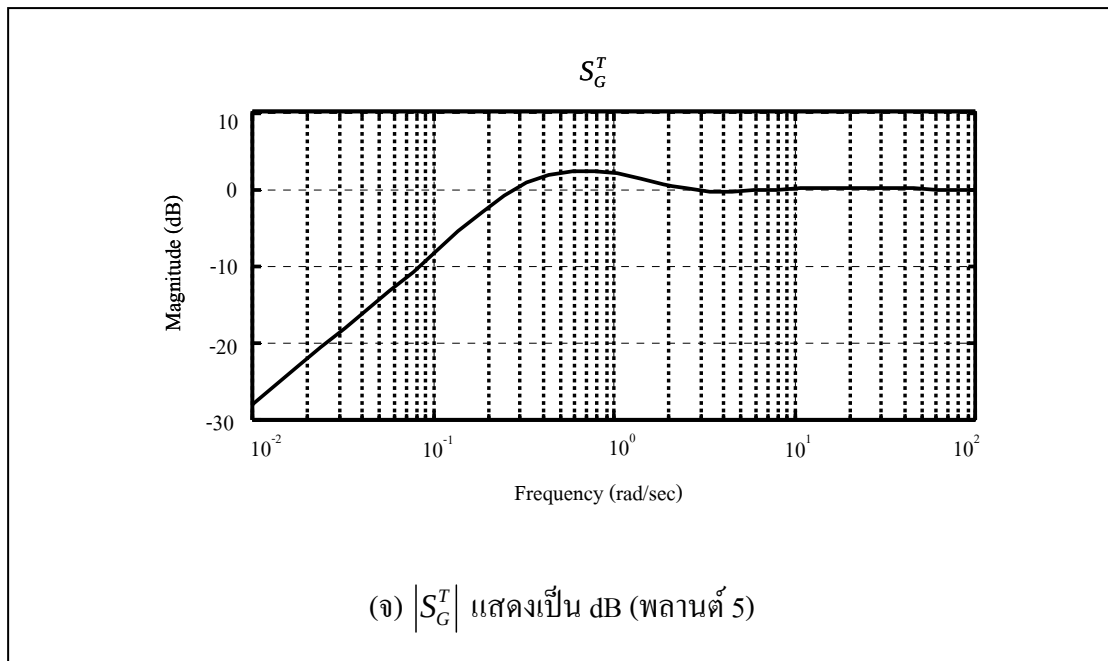


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

พลานต์ 6 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 10s$ และ $T_s \leq 20s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{140s^3 + 253.7s^2 + 149.9s + 29.06}{s^3 + 15.59s^2 + 60.74s}$$

ทั้งนี้ $K_p=2.35$ $K_I=0.48$ $K_D=27.80$ $K_A=109.89$ $d=7.79$ และ $e=7.79$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{140s^5 + 1934s^4 + 8235s^3 + 1.1 \times 10^4 s^2 + 5747s + 1046}{s^7 + 53.59s^6 + 726.1s^5 + 3482s^4 + 4996s^3 + 2187s^2}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

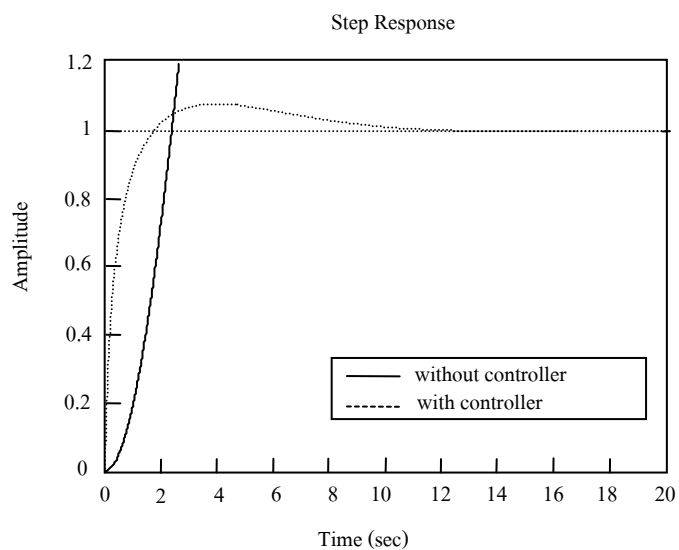
$$T(s) = \frac{140s^5 + 1934s^4 + 8235s^3 + 1.09 \times 10^4 s^2 + 5747s + 1046}{\left[\begin{array}{l} s^7 + 53.59s^6 + 866.1s^5 + 5416s^4 + 1.32 \times 10^4 s^3 + 1.31 \times 10^4 s^2 + 5747s \\ + 1046 \end{array} \right]}$$

- มีความไวของระบบ

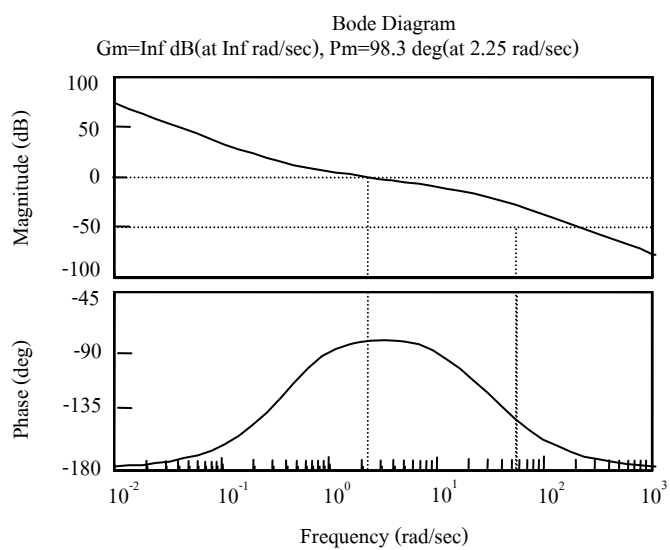
$$S_G^T = \frac{s^7 + 53.59s^6 + 726.1s^5 + 3482s^4 + 4996s^3 + 2187s^2}{s^7 + 53.59s^6 + 866.1s^5 + 5416s^4 + 13230s^3 + 13150s^2 + 5747s + 1046}$$

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.51 -0.52 0.78 $-6 \pm j2.2 \times 10^{-7}$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.84 -2.32 -6.97 -12.05 -30.65 $-0.37 \pm j0.26$

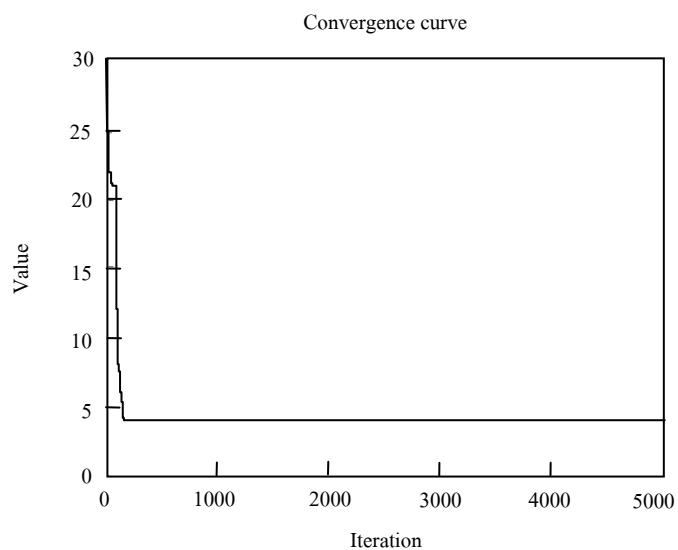


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

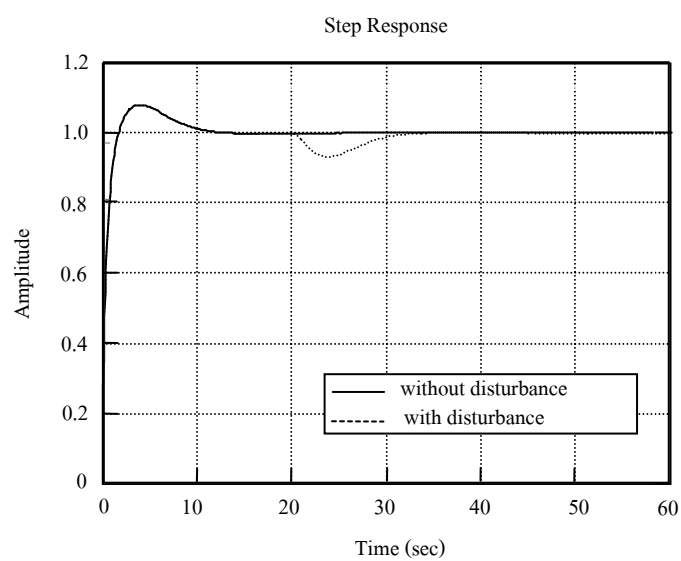


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

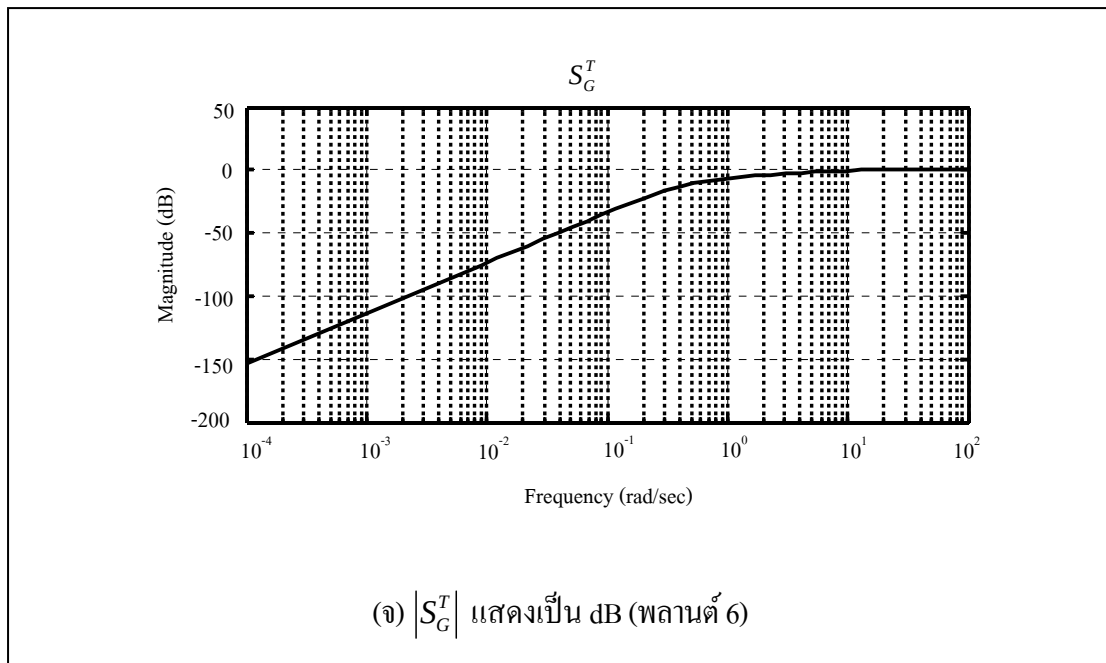


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 4.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 4.8 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.8 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า พลานต์มีลักษณะขาดเสถียรด้วยความเป็น type-1 เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมให้แล้ว ระบบวงปิดมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาเป็นไปตามข้อกำหนดนั่นคือ $P.O. = 9.12\% < 15\%$ $T_r = 1.03s < 10s$ และ $T_s = 9.12s < 20s$ อีกทั้ง $P.m = 98.3\text{deg}$ และ $G.m = \text{Inf}$ ดังรูปที่ 4.8 (ข) ซึ่งแสดงว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก พิจารณาระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอกดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ง) เมื่อระบบถูกการรบกวนจากภายนอก ระบบมีความสามารถในการฟื้นคืนสู่สภาวะคงตัวที่ดีมาก และเมื่อพิจารณาความไวดังรูปที่ 4.8 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่าและมากกว่า 0.4 rad/sec พฤติภาพของความไวมีรูปแบบคล้ายคลึงกับกรณีพลานต์ 1 (ดูรูปที่ 4.3) การอภิปรายเกี่ยวกับความไวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีแรก ระบบวงปิดมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดการรบกวนจากภายนอก และสามารถตามรอยอินพุตได้ดี ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมจะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (noise) ได้ดี และจะไม่ดึงพลังงานมากในการควบคุมพลานต์

พลาเน็ต 7 ต้องการ $P.O. \leq 15\%$ $T_r \leq 1.5s$ และ $T_s \leq 30s$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$$G_c(s) = \frac{676.1s^3 + 1532s^2 + 1146s + 283.1}{s^3 + 71.71s^2 + 555.6s}$$

ทั้งนี้ $K_p=2.00$ $K_I=0.51$ $K_D=157.10$ $K_A=516.97$ $d=62.87$ และ $e=8.83$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบที่มีตัวควบคุม

$$GH(s) = \frac{676.1s^3 + 1532s^2 + 1146s + 283.1}{s^6 + 72.91s^5 + 642.9s^4 + 753.8s^3 + 738.5s^2 + 555.6s}$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด

$$T(s) = \frac{676.1s^3 + 1532s^2 + 1146s + 283.1}{s^6 + 72.91s^5 + 642.9s^4 + 1430s^3 + 2271s^2 + 1702s + 283.1}$$

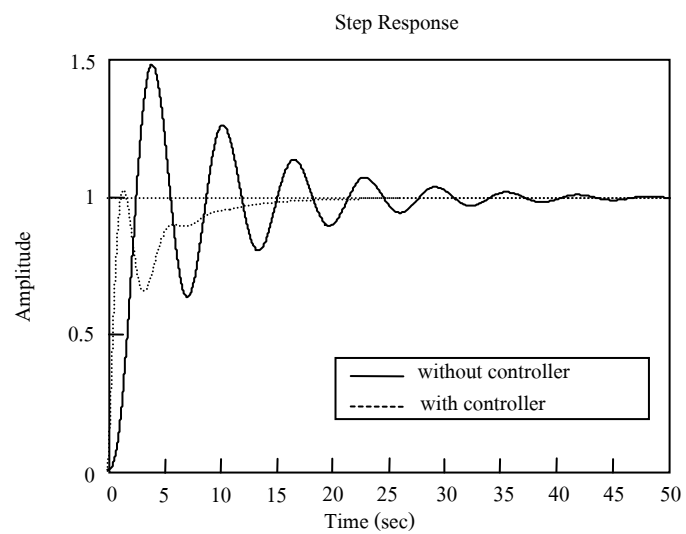
- มีความไวของระบบ

$$S_G^T = \frac{s^6 + 72.91s^5 + 642.9s^4 + 753.8s^3 + 738.5s^2 + 555.6s}{s^6 + 72.91s^5 + 642.9s^4 + 1430s^3 + 2271s^2 + 1702s + 283.1}$$

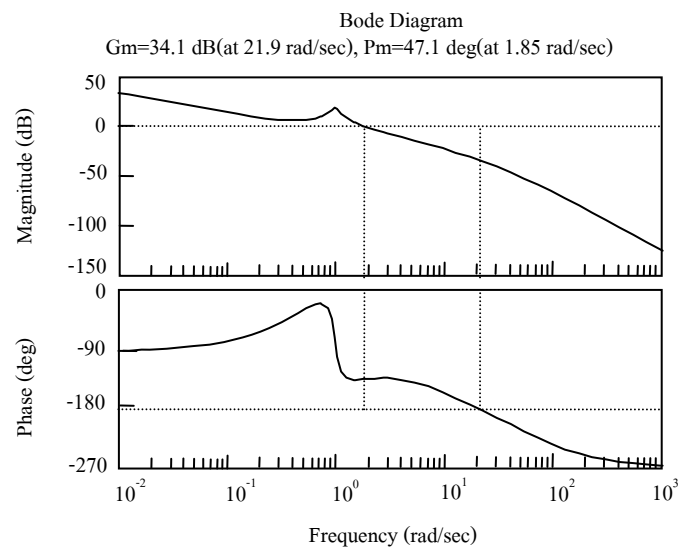
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.63 -0.76 -0.88

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิด : -0.23 -1.01 -7.45 -63.07 -0.58±j1.52

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.9 (ก) อาจสังเกตเห็นได้ว่า พลาเน็ตมีการแกว่งในการตอบสนองที่สูงมาก เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมให้แล้ว ระบบวงปิดมีผลการตอบสนองทางโดเมนเวลาที่เราเปรียบกว่าเดิมมากและเป็นไปตามข้อกำหนด นั่นคือ $P.O. = 2.8\% < 15\%$ $T_r = 0.81s < 1.5s$ และ $T_s = 14.1s < 30s$ ตลอดจนมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก นั่นคือ $Pm = 47.1\text{deg}$ และ $Gm = 34.1\text{dB}$ ตามรูปที่ 4.9 (ข) จากระบบเมื่อถูกการรบกวนจากภายนอกดังรูปที่ 4.9 (ง) มีความสามารถในการฟื้นคืนระบบที่ดีมาก และจากผลการจำลองสถานการณ์ความไวแสดงในรูปที่ 4.9 (จ) ในย่านความถี่น้อยกว่า 1.3 rad/sec ระบบมีความไวต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ส่วนในย่านความถี่มากกว่า 1.3 rad/sec ระบบมีความไวสูง (มากกว่า -10 dB) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบของพลาเน็ต 7 เมื่อมีตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีในทำนองเดียวกับกรณีแรกที่ผ่านมา

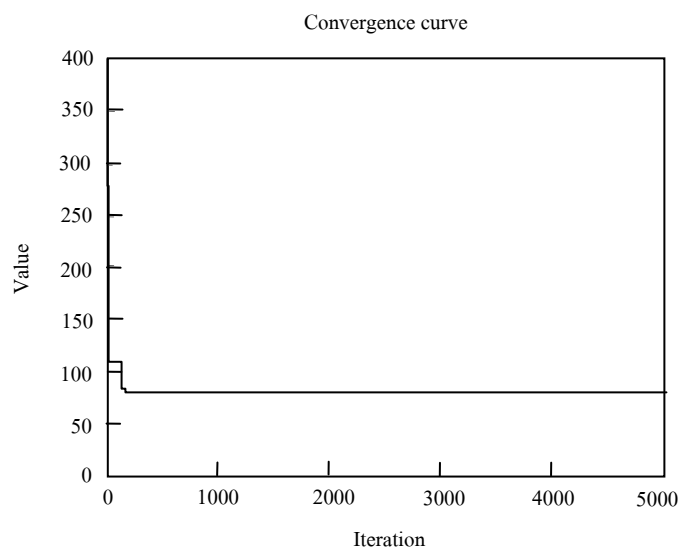


(ก) การตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบ

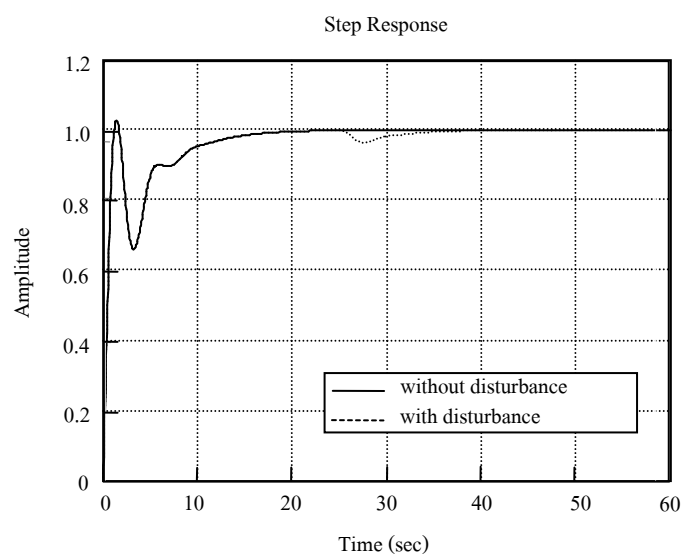


(ข) แผนภาพโบดของระบบที่มีตัวควบคุม

รูปที่ 4.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ

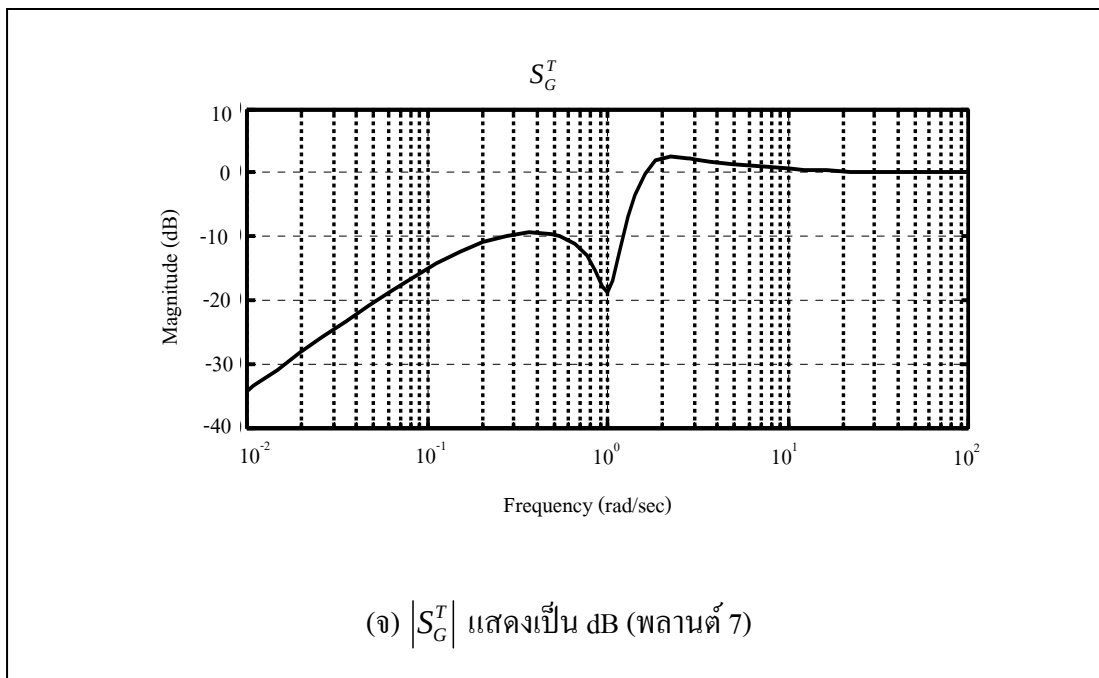


(ค) การวนรอบหาค่าเหมาะที่สุดของระบบ



(ง) ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก

รูปที่ 4.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)



รูปที่ 4.9 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบ (ต่อ)

4.5 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ผลการออกแบบตัวควบคุมแสดงให้เห็นว่าการออกแบบเป็นไปตามข้อกำหนดทุกประการ ทั้งด้านการพุ่งเกิน เวลาไต่ระดับ และเวลาเข้าที่ วิธีจินเนติกอัลกอริทึมให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม อาศัยคำตอบที่ได้จากวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุดมากำหนดขอบเขตของค่าเริ่มต้นการค้นหา อีกทั้งการออกแบบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้วิธีการค้นหาคำตอบด้วยหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ ซึ่งมีการวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนการค้นหาคำตอบ จึงทำให้ระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวควบคุมจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีผลการตอบสนองที่ดีกว่าที่ได้จากวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด หากพิจารณาเปรียบเทียบกับผลที่นำเสนอในบทที่ 3 จากการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก พบว่าพลานต์ทั้ง 7 เมื่อถูกรบกวนจากภายนอก ตัวควบคุมช่วยให้ระบบที่ถูกรบกวนฟื้นคืนสู่ระดับการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวได้ดี และใช้เวลาไม่นาน ตลอดจนมีความสามารถในการตามรอยอินพุตได้ดีมาก นอกจากนั้นระบบวงปิดทุกกรณีมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมให้ผล

การฟื้นคืนสู่สภาวะอยู่ตัว เมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก ได้เร็วกว่าการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด อีกทั้งความไวของระบบที่ทำการออกแบบตัวควบคุมด้วย จินเนติกอัลกอริทึมให้ผลที่ดีกว่าระบบที่ทำการออกแบบด้วยวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด อาจกล่าวได้ว่า วิธีการออกแบบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างมาก

บทที่ 5

การอนุวัตและทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอ

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการอนุวัตและทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอ ด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อก โดยอาศัยออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก เชื่อมต่อตามโครงสร้างแบบขนาน พิจารณาโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อกแสดงดังรูปที่ 5.1 อีกทั้งมีการแสดงความสัมพันธ์ในการนำค่าพารามิเตอร์ K_p , K_I , K_D และ K_A ไปสร้างเป็นวงจรตัวควบคุมพี วงจรตัวควบคุมไอ วงจรตัวควบคุมดี และวงจรตัวควบคุมเอตามลำดับ พร้อมทั้งมีการอธิบายหน้าที่ของพารามิเตอร์แต่ละตัวในวงจรตัวควบคุมพีไอดีเอ นอกจากนี้ยังทำการทดสอบตัวควบคุมด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได และสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในการทดสอบทำการแปรค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในโครงสร้างของตัวควบคุม เพื่อศึกษาคุณลักษณะของตัวควบคุม เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในโครงสร้างของตัวควบคุมแต่ละตัวมีการเปลี่ยนแปลง คุณลักษณะของตัวควบคุมแต่ละตัวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ตลอดจนวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอต่อการตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดและสัญญาณลาดเอียงตามลำดับ

5.2 ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อก

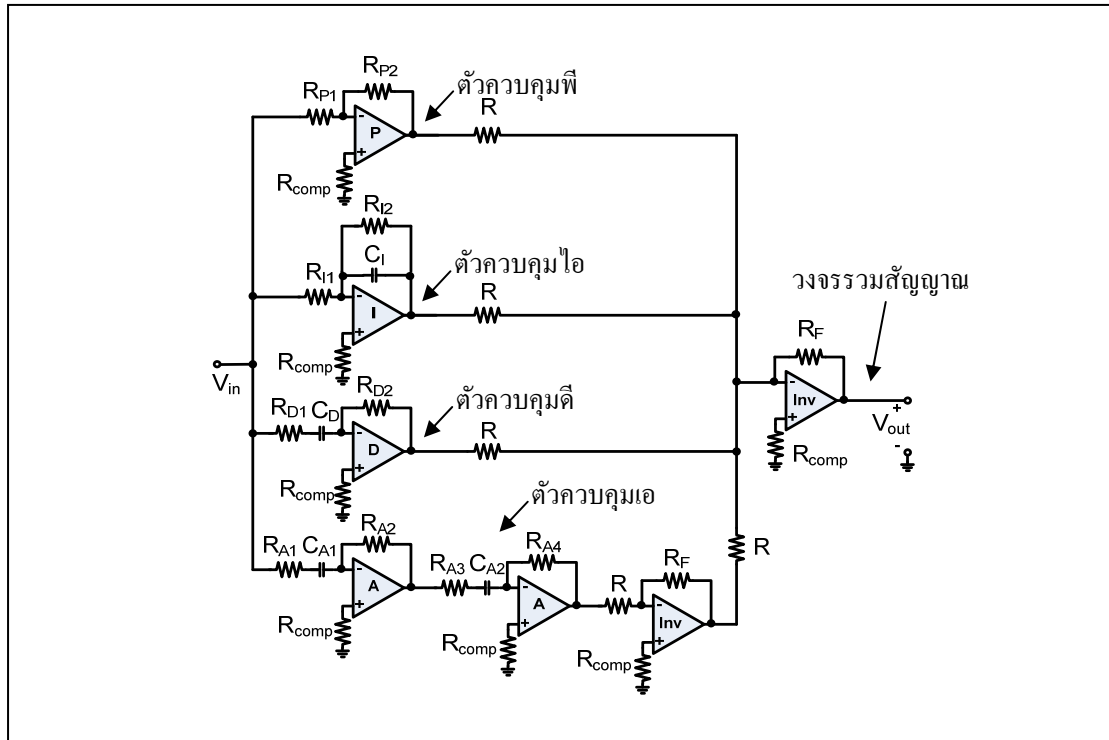
การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อก สามารถสร้างตัวควบคุมที่มีโครงสร้างแบบขนาน อาศัยออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก มีโครงสร้างของตัวควบคุมดังรูปที่ 5.1 พารามิเตอร์ของแต่ละองค์ประกอบ หาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ต่อไปนี้

$$K_p = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} \quad (5.1)$$

$$K_I = \frac{1}{R_{i1}C_I} \quad (5.2)$$

$$K_D = R_{D2}C_D \quad (5.3)$$

$$K_A = R_{A2} C_{A1} R_{A4} C_{A2} \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก

จากโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีเอกรูปที่ 5.1 พารามิเตอร์แต่ละตัวในวงจรมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- | | |
|-----------------------|--|
| R_{comp} | มีหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าขาบวก |
| R_{P1} และ R_{P2} | มีหน้าที่เป็นเกนในการปรับสัดส่วนของสัญญาณ |
| R_{I1} และ C_I | ส่งผลต่อความชันของสัญญาณ |
| R_{I2} | ทำหน้าที่ช่วยให้ C_I คายประจุเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตตอบสนองเร็วขึ้น ในวงจรตัวควบคุมอาจไม่จำเป็นต้องมีก็ได้ หากใช้โอปแอมป์ที่มีกระแสไบอัสต่ำ ($\leq 1pA$) |
| R_{D1} | เป็นชิ้นส่วนของตัวกรองผ่านต่ำ ของตัวควบคุมดี ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้าไปได้ |
| R_{A1} และ R_{A3} | เป็นชิ้นส่วนของตัวกรองผ่านต่ำของตัวควบคุมเอ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้าไปได้ |
| R_{D2} และ C_D | ส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณ |

R_{A2}, R_{A4}, C_{A1} และ C_{A2} ส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณและการพุ่งลงของสัญญาณ

ออปแอมป์ Inv ในรูปที่ 5.1 ทำหน้าที่ช่วยกลับเฟส มีค่าเกนของวงจรเท่ากับ 1 ($R_f = R$) การใช้งานวงจรทั้งหมดนี้ควรเลือกค่า R ในย่าน $1k\Omega - 50M\Omega$ และควรเลือกค่า C ในย่านที่มากกว่า $0.1 \mu F$ จึงจะมีผลดีต่อการทำงานของวงจร

การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุม สามารถพิจารณาจากความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

องค์ประกอบพี จากสมการที่ (5.1) หากค่า R_{p2} โดยที่กำหนดให้ $R_{p1} = 10k\Omega$ จะได้

$$R_{p2} = (10 \times 10^3) K_p \quad (5.5)$$

องค์ประกอบไอ จากสมการที่ (5.2) หากค่า R_{I1} โดยที่กำหนดค่าของ C_I จากการทดสอบพบว่าขนาดของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสม ควรจะต้องมีค่ามากกว่า $0.1 \mu F$ ในที่นี้จะกำหนดค่าของ $C_I = 1\mu F$ ดังนั้นหากค่า R_{I1} และ R_{I2} ได้จากสมการ

$$R_{I1} = \frac{1 \times 10^6}{K_I}; \quad R_{I2} > 10R_{I1} \quad (5.6)$$

องค์ประกอบดี จากสมการที่ (5.3) หากค่า R_{D2} โดยที่กำหนดค่าของ C_I จากการทดสอบพบว่าขนาดของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสม จะต้องมีความค่ามากกว่า $0.1 \mu F$ โดยที่กำหนดให้ $C_D = 1\mu F$ จะได้

$$R_{D2} = (1 \times 10^6) K_D \quad (5.7)$$

และหากค่า R_{D1} ได้จากสมการ

$$R_{D1} = \tau_1, \quad \tau_1 = d \quad (5.8)$$

องค์ประกอบเอ จากสมการที่ (5.4) ในการออกแบบกำหนดให้ $R_{A2} = R_{A4}$ และกำหนดให้ $C_{A1} = C_{A2}$ จากการทดสอบหากกำหนดค่าคาปาซิเตอร์ต่ำ (เช่น $0.1 \mu F$) จะส่งผลให้เกิดการพุ่งลงที่สัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นจึงกำหนด $C_{A1} = C_{A2} = 1\mu F$ จะได้

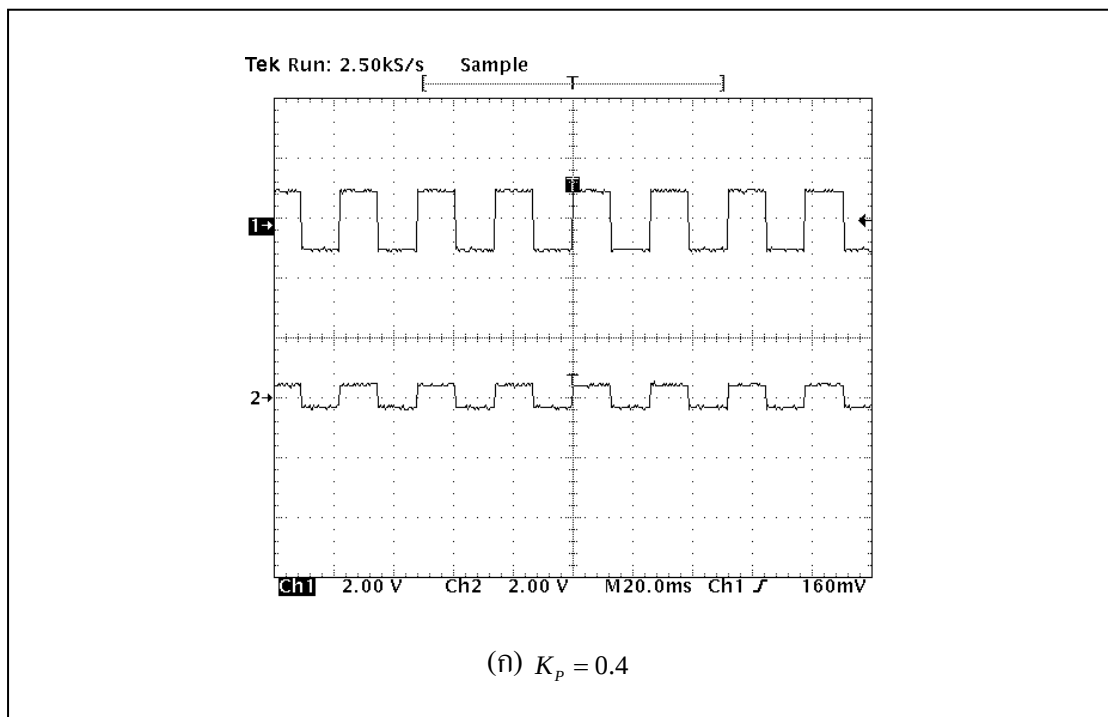
$$R_{A2} = (1 \times 10^6) \sqrt{K_A} \quad (5.9)$$

