

การปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีตามข้อกำหนดในโดเมนเวลาและดัชนีสมรรถนะ
ไอเอสอี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**PID CONTROLLER TUNING BASED-ON
TIME-DOMAIN SPECIFICATIONS AND
ISE PERFORMANCE INDEX**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

การปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีตามข้อกำหนดในโดเมนเวลาและดัชนีสมรรถนะไอเอสอี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.วิโรจน์ แสงทอง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ศ. น.ท. ดร.สรารุณี สุจิตจร)

กรรมการ

(ผศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ

(อ. ดร.สุदारัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุนทรีย์ แสงศรี : การปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีตามข้อกำหนดในโดเมนเวลาและดัชนี
สมรรถนะไอเอสอี (PID CONTROLLER TUNING BASED-ON TIME-DOMAIN
SPECIFICATIONS AND ISE PERFORMANCE INDEX) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์
ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง, 203 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ที่มีรากฐานมาจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ 3 แนวทาง แนวทางแรกเป็นวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส (phase margin) แนวทางที่สองเป็นวิธีส่วนเพื่ออัตราขยาย (gain margin) และส่วนเฟสที่แม่นยำ และแนวทางที่สามเป็นการใช้ข้อกำหนดและสูตรคำนวณจัดวางตำแหน่งคู่โพลเด่นที่แม่นยำ เงื่อนไขที่ทำให้แนวทางที่สามมีผลตอบแทนที่ดี คือการเลือกพารามิเตอร์พีของตัวควบคุมให้มีค่าต่ำสุดในแต่ละช่วงที่ได้กำหนดไว้ และใช้สูตรการวางคู่โพลเด่นคำนวณหาพารามิเตอร์ไอเอสอี ทำให้การหาค่าพารามิเตอร์พีของตัวควบคุมที่เหมาะสมมีความสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมหรือไอเอสอี (integral of squared error : ISE) ของผลตอบแทนจะมีค่าค่อนข้างสูง ค่าไอเอสอีนั้นสัมพันธ์กับช่วงระยะเวลาของการเกิดความผิดพลาด และขนาดของความผิดพลาดมากที่สุดที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ (ความผิดพลาดในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว) ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งคู่โพลเด่นที่แม่นยำ โดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะของผลตอบแทนในระบบวงปิด ซึ่งทำการชดเชย พลาเน็ตควบคุมยากห้าแบบตามที่นำเสนอไว้ในปี ค.ศ. 2000 โดย Aström และ Hägglund ผลการออกแบบเป็นไปในทิศทางที่น่าพึงพอใจอย่างมาก

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

SOONTAREE SEANGSRI : PID CONTROLLER TUNING BASED-ON
TIME-DOMAIN SPECIFICATIONS AND ISE PERFORMANCE
INDEX. THESIS ADVISOR : WIROTE SANGTUNGTONG, Ph.D., 203 PP.

PID CONTROLLER/ PLANT DIFFICULT/ ISE/ TRANSIENT PERFORMANCE

This thesis is concerned with the development of a PID controller design based-on 3 previous approaches. The first approach is to use a dominant pole placement with phase margin. The second one is to use gain margin and an accurate phase margin. The third approach is to some specification with calculation formulae to obtain accurate dominant pole location. The third approach provides good response under some certain conditions, i.e. choose minimum P-parameter for each specified interval, and apply a dominant pole placement formula to calculate I- and D-parameters, respectively. Regarding this, to find a suitable P-parameter is of prime important. However, the integral of squared errors (ISE) of the response are quite high. The ISE is related to the duration of errors and the maximum error, i.e. transient and steady state error. Therefore, this thesis proposes an approach to PID controller design using an accurate dominant pole placement with the least integral of squared errors. The thesis works are aimed to enhance the performance of a closed-loop system. Simulation test was conducted against 5 plants difficult to be controlled proposed by Aström and Hägglund (2000). The results are very satisfactory.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

CO-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ล่วงหน้าด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ เป็นอย่างดี กล่าวคือ

อาจารย์ ดร. วิโรจน์ แสงทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ น.ท.ดร. สราวุฒิ สุจิตกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ได้กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก ได้สอนให้ข้าพเจ้าได้รู้จักความรับผิดชอบ ความเข้มแข็งในการทำวิจัยด้วยความเมตตาเสมอมา และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัชชัย กุลรวรานิชพงษ์ และ คุณกิตติวงศ์ สุธรรมโน ที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับระเบียบวิธีการค้นหาคำลงสาม และระเบียบวิธีการค้นหาของพี โบนาซซี ตลอดจนคำแนะนำ ในการพัฒนางานวิจัยนี้

คุณสุรัชย์ วงษ์ฟูเกียรติ ที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับการเทียบสัมประสิทธิ์ ตำแหน่ง โพลระบบวงปิด ตลอดจนคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา

เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชูชาติ คุณแม่บุษบง แสงศรี รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สุนทรี แสงศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	6
2 แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 พลาเน็ตควบคุมยาที่ใช้ในการทดสอบ.....	9
2.3 แนวทางการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่ง โพลเด่นและส่วนเฟส.....	16
2.3.1 ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่ง โพลเด่นและส่วนเฟส	16
2.3.2 ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่ง โพลเด่นและส่วนเฟส	18
2.4 แนวทางการออกแบบด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่แม่นยำ	19
2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่แม่นยำ	20
2.4.2 ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่แม่นยำ	21
2.5 แนวทางการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่ง โพลเด่นที่แม่นยำ	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด้นที่แม่นยำ	24
2.5.2	ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด้นที่แม่นยำ	25
2.6	สรุป.....	30
3	ผลการจำลองสถานการณ์ซดเซพแลนด์ควบคุมยาก 5 พลานต์ จากแนวทางการ	
	ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสามแนวทางที่ศึกษาก่อนหน้านี้	32
3.1	บทนำ	32
3.2	ผลการจำลองสถานการณ์.....	32
3.2.1	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแนวทางที่ 1.....	32
3.2.2	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแนวทางที่ 2.....	55
3.2.3	ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแนวทางที่ 3.....	77
3.2.4	เปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุม พีไอดีทั้งสามแนวทาง	101
3.3	สรุป.....	107
4	แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลโดยให้ค่าความ	
	ผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม	109
4.1	บทนำ	109
4.2	ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด้นที่แม่นยำและให้ค่าความ ผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม.....	109
4.3	ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด้นที่แม่นยำและให้ค่าความ ผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม.....	112
4.4	ระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาชชี (Fibonacci Search Method)	121
4.5	ระเบียบวิธีการค้นหาลำดับสาม (Cubic Search Method)	125
4.6	การตรวจสอบคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าหรือเท่ากับ ขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด้นสามเท่า ($m \geq 3$) สำหรับการออกแบบตัว ควบคุมพีไอดีที่ซดเซพแลนด์ 1	128
4.7	สรุป.....	136

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 ผลการจำลองสถานการณ์จากแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม.....	137
5.1 บทนำ.....	137
5.2 ผลการจำลองสถานการณ์.....	137
5.3 สรุป.....	155
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	157
6.1 สรุป.....	157
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	159
รายการอ้างอิง.....	160
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามคุณลักษณะที่เกิดจากการวางโพลวงปิดและพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิด.....	162
ภาคผนวก ข. โครงสร้างของโปรแกรม MATLAB ช่วยในการออกแบบตามแนวทางใหม่ที่นำเสนอ.....	178
ภาคผนวก ค. ผลการจำลองสถานการณ์เพิ่มเติม.....	185
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	195
ประวัติผู้เขียน.....	203

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของพลาเน็ตควมยาก 5 พลาเน็ต..... 13
3.1	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1) 34
3.2	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 1) 36
3.3	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2) 38
3.4	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 2) 42
3.5	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3) 44
3.6	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3) 46
3.7	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4) 52
3.8	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5) 55
3.9	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1) 56
3.10	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 1) 59
3.11	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 2) 62
3.12	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3) 65
3.13	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4) 67
3.14	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5) 75
3.15	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1) 79
3.16	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 1) 82
3.17	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี กรณี $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ (พลาเน็ต 2) 83
3.18	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ กรณี $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ (พลาเน็ต 2) 87
3.19	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3) 90
3.20	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 4) 92
3.21	ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4) 94
3.22	ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 5) 97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.23	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5) 101
3.24	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 1) 102
3.25	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 2) 103
3.26	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3) 104
3.27	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4) 105
3.28	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5) 106
5.1	ซีโรและ โพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1) 138
5.2	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 1) 140
5.3	ซีโรและ โพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2) 141
5.4	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 2) 143
5.5	ซีโรและ โพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 3) 144
5.6	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3) 147
5.7	ซีโรและ โพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 4) 147
5.8	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4) 150
5.9	ซีโรและ โพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 5) 151
5.10	ค่าเกินของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5) 154

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ.....	8
2.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต.....	11
2.3 แผนภาพโบคของพลาเน็ต.....	12
2.4 ความหมายของคำว่า “Without PID” หรือ “พลาเน็ต” ในโดเมนเวลา.....	13
2.5 ความหมายของคำว่า “Without PID” หรือ “พลาเน็ต” ในโดเมนความถี่.....	13
2.6 ระบบถังทรงกระบอกบรรจุของเหลวจำนวน n ถังที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม	14
2.7 แผนภาพโบคของพลาเน็ต 1.....	22
2.8 แผนภาพโลโก้สราฟพลาเน็ต 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s.....	27
2.9 แผนภาพโลโก้สราฟพลาเน็ต 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $m = 3$	28
2.10 แผนภาพโลโก้สราฟพลาเน็ต 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $m = 4$	29
2.11 แผนภาพโลโก้สราฟพลาเน็ต 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $m = 5$	29
3.1 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลาเน็ต 1	33
3.2 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.5778$ และ $K_T = 2.1448$	34
3.3 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5778$ และ $K_T = 2.1448$ ตามลำดับ	35
3.4 แผนภาพโบคของพลาเน็ต (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลาเน็ตและตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5778$ และ $K_T = 2.1448$ ตามลำดับ.....	36
3.5 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลาเน็ต 2	37
3.6 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.4479$ และ $K_T = 117.6261$	38
3.7 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4479$ ตามลำดับ	39
3.8 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดพลาเน็ต 2 เมื่อค่าเกน $K_T = 0.4479$ ก่อนและหลังตัดคู่โพลและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนออกจากระบบ	41
3.9 แผนภาพโบคของพลาเน็ต (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลาเน็ตและตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4479$ และ $K_T = 117.6261$ ตามลำดับ	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4255$ ตามลำดับ.....	43
3.11 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลานต์ 3	44
3.12 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.4753$ และ $K_I = 11.7557$	45
3.13 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดพลานต์ 3 เมื่อค่าเกน $K_I = 0.4753$ ก่อนและหลังตัดคู่โพลและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนออกจากระบบ	46
3.14 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4753$ ตามลำดับ	47
3.15 แผนภาพโบลของพลานต์ (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4753$	47
3.16 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลานต์ 4	48
3.17 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.1674$	49
3.18 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดพลานต์ 4 เมื่อค่าเกน $K_I = 0.1674$ ก่อนและหลังตัดคู่โพลและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนออกจากระบบ	50
3.19 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.1674$	51
3.20 แผนภาพโบลของพลานต์ (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.1674$	51
3.21 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดเพื่อการออกแบบทั้ง 3 จุด ของพลานต์ 5.....	52
3.22 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.5879$	53
3.23 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5879$	54
3.24 แผนภาพโบลของพลานต์ (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5879$	54
3.25 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีที่มี $\alpha = 0.5$ และ $\alpha = 0.9$	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.5$ ถึง 0.9 ตามลำดับ	57
3.27 แผนภาพโบลของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.5$ ถึง 0.9 ตามลำดับ	58
3.28 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$	60
3.29 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$	61
3.30 แผนภาพโบลของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$	61
3.31 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีที่มี $\alpha = 1$	63
3.32 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 1$	64
3.33 แผนภาพโบลของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 1$	64
3.34 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีที่มี $\alpha = 0.67$	66
3.35 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.67$	67
3.36 แผนภาพโบลของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.67$	68
3.37 วิธี $GH(s)$ ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$	70
3.38 วิธี $GH(s)$ ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$ บริเวณใกล้จุด $-1 + j0$	70
3.39 วิธี $GH(s)$ (ขยาย) ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$ บริเวณใกล้จุด $-1 + j0$	71
3.40 วิธี $GH(s)$ ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$ บริเวณใกล้จุดกำเนิด	71
3.41 ทางเดินของไนควิสต์ในระนาบเอส	72
3.42 ทางเดินของไนควิสต์ในระนาบเอสบริเวณใกล้จุดกำเนิด	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.43	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ 73
3.44	ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ 74
3.45	แผนภาพโบลของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ 75
3.46	แผนภาพโบลของระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) กรณีที่ $\alpha = 0.833$ 76
3.47	แผนภาพโบล (ขยาย) ของระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ 77
3.48	แผนภาพโลโก้สรากรเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 1 78
3.49	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 0.348$ 79
3.50	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 0.474$ 80
3.51	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 5$ ในกรณีที่ $K_p = 0.538$ 80
3.52	ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5..... 81
3.53	แผนภาพโบลของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5..... 82
3.54	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 0.8878$ 84
3.55	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 0.6791$ 84
3.56	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 5$ ในกรณีที่ $K_p = 0.5591$ 85
3.57	ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (Plant 2 Without PID) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5..... 86
3.58	แผนภาพโบลของพลานต์ 2 (Plant 2 Without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5..... 86
3.59	แผนภาพโลโก้สรากรเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 3 88
3.60	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 0.584$ 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.61 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3$	89
3.62 แผนภาพโบลของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3$	90
3.63 แผนภาพโลโก้สรากรเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 4	91
3.64 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ	92
3.65 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5	93
3.66 แผนภาพโบลของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5.....	93
3.67 แผนภาพโลโก้สรากรเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 5 เมื่อ $m = 3$	95
3.68 แผนภาพโลโก้สรากรเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 5 เมื่อ $m = 4$	96
3.69 แผนภาพโลโก้สรากรเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 5 เมื่อ $m = 5$	96
3.70 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 2.7700$	97
3.71 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 3.72$	98
3.72 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 5$ ในกรณีที่ $K_p = 4.69$	98
3.73 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5	99
3.74 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (ขยาย) ของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5.....	100
3.75 แผนภาพโบลของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5.....	100
3.76 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง.....	102
3.77 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง.....	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.78 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง.....	104
3.79 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง.....	105
3.80 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง.....	106
4.1 แผนภาพโลกัศรากลพลานต์ 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s เปิดเผยค่าเกณฑ์ $K_{P,max} = 11.2$ คือค่าที่ทำให้โลกัศของรากตัดกับแกนจินตภาพ	114
4.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดด้วยวิธีหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด (minimum ISE) โดยที่ $K_p = 4.6769$	118
4.3 แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลโดยหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม	120
4.4 การแบ่งจุดเพื่อคำนวณสำหรับระเบียบวิธีพีโบนาชซี	123
4.5 การลดขอบเขตช่วงการค้นหาสำหรับระเบียบวิธีพีโบนาชซี	123
4.6 แผนภูมิอัลกอริทึมการค้นหาจุดต่ำสุดด้วยระเบียบวิธีพีโบนาชซี	124
4.7 การตรวจสอบช่วงที่มีจุดต่ำสุดบรรจุอยู่ด้วยระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม	126
4.8 แผนภูมิอัลกอริทึมการค้นหาจุดต่ำสุดด้วยระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม	127
4.9 แผนภาพโลกัศรากล เมื่อข้อกำหนด $\%P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณีให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คือ $-2.25 \pm j2.8041$ และมีค่า $m = 4.64$	132
4.10 แผนผังโพลและซีโร เมื่อข้อกำหนด $\%P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $\theta' = \theta$ โดยที่ $K_p = 1.3856$	133
4.11 ผลตอบสนองในโดเมนเวลา เมื่อข้อกำหนด $\%P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $\theta' = \theta$ โดยที่ $K_p = 1.3856$	133
4.12 แผนภาพโลกัศรากล เมื่อข้อกำหนด $\%P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5$ s ที่จุด Break Away มีค่า $m = 2.97$	134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	แผนผังโพลและซีโร เมื่อข้อกำหนด $\%P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5s$ ที่จุด Break Away โดยที่ $K_p = 1.56$ 135
4.14	ผลตอบสนองในโดเมนเวลา เมื่อข้อกำหนด $\%P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5s$ ที่จุด Break Away โดยที่ $K_p = 1.56$ 135
5.1	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่มี $K_p = 0.538$ และ $K_p = 1.3856$ 138
5.2	ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่มี $K_p = 0.5380$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 1.3856$ 139
5.3	แผนภาพโพลของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่มี $K_p = 0.5380$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 1.3856$ 140
5.4	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่มี $K_p = 0.8878$ และ $K_p = 1.6392$ 141
5.5	ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม กรณีที่มี $K_p = 0.8878$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 1.6392$ 142
5.6	แผนภาพโพลของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่มี $K_p = 0.8878$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 1.6392$ 143
5.7	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่มี $K_p = 0.5270$ และ $K_p = 0.8472$ 144
5.8	ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่มี $K_p = 0.5270$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 0.8472$ 145
5.9	แผนภาพโพลของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่มี $K_p = 0.5270$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 0.8472$ 146
5.10	แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่มี $K_p = 296$ และ $K_p = 29.1434$ 148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม กรณีที่ $K_p = 296$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่ $K_p = 29.1434$	149
5.12 แผนภาพโบลของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่ $K_p = 296$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่ $K_p = 29.1434$	150
5.13 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่ $K_p = 2.7700$ และ $K_p = 2.7473$	152
5.14 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่ $K_p = 2.7700$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่ $K_p = 2.7473$	153
5.15 แผนภาพโบลของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่ $K_p = 2.7700$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่ $K_p = 2.7473$	154
ก.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ	164
ก.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_p = 0.7445$ ตามลำดับ	176
ก.3 แผนภาพ โบลของพลานต์ 2 (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_p = 0.7445$ ตามลำดับ	176
ก.4 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_p = 0.7445$	177
ข.1 โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดของพลานต์ 1 (ด้านบน) และของระบบวงปิด (ด้านล่าง)	184
ค.1 แผนภาพ โลกัศรอกเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 2\%$ และ $t_s \leq 2s$	186
ค.2 แผนภาพ โลกัศรอกเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 4\%$ และ $t_s \leq 2s$	187
ค.3 แผนภาพ โลกัศรอกเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 6\%$ และ $t_s \leq 2s$	187
ค.4 แผนภาพ โลกัศรอกเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 2s$	188
ค.5 แผนภาพ โลกัศรอกเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 2s$	188

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.6 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 4s$	189
ค.7 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 6s$	189
ค.8 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 7s$	190
ค.9 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 8s$	190
ค.10 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 10s$...	191
ค.11 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 12s$...	191
ค.12 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 13s$	192
ค.13 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 14s$	192
ค.14 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 20\%$ และ $t_s \leq 14s$	193
ค.15 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 30\%$ และ $t_s \leq 14s$	193
ค.16 แผนภาพ โลกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 35\%$ และ $t_s \leq 14s$	194



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) เป็นตัวชดเชยพลวัตของกระบวนการ (พลาเน็ต) ที่สำคัญและได้รับความนิยมใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมากกว่า 4 ทศวรรษ และในทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยตีพิมพ์มากกว่า 330 ผลงานที่กล่าวถึงการใช้งานตัวควบคุมพีไอดี ในปัจจุบัน การควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ได้มีการใช้ตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวคุมค่า (regulator) มาตรฐานอย่างกว้างขวาง (Ang, Chong, and Li, 2005) รวมถึงการควบคุมเครื่องจักรกลทางอุตสาหกรรมเบา อุตสาหกรรมหนัก การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเกิดจากความสะดวกในการใช้งาน กล่าวคือผู้ปฏิบัติงานนำตัวควบคุมพีไอดีเชื่อมต่อเข้ากับพลาเน็ตและป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุตของพลาเน็ตเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (จุดปรับตั้งหรือคำสั่ง) ตามรูปแบบระบบควบคุมวงปิด ต่อมาปรับจูนค่าพารามิเตอร์ (ค่าเกน) สามค่าของตัวควบคุมจนกว่าระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะตามความต้องการ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วยหน่วยสัดส่วน (proportional: P) หน่วยปริพันธ์ (integral: I) และหน่วยอนุพันธ์ (derivative: D) ทำให้ตัวควบคุมพีไอดีมีฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ดังนี้

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (1.1)$$

โดยที่ K_p , K_I และ K_D คือค่าเกนหรืออัตราขยายแบบสัดส่วน แบบปริพันธ์ และแบบอนุพันธ์ ตามลำดับ ในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติ ตัวควบคุมพีไอดีมีข้อจำกัดหลายประการ ข้อจำกัดข้อหนึ่งคือการไม่สามารถชดเชยพลาเน็ตอันดับสูงได้ ทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการออกแบบและวิธีการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมดังกล่าวในหลายลักษณะวิธีการ งานวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายวิธีการกำหนดสมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่เพื่อการออกแบบหรือปรับจูนตัวควบคุมพีไอดี งานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ได้กล่าวถึงวิธีการวางโพลเด่นและการระบุข้อกำหนดในโดเมนความถี่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Aström และ Hägglund (1984) ได้กล่าวถึงการใช้ออกแบบของส่วนเพื่อเสถียรภาพ (stability margin) นำมาปรับจูนตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งวิธีนี้มีการประมาณค่าอัตราขยายวิกฤตและ

ค่าความถี่วิกฤต รวมถึงการสร้างและป้อนสัญญาณทดสอบที่เหมาะสม ความผิดพลาดในการสร้างแบบจำลองและการรบกวนจะมีผลกระทบน้อย

Ho, Hang และ Cao (1995) ได้กล่าวถึงสูตรการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอและพีไอดีที่ทำให้ระบบวงเปิดมีส่วนเผื่ออัตราขยาย (gain margin: GM) และส่วนเผื่อเฟส (phase margin : PM) ที่ต้องการ เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกนของตัวควบคุมและข้อกำหนดต่าง ๆ ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้สูตรดังกล่าวกำหนดความคงทนของระบบ นอกจากนี้สูตรที่นำเสนอสามารถทำนายช่วงเวลาขึ้น (rise-time) ของผลตอบสนองวงปิดได้

Ho และคณะ (1996) ได้กล่าวถึงผลการเปรียบเทียบระหว่างสูตรการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่มีผลกระทบถึงส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟส สูตรการปรับจูนดังกล่าวคือสูตรของซีกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols: ZN) และ โคเฮน-คูน (Cohen-Coon: CC) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างเวลาประวิงและค่าคงที่ทางเวลาของพลาตันในช่วง 0.1 ถึง 1.0 วินาที และใช้สูตรสองสูตรนี้ปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวน จะให้ $GM \approx 3.52$ dB และ $PM \approx 30$ ถึง 60 องศา และเมื่อใช้สูตรสองสูตรนี้ปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมเพื่อการติดตามสัญญาณอ้างอิง จะให้ $GM \approx 6$ dB และ $PM \approx 65$ องศา

Ho, Lim และ Xu (1998) ได้กล่าวถึงสูตรการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้เกิดความคงทนและได้ข้อกำหนดในโดเมนความถี่ที่ต้องการ นั่นคือระบบวงเปิดมีผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่ให้ส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟสที่เหมาะสมที่สุด

Wang, Fung และ Zhang (1999) ได้กล่าวถึงวิธีการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟสที่ต้องการอย่างแม่นยำตรงตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกนซึ่งได้จากวิธีการปรับจูนนี้จะสามารถชดเชยพลาตันที่มีรูปแบบแตกต่างกันและพลาตันที่มีพจน์เวลาประวิง

Hwang และ Hsiao (2002) ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมที่สุด วิธีการนี้พิจารณาดัชนีสมรรถนะของนอร์มเอชสอง (H_2 -norm) และเอชอนันต์ (H_∞) ถ้าระบบควบคุมวงปิดไม่มีการรบกวน จะทำให้เกิดความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด

Cominos และ Munro (2002) ได้รวบรวมและทบทวนวิธีการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีและการพิจารณาข้อกำหนดต่าง ๆ เช่น วิธีการปรับจูนของซีกเลอร์-นิโคลส์ การวางตำแหน่งของโพลวงปิด การพิจารณาข้อกำหนดของส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟส เป็นต้น งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงวิธีการปรับจูนที่แตกต่างกัน จุดเด่น และจุดด้อยของแต่ละวิธีการที่สำคัญเท่านั้น นอกจากนี้ได้แสดงว่าตัวควบคุมพีไอดีอาจจะไม่สามารถชดเชยกระบวนการที่มีโหมดการกวัดแกว่งมากกว่าหนึ่งโหมด หรืออาจจะไม่สามารถชดเชยกระบวนการที่มีการเวลาประวิงยาวนานหรือกระบวนการที่มีพฤติกรรมซับซ้อน

Ho และ Wang (2003) ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการอย่างแม่นยำ วิธีการนี้ใช้ทฤษฎีของพหุนามเชิงซ้อนในการคำนวณที่ซับซ้อน

Wang และคณะ (2009) ได้กล่าวถึงวิธีการวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำเพื่อปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี ถ้าพลานต์ไม่มีเวลาประวิง วิธีการนี้จะใช้แผนภาพทางเดินราก (โลกัสราก) ในการวางโพลเด่น แต่ถ้าพลานต์มีเวลาประวิง วิธีการนี้จะใช้แผนภาพในควิสต์ในการวางโพลเด่น

Wei และคณะ (2010) ได้กล่าวถึงวิธีการวางตำแหน่งโพลเด่นเพื่อปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี วิธีการนี้ใช้ข้อกำหนดสมรรถนะในโดเมนเวลาและส่วนเฟสในการวางตำแหน่งโพลเด่น ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกนซึ่งได้จากวิธีการปรับจูนนี้จะสามารถชดเชยพลานต์ที่มีอันดับไม่จำกัดและพลานต์ที่มีเวลาประวิง ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงว่าคู่โพลเด่นมีความสำคัญและมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองวงปิด

การทบทวนงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ให้ความรู้วิธีการต่าง ๆ ในการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีซึ่งแบ่งได้ออกเป็นสองประเภท ประเภทแรกคือวิธีการวางตำแหน่งโพลเด่นอย่างแม่นยำ (โดเมนแอส) และประเภทที่สองคือวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ระบบวงปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ (โดเมนความถี่) ประเด็นดังกล่าวได้กระตุ้นความสนใจในการปรับปรุงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และการพิจารณาข้อจำกัดของแต่ละวิธีการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลานต์ควบคุมยากที่มีรูปแบบแตกต่างกัน

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งหมดสี่แนวทาง แนวทางแรกคือวิธีการวางตำแหน่งโพลเด่นและการกำหนดส่วนเฟสเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Wei และคณะ, 2010) แนวทางที่สองคือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ระบบวงปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ (Wang, Fung และ Zhang, 1999) แนวทางที่สามคือการวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Wang และคณะ, 2009) และแนวทางที่สี่คือการปรับปรุงแนวทางที่สามในการวางตำแหน่งโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นโพลเด่นเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ทำให้ระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้) ที่ทำให้ผลตอบสนองยังคงมีสมรรถนะไม่เกินกว่าข้อกำหนดในโดเมนเวลา หรือคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีมุมเท่ากับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ปรับปรุงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่ เป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการออกแบบ และค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การคำนวณที่มีความซับซ้อนและการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม MATLAB Simulink และ Control Systems Toolbox เป็นเครื่องมือในการคำนวณ

1.3.2 การทดสอบวิธีการออกแบบตัวควบคุม ดำเนินการกับพลาเน็ตควบคุมยาก 5 รูปแบบ ตามที่นำเสนอโดย Aström and Hägglund (2000)

1.3.3 สัญญาณอ้างอิง (setpoint หรือ command) ของระบบ คือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ตัวควบคุมพีไอดี มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ตามสมการที่ (1)

1.4.2 พลาเน็ต $G_p(s)$ มีจำนวน 5 พลาเน็ต ตามคำแนะนำของ Aström and Hägglund (2000) ซึ่งปรากฏในเอกสารอ้างอิง พลาเน็ต $G_p(s)$ ที่ควบคุมยากมีดังนี้

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

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

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

$$\text{พลาเน็ต 4 : } G_p(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)}$$

$$\text{พลาเน็ต 5 : } G_p(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2)} ; \omega_0 = 1, \zeta = 0.1$$

1.4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีใช้วิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่นในระนาบเอส และให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม

1.4.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิด คือผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย และมีการพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้วิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่น *PM* และ *GM* จากงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนแล้ว
2. ใช้การวิเคราะห์บนระนาบเอสและการจำลองสถานการณ์ ศึกษาข้อจำกัดของวิธีการออกแบบในงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนแล้ว
3. จำลองสถานการณ์ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และพลาเน็ตควบคุมยกทั้ง 5 รูปแบบ และพิจารณาสมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลา รวมถึงส่วนเพื่อเสถียรภาพเพื่อเลือกแนวทางดีที่สุดนำมาปรับปรุงต่อไป
4. ปรับปรุงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้วิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่น และให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม
5. จำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสมรรถนะของผลตอบสนองที่เกิดจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และผลตอบสนองที่เกิดจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่นำเสนอ

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้วิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นในงานวิจัยก่อนหน้านี้
2. ใช้การวิเคราะห์บนระนาบเอส และการจำลองสถานการณ์ ศึกษาข้อจำกัดของวิธีการออกแบบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ดั้งเดิม
3. จำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมพีไอดีในงานวิจัยก่อนหน้านี้และในงานวิจัยที่นำเสนอ

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการ 3206 อาคารศูนย์เครื่องมือฯ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. อาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. คอมพิวเตอร์ Intel Pentium (R) core 2 Duo, CPU 2.0 GHz, 1 GB RAM, 250 GB HD
2. คอมพิวเตอร์ Intel Inside (R) core i7-3610QM, CPU 2.3 GHz, 4 GB RAM, 750 GB HD
3. โปรแกรมเฉพาะทางวิศวกรรม MATLAB Simulink และ Control Systems Toolbox

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการเก็บรวบรวมผลการคำนวณและผลการจำลองสถานการณ์การทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคเฉพาะทางวิศวกรรม

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.6.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ด้านการออกแบบและข้อจำกัดของตัวควบคุมพีไอดี
- 1.6.2 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ในระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาประกอบไปด้วย 6 บท

บทที่ 1 คือบทนำ ที่ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมถึงแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสามแนวทางที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยแนวทางแรกคือวิธีการวางตำแหน่งโพลเด่นและการกำหนดส่วนเพื่อเฟส แนวทางที่สองคือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ระบบวงป้อนมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และแนวทางที่สามคือการวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ

รวมถึงอธิบายขั้นตอนการออกแบบ และแสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีซึ่งชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกพลาเน็ต 1 ของแต่ละแนวทาง

บทที่ 3 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยกทั้ง 5 พลาเน็ต จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยแนวทางแรกคือการวางตำแหน่งโพลเด่นและการกำหนดส่วนเฟส แนวทางที่สองคือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ระบบวงเปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และจากแนวทางที่สามคือการวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี พร้อมทั้งสรุปผลการออกแบบเมื่อชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกแต่ละพลาเน็ต

บทที่ 4 นำเสนอแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่พัฒนาขึ้นมาจากแนวทางที่สาม นั่นคือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (แนวทางที่สี่) รวมถึงอธิบายขั้นตอนการออกแบบ และแสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีซึ่งชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกพลาเน็ต 1

บทที่ 5 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยกทั้ง 5 พลาเน็ต จากแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม พร้อมทั้งสรุปผลการออกแบบเมื่อชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกแต่ละพลาเน็ต

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. การเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะที่เกิดจากการวางโพลวงปิดและพหุนามลักษณะเฉพาะของระบบควบคุมวงปิด

ภาคผนวก ข. โครงสร้างของโปรแกรม MATLAB ช่วยในการออกแบบตามแนวทางใหม่
ที่นำเสนอ

ภาคผนวก ค. ผลการจำลองสถานการณ์เพิ่มเติม

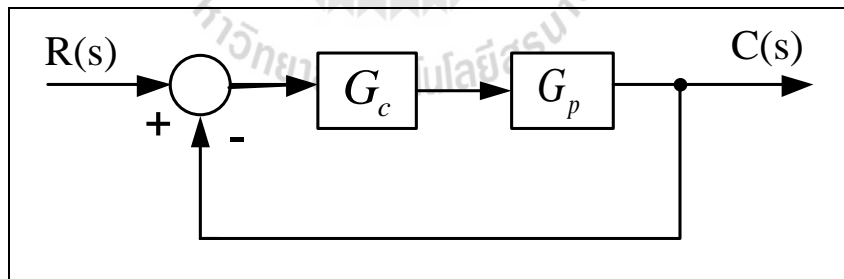
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

2.1 บทนำ

ตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถแก้ปัญหาที่ร้อยละ 90 ในการควบคุมระบบ ซึ่งของตัวควบคุมมีความหมาย คือ P (proportional) หมายถึง การปรับสัดส่วนสัญญาณ I (integral) หมายถึง การปริพันธ์สัญญาณ และ D (derivative) หมายถึง การอนุพันธ์สัญญาณ กลไกทั้งสามนี้จะถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณให้เหมาะสม ตัวควบคุมแบบพีไอดี เสมือนกับตัวชดเชยแบบเฟสล้ำหน้าต่อผสมแบบอนุกรมอยู่กับตัวชดเชยแบบเฟสล้ำหลัง โดยตัวควบคุมแบบพี (P-Controller) จะทำหน้าที่เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบ และลดค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบ ตัวควบคุมแบบไอ (I-Controller) ทำหน้าที่ลดค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบให้น้อยลงจนหมดไป มีผลให้ความเร็วในการตอบสนองของระบบลดลง ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง และตัวควบคุมแบบดี (D-Controller) จะทำหน้าที่ให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น เพิ่มค่าอัตราส่วนความหน่วงให้กับระบบ โดยโครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ

จากโครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับดังรูปที่ 2.1 อาจเขียนแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดได้ดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \quad (2.1)$$

จึงมีสมการลักษณะเฉพาะคือ

$$1 + G_C(s)G_P(s) = 0 \quad (2.2)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่อธิบายในบทที่ 2 ประกอบไปด้วยสามแนวทางการออกแบบ แนวทางแรกคือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส ซึ่งเป็นการออกแบบในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ วิธีการนี้ใช้ข้อกำหนดสมรรถนะในโดเมนเวลาและส่วนเฟสในการวางตำแหน่งโพลเด่น ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีซึ่งได้จากการออกแบบวิธีนี้จะสามารถชดเชยพลานต์ที่มีอันดับได้ไม่จำกัด จากผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงว่าคู่โพลเด่นมีความสำคัญและมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองวงปิด แนวทางที่สองเป็นวิธีการออกแบบค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ได้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีส่วนเพื่ออัตราขยาย (GM) และส่วนเฟส (PM) ที่ต้องการอย่างแม่นยำ ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากวิธีการออกแบบนี้สามารถชดเชยพลานต์ที่มีรูปแบบแตกต่างกันรวมทั้งพลานต์ที่มีพจน์เวลาประวิงได้อีกด้วย ซึ่งวิธีการนี้ใช้ข้อกำหนดสมรรถนะในโดเมนความถี่ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยตรง และแนวทางที่สามเป็นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ ซึ่งวิธีการนี้ใช้ข้อกำหนดสมรรถนะในโดเมนเวลาในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยตรง นอกจากนี้เนื้อหาในบทที่ 2 จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีกับพลานต์ควบคุมยาก 5 รูปแบบตามคำแนะนำของ Aström และ Hägglund (2000) และได้อธิบายขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสี่แนวทาง พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลานต์ 1 ในแต่ละแนวทาง

2.2 พลานต์ควบคุมยากที่ใช้ในการทดสอบ

เนื่องจากพลานต์ควบคุมยากที่ใช้ในการทดสอบ คือ พลานต์ที่มีอันดับสูงกว่าสอง ทำให้วิธีพื้นฐานที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลานต์ดังกล่าวไม่มีประสิทธิภาพ กล่าวคือระบบวงปิดจะสร้างผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะเกินจากข้อกำหนดมากหรือมีสมรรถนะที่ไม่ดี พลานต์ $G_P(s)$ ที่ใช้ในการทดสอบจำลองสถานการณ์เพื่อชดเชยระบบพลวัตของผลตอบสนองให้มีสมรรถนะดีขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ มีจำนวนทั้งสิ้น 5 พลานต์ ซึ่งปรากฏในเอกสารอ้างอิง โดยสามารถอธิบายพลานต์ $G_P(s)$ ที่ควบคุมยากได้ดังนี้

พลานต์ 1 : เป็นพลานต์อันดับสี่ที่ไม่มีซีโร และมีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบซึ่งมีค่าแตกต่างกัน 4 ตัว โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{p1}(s) = \frac{1}{(s+1)(\gamma s+1)(\gamma^2 s+1)(\gamma^3 s+1)} ; \gamma = 0.5 \quad (2.3)$$

$$G_{p1}(s) = \frac{1}{0.01563 s^4 + 0.2344 s^3 + 1.094 s^2 + 1.875 s + 1}$$

พลาเน็ต 2 : เป็นพลาเน็ตอันดับสี่ที่ไม่มีซีโร และมีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 4 ตัว มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{p2}(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (2.4)$$

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

พลาเน็ต 3 : คือพลาเน็ตอันดับสามที่มีซีโรปรากฏอยู่ทางด้านขวามือของระนาบเอส (ซีโรเป็นจำนวนจริงบวก) เป็นเหตุให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการพุ่งต่ำ (undershoot) และมีโพลเป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 3 ตัว โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{p3}(s) = \frac{-\gamma s + 1}{(s+1)^3} ; \gamma = 0.5 \quad (2.5)$$

$$G_{p3}(s) = \frac{-0.5s + 1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

พลาเน็ต 4 : เป็นพลาเน็ตอันดับสี่ที่มีโพล ณ จุดกำเนิด นั่นหมายความว่าพลาเน็ตนี้เป็นระบบที่มีตัวอินทิเกรต กล่าวคือผลตอบสนองระบบวงเปิดของพลาเน็ตจะมีลักษณะขาดเสถียรภาพด้วยความเป็นระบบแบบชนิดหนึ่ง (Type 1 System) และยังมีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 2 ตัวอยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ และโพลจำนวนจริงลบอีก 1 ตัวที่อยู่ไกลจากแกนจินตภาพ นอกจากนั้นยังมีซีโรที่เป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 2 ตัว โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{p4}(s) = \frac{(s+6)^2}{s(s+1)^2(s+36)} \quad (2.6)$$

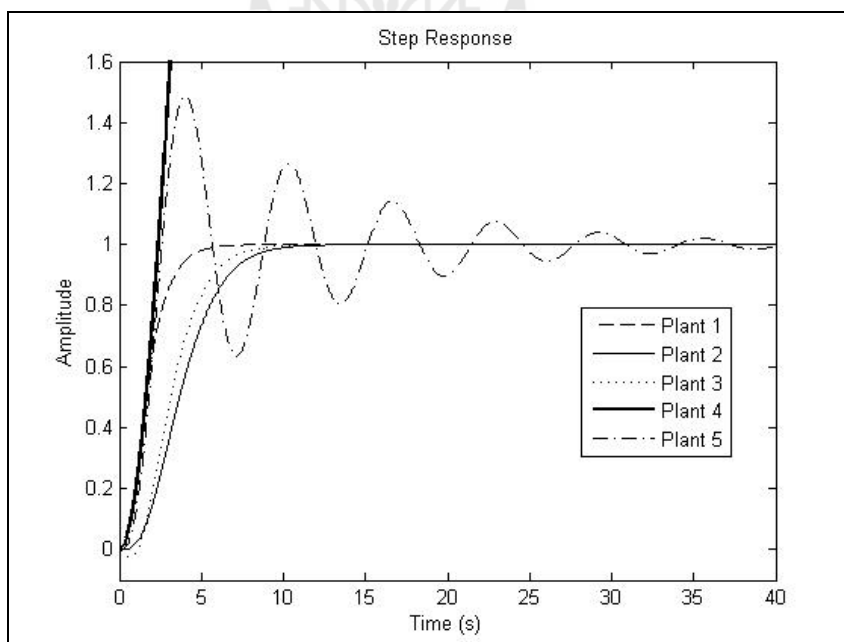
$$G_{P4}(s) = \frac{s^2 + 12s + 36}{s^4 + 38s^3 + 73s^2 + 36s}$$

พลานต์ 5 : เป็นพลานต์อันดับสามที่ให้ผลการตอบสนองที่มีการแกว่งกวัดตัวรุนแรงมาก มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดคือ

$$G_{P5}(s) = \frac{\omega_0^2}{(s+1)(s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2)} ; \omega_0 = 1 , \zeta = 0.1 \quad (2.7)$$

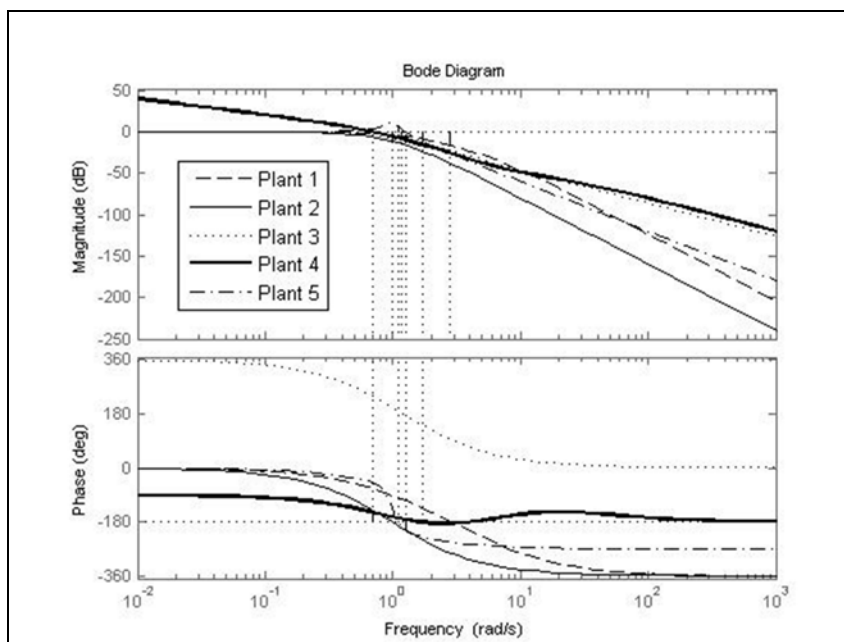
$$G_{P5}(s) = \frac{1}{s^3 + 1.2s^2 + 1.2s + 1}$$

แสดงผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ควบคุมยาก ก่อนมีตัวควบคุมทั้ง 5 พลานต์ ได้ดังรูปที่ 2.2 แผนภาพโบลของพลานต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 และแสดงสมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของพลานต์ควบคุมยาก 5 พลานต์ รวมถึงตำแหน่งโพลและซีโรของพลานต์ได้ดังตารางที่ 2.1



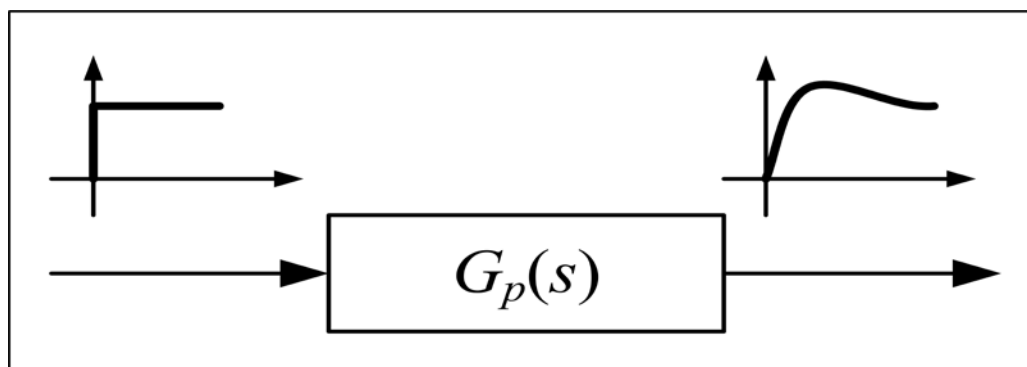
รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.2 อธิบายได้ว่า พลานต์ 1 ถึงพลานต์ 3 ผลตอบสนองไม่มีปริมาณการพุ่งเกิน แต่มีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ใช้เวลาพอสมควร ในขณะที่พลานต์ 4 ให้ผลตอบสนองที่มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่มีขอบเขตพลานต์ นั่นคือระบบที่ขาดเสถียรภาพ เพราะพลานต์เป็นระบบแบบชนิดหนึ่ง (Type-1 System) และพลานต์ 5 เป็นพลานต์ที่ให้ผลตอบสนองที่มีปริมาณการพุ่งเกินสูง และมีช่วงเวลาเข้าที่นานมาก แต่พลานต์มีเสถียรภาพ

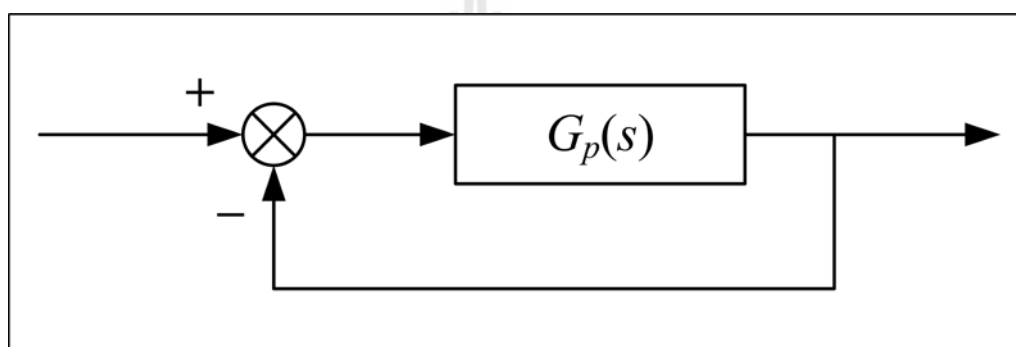


รูปที่ 2.3 แผนภาพโบดของพลานต์

ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่แสดงในรูปที่ 2.3 อธิบายได้ว่า พลานต์ 1 ถึงพลานต์ 4 มีค่าส่วนเพื่ออัตราขยายอยู่ในเกณฑ์ดี แต่พลานต์ 1 ถึงพลานต์ 3 ไม่สามารถหาค่าส่วนเพื่อเฟสได้ และพลานต์ 4 มีค่าส่วนเพื่อเฟสที่น้อยมาก ในขณะที่พลานต์ 5 มีค่าส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสดีคลบ ในงานวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาความหมายของคำว่า “Without PID” หรือ “พลานต์” ในโดเมนเวลาที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 และในโดเมนความถี่ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 ตามลำดับ นั่นคือคำว่า “Without PID” หรือ “พลานต์” ในโดเมนเวลา หมายถึงระบบวงเปิดของพลานต์ และในโดเมนความถี่ หมายถึงระบบวงปิดของพลานต์ สรุปสมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของพลานต์ได้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.4 ความหมายของคำว่า “Without PID” หรือ “พลาเน็ต” ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.5 ความหมายของคำว่า “Without PID” หรือ “พลาเน็ต” ในโดเมนความถี่

ตารางที่ 2.1 สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต

พลาเน็ต	สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่							ตำแหน่งโพลและซีโร	
	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)	โพล	ซีโร
พลาเน็ต 1	2.7	5.02	—	16.58	∞	2.8283	0	-7.99, -4.01, -2, -1	—
พลาเน็ต 2	4.94	9.08	—	12.04	∞	1.0000	0	-1, -1, $-1 \pm j0.0002$	—
พลาเน็ต 3	4.1	7.91	—	10.10	∞	1.1832	0	-1, -1, -1	2
พลาเน็ต 4	—	—	—	15.63	32.95	1.6901	0.6877	-36, -1, -1, 0	-6, -6
พลาเน็ต 5	1.5	35.9	49	-7.1306	-27.72	1.0955	1.2534	-1, $-0.1000 \pm j0.9950$	—

พลาเน็ตควบคุมยากมีตัวอย่างที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดังนี้

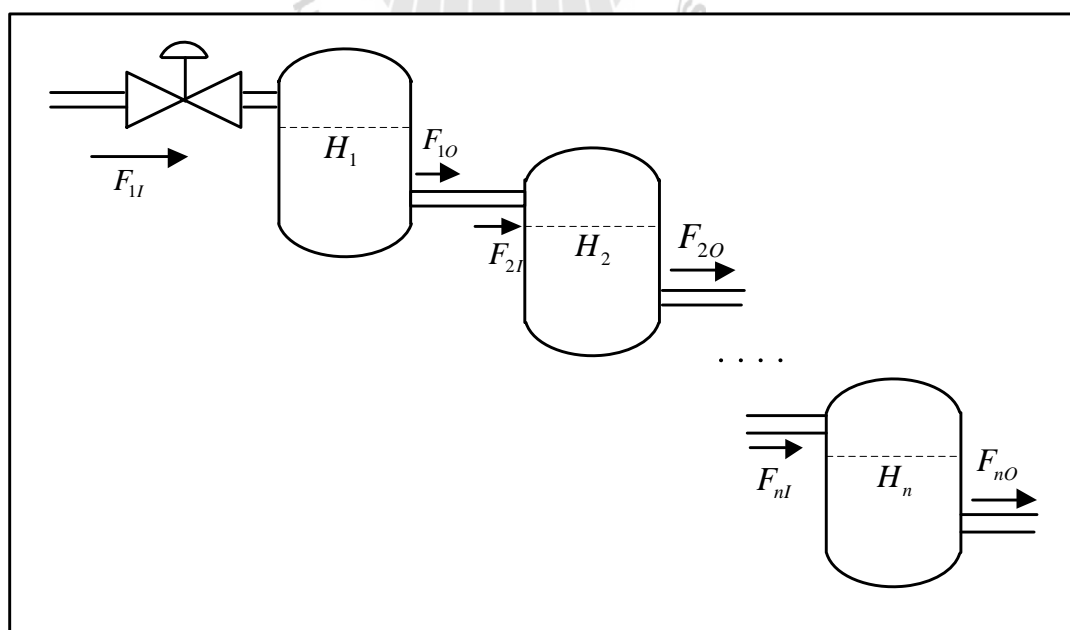
พลาเน็ต 1 คือ ระบบที่ประกอบไปด้วยภาชนะหรือถัง (tank) จำนวน 4 ใบ ที่บรรจุของเหลว ภาชนะแต่ละใบมีท่อระบายออก (เอาต์พุต) เชื่อมต่อเข้ากับทางเข้า (อินพุต) ของภาชนะอีกใบหนึ่ง เชื่อมต่อกันไปเรื่อย ๆ ของเหลวจะไหลเข้าไปในภาชนะใบที่หนึ่ง และจะไหลออกจากภาชนะใบที่สี่ (ภาชนะทุกใบมีรูปทรง ความจุ และมิติที่แตกต่างกัน)

พลาเน็ต 2 คือ พลาเน็ต 1 ที่มีภาชนะหรือถังทุกใบที่มีรูปทรง ความจุ และมิติเท่ากัน

พลาเน็ต 4 คือ ระบบการเคลื่อนที่หรือการหมุนที่ประกอบด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน โหลดที่มีเอาต์พุต คือ ตำแหน่งหรือระยะทาง (position)

พลาเน็ต 5 คือ พลาเน็ต 4 ที่มีสายพานที่มีความยืดหยุ่น ทำหน้าที่ส่งถ่ายกำลังจากเพลลาหมุนของมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ต้นกำลังไปถึงโหลด และมีเอาต์พุต คือ ความเร็ว (speed)

เมื่อพิจารณาพลาเน็ตควบคุมยากที่ใช้ในงานในภาคอุตสาหกรรม พลาเน็ต 2 คือระบบถังทรงกระบอกที่มีอากาศอยู่ภายใน (cylinder atmospheric tanks) ซึ่งบรรจุของเหลวที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศ ระบบถังทรงกระบอกดังกล่าวมีจำนวน n ใบที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม (J.E. Normey-Rico and E.F. Camacho, 2007) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 ถังที่ i ง่ายเอาต์พุต (F_{iO}) ถึงอินพุตของถังที่ $i + 1$ ($F_{(i+1)I}$) (ถังที่ $i + 1$ มีอินพุตที่ได้รับจากเอาต์พุตของถังที่ i) หรือ $F_{(i+1)I} = F_{iO}$ โดยที่ $F_{(i+1)I}$ คืออัตราการไหลของอินพุตของถังที่ $i + 1$ และ F_{iO} คืออัตราการไหลของเอาต์พุตของถังที่ i ซึ่งมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s)



รูปที่ 2.6 ระบบถังทรงกระบอกบรรจุของเหลวจำนวน n ถังที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม

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

$$A \frac{dH_i}{dt} = F_{iI} - F_{iO} \quad (2.8)$$

$$F_{iO} = KH_i \quad (2.9)$$

โดยที่ t คือเวลาที่มีหน่วยเป็นวินาที (s) A คือพื้นที่ด้านล่างของถังหรือภาชนะ (A มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)) ซึ่งตั้งแต่ถังใดถังหนึ่งต้องมีรูปทรง มิติ หรือลักษณะทางกายภาพเหมือนกันทุกถัง และ K คือค่าคงที่ที่มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที (m^2/s) ค่าคงที่ K จะขึ้นอยู่กับรูปทรง มิติ หรือลักษณะทางกายภาพของถัง ถังที่ i มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอินพุตและระดับของของเหลวที่อธิบายเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$H_i(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{iI}(s) \quad (2.10)$$

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

$$H_1(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{1I}(s) \quad (2.11)$$

ถังที่ 2 มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$H_2(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{2I}(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{1O}(s) = \frac{(1/K)}{\tau s + 1} KH_1(s) \quad (2.12)$$

ต่อมาแทนค่า $H_1(s)$ จากสมการที่ (2.11) ลงในสมการที่ (2.12) จะได้ว่า

$$H_2(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \times \frac{(1/K)}{\tau s + 1} F_{1I}(s) = \frac{(1/K)}{(\tau s + 1)^2} F_{1I}(s) \quad (2.13)$$

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

$$H_n(s) = G(s)F_{1r}(s) = \frac{K_e}{(\tau s + 1)^n} F_{1r}(s) \quad (2.14)$$

โดยที่ $K_e = (1/K)$ กำหนดให้ถึงทุกใบมีค่าเวลาคงตัวเท่ากัน ถ้า $n = 4$, $K = 1$ ตารางเมตรต่อวินาที และ $\tau = 1$ วินาที จะได้ว่าระบบถึงบรรจของเหลว 4 ถึงมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (2.15)$$

ดังนั้นพลาเน็ต 2 มีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดคือ

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

ชุดเซตสมรรถนะผลตอบสนองของพลาเน็ตควบคุมยากทั้ง 5 พลาเน็ต ด้วยแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสี่แนวทาง เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติ ความเหมาะสมและข้อจำกัดในแต่ละแนวทางการออกแบบเมื่อนำไปใช้งานกับระบบต่าง ๆ

2.3 แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส ในหัวข้อนี้ได้อธิบายขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส และแสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้วิธีนี้

2.3.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าส่วนเฟส (PM) , อัตราส่วนการหน่วง (ζ) และความถี่ธรรมชาติ (ω_n) เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของโพลเด่น $p_{1,2}$ บนระนาบเอส

$$p_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.16)$$

โดยที่ $\zeta = \frac{\left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}}$ และ $\omega_n = \frac{4}{\zeta t_s}$

t_s คือช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ที่มีหน่วยเป็นวินาที
และ H คือเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot)
คู่โพลเด่นที่คำนวณได้จะอยู่ในรูป $-a \pm jb$ โดยที่ $a > 0$ และ $b > 0$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดขอบเขตของช่วง ω ที่ต้องการ และพิจารณาสมการ

$$f_1(\omega) = \text{Re}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] + \frac{a^2 - b^2}{2ab} \text{Im}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] + \frac{a^2 + b^2}{2a} \text{Re}\left[-\frac{e^{j\phi_m}}{G_p(j\omega)}\right] \quad (2.17)$$

$$f_2(\omega) = \frac{\omega^2}{2a} \text{Re}\left[-\frac{e^{j\phi_m}}{G_p(j\omega)}\right] - \frac{\omega^2}{2ab} \text{Im}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] - \omega \text{Im}\left[-\frac{e^{j\phi_m}}{G_p(j\omega)}\right] \quad (2.18)$$

เมื่อ $G_p(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต
 $G_p(p_1)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต แทน s ด้วย p_1
และ $G_p(j\omega)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต แทน s ด้วย $j\omega$

ขั้นตอนที่ 3 ใช้สมการที่ (2.17) และ (2.18) วาดกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ในแกนเดียวกัน จุดตัดของกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ คือค่าแกน K_I (เส้นกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ อาจตัดกันมากกว่าหนึ่งจุด)

ขั้นตอนที่ 4 ใช้เงื่อนไข $K_{I,\min} > \max\{0, K_{I1}, K_{I2}\}$ เลือกค่าแกน K_I โดยที่ $K_{I,\min}$ คือค่าน้อยที่สุดของ K_I ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 และสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$K_{I1} = \text{Re}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] + \frac{a}{b} \text{Im}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right]$$

$$\text{และ } K_{I2} = \text{Re}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] + \frac{a^2 - b^2}{2ab} \text{Im}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right]$$

ขั้นตอนที่ 5 ใช้สมการที่ (2.19) และ (2.20) คำนวณค่าเกณฑ์ K_D และ K_P ตามลำดับ

$$K_D = \frac{1}{a^2 + b^2} \left(K_I - \text{Re}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] - \frac{a}{b} \text{Im}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] \right) \quad (2.19)$$

$$K_P = \frac{2a}{a^2 + b^2} \left(K_I - \text{Re}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] - \frac{a^2 - b^2}{2ab} \text{Im}\left[-\frac{p_1}{G_p(p_1)}\right] \right) \quad (2.20)$$

ดังนั้นแนวทางการออกแบบด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเพื่อเฟสที่ประกอบด้วยขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 นี้ จะคำนวณและให้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีเพื่อชดเชยพลานต์ต่าง ๆ ต่อไป

2.3.2 ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเพื่อเฟส

ในหัวข้อนี้จะอธิบายตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเพื่อเฟสที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีซึ่งชดเชยพลานต์ 1 เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวสำหรับทำหน้าที่ชดเชยพลานต์ทุกพลานต์ มีขั้นตอนการออกแบบเดียวกัน จึงไม่มีการแสดงรายละเอียดเพื่อความกระชับของเนื้อหา โดยต้องการให้ผลตอบสนองระบบวงปิดต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 มีปริมาณการพุ่งเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8% ($P.O. \leq 8\%$) มีช่วงเวลาเข้าที่ไม่นานกว่า 8.25 วินาที ($t_s \leq 8.25 \text{ s}$) และส่วนเพื่อเฟสไม่น้อยกว่า 60 องศา ($PM \geq 60^\circ$) ตัวอย่างการคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาตำแหน่งของคู่โพลเด่นบนระนาบเอส

- เมื่อ $H = P.O. \leq 8\%$ จะได้ว่า $\zeta \geq 0.6266$
- เมื่อ $t_s \leq 8.25 \text{ s}$ จะได้ว่า $\omega_n \leq 0.7738$
- แทนค่า ζ และ ω_n ลงในสมการที่ (2.16) จะได้ว่า $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$

ขั้นตอนที่ 2 และ 3 กำหนดขอบเขตช่วง ω ที่ต้องการ ต่อมาวาดกราฟ พิจารณาจุดตัดของกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ในแกนเดียวกัน และอ่านค่าเกณฑ์ K_I

- เลือก ω ให้มีขอบเขตกว้างมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในที่นี้เลือก $-1000 \leq \omega \leq 1000$ และ ω มีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.001

- ใช้สมการที่ (2.17) และ (2.18) วาดกราฟ จะได้ว่ากราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ตัดกันที่จุด (0.5174 , 0.5778) และ (3.114 , 2.145) ตามลำดับ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 ของบทที่ 3 นั่นคือ $K_I = 0.5778$ และ $K_I = 2.145$ ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 ใช้เงื่อนไข $K_{I,\min} > \max\{0, K_{I1}, K_{I2}\}$ เลือกค่าแกน K_I

- คำนวณค่า K_{I1} จะได้ว่า $K_{I1} = 0.5378$

- คำนวณค่า K_{I2} จะได้ว่า $K_{I2} = 0.2951$

- พิจารณาเงื่อนไข $K_{I,\min} > \max\{0, 0.5378, 0.2951\}$ จะได้ว่า $K_{I,\min} > 0.5378$ ดังนั้นค่าแกน $K_I = 0.5778$ คือค่าที่เหมาะสม แต่ในบทนี้ จะพิจารณา $K_I = 2.145$ เป็นกรณีเปรียบเทียบด้วย

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อค่าแกน $K_I = 0.5778$ และ $K_I = 2.145$ คำนวณค่าแกน K_D และ K_P ตามลำดับ

- ใช้สมการที่ (2.19) จะได้ว่า $K_D = 0.0669$ และ $K_D = 2.6839$ ตามลำดับ

- ใช้สมการที่ (2.20) จะได้ว่า $K_P = 0.4579$ และ $K_P = 2.9956$ ตามลำดับ

ต่อมากำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีคือค่าแกนที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 และนำตัวควบคุมพีไอดีดังกล่าวเชื่อมต่อเข้ากับพลานต์ 1 ทำให้เกิดระบบควบคุมวงปิด จากนั้นจำลองสถานการณ์ และพิจารณาผลตอบสนองของระบบวงปิดในโดเมนเวลาและผลตอบสนองในโดเมนความถี่ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วย รวมถึงพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ การดำเนินการจากขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 จะนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำหน้าที่ชดเชยพลานต์ควบคุมยกตั้งแต่พลานต์ 2 ถึง พลานต์ 5 และพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์เช่นเดียวกัน แต่ไม่มีการแสดงการคำนวณค่าแกนของตัวควบคุมพีไอดี เพื่อความกระชับของเนื้อหา ซึ่งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.1 ต่อไป

2.4 แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่แม่นยำ

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยแนวทางการออกแบบที่สองคือ วิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่แม่นยำ พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีกับพลานต์ควบคุมยก พลานต์ 1 โดยใช้วิธีการออกแบบนี้

2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่แม่นยำ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่แม่นยำ มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานต์ที่ต้องการควบคุมเป็น $G_p(j\omega)$ จากนั้นพล็อตแผนภาพโพลเพื่ออ่านค่าความถี่ตัดข้ามเฟส ω_c

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการ โดยกำหนดให้เป็นค่าจริงไม่มีหน่วย คือ A_m (ปกติ $A_m > 1$) กำหนดค่าส่วนเฟสที่ต้องการ φ_m โดยมีหน่วยเรเดียน และกำหนดค่าอัตราส่วนแบนวิดธ์ของระบบวงปิดต่อวงเปิด α ซึ่ง α มีค่าตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 ($\alpha \in [0.5, 2]$)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความถี่ตัดข้ามเฟส $(\omega_p)^+$ จากสมการ (2.21)

$$\omega_p = \alpha \omega_c \quad (2.21)$$

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบเงื่อนไข ในสมการ (2.22)

$$-\pi + \arctan\left(\frac{1 - A_m \cos \varphi_m}{A_m \sin \varphi_m}\right) < \angle G_p(j\omega_p) < -\frac{\pi}{2} \quad (2.22)$$

ถ้าเงื่อนไขในสมการ (2.22) ไม่เป็นจริง ให้ปรับค่า α หรือกำหนด A_m และ φ_m ใหม่

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าเกน K_p ของตัวควบคุมพีไอดีจากสมการ (2.23)

$$K_p = \text{Re}\left[\frac{-1}{A_m G_p(j\omega_p)}\right] \quad (2.23)$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าความถี่ตัดข้ามอัตราขยาย (ω_g) จากสมการ (2.24)

$$\text{Re}\left[\frac{-\exp(j\varphi_m)}{G_p(j\omega_g)}\right] = \text{Re}\left[\frac{-1}{A_m G_p(j\omega_p)}\right] \quad (2.24)$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่าเกน K_I และ K_D ของตัวควบคุมพีไอดี จากสมการ (2.25) และ (2.26) ตามลำดับ

$$K_I = (X_p \omega_g - X_g \omega_p) \left(\frac{\omega_p}{\omega_g} - \frac{\omega_g}{\omega_p} \right)^{-1} \quad (2.25)$$

$$K_D = \left(\frac{X_p}{\omega_g} - \frac{X_g}{\omega_p} \right) \left(\frac{\omega_p}{\omega_g} - \frac{\omega_g}{\omega_p} \right)^{-1} \quad (2.26)$$

โดยที่ $X_p = \text{Im} \left[\frac{-1}{A_m G_p(j\omega_p)} \right]$ และ $X_g = \text{Im} \left[\frac{-\exp(j\varphi_m)}{G_p(j\omega_g)} \right]$

†หมายเหตุ พิจารณาได้ว่า ω_c เป็นแบนวิดธ์ของระบบวงเปิด ω_p เป็นแบนวิดธ์ของระบบวงปิด

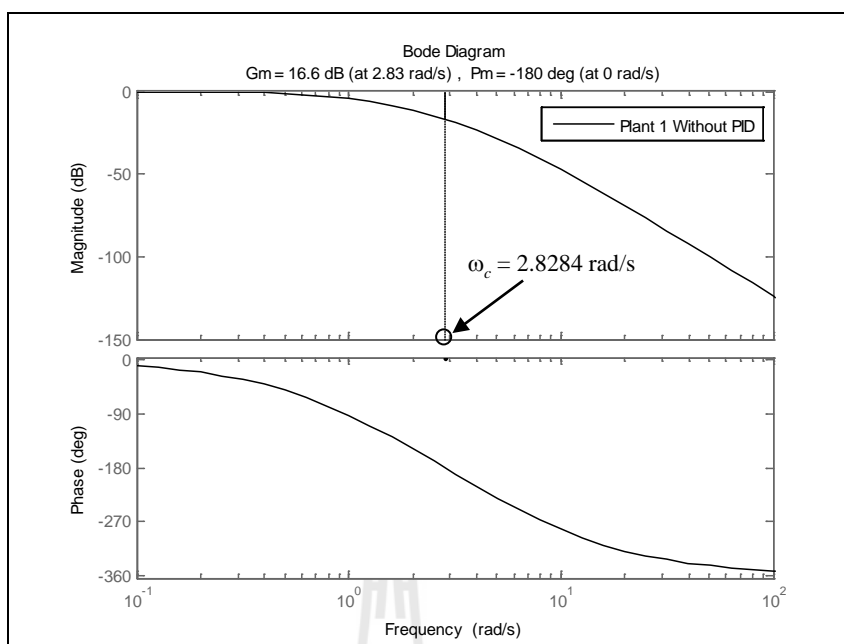
2.4.2 ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่แม่นยำ