หาค่า R_{A1} ซึ่งได้จาก $R_{A1} = \tau_1$ โดยที่ $\tau_1 = d$ และทำการหาค่า R_{A3} ได้จาก $R_{A3} = \tau_2$ โดยที่ $\tau_2 = e$ เนื่องจาก R_{comp} ที่มีในวงจรตัวควบคุมดังรูปที่ 5.1 ใช้เพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าขาบวก ได้ $R_f = R = 1k\Omega$ และดังนั้น $R_{comp} \cong R // R_f$

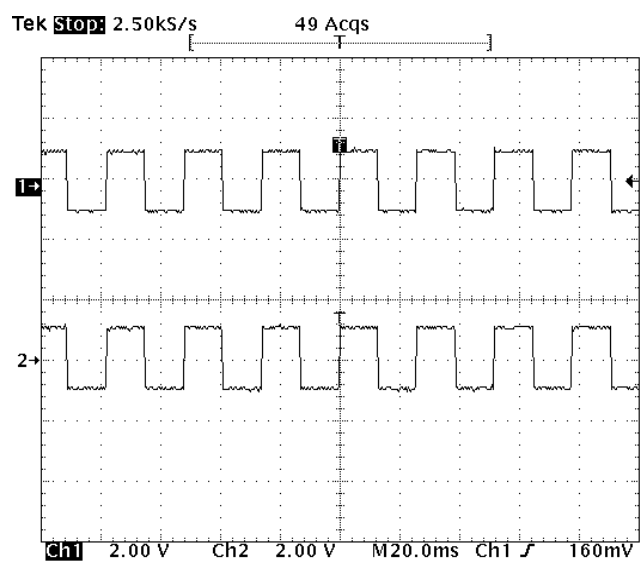
5.3 การทดสอบตัวควบคุม

ผลการทดสอบตัวควบคุมด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อก โดยทดสอบด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดและแบบลาดเอียงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ มีผลการทดสอบ แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 – 5.9

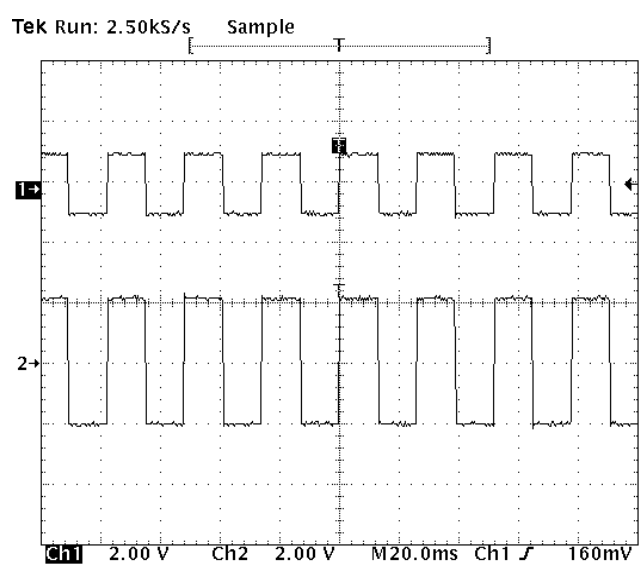
- ผลการทดสอบตัวควบคุมพี



รูปที่ 5.2 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได

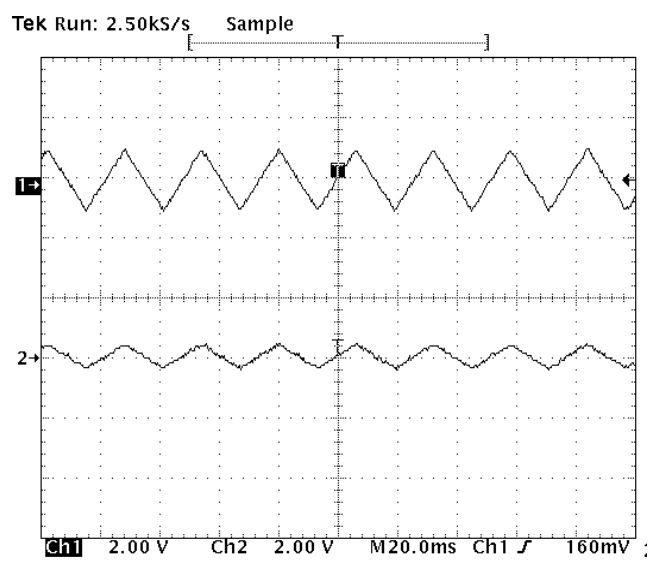


(ข) $K_p = 1$

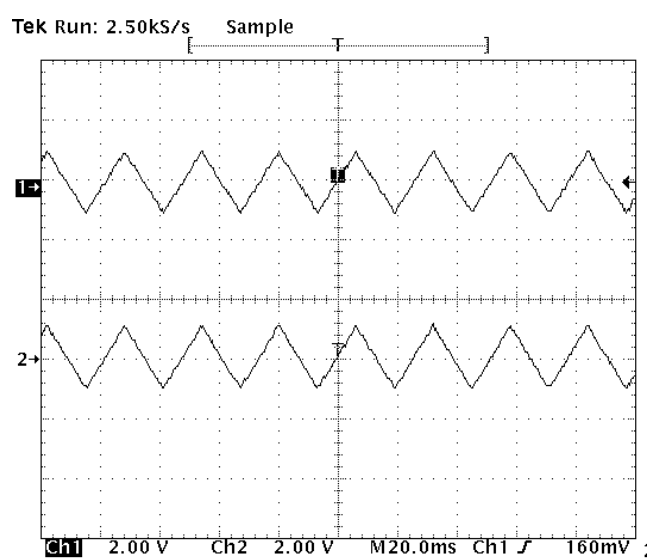


(ค) $K_p = 2$

รูปที่ 5.2 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได (ต่อ)

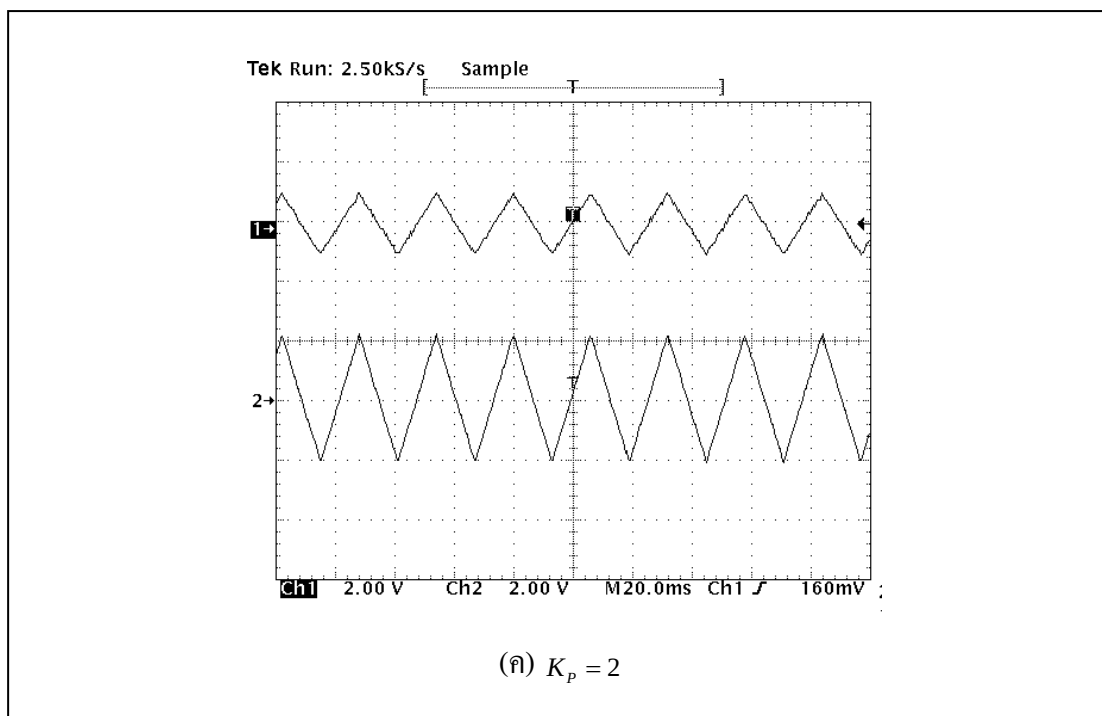


(ก) $K_p = 0.4$



(ข) $K_p = 1$

รูปที่ 5.3 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง

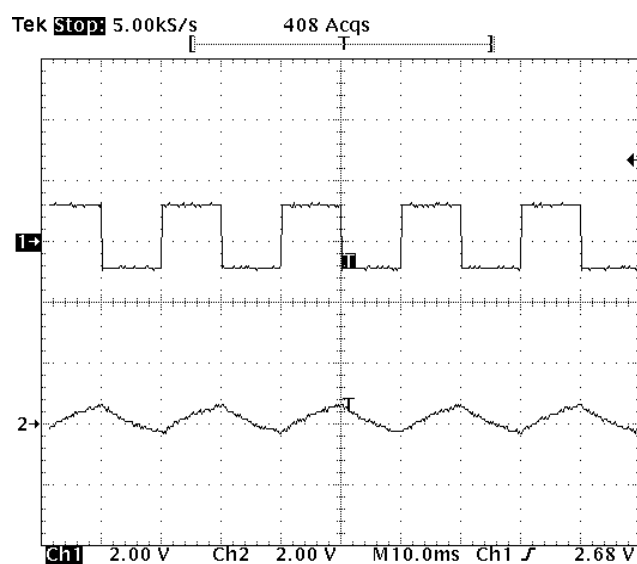


รูปที่ 5.3 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง (ต่อ)

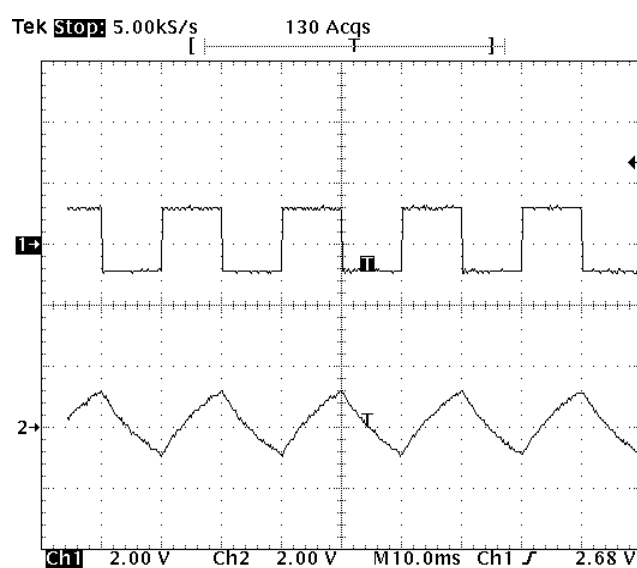
ตารางที่ 5.1 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมพี

ค่าพารามิเตอร์ K_p	ค่าความต้านทาน R_{p1}	ค่าความต้านทาน R_{p2}
0.4	10 k Ω	4 k Ω
1	10 k Ω	10 k Ω
2	10 k Ω	20 k Ω

- ผลการทดสอบตัวควบคุมไอ

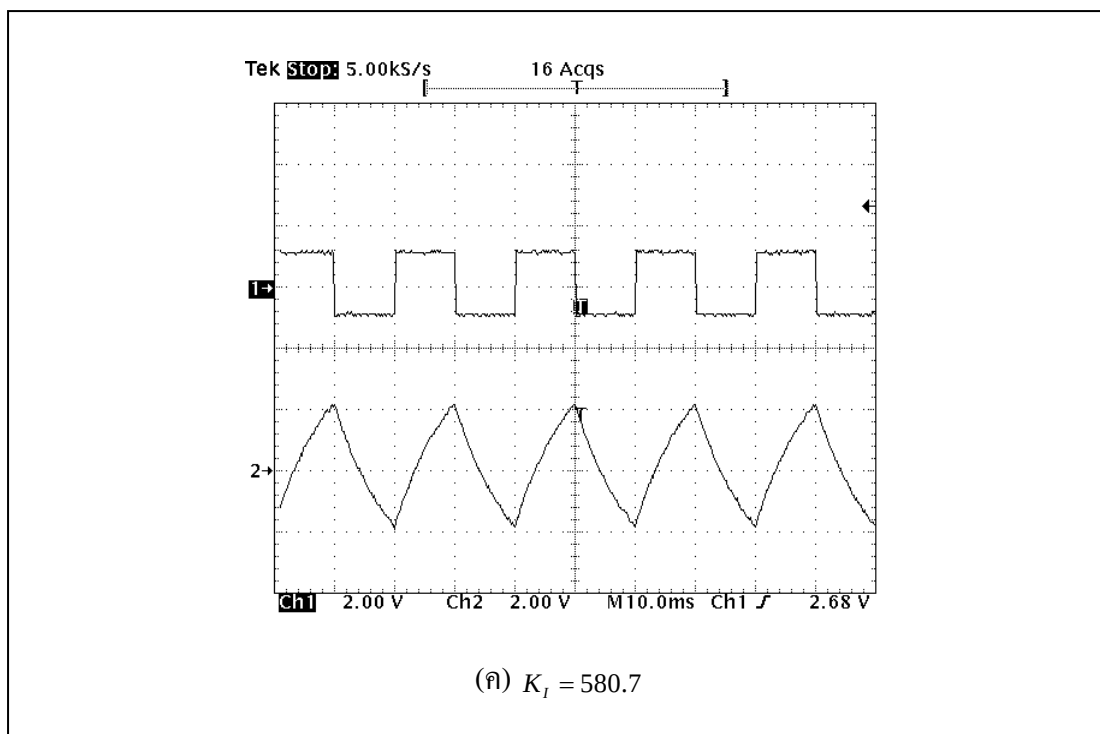


(ก) $K_f = 2.63 \times 10^3$

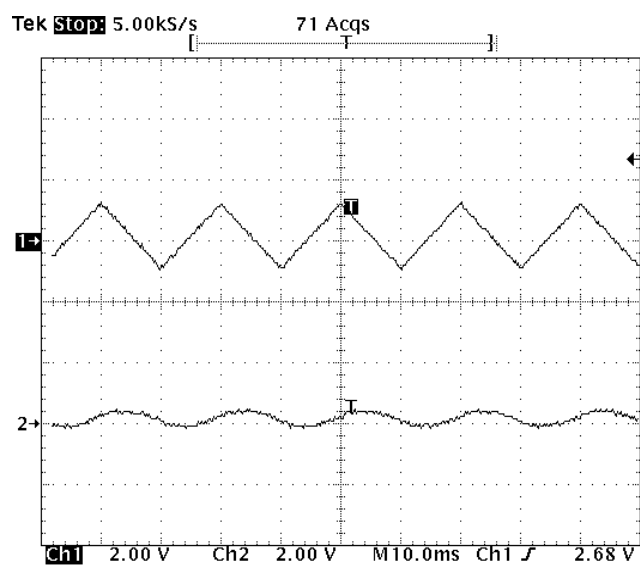


(ข) $K_f = 1.18 \times 10^3$

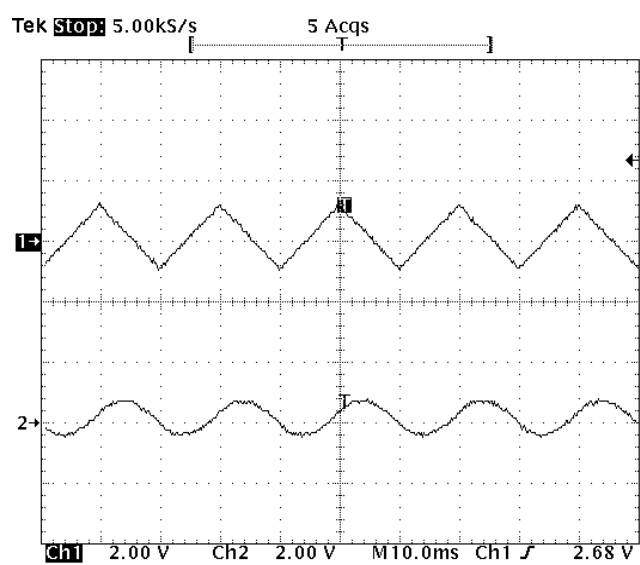
รูปที่ 5.4 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.4 อินพุตเป็นสัญญาณแบบซึ้นบันได (ต่อ)

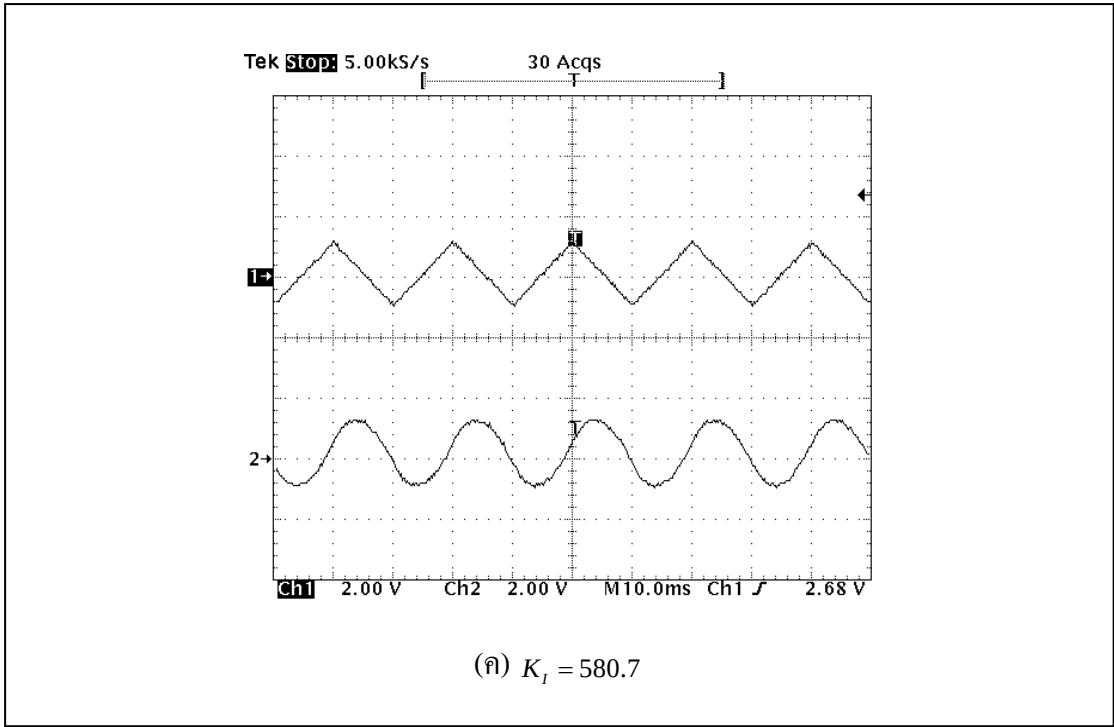


(ก) $K_I = 2.63 \times 10^3$



(ข) $K_I = 1.18 \times 10^3$

รูปที่ 5.5 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง

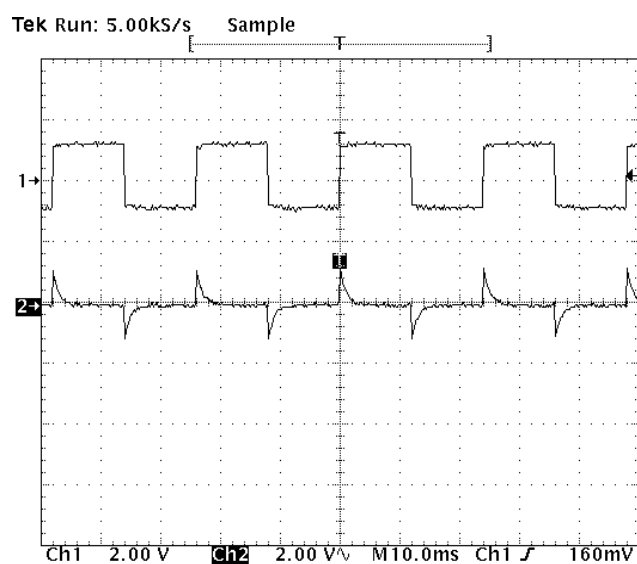


รูปที่ 5.5 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง (ต่อ)

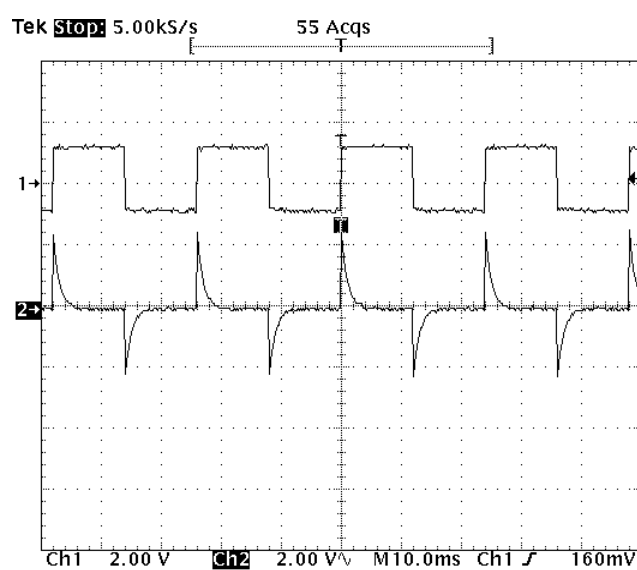
ตารางที่ 5.2 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมไอ

พารามิเตอร์ K_I	คาพาซิเตอร์ C_I	ความต้านทาน R_{I1}	ความต้านทาน R_{I2}
2.63×10^3	0.1 μF	3.80 k Ω	10 k Ω
1.18×10^3	0.1 μF	8.45 k Ω	10 k Ω
580.7	0.1 μF	17.22 k Ω	10 k Ω

- ผลการทดสอบตัวควบคุมดี

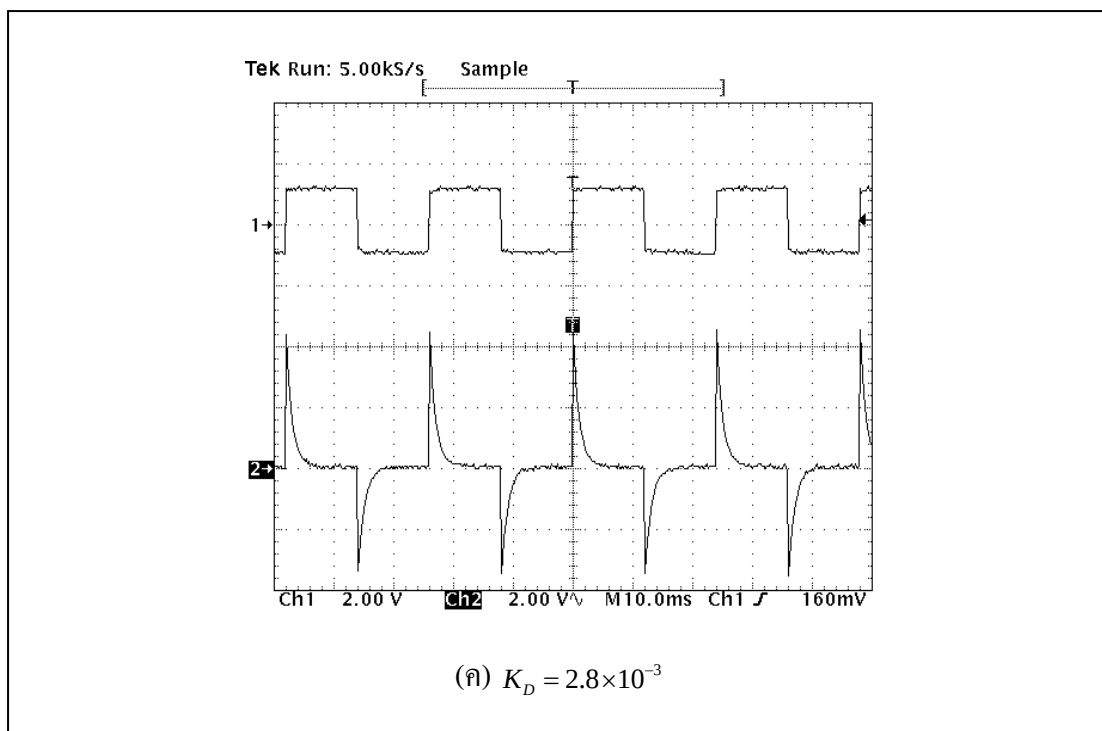


(ก) $K_D = 0.69 \times 10^{-3}$

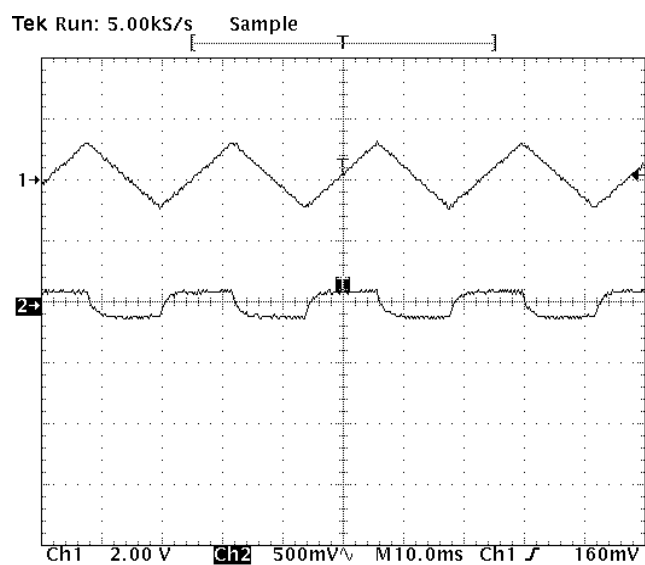


(ข) $K_D = 1.6 \times 10^{-3}$

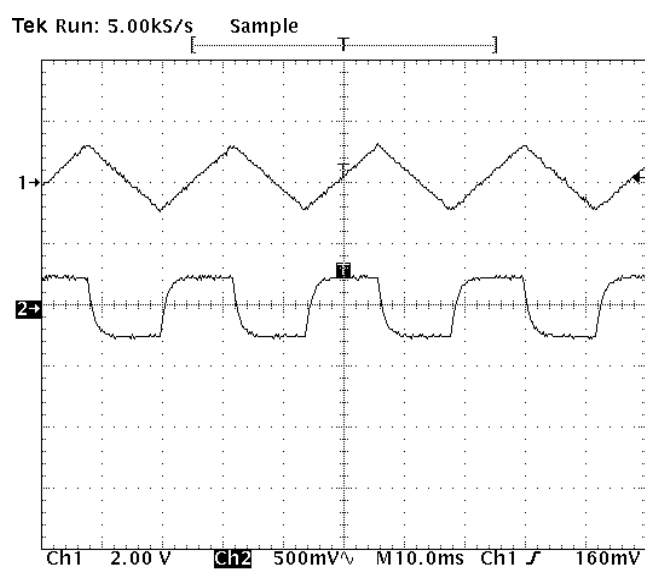
รูปที่ 5.6 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.6 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได (ต่อ)

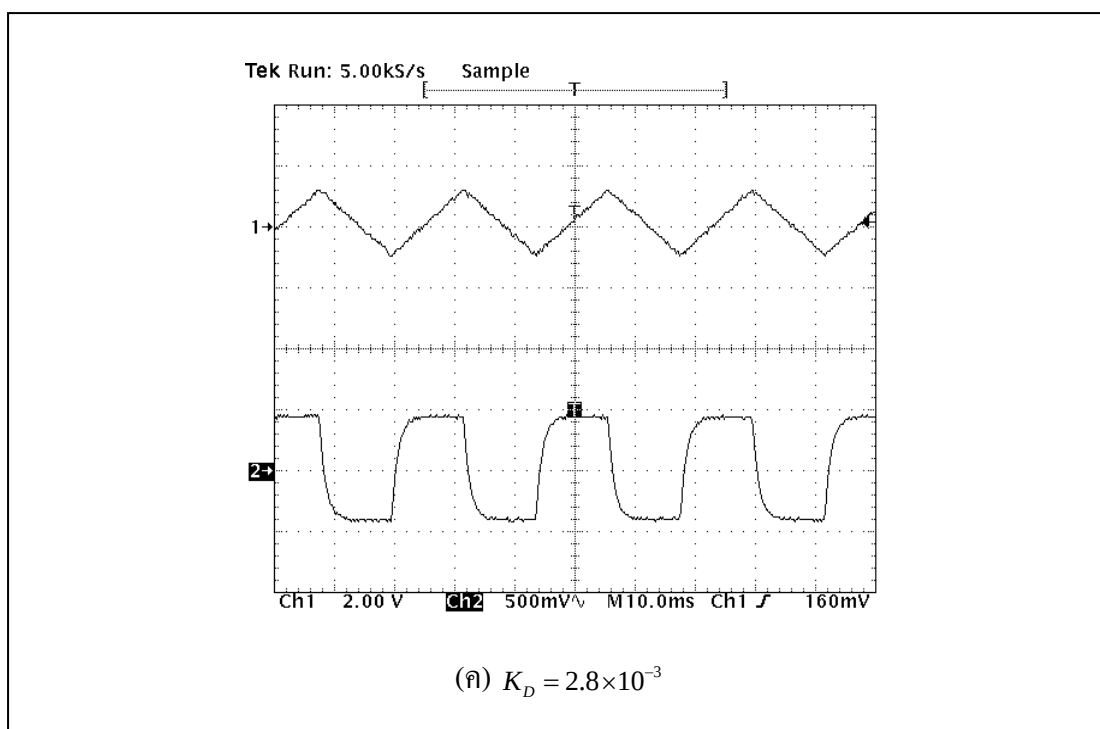


(ก) $K_D = 0.69 \times 10^{-3}$



(ข) $K_D = 1.6 \times 10^{-3}$

รูปที่ 5.7 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง

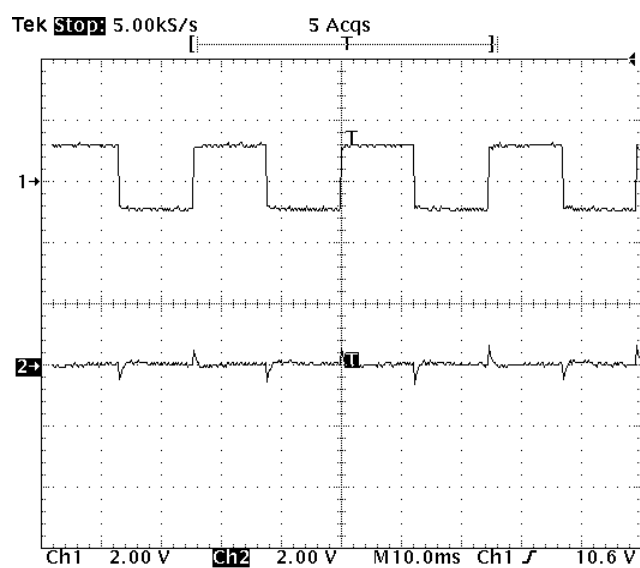


รูปที่ 5.7 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง (ต่อ)

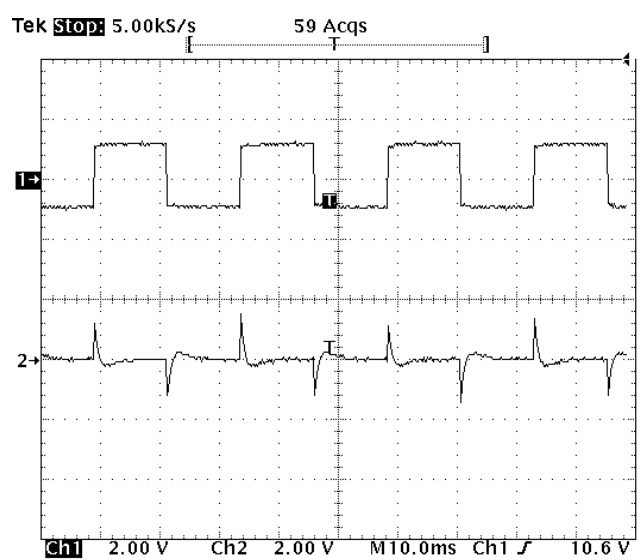
ตารางที่ 5.3 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมดี

พารามิเตอร์ K_D	คาพาซิเตอร์ C_D	ความต้านทาน R_{D1}	ความต้านทาน R_{D2}
0.69×10^{-3}	0.1 μF	10 k Ω	6.86 k Ω
1.57×10^{-3}	0.1 μF	10 k Ω	15.70 k Ω
2.77×10^{-3}	0.1 μF	10 k Ω	27.69 k Ω

- ผลการทดสอบตัวควบคุมเอ

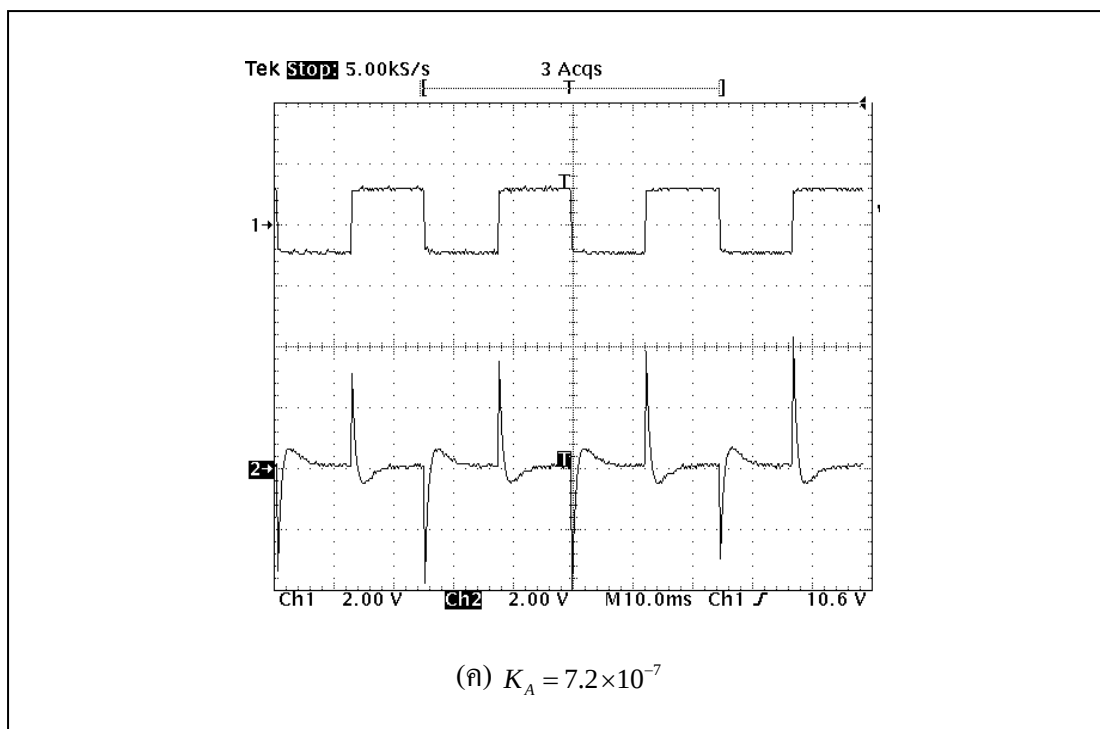


(ก) $K_A = 1.57 \times 10^{-6}$

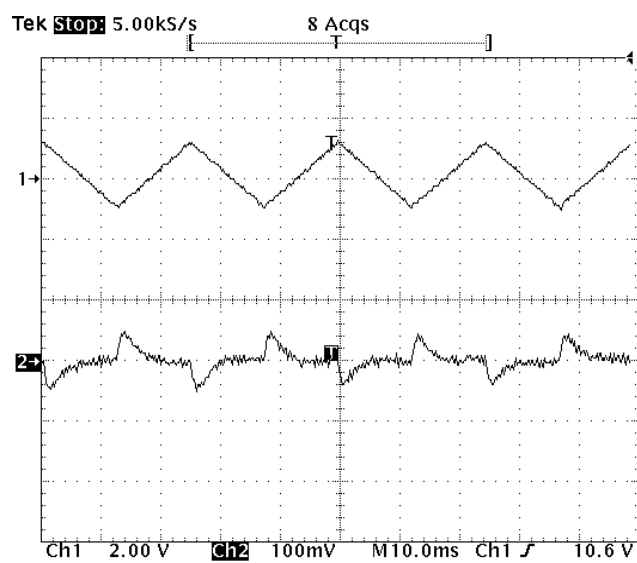


(ข) $K_A = 3.3 \times 10^{-6}$

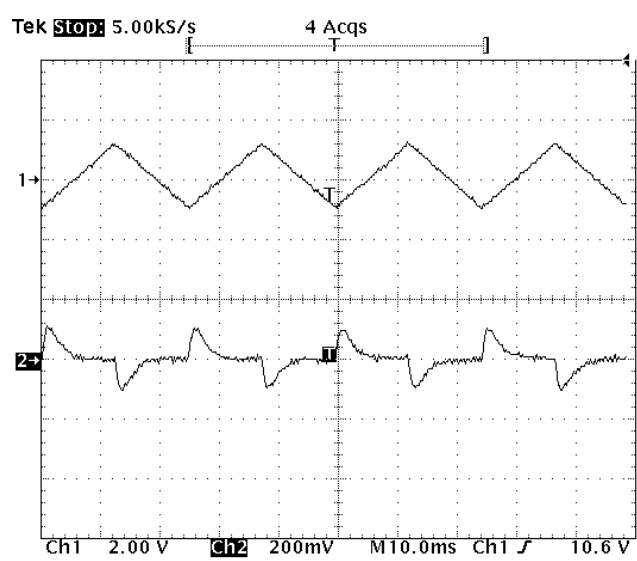
รูปที่ 5.8 อินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.8 อินพุตเป็นสัญญาณแบบจันบันได (ต่อ)

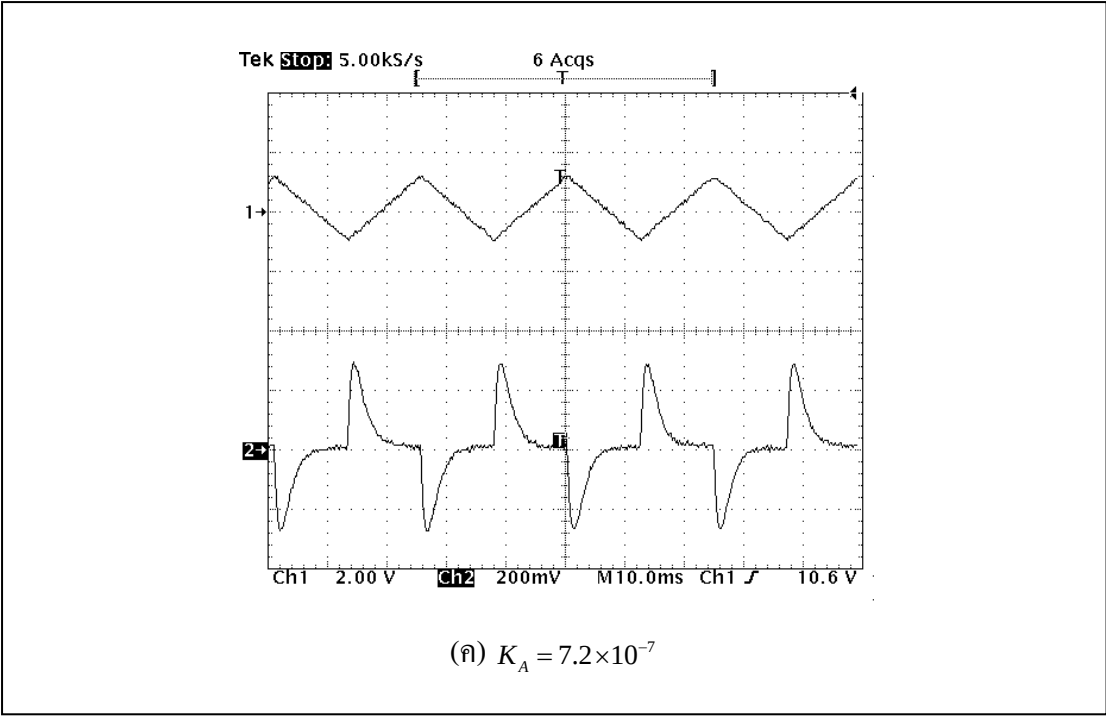


(ก) $K_A = 1.57 \times 10^{-6}$



(ข) $K_A = 3.3 \times 10^{-6}$

รูปที่ 5.9 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง

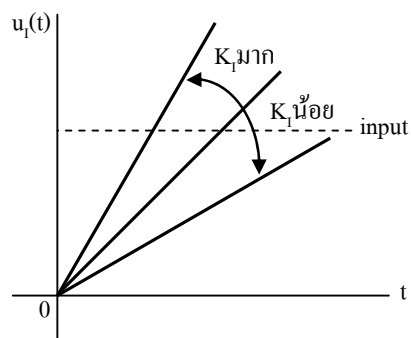


รูปที่ 5.9 อินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง (ต่อ)

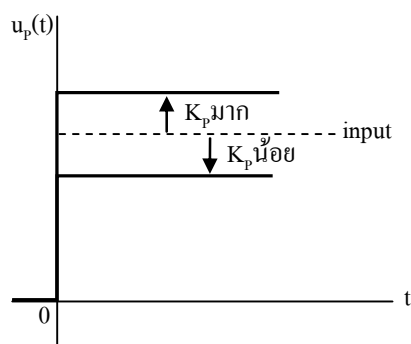
ตารางที่ 5.4 ค่าของพารามิเตอร์ของวงจรตัวควบคุมเอ

K_A	C_{A1}	C_{A2}	R_{A1}	R_{A2}	R_{A3}	R_{A4}
1.57×10^{-6}	0.1 μ F	0.1 μ F	10 k Ω	0.76 k Ω	10 k Ω	206.6 k Ω
3.3×10^{-6}	0.1 μ F	0.1 μ F	10 k Ω	0.16 k Ω	10 k Ω	206.6 k Ω
7.2×10^{-7}	0.1 μ F	0.1 μ F	10 k Ω	0.35 k Ω	10 k Ω	206.6 k Ω

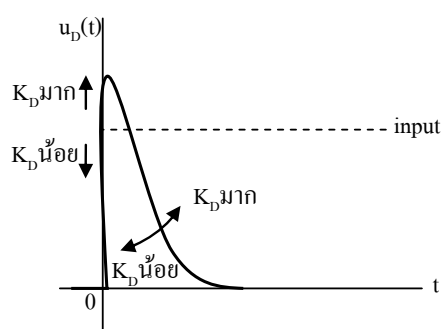
5.4 การทดสอบและอภิปรายผล



(ก) ตัวควบคุมพี

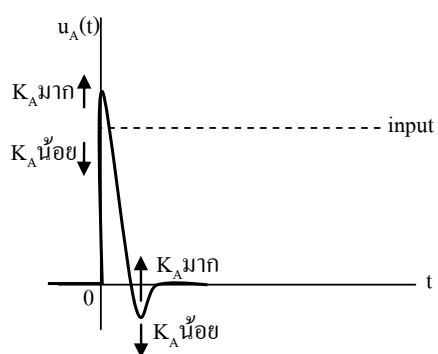


(ข) ตัวควบคุมไอ

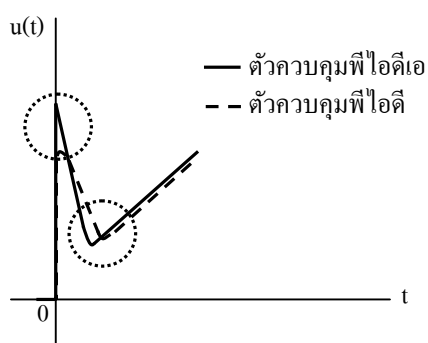


(ค) ตัวควบคุมดี

รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได

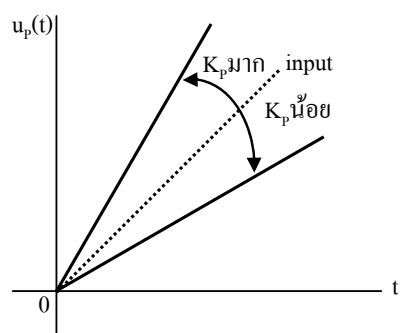


(ง) ตัวควบคุมเอ

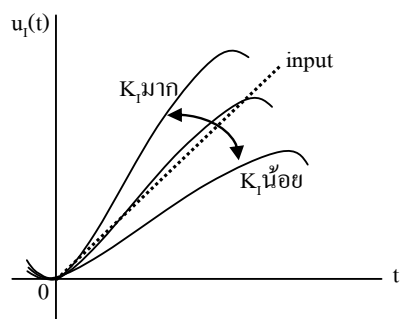


(จ) ตัวควบคุมพีไอดีเอ

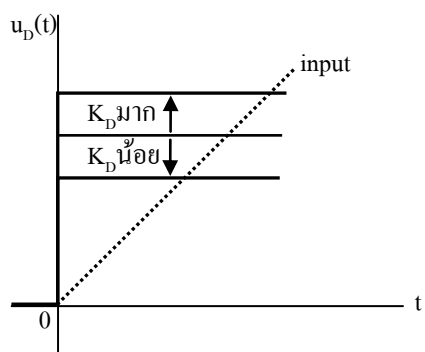
รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได (ต่อ)



(ก) ตัวควบคุมพี

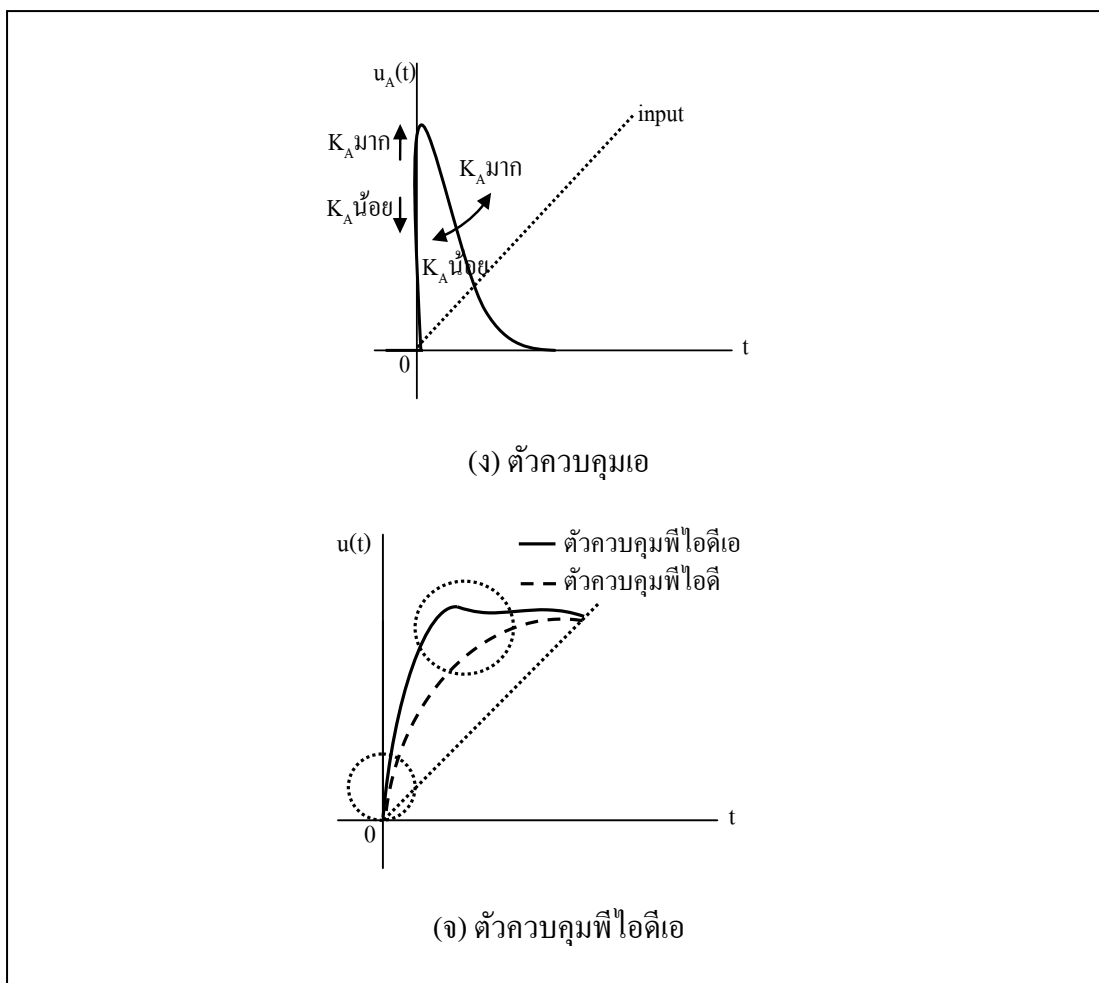


(ข) ตัวควบคุมไอ



(ค) ตัวควบคุมดี

รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองต่อสัญญาณลาดเอียง



รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองต่อสัญญาณลาดเอียง (ต่อ)

การทดสอบตัวควบคุมได้ใช้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดและแบบลาดเอียงเป็นสัญญาณทดสอบ ดังการนำเสนอผลทดสอบไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ตัวควบคุมพีจากวงจรแอนะล็อก เราสามารถปรับพจน์ของอินทิเมนต์พีได้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน ผลการทดสอบตัวควบคุมพี พบว่าเมื่อทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ $K_p = 1$ ส่งผลให้เอาต์พุตมีขนาดเท่ากับอินพุต เมื่อทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ $K_p < 1$ ส่งผลให้เอาต์พุตมีขนาดน้อยกว่าอินพุต และในทำนองเดียวกันเมื่อทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ $K_p > 1$ ส่งผลให้เอาต์พุตมีขนาดมากกว่าอินพุต พจน์ของอินทิเมนต์พีเป็นตัวปรับสัดส่วน ส่งผลต่อแอมพลิจูดของเอาต์พุต สามารถทำให้แอมพลิจูดของเอาต์พุตมากกว่า เท่ากับ หรือน้อยกว่าอินพุตได้ พิจารณาได้จากรูปที่ 5.10 (ก) และรูปที่ 5.11 (ก)

ตัวควบคุมไอจากวงจรแอนะล็อก เราสามารถปรับพจน์ของอินทิเมนต์ไอได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ผลของการทดสอบตัวควบคุมไอ พบว่าความต้านทานส่งผลต่อ

ความชันและแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อปรับค่าความต้านทานมากขึ้น ส่งผลให้ความชันและแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตลดลง ส่วนคาพาซิเตอร์ส่งผลต่อความชันของสัญญาณเอาต์พุตอย่างเดียว เมื่อปรับค่าคาพาซิเตอร์มากขึ้น ส่งผลให้ความชันของสัญญาณเอาต์พุตลดลง และในทางกลับกัน พจน์ของอิลิเมนต์ไอซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและคาพาซิเตอร์ ที่ค่าความความต้านทานและคาพาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ K_f มีค่าน้อยลง เมื่อ K_f มีค่าน้อยลง ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตมีความชันและแอมพลิจูดน้อยลง พิจารณาได้จากรูปที่ 5.10 (ข) และรูปที่ 5.11 (ข)

ตัวควบคุมดีจากวงจรแอนะล็อก เราสามารถปรับพจน์ของอิลิเมนต์ดีได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานและคาพาซิเตอร์ ผลของการทดสอบตัวควบคุมดี พบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นขั้นบันได สัญญาณของเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งค่าความต้านทานส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์ เมื่อปรับค่าความต้านทานมากขึ้น ทำให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์มีขนาดสูงขึ้น ส่วนค่าคาพาซิเตอร์ ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณเอาต์พุต ที่คาพาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้ความกว้างของสัญญาณพัลส์มากขึ้น นั่นคืออัตราการสลายตัวในพจน์เอกซ์โปเนนเชียลลดลง และในทางกลับกัน พจน์ของอิลิเมนต์ดีซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและคาพาซิเตอร์ ที่ค่าความต้านทานและคาพาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ K_D มีค่ามากขึ้น เมื่อ K_D มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดสูงสุดและความกว้างของสัญญาณพัลส์มีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากค่าความต้านทานและคาพาซิเตอร์มีค่าน้อยลง จะส่งผลให้ K_D มีค่าน้อยลง ทำให้ขนาดสูงสุดและความกว้างของสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยลง นั่นคืออัตราการสลายตัวในพจน์เอกซ์โปเนนเชียลเพิ่มขึ้น พิจารณาได้จากรูปที่ 5.10 (ค) และเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบลาดเอียง สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได เมื่อ K_D มีค่ามากขึ้น เอาต์พุตจะมีขนาดมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อ K_D มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เอาต์พุตมีค่าน้อยลงด้วย พิจารณาได้จากรูปที่ 5.11 (ค)

ตัวควบคุมเอจากวงจรแอนะล็อก สามารถปรับพจน์ของอิลิเมนต์เอได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานและคาพาซิเตอร์ ผลของการทดสอบตัวควบคุมเอ พบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นขั้นบันได สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์คล้ายกับสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมดี แต่สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเอมีความกว้างของสัญญาณพัลส์แคบกว่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมดี นอกจากนี้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเอมีการพุ่งลงอีกด้วย ซึ่งค่าความต้านทานส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์และการพุ่งลงนี้ เมื่อปรับค่าความต้านทานมากขึ้น ทำให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์และการพุ่งลงของสัญญาณมีแอมพลิจูดสูงขึ้น ส่วนค่าคาพาซิเตอร์ส่งผลต่อการเกิดการพุ่งลงของสัญญาณ ถ้าคาพาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตมีการพุ่งลงลดลง เมื่อถึงค่าที่เหมาะสมสามารถกำจัดการพุ่งลงของสัญญาณได้ พจน์ของอิลิเมนต์เอซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและคาพาซิเตอร์ ที่ค่าความความต้านทานและคาพาซิเตอร์มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ K_A มีค่ามากขึ้น เมื่อ K_A มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์มีค่ามากขึ้น

และการพุ่งลงมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามหากค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ K_A มีค่าน้อยลง เมื่อ K_A มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยลงและการพุ่งลงมีค่ามากขึ้น พิจารณาได้จากรูปที่ 5.10 (ง) และเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบลาดเอียง สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์เช่นเดียวกับสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมดีโดยมีอินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได ซึ่งค่าความต้านทานส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์ เมื่อปรับค่าความต้านทานมากขึ้น ทำให้ขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์มีขนาดสูงขึ้น ส่วนคาปาซิเตอร์ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณเอาต์พุต ที่คาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้ความกว้างของสัญญาณพัลส์มากขึ้น นั่นคืออัตราการสลายตัวในพจน์เอกซ์โปเนนเชียลลดลง พจน์ของอิลิเมนต์ดีซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและคาปาซิเตอร์ ที่ค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ K_A มีค่ามากขึ้น เมื่อ K_A มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดสูงสุดและความกว้างของสัญญาณพัลส์มีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากค่าความความต้านทานและคาปาซิเตอร์มีค่าน้อยลง จะส่งผลให้ K_A มีค่าน้อยลง ทำให้ขนาดสูงสุดและความกว้างของสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยลง นั่นคืออัตราการสลายตัวของพจน์เอกซ์โปเนนเชียลมากขึ้น พิจารณาได้จากรูปที่ 5.11 (ง)

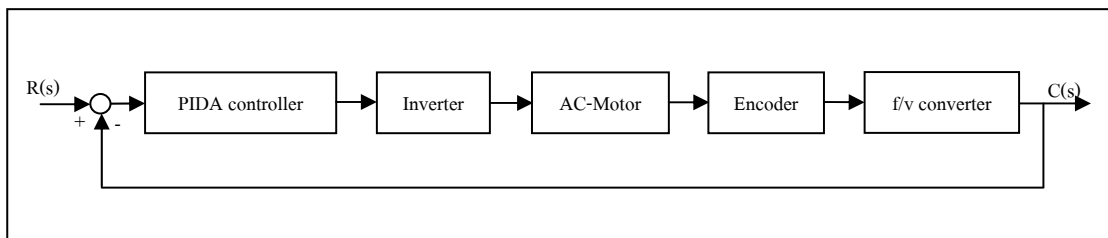
สัญญาณควบคุมที่กำเนิดจากตัวควบคุมพีไอดีเอ สนองตอบต่ออินพุตขั้นบันได แสดงไว้ในรูปที่ 5.10 (จ) เปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดี ที่มีความคล้ายคลึงกันมากและกราฟสัญญาณควบคุมสนองตอบต่ออินพุตแบบลาดเอียง แสดงไว้ในรูปที่ 5.11 (จ) เมื่อปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเออย่างเหมาะสม จะเห็นได้ถึงความแตกต่างในส่วนแอมพลิจูดของสัญญาณ อาจกล่าวได้ว่า ตัวควบคุมพีไอดีเอให้ผลกระทบที่รุนแรงและรวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของตัวควบคุมชนิดนี้

บทที่ 6

การควบคุมอัตราเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

6.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการประยุกต์ตัวควบคุมพีไอดีเอและการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด กับการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกสั้น ๆ ว่ามอเตอร์สามเฟส ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอใช้จินเนติกอัลกอริทึมตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ตลอดจนการสร้างตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อกตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ซึ่งการควบคุมอัตราเร็วรอบมอเตอร์ มีโครงสร้างระบบควบคุมวงปิดดังแผนภาพรูปที่ 6.1 ที่แสดงส่วนประกอบของระบบมี ตัวควบคุมพีไอดีเอ อินเวอร์เตอร์ (PWM ของ TOSHIBA รุ่น VFS11-2002PM) เอซีมอเตอร์สามเฟส (Panasonic รุ่น MAS04-90Y พิกัด 90W 4P) วงจรถอดรหัส (ทำหน้าที่ถอดรหัสแถบสีวงล้อที่ติดกับเพลลาของมอเตอร์ให้เป็นสัญญาณความถี่) และวงจรแปลงสัญญาณจากความถี่เป็นแรงดัน (ทำหน้าที่แปลงสัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรถอดรหัสเป็นแรงดันในการทดสอบพิจารณาอัตราเร็วรอบ 600 rpm สมัยกับแรงดันไฟฟ้า 5V) เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การหาแบบจำลองของมอเตอร์ด้วยการระบุเอกลักษณ์ (system identification) ซึ่งทดสอบมอเตอร์ตามโครงสร้างของระบบวงเปิดดังแผนภาพรูปที่ 6.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอและการจำลองสถานการณ์ ผลการทดสอบมอเตอร์และการอภิปราย และสรุป ทั้งนี้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตได้รับการทบทวนไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 6.1 โครงสร้างระบบควบคุมวงปิดสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

6.2 การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์สามเฟส

6.2.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์สามเฟส

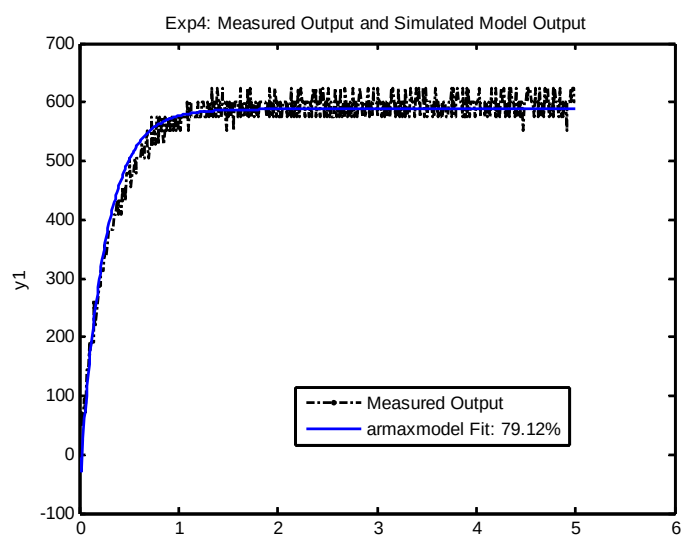
ในการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ อันดับแรกจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์สามารถหาได้จากการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาแบบจำลองของมอเตอร์ จากนั้นจึงนำแบบจำลองของมอเตอร์ที่ได้เข้าสู่กระบวนการออกแบบตัวควบคุมเพื่อหาตัวควบคุมที่เหมาะสมกับการนำไปควบคุมอัตราเร็วรอบต่อไป รูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการพิจารณามีอันดับสอง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (6.1) (Liaw and Lin, 1994)

$$\frac{\omega_r(s)}{\omega_r^*(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6.1)$$

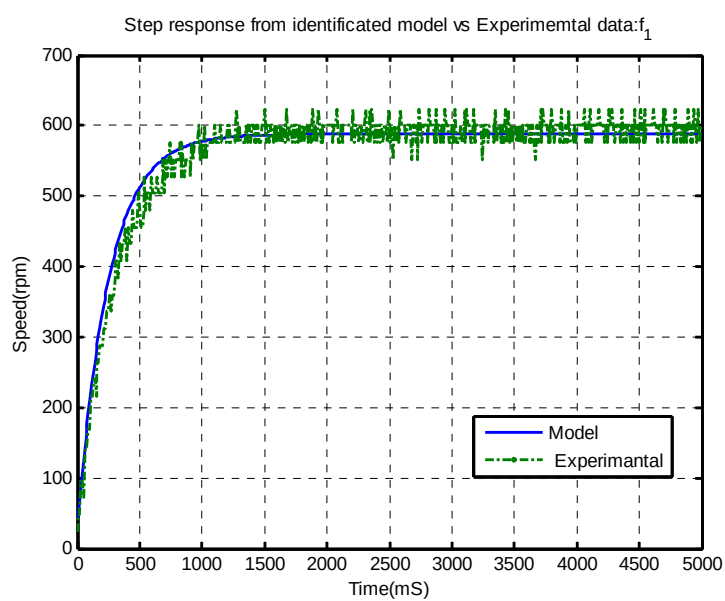
ทำการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาแบบจำลองของมอเตอร์ ด้วยแบบจำลอง ARMAX ทดสอบมอเตอร์แบบวงเปิดในสถานะไม่มีโหลดตามโครงสร้างดังรูปที่ 6.2 โดยใช้ชุดข้อมูลผลการทดสอบ 9 ชุด แบ่งชุดข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกใช้เพื่อกระบวนการหาแบบจำลอง กลุ่มที่สองใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการระบุเอกลักษณ์ และทำการหาแบบจำลองของมอเตอร์ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ 2 ดังสมการที่ (6.1) ผลการระบุเอกลักษณ์ผลดังรูปที่ 6.2 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการ (6.2)

$$G_p(s) = \frac{3690}{s^2 + 923.4s + 3695} \quad (6.2)$$

จากผลการระบุเอกลักษณ์โดยใช้แบบจำลองที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ 2 โปรแกรมรายงานผลความแม่นยำประมาณ 79% ซึ่งความแม่นยำที่ได้ให้ผลยังไม่เป็นที่น่าพอใจ อีกทั้งผลการตรวจสอบความถูกต้องระหว่างผลจากการทดสอบและผลจากการระบุเอกลักษณ์ยังให้ผลที่ไม่ค่อยดีนัก ดังนั้นจึงทำการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาแบบจำลองของมอเตอร์อีกครั้ง โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ 3 โปรแกรมรายงานผลความแม่นยำประมาณ 84% ผลการทดสอบความถูกต้องระหว่างผลจากการทดสอบและผลจากการระบุเอกลักษณ์ให้ผลที่น่าพอใจ ซึ่งถือได้ว่าโดยรวมผลการระบุเอกลักษณ์โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ 3 ก่อนข้างเป็นที่น่าพอใจอย่างมาก จึงตัดสินใจใช้การระบุเอกลักษณ์โดยใช้แบบจำลองด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ 3 โดยรายละเอียดการระบุเอกลักษณ์แสดงดังหัวข้อ 6.2.2



(ก) ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์



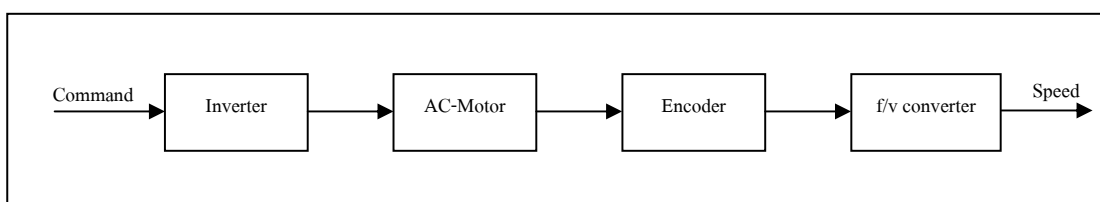
(ข) ผลการตรวจสอบความถูกต้อง

รูปที่ 6.2 การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์สามเฟส

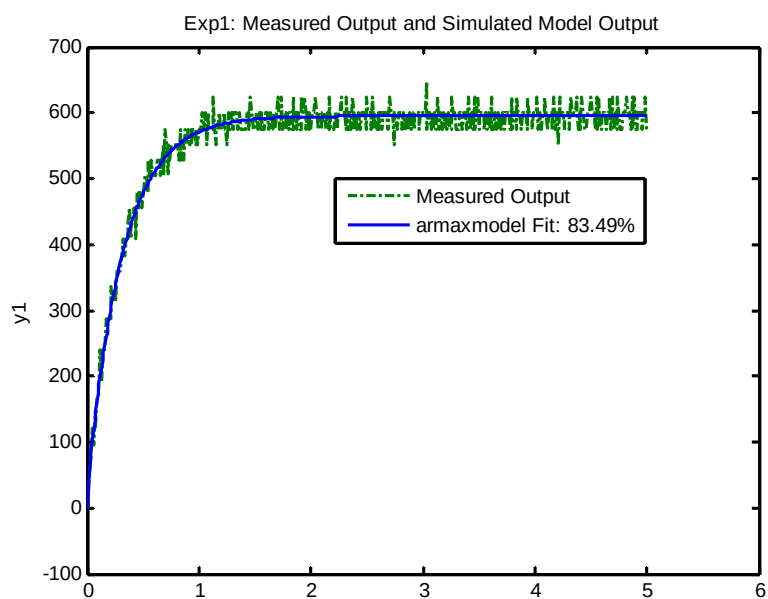
6.2.2 การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์สามเฟส

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบควบคุมอัตราเร็วรอบของเอซิมอเตอร์สามเฟสของ Panasonic รุ่น MAS04-90Y พิกัด 90W 4P และใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ของ TOSHIBA รุ่น VFS11-2002PM เนื่องจากอินเวอร์เตอร์รุ่นนี้สามารถทำงานได้ทั้งการออกตัวอย่างนุ่มนวลและจับปล้นซึ่งสามารถปรับตั้งความต้องการได้ด้วยโปรแกรมและการเชื่อมต่อสาย เหมาะแก่การทดสอบมอเตอร์ตามวิธีการตอบสนองชั่วคราว ได้ทดสอบมอเตอร์แบบวงเปิดในสภาวะไม่มีโหลดตามโครงสร้างดังรูปที่ 6.3 เพื่อระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของมอเตอร์ ทั้งนี้ทดสอบที่ความถี่ 20 Hz อัตราเร็วรอบ 600 rpm ทำการทดสอบ 9 ครั้ง ได้ชุดข้อมูลผลการทดสอบ 9 ชุด นำข้อมูลการทดสอบไปหาแบบจำลองของมอเตอร์ด้วยการระบุเอกลักษณ์ แบบจำลอง ARMAX ทั้งนี้ได้แบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกใช้เพื่อกระบวนการหาแบบจำลอง มีชุดข้อมูลที่ 2 3 4 6 7 และ 8 กลุ่มที่สองใช้เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของผลระบุเอกลักษณ์ (validation) มีชุดข้อมูลที่ 1 5 และ 9 การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองได้ใช้ MATLAB และ System Identification Toolbox ผลการดำเนินงานได้รวบรวมแสดงไว้ในรูปที่ 6.4 ซึ่งโปรแกรมรายงานผลความแม่นยำประมาณ 84% โดยมีแบบจำลองชนิดฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงดังสมการ (6.3) ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้รับการรวบรวมแสดงไว้ในรูปที่ 6.5