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอย่างแม่นยำที่ชดเชยพลานต์ 1 โดยต้องการให้ผลตอบสนองทางโดเมนความถี่ของระบบวงปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายไม่น้อยกว่า 18.0618 เดซิเบล ($GM \geq 18.0618$ dB) และส่วนเฟสไม่น้อยกว่า 60 องศา ($PM \geq 60^\circ$) ดังนั้นขั้นตอนการออกแบบต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพลานต์ $G_p(j\omega)$ ที่ต้องการควบคุมดังนี้

$$G_{p1}(j\omega) = \frac{1}{0.01563(j\omega)^4 + 0.2344(j\omega)^3 + 1.094(j\omega)^2 + 1.875(j\omega) + 1}$$

พล็อตแผนภาพของโบลของ $G_{p1}(j\omega)$ จะได้ดังรูปที่ 2.7 จากนั้นอ่านค่าความถี่ตัดข้ามเฟส†(ω_c) จะได้ว่าค่าความถี่ตัดข้ามเฟส† คือ $\omega_c = 2.8284$ rad/s



รูปที่ 2.7 แผนภาพโบดของพลานต์ 1

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าส่วนเพื่ออัตราขยายที่ต้องการ ในกรณีนี้กำหนดให้ $A_m \geq 8$ หรือนั่นคือ $GM \geq 18.0618$ dB

กำหนดค่าส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการ ในกรณีนี้กำหนดให้ $\varphi_m \geq \pi/3$ rad/s หรือนั่นคือ $PM \geq 60^\circ$ และ

กำหนดค่าอัตราส่วนแบนวิดธ์ของระบบวงปิดต่อวงเปิด[†] ในกรณีนี้กำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.5 ถึง 0.9 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าความถี่ตัดข้ามเฟส $\omega_p = \alpha\omega_c$ จากสมการ (2.21) จะได้ว่า

- เมื่อ $\alpha = 0.5$ จะได้ $\omega_p = 0.5 \times 2.8284 = 1.4142$
- เมื่อ $\alpha = 0.6$ จะได้ $\omega_p = 0.6 \times 2.8284 = 1.6970$
- เมื่อ $\alpha = 0.7$ จะได้ $\omega_p = 0.7 \times 2.8284 = 1.9798$
- เมื่อ $\alpha = 0.8$ จะได้ $\omega_p = 0.8 \times 2.8284 = 2.2627$
- เมื่อ $\alpha = 0.9$ จะได้ $\omega_p = 0.9 \times 2.8284 = 2.5455$

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบเงื่อนไข ของสมการ (2.22) จะได้ว่า

- เมื่อ $\alpha = 0.5$ จะได้ $-3.5502 < -2.0858 < -1.5708$
- เมื่อ $\alpha = 0.6$ จะได้ $-3.5502 < -2.3524 < -1.5708$
- เมื่อ $\alpha = 0.7$ จะได้ $-3.5502 < -2.5858 < -1.5708$
- เมื่อ $\alpha = 0.8$ จะได้ $-3.5502 < -2.7922 < -1.5708$

- เมื่อ $\alpha = 0.9$ จะได้ $-3.5502 < -2.9763 < -1.5708$
 - เมื่อ $\alpha = 1$ จะได้ $-3.5502 < 3.1415 < -1.5708$
 - เมื่อ $\alpha = 2$ จะได้ $-3.5502 < 2.0856 < -1.5708$
- จะได้ว่ากรณี $\alpha = 1$ และ $\alpha = 2$ ไม่สามารถทำให้สมการเป็นจริง

ดังนั้นสำหรับพลาเน็ต 1 ซึ่งเป็นพลาเน็ตตัวอย่าง เมื่อข้อกำหนดคือ $A_m \geq 8$ และ $\varphi_m \geq \pi/3$ rad/s จะได้ว่าแนวทางการออกแบบวิธีนี้สามารถออกแบบค่าเกินของตัวควบคุมพีไอดี ด้วยการกำหนดค่า $\alpha \in [0.5, 0.9]$ เท่านั้น เนื่องจากเมื่อ $\alpha = 1$ ถึง 2 ไม่สามารถทำให้เงื่อนไขในสมการ (2.22) เป็นจริงได้ หากต้องการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยแนวทางการออกแบบวิธีนี้ โดยให้เงื่อนไขในสมการ (2.22) เป็นจริงทุกค่าสำหรับ $\alpha \in [0.5, 2]$ ตามคำแนะนำของ Wang, Fung และ Zhang (1999) ให้ดำเนินการปรับจูนค่า α หรือกำหนด A_m และ φ_m ที่ต้องการใหม่ตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 จนกระทั่งตรวจสอบเงื่อนไขในสมการ (2.22) เป็นจริงทุกค่าเมื่อ $\alpha \in [0.5, 2]$ จึงดำเนินการออกแบบในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดค่าเกิน K_p จากสมการ (2.23)

- เมื่อ $\alpha = 0.5$ จะได้ $K_p = 0.1407$
- เมื่อ $\alpha = 0.6$ จะได้ $K_p = 0.2526$
- เมื่อ $\alpha = 0.7$ จะได้ $K_p = 0.3810$
- เมื่อ $\alpha = 0.8$ จะได้ $K_p = 0.5239$
- เมื่อ $\alpha = 0.9$ จะได้ $K_p = 0.6791$

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าความถี่ตัดข้ามอัตรายาย (ω_g) จากสมการ (2.24)

- เมื่อ $\alpha = 0.5$ จะได้ $\omega_g = 0.3573$
- เมื่อ $\alpha = 0.6$ จะได้ $\omega_g = 0.4146$
- เมื่อ $\alpha = 0.7$ จะได้ $\omega_g = 0.4792$
- เมื่อ $\alpha = 0.8$ จะได้ $\omega_g = 0.5498$
- เมื่อ $\alpha = 0.9$ จะได้ $\omega_g = 0.6255$

ขั้นตอนที่ 7 กำหนด X_p และ X_g จะได้ว่า

- เมื่อ $\alpha = 0.5$ จะได้ $X_p = -0.2486$ และ $X_g = -1.0749$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.6$ จะได้ $X_p = -0.2545$ และ $X_g = -1.0839$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.7$ จะได้ $X_p = -0.2366$ และ $X_g = -1.0855$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.8$ จะได้ $X_p = -0.1909$ และ $X_g = -1.0768$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.9$ จะได้ $X_p = -0.1133$ และ $X_g = -1.0551$ ตามลำดับ

แทนค่า X_p และ X_g ลงในสมการ (2.25) และสมการ (2.26) เพื่อคำนวณหาค่าเกน K_I และ K_D ตามลำดับ

- เมื่อ $\alpha = 0.5$ จะได้ $K_I = 0.3863$ และ $K_D = 0.0174$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.6$ จะได้ $K_I = 0.4505$ และ $K_D = 0.0064$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.7$ จะได้ $K_I = 0.5234$ และ $K_D = 0.0140$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.8$ จะได้ $K_I = 0.6022$ และ $K_D = 0.0333$ ตามลำดับ
- เมื่อ $\alpha = 0.9$ จะได้ $K_I = 0.6840$ และ $K_D = 0.0610$ ตามลำดับ

นำค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีจากขั้นตอนการออกแบบที่ 1 ถึง 7 ซดเซพลานต์ 1 แล้วพิจารณาผลตอบสนองเช่นเดียวกับแนวทางแรก โดยแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.2 ต่อไป โดยเกณฑ์การพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์อ้างอิงจากหนังสือ Modern Control Engineering ของ Katsuhiko Ogata หน้า 564 กล่าวไว้ว่า “เมื่อพิจารณาระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมและพลานต์ ซึ่งระบบวงเปิดนี้เป็นระบบเฟสต่ำสุด ถ้าระบบวงเปิดที่พิจารณาให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี GM และ PM เป็นค่าบวกทั้งคู่ นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ แต่ถ้าระบบวงเปิดที่พิจารณาให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี GM และ PM เป็นค่าลบทั้งคู่ นั่นคือระบบวงปิดไม่มีเสถียรภาพสัมพัทธ์ และถ้าระบบวงเปิดที่พิจารณาให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี GM หรือ PM ค่าใดค่าหนึ่งเป็นค่าลบ จะไม่อาจสรุปได้ว่าระบบวงปิดมีหรือไม่มีเสถียรภาพสัมพัทธ์ ”

2.5 แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ

ขั้นตอนการออกแบบและรายละเอียดการแสดงตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ ได้อธิบายไว้ในหัวข้อนี้

2.5.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดอัตราส่วนการหน่วง (ζ) และความถี่ธรรมชาติ (ω_n) เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของโพลเด่น $p_{1,2}$ บนระนาบเอส จากสมการ (2.16)

ขั้นตอนที่ 2 วาดแผนภาพโพล์ซากรากจากสมการ (2.27)

$$\bar{G}(s) = \frac{N(s)[s^2 + 2as + (a^2 + b^2)]e^{-Ls}}{2aD(s)s + 2aX_2N(s)s^2e^{-Ls} - 2a(a^2 + b^2)X_1N(s)e^{-Ls}} \quad (2.27)$$

โดยที่ $X_1 = \frac{1}{2b} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right] + \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right]$

และ $X_2 = \frac{1}{2b} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right] - \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right]$

เมื่อ $N(s)$ คือ พจน์เศษของแบบจำลองพลาเน็ต

$D(s)$ คือ พจน์ส่วนของแบบจำลองพลาเน็ต

L คือ พจน์ประวิงเวลาของแบบจำลองพลาเน็ต

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดช่วงส่วนจริงของโพลเด่นที่ต้องการ (m) ซึ่งจะปราศจากซีโรในบริเวณใกล้เคียง โดยปกติกำหนดให้ $m \in [3, 5]$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า ma

ขั้นตอนที่ 5 ลากเส้นตรงจากจุด ma ขึ้นด้านบนเพื่อให้ตัดเส้นทางเดินของราก จากนั้นอ่านช่วงของค่า K_p ดังนั้นค่า K_p จะอยู่ในช่วงจุด ma ถึงจุดตัดทางเดินของราก

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าเกน K_I และ K_D ของตัวควบคุมพีไอดีจากสมการ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

$$K_I = \frac{a^2 + b^2}{2a} K_p - (a^2 + b^2) X_1 \quad (2.28)$$

$$K_D = \frac{1}{2a} K_p + X_2 \quad (2.29)$$

2.5.2 ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ

ต้องการให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วยมีปริมาณการพุ่งเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8% ($P.O. \leq 8\%$) และมีช่วงเวลาเข้าที่ไม่นานกว่า 8.25 วินาที ($t_s \leq 8.25$ s) ตัวอย่างการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าตำแหน่งของคู่โพลเด่นบนระนาบเอส

- เมื่อ $H = P.O. \leq 8\%$ จะได้ว่า $\zeta \geq 0.6266$
- เมื่อ $t_s \leq 8.25$ s จะได้ว่า $\omega_n \leq 0.7738$
- เมื่อแทนค่า ζ และ ω_n ลงในสมการที่ (2.16) จะได้ว่า $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่า X_1 และ X_2 เพื่อวาดแผนภาพโพลก็สรากรจากสมการ (2.27)

- คำนวณหาค่า X_1 จะได้

$$X_1 = \frac{1}{2(0.6031)} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)} \right] + \frac{1}{2(0.4848)} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)} \right]$$

$$X_1 = \frac{1}{2(0.6031)} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351} \right] + \frac{1}{2(0.4848)} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351} \right]$$

$$X_1 = \frac{1}{2(0.6031)} (-0.5416) + \frac{1}{2(0.4848)} (-0.0424) = -0.4928$$

- คำนวณหาค่า X_2 จะได้

$$X_2 = \frac{1}{2(0.6031)} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)} \right] - \frac{1}{2(0.4848)} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)} \right]$$

$$X_2 = \frac{1}{2(0.6031)} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351} \right] - \frac{1}{2(0.4848)} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351} \right]$$

$$X_2 = \frac{1}{2(0.6031)} (-0.5416) - \frac{1}{2(0.4848)} (-0.0424) = -0.4053$$

เมื่อ $N(s)$ คือ พจน์เศษของแบบจำลองพลาเน็ต มีค่าเป็น 1

$D(s)$ คือ พจน์ส่วนของแบบจำลองพลาเน็ต มีค่าเป็น

$$0.01563 s^4 + 0.2344 s^3 + 1.094 s^2 + 1.875 s + 1$$

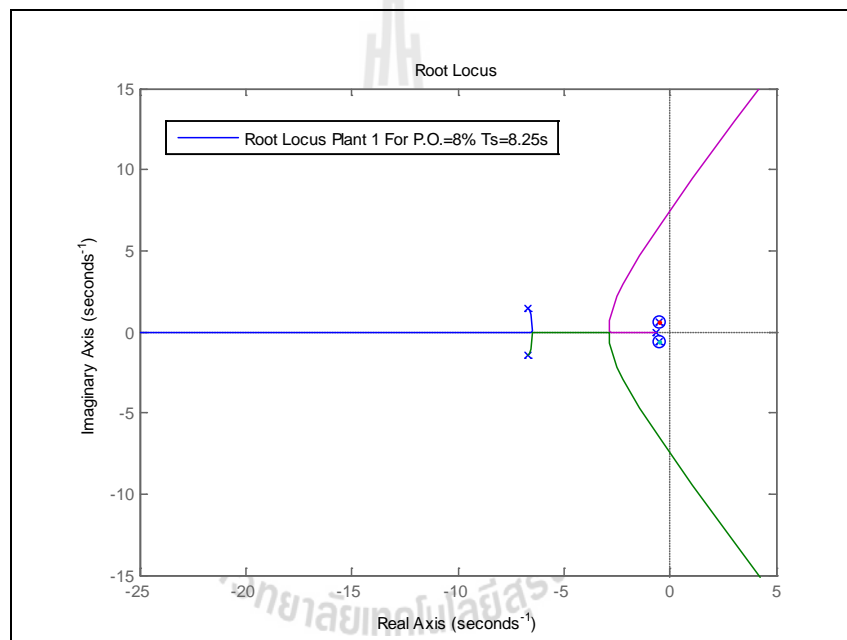
L คือ พจน์ประวิงเวลาของแบบจำลองพลาเน็ต มีค่าเป็น 0

- จากสมการ (2.27) จะได้

$$\bar{G}(s) = \frac{N(s)[s^2 + 2as + (a^2 + b^2)]e^{-Ls}}{2aD(s)s + 2aX_2N(s)s^2e^{-Ls} - 2a(a^2 + b^2)X_1N(s)e^{-Ls}}$$

$$\bar{G}(s) = \frac{s^2 + 0.9697s + 0.5988}{0.01516s^5 + 0.2273s^4 + 1.061s^3 + 1.425s^2 + 0.9697s + 0.2861}$$

- วาดแผนภาพโลกัสรากจากสมการ (2.27) จะได้เป็นดังนี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพโลกัสรากพลานต์ 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดช่วงส่วนจริงของโพลเด่นที่ต้องการ (m) ซึ่งไม่มีซีโรในบริเวณใกล้เคียง โดยปกติกำหนดให้ $m \in [3, 5]$

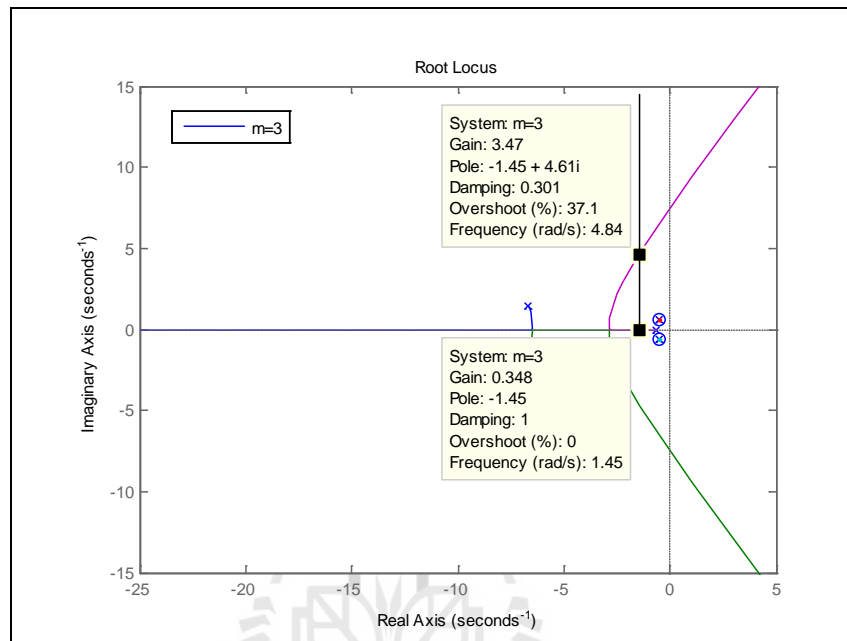
- ในที่นี้กำหนดให้ $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า ma

- กรณี $m = 3$ จะได้ $ma = 3 \times -0.4848 = -1.4545$
- กรณี $m = 4$ จะได้ $ma = 4 \times -0.4848 = -1.9394$
- กรณี $m = 5$ จะได้ $ma = 5 \times -0.4848 = -2.4242$

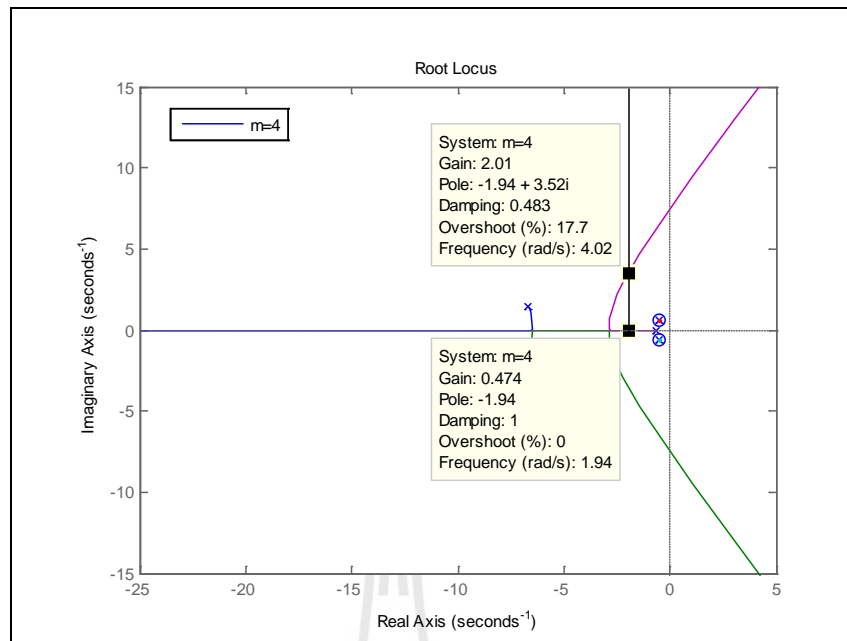
ขั้นตอนที่ 5 ลากเส้นตรงจากจุด ma ขึ้นด้านบนเพื่อให้ตัดเส้นทางเดินของราก จากนั้นอ่านช่วงของค่า K_p ดังนั้นค่า K_p จะอยู่ในช่วงจุด ma ถึงจุดตัดทางเดินของราก

- กรณี $m = 3$ ลากเส้นตรงจากจุด $ma = -1.4545$ ดังนั้นจะได้ว่าค่าเกน $K_p = 0.348$ และ $K_p = 3.47$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



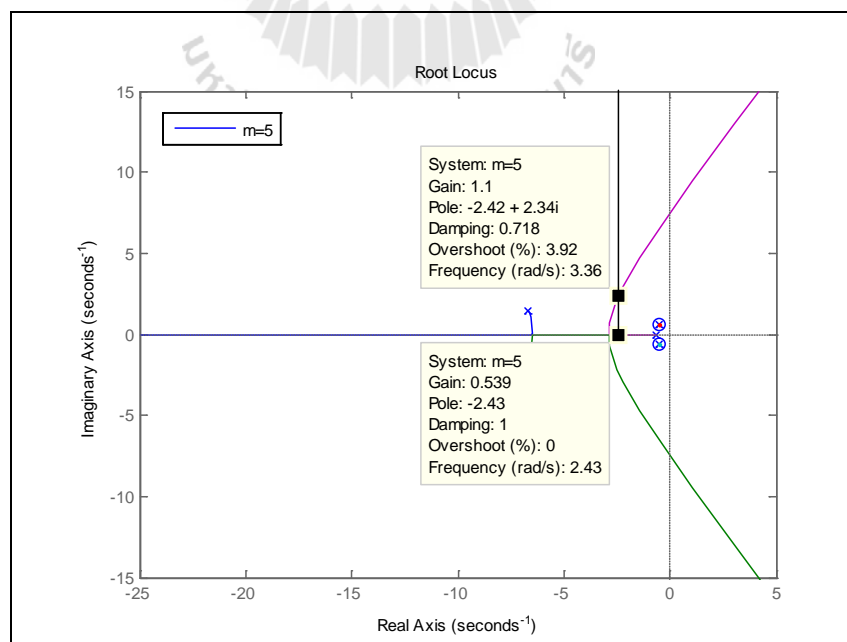
รูปที่ 2.9 แผนภาพโถ้กรากพลานต์ 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $m = 3$

- กรณี $m = 4$ ลากเส้นตรงจากจุด $ma = -1.9394$ ดังนั้นจะได้ว่าค่าเกน $K_p = 0.474$ และ $K_p = 2.01$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพโลโก้สรากพลานต์ 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $m = 4$

- กรณี $m = 5$ ลากเส้นตรงจากจุด $ma = -2.4242$ ดังนั้นจะได้ว่าค่าเกน $K_p = 0.539$ และ $K_p = 1.1$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพโลโก้สรากพลานต์ 1 เมื่อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s กรณี $m = 5$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าเกณฑ์ K_I ของตัวควบคุมพีไอดี จากสมการ (2.28) ได้ดังนี้

- กรณี $m = 3$ เมื่อ $K_p = 0.348$ จะได้ $K_I = 0.5099$
- กรณี $m = 3$ เมื่อ $K_p = 3.470$ จะได้ $K_I = 2.4377$
- กรณี $m = 4$ เมื่อ $K_p = 0.474$ จะได้ $K_I = 0.5878$
- กรณี $m = 4$ เมื่อ $K_p = 2.010$ จะได้ $K_I = 1.5362$
- กรณี $m = 5$ เมื่อ $K_p = 0.539$ จะได้ $K_I = 0.6279$
- กรณี $m = 5$ เมื่อ $K_p = 1.100$ จะได้ $K_I = 0.9743$

คำนวณค่าเกณฑ์ K_D ของตัวควบคุมพีไอดี จากสมการ (2.29) ได้ดังนี้

- กรณี $m = 3$ เมื่อ $K_p = 0.348$ จะได้ $K_D = -0.0465$
- กรณี $m = 3$ เมื่อ $K_p = 3.470$ จะได้ $K_D = 3.1731$
- กรณี $m = 4$ เมื่อ $K_p = 0.474$ จะได้ $K_D = 0.0835$
- กรณี $m = 4$ เมื่อ $K_p = 2.010$ จะได้ $K_D = 1.6675$
- กรณี $m = 5$ เมื่อ $K_p = 0.539$ จะได้ $K_D = 0.1505$
- กรณี $m = 5$ เมื่อ $K_p = 1.100$ จะได้ $K_D = 0.7290$

ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 เมื่อชดเชยพลาเน็ต 1 จะพิจารณาผลตอบสนองเช่นเดียวกับแนวทางแรก ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.3 ต่อไป

2.6 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้อธิบายขั้นตอนดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีและแสดงตัวอย่างการออกแบบทั้งสามแนวทางดังที่ได้กล่าวไว้ ซึ่งแต่ละแนวทางการออกแบบมีขั้นตอนและให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป อย่างเช่นในแนวทางแรกการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟื่อเฟส เป็นแนวทางการออกแบบที่ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยากในการออกแบบ มีเพียง 5 ขั้นตอน แต่การกำหนดขอบเขตของช่วง ω ที่ต้องการค้นหาค่าเกณฑ์ K_I หากกำหนดกว้างหรือละเอียดเกินไป จะส่งผลให้ใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบนานมาก ในทางตรงกันข้ามขอบเขตของช่วง ω ที่แคบหรือมีความละเอียดในการค้นหาลดน้อยเกินไป ผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่สามารถหาค่าเกณฑ์ K_I ที่เหมาะสมได้ และเนื่องด้วยแนวทางการออกแบบวิธีนี้ใช้จุดตัดของเส้นกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ คือค่าเกณฑ์ K_I ที่ใช้ชดเชยพลาเน็ต ซึ่งในบางกรณีเส้นกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ อาจตัดกันมากกว่าหนึ่งจุด นั่นคือมีค่าเกณฑ์ K_I มากกว่าหนึ่งค่า ดังนั้นถ้าผู้ใช้เลือกค่าเกณฑ์ K_I ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ แนวทางถัดมาวิธีการออกแบบค่าเกณฑ์ของ

ตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ได้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีส่วนเพื่ออัตราขยาย (GM) และส่วนเฟส (PM) ที่ต้องการอย่างแม่นยำ ขั้นตอนในการออกแบบไม่ยุ่งยากซับซ้อนเท่าไรนัก มีเพียง 7 ขั้นตอนการออกแบบ แต่การกำหนดค่า α , A_m และ φ_m ที่ต้องการให้สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการ (2.22) อาจไม่สะดวกกับผู้ใช้งานในบางพลาเน็ต และต้องพึงระวังถึงค่า α วิฤตในแต่ละข้อกำหนดที่ใช้ชดเชยแต่ละพลาเน็ต เพราะนั่นจะส่งผลให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด และแนวทางสุดท้ายเป็นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ มีเพียง 6 ขั้นตอนในการออกแบบ แนวทางนี้อาศัยแผนภาพโลกัศรากล ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับทุกวิธีที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์นี้ แต่แผนภาพโลกัศรากลบางพลาเน็ตอาจไม่สามารถให้ค่าเกน K_p ที่ทำให้ระบบวงปิดมีโพลอื่น ๆ ห่างจากคู่โพลเด่นเป็นจำนวน m เท่าได้ตามต้องการ นั่นคือผลตอบสนองระบบวงปิดที่ได้อาจไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากโพลอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้กับคู่โพลเด่น สุดท้ายการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการออกแบบในแต่ละแนวทางเป็นสิ่งสำคัญ จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ อาจสังเกตได้ว่าในขั้นตอนการออกแบบต้องเลือกค่าต่าง ๆ ตามประสบการณ์ของผู้ออกแบบ เช่น การเลือกค่า α , A_m และ φ_m ในแนวทางที่สอง การกำหนดตำแหน่งของคู่โพลเด่นเป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ผลลัพธ์ในการออกแบบ นั่นคือผลตอบสนองของระบบวงปิดอาจไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง หากกำหนดเงื่อนไขความต้องการต่าง ๆ ไม่เหมาะสม

บทที่ 3

ผลการจำลองสถานการณ์ชุดเซพลานต์ควบคุมยาก 5 พลานต์ จากแนวทางการ ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสามแนวทางที่ศึกษาก่อนหน้านี้

3.1 บทนำ

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในบทที่ 3 คือผลการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งหมดสามแนวทาง แนวทางแรกคือวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟส แนวทางที่สองคือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ระบบวงปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และแนวทางที่สามคือการวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี เพื่อใช้ชุดเซพลานต์ควบคุมยากทั้ง 5 พลานต์ บทนี้ได้อธิบาย วิเคราะห์ผลการจำลองสถานการณ์ พิจารณาผลตอบสนองของระบบวงปิดในโดเมนเวลาและผลตอบสนองในโดเมนความถี่ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วย รวมถึงพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ โดยค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีคือค่าเกนที่คำนวณได้จากขั้นตอนการออกแบบของแต่ละแนวทางในหัวข้อ 2.3.1 , 2.4.1 และ 2.5.1 ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 2 และยังสามารถสรุปการนำแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสามแนวทางไปใช้ชุดเซพลานต์แต่ละพลานต์

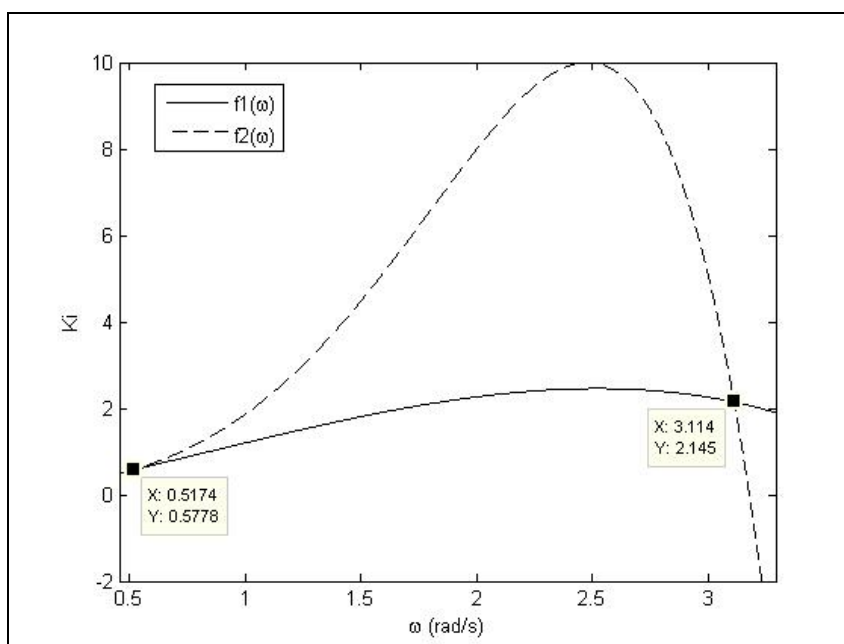
3.2 ผลการจำลองสถานการณ์

ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเพื่อชุดเซพลานต์ควบคุมยากทั้ง 5 พลานต์ โดยจำลองสถานการณ์ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลานต์ควบคุมยากและตัวควบคุมพีไอดี ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอผลตอบสนองของระบบเมื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีที่แตกต่างกันทั้งหมดสามแนวทางสำหรับชุดเซพแต่ละพลานต์ เพื่อศึกษาเสถียรภาพสัมพัทธ์ ตำแหน่งของโพลและซีโรของระบบวงปิด และสมรรถนะของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วย โดยมีผลการออกแบบและผลการจำลองสถานการณ์ดังนี้

3.2.1 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแนวทางที่ 1

ชุดเซพลานต์ควบคุมยาก เมื่อค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีคือค่าเกนที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 ในหัวข้อ 2.3.1 ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 2

พลาเน็ต 1 ภายใต้ข้อกำหนดที่ให้ออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$, $t_s \leq 8.25$ s และ $PM \geq 60^\circ$ จึงระบุพหุคูณโพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$ เมื่อกำหนดขอบเขตช่วง ω ที่ต้องการคือ $-1000 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 1000 \text{ rad/s}$ และให้ ω มีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.001 rad/s จะได้จุดตัดกราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ที่ให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดมีเสถียรภาพทั้งหมด 2 จุดตัด ณ ตำแหน่งที่ ω มีค่าเท่ากับ 0.5174 rad/s และ 3.114 rad/s ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

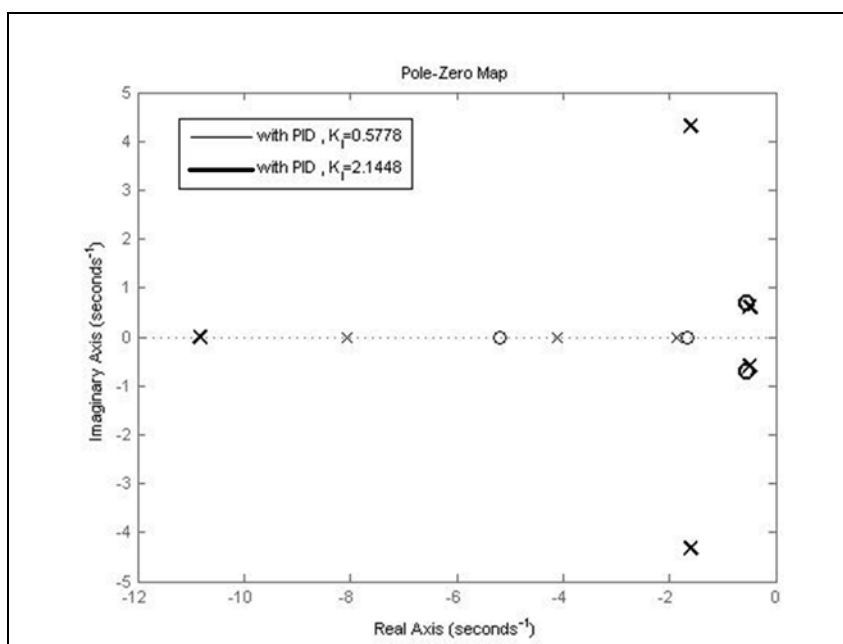


รูปที่ 3.1 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลาเน็ต 1

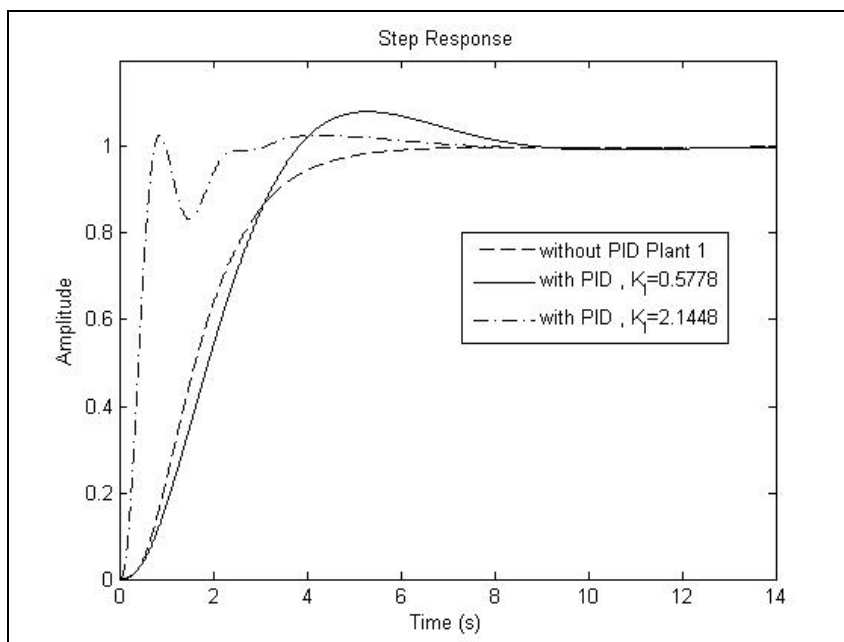
เมื่อพิจารณารูปกราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ในรูปที่ 3.1 ซึ่งตัดกันที่จุด $(0.5174, 0.5778)$ และ $(3.114, 2.145)$ จึงได้ว่าค่าเกน K_I มีค่าเท่ากับ 0.5778 และ 2.1448 ตามลำดับ เลือกค่าเกน K_I จากการพิจารณาเงื่อนไข $K_{I,\min} > \max\{0, K_{I1}, K_{I2}\}$ เมื่อกำหนดค่า K_{I1} และ K_{I2} จะได้ว่า $K_{I,\min} > \max\{0, 0.5378, 0.2951\}$ ดังนั้น $K_I = 0.5778$ คือค่าที่สอดคล้องกับเงื่อนไข แต่ในงานนี้จะพิจารณารณี $K_I = 2.1448$ เพิ่มเติมเป็นกรณีศึกษา จากนั้นแทนค่าเกน K_I ลงในสมการที่ (2.19) และ (2.20) เพื่อคำนวณค่าเกน K_D และ K_P ตามลำดับ โดยให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_I = 0.5778$	ซีโร : -5.18 , -1.67 โพล : -8.05 , -4.12 , -1.86 , $-0.485 \pm j0.603$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_I = 2.1448$	ซีโร : $-0.558 \pm j0.698$ โพล : -10.8 , $-1.6 \pm j4.31$, $-0.485 \pm j0.603$

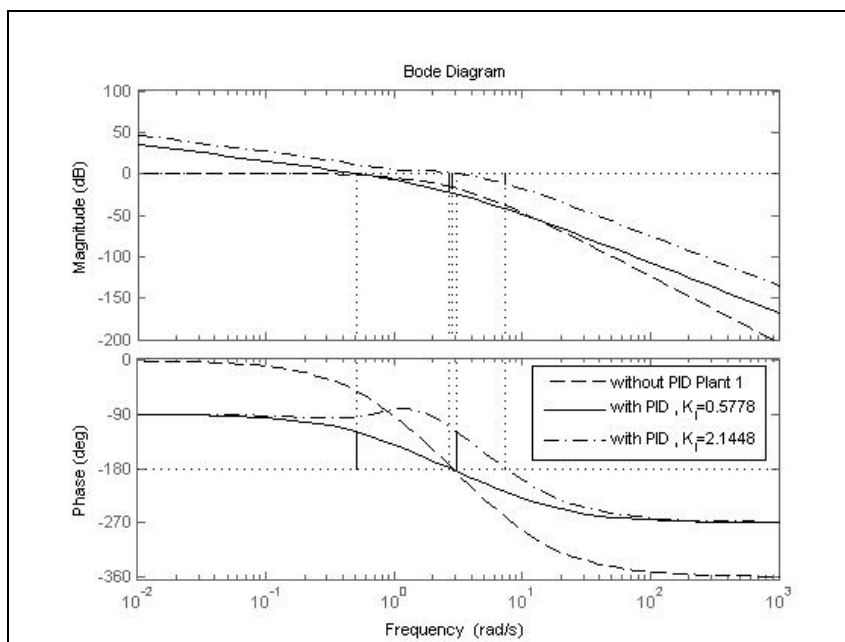
รูปที่ 3.2 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.5778$ และ $K_I = 2.1448$

ระบบวงปิดทั้งสองมีคู่โพลเด่นตามที่ต้องการคือ $-0.4848 \pm j0.6031$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 และข้อมูลตารางที่ 3.1 ในกรณีที่ $K_I = 0.5778$ ซึ่งแสดงด้วยเส้นบาง คู่โพล $-0.4848 \pm j0.6031$ คือคู่โพลเด่นที่แท้จริง เพราะโพลอื่น ๆ ที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับคู่โพลเด่นมากที่สุดมีส่วนจริงที่มีขนาดมากกว่าส่วนจริงของคู่โพลเด่น 3.84 เท่า และไม่มีซีโรอยู่ใกล้กับคู่โพลเด่น แต่เนื่องจากระบบวงปิดคือระบบที่มีอันดับมากกว่าสอง จึงทำให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะมากกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย ในกรณีที่ $K_I = 2.1448$ ซึ่งแสดงด้วยเส้นหนา คู่โพล $-0.4848 \pm j0.6031$ ไม่เป็นคู่โพลเด่นที่แท้จริง เพราะคู่ซีโร $-0.558 \pm j0.698$ มีตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับคู่โพลดังกล่าวมาก คู่ซีโรนี้อาจจะหักล้างอิทธิพลที่เกิดจากคู่โพล $-0.4848 \pm j0.6031$ ทำให้คู่โพล $-1.6 \pm j4.31$ มีอิทธิพลแทนที่คู่โพล $-0.4848 \pm j0.6031$ เป็นผลให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะไม่เกินจากข้อกำหนดอธิบายผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5778$ และ $K_I = 2.1448$ ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.3 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 3.2 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าผลตอบสนองของพลานต์ (ช่วงเวลาขึ้นสั้นกว่า) ในกรณีที่ $K_I = 0.5778$ ผลตอบสนองมี $t_r = 2.46$ วินาที มี $t_s = 7.85$ วินาที และมี $P.O. = 8.16\%$ และในกรณีที่ $K_I = 2.1448$ ผลตอบสนองมี $t_r = 0.451$ วินาที มี $t_s = 5.49$ วินาที และมี $P.O. = 2.64\%$ นั่นคือผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในกรณีที่ $K_I = 2.1448$ มีสมรรถนะไม่มากกว่าข้อกำหนด $t_s \leq 8.25$ วินาที และ $P.O. \leq 8\%$ แต่ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในกรณีที่ $K_I = 0.5778$ มี $P.O.$ มากกว่าข้อกำหนดในโดเมนเวลาที่ต้องการเล็กน้อย ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม ระบบมี PM ที่หาค่าไม่ได้ ($PM \approx \infty$) และมี $GM = 16.5873$ dB ในกรณีที่มีตัวควบคุม ระบบทั้งสองมี $PM \approx 60^\circ$ ซึ่งตรงกับข้อกำหนดในโดเมนความถี่ และมี $GM = 22.6$ dB และ $GM = 12.3$ dB นั่นคือระบบวงปิดทั้งสองมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก และถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย ซึ่งอธิบายได้โดยแผนภาพโบลต์ที่แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพโบคของพลาเน็ต (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลาเน็ตและตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5778$ และ $K_I = 2.1448$ ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 1)

	ค่าเกณฑ์ ของตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	2.7	5.02	—	16.5873	∞	2.8283	—
ระบบวงเปิด $K_I = 0.5778$	0.4579	0.0669	2.46	7.85	8.16	22.56	60	2.7	0.5174
ระบบวงเปิด $K_I = 2.1448$	2.9956	2.6839	0.451	5.49	2.64	12.3	60	7.3757	3.11

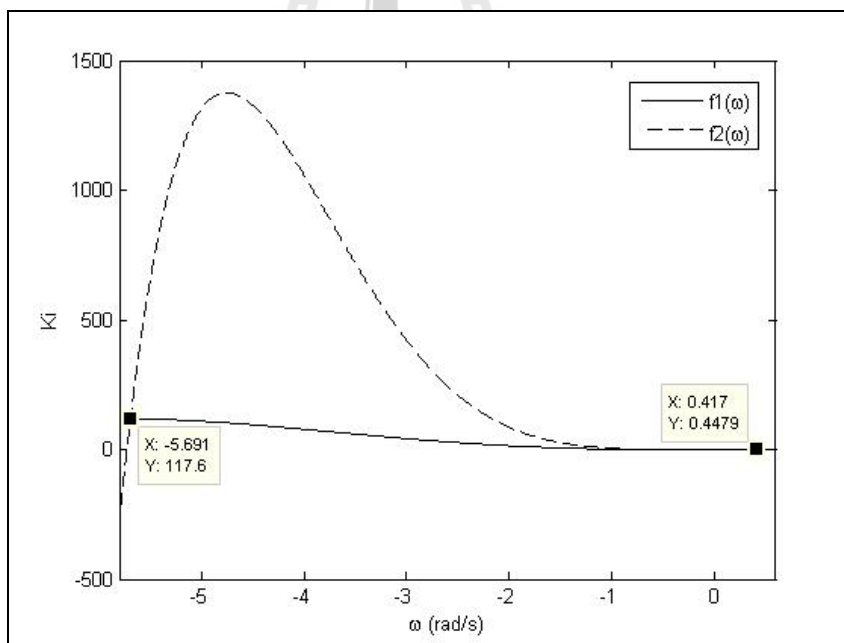
หมายเหตุ: ช่วงเวลาขึ้น (t_r) คือ ช่วงระยะเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าเท่ากับ 10% ของค่าในสถานะ
อยู่ตัว (หรือค่าสัญญาณอ้างอิงขึ้นบันไดหนึ่งหน่วย) จนถึง 90% ของค่าในสถานะอยู่ตัว
ในครั้งแรก (หรือค่าสัญญาณอ้างอิงขึ้นบันไดหนึ่งหน่วย)

ช่วงเวลาเข้าที่ (t_s) คือช่วงระยะเวลาที่เริ่มต้นเกิดผลตอบสนองจนถึงผลตอบสนอง
ไม่มีความผิดพลาดมากกว่า 2% อีกต่อไป (สมมุติว่าผลตอบสนองไม่มีเวลาประวิง)

GM คือส่วนเผื่ออัตราขยาย และ PM คือส่วนเผื่อเฟส

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ ข้อกำหนดเดียวกันอาจจะให้ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกินมากกว่าหนึ่งชุดหรือมากกว่าหนึ่งกรณี ทำให้ระบบวงปิดอาจจะไม่มีซีโรหรือไม่มีโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับคู่โพลเด่นที่ต้องการบนระนาบเอสได้ในบางกรณี หรือระบบวงปิดอาจจะมีซีโรหรือมีโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับคู่โพลเด่นที่ต้องการได้ในบางกรณี หรือระบบวงปิดอาจจะมีโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงเกินจินตภาพมากกว่าคู่โพลเด่นที่ต้องการได้ในบางกรณี นั่นคือค่าเกณฑ์ K_T ที่ได้จากจุดตัดของกราฟและสอดคล้องกับเงื่อนไขอาจจะไม่เป็นค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม และระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ให้สมรรถนะในโดเมนเวลาเกินข้อกำหนด แต่ค่าเกณฑ์ K_T ที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขจะเป็นค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม และผลตอบสนองให้สมรรถนะในโดเมนเวลาไม่เกินข้อกำหนด

พลาเน็ต 2 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$, $t_s \leq 8.25$ s และ $PM \geq 60^\circ$ จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$ แสดงจุดตัดกราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ได้ดังรูปที่ 3.5



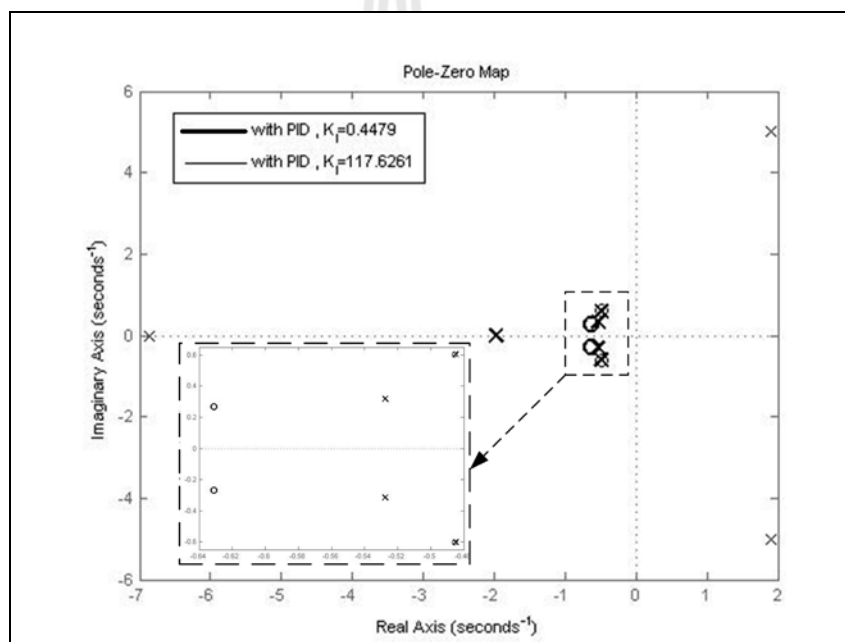
รูปที่ 3.5 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลาเน็ต 2

เมื่อพิจารณากราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ที่แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งตัดกันที่จุด $(-5.6914, 117.6261)$ และ $(0.417, 0.4479)$ จะได้ว่าค่าเกณฑ์ K_T มีค่าเท่ากับ 117.6261 และ 0.4479 เมื่อพิจารณาเงื่อนไข $K_{T,\min} > \max\{0, K_{T1}, K_{T2}\}$ และคำนวณหาค่า K_{T1} และ K_{T2} จะได้ว่า

$K_{I,\min} > \max\{0, -0.1213, -0.2931\}$ ดังนั้น $K_I = 0.4479$ คือค่าที่สอดคล้องกับเงื่อนไข แต่ในงานนี้จะพิจารณา $K_I = 117.6261$ เพิ่มเติม ต่อมาแทนค่า K_I ลงในสมการที่ (2.19) และ (2.20) เพื่อคำนวณ K_D และ K_P ตามลำดับ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 2)

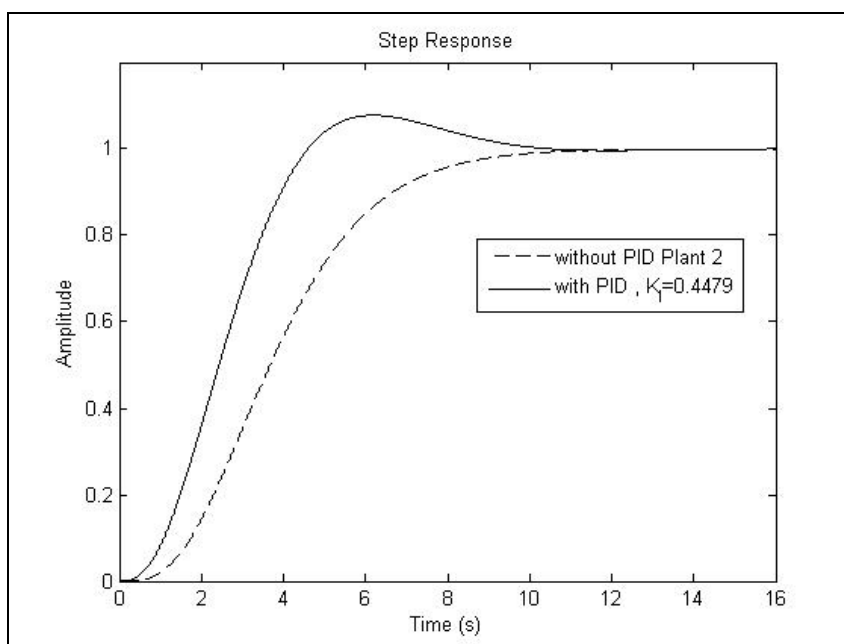
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_I = 0.4479$	ซีโร : $-0.631 \pm j0.27$ โพล : -1.98 , $-0.528 \pm j0.317$, $-0.485 \pm j0.603$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_I = 117.6261$	ซีโร : $-0.486 \pm j0.602$ โพล : -6.85 , $-0.485 \pm j0.603$, $1.91 \pm j5.0012$



รูปที่ 3.6 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.4479$ และ $K_I = 117.6261$

ผลการจำลองสถานการณ์ให้ตำแหน่งโพลและซีโรของระบบวงปิดดังที่แสดงได้ในรูปที่ 3.6 และข้อมูลในตารางที่ 3.3 อธิบายได้ว่า ในกรณี $K_I = 0.4479$ แสดงด้วยเส้นหนา ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน และคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน เกือบเท่ากัน เพราะคู่โพลเด่น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนมีตำแหน่งใกล้เคียงกันในระนาบเอส และคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่นน้อยกว่า 3 เท่า (ถ้าคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนหรือโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่น มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่น มากกว่า 3 เท่า หรือ มากกว่า 5 เท่า และไม่มีซีโรอยู่ใน

บริเวณใกล้เคียงกับคู่โพลเด่น จะทำให้ผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นมากกว่าอย่างชัดเจน) และในกรณีที่ $K_I = 117.6261$ แสดงด้วยเส้นบาง ระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส ทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ แสดงผลตอบสนองในโดเมนเวลาของพลาเน็ตและของระบบวงปิดในกรณี $K_I = 0.4479$ ได้ดังรูปที่ 3.7 และแสดงการตรวจสอบอิทธิพลของคู่โพลเด่นที่มีต่อผลตอบสนองได้ในรูปที่ 3.8

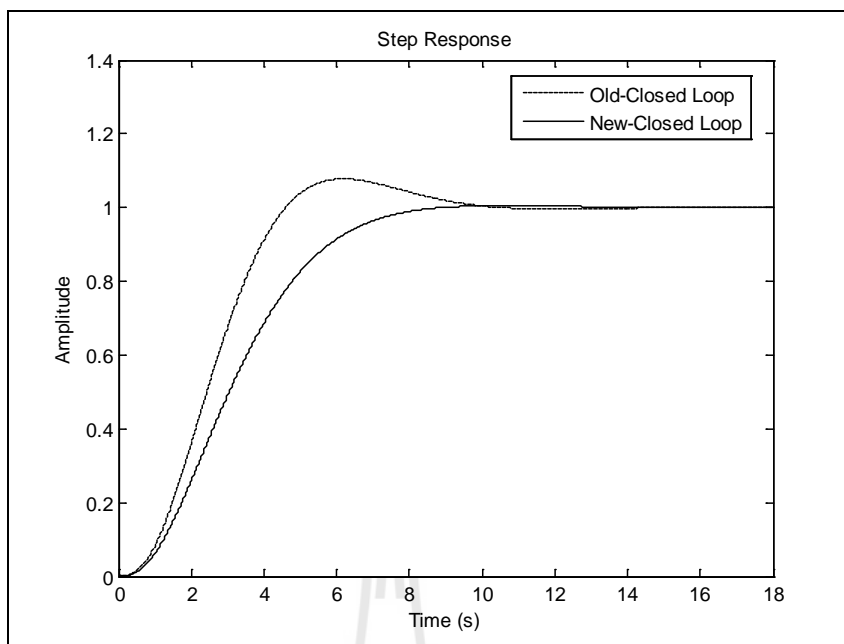


รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4479$ ตามลำดับ

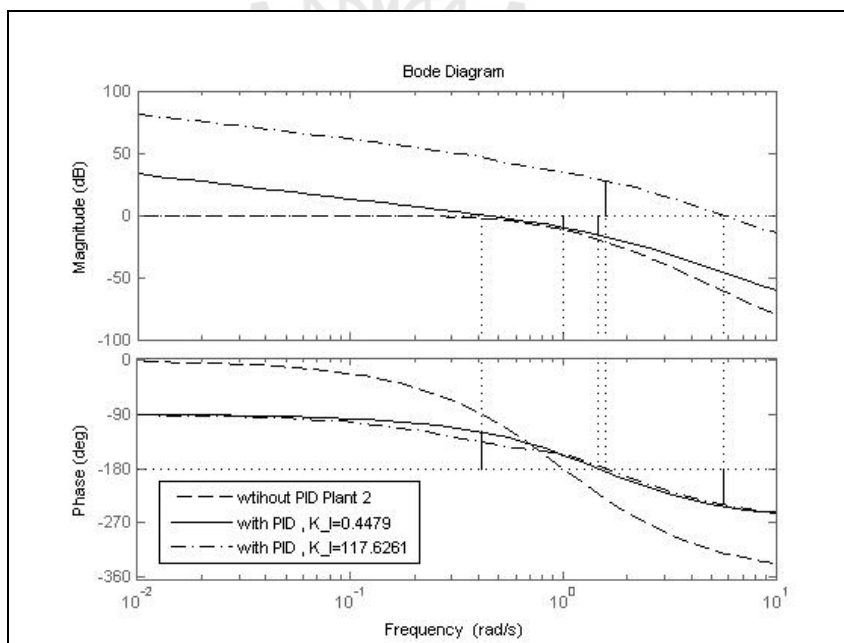
ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 3.7 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 3.4 อธิบายได้ว่า ในกรณีที่ $K_I = 0.4479$ ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลานั้นสั้นกว่าช่วงเวลานั้นของผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต แต่มีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าข้อกำหนด ($t_s = 8.99 \text{ s} > 8.25 \text{ s}$) และมีปริมาณการพุ่งเกินน้อยกว่าข้อกำหนด ($P.O. = 7.79 \% < 8 \%$)

การตรวจสอบผลตอบสนองของระบบวงปิดที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นจะเริ่มต้นจากการคำนวณค่าจีเชน (DC gain) ของฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงปิด (old closed-loop system) ต่อมาพิจารณาระบบใหม่ (new closed-loop system) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดที่ไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนและคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน ทำให้ระบบใหม่มีเฉพาะคู่โพลเด่น โพลอื่น ๆ และซีโรอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนและมีตำแหน่งอยู่ห่างจากคู่โพลเด่น เพื่อตรวจสอบการหักล้างอิทธิพลซึ่งกันและกันระหว่างคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนและคู่ซีโรสัง

ยุคเชิงซ้อนนี้ กล่าวคือถ้าการหักล้างอิทธิพลซึ่งกันและกันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์ คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนจะไม่มีผลกระทบหรือแทบไม่มีอิทธิพลถึงผลตอบสนอง ทำให้ระบบใหม่มีผลตอบสนองที่เหมือนกับหรือคล้ายกับผลตอบสนองของระบบวงปิด นั่นคือระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น แต่ถ้าไม่มีการหักล้างอิทธิพลซึ่งกันและกันหรือมีการหักล้างอิทธิพลเพียงบางส่วน คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน และคู่โพลเด่นจะมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองของระบบวงปิด ทำให้ระบบใหม่มีผลตอบสนองที่แตกต่างจากผลตอบสนองของระบบวงปิด จากนั้นคำนวณค่าดัชนีเกินของฟังก์ชันถ่ายโอนระบบใหม่และนำค่าดัชนีเกินค่านี้ไปหารกับค่าดัชนีเกินของระบบวงปิด ต่อมานำผลลัพธ์ที่ได้จากการหารไปคูณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบใหม่ จากนั้นตรวจสอบผลตอบสนองของระบบใหม่ ถ้าระบบใหม่ให้ผลตอบสนองที่เหมือนกับหรือคล้ายกับผลตอบสนองของระบบวงปิด จะได้ว่าคู่โพลเด่นเท่านั้นที่มีอิทธิพลถึงผลตอบสนองของระบบวงปิด แต่ถ้าระบบใหม่ให้ผลตอบสนองที่แตกต่างจากผลตอบสนองของระบบวงปิด จะได้ว่าผลตอบสนองของระบบวงปิดได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน และคู่โพลเด่น เมื่อพิจารณาการใช้แนวทางที่ 1 คำนวณค่าเกินของตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพแลนด์ 2 ในกรณีนี้ $K_f = 0.4479$ ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงปิดมีค่าดัชนีเกินเท่ากับ 1 เนื่องจากระบบใหม่มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดที่ไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.528 \pm j0.317$ และไม่มีคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.631 \pm j0.27$ ทำให้ระบบใหม่นี้มีค่าดัชนีเกินเท่ากับ 1.3366 ต่อมานำตัวเลข 0.7482 ไปคูณกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบใหม่ จากนั้นตรวจสอบผลตอบสนองของระบบใหม่ จะได้ว่าระบบใหม่ให้ผลตอบสนองที่แตกต่างจากผลตอบสนองของระบบวงปิดซึ่งแสดงในรูปที่ 3.8 นั่นคือผลตอบสนองของระบบวงปิดได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน และคู่โพลเด่น ทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าข้อกำหนด



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดพลานต์ 2 เมื่อค่าเกน $K_I = 0.4479$ ก่อนและหลังตัดคู่โพลและคู่อิโวลต์ของระบบ



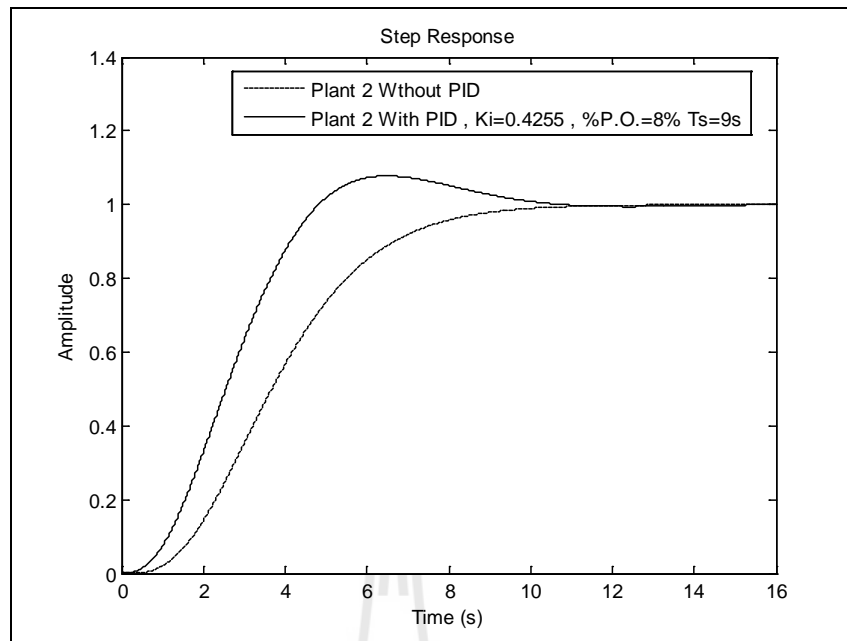
รูปที่ 3.9 แผนภาพโบดของพลานต์ (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4479$ และ $K_I = 117.6261$ ตามลำดับ

ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่แสดงในรูปที่ 3.9 ให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่อยู่ในเกณฑ์ดีและไม่ต่ำกว่าข้อกำหนด ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก และถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตารางที่ 3.4 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 2)

	ค่าเกณฑ์ ของตัวควบคุม		สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่						
	K_P	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	4.94	9.08	—	12.0412	∞	1	0
ระบบวงปิด $K_I = 0.4479$	1.2000	0.9506	2.85	8.99	7.79	15.6	60	1.45	0.417
ระบบวงปิด $K_I = 117.6261$	190.9667	196.6475	—	—	—	-27.8	-60	1.59	5.69

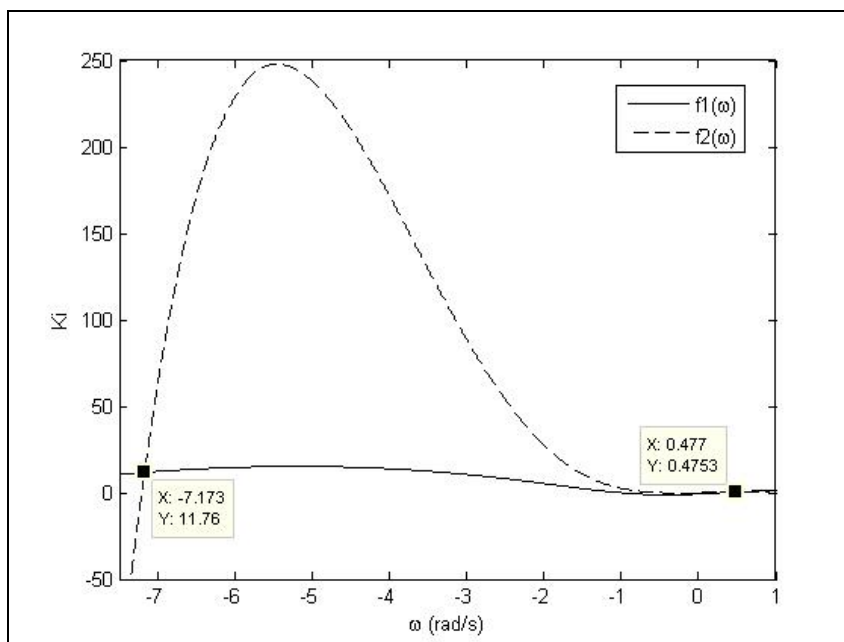
เนื่องจากระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาที่เข้าที่นานกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย ($t_s = 8.99 \text{ s} > 8.25 \text{ s}$) ต่อมาจึงเปลี่ยนข้อกำหนดใหม่ที่ต้องการให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่แสดงสมรรถนะ $t_s \leq 9$ วินาที $P.O. \leq 8\%$ และ $PM \geq 60^\circ$ เพื่อใช้ข้อกำหนดที่ผ่อนปรนมากขึ้นสำหรับแนวทางในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีวิธีนี้ที่ทำหน้าที่ชดเชยพลาเน็ต 2 ดังนั้นจะได้กรณีค่าเกณฑ์ $K_I = 0.4255$ ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 3.10 อธิบายได้ว่าระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาที่ขึ้นสั้นกว่าช่วงเวลาที่ขึ้นของผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต ($t_r = 3 \text{ s} < 4.94 \text{ s}$) แต่มีช่วงเวลาที่เข้าที่นานกว่าข้อกำหนด ($t_s = 9.35 \text{ s} > 9.00 \text{ s}$) และนานกว่าช่วงเวลาที่เข้าที่ของผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต ($t_s = 9.35 \text{ s} > 9.08 \text{ s}$) และผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินน้อยกว่าข้อกำหนด ($P.O. = 7.79\% < 8\%$) ดังนั้นเมื่อพิจารณาข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมและผลการจำลองสถานการณ์ การใช้แนวทางที่ 1 คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 2 จะทำให้ระบบวงปิดสร้างผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะเกินข้อกำหนด การใช้แนวทางที่ 1 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 2 และการเลือกข้อกำหนดที่เหมาะสม คืองานที่ต้องการศึกษาและการวิเคราะห์เพิ่มเติม



รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4255$ ตามลำดับ

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลานต์ 2 และตัวควบคุมพีไอดี การใช้แนวทางที่ 1 คำนวณค่าเกนของตัวควบคุม จะให้ระบบวงปิดที่ขาดเสถียรภาพหรือมีเสถียรภาพ กล่าวคือ ในการเลือกข้อกำหนดที่มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นเกินไป ค่าเกน K_I ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขจะทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ และค่าเกน K_I ที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขจะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพแต่ผลตอบสนองมีสมรรถนะเกินกว่าข้อกำหนดมาก และในการเลือกข้อกำหนดที่มีช่วงเวลาเข้าที่นานมากกว่า ค่าเกน K_I ที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขจะทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ และค่าเกน K_I ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขจะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพและผลตอบสนองมีสมรรถนะดีกว่าแต่ยังคงเกินกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย นั่นคือการเลือกข้อกำหนดที่มีช่วงเวลาเข้าที่นานไม่ได้หมายถึงระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะไม่มากกว่าข้อกำหนด ดังนั้นการเลือกข้อกำหนดที่มีช่วงเวลาเข้าที่นานมากกว่าและการใช้แนวทางที่ 1 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพพลานต์ 2 คือการเพิ่มโอกาสให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับความต้องการเท่านั้น

พลานต์ 3 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$, $t_s \leq 7\text{ s}$ และ $PM \geq 60^\circ$ จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.5714 \pm j0.7108$ สามารถแสดงจุดตัดของกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ เพื่อระบุค่าเกน K_I ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีได้ดังรูปที่ 3.11