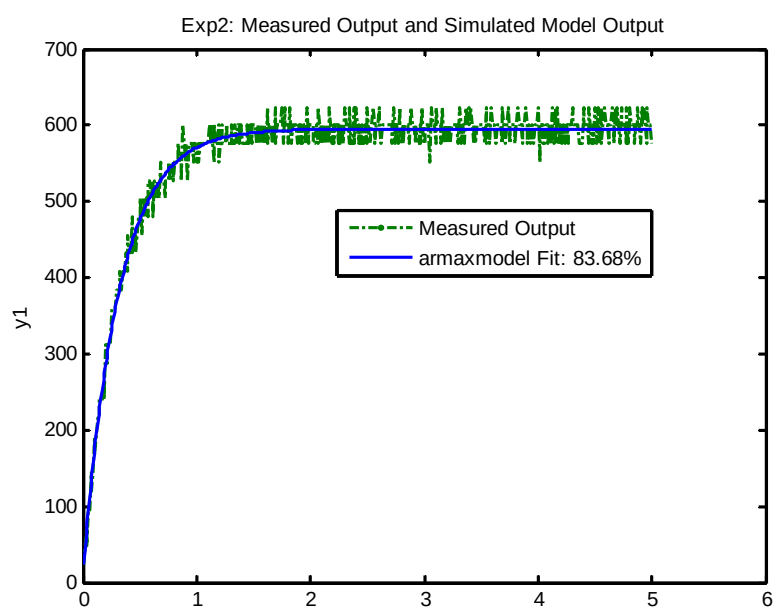
$$G_p(s) = \frac{3599s + 240000}{s^3 + 548.3s^2 + 77870s + 241900} \quad (6.3)$$



รูปที่ 6.3 โครงสร้างระบบวงเปิดในการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองของมอเตอร์

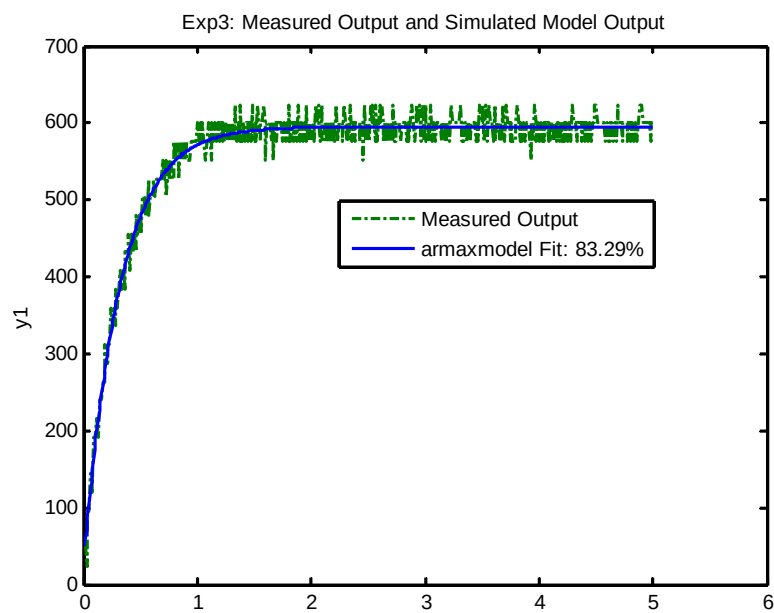


(ก) ชุดข้อมูลที่ 2

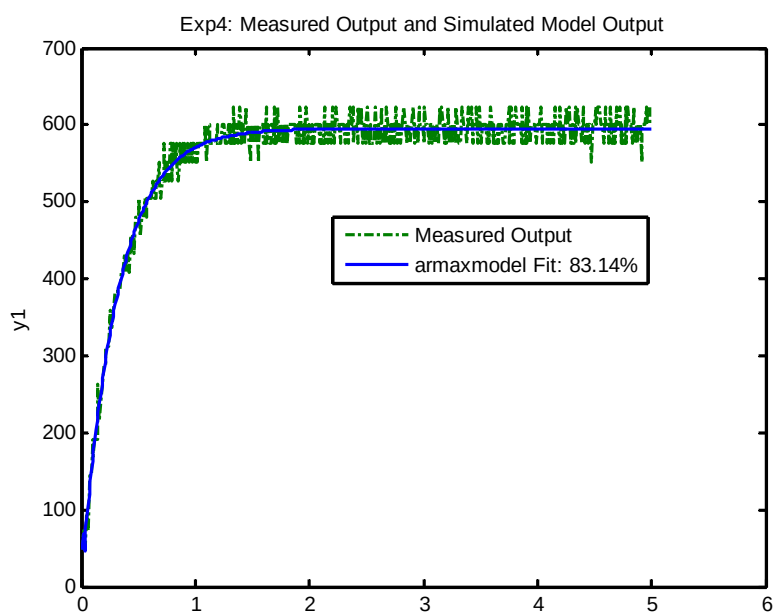


(ข) ชุดข้อมูลที่ 3

รูปที่ 6.4 ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์

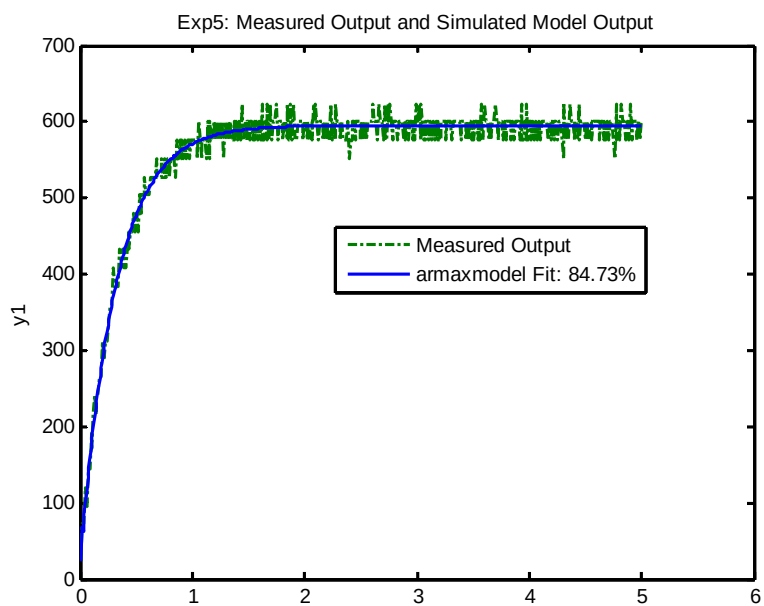


(ค) ชุดข้อมูลี่ 4

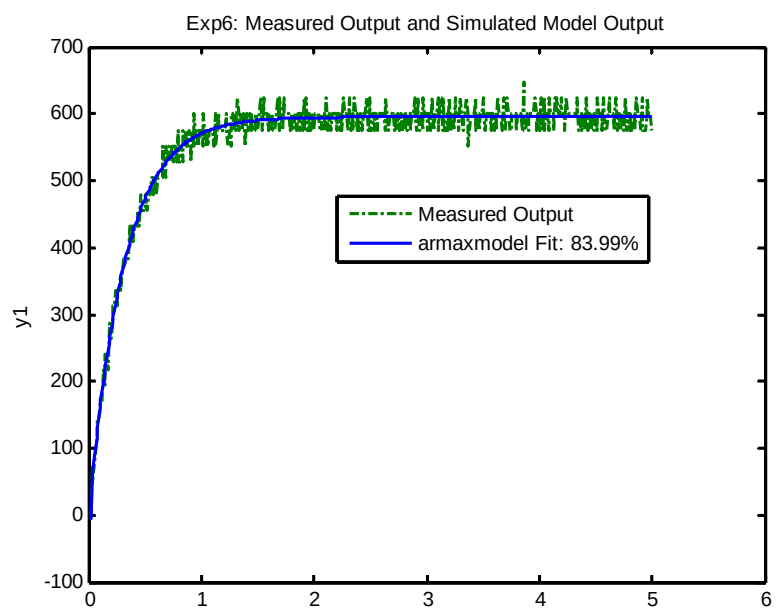


(ง) ชุดข้อมูลี่ 6

รูปที่ 6.4 ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ (ต่อ)

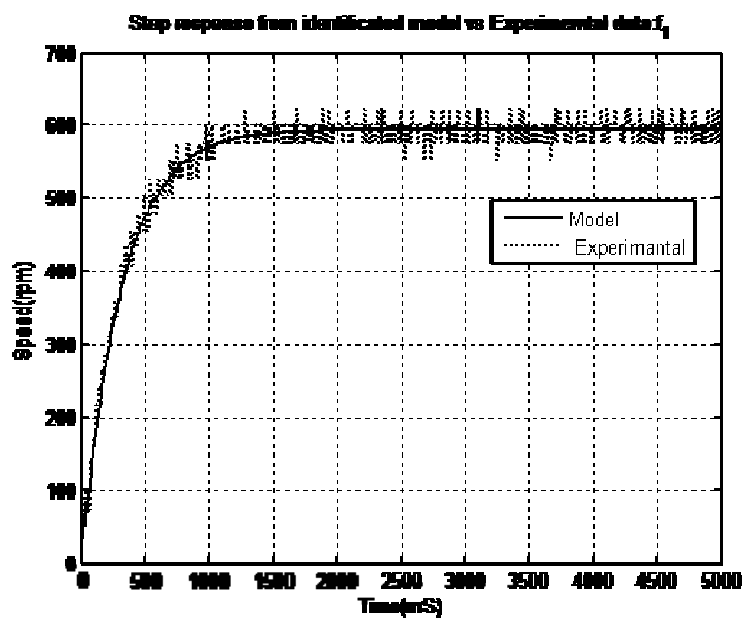


(จ) ชุดข้อมูลที่ 7

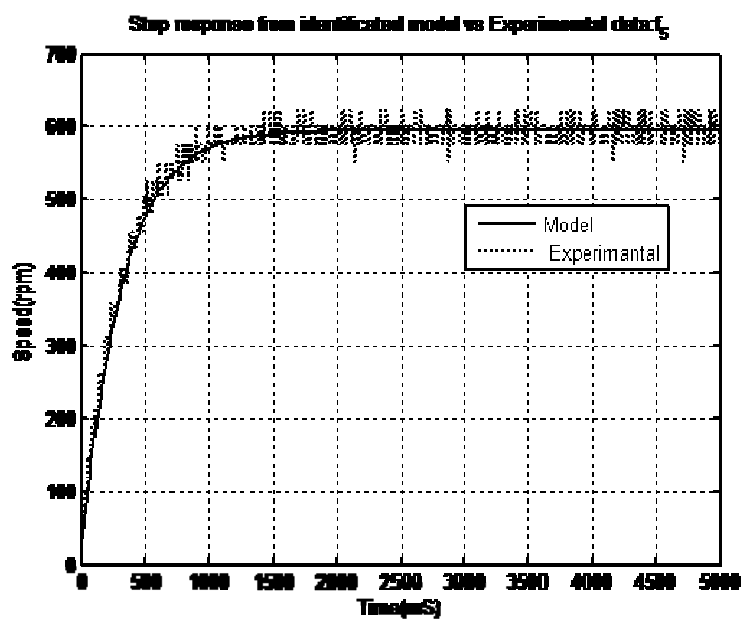


(ฉ) ชุดข้อมูลที่ 8

รูปที่ 6.4 ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ (ต่อ)

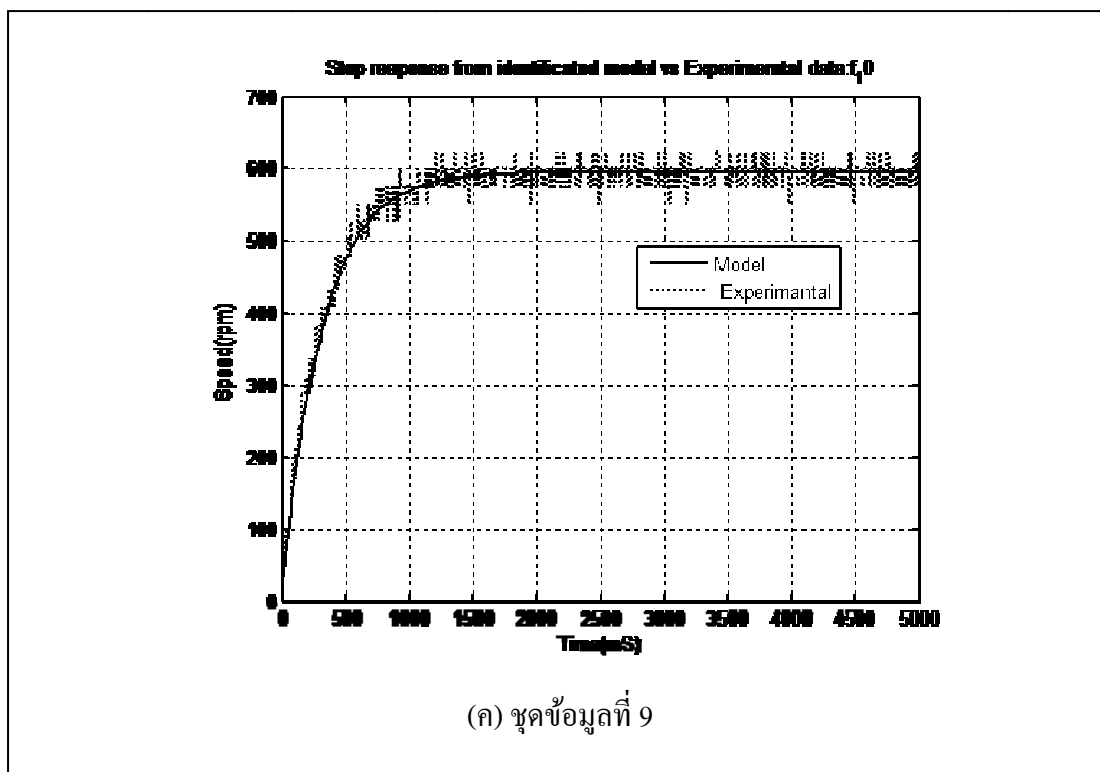


(ก) ชุดข้อมูลที่ 1



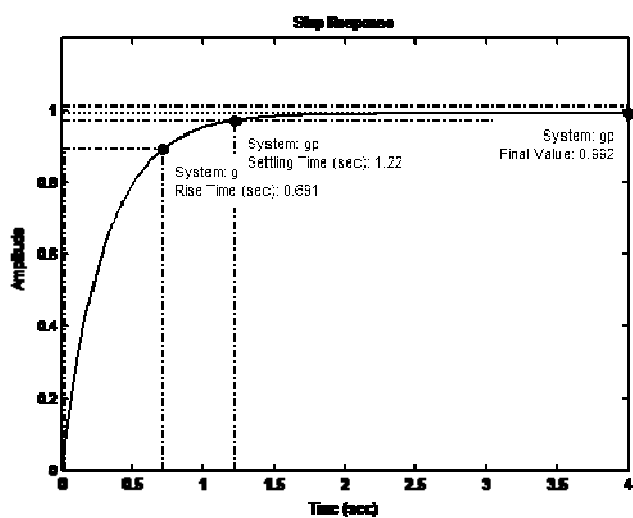
(ข) ชุดข้อมูลที่ 5

รูปที่ 6.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้อง

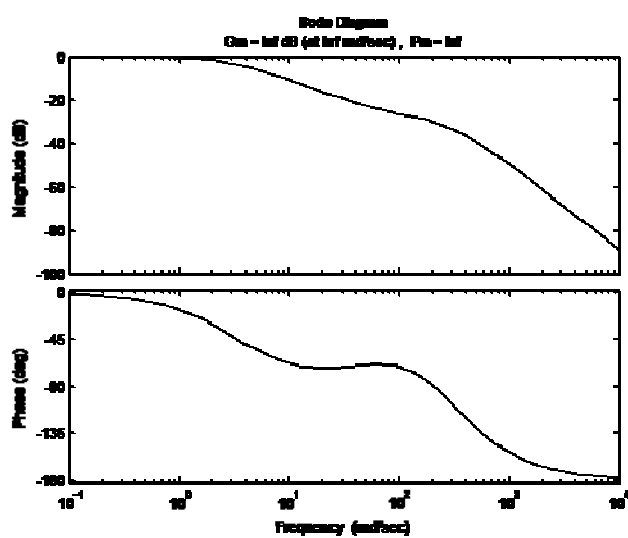


รูปที่ 6.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้อง (ต่อ)

จากผลการระบุเอกลักษณ์เห็นได้ว่า ผลจากการทดสอบมอเตอร์และผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งถือว่ายอมรับได้ และพิจารณารูปที่ 6.6 แสดงผลตอบสนองในโดเมนเวลาและความถี่ตามแบบจำลองดังกล่าว เห็นได้ว่ามอเตอร์มีช่วงเวลาขึ้น 0.691 วินาที เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 1.22 วินาที และมี G_m และ P_m เป็นอนันต์ ผลการตอบสนองโดยรวมถือว่ามีความคุณภาพค่อนข้างดี



(ก) ผลตอบสนองทางโดเมนเวลา



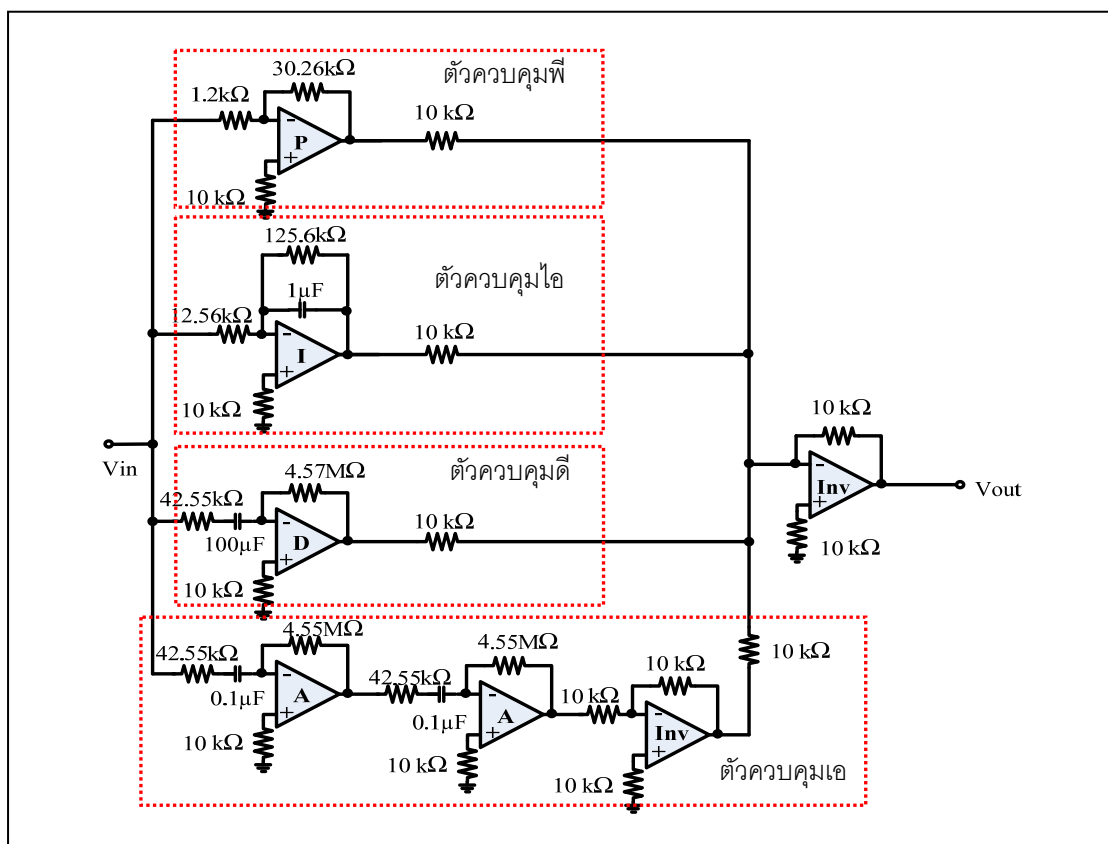
(ข) ผลตอบสนองทางโดเมนความถี่

รูปที่ 6.6 การจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองของระบบวงเปิด

6.3 การออกแบบและจำลองสถานการณ์

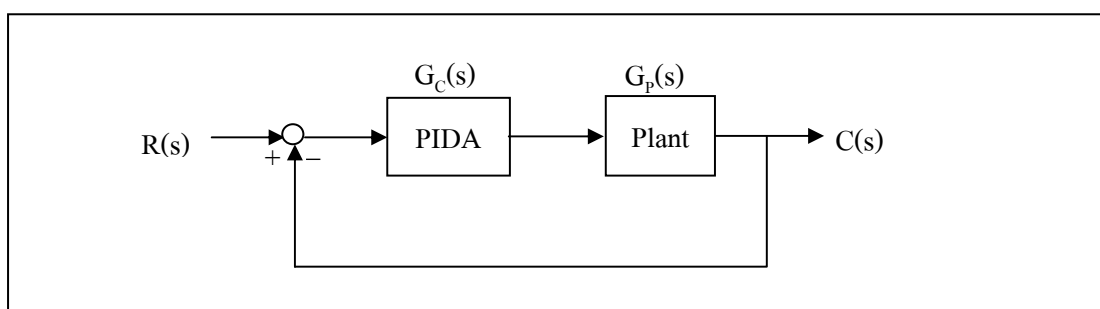
จากฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ เห็นได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์เป็นระบบอันดับสาม เป็นระบบที่ไม่มี ความยุ่งยากและซับซ้อน ในการออกแบบตัวควบคุม จึงไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมใช้เพียงวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยจินเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดค่าเริ่มต้นการค้นหายุ่งในย่าน $[0, 1000]$ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ปรับตามค่าจัดตั้ง ของ toolbox ได้ผลการออกแบบเป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังนี้ $K_P=25.22$ $K_I=79.62$ $K_D=456.89$ $K_A=-2070.9$ $d=42549$ และ $e=42549$ ตัวควบคุมพีไอดีเอจึงมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (6.4) และสามารถสร้างขึ้นเป็นตัวควบคุมแอนะล็อกได้ดังแผนภาพวงจรในรูปที่ 6.7 (รายละเอียดการคำนวณเพื่อสร้างตัวควบคุมแอนะล็อกได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5)

$$G_C(s) = \frac{2553s^3 + 2.16 \times 10^7 s^2 + 4.57 \times 10^{10} s + 1.44 \times 10^{11}}{s^3 + 85098s^2 + 1.81 \times 10^9 s} \quad (6.4)$$

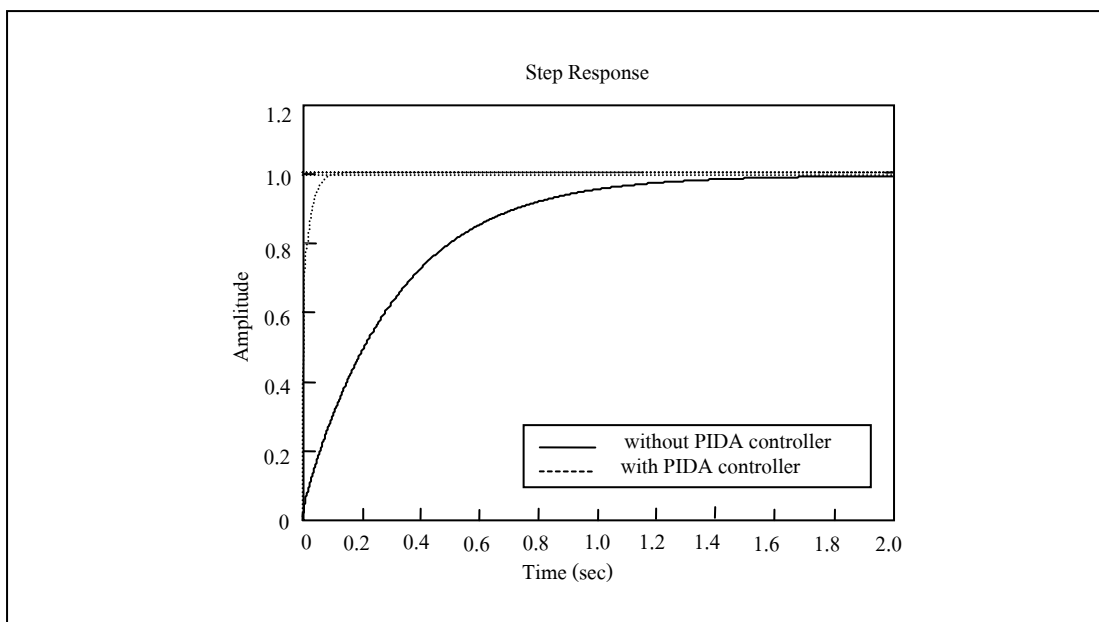


รูปที่ 6.7 วงจรตัวควบคุม

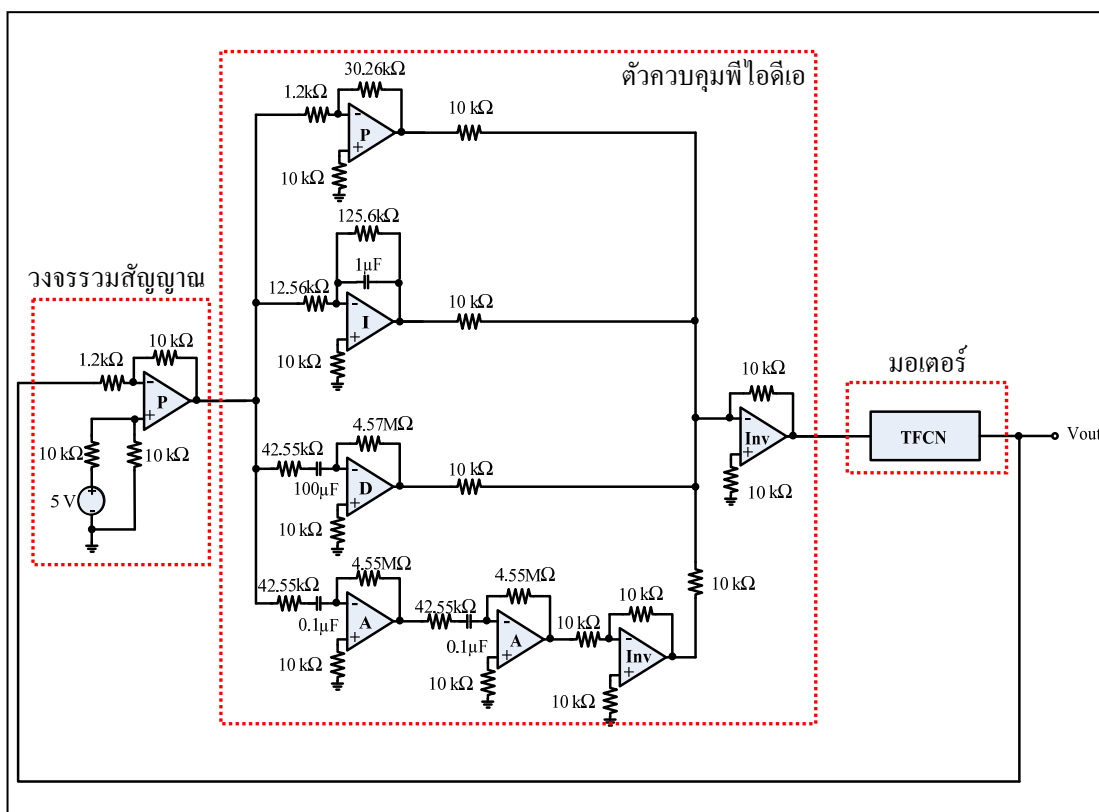
ในขณะนี้ เมื่อพิจารณาเชิงทฤษฎีอาจกล่าวได้ว่า ระบบควบคุมวงปิดมีโครงสร้างดังแผนภาพบล็อกในรูปที่ 6.8 และจากรูปที่ 6.9 เห็นได้ว่า ผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยกรณีเมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม มีผลการตอบสนองที่ดีมาก มอเตอร์มีช่วงเวลาขึ้น 0.0347 วินาที เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.0753 วินาที มี Gm เป็นอนันต์ และ มี Pm 102 deg ซึ่งถือได้ว่ามอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอมีช่วงเวลาขึ้นเร็วกว่าเดิม 94.98% และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วกว่าเดิม 93.83% อย่างไรก็ตาม ระบบวงปิดนี้ถือได้ว่าเป็นกรณีอุดมคติ เพราะไม่มีการคำนึงถึงการอ้อมตัวในวงจรรอบป้อนใดๆ เพื่อความแม่นยำที่มากขึ้น ก่อนลงมือทดสอบจริง จึงได้จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมด้วยโปรแกรม PSIM ซึ่งมีการพิจารณาถึงการอ้อมตัวของสัญญาณในวงจรตัวควบคุม มีโครงสร้างระบบควบคุมดังกล่าวมีแผนภาพดังรูปที่ 6.10



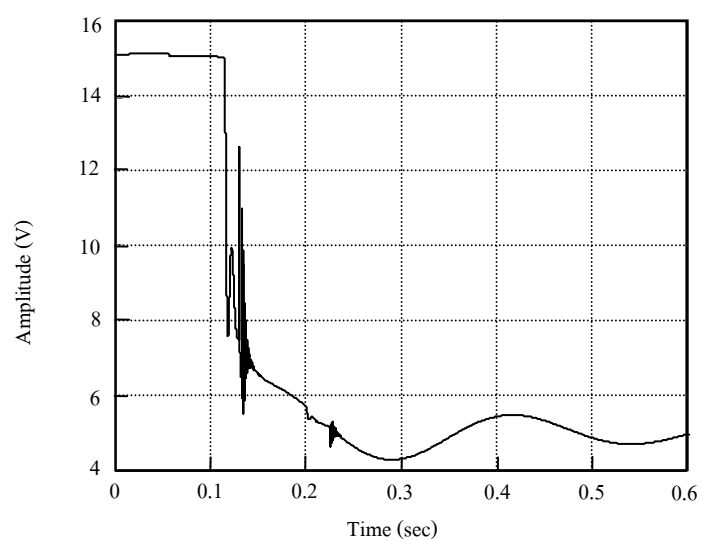
รูปที่ 6.8 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ



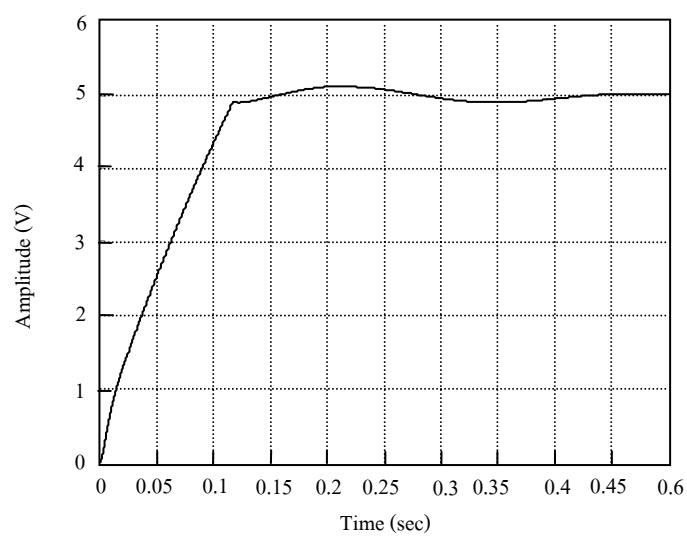
รูปที่ 6.9 ผลตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยในกรณีอุดมคติ



รูปที่ 6.10 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ของ PSIM



(ก) สัญญาณจากตัวควบคุมพีไอดีเอ

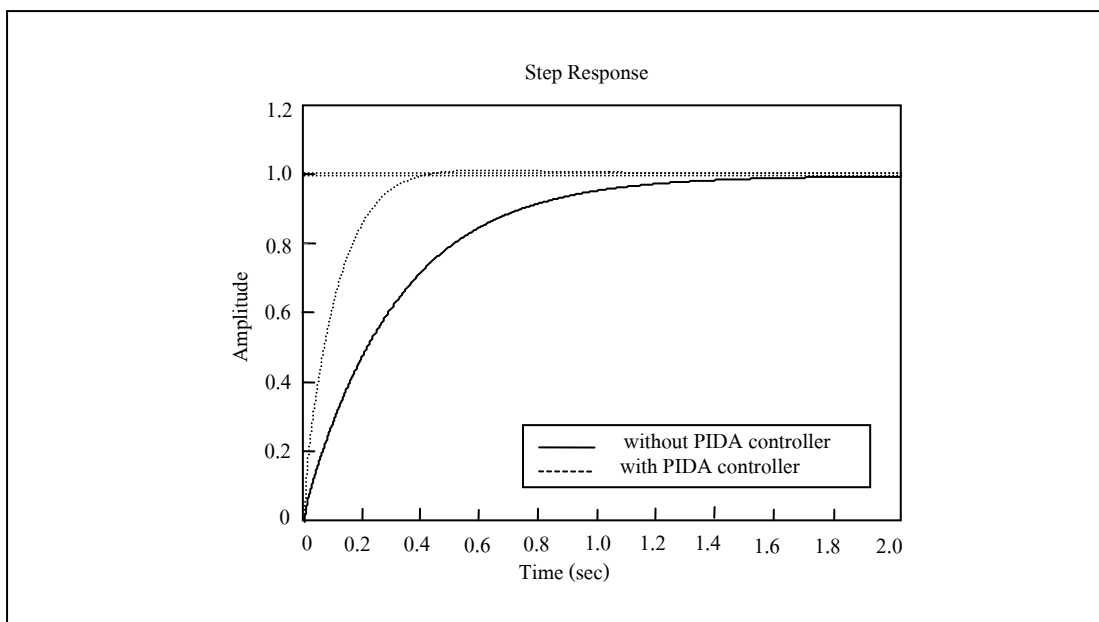


(ข) อัตราเร็วรอบของมอเตอร์

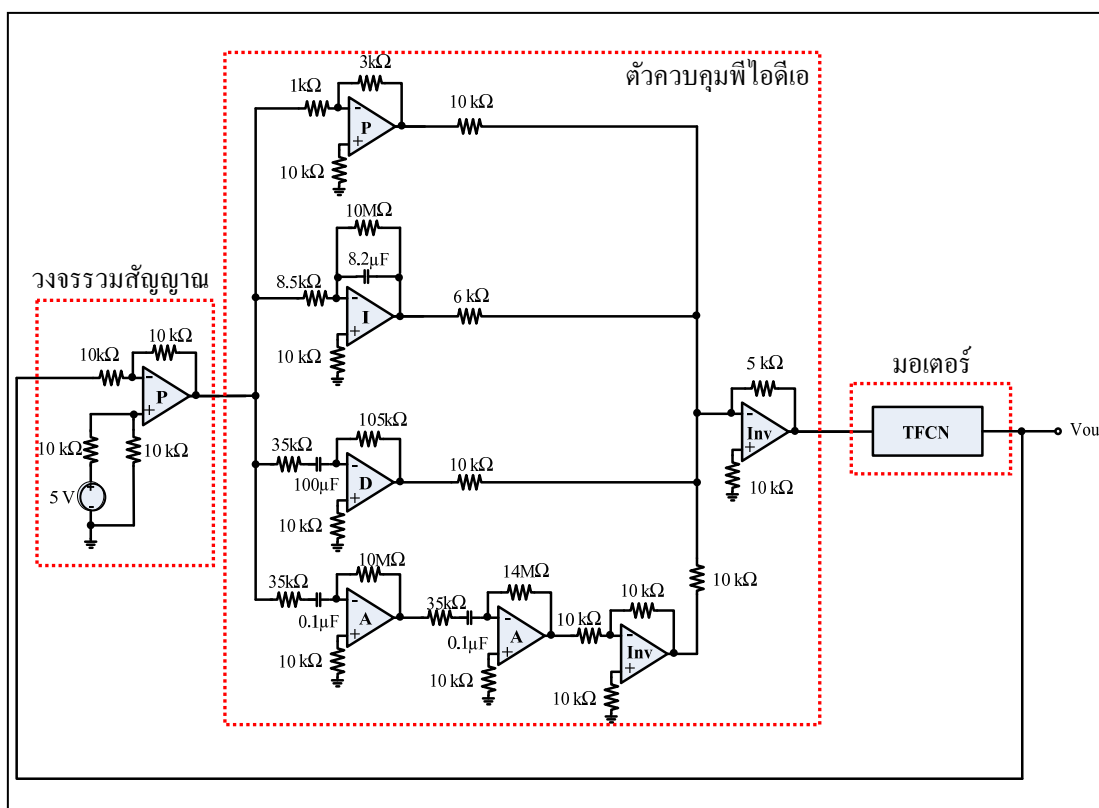
รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM