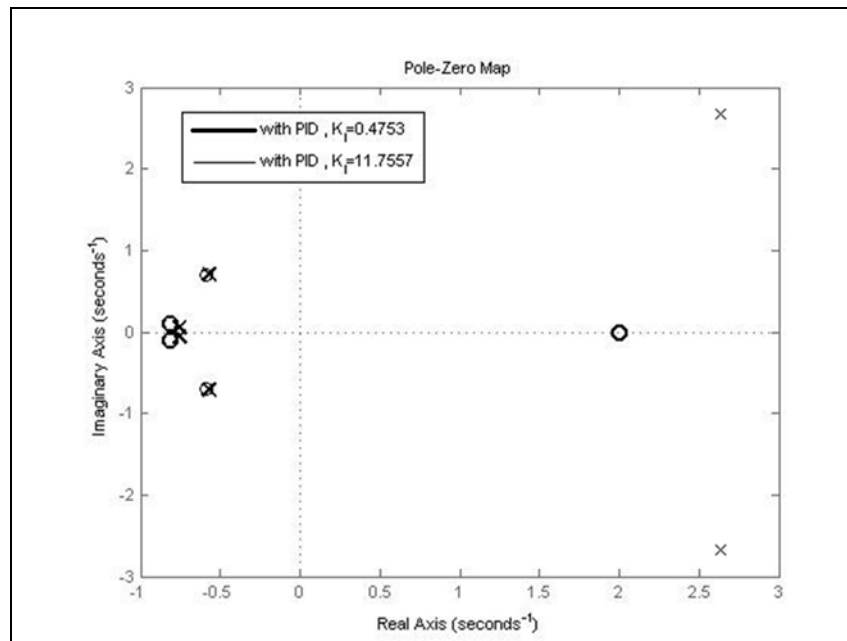


รูปที่ 3.11 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลานต์ 3

เมื่อพิจารณากราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ที่แสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งตัดกันที่จุด $(-7.173, 11.7557)$ และ $(0.477, 0.4753)$ ตามลำดับ จึงได้ว่าค่าเกน K_I มีค่าเท่ากับ 11.7557 และ 0.4753 เมื่อพิจารณาเงื่อนไข $K_{I,\min} > \max\{0, K_{I1}, K_{I2}\}$ และคำนวณหาค่า K_{I1} และ K_{I2} จะได้ว่า $K_{I,\min} > \max\{0, -0.1059, -0.3578\}$ ดังนั้น $K_I = 0.4753$ คือค่าที่สอดคล้องกับเงื่อนไข ในงานนี้จึงละเว้นการพิจารณาค่า $K_I = 11.7557$ เพื่อความกระชับของเนื้อหา เนื่องจากเป็นค่าเกนที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไข และระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน 1 คู่ อยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3.12 ทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ เมื่อแทนค่า K_I ลงในสมการที่ (2.19) และ (2.20) จะคำนวณ K_D และ K_P ได้ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ ให้ข้อมูลที่สำคัญดังต่อไปนี้

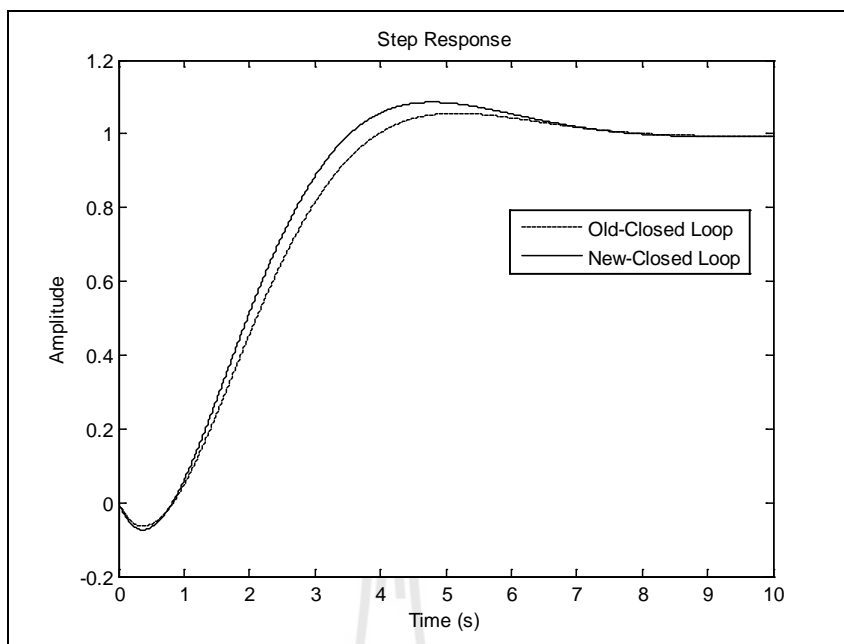
ตารางที่ 3.5 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลานต์ 3)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_I = 0.4753$	ซีโร : $-0.819 \pm j0.0958$, 2 โพล : $-0.754 \pm j0.0559$, $-0.571 \pm j0.711$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_I = 11.7557$	ซีโร : $-0.584 \pm j0.696$, 2 โพล : $-0.571 \pm j0.711$, $2.64 \pm j2.68$



รูปที่ 3.12 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.4753$ และ $K_I = 11.7557$

แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.12 และข้อมูลในตารางที่ 3.5 อธิบายได้ว่าในกรณีที่ $K_I = 11.7557$ ซึ่งแสดงด้วยเส้นบาง ระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนหนึ่งคู่อยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส ทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ ในกรณีที่ $K_I = 0.4753$ ซึ่งแสดงด้วยเส้นหนา ระบบวงปิดมีซีโร +2 อยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.754 \pm j0.0559$ และคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.819 \pm j0.0958$ มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับคู่โพลเด่น $-0.5714 \pm j0.7108$ พอสมควร ทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน และคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนดังกล่าว แต่ผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นมากกว่า เพราะคู่โพลเด่นอยู่ใกล้แกนจินตภาพมากกว่า และตำแหน่งของคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนอยู่ใกล้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมากกว่าใกล้คู่โพลเด่น ซึ่งอิทธิพลของคู่โพลเด่นต่อผลตอบสนองของระบบวงปิดสามารถตรวจสอบได้จากผลตอบสนองของระบบใหม่ (new closed-loop system) ที่มีโพลประกอบด้วยคู่โพลเด่นเท่านั้น มีซีโรบวกเท่ากับ 2 หนึ่งซีโร ไม่มีคู่โพลและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน และมีค่าดีซีเกนค่าใหม่ การคำนวณค่าดีซีเกนค่าใหม่นี้เหมือนกับการคำนวณที่ได้อธิบายในเนื้อหาที่ผ่านมา ทำให้ระบบใหม่คือระบบอันดับสองที่มีซีโรอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส ระบบใหม่นี้ให้ผลตอบสนองที่มีพลวัตคล้ายกับผลตอบสนองของระบบวงปิด (old closed-loop system) ที่มีคู่โพลเด่น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน และซีโรบวก นั่นคือระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นมากกว่า ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.13

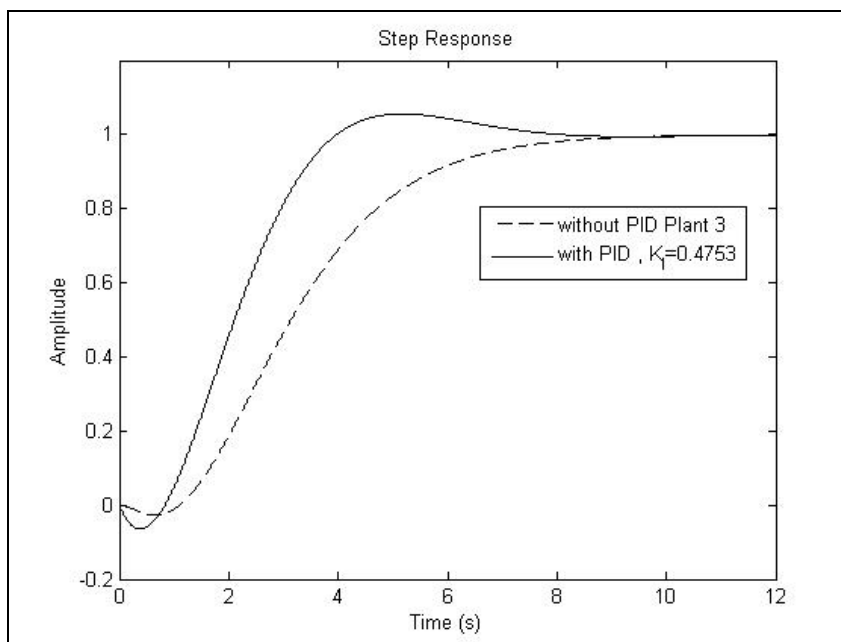


รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดพลาเน็ต 3 เมื่อค่าเกน $K_I = 0.4753$ ก่อนและหลังตัดคูโพลและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนออกจากระบบ

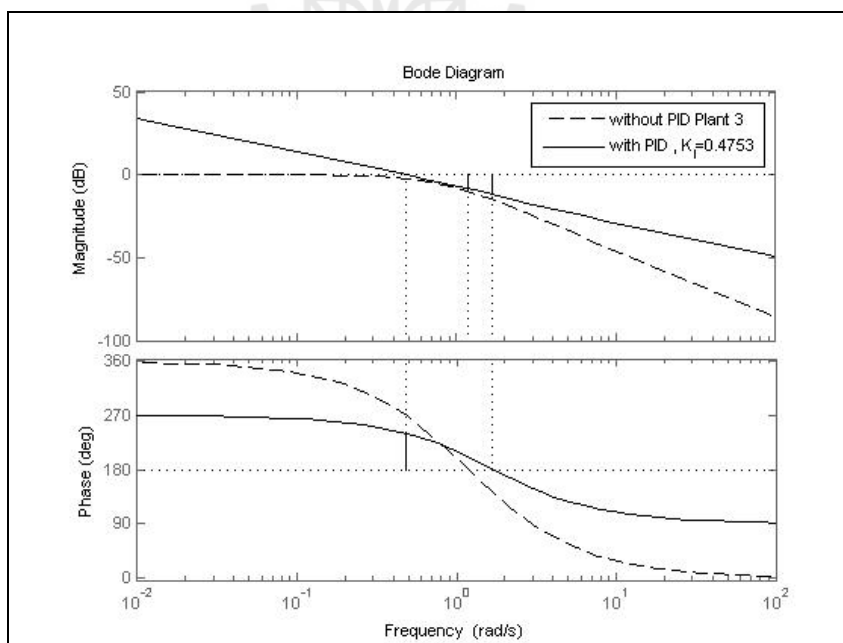
ตารางที่ 3.6 ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3)

	ค่าเกน ของตัวควบคุม		สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่						
	K_P	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	4.1	7.91	—	10.1	≈ 180	1.1832	0
ระบบวงปิด $K_I = 0.4753$	1.1448	0.6987	2.21	6.88	5.59	11.9	60	1.68	0.477

สมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 3.6 อธิบายได้ว่า ในกรณีที่ $K_I = 0.4753$ ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่ไม่มากกว่าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ และน้อยกว่าปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองที่เกิดจากข้อกำหนด $t_s \leq 8.25$ วินาที ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีปริมาณการพุ่งต่ำ (undershoot) ในช่วงเวลาเริ่มต้น แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ตและระบบวงปิดได้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4753$ ตามลำดับ

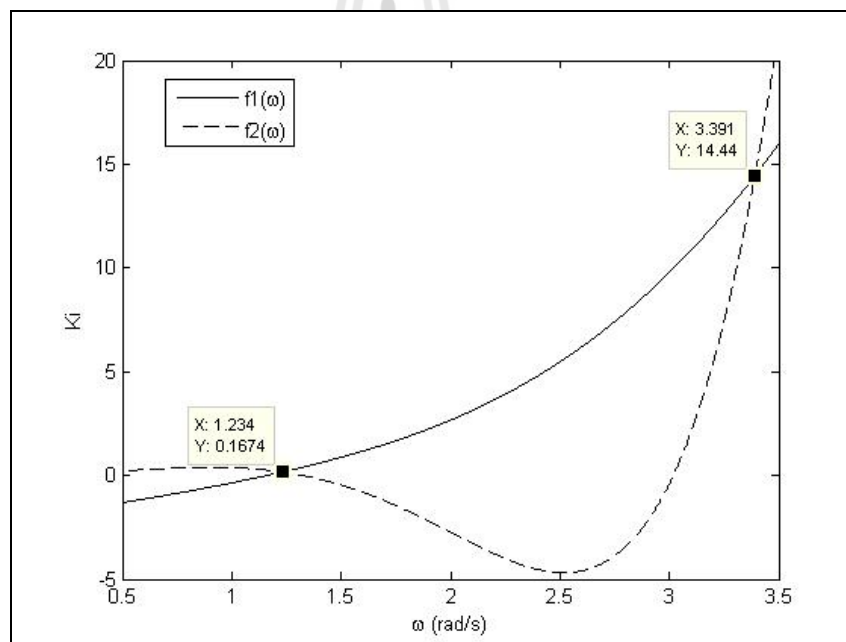


รูปที่ 3.15 แผนภาพโบดของพลานต์ (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.4753$

จากรูปที่ 3.15 อธิบายได้ว่า ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ของระบบที่มีตัวควบคุม ให้ $GM = 11.9$ dB และ $PM = 60^\circ$ นั่นคือระบบมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสอยู่ในเกณฑ์ดี และไม่ต่ำกว่าข้อกำหนด ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก และถ้าระบบมีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ดังนั้นถ้าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบมีช่วงเวลาเข้าที่ไม่สั้นเกินไป การใช้แนวทางที่ 1 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพลานต์ 3 จะให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดอยู่ในข้อกำหนดโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ และถ้าข้อกำหนดมีความเหมาะสม ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์

พลานต์ 4 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$, $t_s \leq 5$ s และ $PM \geq 60^\circ$ จึงระบุโพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.8000 \pm j1.0915$ แสดงจุดตัดกราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ เพื่อระบุค่าเกน K_I ที่ใช้ซดเซพลานต์ได้ดังนี้



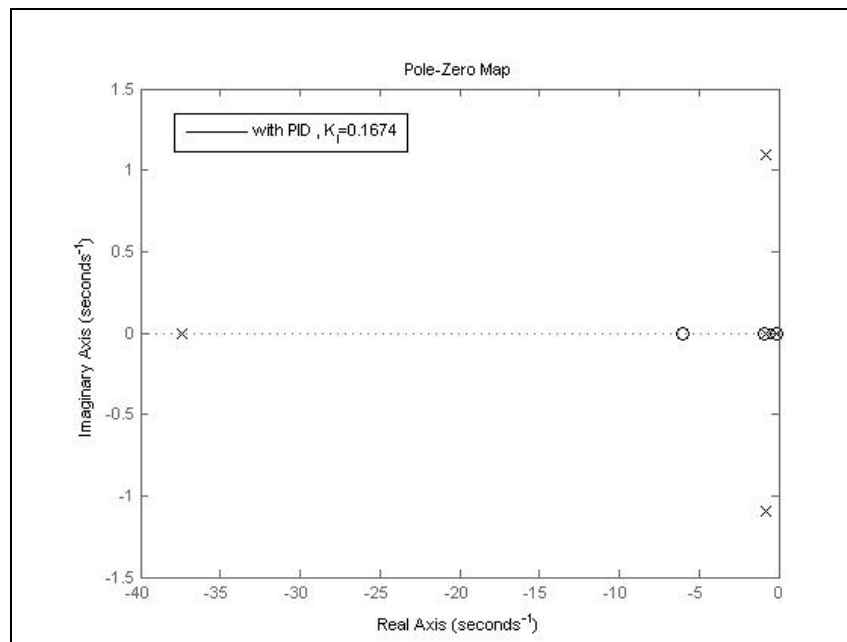
รูปที่ 3.16 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดที่เป็นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของพลานต์ 4

เมื่อพิจารณากราฟของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ที่แสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งตัดกันที่จุด (1.2341, 0.1674) และ (3.3912, 14.4397) จึงได้ว่าค่าเกน K_I มีค่าเท่ากับ 0.1674 และ 14.4397 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไข $K_{I,\min} > \max\{0, K_{I1}, K_{I2}\}$ และคำนวณค่า K_{I1} และ K_{I2} จะได้ว่า $K_{I,\min} > \max\{0, -3.4656, -2.005\}$ ดังนั้นค่าเกน $K_I = 0.1674$ คือค่าที่สอดคล้องกับเงื่อนไข ในงานนี้จึงจะเว้นการพิจารณากรณี $K_I = 14.4397$ เพื่อความกระชับของเนื้อหา จากนั้น

แทนค่า K_I ลงในสมการที่ (2.19) และ (2.20) เพื่อคำนวณ K_D และ K_P ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์ให้ข้อมูลที่สำคัญดังต่อไปนี้

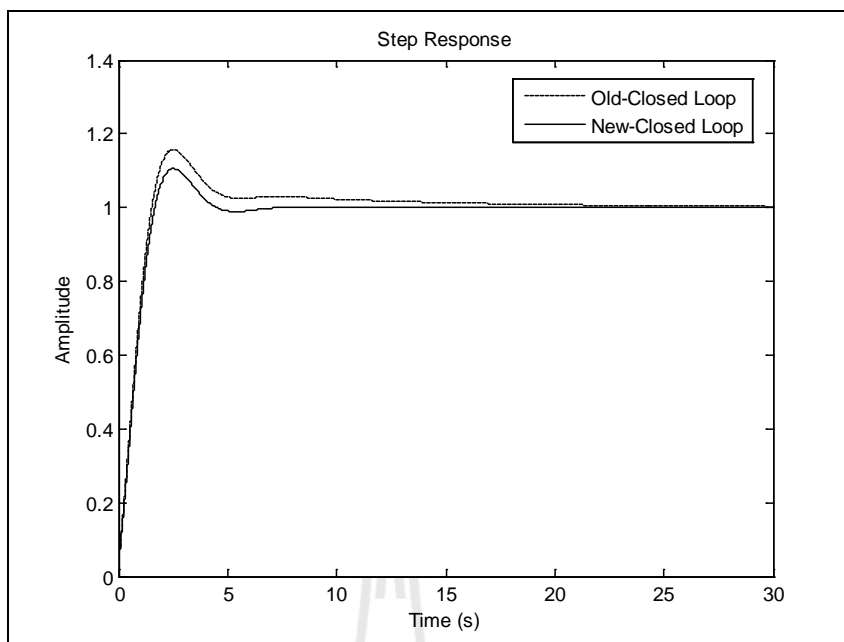
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-6, -6, -0.8562, -0.0986$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-37.44, -0.84, -0.800 \pm j1.0915, -0.105$



รูปที่ 3.17 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.1674$

จากข้อมูลตำแหน่งโพลและซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด และแผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.17 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดมีโพลทุกตัวอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอส มีซีโร -0.0986 และ -0.8562 อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับโพล -0.105 และ -0.84 มากตามลำดับ ทำให้อิทธิพลของซีโรและโพลเกือบหักล้างกันทั้งหมดหรือหักล้างกันบางส่วน โพล -0.105 อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากกว่าคู่โพลเด่น $-0.8000 \pm j1.0915$ โพล -0.84 อยู่ห่างจากแกนจินตภาพมากกว่าคู่โพลเด่นเล็กน้อย และซีโร -0.0986 และ -0.8562 อยู่ในบริเวณใกล้กับคู่โพลเด่น นั่นคือผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น ซีโร และโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่น ซึ่งซีโร $-0.0986, -0.8562$ และโพล $-0.105, -0.84$ เป็นสาเหตุให้ผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินเพิ่มขึ้น

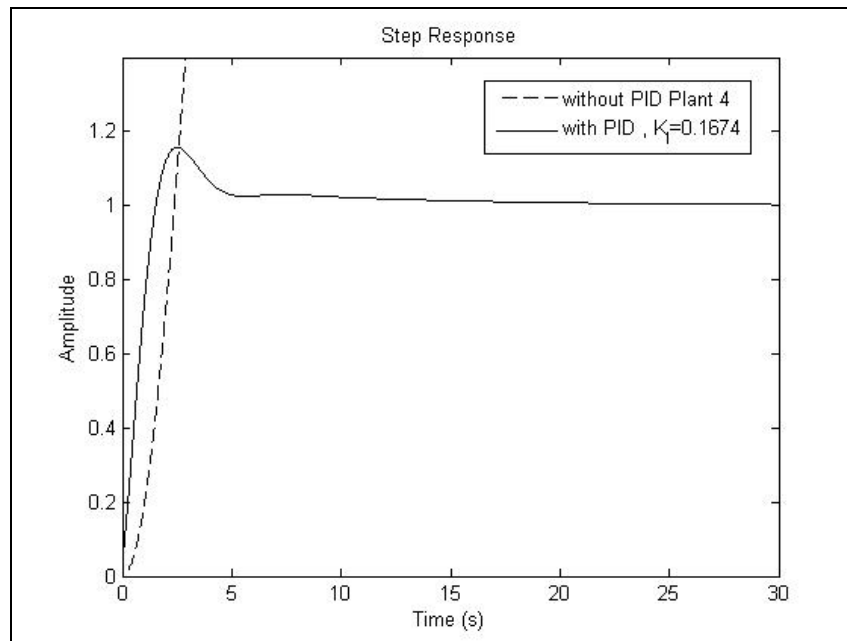


รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดพลาเน็ต 4 เมื่อค่าเกน $K_f = 0.1674$ ก่อนและหลังตัดคู่โพลและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนออกจากระบบ

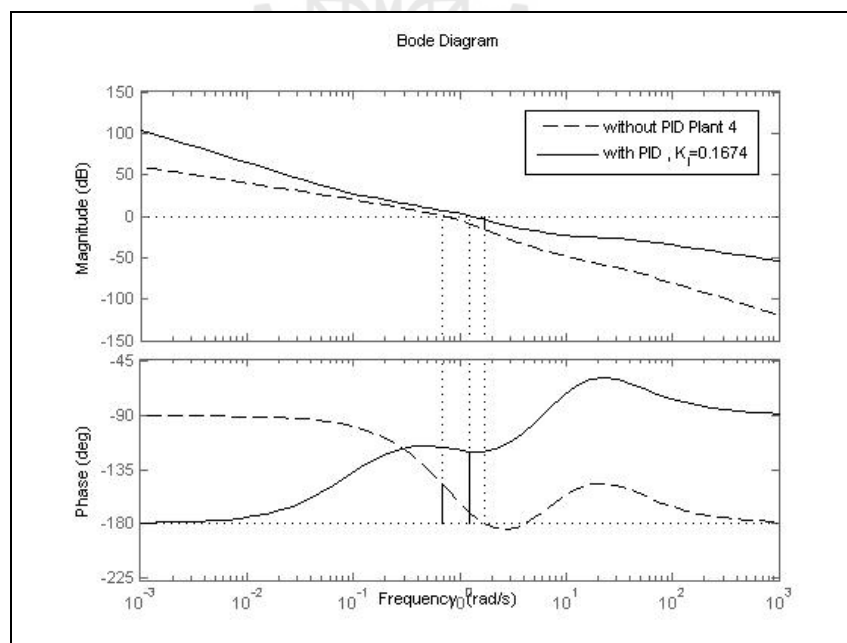
จากรูปที่ 3.18 อธิบายได้ว่า อิทธิพลของคู่โพลเด่นสามารถตรวจสอบได้จากผลตอบสนองของระบบใหม่ (new closed-loop system) ที่มีคู่โพลเด่น โพล -37.44 ซีโร -6 ซ้ำกันสองตัว และมีค่าดีซีเกนค่าใหม่ การคำนวณค่าดีซีเกนค่าใหม่นี้เหมือนกับการคำนวณที่ได้อธิบายในเนื้อหาที่ผ่านมา ทำให้ระบบใหม่คือระบบอันดับสามที่มีซีโรซ้ำกันสองตัว ระบบใหม่นี้ให้ผลตอบสนองที่มีพลวัตคล้ายกับผลตอบสนองของระบบวงปิด (old closed-loop system) ที่มีโพลและซีโรครบทุกตัว นั่นคือระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นมากกว่า

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในโดเมนเวลาจากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ตและระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.19 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 3.7 อธิบายได้ว่า พลาเน็ตให้ผลตอบสนองที่มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่มีขอบเขต แต่ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่ไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวหรือมีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวน้อยมาก ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมในกรณีที่มี $K_f = 0.1674$ มีเสถียรภาพ แต่ช่วงเวลาเข้าที่ และปริมาณการพุ่งเกิน ยังมากกว่าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในโดเมนความถี่จากแผนภาพโบดที่แสดงในรูปที่ 3.20 อธิบายได้ว่า ระบบที่มีตัวควบคุมไม่สามารถหาค่าส่วนเพื่ออัตราขยายได้ แต่มีส่วนเฟสที่ไม่น้อยกว่าข้อกำหนด สมรรถนะของผลตอบสนองสามารถสรุปเป็นข้อมูลที่สำคัญได้ดังตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.19 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.1674$



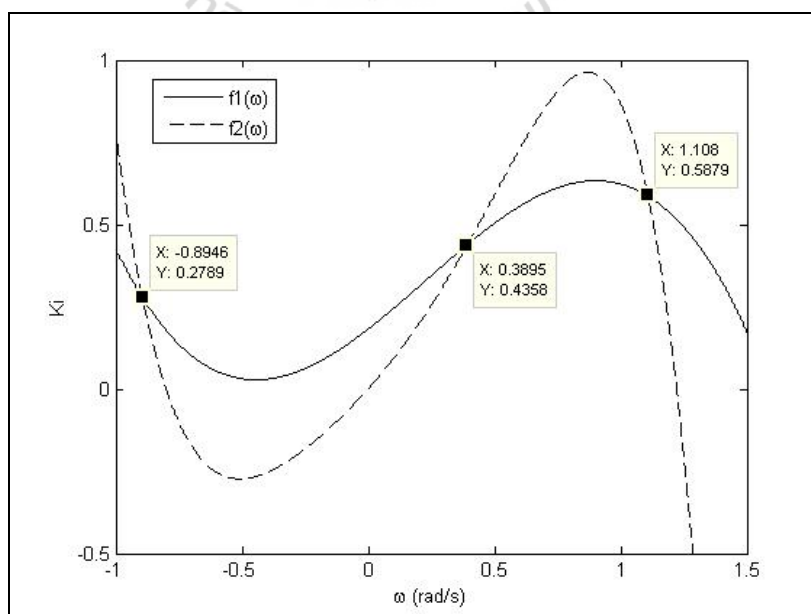
รูปที่ 3.20 แผนภาพโบดของพลานต์ (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.1674$

ตารางที่ 3.7 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4)

	ค่าเกณฑ์ตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	—	—	—	15.6280	32.9509	1.6901	0.6877
ระบบวงปิด $K_I = 0.1674$	1.8940	1.9838	1.19	11.3	15.7	∞	60	0	1.23

การใช้แนวทางที่ 1 คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีเพื่อชดเชยพลาเน็ต 4 จะได้ว่าถ้าค่าเกณฑ์ K_I สอดคล้องกับเงื่อนไขจะทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพแต่ผลตอบสนองมีช่วงเวลาที่เข้าที่และปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าข้อกำหนด การเลือกข้อกำหนดที่มีปริมาณการพุ่งเกินต่ำกว่าจะทำให้ผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินลดลง และการเลือกข้อกำหนดที่มีช่วงเวลาที่เข้าที่นานมากกว่าและมีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าจะทำให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาที่เข้าที่นานขึ้นและมีปริมาณการพุ่งเกินสูงขึ้น แต่ระบบวงปิดมีแนวโน้มให้สมรรถนะของผลตอบสนองที่ไม่เกินจากข้อกำหนด ซึ่งหมายถึงการเพิ่มโอกาสให้แนวทางที่ 1 ใช้รูปแบบตัวควบคุมพีไอดีชดเชยพลาเน็ต 4 ได้

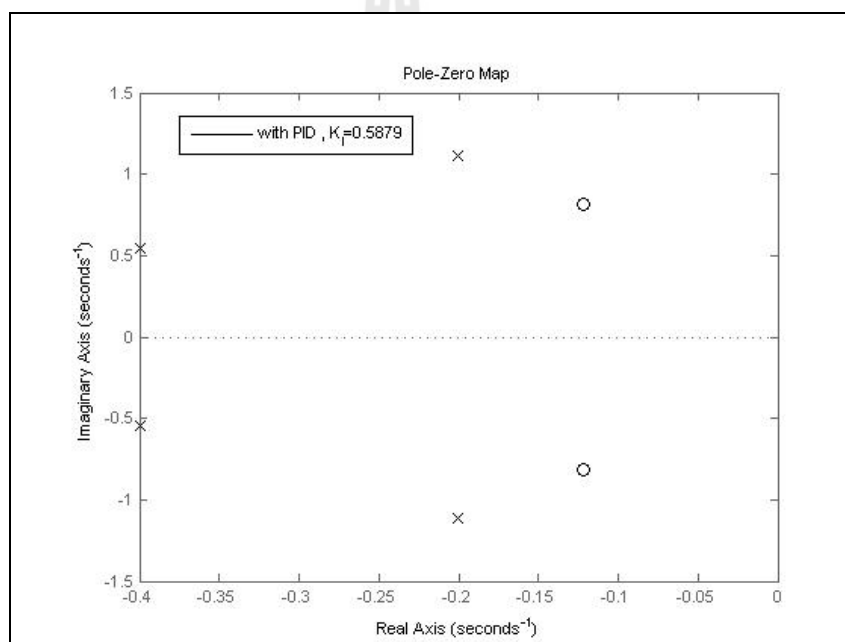
พลาเน็ต 5 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้รูปแบบคือ $P.O. \leq 10\%$, $t_s \leq 10$ s และ $PM \geq 60^\circ$ จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.4000 \pm j0.5458$ สามารถวาดกราฟ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ เพื่อแสดงค่าเกณฑ์ K_I ที่ใช้รูปแบบตัวควบคุมพีไอดี ได้ดังรูปที่ 3.21

รูปที่ 3.21 กราฟ $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ และการระบุจุดตัดเพื่อการออกแบบทั้ง 3 จุด ของพลาเน็ต 5

เมื่อพิจารณารูปของ $f_1(\omega)$ และ $f_2(\omega)$ ที่แสดงในรูปที่ 3.21 ตัดกันที่จุด $(-0.8946, 0.2789)$, $(0.3895, 0.4358)$ และ $(1.1077, 0.5879)$ ตามลำดับ จะได้ว่า $K_I = 0.2789$, $K_I = 0.4358$ และ $K_I = 0.5879$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไข $K_{I,\min} > \max\{0, K_{I1}, K_{I2}\}$ และ คำนวณค่า K_{I1} และ K_{I2} จะได้ว่า $K_{I,\min} > \max\{0, 0.1933, 0.4675\}$ ดังนั้น $K_I = 0.5879$ คือค่าที่สอดคล้องกับเงื่อนไข ในงานนี้ไม่พิจารณากรณี $K_I = 0.2789$ และ $K_I = 0.4358$ เพื่อความ กระชับของเนื้อหา จากนั้นแทนค่า K_I ลงในสมการที่ (2.19) และ (2.20) เพื่อคำนวณ K_D และ K_P ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ให้ข้อมูลที่สำคัญดังต่อไปนี้

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-0.122 \pm j0.817$

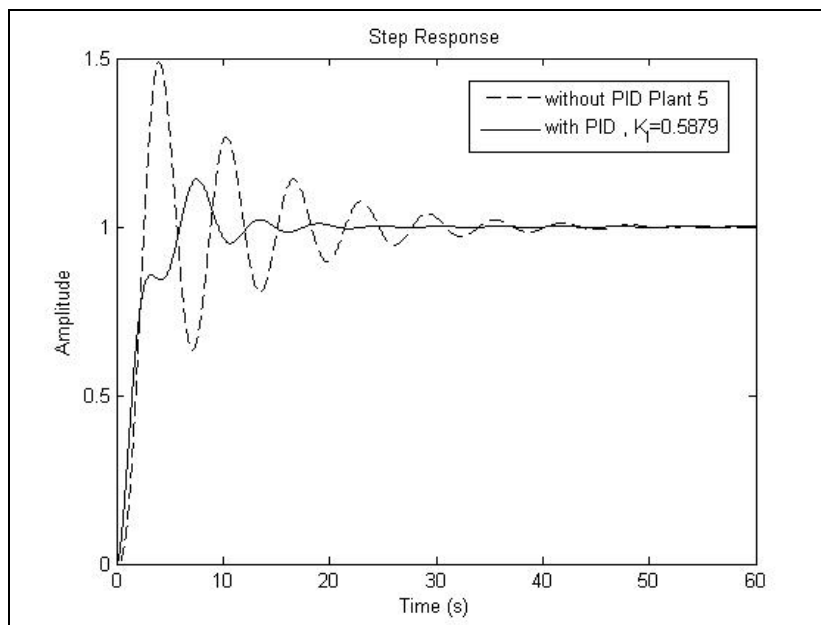
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-0.400 \pm j0.546$, $-0.200 \pm j1.12$



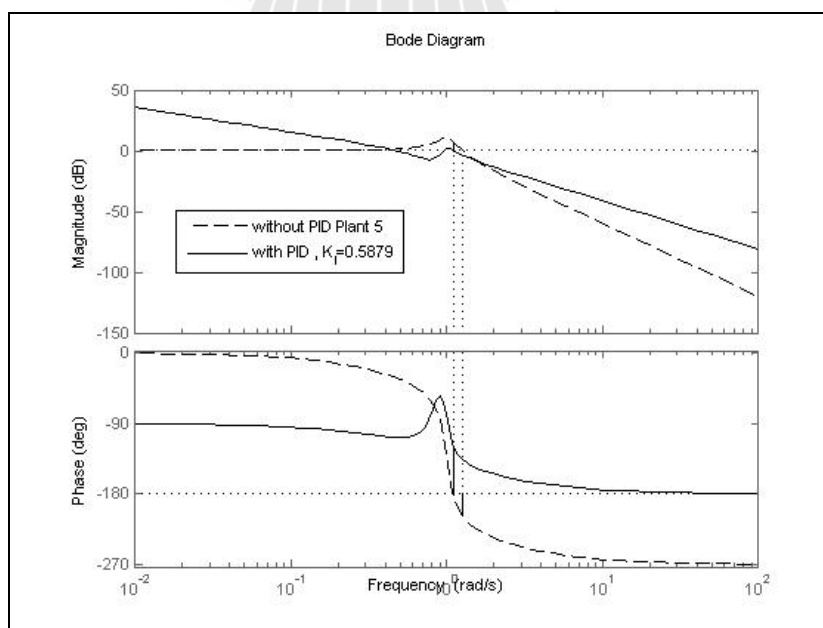
รูปที่ 3.22 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด โดยที่ $K_I = 0.5879$

แผนผังโพลและซีโรที่แสดงในรูปที่ 3.22 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่นและคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กันมากกว่า กล่าวคือคู่โพลเด่นมีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนน้อยกว่าสามเท่า และคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนอยู่ใกล้แกนจินตภาพมากกว่า ทำให้ผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนและอิทธิพลจากคู่โพลเด่น และนั่นทำให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าและปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า แสดงผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดได้ดังรูปที่ 3.23 ซึ่งอธิบายได้ว่า ในกรณีที่ $K_I =$

0.5879 ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลานิ่ง 4.69 วินาที มีช่วงเวลาที่เข้าที่ 13.8 วินาที และมีปริมาณการพุ่งเกิน 14.2% ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ



รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5879$



รูปที่ 3.24 แผนภาพโบดของพลานต์ (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_I = 0.5879$

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่แสดงในแผนภาพโบดรูปที่ 3.24 อธิบายได้ว่า ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม ระบบมี $PM = -27.719^\circ$ และมี $GM = -7.1306$ dB ในกรณีที่มีตัวควบคุม ระบบมี $PM \approx 60^\circ$ ซึ่งไม่น้อยกว่าข้อกำหนดในโดเมนความถี่ แต่ไม่สามารถหาค่า GM ได้ สรุปสมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ได้ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5)

	ค่าเกณฑ์ตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	1.5	35.9	49	-7.1306	-27.719	1.0955	1.2534
ระบบวงปิด $K_I = 0.5879$	0.2104	0.8619	4.69	13.8	14.2	∞	60	∞	1.11

ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 1 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซัดเซพลาเน็ต 5 จึงต้องเลือกข้อกำหนดที่ทำให้ระบบวงปิดมีโพลทุกตัวอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอส และคู่โพลเด่นต้องมีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนเกินสามเท่า แต่ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่และปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบภาคผนวก ข. ได้อธิบายเพิ่มเติมถึงการเลือกข้อกำหนดที่ต้องการให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่นานมากขึ้นและปริมาณการพุ่งเกินสูงขึ้น และการใช้แนวทางที่ 1 คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ซัดเซพลาเน็ต 5

3.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์จากแนวทางที่ 2

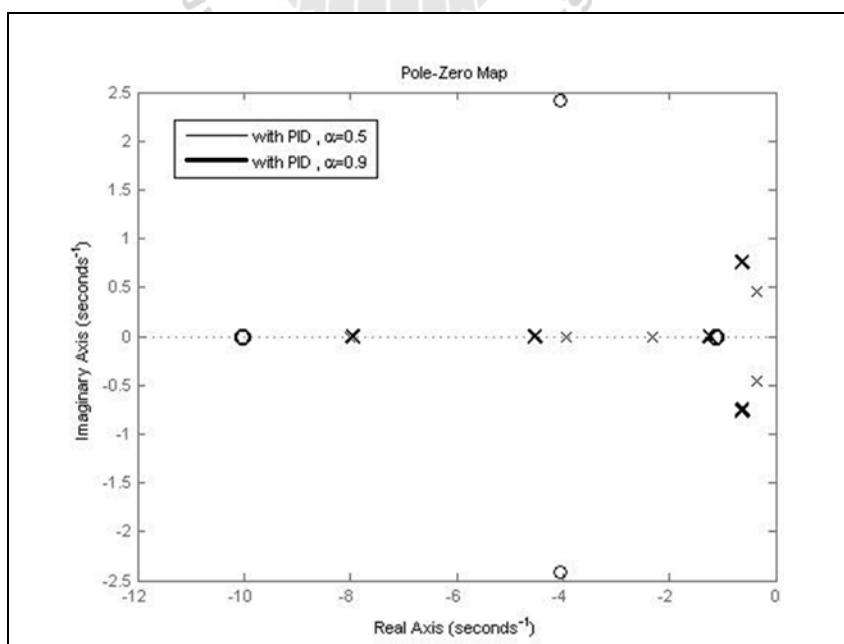
หัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิดแต่ละระบบที่ประกอบด้วยพลาเน็ตควบคุมยากและตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากการใช้แนวทางที่ 2 ขึ้นตอนที่ 1 ถึง 7 ในหัวข้อ 2.4.1 ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 2 ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวคือผลตอบสนองของระบบวงปิดที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า α และการใช้ข้อกำหนดในโดเมนความถี่ (GM และ PM) ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี การตรวจสอบเสถียรภาพสัมพัทธ์ ตำแหน่งของโพลและซีโรของระบบวงปิด และสมรรถนะของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ระบบวงปิดแต่ละระบบมีผลการจำลองสถานการณ์ดังนี้

พลาเน็ต 1 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ เมื่อกำหนดให้ $\alpha \in [0.5, 2]$ เพื่อคำนวณค่าความถี่ตัดข้าม -180° ของพลาเน็ต จากสมการที่ (2.21)

ต่อมาตรวจสอบเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) จะได้ว่าภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบข้างต้น ให้ค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha \in [0.5, 0.9]$ เท่านั้น จึงกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.5 ถึง 0.9 และ α มีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 จากนั้นใช้สมการที่ (2.23) คำนวณค่าเกน K_p และใช้สมการที่ (2.24) คำนวณค่าความถี่ตัดข้าม 0 dB และคำนวณค่าเกน K_I และ K_D จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังต่อไปนี้

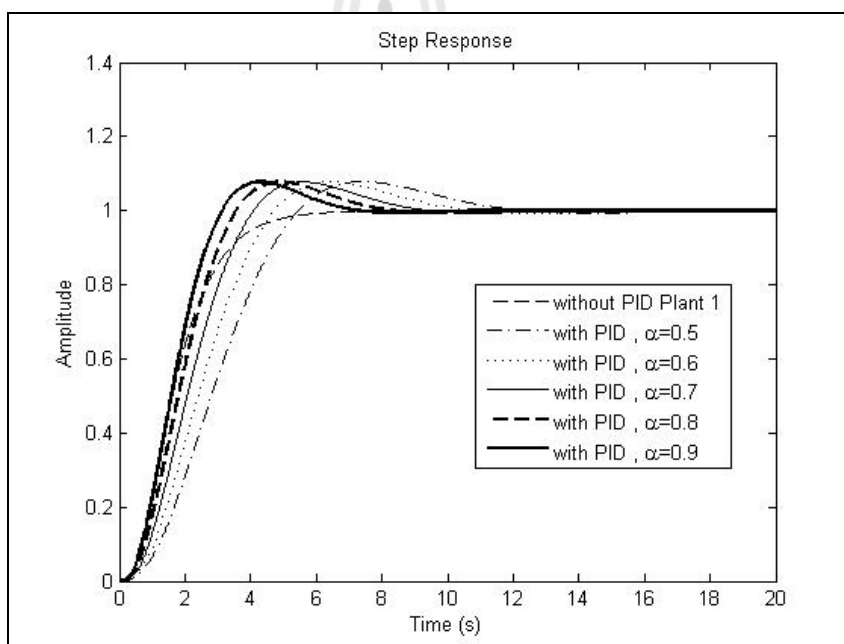
ตารางที่ 3.9 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $\alpha = 0.5$	ซีโร : $-4.0431 \pm j2.4196$ โพล : $-8.01, -3.938, -2.328, -0.3609 \pm j0.4542$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $\alpha = 0.6$	ซีโร : $-37.5965, -1.8723$ โพล : $-7.93, -4.285, -1.947, -0.4152 \pm j0.5128$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $\alpha = 0.7$	ซีโร : $-25.7632, -1.4511$ โพล : $-7.909, -4.44, -1.6916, -0.4779 \pm j0.579$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $\alpha = 0.8$	ซีโร : $-14.4842, -1.2485$ โพล : $-7.917, -4.51, -1.465, -0.5525 \pm j0.6569$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $\alpha = 0.9$	ซีโร : $-10.0129, -1.1199$ โพล : $-7.948, -4.53, -1.244, -0.6372 \pm j0.7557$



รูปที่ 3.25 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณี $\alpha = 0.5$ และ $\alpha = 0.9$

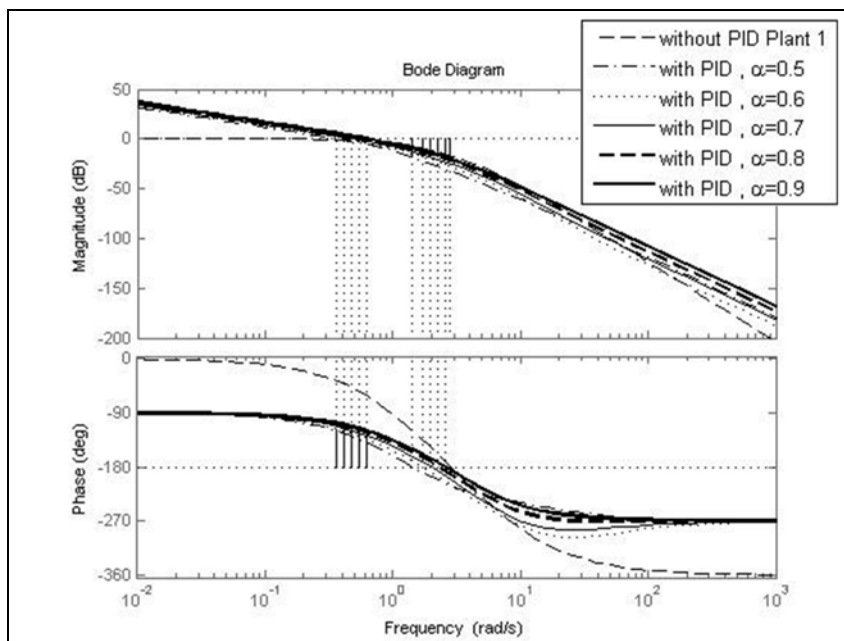
จากแผนผังโพลและซีโรที่แสดงในรูปที่ 3.25 และตำแหน่งของโพลและซีโรที่แสดงได้ในตารางที่ 3.9 อธิบายได้ว่า คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีตำแหน่งอยู่ใกล้แกนจินตภาพมากกว่าโพลอื่น ๆ เมื่อ α มีค่าเพิ่มขึ้น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากที่สุดจะมีขนาดของส่วนจริงและขนาดของส่วนจินตภาพมากขึ้น นั่นคือคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนดังกล่าวมีตำแหน่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพมาทางด้านซ้ายของระนาบเอสมากขึ้น ซีโรที่เป็นจำนวนจริงลบหนึ่งซีโรและโพลที่เป็นจำนวนจริงลบหนึ่งโพลจะมีตำแหน่งใกล้เคียงกันมากขึ้น ทำให้โพลและซีโรนี้มีอิทธิพลที่หักล้างซึ่งกันและกันมากขึ้น นั่นคือโพลและซีโรนี้จะมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองน้อยลง และโพลและซีโรนี้มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมากขึ้น ทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน ซีโร และโพลอื่น ๆ แต่ผลตอบสนองจะได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมากขึ้น เนื่องจากระบบวงปิดมีโพลทุกตัวอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอส ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองที่แสดงได้ในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.5$ ถึง 0.9 ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.26 อธิบายได้ว่า เมื่อ α มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลานั้นและปริมาณการพุ่งเกินลดลง แต่มีช่วงเวลาน่าเข้าที่เกือบไม่เปลี่ยนแปลง ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ จึงเป็นกรณีที่ทำให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาดีที่สุด ซึ่งในกรณีที่ $\alpha = 0.7$ ถึง 0.9 ผลตอบสนองมี

ช่วงเวลาขึ้นสั้นกว่าช่วงเวลาขึ้นของผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์ แต่ในทุกกรณี ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีปริมาณการพุ่งเกินและมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์



รูปที่ 3.27 แผนภาพโบดของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.5$ ถึง 0.9 ตามลำดับ

แผนภาพโบดที่แสดงในรูปที่ 3.27 อธิบายได้ว่าพลานต์มี $GM = 16.58$ dB แต่ไม่สามารถหาค่า PM ได้ เมื่อระบบวงเปิดมีตัวควบคุม ระบบมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ตรงกับข้อกำหนดในโดเมนความถี่ที่ต้องการ กล่าวคือ $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก นั่นคือถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย และสรุปสมรรถนะของผลตอบสนองได้ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 1)

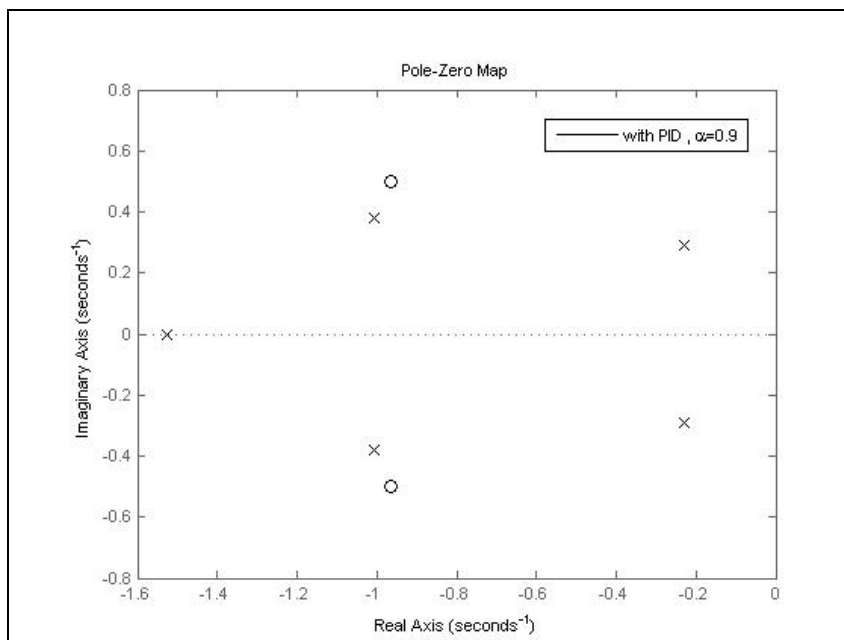
	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	—	2.7	5.02	—	16.58	∞	2.8283	0
ระบบวงปิด $\alpha = 0.5$	0.1407	0.3863	0.0174	3.45	7.87	10.8	18.06	60	1.4143	0.3573
ระบบวงปิด $\alpha = 0.6$	0.2526	0.4505	0.0064	2.96	7.78	9.4	18.06	60	1.6963	0.4146
ระบบวงปิด $\alpha = 0.7$	0.3810	0.5234	0.0140	2.56	7.75	8.21	18.06	60	1.9797	0.4792
ระบบวงปิด $\alpha = 0.8$	0.5239	0.6022	0.0333	2.24	7.76	7.18	18.06	60	2.2630	0.5498
ระบบวงปิด $\alpha = 0.9$	0.6791	0.6840	0.0610	1.96	6.28	7.79	18.06	60	2.5451	0.6255

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต มีค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 0.9$ ทำให้ในกรณีที่ $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 0.9$ ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ตรงกับข้อกำหนด ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต เพราะข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบอาจจะมีส่วนเพื่ออัตราขยายมากเกินไป นั่นคือการใช้แนวทางที่ 2 และการใช้ข้อกำหนดที่มีค่าส่วนเพื่ออัตราขยายสูงสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 1 ได้ ทำให้ระบบมีผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสตรงกับข้อกำหนด

พลาเน็ต 2 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ จะได้ว่าภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบข้างต้น ให้ค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha \in [0.5, 0.9]$ เท่านั้น จึงกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.5 ถึง 0.9 และ α มีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 ซึ่งจะได้ว่าระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมในทุกกรณีที่ α สอดคล้องกับเงื่อนไข ระบบมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ตรงกับข้อกำหนดในโดเมนความถี่ที่ต้องการ กล่าวคือ $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB แต่ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ ให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่ดีที่สุด เพื่อความกระชับของเนื้อหา จึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ เพียงกรณีเดียวได้ดังนี้

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-0.9646 \pm j0.5002$

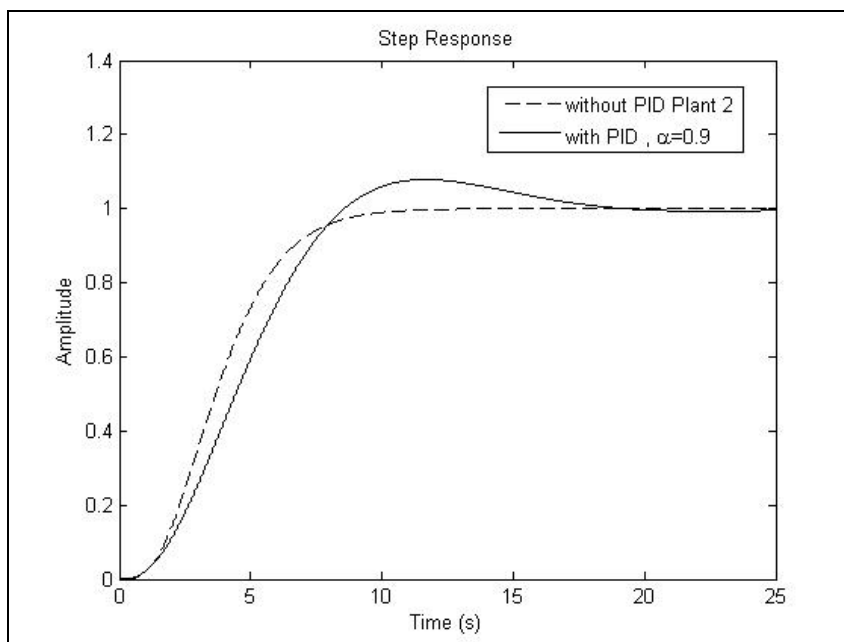
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-1.5268, -1.006 \pm j0.382, -0.23 \pm j0.293$



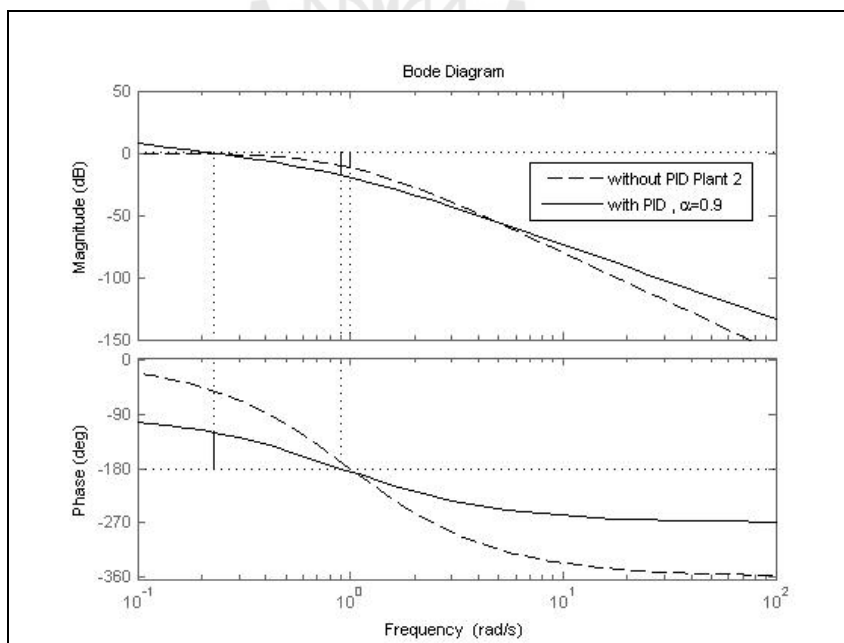
รูปที่ 3.28 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$

แผนผังโพลและซีโรที่แสดงในรูปที่ 3.28 อธิบายได้ว่า ผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดได้รับอิทธิพลจากคู่โพล $-0.23 \pm j0.293$ ทำให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะดังที่แสดงในรูปที่ 3.29 และตารางที่ 3.11 ในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$ ให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาดีที่สุด เพราะเมื่อ α มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบวงปิดมีผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้แกนจินตภาพมากที่สุดมากขึ้น เพราะคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนมีตำแหน่งห่างจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนดังกล่าวมากขึ้น

ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลายาวขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าผลตอบสนองของพลาเน็ต ซึ่งในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$ ให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาดีที่สุด เพราะเมื่อ α มีค่ามากขึ้น ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลายาวขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่สั้นลง และมีปริมาณการพุ่งเกินลดลง ซึ่งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ตและระบบวงปิดได้ดังในรูปที่ 3.29 และแสดงสมรรถนะของผลตอบสนองได้ดังตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.29 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$



รูปที่ 3.30 แผนภาพโบดของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$

แผนภาพ โปดที่แสดงในรูปที่ 3.30 อธิบายได้ว่า พลานต์มี $GM = 12.04$ dB แต่ไม่สามารถหาค่า PM ได้ ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.9$ ให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB ซึ่งตรงกับข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก ถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตารางที่ 3.11 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 2)

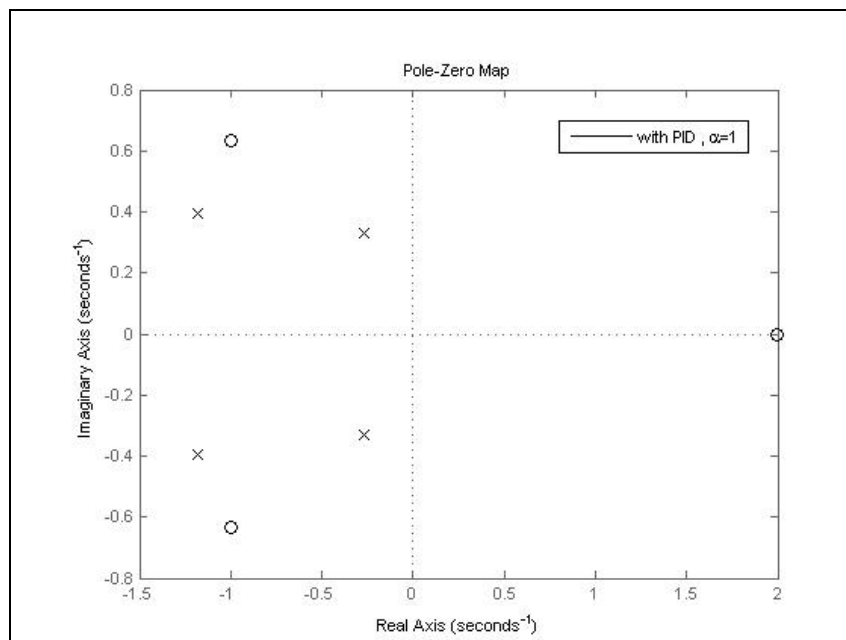
	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลานต์	—	—	—	4.94	9.08	—	12.04	∞	1	0
ระบบวงปิด $\alpha = 0.9$	0.4005	0.2451	0.2076	5.41	16.9	7.88	18.06	60	0.9	0.2273

เนื่องจากตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ที่กำหนดได้จากข้อกำหนดที่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่มีค่าค่อนข้างมาก ระบบวงปิดจึงให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลารั้งขึ้นและช่วงเวลาลงที่นานกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์ แต่ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสตรงตามความต้องการ เมื่อพิจารณาแนวทางที่ 2 และข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีซดเซพลานต์ 2 จะได้ว่าค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 0.9$ ทำให้ในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 0.9$ ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสซึ่งตรงกับข้อกำหนด แต่ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะด้อยกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์ นั่นคือค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไข จะทำให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มี GM และ PM ตรงกับข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ

พลานต์ 3 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ จะได้ว่าภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบข้างต้น ให้ค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha \in [0.5, 1]$ เท่านั้น จึงกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.5 ถึง 1 และ α มีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 ซึ่งจะได้ว่าระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมในทุกกรณีที่มี α สอดคล้องกับเงื่อนไข ระบบมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ตรงกับข้อกำหนดในโดเมนความถี่ที่ต้องการ กล่าวคือ $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB แต่ในกรณีนี้ที่ $\alpha = 1$ ให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่ต่ำสุด เพื่อความกระชับของเนื้อหา จึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ที่ $\alpha = 1$ เพียงกรณีเดียวได้ดังนี้

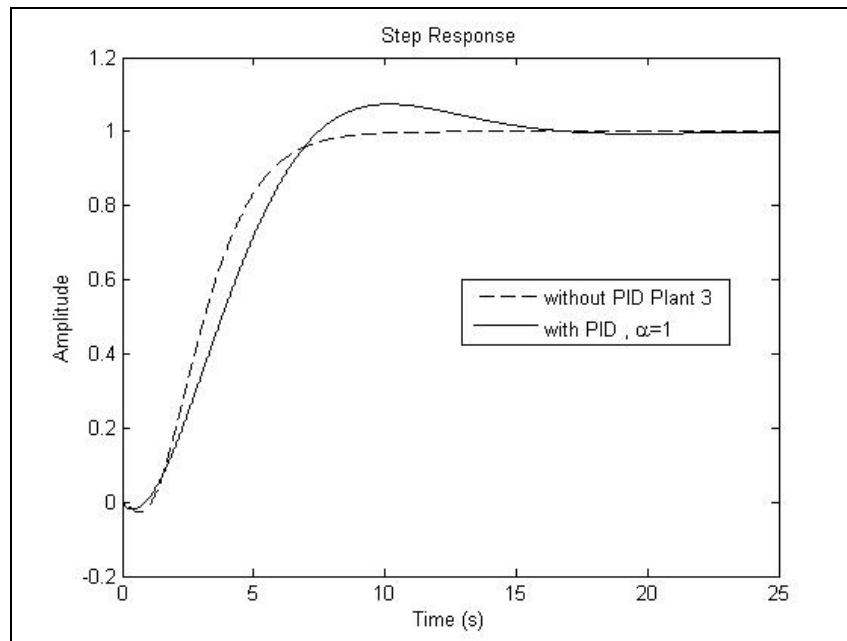
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $2, -0.999 \pm j0.635$

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-1.181 \pm j0.394, -0.268 \pm j0.329$

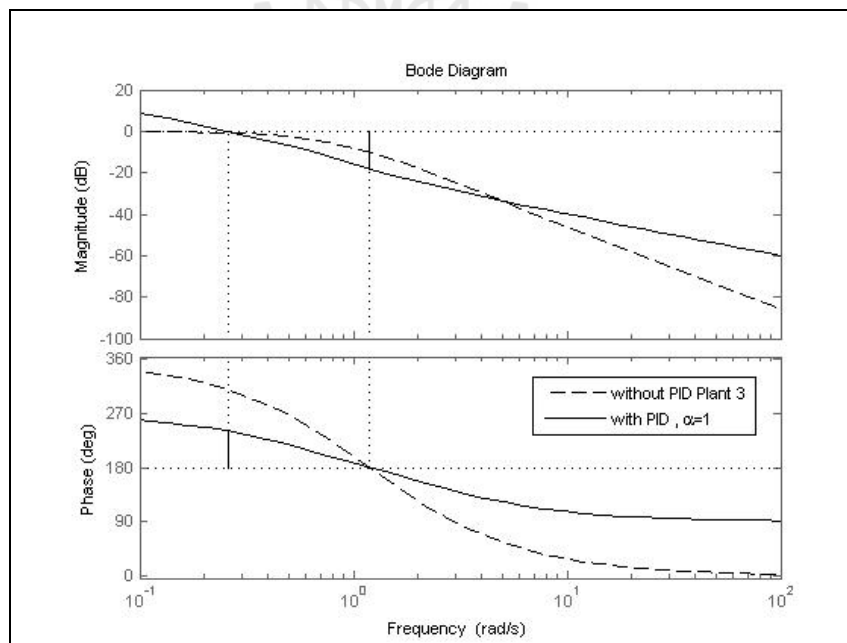


รูปที่ 3.31 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณี $\alpha = 1$

แผนผังโพลและซีโรที่แสดงในรูปที่ 3.31 อธิบายได้ว่า ในกรณีที่ $\alpha = 1$ ให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาดีที่สุด เพราะเมื่อ α มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากที่สุดมากขึ้น เพราะคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนมีตำแหน่งห่างจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนดังกล่าวมากขึ้น ทำให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นลง และปริมาณการพุ่งเกินลดลง ระบบวงปิดมีซีโร 2 อยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส ทำให้ผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งต่ำในช่วงเวลาเริ่มต้น สังเกตได้จากผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ตและระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.32 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 3.12 ซึ่งอธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าผลตอบสนองของพลาเน็ต ในกรณีที่ $\alpha = 1$ ให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาดีที่สุด เพราะเมื่อ α มีค่ามากขึ้น ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และปริมาณการพุ่งเกินลดลง



รูปที่ 3.32 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่ $\alpha = 1$



รูปที่ 3.33 แผนภาพโบดของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่ $\alpha = 1$

แผนภาพโบดที่แสดงในรูปที่ 3.33 อธิบายได้ว่า พลาเน็ตให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $GM = 10.10$ dB แต่ไม่สามารถหาค่า PM ได้ ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมในกรณีที่มี $\alpha = 1$ ให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB ซึ่งตรงกับข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก ถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย

ตารางที่ 3.12 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	–	–	–	4.1	7.91	–	10.10	∞	1.183	0
ระบบวงปิด $\alpha = 1$	0.4000	0.2804	0.2003	4.63	14.6	7.4	18.06	60	1.183	0.262

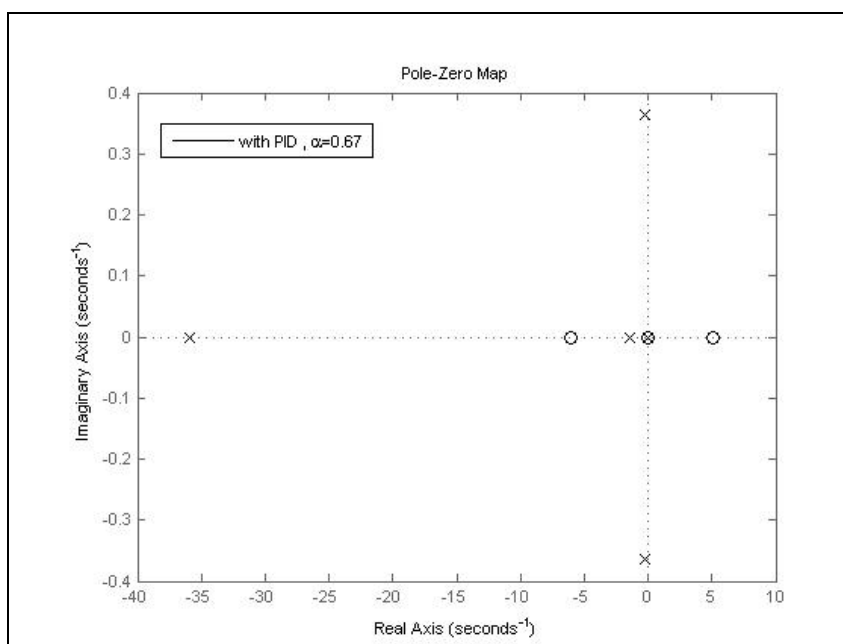
เนื่องจากตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ที่กำหนดได้จากข้อกำหนดที่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่มีค่าค่อนข้างมาก ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต แต่ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสตรงตามความต้องการ เมื่อพิจารณาแนวทางที่ 2 และข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีซัดเซพลาเน็ต 3 จะได้ว่าค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 1.0$ ทำให้ในกรณีที่มี $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 1.0$ ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสซึ่งตรงกับข้อกำหนด แต่ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่และปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต

พลาเน็ต 4 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ จะได้ว่าภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบข้างต้น ให้ค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha \in [0.5, 0.9]$ เท่านั้น แต่ให้ค่า α วิกฤต คือ $\alpha = 0.67$ (ค่า α วิกฤต คือค่า α มากที่สุดที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) และเมื่อนำค่า α นี้มาคำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีระบบวงปิดยังคงมีเสถียรภาพ ถ้า α มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต ระบบวงปิดจะขาดเสถียรภาพ นั่นคือถ้า $\alpha > 0.67$ ระบบวงปิดจะมีโพลอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอสและขาดเสถียรภาพ ตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ K_I ที่เป็นค่าลบ ดังนั้นจึงจำลองสถานการณ์ในกรณี $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 0.67$ ซึ่งจะได้ว่าระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ตรงกับข้อกำหนดในโดเมนความถี่ที่

ต้องการ กล่าวคือ $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB แต่ในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.67$ ให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาดีที่สุด เพื่อความกระชับของเนื้อหา จึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.67$ เพียงกรณีเดียวได้ดังนี้

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : 5.1393, -6, -6, -0.0010

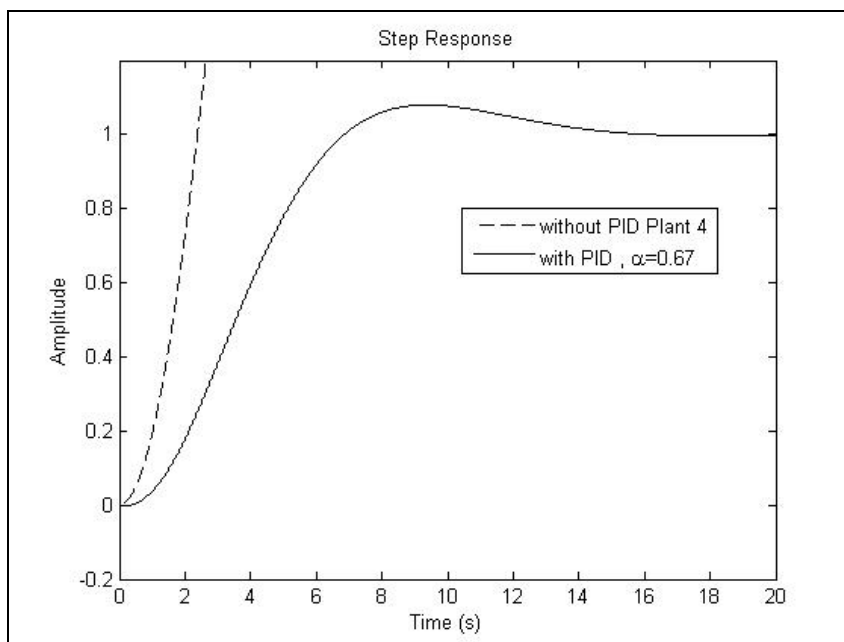
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : -35.95, -1.4095, -0.29 ± j0.3629, -0.0010



รูปที่ 3.34 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.67$

แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.67$ ที่แสดงในรูปที่ 3.34 อธิบายได้ว่า ผลตอบสนองของระบบวงปิดได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.29 \pm j0.3629$ โพลจริง -1.4095 และซีโร 5.1393 ทำให้สมรรถนะของผลตอบสนองมีช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ใช้เวลานานพอสมควร และปริมาณการพุ่งเกินเป็นดังที่ปรากฏในตารางที่ 3.13 ซึ่งในกรณีนี้ที่ $\alpha > 0.67$ ระบบวงปิดมีโพลจริงอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส ทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ

ผลตอบสนองในโดเมนเวลาพบว่าพลานต์ให้ผลตอบสนองที่มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่มีขอบเขต ในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.67$ ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่และปริมาณการพุ่งเกินคิดว่าพลานต์มาก แต่อาจมีช่วงเวลาเข้าที่ใช้เวลานานพอสมควร แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดได้ในรูปที่ 3.35

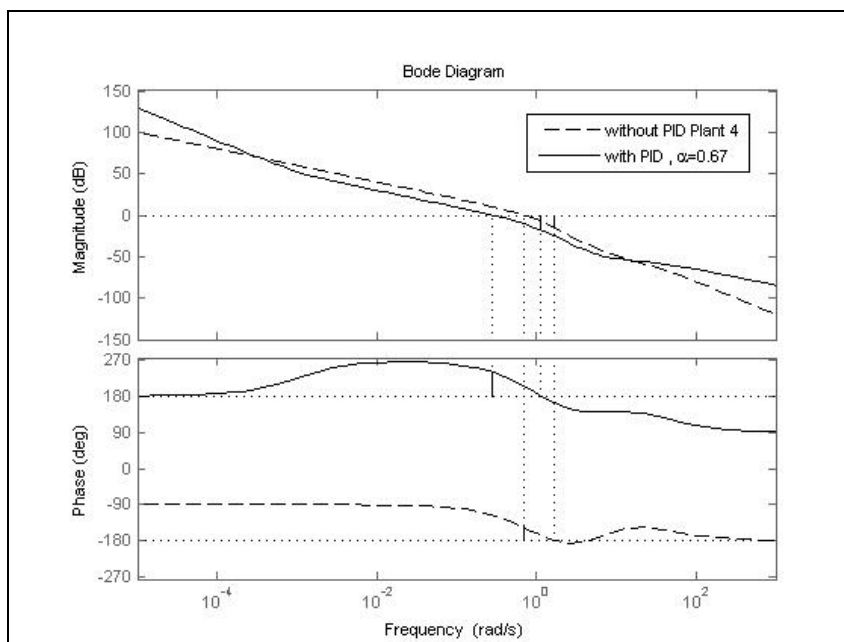


รูปที่ 3.35 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.67$

ตารางที่ 3.13 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 4)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลานต์	—	—	—	—	—	—	15.6	33	1.69	0.688
ระบบวงปิด $\alpha = 0.67$	0.3047	0.0003	-0.0593	4.32	13.8	8	18.06	60	1.1324	0.2832

สมรรถนะในโดเมนความถี่ที่แสดงในตารางที่ 3.13 อธิบายได้ว่า ระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุมแบบสัดส่วน $K_P = 1$ ให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $PM \approx 33^\circ$ และมี $GM = 15.6$ dB ในกรณีที่มี $\alpha = 0.67$ ระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุมพีไอดีมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ตรงกับข้อกำหนดในโดเมนความถี่ที่ต้องการ กล่าวคือ $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก ถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย ซึ่งแสดงได้ในแผนภาพโบลด์รูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 แผนภาพโบคของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.67$

เมื่อพิจารณาข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพพลานต์ 4 ค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือ $\alpha = 0.1$ ถึง $\alpha = 0.9$ ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ ให้ค่า α วิกฤต คือ $\alpha = 0.67$ นั่นคือถ้า $\alpha > 0.67$ ระบบวงปิดจะมีโพลอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอสและขาดเสถียรภาพ แต่ระบบวงเปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ตรงกับข้อกำหนดที่ต้องการ กล่าวคือ $PM = 60^\circ$ และ $GM = 18.0618$ dB ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 2 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพพลานต์ 4 อาจจะทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ แต่การใช้ข้อกำหนดที่มีส่วนเพื่ออัตราขยาย ส่วนเฟส และ α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) จะทำให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสที่ตรงกับข้อกำหนด เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบวงปิด เกณฑ์ของไนควิสต์ ได้กล่าวไว้ว่า

$$Z = N + P$$

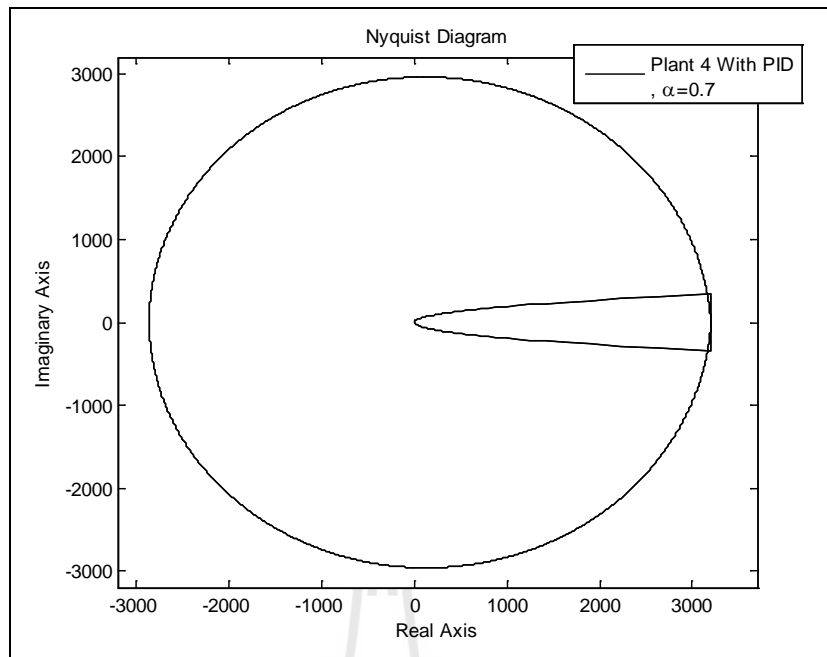
โดยที่ Z คือ จำนวนโพลของระบบวงปิดที่มีตำแหน่งอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส

N คือ จำนวนการวนล้อมรอบจุด $-1 + j0$ ของวิถี $GH(s)$ ในทิศตามเข็มนาฬิกา และ

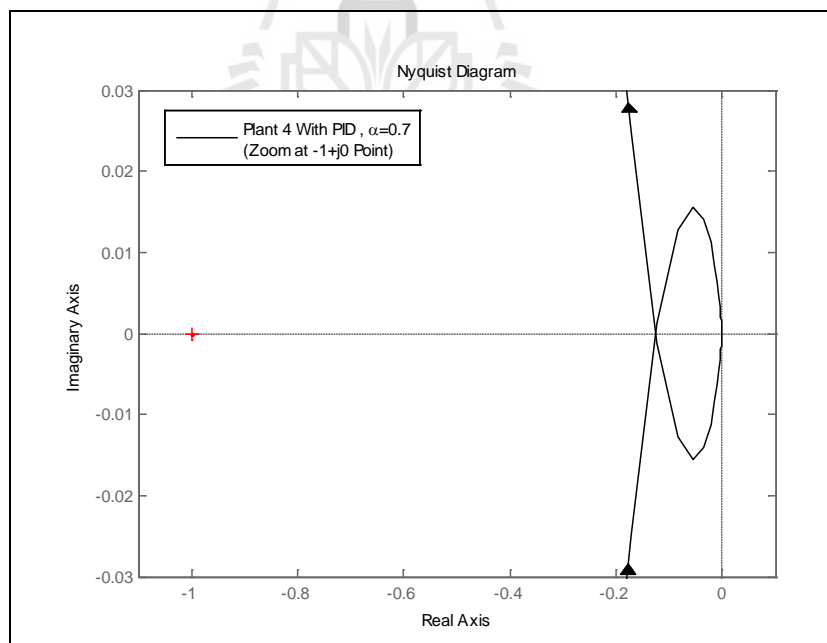
P คือ จำนวนโพลของ $GH(s)$ ที่มีตำแหน่งอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส

และในระบบป้อนกลับหนึ่งหน่วย (unity feedback system) $GH(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์และตัวควบคุม ถ้า $GH(s)$ มีโพลจำนวนหนึ่งอยู่ในตำแหน่งด้านขวาของระนาบเอส ($P \neq 0$) และวิถี $GH(s)$ วนล้อมรอบจุด $-1 + j0$ ในทิศทวนเข็มนาฬิกาในจำนวน P รอบ จะได้ว่า $Z = 0$ เพราะ $N = (-P)$ นั่นคือระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์และตัวควบคุมไม่มีโพลอยู่ในตำแหน่งด้านขวาของระนาบเอสและระบบวงปิดมีโพลทุกตัวอยู่ในตำแหน่งด้านซ้ายของระนาบเอส ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพ แต่ถ้า $GH(s)$ ไม่มีโพลอยู่ในตำแหน่งด้านขวาของระนาบเอส ($P = 0$) และวิถี $GH(s)$ ไม่มีการวนล้อมรอบจุด $-1 + j0$ ($N = 0$) จะได้ว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพ ($Z = 0$)

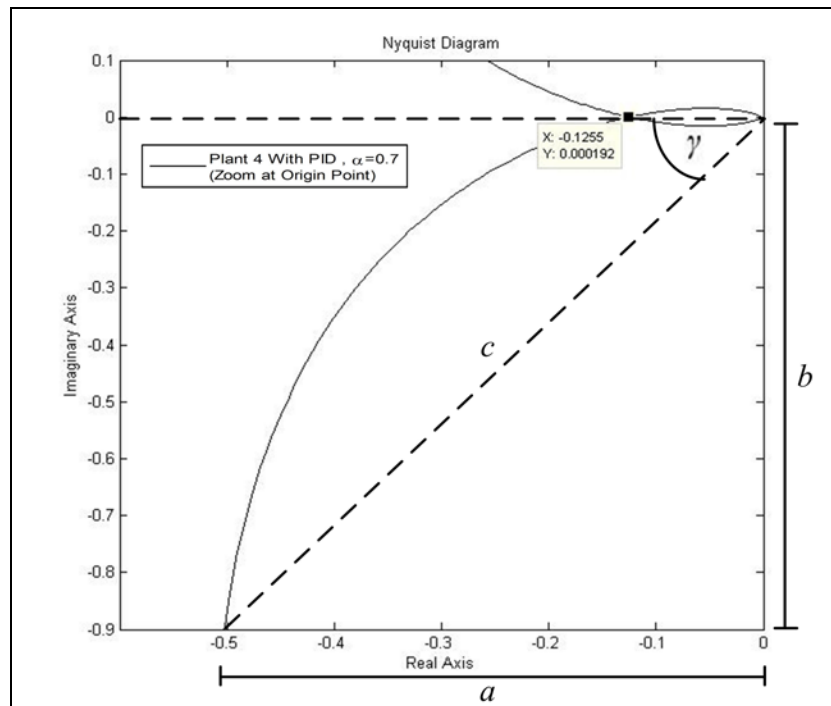
เมื่อพิจารณาข้อกำหนด $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ ในกรณีนี้ $\alpha = 0.68$ ถึง $\alpha = 0.9$ จะได้ว่า $GH(s)$ ไม่มีโพลอยู่ในตำแหน่งด้านขวาของระนาบเอส ($P = 0$) ถ้าวิถี $GH(s)$ ไม่มีการวนล้อมรอบจุด $-1 + j0$ ($N = 0$) จะได้ว่าระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์และตัวควบคุมพีไอดีมีเสถียรภาพ ($Z = 0$) แต่ในแผนภาพในควิสด์ที่แสดงในรูปที่ 3.37 – 3.40 วิถี $GH(s)$ มีการวนล้อมรอบจุด $-1 + j0$ ในทิศตามเข็มนาฬิกาจำนวน 1 รอบ ($N = 1$) นั่นคือระบบวงปิดมีโพลหนึ่งตัวอยู่ในตำแหน่งด้านขวาของระนาบเอสและระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ ($Z = N = 1$) นั่นคือส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสของผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่อ่านได้จากแผนภาพในควิสด์ที่แสดงในรูปที่ 3.39 จะได้ว่าระบบมีส่วนเพื่ออัตราขยายเท่ากับ $20\log(1 \div 0.1255) = 18.0271$ dB และส่วนเพื่อเฟสมีค่าเท่ากับมุมของ γ โดยที่ c คือเส้นสมมุติที่มีความยาว 1 หน่วยลากตัดทางเดินในควิสด์ทำมุมกับแกนนอน จะได้ว่า $c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(0.5)^2 + (0.9)^2} = \sqrt{0.25 + 0.81} = 1.02 \approx 1$ มุมของ γ จึงมีค่าเท่ากับ $\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.9}{0.5}\right) = 1.0637$ เรเดียน เปลี่ยนเป็นมุมในหน่วยองศา จะได้ว่า $\gamma = ((1.0637 \times 180) \div \pi) = 60.9454$ องศา นั่นคือระบบมี $GM \approx 18$ dB และ $PM \approx 60^\circ$ ทำให้ส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่แสดงได้จากแผนภาพโบดไม่สามารถใช้ระบุหรือบ่งชี้เสถียรภาพของระบบวงปิดทุกระบบได้ ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 2 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซัดเซพลาตต์ 4 จะทำให้ระบบวงเปิดที่ประกอบด้วยพลาตต์และตัวควบคุมมีผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสตรงกับข้อกำหนด แต่ระบบวงปิดอาจจะขาดเสถียรภาพ



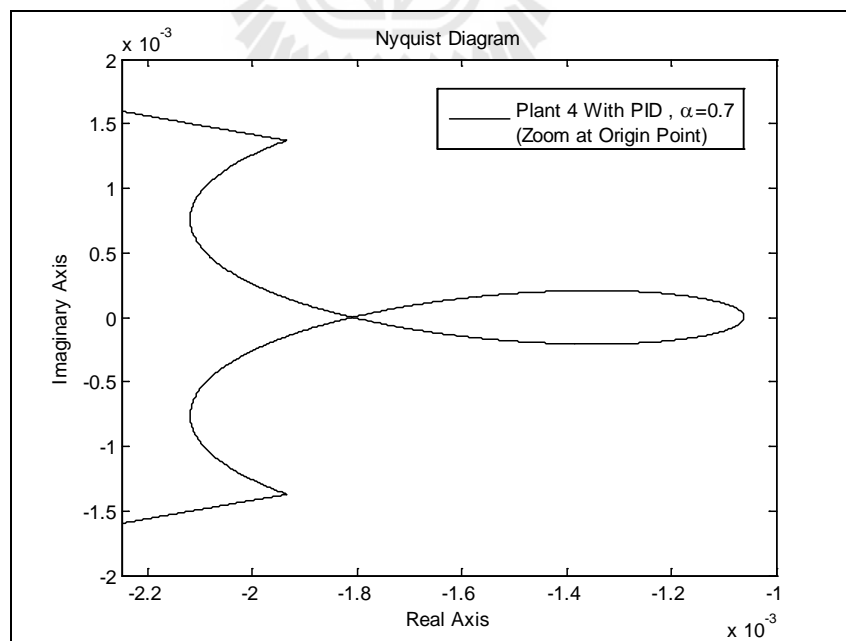
รูปที่ 3.37 วิถี $GH(s)$ ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$



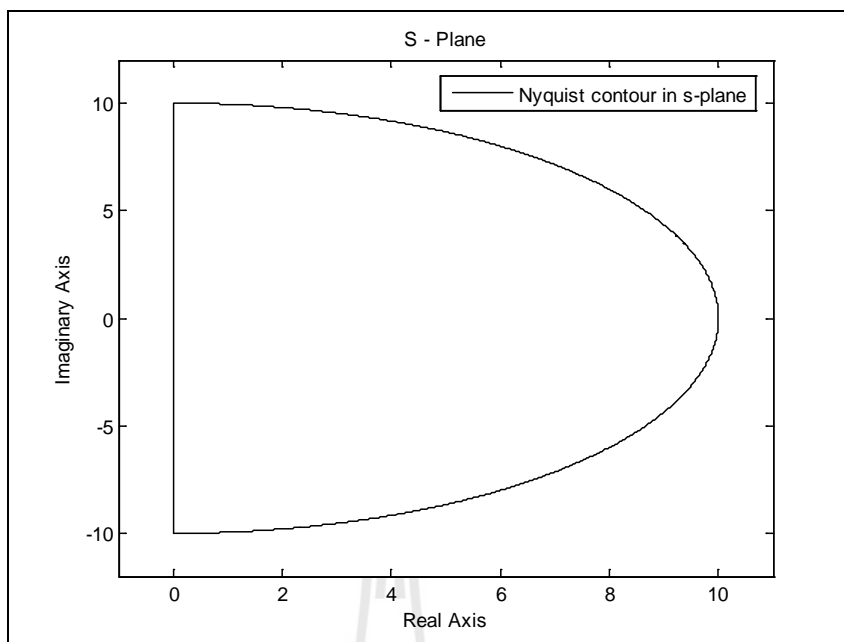
รูปที่ 3.38 วิถี $GH(s)$ ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$ บริเวณใกล้จุด $-1 + j0$



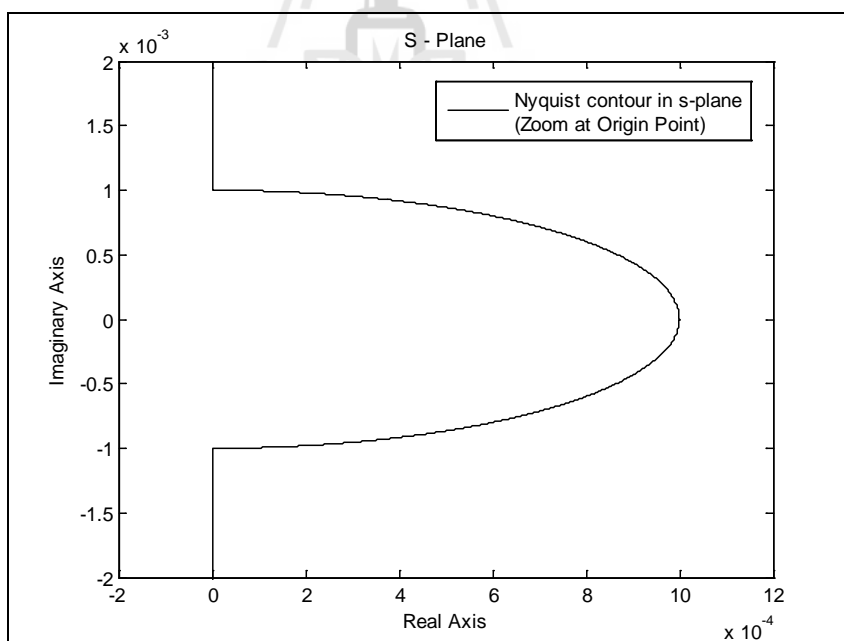
รูปที่ 3.39 วิถี $GH(s)$ (ขยาย) ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$ บริเวณใกล้จุด $-1 + j0$



รูปที่ 3.40 วิถี $GH(s)$ ของระบบวงเปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.7$ บริเวณใกล้จุดกำเนิด



รูปที่ 3.41 ทางเดินของไนควิสต์ในระนาบเอส



รูปที่ 3.42 ทางเดินของไนควิสต์ในระนาบเอสบริเวณใกล้จุดกำเนิด

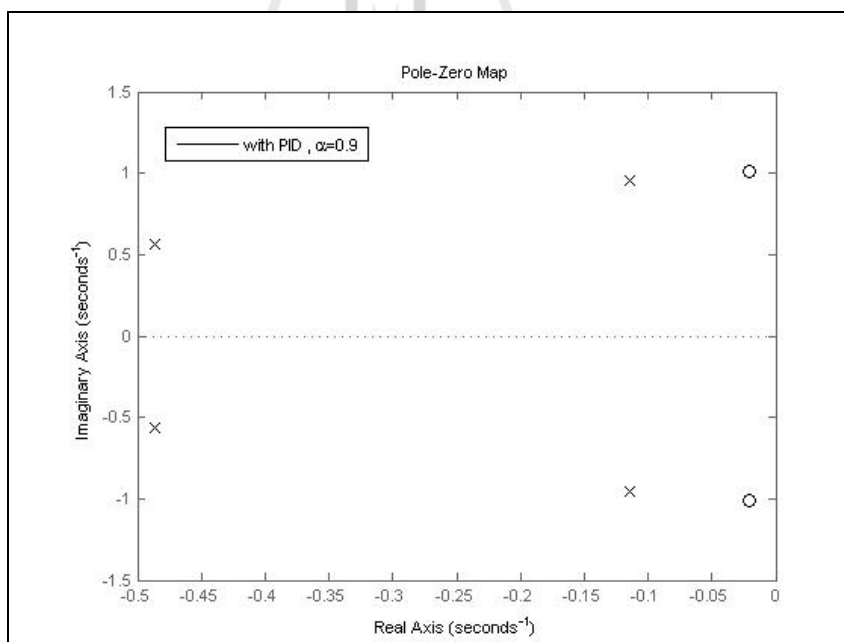
ทางเดินของไนควิสต์คือเส้นรอบวงของครึ่งวงกลมใหญ่ทางด้านขวาของระนาบเอสที่มีรัศมีเท่ากับ 10 หน่วย (ในทางอุดมคติ ครึ่งวงกลมต้องมีรัศมีที่มีค่ามากมายไม่จำกัดหรือมีค่าเท่ากับอนันต์) ในทิศตามเข็มนาฬิกาจำนวน 1 รอบซึ่งแสดงในรูปที่ 3.41 เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

มีโพลอยู่ที่จุดกำเนิดซ้ำกัน 2 ตัว ทางเดินของไนควิสต์จึงต้องอ้อมจุดกำเนิดมาทางด้านขวาของระนาบเอส เพื่อเบี่ยงหลบโพลที่จุดกำเนิด ทำให้เกิดเส้นรอบวงของครึ่งวงกลมเล็กที่มีรัศมีน้อยมาก และต้องไม่มีโพลหรือซีโรตัวอื่นอยู่ภายในครึ่งวงกลมนี้ นั่นคือมีโพลที่จุดกำเนิดอยู่ภายในครึ่งวงกลมเล็กเท่านั้น ครึ่งวงกลมเล็กมีรัศมีเท่ากับ 0.001 ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.42 วิธี $GH(s)$ มีส่วนหนึ่งเป็นเส้นรอบวงของวงกลมขนาดใหญ่ที่ล้อมรอบจุด $-1 + j0$ ในทิศตามเข็มนาฬิกาจำนวน 1 รอบ นั่นคือ $N = 1$ เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่มีโพลอยู่ในตำแหน่งด้านขวาของระนาบเอส หรือ $P = 0$ จะได้ว่า $Z = N + P = 1 + 0 = 1$ ดังนั้นระบบวงปิดมีโพลหนึ่งตัวอยู่ในตำแหน่งด้านขวาของระนาบเอสและระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ

พลาเน็ต 5 ภายได้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ จากการกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.5 ถึง 2 และ α มีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 จะได้ว่า ภายได้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบข้างต้น ให้ค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.22) คือในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ เพียงกรณีเดียวเท่านั้น ซึ่งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.9$ ได้ดังนี้

ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-0.0211 \pm j1.0139$

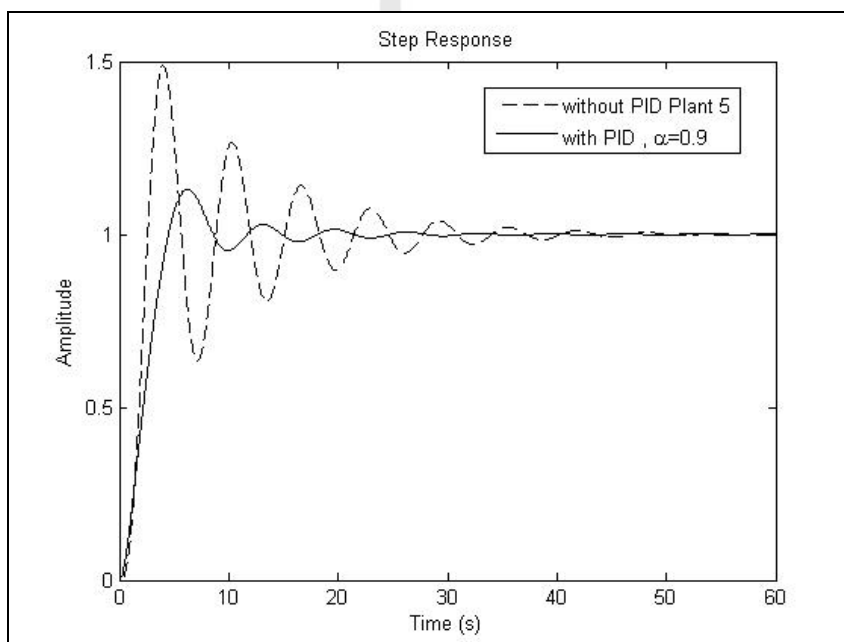
โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : $-0.4861 \pm j0.5594, -0.1139 \pm j0.9531$



รูปที่ 3.43 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.9$

แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดในกรณีนี้ที่ $\alpha = 0.9$ ที่แสดงในรูปที่ 3.43 อธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.4861 \pm$

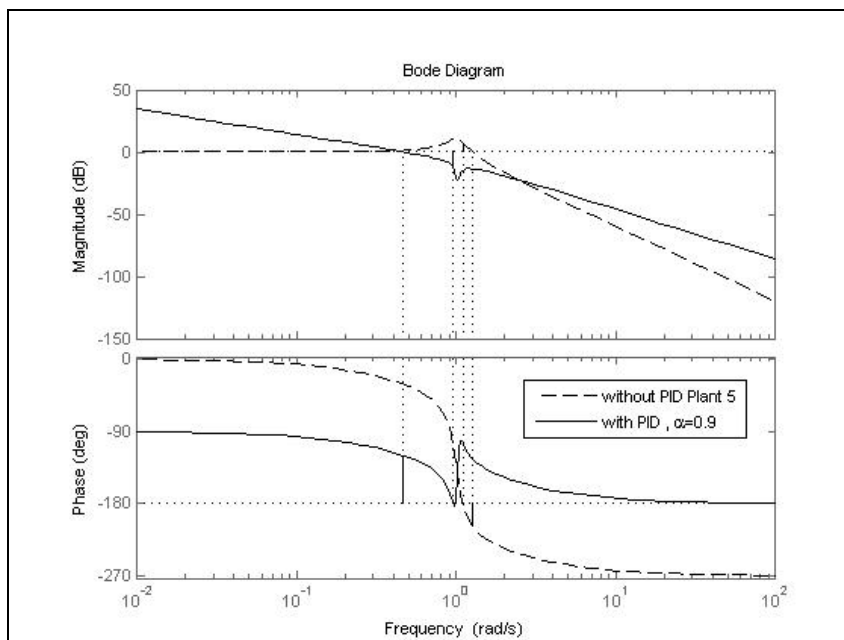
$j0.5594$ มากกว่าอิทธิพลที่เกิดจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.1139 \pm j0.9531$ และคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.0211 \pm j1.01$ เพราะคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.114 \pm j0.953$ และคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.0211 \pm j1.0139$ นี้มีตำแหน่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันและมีอิทธิพลหักล้างซึ่งกันและกันบางส่วน ในขณะที่พลานต์ไม่มีซีโร แต่มีคู่โพล $-0.1 \pm j0.995$ ที่มีตำแหน่งใกล้แกนจินตภาพมาก ทำให้พลานต์สร้างผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่นานมาก ซึ่งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดได้ดังในรูปที่ 3.44 และสมรรถนะของผลตอบสนองในตารางที่ 3.14 ที่อาจสังเกตได้ว่า ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าและปริมาณการพุ่งเกินต่ำกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์ แต่มีช่วงเวลายื่นนานกว่า



รูปที่ 3.44 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$

พลานต์ให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $PM \approx -27.7^\circ$ และมี $GM = -7.13$ dB นั่นคือระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลานต์และตัวควบคุมแบบสัดส่วน $K_p = 1$ ขาดเสถียรภาพ และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุมพีไอดีให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $PM \approx 60^\circ$ ซึ่งตรงกับข้อกำหนด แต่มี $GM = 13.32$ dB ที่น้อยกว่าข้อกำหนดที่ต้องการคือ $GM = 18.0618$ dB นั่นคือระบบวงปิดยังคงมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดี ถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย แต่เนื่องจากพลานต์ให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีปริมาณการพุ่งเกินสูงและมีการแกว่งหลายครั้งก่อนถึงสถานะอยู่ตัว ทำให้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบอาจจะมีส่วนเพื่อ

อัตราขยายมากเกินไป เป็นผลให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มี GM น้อยกว่าข้อกำหนด ซึ่งแสดงได้ในแผนภาพโบดรูปที่ 3.45



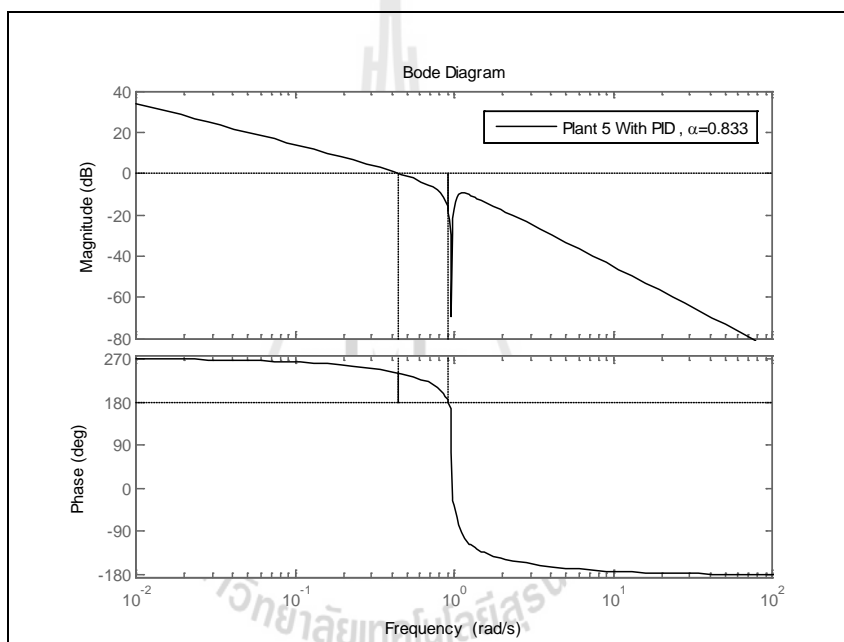
รูปที่ 3.45 แผนภาพโบดของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่มี $\alpha = 0.9$

ตารางที่ 3.14 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะใน โดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 5)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลานต์	—	—	—	1.5	35.9	49	-7.13	-27.7	1.0955	1.25
ระบบวงปิด $\alpha = 0.9$	0.0208	0.5060	0.4920	3.16	16.7	13.1	13.32	60	0.956	0.46

เมื่อพิจารณาแนวทางที่ 2 และข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลานต์ 5 จะได้ว่าค่า α ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการ (2.22) คือ $\alpha = 0.834$ ถึง $\alpha = 0.99$ เท่านั้น ในกรณีที่ $\alpha = 0.5$ ถึง $\alpha = 0.833$ ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลานานกว่าและปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าผลตอบสนองในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ และตัวควบคุมพีไอดีมีค่าเกณฑ์ K_P เป็นค่าลบ แต่ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีส่วนเพื่ออัตราขยาย

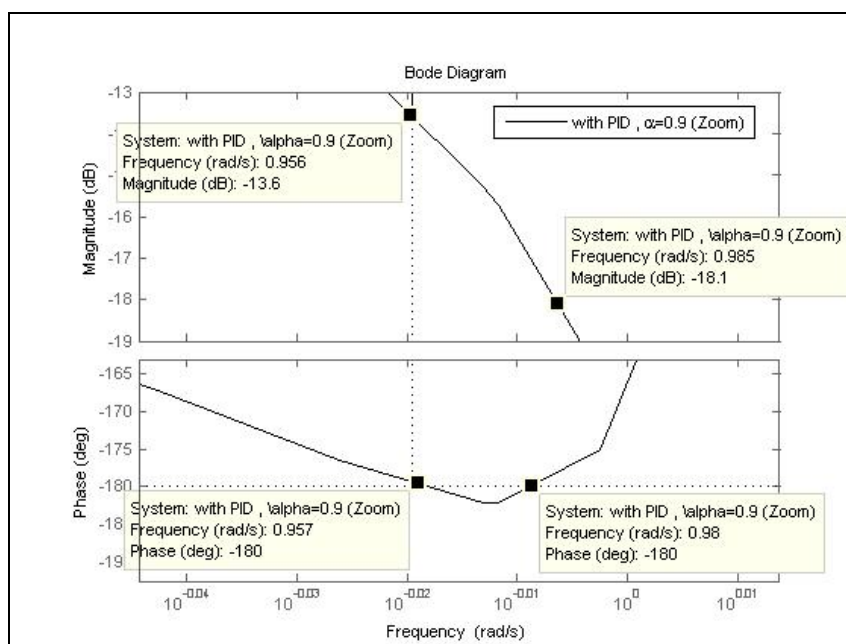
และส่วนเฟสที่ตรงกับข้อกำหนด ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ ผลตอบสนองในโดเมนเวลามีช่วงเวลายาวขึ้นกว่า แต่ช่วงเวลาเข้าที่และปริมาณการพุ่งเกินน้อยกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์ และในกรณีที่ $\alpha = 1$ ถึง $\alpha = 2$ ตัวควบคุมมีค่าเกน K_p เป็นค่าบวก แต่ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมให้ส่วนเพื่ออัตราขยายน้อยกว่าข้อกำหนด แต่ให้ส่วนเฟสที่ตรงกับข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ เมื่อพิจารณาข้อกำหนด $GM \geq 18.0618$ dB และ $PM \geq 60^\circ$ จะได้ว่าถ้า $\alpha > 0.833$ ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีความถี่ตัดข้าม -180° (ω_g) มากกว่าหนึ่งความถี่ ทำให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มี GM น้อยกว่าข้อกำหนด เช่น ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มี $GM = 13.32$ dB และ $PM = 60^\circ$