จากแผนภาพการจำลองสถานการณ์ของ PSIM ดังแสดงในรูปที่ 6.10 องค์ประกอบของระบบควบคุม ประกอบด้วยวงจรรวมสัญญาณ วงจรตัวควบคุมพีไอดีเอ และฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์สามเฟส วงจรรวมสัญญาณได้กำหนดแรงดันอ้างอิงไว้ที่ 5V (พิจารณาอัตราเร็วรอบของมอเตอร์ 600 rpm สมนัยกับแรงดันไฟฟ้า 5V) จากรูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM แสดงผลของสัญญาณจากตัวควบคุมพีไอดีเอ และผลของอัตราเร็วรอบมอเตอร์ (เครื่องหมาย ▼ แสดงถึงเวลาที่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวทางความเร็วของมอเตอร์) สังเกตได้ว่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์มีการพุ่งเกินบ้างเล็กน้อย และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวด้วยเวลา 0.45 วินาที จากผลการจำลองสถานการณ์ของ PSIM การอิมิตัวของออปแอมป์อยู่ที่ ± 15 V ตัวควบคุมพีไอดีเอจากการออกแบบข้างต้นถูกจำกัดสมรรถนะด้วยการอิมิตัวของออปแอมป์ ดังนั้นจึงทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเออีกครั้ง เมื่อพิจารณาผลจาก PSIM ทำให้ทราบได้ถึงช่วงของค่าเกนของตัวควบคุมที่จะทำให้ออปแอมป์ไม่อิมิตัว ซึ่งอาจเขียนแสดงค่าเกนเหล่านี้เป็นช่วงได้ดังต่อไปนี้ ตัวควบคุมพีมี K_p อยู่ในย่าน $[0, 3]$ ตัวควบคุมไอมี K_i อยู่ในย่าน $[0, 100]$ ตัวควบคุมดีมี K_d อยู่ในย่าน $[0, 12.7]$ ตัวควบคุมเอมี K_A อยู่ในย่าน $[0, 0.06]$ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยการค้นหาด้วย GA ใช้ toolbox พบว่าการค้นหาด้วยค่าจำนวนรอบ=5,000 และ $J=5.95$ ได้ค่าเกน $K_p=3$ $K_i=11$ $K_d=10.5$ $K_A=0.02$ $d=35000$ และ $e=35000$ ตัวควบคุมพีไอดีเอจึงมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (6.5) มีผลการออกแบบดังรูปที่ 6.12

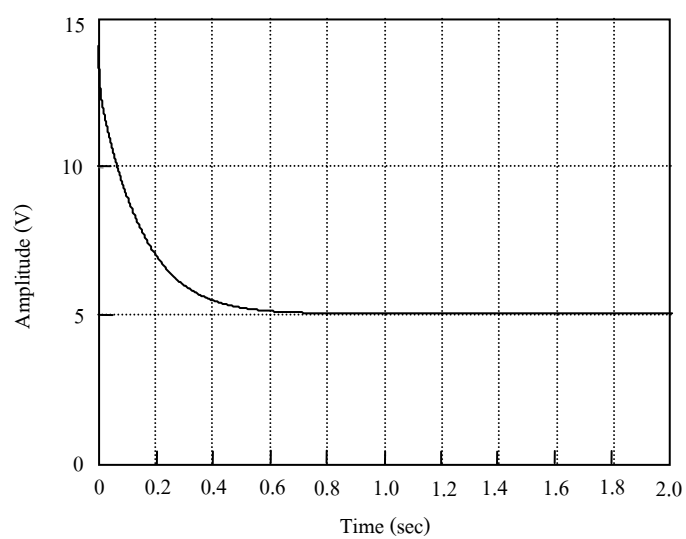
$$G_C(s) = \frac{13.52s^3 + 5.77 \times 10^5 s^2 + 3.68 \times 10^9 s + 1.35 \times 10^{10}}{s^3 + 7 \times 10^4 s^2 + 1.22 \times 10^9 s} \quad (6.5)$$



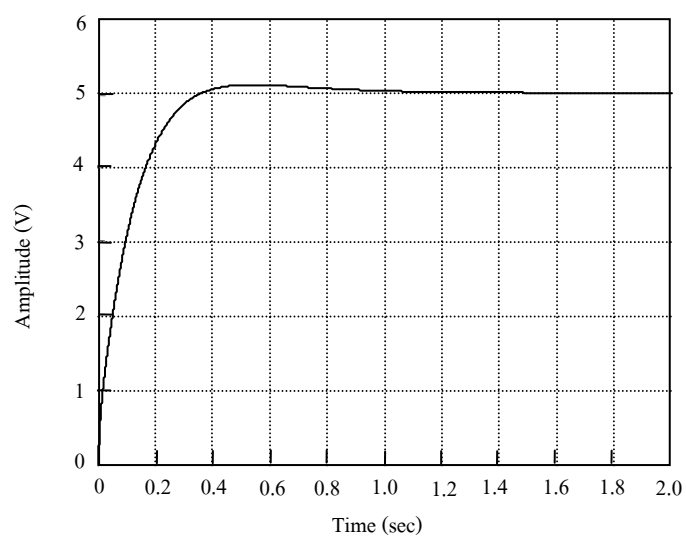
รูปที่ 6.12 ผลตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยเมื่อพิจารณาผลกระทบจากการอิมิตัวในออปแอมป์



รูปที่ 6.13 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ของ PSIM



(ก) สัญญาณจากตัวควบคุมพีไอดีเอ



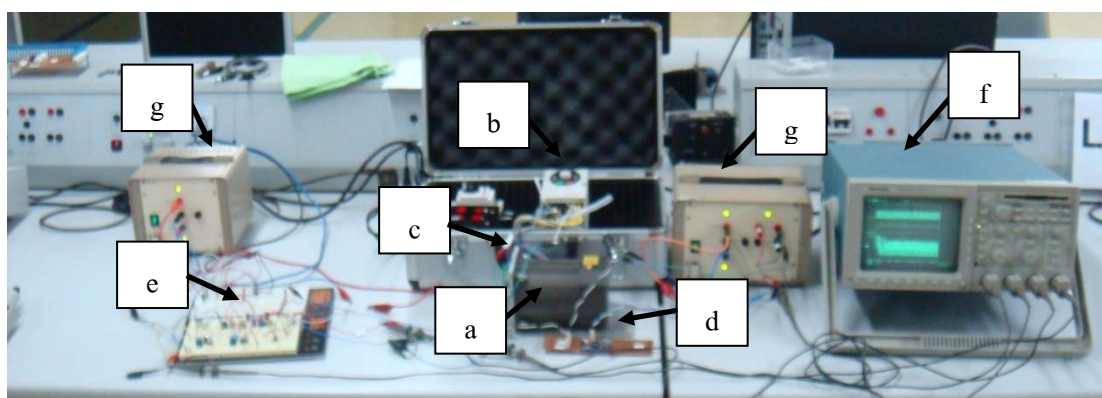
(ข) อัตราเร็วรอบของมอเตอร์

รูปที่ 6.14 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM

จากผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอดังรูปที่ 6.12 พิจารณาตัวควบคุมให้อยู่ในช่วงการอิมิตัวของออปแอมป์ มอเตอร์มีช่วงเวลาขึ้น 0.22 วินาที เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.35 วินาที มี Gm เป็นอนันต์ และมี Pm 91.8 deg เพื่อความสมจริงจึงจำลองสถานการณ์ด้วย PSIM อีกครั้ง ดังรูปที่ 6.13 ได้ผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6.14 (เครื่องหมาย ▼ แสดงถึงเวลาที่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวทางความเร็วของมอเตอร์) จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว สังเกตได้ว่าอัตราเร็วรอบมอเตอร์มีการพุ่งเกินบ้างเล็กน้อย มีช่วงเวลาขึ้น 0.3 วินาที และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.8 วินาที ผลการออกแบบตัวควบคุมทั้งกรณีไม่พิจารณาการอิมิตัวของออปแอมป์ และกรณีพิจารณาการอิมิตัวของออปแอมป์ เมื่อจำลองสถานการณ์ความสมจริงด้วย PSIM ผลการจำลองสถานการณ์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน นั่นคืออัตราเร็วรอบมอเตอร์มีการพุ่งเกินบ้างเล็กน้อยเช่นเดียวกัน และมอเตอร์กรณีออกแบบตัวควบคุมโดยไม่พิจารณาการอิมิตัวของออปแอมป์ เข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่าเล็กน้อยเพื่อให้ผลการทดสอบมอเตอร์เป็นไปในทิศทางที่ดีที่สุด ดังนั้นในการทดสอบจึงใช้ชุดพารามิเตอร์ของการออกแบบตัวควบคุมกรณีไม่พิจารณาการอิมิตัวของออปแอมป์ ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามหัวข้อ 6.4

6.4 ผลการทดสอบมอเตอร์และอภิปราย

ทดสอบควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์สามเฟสตามโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 6.1 ที่ความถี่ 20 Hz อัตราเร็วรอบ 600 rpm กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ 5V สมัยกับอัตราเร็ว 600 rpm โดยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบอัตราเร็วรอบมอเตอร์สามเฟส

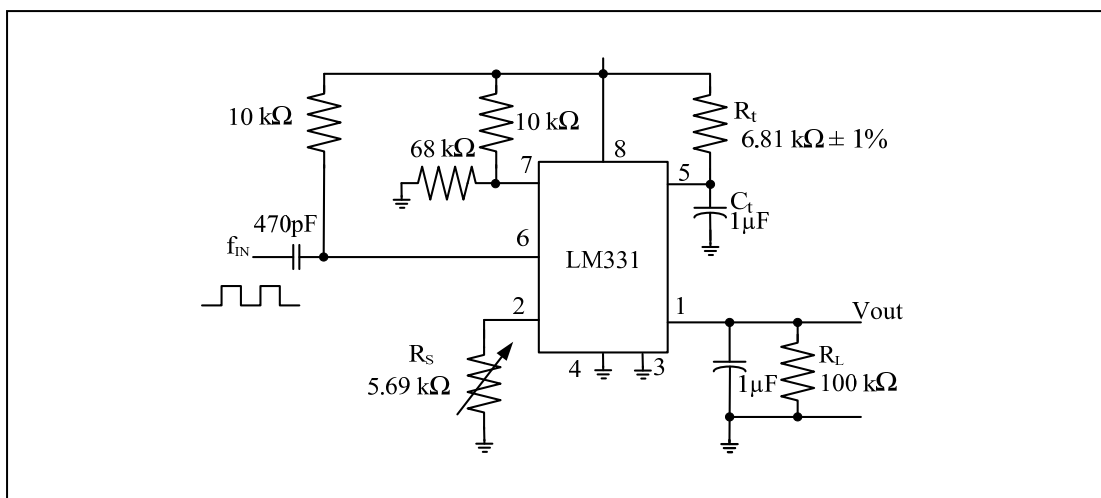
ซึ่งมีอุปกรณ์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

- a คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส รุ่น MAS04-90Y พิกัด 90W 4P
- b คือ อินเวอร์เตอร์ PWM ของ TOSHIBA รุ่น VFS11-2002PM
- c คือ วงจรถอดรหัสแถบสีวงล้อ
- d คือ วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (f/v)
- e คือ วงจรตัวควบคุมพีไอดีเอ
- f คือ ดิจิตอลออสซิลอสโคปสำหรับวัดรูปคลื่นสัญญาณพิกัด 200 MHz 100 MS/s
220 V_{rms} 50 Hz
- g คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ พิกัด 70mA 220 V_{rms} 50 Hz



รูปที่ 6.16 ชุดวงจรถอดรหัสแถบสีวงล้อ

พิจารณารูปที่ 6.16 (ก) แผงวงจรถอดรหัสแถบสีวงล้อ (ของ Innovative รุ่น NX-ZX-21) เป็นแผงวงจรที่ใช้หลักการสะท้อนแสงของแสงอินฟราเรด โดยแผงวงจรนี้จะประกอบด้วยวงจรที่ช่วยจัดสัญญาณดิจิตอล เมื่อตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับแสงอินฟราเรดสะท้อนกลับน้อย (อ่านแถบสีดำ พิจารณารูปที่ 6.16 (ข)) จะได้เอาต์พุตเป็น “1” หากได้รับแสงอินฟราเรดสะท้อนกลับมาก (อ่านแถบสีขาว พิจารณารูปที่ 6.16 (ข)) จะให้เอาต์พุตเป็น “0” สัญญาณที่ได้จากแผงวงจรถอดรหัสแถบสีวงล้อจึงเป็นสัญญาณพัลส์



รูปที่ 6.17 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (f/v)

พิจารณารูปที่ 6.17 แสดงวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ใช้ไอซีเบอร์ LM331 อินพุตที่ขาเข้าของวงจรเป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งสัญญาณนี้ได้จากเอาต์พุตของวงจรถดถอยสวิตช์แสงลือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันกำหนดให้เท่ากับ 5V ที่ความถี่ 20 Hz ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (6.6)

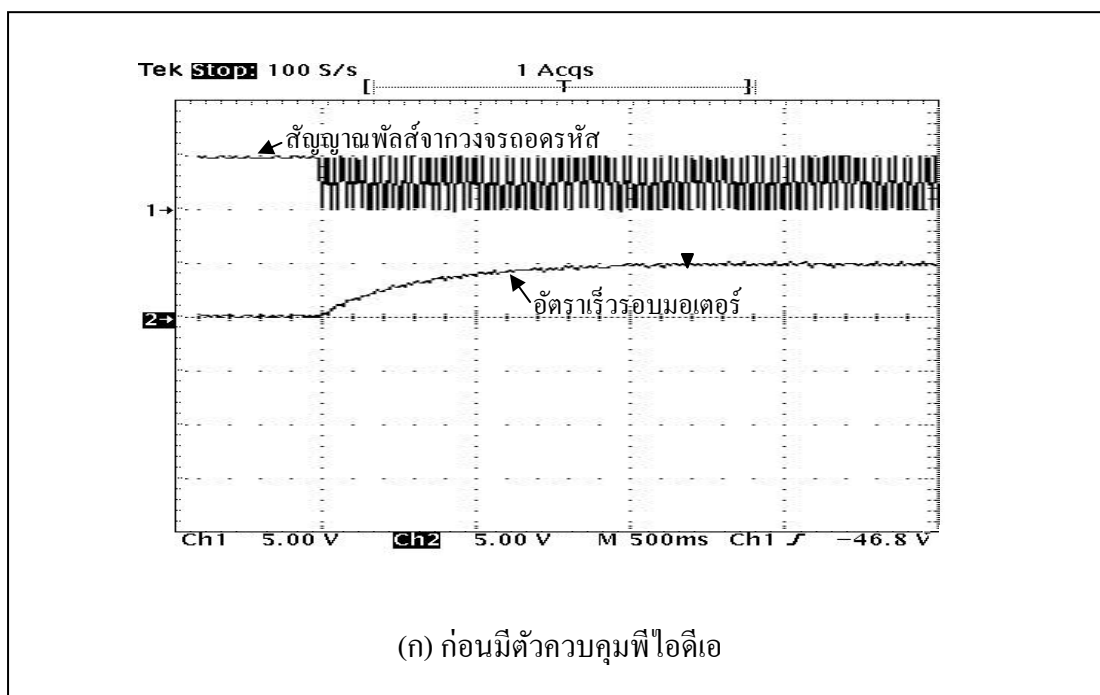
$$V_{OUT} = f_{IN} \times 2.09V \times \frac{R_L}{R_S} \times (R_t C_t) \quad (6.6)$$

โดยที่ V_{OUT} คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจร (V)

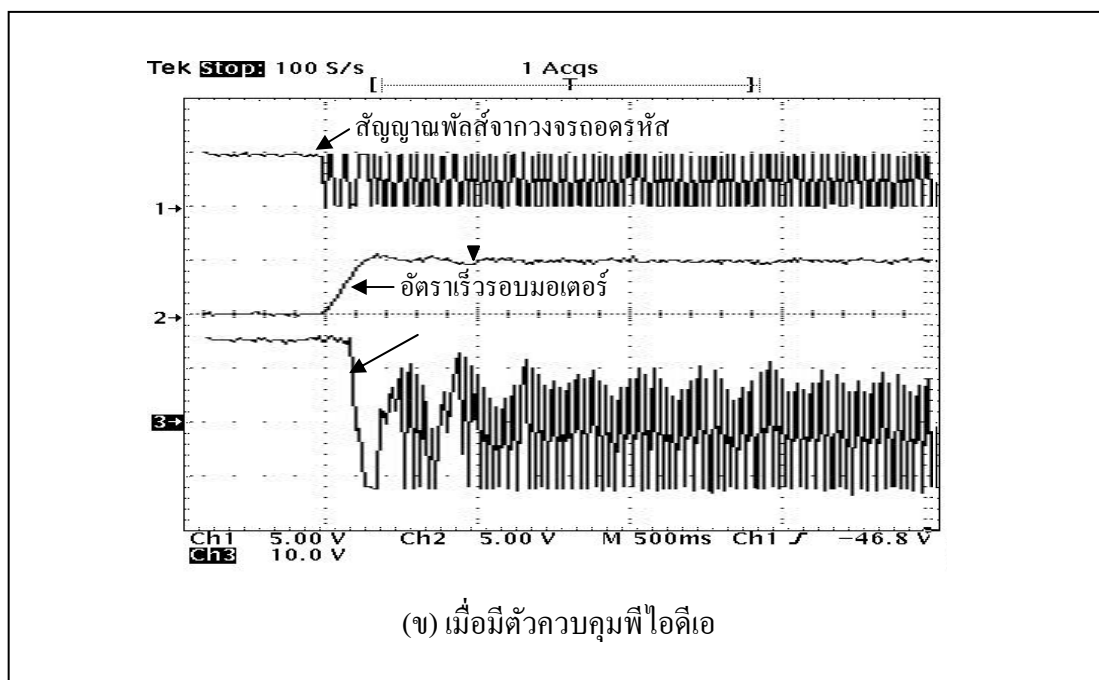
f_{IN} คือ ความถี่อินพุตของวงจร (Hz)

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบอัตราเร็วรอบมอเตอร์สามเฟสดังแสดงในรูปที่ 6.15 ผลการทดสอบอัตราเร็วรอบที่ได้ มีผลดังแสดงในรูปที่ 6.18 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM ดังแสดงในรูปที่ 6.11 จากผลการทดสอบอัตราเร็วรอบมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 6.18 เห็นได้ว่ามอเตอร์ก่อนมีตัวควบคุมมีช่วงเวลาขึ้น 0.69 วินาที เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 1.22 วินาที แต่เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอ มอเตอร์มีผลการตอบสนองที่ดีขึ้นกว่าเดิมมาก มีช่วงเวลาขึ้น 0.2 วินาที และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.5 วินาที และมีการฟุ้งกินน้อยมาก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมมีช่วงเวลาที่เร็วกว่าเดิม 71.01% และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วกว่าเดิม 59.02% พิจารณาผลการตอบสนองมอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอแสดงดังรูปที่ 6.18 (ข)

ผลการตอบสนองที่ได้ใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM ดังแสดงในรูปที่ 6.11 (ข) ทั้งนี้เนื่องจากผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM มีการพิจารณาผลการอิ่มตัวของอุปกรณ์ใด ๆ ในวงจรอปแอมป์ ผลการทดสอบที่ได้จึงมีความใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบมอเตอร์



รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบมอเตอร์ (ต่อ)

6.5 สรุป

ในการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์สามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีเอ เริ่มจากการหาแบบจำลองของมอเตอร์ด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง โดยการทดสอบมอเตอร์ตามโครงสร้างระบบวงเปิดแสดงดังรูปที่ 6.2 ในการทดสอบแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกใช้เพื่อกระบวนการหาแบบจำลอง กลุ่มที่สองใช้เพื่อตรวจสอบความแม่นยำตรงของผลการระบุเอกลักษณ์จากการตรวจสอบความแม่นยำตรงของผลการระบุเอกลักษณ์ การระบุเอกลักษณ์ที่ได้จากการใช้กระบวนการหาแบบจำลองมีผลที่ยอมรับได้ ซึ่งมีความแม่นยำประมาณ 84% และให้ผลแบบจำลองชนิดฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ 3 ดังสมการที่ (6.3) ลำดับถัดไป ทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ตามแนวทางดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบตัวควบคุมกรณีอุดมคติ มอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอมีผลการตอบสนองที่ดี มีช่วงเวลาที่ขึ้นที่เร็วกว่าเดิม 94.98% และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วกว่าเดิม 93.83% และเมื่อต้องการนำไปทดสอบจริง จำเป็นต้องคำนึงถึงความอึดตัวของอุปกรณ์ออฟแอมป์ เพื่อความแม่นยำที่มากขึ้น ดังนั้นจึงจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อคำนึงถึงความอึดตัวดังกล่าว ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้พบว่า อัตราเร็วรอบมอเตอร์มีการพุ่งเกินบ้างเล็กน้อยและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวด้วยเวลา 0.45 วินาที ลำดับสุดท้าย ทำการทดสอบอัตราเร็วรอบมอเตอร์ โดยติดตั้ง

อุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 6.11 ผลการทดสอบที่ได้ มอเตอร์มีช่วงเวลาขึ้น 0.2 วินาที และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่เวลา 0.5 วินาที ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมมีช่วงเวลาที่เร็วกว่าเดิม 71.01% และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วกว่าเดิม 59.02% ซึ่งผลการทดสอบใกล้เคียงกับการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM เนื่องจากการพิจารณาการอ้อมตัวของอุปกรณ์ออปแอมป์ ผลการทดสอบการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์สามเฟส เห็นได้ชัดเจนว่าอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอ มีผลการตอบสนองที่ดีกว่ามอเตอร์ก่อนมีตัวควบคุมเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดี การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ สามารถนำมาใช้ควบคุมพลานต์ต่าง ๆ เพื่อให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้น และเมื่อนำมาทดสอบในทางปฏิบัติ ถึงแม้ว่าจะต้องทำงานที่ซับซ้อนกว่าเดิมบ้างเล็กน้อย แต่เทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอได้ให้ผลการตอบสนองที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิมเป็นอย่างมาก

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาและพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ในระบบเอส อาศัยหลักการจัดวางตำแหน่งโพลเพื่อหาค่าโพลที่เหมาะสมต่อระบบที่สุด โดยใช้การค้นหาคำตอบด้วยการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด และใช้การค้นหาคำตอบอย่างชาญฉลาดด้วยจินเนติกอัลกอริทึม นอกจากนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อเป็นเครื่องยืนยันว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ สามารถนำมาใช้ควบคุมพลานต์ต่าง ๆ เพื่อให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้น และเมื่อนำมาทดสอบในทางปฏิบัติ ถึงแม้ว่า จะต้องทำงานที่ซับซ้อนกว่าเดิมบ้างเล็กน้อย แต่เทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอได้ให้ผลการตอบสนองที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิมเป็นอย่างมาก การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าว สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา โดยกล่าวถึงความสำคัญของการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในทางทฤษฎีและปฏิบัติ และด้วยข้อจำกัดบางประการของตัวควบคุมพีไอดี จึงมีผู้คิดค้นตัวควบคุมพีไอดีเอขึ้น Dorf and Jung (1996) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอโดยอิงหลักการโพลเด่นเชิงซ้อน 1 คู่ ซึ่งทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอกับพลานต์ที่ควบคุมยาก 7 แบบ ตามข้อเสนอแนะของ Astrom and Hagglund (2000) ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอวิธีออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอที่ดำเนินการในระบบเอส โดยอาศัยหลักการจัดวางตำแหน่งโพล ดำเนินการค้นหาคำตอบด้วยการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด ซึ่งมีการแสดงรายละเอียดของความสัมพันธ์ทางสมการพีชคณิตสำหรับการออกแบบ ตลอดจนขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอกับพลานต์ที่ควบคุมยาก 7 แบบ ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการออกแบบเมื่อปรากฏการรบกวนจากภายนอก และความไวของระบบ จากผลการออกแบบตัวควบคุม พบว่าบางพลานต์เราสามารถออกแบบให้ผลการตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิด เป็นไปตามข้อกำหนดทั้งทางด้านการพุ่งเกิน เวลาได้ระดับ และเวลาเข้าที่ แม้ว่าบางพลานต์การออกแบบไม่สามารถเป็นไปตามข้อกำหนด แต่ผลการตอบสนองในภาพรวมของทั้ง 7 พลานต์เป็นไปในทิศทางที่ค่อนข้างดี

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการออกแบบตัวควบคุมดำเนินการด้วยวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ส่งผลให้คำตอบที่ได้ผู้เข้าสู่คำตอบเฉพาะถิ่นที่มีคุณภาพ จากการจำลองสถานการณ์ของระบบเมื่อระบบถูกรบกวนจากภายนอก พบว่าพลาเน็ตทั้ง 7 เมื่อถูกรบกวนจากภายนอก ตัวควบคุมช่วยให้ระบบที่ถูกรบกวนฟื้นคืนสู่ระดับการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวได้ดีภายในเวลาอันสั้น ตลอดจนมีความสามารถในการตามรอยอินพุตได้ดีมาก นอกจากนั้นระบบวงปิดทุกกรณีมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก อาจกล่าวได้ว่า วิธีการนี้ให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ

นอกจากนั้นแล้วบทที่ 4 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอดำเนินการในระนาบเอส โดยอาศัยหลักการจัดวางตำแหน่งโพลอย่างเหมาะสมที่สุดเช่นกัน แต่ดำเนินการค้นหาคำตอบอย่างชาญฉลาดด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งบทที่ 4 นี้ได้นำเสนอเนื้อหาทั่วไปของจินเนติกอัลกอริทึม ตลอดจนวิธีการออกแบบตัวควบคุม ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอดับพลาเน็ตที่ควบคุมยาก 7 แบบ ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการออกแบบเมื่อปรากฏการรบกวนจากภายนอก และความไวของระบบ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ให้ผลการตอบสนองที่ดีมาก และเป็นไปตามข้อกำหนดทั้งทางด้านการพุ่งเกิน เวลาไต่ระดับ และเวลาเข้าที่ทุกประการ ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอด้วยวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึม อาศัยคำตอบที่ได้จากวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุดมากำหนดขอบเขตของค่าเริ่มต้นการค้นหา จึงส่งผลระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวควบคุมจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมีผลการตอบสนองที่ดีกว่าที่ได้จากวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด จากผลการจำลองสถานการณ์ระบบเมื่อถูกรบกวนจากภายนอก และความไวของระบบ เห็นได้ว่าตัวควบคุมช่วยให้ระบบที่ถูกรบกวนฟื้นคืนสู่ระดับการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวได้ดี และใช้เวลาไม่นาน ตลอดจนมีความสามารถในการตามรอยอินพุตได้ดีมาก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างมาก และให้ให้ผลที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด

บทที่ 5 นำเสนอการอนุวัตและทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอด ด้วยเทคโนโลยีแอนะล็อกโดยอาศัยออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก เชื่อมต่อตามโครงสร้างแบบขนาน อีกทั้งแสดงความสัมพันธ์ในการนำค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i , K_d และ K_A ไปสร้างเป็นวงจรตัวควบคุมพี วจรตัวควบคุมไอ วจรตัวควบคุมดี และวงจรตัวควบคุมเอตามลำดับ พร้อมทั้งอธิบายหน้าที่ของพารามิเตอร์แต่ละตัวในวงจรตัวควบคุมพีไอดีเอด นอกจากนี้ยังมีการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอดเพื่อศึกษาคุณลักษณะของตัวควบคุมแต่ละตัว ทั้งนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบตัวควบคุมในทางปฏิบัติในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 6 นำเสนอการประยุกต์ตัวควบคุมพีไอดีเอดและการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด กับการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอดด้วยวิธีจินเนติก

อัลกอริทึมตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ตลอดจนการสร้างตัวควบคุมพีไอดีด้วยเทคโนโลยี แอนะล็อกตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ซึ่งการทดสอบพิจารณาที่ความถี่ 20 Hz อัตราเร็ว รอบ 600 rpm ทำการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาแบบจำลองของมอเตอร์ ด้วยการทดสอบสภาวะชั่วคราว แบบขั้นบันได (step transient test) โดยทดสอบมอเตอร์ตามโครงสร้างของระบบวงเปิด จากผลการ ระบุเอกลักษณ์โดยใช้แบบจำลอง ARMAX ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับ 3 โปรแกรมรายงานผล ความแม่นยำประมาณ 84% และเมื่อพิจารณาผลการตรวจสอบความถูกต้อง ระหว่างผลจากการ ทดสอบและผลจากการระบุเอกลักษณ์มีผลเป็นที่น่าพอใจอย่างมาก และจากผลการทดสอบ อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ ตัวควบคุมพีไอดีช่วยให้มอเตอร์มีช่วงเวลาขึ้นเร็วขึ้นกว่าเดิม 71.01% และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วกว่าเดิม 59.02%

ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุดและ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม ให้ผลการจำลองสถานการณ์เป็นที่น่าพึงพอใจ ผลการออกแบบตัวควบคุมด้วย วิธีจินเนติกอัลกอริทึมให้ผลที่ดีกว่าผลการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่าง เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมอาศัยคำตอบที่ได้ จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการคำนวณทางพีชคณิตมากำหนดเป็นขอบเขตเริ่มต้นของการ ค้นหา อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้วิธีการ ค้นหาคำตอบด้วยหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ ซึ่งมีการวิวัฒนาการอยู่ ในขั้นตอนการค้นหาคำตอบ จึงทำให้ระบบควบคุมวงปิดที่มีตัวควบคุมจากวิธีจินเนติกอัลกอริทึมมี ผลการตอบสนองที่ดีกว่าผลที่ได้จากวิธีการคำนวณทางพีชคณิตอย่างเหมาะสมที่สุด และจากการ ทดสอบในทางปฏิบัติ การควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์สามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีเอ เห็นได้ ชัดเจนว่าอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอ มีผลการตอบสนองที่ดีกว่ามอเตอร์ ก่อนมีตัวควบคุมเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันได้อย่างดีว่า การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ สามารถนำมาใช้ควบคุมพลานต์ต่าง ๆ เพื่อให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้น และเมื่อนำมาทดสอบในทาง ปฏิบัติ ถึงแม้ว่าจะต้องทำงานที่ซับซ้อนกว่าเดิมบ้างเล็กน้อย แต่เทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอได้ ให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้นกว่าเดิมเป็นอย่างมาก

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

1) การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ สิ่งสำคัญที่สุดในการออกแบบ คือวิธีในการออกแบบ ตัวควบคุม และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบ หากวิธีในการออกแบบและฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่ใช้ไม่เหมาะสมต่อการออกแบบตัวควบคุม จะส่งผลให้ระบบที่ทำการออกแบบตัว ควบคุมมีผลการตอบสนองที่ด้อย

2) การสร้างเทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อกเพื่อให้ได้ผลที่ดี อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ แอมป์ที่ใช้ ต้องมีคุณภาพดี ความต้านทานและคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในวงจร ควรเลือกค่าที่เหมาะสมต่อ

วงจรตัวควบคุมและเลือกชนิดที่ทำจากวัสดุคุณภาพสูง ในกรณีที่เลือกค่าไม่เหมาะสมจะส่งผลให้คุณลักษณะของตัวควบคุมด้อย และทำให้ระบบมีผลการตอบสนองที่ไม่ดี

3) การทดสอบควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ทดสอบตัวควบคุมในช่วงการตอบสนองชั่วคราว อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควรคำนึงถึงสามารถในการทำงานแบบนับพลัน หากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถทำงานแบบนับพลันได้ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอาจจะไม่ส่งผลใด ๆ ต่อการควบคุมอัตราเร็วรอบของมอเตอร์

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1) ควรศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ ด้วยวิธีการพีชคณิตเชิงเส้น สำหรับการป้อนกลับตัวแปรสแตต ตลอดจนดำเนินการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบใหม่ ๆ ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีและใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่รวดเร็วกว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีทางพีชคณิตและวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

2) ควรศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริงที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล หรือผสมผสานแอนะล็อกกับดิจิทัล โดยพิจารณาถึงกรณีที่ระบบถูกรบกวนจากภายนอกร่วมด้วย

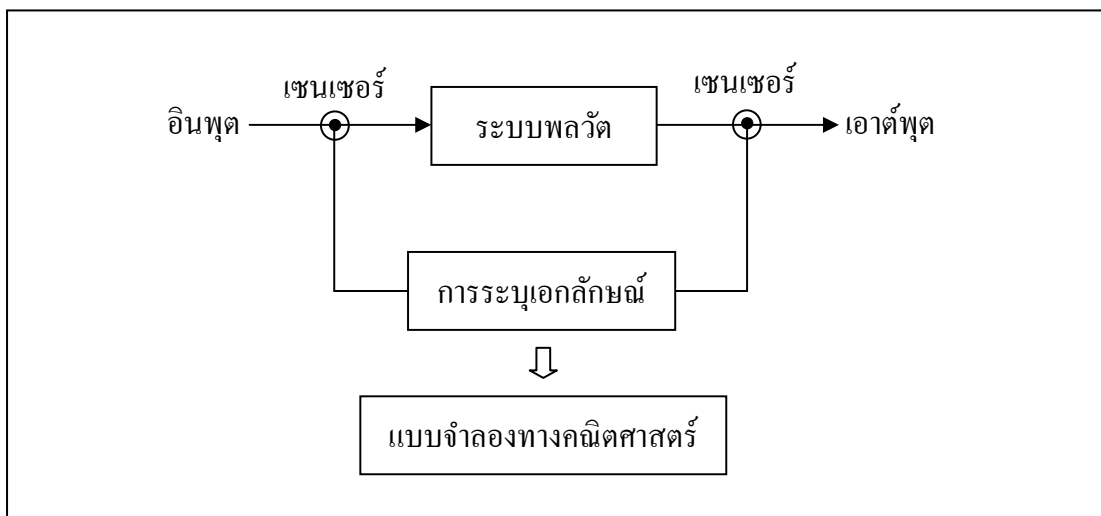
รายการอ้างอิง

- วิเวก ภาชีรักษ์ (2552). การพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังดีซีสำหรับสกรีนกริดของหลอดเทโทรูด RS2058CJ ในระบบคลื่นวิทยุของเครื่องกำเนิดแสงสยาม. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ (Computational Intelligence)**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Ang, K.H., Chong, G., and Li, Y. (2005). PID Control System Analysis, Design and Technology. **IEEE Trans Control Systems Technology**. 13(4): 559-576.
- Astrom, K.J., and Hagglund, T. (2000). Benchmark Systems for PID Control. **IFAC Digital Control: Past, Present and Future of PID Control**. 165-166.
- Astrom, K.J., and Wittenmark, B. (1997). **Computer-Controlled Systems**: Prentice-Hall.
- Baldick, R. (2006). **Applied Optimization**. Cambridge University Press.
- Charton, W. (1976). Transfer and Weighting Functions for Variable Frequency Induction Motor. **IEEE Trans. and. Appl.** IA-12(5): 474-478.
- Dorf, R.C., and Jung, S. (1996). Analytical PIDA Controller Design Technique for a Third Order System. **35th IEEE Conf. Pwc. Decision and Control**. 2513-2518.
- Liaw, G.M., and Lin, F.J.(1994). A Robust Speed Controller for Induction Motor Drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 14(3): 308-315.
- Lin, F.L., and Liaw, C.M. (1993). Reference Model Selection and Adaptive Control for Induction Motor Drives. **IEEE Trans. AC**. 38(10): 1594-1600.
- MacDonald, M.L., and Sen, P.C. (1979). Control Loop Study of Induction Motor Drives Using DQ Model. **IEEE Trans. and. Elec. 20 Cont. Instr.** 26(4): 237-243.
- Puangdownreong, D., and Sujitjorn, S. (2007). Obtaining an Optimum PID Controller Via Adapt Tabu Search. **Lecture Notes in Computer Science**.
- Salamd, M.H., and Holmes, P.G. (1992). Modelling and Dynamic Performance of Variable-Frequency- Fed Induction Motors. **IEE Proc.-B**. 139(3): 191-196.