รูปที่ 3.46 แผนภาพ โบคของระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) กรณีที่ $\alpha = 0.833$

แผนภาพ โบคที่แสดงในรูปที่ 3.46 อธิบายได้ว่า ในกรณีที่ $\alpha = 0.833$ ระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุมพีไอดีให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี $GM = 18.0618$ dB และ $PM = 60^\circ$ มีความถี่ตัดข้าม 0 dB (ω_p) คือ 0.4402 rad/s และมีความถี่ตัดข้าม -180° (ω_g) คือ 0.9125 rad/s นั่นคือผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีความถี่ตัดข้าม -180° (ω_g) หนึ่งจุด และระบบวงเปิดให้ GM ที่ตรงกับข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ แต่ถ้า $\alpha > 0.833$ ระบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมจะให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มีความถี่ตัดข้าม -180° (ω_g) มากกว่าหนึ่งจุด ทำให้ผลตอบสนองมีส่วนเพื่ออัตราขยายมากกว่าหนึ่งค่า ส่วนเพื่ออัตราขยายที่มีค่าน้อยที่สุดคือส่วนเพื่ออัตราขยายของระบบ เป็นผลให้ระบบวงเปิดอาจจะมีค่า $GM < 18.0618$ dB เมื่อพิจารณาการใช้แนวทางที่ 2

ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพลานต์ 5 จะได้ว่าถ้า α มีค่าเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มี $PM = 60^\circ$ แต่อาจจะมี GM น้อยกว่าข้อกำหนด เช่น ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$ ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีความถี่ตัดข้าม -180° คือ $\omega_g = 0.956$ rad/s ซึ่งความถี่ตัดข้ามนี้ให้ $GM = 13.32$ dB และมีความถี่ตัดข้าม -180° คือ $\omega_g = 0.986$ rad/s ซึ่งความถี่ตัดข้ามนี้ให้ $GM = 18.06$ dB ทำให้ระบบวงเปิดมีส่วนเผื่ออัตรายาย 13.32 dB นั่นคือถ้าระบบวงปิดมีอัตรายายเพิ่มขึ้น 13.32 dB ระบบวงปิดจะขาดเสถียรภาพซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 แผนภาพโบด (ขยาย) ของระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) ในกรณีที่ $\alpha = 0.9$

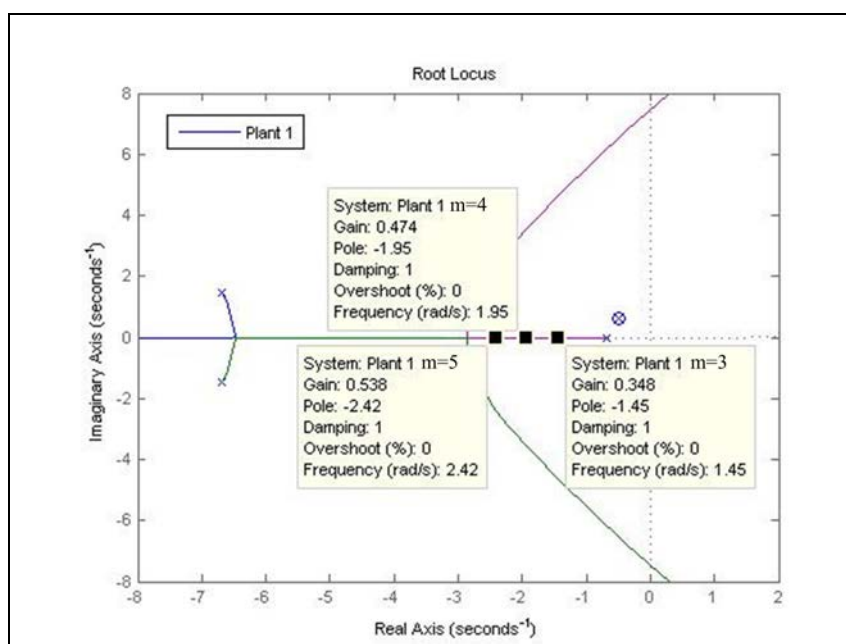
ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 2 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพลานต์ 5 ต้องพิจารณาข้อกำหนด GM , PM และการเลือกค่า α เพื่อไม่ให้เกิดความถี่ตัดข้าม -180° (ω_g) มากกว่าหนึ่งความถี่ เพราะระบบวงเปิดอาจจะมี GM น้อยกว่าข้อกำหนด

3.2.3 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแนวทางที่ 3

ผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงในหัวข้อนี้ เป็นผลจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ ที่ซดเซพลานต์ควบคุมยาก 5 พลานต์ โดยค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ซดเซพลานต์แต่ละพลานต์ ได้จากขั้นตอนการออกแบบที่ 1 ถึง 6 ในหัวข้อ 2.5.1 ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 2 จำลองสถานการณ์ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลานต์ควบคุม

ยากและตัวควบคุมพีไอดี เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ เมื่อกำหนดค่า $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ เพื่อศึกษาเสถียรภาพสัมพัทธ์ ตำแหน่งของโพลและซีโรของระบบวงปิด และสมรรถนะของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วย โดยมีผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 5 พลานต์ดังนี้

พลานต์ 1 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s จึงระบุเป็นคู่โพลเด่นได้คือ $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$ เมื่อพิจารณาสมการ (2.27) สามารถวาดแผนภาพโลกราก (ทางเดินราก) เพื่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีได้ดังรูปที่ 3.48

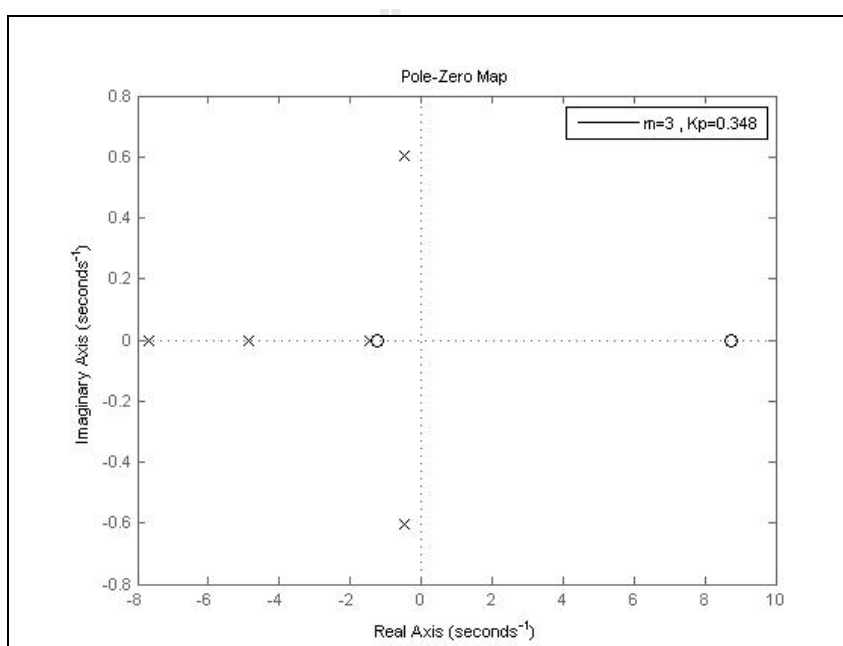


รูปที่ 3.48 แผนภาพโลกรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 1

จากรูปที่ 3.48 เมื่อกำหนดให้โพลจริงใด ๆ ของระบบวงปิดต้องมีระยะห่างจากแกนจินตภาพไปซ้ายมือของระนาบเอสเป็นจำนวนสามเท่าของระยะห่างจากแกนจินตภาพของคู่โพลเด่น ($m = 3$) จะได้ว่า $ma = 3 \times (-0.4848) = -1.4545$ นั่นคือระบบวงปิดมีโพลจริงในตำแหน่ง -1.4545 ซึ่งมีค่าเกน $K_p = 0.348$ เมื่อ $m = 4$ จะได้ว่า $ma = 4 \times (-0.4848) = -1.9394$ จึงได้ค่าเกน $K_p = 0.474$ และเมื่อ $m = 5$ จะได้ว่า $ma = 5 \times (-0.4848) = -2.4242$ ดังนั้นค่าเกน $K_p = 0.538$ จึงแสดงการวิเคราะห์ผลการจำลองสถานการณ์เป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีแรก $K_p = 0.348$ กรณีที่สอง $K_p = 0.474$ และกรณีสุดท้าย $K_p = 0.538$ กำหนดค่าเกน K_I และ K_D จากสมการ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ จากการออกแบบมีข้อมูลดังแสดงต่อไปนี้

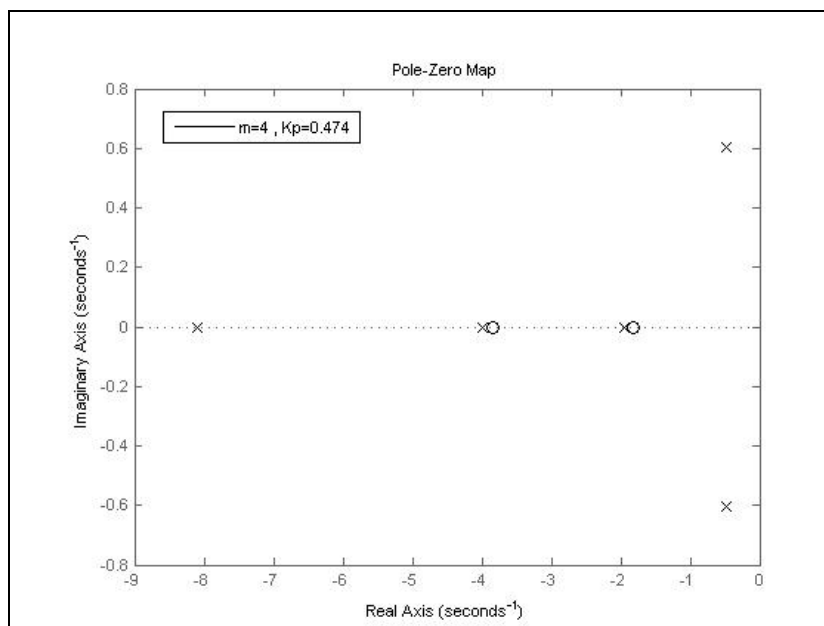
ตารางที่ 3.15 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.348$	ซีโร : -1.26 , 8.75 โพล : -7.7 , -4.87 , -1.45 , $-0.485 \pm j0.603$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.474$	ซีโร : -3.85 , -1.83 โพล : -8.09 , -3.99 , -1.94 , $-0.485 \pm j0.603$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.538$	ซีโร : $-1.8 \pm j0.979$ โพล : -8.25 , -3.36 , -2.42 , $-0.485 \pm j0.603$



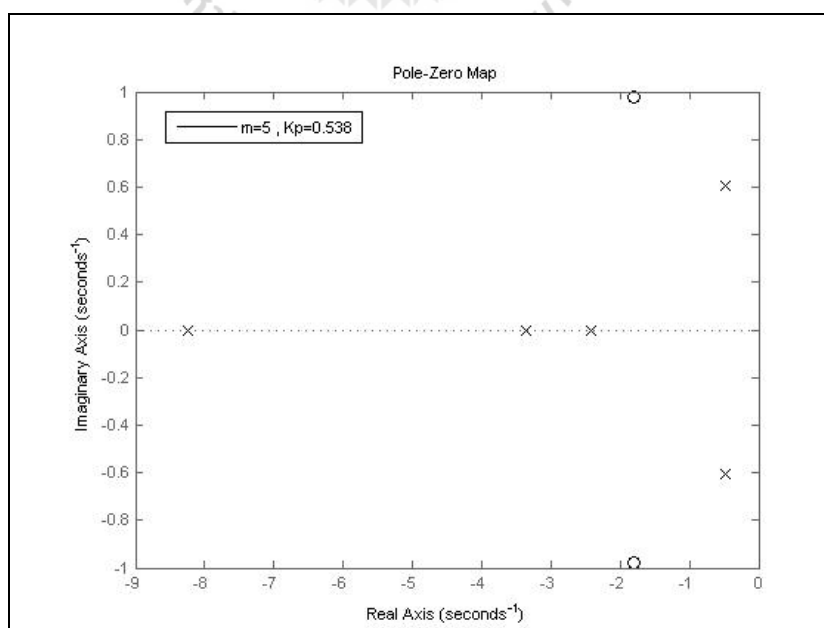
รูปที่ 3.49 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 0.348$

จากรูปที่ 3.49 และตารางที่ 3.15 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดในกรณีที่ $K_p = 0.348$ มีคู่โพลเด่นตามที่ต้องการคือ $-0.4848 \pm j0.6031$ และผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นดังกล่าว เพราะคู่โพลเด่น $-0.4848 \pm j0.6031$ มีตำแหน่งอยู่ใกล้แกน $j\omega$ มากที่สุด และโพลจริง -1.4545 และซีโรจริง -1.26 ที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกันและอยู่ห่างจากคู่โพลเด่นไปทางด้านซ้ายของระนาบเอส ประมาณสามเท่า เกิดการหักล้างอิทธิพลซึ่งกันและกันเกือบสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาแผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 0.474$ ซึ่งแสดงได้ดังในรูปที่ 3.50 สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ ในกรณีที่ $K_p = 0.348$ เมื่อ $m = 3$

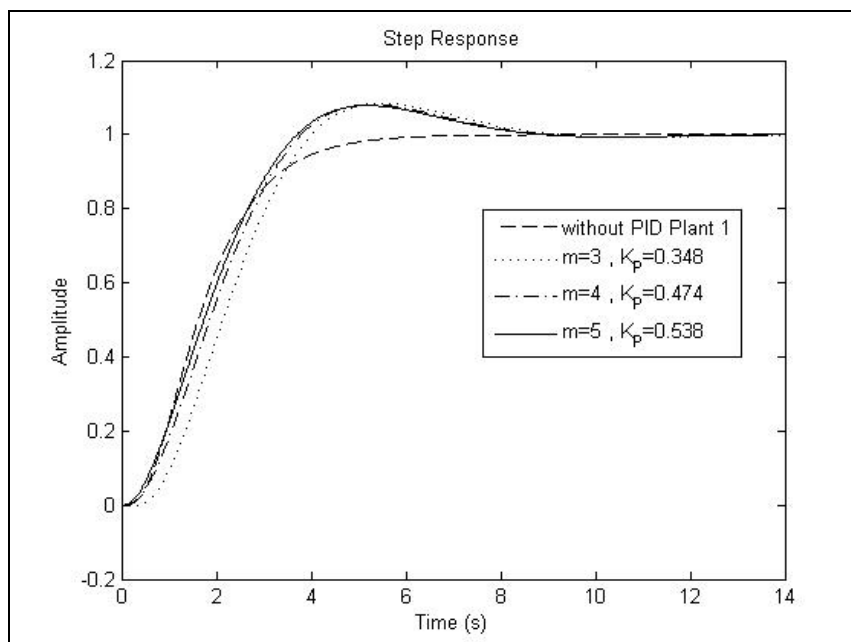


รูปที่ 3.50 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 0.474$

เมื่อพิจารณา $m = 5$ ในกรณีที่ $K_p = 0.538$ ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่นตามที่ต้องการคือ $-0.4848 \pm j0.6031$ และผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นดังกล่าว เพราะคู่โพลเด่น $-0.4848 \pm j0.6031$ มีตำแหน่งอยู่ใกล้แกน $j\omega$ มากที่สุด และไม่มีโพลหรือซีโรอยู่ใกล้กับคู่โพลเด่น แสดงแผนผังโพลและซีโรได้ดังในรูปที่ 3.51



รูปที่ 3.51 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 5$ ในกรณีที่ $K_p = 0.538$

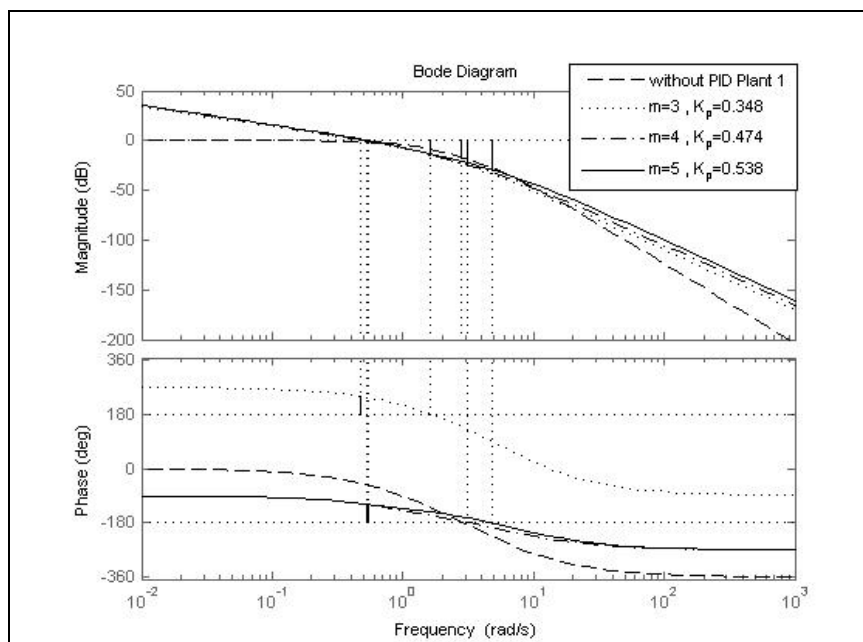


รูปที่ 3.52 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.52 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาริ่ขึ้นสั้นกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์เล็กน้อย แต่มีช่วงเวลาริ่เข้าที่นานกว่าและมีปริมาณการฟุงเกินสูงกว่า ในกรณีที $K_p = 0.348$ และกรณี $K_p = 0.474$ ผลตอบสนองมีปริมาณการฟุงเกินสูงกว่าข้อกำหนดในโดเมนเวลาที่ต้องการเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในโดเมนความถี่จากแผนภาพโบริดทีแสดงในรูปที่ 3.53 อธิบายได้ว่า ระบบทีมีตัวควบคุม เมื่อค่าเกน K_p เพิ่มขึ้น ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มี GM และ PM เพิ่มขึ้น ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ทีดีขึ้นและอยู่ในเกณฑ์ทีดีมาก ถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย สามารถสรุปสมรรถนะของผลตอบสนองได้ดังตารางที

3.16



รูปที่ 3.53 แผนภาพโบคของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5

ตารางที่ 3.16 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 1)

	ค่าเกณฑ์ตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลานต์	—	—	2.7	5.02	—	16.58	∞	2.8283	0
ระบบวงปิด $K_P = 0.348$	0.5099	-0.0465	2.42	8.08	8.52	14.44	58.64	1.6419	0.4756
ระบบวงปิด $K_P = 0.474$	0.5878	0.0835	2.47	7.82	8.1	24.6	60.2	3.1	0.523
ระบบวงปิด $K_P = 0.538$	0.6273	0.1495	2.46	7.7	7.83	29.6	61.2	4.88	0.546

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลานต์ 1 และตัวควบคุมพีไอดี การใช้แนวทางที่ 3 คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม จะให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะไม่มากกว่าข้อกำหนดที่ใช้ ออกแบบหรืออาจจะเกินกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย กล่าวคือผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าข้อกำหนด แต่อาจมีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย ระบบวงปิดมีเกณฑ์เสถียรภาพ

สัมพัทธ์ที่ดี และเมื่อ m มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบวงปิดมีแนวโน้มให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่ และ ปริมาณการพุ่งเกินลดลง

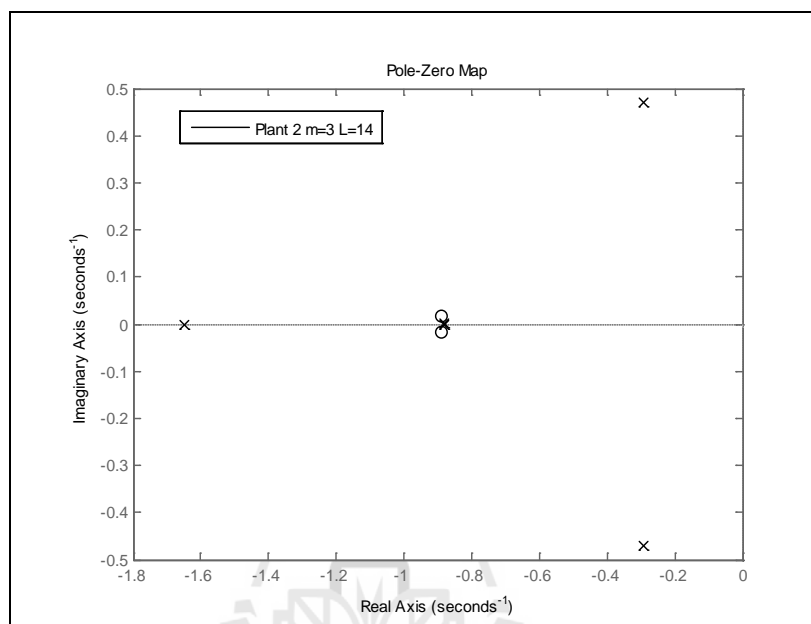
ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์ 2 ด้วยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแนวทางที่สาม เมื่อนำเทคนิคการระบุข้อกำหนดด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโพลในระบบวงปิดมาประยุกต์ใช้เพื่อการระบุคู่โพลเด่นในตำแหน่งที่ต้องการตามข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ ทำให้คู่โพลเด่นมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองในโดเมนเวลามากที่สุด เนื่องจากพลานต์ 2 เป็นระบบอันดับสี่ ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีคือระบบอันดับห้า ทำให้ระบบวงปิดมีโพลจำนวนทั้งหมดห้าตัว กำหนดให้โพลสองตัวเป็นคู่โพลเด่น โพลที่เหลือคือโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นและเป็นโพลจริงจำนวนสามตัว โพลจริงนี้เป็น โพลซ้ำกันสองตัวที่จุดแยก (breakaway) ของทางเดินรากซึ่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพไปทางซ้ายของระนาบเอสเป็นจำนวน m เท่าของขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่น และกำหนดให้โพลจริงตัวสุดท้ายมีตำแหน่งห่างจากแกนจินตภาพไปทางด้านซ้ายของระนาบเอสมากกว่า m เท่าของขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่น ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ที่มีรายละเอียดตัวอย่างการออกแบบในกรณีที่ $m = 3$ เท่านั้น เพราะในกรณีที่ $m = 4$ และ 5 เป็นการดำเนินการซ้ำ จะได้ว่ากรณี $m = 3, 4$ และ 5 สามารถระบุข้อกำหนดที่มีปริมาณการพุ่งเกินขั้นต่ำหรือร้อยละสูงสุดคือ $P.O. = 0\%$, 1.1762% และ 13.0219% ตามลำดับ และถ้าข้อกำหนดมีปริมาณการพุ่งเกิน มากกว่า 61.5846% , 68.1263% และ 72.8077% ตามลำดับ ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่ไม่สามารถคาดคะเนได้ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบหรือไม่ เมื่อ $m = 5$ ข้อกำหนดมีปริมาณการพุ่งเกินขั้นต่ำมากที่สุด จึงระบุข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือต้องการให้ผลตอบสนองมี $P.O. \leq 14\%$ และ $t_s \leq 13.59\text{ s}$, $t_s \leq 15.76\text{ s}$ และ $t_s \leq 17.21\text{ s}$ เมื่อ $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.2942 \pm j0.4701$, $p_{1,2} = -0.2537 \pm j0.4054$ และ $p_{1,2} = -0.2324 \pm j0.3713$ ตามลำดับ จากภาคผนวก ก. คำนวณค่าเกน $K_p = 0.8878, 0.6791$ และ 0.5591 ตามลำดับ จึงแสดงการวิเคราะห์ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี ได้แก่ $K_p = 0.8878, 0.6791$ และ 0.5591 จากการออกแบบมีผลการจำลองสถานการณ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.17 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี กรณี $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ (พลานต์ 2)

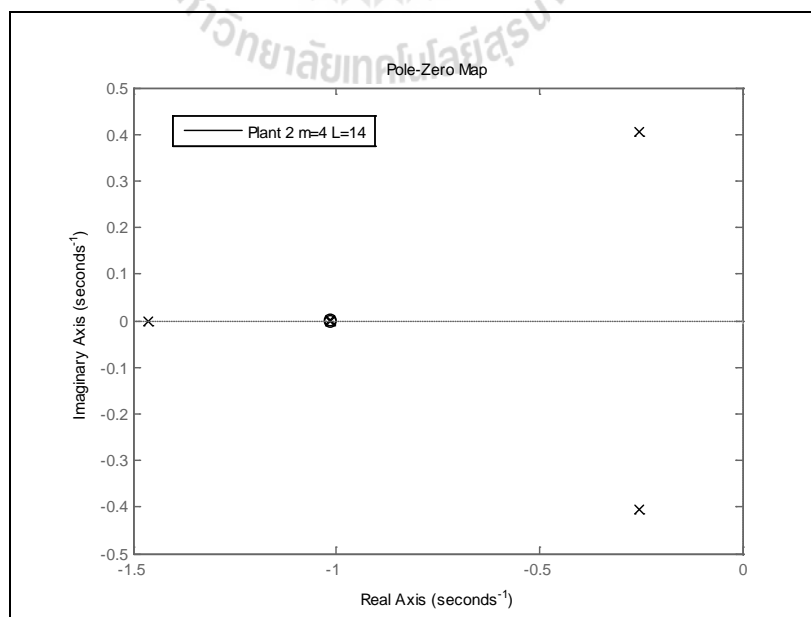
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.8878$	ซีโร : $-0.8881 \pm j0.0175$ โพล : $-1.6465, -0.8826, -0.8826, -0.2942 \pm j0.4701$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.6791$	ซีโร : $-1.0148 \pm j0.0004$ โพล : $-1.4630, -1.0148, -1.0148, -0.2537 \pm j0.4054$

ตารางที่ 3.17 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี กรณี $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ (พลานต์ 2) (ต่อ)

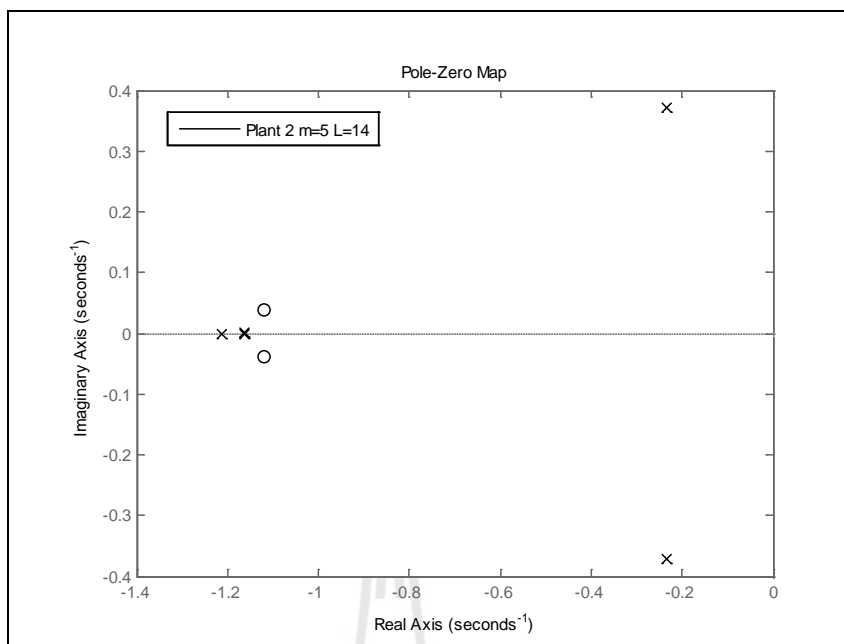
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.5591$	ซีโร : $-1.1210 \pm j0.0391$ โพล : $-1.2117, -1.1618, -1.1618, -0.2324 \pm j0.3713$
--	--



รูปที่ 3.54 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 0.8878$

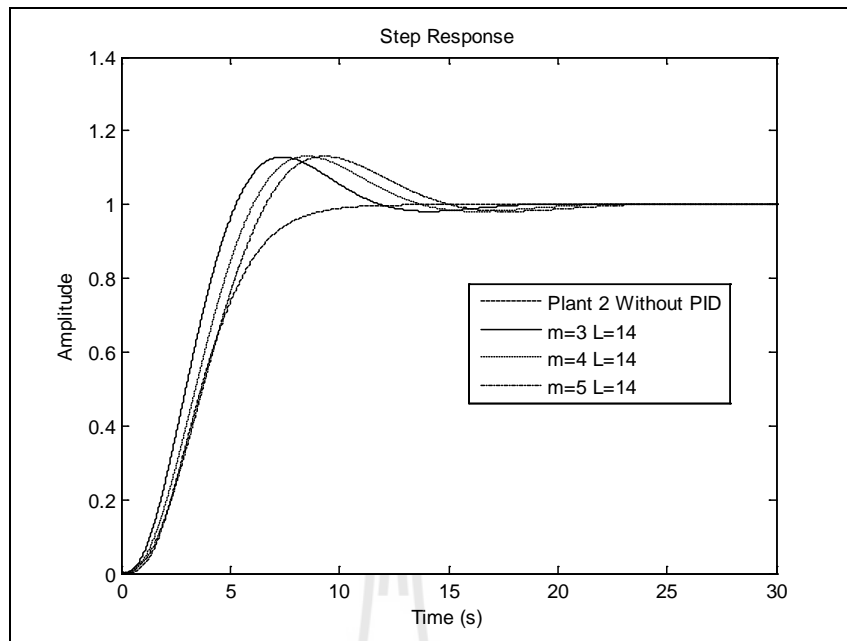


รูปที่ 3.55 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 0.6791$

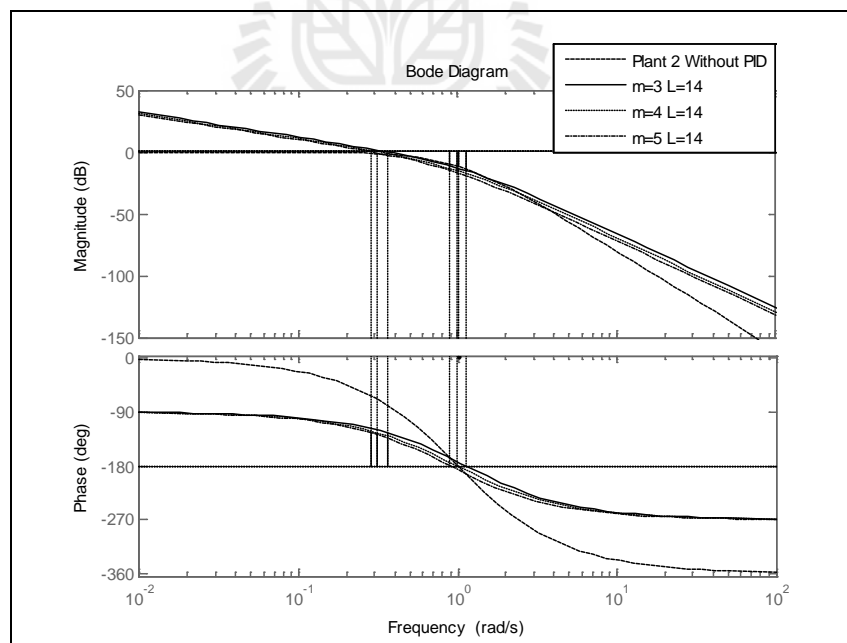


รูปที่ 3.56 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 5$ ในกรณีนี้ $K_p = 0.5591$

ข้อมูลในตารางที่ 3.17 และแผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.54 ถึงรูปที่ 3.56 เมื่อพิจารณา $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่น และโพลจริงอื่น ๆ อยู่ในตำแหน่งตามที่ต้องการ ทำให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ตและระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.57 ซึ่งอธิบายได้ว่า ข้อกำหนด $P.O. \leq 14\%$ ในกรณี $m = 3, 4$ และ 5 ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาขึ้นสั้นกว่าช่วงเวลาที่ขึ้นของผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต มีปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่อยู่ภายในข้อกำหนด กรณี $m = 3$ ($t_s = 11.1 \text{ s} < 13.5969 \text{ s}$) กรณี $m = 4$ ($t_s = 12.8 \text{ s} < 15.7664 \text{ s}$) และ กรณี $m = 5$ ($t_s = 14 \text{ s} < 17.2146 \text{ s}$) ตามลำดับ



รูปที่ 3.57 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (Plant 2 Without PID) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5



รูปที่ 3.58 แผนภาพโบดของพลานต์ 2 (Plant 2 Without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5