Young, H.D., Yong, L.I., Seung, C.Y., and Kwi, C.B. (2001). The Design of PIDA Controller with Pre-Compensator. **IEEE Conf. Pwc. ISIE.:** 798-804.

ภาคผนวก ก

ทบทวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองกล่องดำเชิงเส้น



รูปที่ ก.1 แผนภาพการระบุเอกลักษณ์ระบบ

วิเวก ภาชีรักษ์ (2552) กล่าวถึงหลักการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของระบบพลวัต อาจสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ ก.1 ซึ่งข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบพลวัตจะถูกตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยปกติแล้วข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบถูกบันทึกแบบซีกตัวอย่าง (sampled) ดังนั้น แบบจำลองแบบกล่องดำชนิดเวลาเต็มหน่วยแบบเชิงเส้นอาจเขียนได้ดังสมการ (ก.1) (สัญลักษณ์ t ที่ใช้ในภาคผนวก ก. มีความหมายถึงเวลาเต็มหน่วย)

$$y(t) = \eta(t) + \omega(t) \quad (\text{ก.1})$$

ซึ่ง $\eta(t)$ คือ แบบจำลองเอาต์พุตที่เป็นอิสระต่อสัญญาณรบกวน และ

$\omega(t)$ คือ แบบจำลองของสัญญาณรบกวน ดังแสดงในสมการ (ก.2) และ (ก.3) ตามลำดับ

$$\eta(t) = G(q, \theta)u(t) \quad (\text{ก.2})$$

$$\omega(t) = H(q, \theta)e(t) \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ $u(t)$ คือ สัญญาณอินพุต $e(t)$ คือ สัญญาณรบกวนขาว $y(t)$ คือ สัญญาณเอาต์พุต และ θ คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง กำหนดให้ $G(q, \theta)$ และ $H(q, \theta)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของ ตัวปฏิบัติการเลื่อน ดังแสดงในสมการ (ก.4) และ (ก.5) ตามลำดับ

$$G_C(q, \theta) = \frac{B(q)}{F(q)} = \frac{b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-nk-1} + \dots + b_{ab} q^{-nk-nb+1}}{1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf}} \quad (\text{ก.4})$$

$$H(q, \theta) = \frac{C(q)}{D(q)} = \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}}{1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd}} \quad (\text{ก.5})$$

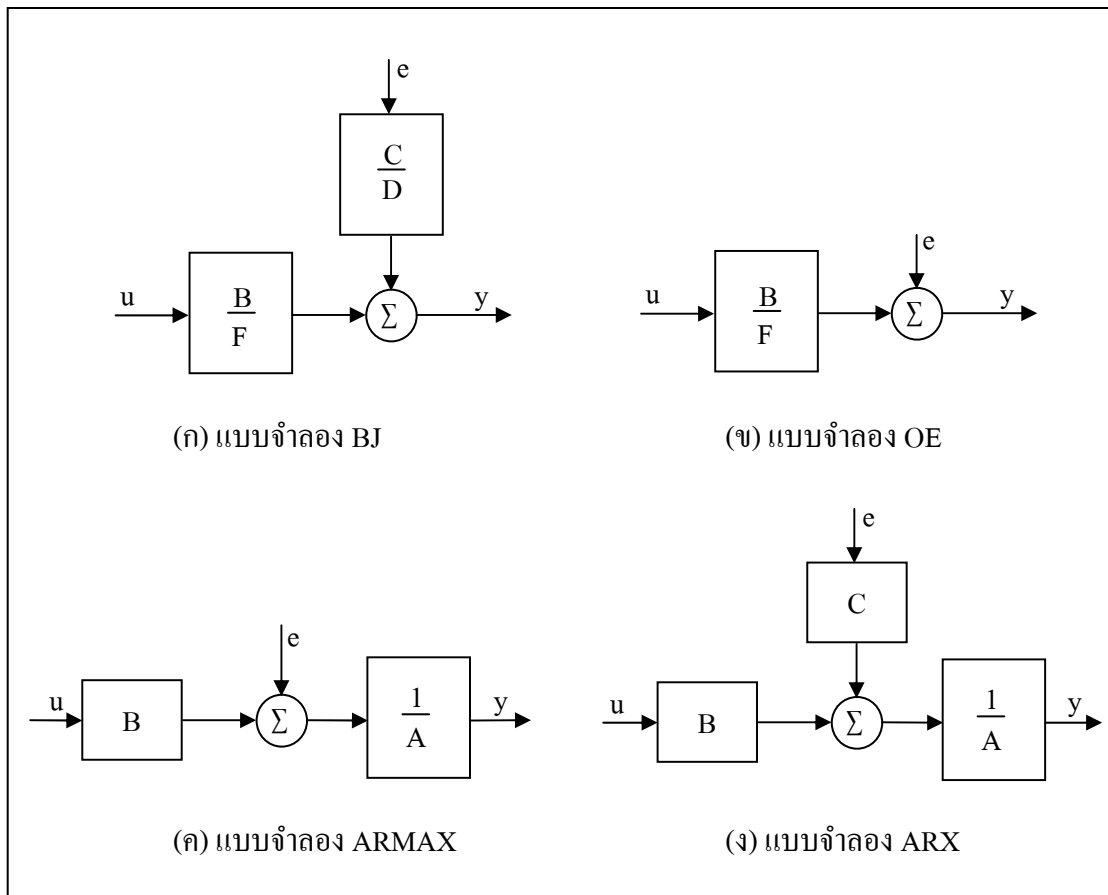
ดังนั้น จึงอาจเขียนสมการ (ก.2) ได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนี้

$$\eta(t) + f_1 \eta(t-1) + \dots + f_{nf} \eta(t-nf) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u[t-(nb+nk-1)] \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ nk คือ เวลาประวิงของการชักตัวอย่าง หากกำหนดให้ T เป็นคาบเวลาของการชักตัวอย่าง ซึ่งมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการ (ก.1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ θ คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ b_i c_i d_i และ f_i ของฟังก์ชันถ่ายโอน อาจสังเกตเห็นได้ว่า แบบจำลองแบบกล่องดำจะถูกกำกับด้วยอันดับของพหุนามจำนวน 5 ค่าคือ nb nc nd nf และ nk แบบจำลองตามสมการ (ก.7) เป็นที่รู้จักในนามของแบบจำลอง Box-Jenkins (BJ) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงด้วยแผนภาพบล็อกในรูปที่ ก.2 (ก)



รูปที่ ก.2 โครงสร้างของแบบจำลองกล่องดำเชิงเส้น

ในกรณีที่ไม่นำคุณสมบัติของสัญญาณรบกวนมาสร้างแบบจำลอง และกำหนดให้ $H(q)=1$ นั่นคือ $nc=nd=0$ ดังนั้น สมการ (ก.7) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (ง.8) ซึ่งได้แบบจำลองที่รู้จักกันในนามของแบบจำลอง output error (OE) และมีโครงสร้างดังแสดงด้วยแผนภาพบล็อกในรูปที่ ก.2 (ข)

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + e(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + e(t) \quad (\text{ก.8})$$

หากกำหนดให้พหุนามเทอมส่วนของ G และ H ของสมการ (ก.7) มีค่าเป็น $A(q)$ ดังแสดงในสมการ (ก.9) จากนั้นคุณสมบัติของสมการ (ก.7) ทั้งสองด้านด้วย $A(q)$ จึงได้สมการ (ก.10) ซึ่งเป็น

แบบจำลองที่รู้จักกันในนามของแบบจำลอง ARMAX (auto regressive-moving average with exogenous) โดยมีโครงสร้างดังแสดงด้วยแผนภาพบล็อกในรูปที่ ก.2 (ก)

$$A(q)=F(q)=D(q)=1+a_1q^{-1}+...+a_{na}q^{-na} \quad (ก.9)$$

$$A(q)y(t)=B(q)u(t)+C(q)e(t) \quad (ก.10)$$

ในกรณีที่เทอม $C(q)$ ของสมการ (ก.10) มีค่าเป็น 1 จะได้แบบจำลองตามสมการ (ก.11) ที่รู้จักกันในนามของแบบจำลอง ARX (auto regressive with exogenous variable) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงด้วยแผนภาพบล็อกในรูปที่ ก.2 (ง)

$$A(q)y(t)=B(q)u(t)+e(t) \quad (ก.11)$$

จากแบบจำลองแบบกล่องดำเชิงเส้นทั้ง 4 รูปแบบ ที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลอง ARMAX และ ARX เหมาะสำหรับการจำลองระบบที่มีสัญญาณรบกวนโหลด (load disturbance) เข้าสู่ระบบทางด้านอินพุต แบบจำลอง BJ เหมาะสำหรับการจำลองระบบที่พลวัตของระบบและสัญญาณรบกวนไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกันโดยตรงตามธรรมชาติ เช่น ระบบที่ประสบสัญญาณรบกวนทางด้านเอาต์พุต และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัด (measurement noise) สำหรับแบบจำลอง OE มีข้อดีตรงที่แบบจำลองเอาต์พุตอิสระต่อสัญญาณรบกวน พลวัตของระบบและแบบจำลองของสัญญาณรบกวนแยกส่วนกันอย่างเด็ดขาด ส่งผลให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ถูกต้องแม่นยำ หากมีการทดสอบระบบแบบวงเปิดอย่างแท้จริง

เมื่อกำหนดให้ $\hat{y}(t|\theta)$ คือการทำนายค่าเอาต์พุต $y(t)$ ดังนั้น จากแบบจำลอง OE ดังสมการ (ก.8) สามารถทำนายค่าเอาต์พุต $y(t)$ ได้ดังสมการ (ก.12)

$$\hat{y}(t|\theta)=G(q,\theta)u(t) \quad (ก.12)$$

ในกรณีของแบบจำลอง ARX ดังสมการ (ก.11) สามารถเขียนสมการเอาต์พุต $y(t)$ ได้ดังนี้

$$y(t)=-a_1y(t-1)-...-a_{na}y(t-na)+b_1u(t-nk)+...+b_{nb}u(t-nk-nb+1)+e(t) \quad (ก.13)$$

สมการ (ก.13) สามารถทำนายค่าเอาต์พุต $y(t)$ ของแบบจำลอง ARX ได้ดังสมการ (ก.14)

$$\hat{y}(t|\theta) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) \quad (\text{ก.14})$$

อาจสังเกตเห็นได้ว่า การทำนายค่าเอาต์พุตปัจจุบันของแบบจำลอง OE ใช้ข้อมูลอินพุตแต่เพียงอย่างเดียว ในขณะที่การทำนายค่าเอาต์พุตปัจจุบันของแบบจำลอง ARX จำเป็นต้องใช้ค่าเอาต์พุตเก่าประกอบการทำนายด้วย

จากแบบจำลองดังสมการ (ก.7) หากนำอินเวอร์สของ $H(q, \theta)$ คูณทั้งสองด้านของสมการ จะได้ว่า

$$H^{-1}(q, \theta) y(t) = H^{-1}(q, \theta) G(q, \theta) u(t) + e(t) \quad (\text{ก.15})$$

$$y(t) = [1 - H^{-1}(q, \theta)] y(t) + H^{-1}(q, \theta) G(q, \theta) u(t) + e(t) \quad (\text{ก.16})$$

และสามารถทำนายค่าเอาต์พุต $y(t)$ ของสมการ (ก.16) ได้ดังนี้

$$\hat{y}(t|\theta) = [1 - H^{-1}(q, \theta)] y(t) + H^{-1}(q, \theta) G(q, \theta) u(t) \quad (\text{ก.17})$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ (ก.17) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\hat{y}(t|\theta) = \theta^T \varphi(t) \quad (\text{ก.18})$$

เมื่อ θ คือคอลลัมน์เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และ $\varphi(t)$ คือ คอลลัมน์เวกเตอร์ของอินพุตและเอาต์พุตเก่า ซึ่งเรียกว่า เวกเตอร์ถดถอย (regression vector) และมีสมาชิกเป็นตัวถดถอย (regresses)

ในกรณีของแบบจำลอง ARX เมื่อเขียนให้อยู่ในแบบของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นตามสมการ (ก.18) จะได้ค่า θ และ $\varphi(t)$ ดังสมการ (ก.19) และ (ก.20) ตามลำดับ

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{na} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{nb}]^T \quad (\text{ก.19})$$

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} -y(t-1) \dots -y(t-na) & u(t-nk) \dots u(t-nk-nb+1) \end{bmatrix}^T \quad (\text{ก.20})$$

การประเมินแบบจำลองว่ามีความถูกต้องเหมาะสมหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากค่าความคลาดเคลื่อนที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างค่าจริงกับค่าที่ทำนาย ซึ่งเขียนแทนด้วย

$$\varepsilon(t|\theta) = y(t) - \hat{y}(t|\theta) \quad (\text{ก.21})$$

เมื่อกำหนดให้ $V_N(\theta)$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ตลอดช่วงเวลาที่สนใจ ($t=1, \dots, N$) ดังนั้น จะได้ว่า

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta) \quad (\text{ก.22})$$

ค่าพารามิเตอร์ θ ที่ทำให้สมการ (ก.23) มีค่าน้อยที่สุด เขียนได้ดังนี้

$$\hat{\theta}_N(\theta) = \arg \min V_N(\theta) \quad (\text{ก.23})$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นตามสมการ (ก.18) สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อน $\varepsilon(t, \theta)$ และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย $V_N(\theta)$ ได้จากสมการ (ก.24) และ (ก.25) ตามลำดับ

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - \theta^T \varphi(t) \quad (\text{ก.24})$$

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y^2(t) - 2\theta^T f_N - \theta^T R_N \theta \quad (\text{ก.25})$$

เมื่อ f_N เป็นเวกเตอร์คอลัมน์ และ R_N เป็นเมทริกซ์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (ก.26) และ (ก.27) ตามลำดับ

$$f_N = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) \quad (\text{ก.26})$$

$$R_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) \quad (\text{ก.27})$$

ถ้า R_N สามารถอินเวอร์สได้ (invertible) สมการ (ก.26) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y^2(t) - f_N^T R_N^{-1} f_N + [(\theta - R_N^{-1} f_N)^T R_N (\theta - R_N^{-1} f_N)] \quad (\text{ก.28})$$

เมื่อพิจารณาสมการ (ก.28) เห็นได้ว่า ค่า $V_N(\theta)$ จะมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทอมทางด้านขวาสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\theta = \hat{\theta}_N - R_N^{-1} f_N \quad (\text{ก.29})$$

ซึ่งสามารถคำนวณค่า $\hat{\theta}_N$ ได้โดยอาศัยวิธีระบบสมการเชิงเส้น

ในกรณีแบบจำลอง ARX สมาชิกเมตริกซ์ R_N และเวกเตอร์ f_N สามารถเขียนอยู่ในรูปต่าง ๆ ดังสมการ (ก.30) ซึ่ง $\hat{\theta}_N$ ได้มาจากฟังก์ชันแปรปรวนร่วม (covariance function) ระหว่างค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

$$\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t-j)u(t-k), \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t-j)y(t-k) \text{ หรือ } \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N u(t-j)u(t-k) \quad (\text{ก.30})$$

การคำนวณ $\hat{\theta}_N$ ที่ทำให้ $V_N(\theta)$ มีค่าน้อยที่สุด สามารถอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขตามระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) หากพิจารณาสมการ (ก.32)

$$g(x) = 0 \quad (\text{ก.32})$$

ค่า x ซึ่งเป็นผลเฉลยของสมการ (ก.32) สามารถหาได้โดยการคำนวณแบบวนซ้ำ ดังสมการ (ก.33)

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - [g'(x^{(i)})]^{-1} g(x^{(i)}) \quad (\text{ก.33})$$

เมื่อ $g'(x)$ คืออนุพันธ์ของ $g(x)$ เทียบกับ x

กำหนดให้ μ เป็นช่วงการปรับการคำนวณแบบวนซ้ำ เพื่อปรับปรุงค่า $x^{(i+1)}$ ให้เป็นคำตอบที่ดีกว่า $x^{(i)}$ ดังนั้น สมการ (ก.33) จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - \mu [g'(x^{(i)})]^{-1} g(x^{(i)}) \quad (\text{ก.34})$$

ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน $V_N(\theta)$ จะมีค่าน้อยที่สุด ก็ต่อเมื่อ

$$\frac{d}{d\theta} V_N(\theta) = 0 \quad (\text{ก.35})$$

เมื่อ $V_N(\theta)$ เป็นฟังก์ชันค่าจริงที่ถูกทำอนุพันธ์เทียบกับ θ มีผลเฉลยเป็นคอลัมน์เวกเตอร์ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน สามารถหาผลเฉลย $\theta^{(i+1)}$ ได้จากสมการ (ก.36)

$$\dot{\theta}^{(i+1)} = \dot{\theta}^{(i)} - \mu [V_N''(\dot{\theta}^{(i)})]^{-1} V_N'(\dot{\theta}^{(i)}) \quad (\text{ก.36})$$

เมื่อ $V_N''(\theta)$ คืออนุพันธ์อันดับสองของ $V_N(\theta)$ เทียบกับ θ $V_N'(\theta)$ คืออนุพันธ์อันดับหนึ่งของ $V_N(\theta)$ เทียบกับ θ และ $\mu^{(i)}$ คือ ช่วงของการปรับซ้ำ

สำหรับระเบียบวิธีการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองโดยทั่วไป อาจแสดงดังแผนภูมิการดำเนินงานดังรูปที่ ก.3 โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการทดสอบระบบเพื่อทำการเก็บข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

ขั้นตอนที่ 2 หากพิจารณาเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระบบยังไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง เช่น ระดับข้อมูลบางส่วนอาจมีการเลื่อน (drift) ไปจากกลุ่มข้อมูลหลัก หรือข้อมูลอาจได้รับการรบกวนจากสัญญาณรบกวนความถี่สูง เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้ อาจจำเป็นต้องทำการปรับปรุงข้อมูลโดยอาศัยเทคนิคการกรองแบบต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสมก่อนที่จะนำข้อมูลไปคำนวณหาแบบจำลองของระบบต่อไป โดยปกติแล้วข้อมูลจากการทดสอบระบบจะถูกจัดแบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือ สองในสามส่วนของข้อมูลที่ได้จากการ

ทดสอบ ระบบจะนำไปใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองระบบ ส่วนข้อมูลส่วนที่เหลือจะนำไปใช้ในการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง (Ljung,1999)

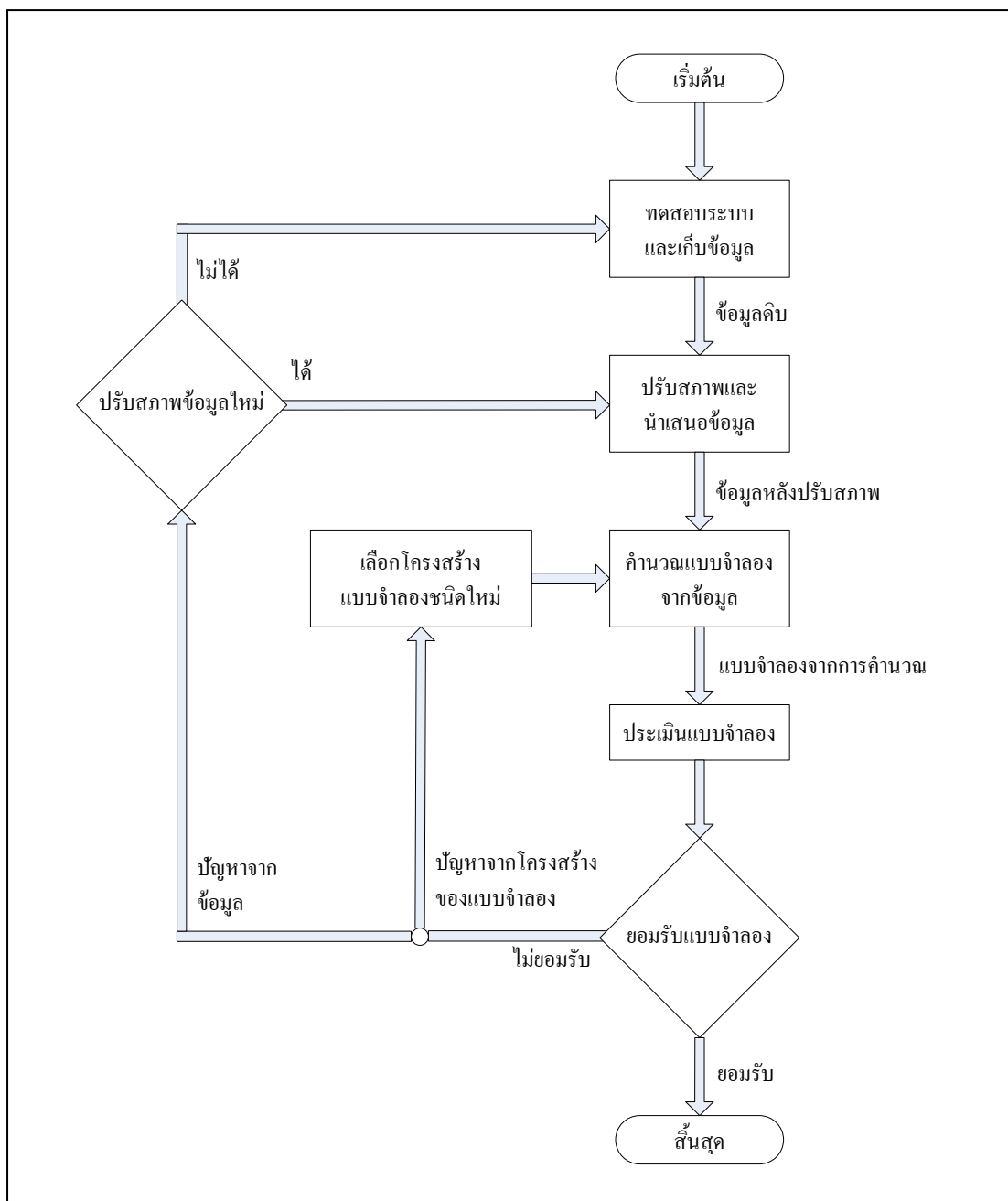
ขั้นตอนที่ 3 ในขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณหาแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบระบบที่ได้จัดเตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 2 โดยเลือกโครงสร้างของแบบจำลองตามความเหมาะสม เช่น BJ OE ARX และ ARMAX เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบระบบในส่วนที่ได้จัดเตรียมไว้สำหรับประเมินแบบจำลอง หากแบบจำลองที่ได้ สามารถแสดงพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องเป็นที่พอใจ ก็สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการต่อไป ซึ่งถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการระบุเอกลักษณ์ อย่างไรก็ตาม หากแบบจำลองที่ได้มายังไม่เป็นที่พอใจ ก็จำเป็นต้องพิจารณาหาข้อผิดพลาดตามขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองที่ได้มีข้อผิดพลาด หากพบว่าสาเหตุเกิดจากการเลือกโครงสร้างของแบบจำลองไม่เหมาะสมก็ให้ย้อนกลับไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง หากพบว่าข้อผิดพลาดของแบบจำลองเกิดจากข้อมูลที่ใช้ระบุเอกลักษณ์ไม่เหมาะสมให้ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 พิจารณาว่าข้อมูลที่ใช้คำนวณหาแบบจำลองสามารถปรับปรุงและแก้ไขเพิ่มเติมได้อีกหรือไม่ หากสามารถทำได้ให้ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง อย่างไรก็ตาม หากเห็นว่าไม่สามารถปรับปรุงข้อมูลต่อไปได้ ให้ย้อนกลับไปทดสอบระบบและเก็บข้อมูลตามขั้นตอนที่ 1 ใหม่อีกครั้ง

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ได้มีการพัฒนาไปอย่างก้าวไกล ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินงานเพื่อระบุเอกลักษณ์แบบจำลองระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนของการปรับปรุงข้อมูลการคำนวณแบบจำลอง และการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง เป็นต้น



รูปที่ ก.3 แผนภูมิการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์แบบจำลองระบบ

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Sornmuang, S., and Sujitjorn, S. (2010). **GA-Based PIDA Control Design Optimization with an Application to AC Motor Speed Control**. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. 4(3):67-80.

วารสารการประชุมสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติ

Sornmuang, S., and Sujitjorn, S. (2010). **GA-Based PIDA Control Design**. 10th WSEAS International Conference on Systems Theory and Scientific Computation (ISTASC'10). 192-197.

วารสารวิชาการระดับชาติ

สุนิสา สอนเมือง สุภชัย ชุมแสงวาปี และสราวุฒิ์ สุจิตจร (2553). เทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอ (PIDA-controller) กับการควบคุมมอเตอร์กระแสลับ. วารสาร Electrical & Control (E&C). 30-37.

GA-Based PIDA Control Design Optimization with an Application to AC Motor Speed Control

Sunisa Sommuang and Sarawut Sujitjorn*

Abstract—PIDA controller has been proposed since 1996 as an extension to the conventional PID controller. The additional term “A” stands for acceleration. With this new term, a closed-loop system can respond faster with less overshoot. Originally, the design utilizes the dominant pole concept proceeded in the s -plane. As shown by simulation, this design approach is not suitable for high-order plants having delays and complex oscillatory modes. The article proposes an algebraic design approach which also utilizes the genetic algorithm (GA) to achieve design optimality. Comparison studies among the previous method, the gradient-search based method and the proposed approach are elaborated. Such studies were conducted against some benchmark plants defined by Astrom and Hagglund. As a result, the GA method with heuristically defined solution boundaries provides superior results. The proposed approach has been successfully applied to the speed control of an AC motor.

Keywords—Genetic algorithm, gradient search, optimization, PIDA controller, pole placement, speed control of ac motor.

I. INTRODUCTION

PID controller has been a worldwide solution for an effective control for many years. Researchers have paid a lot of attention to its design as evidenced by a great member of published patents and articles. For instance, some recent literatures include but not exhaustive (i) a collection of PIDA tuning rules [1], (ii) model-free design method based on experimental frequency response data [2], (iii) frequency-domain sensitivity-based design method [3]-[4], (iv) new auto tuning algorithms [5], an adaptive PID control using knowledge-based method [6], robust PID design via evolutionary computation [7], etc. Despite the existing knowledge, the PIDA controller was introduced in 1996 by Jung and Dorf [8], and claimed to deliver faster and smoother response than the PID could. The PIDA controller has been successfully applied to torsional resonance suppression [9], and control of an induction motor model [10], respectively.

So far, there have not been published works detailing the performance studies of the PIDA controller. Design details yet have not been proposed to achieve system optimality. This article offers contributions in the following issues: an investigation of the effectiveness of the Jung and Dorf's design

method, a new optimally algebraic design approach based on genetic algorithm (GA), a comparison study between the gradient search (GS) method and the proposed one, and application to speed control of a 3-phase motor.

II. PROBLEM FORMULATION

To develop a method of control design, a simplified control system represented by the diagram in fig. 1 is considered. The plants for benchmarking the design methods have been proposed by Astrom and Hagglund [11] as follows:

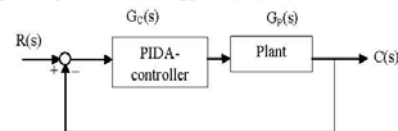


Fig. 1 A closed-loop system.

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

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

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

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

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

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

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

The PIDA controller has a practical form of (1) including the low-pass filters. Four parameters of the controller are K_p , K_i , K_d and K_a , respectively, whilst d , e and f are filter parameters. An alternative representation in a polynomial form results in the following parameters: k , a , b , z , d and e , respectively. The design objective is to achieve a minimum response error due to a unit step input. Hence, the following performance specifications, i.e. rise-time, percent overshoot, settling time and steady-state errors, are considered.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{(s+f)} + \frac{K_a s^2}{(s+d)(s+e)} \quad (1)$$

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

Manuscript received September 1, 2010. This work was supported by Suranaree University of Technology, Thailand, under Grant SUT7-711-52-12-56.

The authors are with the School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

*corresponding author: (sarawut@sut.ac.th).

III. DOMINANT POLE BASED DESIGN

The design method in [8] is based on a pair of dominant complex poles. Locations of the desired poles are arbitrary. Thus, to obtain a satisfactory result is a time consuming task if conducted manually. Even though with an aid of a computer, a few to several trials-and-errors to obtain a satisfactory design are inevitable. The readers may refer to [8] for the design procedures. The list below indicates the obtained PIDA controllers for the plants.

$$\text{Plant 1 : } Gc(s) = \frac{14.17s^3 + 74.91s^2 + 185.7s + 175.8}{s}$$

$$\text{Plant 2 : } Gc(s) = \frac{3022s^3 + 27690s^2 + 106900s + 153600}{s}$$

$$\text{Plant 3 : } Gc(s) = \frac{1.96s^3 + 8.49s^2 + 14.81s + 10.48}{s}$$

$$\text{Plant 4 : } Gc(s) = \frac{-0.06s^3 + 7.64s^2 + 23.6s + 16.3}{s}$$

$$\text{Plant 5 : } Gc(s) = \frac{-83.57s^3 - 564.4s^2 - 1603s - 1540}{s}$$

$$\text{Plant 6 : } Gc(s) = \frac{0.19s^3 - 4.97s^2 - 60.83s - 116}{s}$$

$$\text{Plant 7 : } Gc(s) = \frac{35.1s^3 + 205s^2 + 533.6s + 529.8}{s}$$

Fig 2 illustrates the simulated step responses of the closed-loop systems. It can be noticed that some plants are not well stabilized, some are stable but unable to produce good responses. This is due to the difficulty to accomplish optimal design goals manually. Furthermore, only one pair of dominant poles may not satisfactorily govern these complex plants.

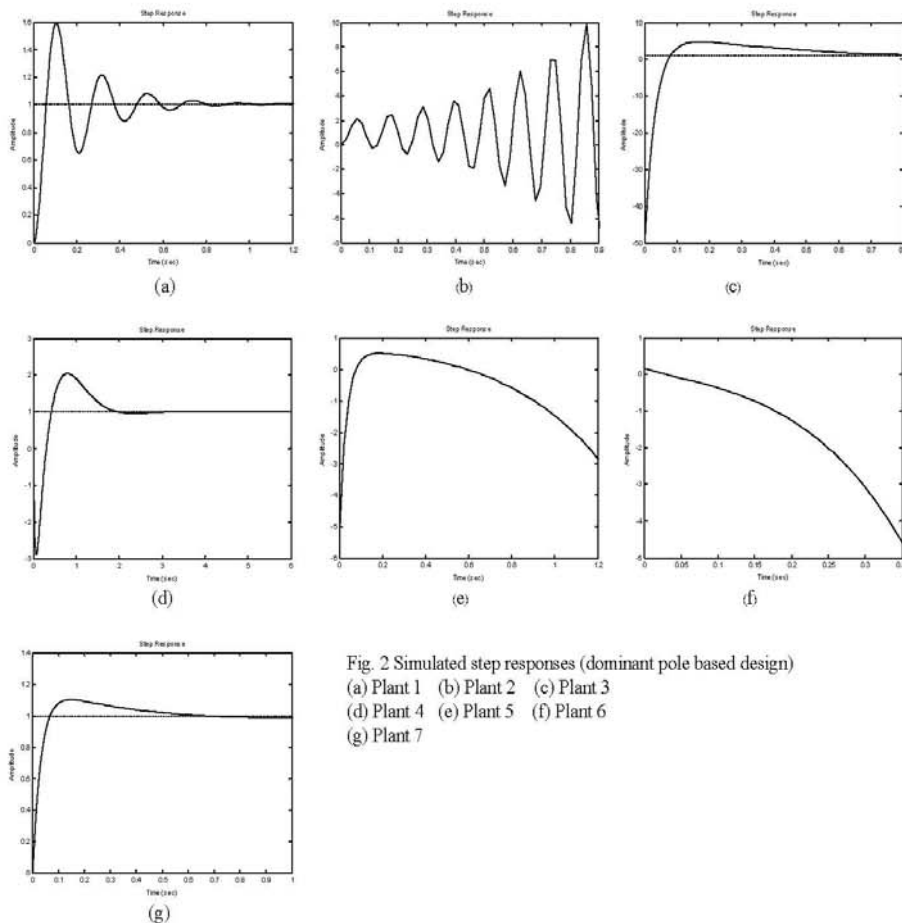


Fig. 2 Simulated step responses (dominant pole based design)

(a) Plant 1 (b) Plant 2 (c) Plant 3
(d) Plant 4 (e) Plant 5 (f) Plant 6
(g) Plant 7

IV. OPTIMAL ALGEBRAIC DESIGN

To reach an optimal pole-placement goal, some algebraic expressions have been derived. Firstly assume that the plant is described by a proper transfer function

$$G_p(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n} \quad (2)$$

, and the closed-loop system possesses the characteristic equation

$$s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0 \quad (3)$$

, in which $m = n+3$ (n is the plant order). Closed-loop pole-placement is achieved by solving (4).

$$\begin{bmatrix} p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_2 & p_1 & 1 & 0 & a_0 & a_1 & a_2 \\ p_3 & p_2 & p_1 & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_n & p_{n-1} & p_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & p_n & p_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

, where $[x]^T = (1 + k\alpha_n)^{-1}$

$$[1 \ (d+e) \ de \ abzk \ k(ab+z(a+b)) \ k(a+b+z)) \ k] \quad (5)$$

In this case, there are $n+3$ equations with 7 unknowns. Secondly, the plant is represented by a strictly proper transfer function

$$G_p(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_1 s^l + a_2 s^{l-1} + \dots + a_l}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n}, \quad l < n \quad (6)$$

, and the closed-loop characteristic equation is also expressed by (3). Equation (7) has been derived for the pole-placement design

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ p_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ p_2 & p_1 & 0 & a_1 & a_2 & \vdots \\ \vdots & p_2 & a_1 & a_2 & \vdots & a_{n-1} \\ p_{n-1} & \vdots & a_2 & \vdots & a_{n-1} & a_n \\ p_n & p_{n-1} & \vdots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - p_1 \\ \alpha_2 - p_2 \\ \vdots \\ \alpha_n - p_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

, where $[x]^T = [(d+e) \ de \ abzk \ k(ab+z(a+b)) \ k(a+b+z)) \ k]$.

In this case, there are $n+3$ equations with 6 unknowns. It is observed that some numerical approximations are necessary for solving such over/underdetermined cases. MATLAB has been used to solve these equations. Derivation of (4) and (7) appears in the appendix.

A. The gradient search

The gradient search (GS) method is a classic approach for optimization problems. The method has been applied for this particular control problem, and represented by the flow diagram in fig. 3. In the figure, the ϵ_m stands for the acceptable threshold of the gradient $\|\nabla J\|$, in which the objective function J can be calculated using (8)

$$J = \int |e|^2 dt + \rho \left[\min \{ (P.O._{boundary} - P.O._{search}), 0 \}^2 + \min \{ (tr_{boundary} - tr_{search}), 0 \}^2 + \min \{ (ts_{boundary} - ts_{search}), 0 \}^2 + \min \{ (ess_{boundary} - ess_{search}), 0 \}^2 \right] \quad (8)$$

, where $e(t)$ is the errors between the input and the output of the system, and ρ is the penalty factor set to 1,000. Noticeably, it is constructed from the time-domain performance specifications.

B. The genetic algorithm

The genetic algorithm (GA) is one of the efficient evolutionary algorithms. The algorithm has been applied to search for optimal solution for this control problem. The flow diagram in fig. 4 represents the work flow of the PIDA control design based on GA attempting to establish a set of optimal controller parameters minimizing the objective function J in (9), constructed under a similar concept to (8).

$$J = \int |e|^2 dt + (P.O._{boundary} - P.O._{search}) + (tr_{boundary} - tr_{search}) + (ts_{boundary} - ts_{search}) + (ess_{boundary} - ess_{search}) \quad (9)$$

TABLE I
SYMBOLS FOR OBJECTIVE FUNCTIONS

Symbols	Meanings
$P.O._{boundary}$	percent overshoot allowance
$P.O._{search}$	percent overshoot from search
$tr_{boundary}$	rise-time allowance
tr_{search}	rise-time from search
$ts_{boundary}$	settling time allowance
ts_{search}	settling time from search
$ess_{boundary}$	steady-state error allowance
ess_{search}	steady-state error from search

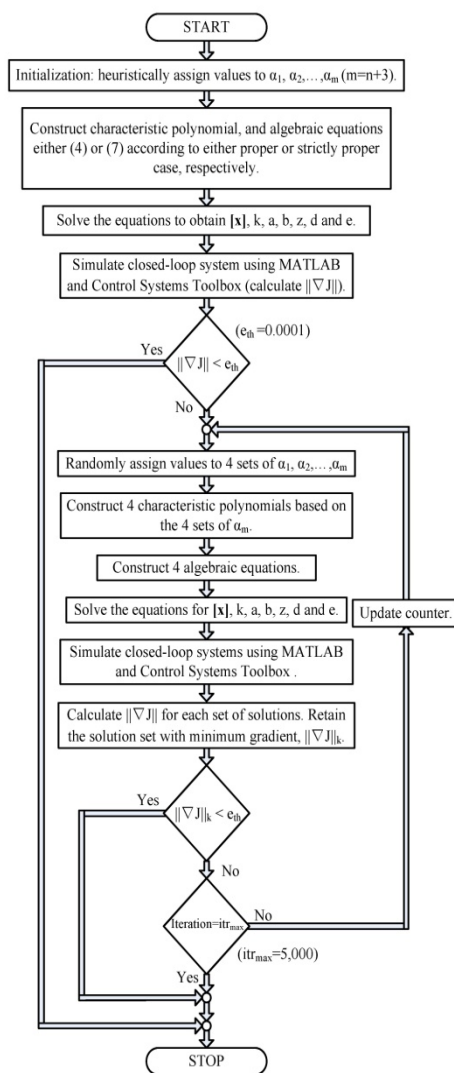


Fig. 3 Flow diagram of the GS method.

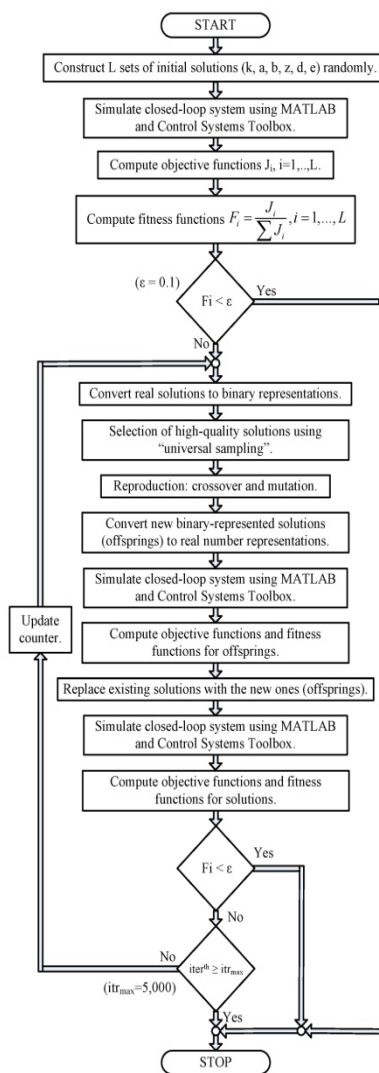


Fig. 4 Flow diagram of the GA method.

V. SIMULATION RESULTS

The optimal PIDA controllers resulted from the GS and GA based methods are summarized in Table II. Fig. 5 illustrates the closed-loop step responses. It can be observed that the GA based method results in the controllers of better performances for all cases in terms of rapid settling, low overshoot and stabilization. The numerical results concerning performances shown in Table II also confirm this. In addition, the results obtained from the GS method are used to aid the formation of solution boundaries for the GA method. In effect, the GA

could converge to high-quality solutions more rapidly. Fig. 6 illustrates the responses to step inputs and disturbances. Notice that, the systems with the controllers searched by the GA respond better to the input commands, and recover better from the external disturbances. The sensitivity (s_G^x) functions are shown in Fig. 7. Both approaches provide very similar sensitivity characteristics in terms of rapid tracking response, and effective disturbance rejection, respectively.

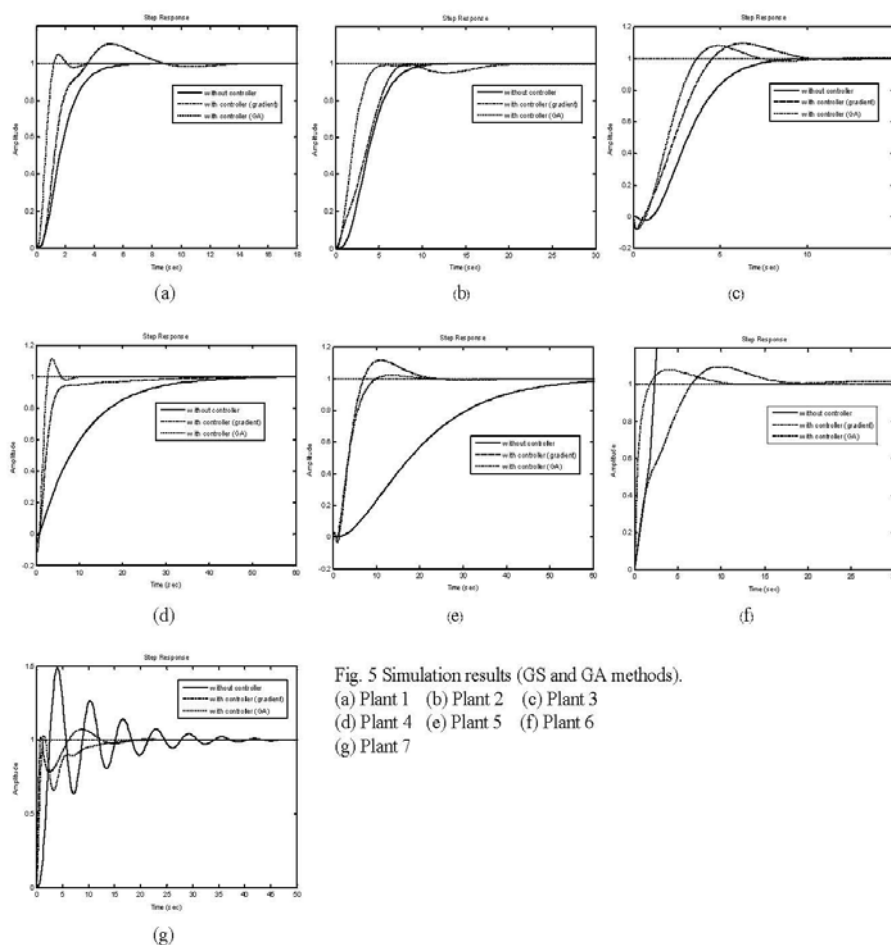
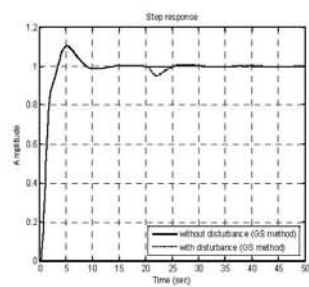
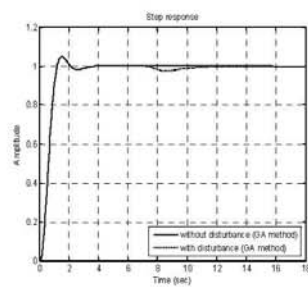


Fig. 5 Simulation results (GS and GA methods).

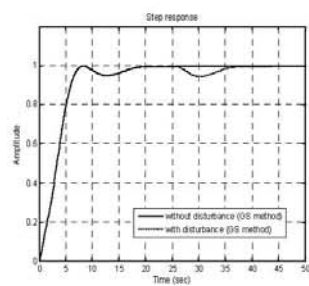
(a) Plant 1 (b) Plant 2 (c) Plant 3
(d) Plant 4 (e) Plant 5 (f) Plant 6
(g) Plant 7



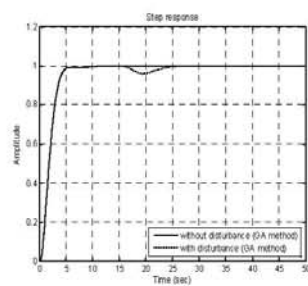
(a)



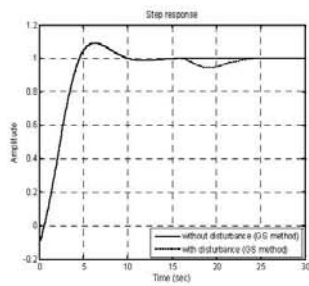
(b)



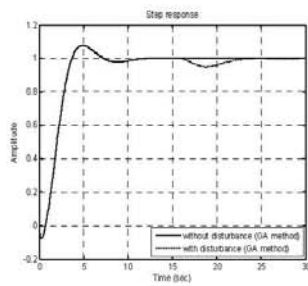
(c)



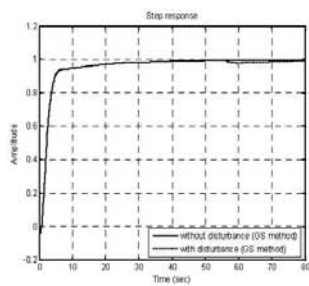
(d)



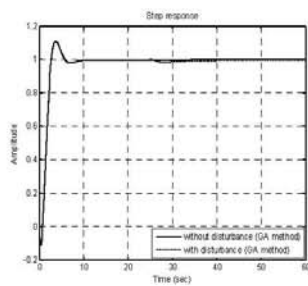
(e)



(f)



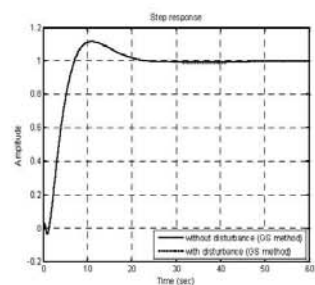
(g)



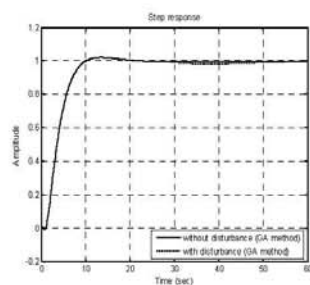
(h)

Fig. 6 Responses to step inputs and disturbances (GS and GA methods).

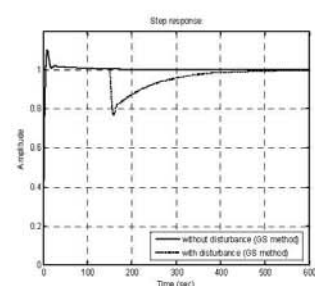
(a) Plant 1 (GS method) (b) Plant 1 (GA method) (c) Plant 2 (GS method) (d) Plant 2 (GA method)
 (e) Plant 3 (GS method) (f) Plant 3 (GA method) (g) Plant 4 (GS method) (h) Plant 4 (GA method)



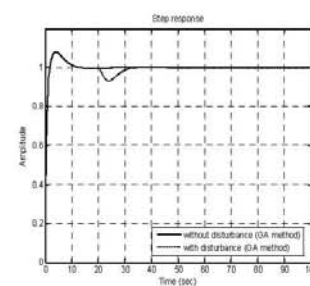
(i)



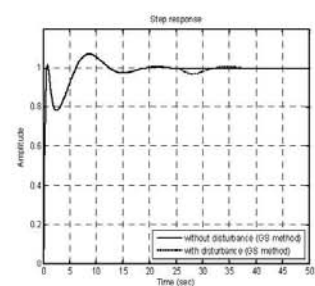
(j)



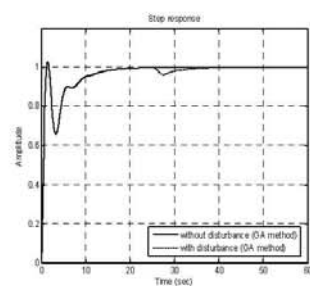
(k)



(l)



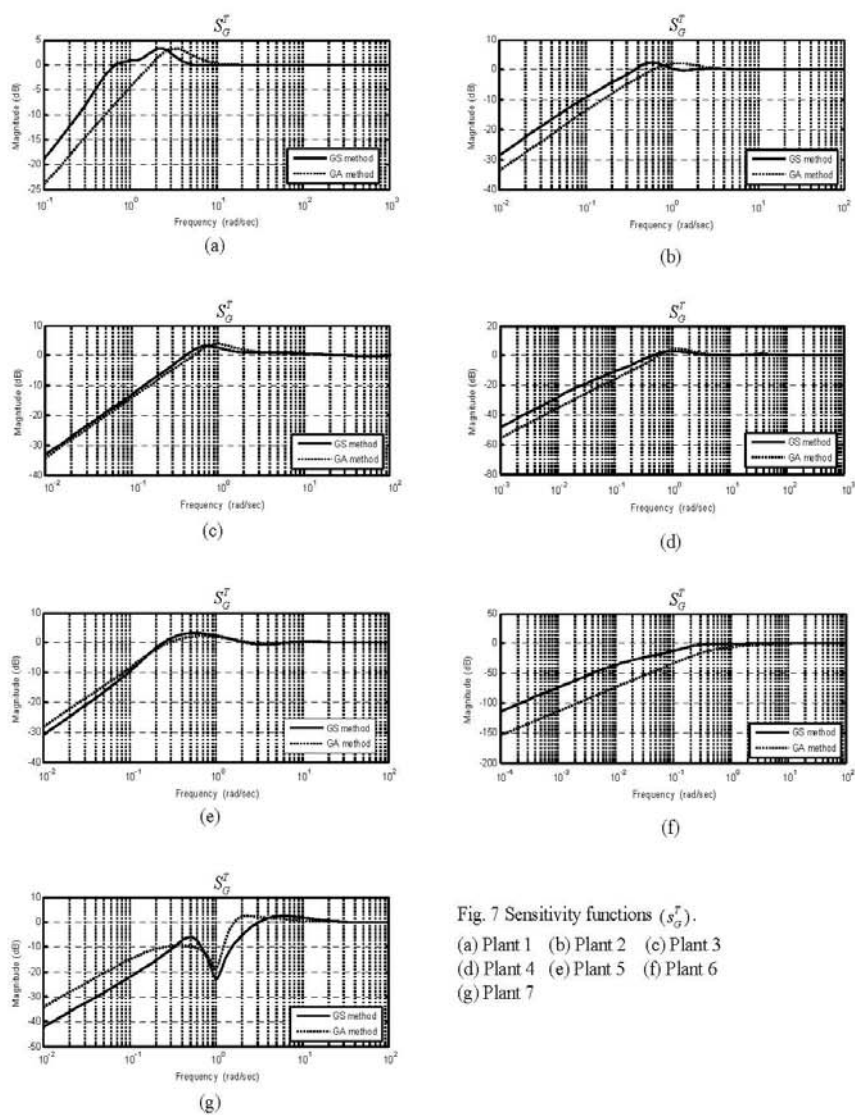
(m)



(n)

Fig. 6 (Cont.)

- (i) Plant 5 (GS method) (j) Plant 5 (GA method)
 (k) Plant 6 (GS method) (l) Plant 6 (GA method)
 (m) Plant 7 (GS method) (n) Plant 7 (GA method)

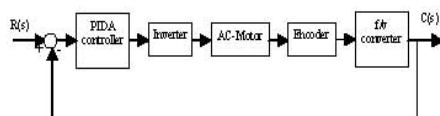
Fig. 7 Sensitivity functions (s_g^r).

(a) Plant 1 (b) Plant 2 (c) Plant 3
 (d) Plant 4 (e) Plant 5 (f) Plant 6
 (g) Plant 7

TABLE II. THE OBTAINED PIDA CONTROLLER

Plant	GIS method						GA method					
	Controller	GM (dB)	PM (deg)	tr (s)	ts (s)	P.O. (%)	Controller	GM (dB)	PM (deg)	tr (s)	ts (s)	P.O. (%)
1	$\frac{-0.071s^3 + 15.92s^2 + 16.74s + 14.6}{s^3 + 8.1s^2 + 16.38s}$	11.2	61	1.8	8.03	10.5	$\frac{-74.45s^3 + 2.09 \times 10^4 s^2 + 5.12 \times 10^4 s + 3.11 \times 10^4}{s^3 + 2889s^2 + 1.95 \times 10^5 s}$	15	63.2	0.73	1.9	4.77
2	$\frac{673.8s^3 + 375.5s^2 + 854.9s + 231}{s^3 + 58.96s^2 + 869.1s}$	37.4	72.5	5.12	16.8	0	$\frac{89.52s^3 + 236.2s^2 + 203.4s + 56.93}{s^3 + 21.76s^2 + 118.4s}$	20.9	70.4	2.77	4.69	0
3	$\frac{174.3s^3 + 525.7s^2 + 848.3s + 379}{s^3 + 57.91s^2 + 838.5s}$	19.8	57.9	2.9	9.04	9.26	$\frac{146.7s^3 + 790.2s^2 + 1251s + 478.7}{s^3 + 63.28s^2 + 945.1s}$	14.2	58.1	2.14	6.63	7.91
4	$\frac{79.53s^3 + 3.31 \times 10^{-15} s^2 + 3887s + 260}{s^3 + 63.14s^2 + 996.5s}$	14	71.7	3.71	40	25.4	$\frac{29.9s^3 - 1.66 \times 10^4 s^2 + 2.15 \times 10^6 s + 1.99 \times 10^5}{s^3 + 1168s^2 + 3.27 \times 10^5 s}$	9.49	53.8	1.42	5.35	11
5	$\frac{-2477s^3 + 6207s^2 + 1894s + 107.6}{s^3 + 35.32s^2 + 311.8s}$	12.7	55.9	4.06	19.7	11.6	$\frac{-47.49s^3 + 2849s^2 + 655.2s + 31.61}{s^3 + 33.76s^2 + 126.2s}$	14.9	67.7	5.36	9.07	2
6	$\frac{6.664s^3 + 3.197s^2 + 2.602s + 0.02777}{s^3 + 4.69s^2 + 5.498s}$	Inf	70.6	5.01	16.3	9.91	$\frac{140s^3 + 253.7s^2 + 149.9s + 29.06}{s^3 + 15.59s^2 + 60.74s}$	Inf	98.3	1.03	9.12	8.06
7	$\frac{714.1s^3 + 1281s^2 + 423.4s + 331}{s^3 + 32.1s^2 + 257.6s}$	20.6	59.2	0.44	16.3	7.27	$\frac{676.1s^3 + 1532s^2 + 1146s + 283.1}{s^3 + 71.71s^2 + 555.6s}$	34.1	47.1	0.81	14.1	2.8

VI. APPLICATION



(a)



(b)

Fig. 8 Closed-loop speed control of a 3-phase motor (a) block diagram, (b) experimental setup.

The GA-based optimal design has been applied to control the speed of a 3-phase induction motor (a Panasonic MAS04-90Y, 90W, 4P). A step-transient test was conducted for the identification of the motor model at the 600 rpm operating point. The identification using MATLAB and System Identification Toolbox results in a 3rd-order plant model expressed by (10). The GA search provides the controller

$$G_p(s) = \frac{3599s + 240000}{s^3 + 548.3s^2 + 77870s + 241900} \quad (10).$$

of the form (1), in which $K_p = 25.22$, $K_i = 79.62$, $K_d = 456.89$, $K_a = 2070.9$, $d = 42549$ and $e = 42549$, respectively. Driving the motor requires a PWM inverter and the controller implemented. The inverter used is a Toshiba VFS11-2002PM. Implementation of the controller uses op-amp RC networks to ensure real-time operation. The circuit diagram in Fig. 9 depicts the PIDA controller realizing the mentioned parameters.

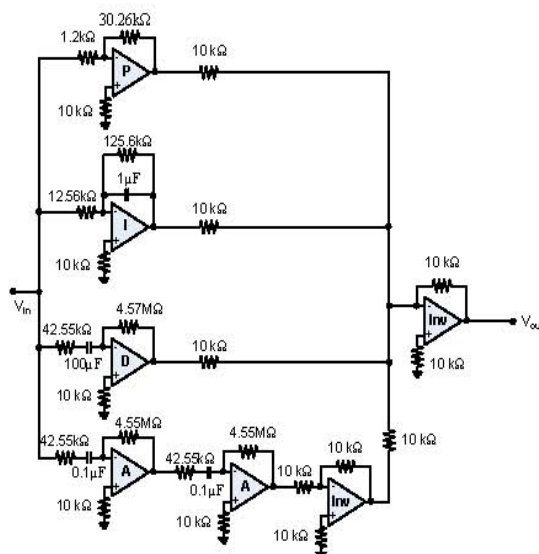


Fig. 9 Analog implementation of the controller.

It is necessary to realistically investigate the closed-loop system though simulation using PSIM in which the op-amp saturation limits can be taken into account. Fig. 10 illustrates

the PSIM simulation diagram in which the motor is represented by (10).

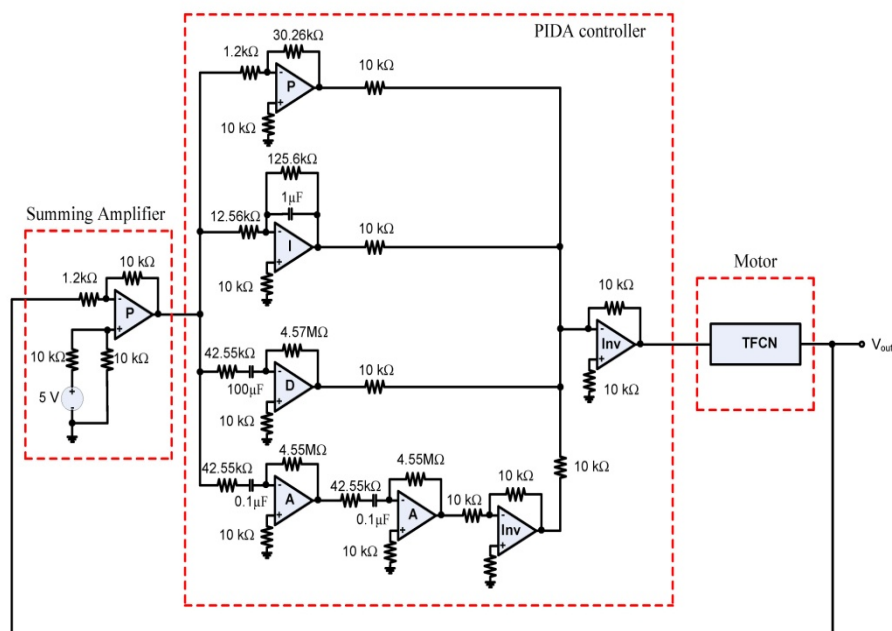


Fig. 10 Simulation diagram for PSIM.

The PSIM results appear in Fig. 11 including the realistic control signal (a) and the motor speed (b). The rise-time and settling time of the simulated speed are about 0.1 and 0.45 s, respectively. Fig. 12 illustrates the measured speed curves of

the open-loop motor (a) and the PIDA controlled motor (b), respectively. Noticeably, the actual speed with the PIDA controller agree very well with the simulated result in Fig. 11(b).

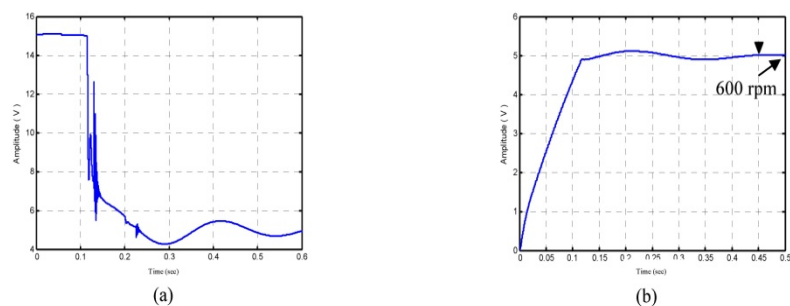
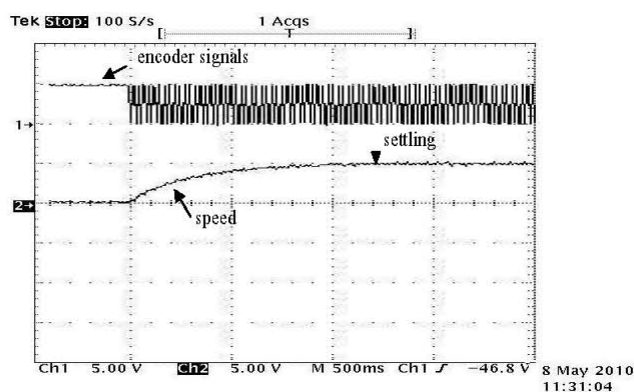
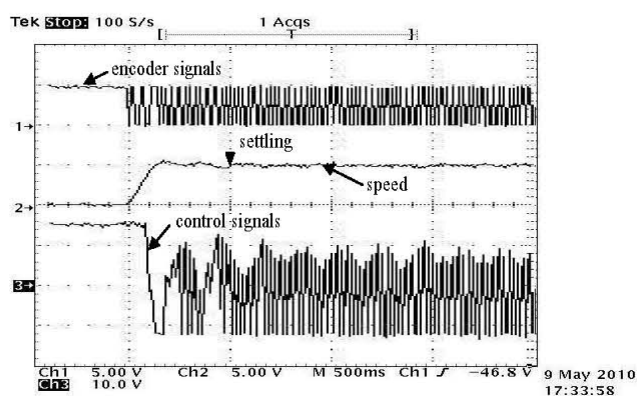


Fig. 11 PSIM results (a) control signal, (b) motor speed.



(a)



(b)

Fig. 12 Experimental speed responses of the motor. (a) without controller, (b) with controller

VII. CONCLUSION

This paper has briefly reviewed the conventional design of the PIDA controller based on the dominant pole concept. It provides the design results tested against some difficult to be controlled plants proposed by Astrom and Hagglund for benchmarking. It is evident that the conventional design approach fails in most cases due to the use of only one pair of dominant poles. This does not mean that the root-locus based method would fail. The authors believe that the method can be successfully applied if more complicated pole and zero assignments are considered with an aid of computing. The paper offers contributions to optimal design of the PIDA controller using search methods. The proposed method can be

viewed as optimal pole placement with an aid of the gradient search (GS) and the genetic algorithm (GA). The algorithms are reviewed in the paper. Simulation results indicate that the GA-based method provide controllers with better closed-loop performances in comparison with the GS-based method. The paper also elaborates the control system implementation for an AC motor speed control. An analog controller has been used to ensure real-time operation. To obtain realistic simulation results, the closed-loop speed control of a 90 W-3ph induction motor is simulated on PSIM. Experimental results with a PWM inverter drive show a very good agreement with simulations, and indicate that the controlled motor responds about 2.4 times faster than the open-loop motor does.

APPENDIX

Derivations of (4) and (7).

Case I – Proper plant ($a_0 \neq 0$)

$$G_P(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n} \quad (a.1)$$

Characteristic equation of the closed-loop system is

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

Equate (a.2) with $s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_m = 0$ ($m=n+3$), one can obtain (a.3)-(a.9)

$$\frac{p_1 + (d+e) + (a+b+z)ka_0 + ka_1}{1+ka_0} = \alpha_1 \quad (a.3)$$

$$\frac{\left\{ \begin{aligned} & p_2 + (d+e)p_1 + de + (ab+z(b+a))ka_0 \\ & + (a+b+z)ka_1 + ka_2 \end{aligned} \right\}}{1+ka_0} = \alpha_2 \quad (a.4)$$

$$\frac{\left\{ \begin{aligned} & p_3 + (d+e)p_2 + dep_1 + abzka_0 \\ & + (ab+z(b+a))ka_1 + (a+b+z)ka_2 + ka_3 \end{aligned} \right\}}{1+ka_0} = \alpha_3 \quad (a.5)$$

$$\frac{\left\{ \begin{aligned} & p_n + (d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-2} \\ & + abzka_{n-3} + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n \end{aligned} \right\}}{1+ka_0} = \alpha_n \quad (a.6)$$

$$\frac{\left\{ \begin{aligned} & (d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} \\ & + (ab+z(b+a))ka_{n-1} + (a+b+z)ka_n \end{aligned} \right\}}{1+ka_0} = \alpha_{n+1} \quad (a.7)$$

$$\frac{dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n}{1+ka_0} = \alpha_{n+2} \quad (a.8)$$

$$\frac{abzka_n}{1+ka_0} = \alpha_{n+3} \quad (a.9)$$

, and hence the following equation is obtained

$$\begin{bmatrix} p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_2 & p_1 & 1 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \\ p_3 & p_2 & p_1 & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_n & p_{n-1} & p_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & p_n & p_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (a.10)$$

, which is (4),

, where $[x]^T = (1+ka_0)^{-1}$

$$[1 \ (d+e) \ de \ abzka \ k(ab+z(b+a)) \ k(a+b+z) \ k]$$

Case II – Strictly proper plant ($a_0 = 0$)

$$G_P(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{a_1 s^j + a_2 s^{j-1} + \dots + a_l}{s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_n} \quad (a.11)$$

Characteristic equation of the closed-loop system is

$$\begin{aligned} & s^n + (p_1 + d + e + ka_1) s^{n-1} \\ & + (p_2 + (d+e)p_1 + de + (a+b+z)ka_1 + ka_2) s^{n-2} \\ & + \left[\frac{p_3 + (d+e)p_2 + dep_1 + (ab+z(b+a))ka_1}{1+ka_0} + \frac{(a+b+z)ka_2 + ka_3}{1+ka_0} \right] s^{n-3} \\ & \dots \\ & \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[p_n + (d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} \right. \\
& \quad \left. + (ab+z(b+a))ka_{n-2} + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n \right] s^3 \\
& + \left[(d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-1} \right. \\
& \quad \left. + (a+b+z)ka_n \right] s^2 \\
& + (dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n)s + abzka_n = 0 \quad (a.12)
\end{aligned}$$

Equate (a.12) with $s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$ ($m=n+3$), one can obtain (a.13)-(a.19)

$$(d+e) + ka_1 = \alpha_1 - p_1 \quad (a.13)$$

$$(d+e)p_1 + de + (a+b+z)ka_1 + ka_2 = \alpha_2 - p_2 \quad (a.14)$$

$$\begin{aligned}
& (d+e)p_2 + dep_1 + (ab+z(b+a))ka_1 + (a+b+z)ka_2 \\
& + ka_3 = \alpha_3 - p_3 \quad (a.15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \\
& \cdot \\
& \cdot \\
& (d+e)p_{n-1} + dep_{n-2} + abzka_{n-3} + (ab+z(b+a))ka_{n-2} \\
& + (a+b+z)ka_{n-1} + ka_n = \alpha_n - p_n \quad (a.16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (d+e)p_n + dep_{n-1} + abzka_{n-2} + (ab+z(b+a))ka_{n-1} \\
& + (a+b+z)ka_n = \alpha_{n+1} \quad (a.17)
\end{aligned}$$

$$dep_n + abzka_{n-1} + (ab+z(b+a))ka_n = \alpha_{n+2} \quad (a.18)$$

$$abzka_n = \alpha_{n+3} \quad (a.19)$$

, and hence the following equation is obtained

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ p_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ p_2 & p_1 & 0 & a_1 & a_2 & \vdots \\ \vdots & p_2 & a_1 & a_2 & \vdots & a_{n-1} \\ p_{n-1} & \vdots & a_2 & \vdots & a_{n-1} & a_n \\ p_n & p_{n-1} & \vdots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ 0 & p_n & a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - p_1 \\ \alpha_2 - p_2 \\ \vdots \\ \alpha_n - p_n \\ \alpha_{n+1} \\ \alpha_{n+2} \\ \alpha_{n+3} \end{bmatrix} \quad (a.20)$$

, which is (7).

, where $[x]^T = [(d+e) \ de \ abzk \ k(ab+z(a+b)) \ k(a+b+z) \ k]$.

ACKNOWLEDGMENT

The authors' thanks are due to Mr Supachai Chumwangwapee for his valuable suggestions, and Premier Automation Center Ltd., Bangkok, Thailand, for supporting the drive system.

REFERENCES

- [1] K.H. Ang, G. Chong and Y. Li, "PID Control System Analysis, Design and Technology," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559-576, 2005.
- [2] L.H. Keel and S.P. Bhattacharyya, "Controller Synthesis Free of Analytical Models: Three Term Controllers," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 53, no. 6, pp. 1353-1369, 2008.
- [3] T. Emami and J.M. Watkins, "Robust Performance Characterization of PID Controllers in The Frequency Domain," *WSEAS Trans. Systems and Control*, vol. 4, no. 5, pp. 232-242, 2009.
- [4] T. Emami and J.M. Watkins, "A Unified Approach for Sensitivity Design of PID Controllers in The Frequency Domain," *WSEAS Trans. Systems and Control*, vol. 4, no. 5, pp. 221-231, 2009.
- [5] B. Sule and S. Vrana, "Some Observations on Development and Testing of A Simple Tuning Algorithm for PID Controllers," *WSEAS Trans. Systems and Control*, vol. 2, no. 10, pp. 497-508, 2009.
- [6] M. Foltin, J. Murgas and I. Sekaj, "A New Adaptive PID Control Approach Based on Closed-Loop Response Recognition," *WSEAS Trans. Systems*, vol. 5, no. 7, pp. 1738-1742, 2006.
- [7] T. Kawabe, "Evolutionary Computation Method of Robust 2DOF PID Controller Design for Time-Delay Systems," *WSEAS Trans. Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 340-346, 2006.
- [8] S. Jung and R.C. Dorf, "Analytic PIDA Controller Design Technique for A Third Order System," in *Proc. 35th IEEE Conf. Decision and Control*, Kobe, Japan, 1996, pp. 2513-2518.
- [9] U-Thaiwasin, S. Sujitjorn, Y. Prempranserach and J. Ngamwivit, "Torsional Resonance Suppression via PIDA Controller," in *Proc. IEEE Reg.-10 Conf.-TENCON 2000*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2000, pp. 498-503.
- [10] D-Y. Ha, I-Y. Lee, Y-S. Cho, Y-D. Lim and B-K. Choi, "The Design of PIDA Controller with Pre-compensator," in *Proc. IEEE Int. Symp. ISIE 2001*, Pusan, Korea, 2001, pp. 798-804.
- [11] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Benchmark Systems for PID Control," in *Proc. IFAC Int. Conf. Digital Control: Past, Present and Future of PID Control*, Terrassa, Spain, 2000, pp. 165-166.



Sunisa Sornmuang was born in 1984, Nakhonsawan, Thailand. She received her BEng (EE) in 2005 from Suranaree University of Technology (SUT), Thailand. She is currently a post-graduate student working towards her master's degree in electrical engineering at SUT. Her research interests include applied AI and control systems.



Sarawut Sujitjorn received his PhD (EE) in 1987 from the University of Birmingham, UK. He is a professor of electrical engineering at the School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His research interests include control and intelligent systems, metaheuristics, power converters, signal processing and hybrid power filters.

เทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอ(PIDA-controller) กับการควบคุมมอเตอร์กระแสสลับ

ศุภิสรา สอนเมือง¹, ศุภชัย ขุนแวงวาปี², สราวุธ สุจิตกร¹

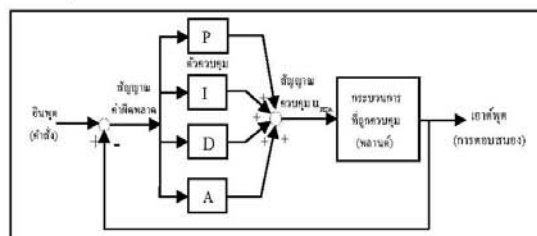
¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²บริษัท พรีเมียร์ ออโตเมชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด

1.1 บทนำ

ตัวควบคุมพีไอดีหรือ PID-controllerเป็นที่รู้จัก และได้รับการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งมักพบว่าตัวควบคุมสำเร็จรูปที่อาจบรรจุอยู่ในกล่องปิด ได้รับการนำมาติดตั้งเพื่อใช้งาน โดยมีหน้าที่ให้ผู้ปรับเกนของตัวควบคุมได้ ส่วนที่เป็นเทคโนโลยีของตัวควบคุมจึงถูกปิดบังซ่อนไว้ ทำให้การพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืนโดยคนไทยเป็นไปได้ยาก บทความนี้จะมุ่งนำเสนอเทคโนโลยีตัวควบคุมทั้งแบบแอนะล็อกและดิจิทัล ที่ให้รายละเอียดพร้อมใช้งานสำหรับวิศวกรและช่างไทยนำไปปรับใช้กับงานต่างๆ มิได้นำเสนอภาคทฤษฎีของการออกแบบตัวควบคุมแต่อย่างใด

อย่างไรก็ตามในปีค.ศ.1996 Dorf และคณะ [1] ได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมพลาตันต์อันดับสามด้วยตัวควบคุมพีไอดีอาจล้มเหลว จึงได้นำเสนอพจน์ A (ย่อมาจาก acceleration) เพื่อเติมเข้ากับตัวควบคุมพีไอดี และเรียกตัวควบคุมนี้ว่าพีไอดีเอ (PIDA-controller) โดยหลักแล้วพจน์พีไอดีและดียังคงเดิม ดังเช่นที่แสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบปิดมีตัวควบคุมแบบพีไอดีเอ

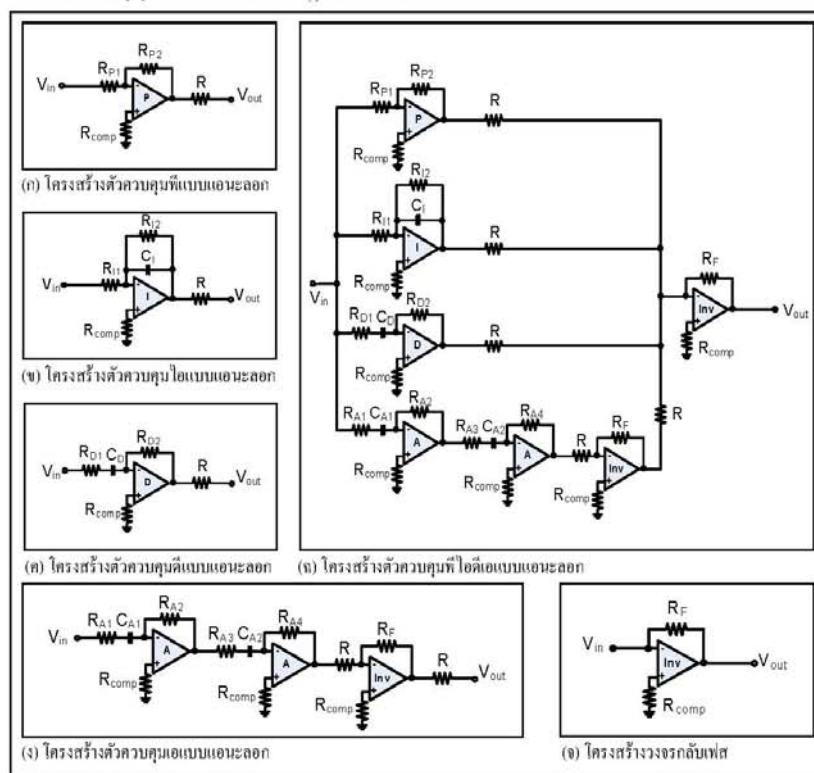
วิจัยในภาคทฤษฎีโดยคณะผู้เขียนเดียวกันป่งชี้ว่า ตัวควบคุมพีไอดีที่มีสมรรถนะจำกัดและล้มเหลวได้ง่ายต่อการควบคุมพลาตันต์หรือกระบวนการอันดับสูงๆ หรือที่มีเวลาประวิงมากๆ พลาตันต์หรือกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ มอเตอร์กระแสสลับ กระบวนการทางเคมี เป็นต้น ผู้ที่สนใจผลศึกษานี้ในรายละเอียด สามารถดาวน์โหลดข้อมูล e-book[2] ได้ฟรีที่ <http://www.sut.ac.th/engineering/electrical/carg/index1.htm> นอกจากนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอสำหรับพลาตันต์ที่มีพลวัตซับซ้อน จำเป็นต้องใช้การคำนวณแบบวนซ้ำ เนื้อหารายละเอียดการออกแบบตัวควบคุม ตลอดจนโปรแกรมช่วยออกแบบสามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้ฟรีจาก website มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเช่นกัน

เนื้อหาของบทความนี้ในหัวข้อต่อไป จึงเป็นโครงสร้างของวงจรตัวควบคุมแบบแอนะล็อกพร้อมความสัมพันธ์ในวงจร สำหรับการคำนวณค่า components ต่างๆ ให้ทำงานตามค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i , K_d และ K_A หัวข้อที่ 3

แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษา C ของตัวควบคุมแบบดิจิทัล ที่เขียนขึ้นตามหลักคณิตศาสตร์แบบดิสครีตอย่างถูกต้อง และได้ทดสอบการทำงานแล้ว ในหัวข้อที่ 4 นำเสนอการใช้เทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอทีเอที่ออกแบบและสร้างขึ้น กับการควบคุมความเร็วเอชเอ็มเตอร์ (Panasonic รุ่น MAS04-90Y พิกัด 90W 4P 3PHASE) ที่ติดตั้ง PWM inverter (TOSHIBA รุ่น VFS11-2002PM พิกัด 3PH - 200/240V - 0.4KW/0.5HP)

1.2 ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อก

ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อก สามารถสร้างขึ้นด้วยวงจรออปแอมป์ R และ C โครงสร้างย่อยสำหรับตัวควบคุมพีไอ ดี และเอ แสดงไว้ในรูปที่ 2 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ สามารถสังเกตได้ว่าพจน์เอ เป็นการอนุพันธ์สองครั้งให้กับสัญญาณ ซึ่งก็คือการทำให้ $d^2(-)/dt^2$ นั้นเอง



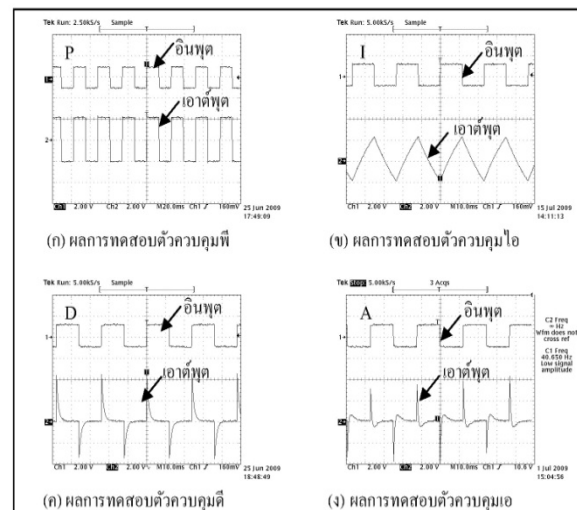
รูปที่ 2 โครงสร้างตัวควบคุมแบบแอนะล็อก

ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อกมีโครงสร้างโดยรวมดังรูปที่ 2(ด) เป็นการนำตัวควบคุมพี ตัวควบคุมไอ ตัวควบคุมดี และตัวควบคุมเอมาต่อขนาน จากนั้นจึงกลับเฟสของเอาต์พุตด้วยวงจรกลับเฟส เพื่อทำให้สัญญาณควบคุม u มีเฟสที่ถูกต้อง ทั้งนี้ตัวควบคุมพีมีหน้าที่ทำการปรับสัดส่วนของสัญญาณ ตัวควบคุมไอส่งผลต่อความชันของสัญญาณ ตัวควบคุมดีส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณทำให้ผลการตอบสนองเร็วขึ้น และตัวควบคุมเอส่งผลต่อ

ขนาดสูงสุดของสัญญาณและการพุ่งลงของสัญญาณ ช่วยเร่งปฏิกิริยาการตอบสนองของพลาเน็ตได้ดี เสริมการทำงานของตัวควบคุมดี พารามิเตอร์ต่างๆในโครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีเอชรูปที่ 1(ด) มีหน้าที่ดังนี้

- R_{comp} มีหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าขาบวก ซึ่ง $R \approx R_{comp}$
- R_{p1} และ R_{p2} มีหน้าที่เป็นแกนในการปรับสัดส่วนของสัญญาณ โดยที่ $K_p = \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$
- R_{i1} และ C_i ส่งผลต่อความชันของสัญญาณ โดยที่ $K_i = \frac{1}{R_{i1}C_i}$
- R_{i2} ทำหน้าที่ช่วยให้ C_i คายประจุเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตตอบสนองเร็วขึ้น ในวงจรตัวควบคุมอาจไม่จำเป็นต้องมีก็ได้ หากใช้โอปแอมป์ที่มีกระแสไบอัสต่ำ ($\leq 1pA$)
- R_{D1} เมื่อมี C_D ต่อรวมจะเป็น low pass filter ของตัวควบคุมดี ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูง โดยที่ $R_{D1} = \tau_1$ ซึ่ง τ_1 เป็นค่าคงที่ทางเวลาของ filter
- R_{D2} และ C_D ส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณ โดยที่ $K_D = R_{D2}C_D$
- R_{A1} และ R_{A3} ทำนองเดียวกับตัวควบคุมดี เป็น low pass filter ของตัวควบคุมเอ ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูง โดยที่ $R_{A1} = \tau_1$ และ $R_{A3} = \tau_2$ ซึ่ง τ_1 และ τ_2 เป็นค่าคงที่ทางเวลาของ filter
- R_{A2}, R_{A4}, C_{A1} และ C_{A2} ส่งผลต่อขนาดสูงสุดของสัญญาณและการพุ่งลงของสัญญาณ โดยที่ $K_A = R_{A2}C_{A1}R_{A4}C_{A2}$
- ออปแอมป์ Inv ทั้งสองชุดในรูปที่ 1(ด) ทำหน้าที่กลับเฟสสัญญาณ โดยมีค่าเกนของวงจรเท่ากับ 1 ($R_f = R$)
- การใช้งานวงจรทั้งหมดนี้ควรเลือกค่า R ในย่าน 1k Ω - 50M Ω และควรเลือกค่า C ในย่านที่มากกว่า 0.1 μF จึงจะมีผลดีต่อวงจร

ทดสอบตัวควบคุมพีไอดีเอชแบบอะนาล็อก ด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ พารามิเตอร์ต่างๆในวงจรเลือกใช้ตามความเหมาะสม พิจารณาผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมต่อสัญญาณขั้นบันได

1.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิทัล

ตัวควบคุมพีไอดีมีโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่ องค์ประกอบไ
องค์ประกอบดี และองค์ประกอบเอ ดังสมการที่ (1) เมื่อถูกใช้งานในระบบป้อนกลับ มีโครงสร้างของระบบดังแผนภาพ
ในรูปที่ 1 ที่กล่าวผ่านมาแล้ว

$$u(t)_{PIDA} = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) + u_A(t)$$

$$u(t)_{PIDA} = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_A(t) \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (1)$$

โดยที่ $e(t)$ คืออินพุตของตัวควบคุมพีไอดีเอ $u(t)_{PIDA}$ คือเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีเอ
 K_P คือค่าคงที่ขององค์ประกอบพี K_I คือค่าคงที่ขององค์ประกอบไอ
 K_D คือค่าคงที่ขององค์ประกอบดี และ K_A คือค่าคงที่ขององค์ประกอบเอ

ในการสร้างตัวควบคุมแบบดิจิทัล สมการที่ (1) จะต้องถูกนำไปผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อปรับ
ให้เป็นคณิตศาสตร์แบบดิสครีต ซึ่งบทความนี้จะขอละเนื้อหาทางทฤษฎีในส่วนนี้ เมื่อดำเนินการดังกล่าวแล้วเสร็จ สมการ
ที่ (1) จะเปลี่ยนรูปไปเป็นสมการที่ (2) ซึ่งเป็นรูปที่เหมาะสมต่อการเขียนโปรแกรม

$$u_{PIDA}(k) = K_P e(k) + u_I(k-1) + \frac{K_I T}{2} [e(k) + e(k-1)] + \left(\frac{2K_D}{2+T} \right) [e(k) - e(k-1)] + \left(\frac{2-fT}{2+fT} \right) u_D(k-1)$$

$$+ \left[\frac{8-2edT^2}{4+2dT+2eT+edT^2} \right] u_A(k-1) + \left[\frac{-4+2dT+2eT-edT^2}{4+2dT+2eT+edT^2} \right] u_A(k-2)$$

$$+ 4K_A [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (2)$$

ทั้งนี้ T คือคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (sampling interval) พารามิเตอร์ต่างๆในตัวควบคุมและปรากฏในโปรแกรมมี
 K_P K_I K_D K_A d และ e ซึ่ง d หมายถึง τ_1 และ e หมายถึง τ_2 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น(ผู้อ่านสามารถดูสมการที่
 (3) ประกอบด้วยในขณะนี้) โดยมีโปรแกรมภาษา C พร้อมใช้แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งผู้ใช้สามารถแก้ไขในตัวโปรแกรมเพื่อ
 ระบุค่าพารามิเตอร์เป็นตัวเลขได้ และเพื่อผลที่ดีในการทำงานของตัวควบคุม ค่า T ควรจะเป็นเวลาสั้นๆ เช่น อาจเป็น
 มิลลิวินาทีหรือไมโครวินาที เป็นต้น

```

#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,U1,Ud,Ud1,Udx,Udy,Ua,Ua1,Ua2;
float Uax,Uay,Uaz,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,float,float);

void init();

void main()
{
    int Adcdata;    float U;

    //-----Set initial parameter-----
    e1=0;   e2=0;   U1=0;
    Ud1=0;  Ua1=0;  Ua2=0;

    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(U1,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+Ud+Ua; // PIDA-Controller

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

        //-----Update data-----
        e2=e1;          e1=e0;          Ud1=Ud;
        U1=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); }

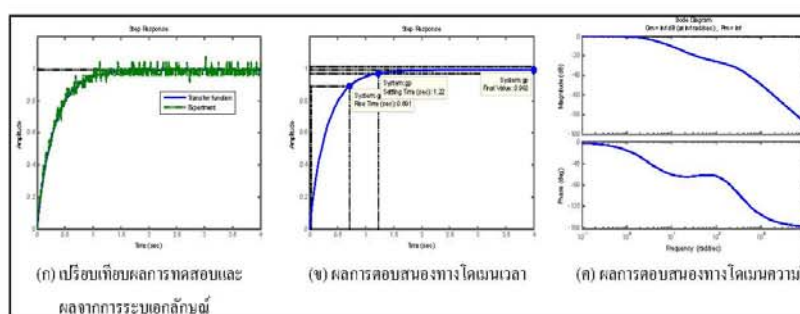
```

รูปที่ 4 โปรแกรม C ของตัวควบคุมฟีดแบ็ค

1.4 การขับมอเตอร์กระแสลับ 3 เฟส

หลักการในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นสามส่วนที่สำคัญได้สามส่วน กล่าวคือ

ส่วนที่ 1. การหาแบบจำลองของมอเตอร์ที่ทำการทดสอบ หาได้จากการระบุเอกลักษณ์ (system identification) จากผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ในสภาวะไม่มีโหลดและไม่มีตัวควบคุม ผลจากการระบุเอกลักษณ์แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การระบุเอกลักษณ์จากผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์

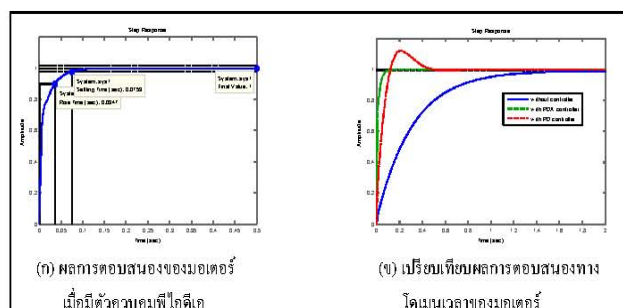
จากการระบุเอกลักษณ์ได้แบบจำลองของมอเตอร์แสดงด้วยโดเมนเฮดดังนี้

$$G_p(s) = \frac{3599s + 240000}{s^3 + 548.3s^2 + 77870s + 241900}$$
 และจากผลการระบุเอกลักษณ์รูปที่ 5 เห็นได้ว่า มอเตอร์มีช่วงเวลาขึ้น 0.691 วินาที เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 1.22 วินาที ผลการตอบสนองโดยรวมถือว่าผลการตอบสนองที่ดี

ส่วนที่ 2. การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเอ ในส่วนนี้ได้ใช้ประโยชน์แบบจำลองของมอเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ตามขั้นตอนแรกในส่วนที่ 1 มาหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้มาจากการใช้โปรแกรมคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดกับระบบ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีเอที่ได้จะนำมาแปลงเป็นวงจรแอนะล็อกตามโครงสร้างดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 1.2 ซึ่งตัวควบคุมอาจเขียนแสดงในโดเมนเฮดด้วย $G_c(s)$ ดังนี้

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

พารามิเตอร์ที่ทำการค้นหาได้จากโปรแกรมคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดกับระบบมี 6 ตัว ได้แก่ K_p , K_I , K_D , K_A , d และ e จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอ และเพื่อเป็นการสาธิตให้เห็นข้อดีของตัวควบคุมพีไอดีเอ จึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีโลกลัสราก ตามกระบวนการออกแบบในตำรา เช่น [3,4] เป็นต้น จากนั้นจึงจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบผล โดยมีผลการจำลองสถานการณ์แสดงไว้ในรูปที่ 6

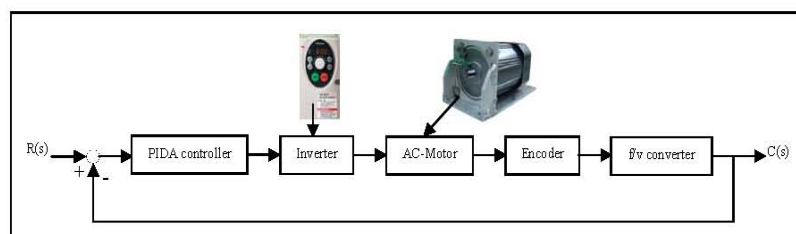


รูปที่ 6 จ้างสถานการณ์ผลการออกแบบตัวควบคุม

เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6 เห็นได้ว่าผลการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีเอ มีช่วงเวลายื่น 0.0347 วินาที เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.0753 วินาที ดังปรากฏในรูปที่ 6(ก) พิจารณารูปที่ 6(ข) ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของมอเตอร์ พบว่ามอเตอร์เมื่อมีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเอส่งผลให้มีผลตอบสนองดีกว่าไม่มีตัวควบคุมพีไอดีเออย่างมาก และดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเอเพียงอย่างเดียวทั้งในด้านการพุ่งเกินและเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ทั้งนี้จากกล่าวในทางทฤษฎีได้ว่า ตัวควบคุมพีไอดีเอสามารถช่วยให้การขับมอเตอร์ทำได้เร็วกว่าเดิม 16.2 เท่า (คำนวณจากเวลาที่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว)

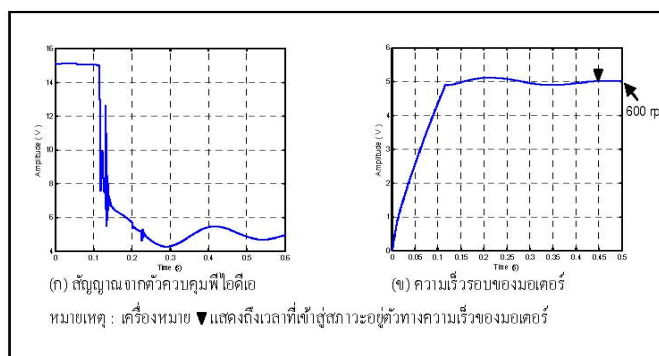
ส่วนที่ 3. คือการนำวงจรแต่ละส่วนมาประกอบกัน เพื่อทำการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ วงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์มีส่วนประกอบดังนี้

1. วงจรตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อก
 2. อินเวอร์เตอร์ TOSHIBA รุ่น VFS11-2002PM เนื่องจากอินเวอร์เตอร์รุ่นนี้สามารถทำงานได้ทั้งซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ และปรับตั้งได้ด้วยโปรแกรมและการจิมพ์ลาย ซึ่งเหมาะแก่การทดสอบมอเตอร์ เพื่อพิจารณาผลในช่วงการตอบสนองชั่วคราวของมอเตอร์
 3. มอเตอร์ไอซี 3 เฟส Panasonic รุ่น MAS04-90Y พิกัด 90W 4P
 4. วงจรถอดรหัส(encoder) เพื่อการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ วงจรนี้ทำการอ่านแถบสีที่ติดกับเพลลาของมอเตอร์ แล้วส่งออกไปเป็นสัญญาณพัลส์
 5. วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน(f/v converter) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณพัลส์ที่ได้ให้เป็นแรงดัน
- โครงสร้างระบบควบคุมวงปิดเพื่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสสลับดังกล่าว แสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 7



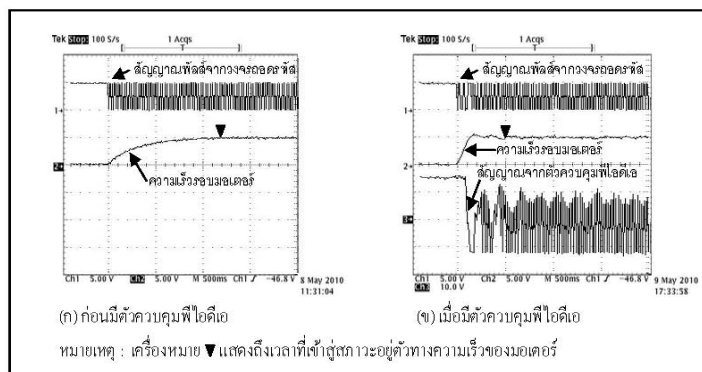
รูปที่ 7 โครงสร้างระบบควบคุมวงปิดสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสสลับ

ในขั้นนี้ จะต้องเข้าใจว่าการจำลองสถานการณ์ ที่ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 6 เป็นกรณีอุดมคติ เพราะไม่มีการคำนึงถึงการอิ่มตัวในวงจรออปแอมป์ใดๆ ก่อนลงมือทดสอบจริง จึงได้จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมด้วยโปรแกรม PSIM ซึ่งมีการพิจารณาการอิ่มตัวของสัญญาณในวงจรตัวควบคุม ได้ผลการจำลองเป็นสัญญาณควบคุม u ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และความเร็วรอบมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) สังเกตได้ว่าความเร็วรอบมอเตอร์มีการพุ่งเกินบ้างเล็กน้อย และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวด้วยเวลา 0.45 วินาที



รูปที่ 8 จำลองสถานการณ์ผลารออกแบบตัวควบคุมด้วย โปรแกรม PSIM

ทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์เลขี 3 เฟสตามโครงสร้างดังรูปที่ 7 ที่ความถี่ 20 Hz, ความเร็วรอบ 600 rpm กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตที่ออกมา $5V = 600 \text{ rpm}$ ผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ตามรูปที่ 8



รูปที่ 9 โครงสร้างวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

จากผลการทดสอบความเร็วรอบมอเตอร์ พิจารณารูปที่ 9 เห็นได้ว่ามอเตอร์ก่อนมีตัวควบคุมมีช่วงเวลานขึ้น 0.69 วินาที เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 1.22 วินาที แต่เมื่อมีตัวควบคุมพีไอเคโอ มอเตอร์มีผลการตอบสนองที่ดีขึ้น มีช่วงเวลานขึ้น 0.2 วินาที และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 0.5 วินาที จากผลการทดสอบเห็นได้ชัดเจนว่าความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อมีตัวควบคุมพีไอเคโอมีผลการตอบสนองที่ดีกว่ามอเตอร์ก่อนใช้ตัวควบคุมเป็นอย่างมาก

1.5 สรุป

เทคโนโลยีการสร้างตัวควบคุมพีไอดีเอ สามารถสร้างได้ทั้งแบบแอนะล็อกและแบบดิจิทัล สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของงาน ในกรณีการสร้างตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัล ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Z180 และ Dynamic C™ ตัวควบคุมพีไอดีเอแบบดิจิทัลเขียนด้วยภาษาซีดังแสดงในหัวข้อ 1.3 วิธีนี้ตัวควบคุมอาจทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจากปัญหาด้านการรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ต I/O ตลอดจนความละเอียดจำกัดของ A/D และ D/A คอนเวอร์เตอร์ ส่วนเทคโนโลยีการสร้างตัวควบคุมพีไอดีเอแบบแอนะล็อกใช้วงจร op-am-R - C ตามโครงสร้างในหัวข้อ 1.2 วิธีนี้สามารถให้ภาพความเข้าใจกลไกการทำงานของฮาร์ดแวร์ต่างๆ ในตัวควบคุมได้ชัดเจนกว่าแบบดิจิทัล เพราะทำงานแบบเวลาจริง (real-time) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปคลื่นเอาต์พุตของตัวควบคุมเองว่า ตัวควบคุมเราสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการตอบสนองของพลานต์ได้อีกขั้นหนึ่ง เสริมการทำงานของตัวควบคุมดี นั้นหมายความว่าช่วงเวลาขึ้นในการตอบสนอง สามารถลดลงได้เมื่อมีการใช้ตัวควบคุมเอเสริมให้ตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งสามารถยืนยันด้วยผลการจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอในบทความ และจากการนำเทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอไปทดสอบจริง ผลการทดสอบกับมอเตอร์เป็นเครื่องยืนยันได้ว่า ถึงแม้ว่าจะต้องทำงานที่ซับซ้อนกว่าเดิมบ้างเล็กน้อย แต่เทคโนโลยีตัวควบคุมพีไอดีเอได้ให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้นกว่าเดิมเป็นอย่างมาก

1.6 อ้างอิง

- [1] R.C. Dorf and S.Jung, "Analytical PIDA Controller Design Technique for a Third Order System", 35th IEEE Conf. Decision and Control, Kobe, Japan, 2513-2518, 1996.
- [2] สราวุธ สุจิตกร, ตัวควบคุม PIDA(e-book), สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553.
- [3] R.C. Dorf and R.H.Bishop, Modern Control Systems, Adolison - Wesley, 1998.
- [4] สราวุธ สุจิตกร, การควบคุมอัตโนมัติ, Pearson Education Indochina, 2546.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุนิสา สอนเมือง เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2527 ที่อำเภอไพศาลี จังหวัดนครสวรรค์ เริ่มการศึกษาระดับอนุบาลถึงประถมศึกษา ที่โรงเรียนนิมิตศึกษา อำเภอไพศาลี จังหวัดนครสวรรค์ และระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนไพศาลีพิทยา อำเภอไพศาลี จังหวัดนครสวรรค์ ในปี พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2548 จากนั้นได้เข้าทำงานที่บริษัท พานาโซนิคอิเล็กทรอนิกส์ เวียร์ค (อยุธยา) จำกัด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในตำแหน่ง Junior Engineer รับผิดชอบงานในส่วนของการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์คอมพิวเตอร์ ปี พ.ศ. 2550 ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยระบบควบคุมและอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะศึกษาระดับปริญญาโท เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการระบบควบคุม (2) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ และ (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ข. ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ การออกแบบตัวควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง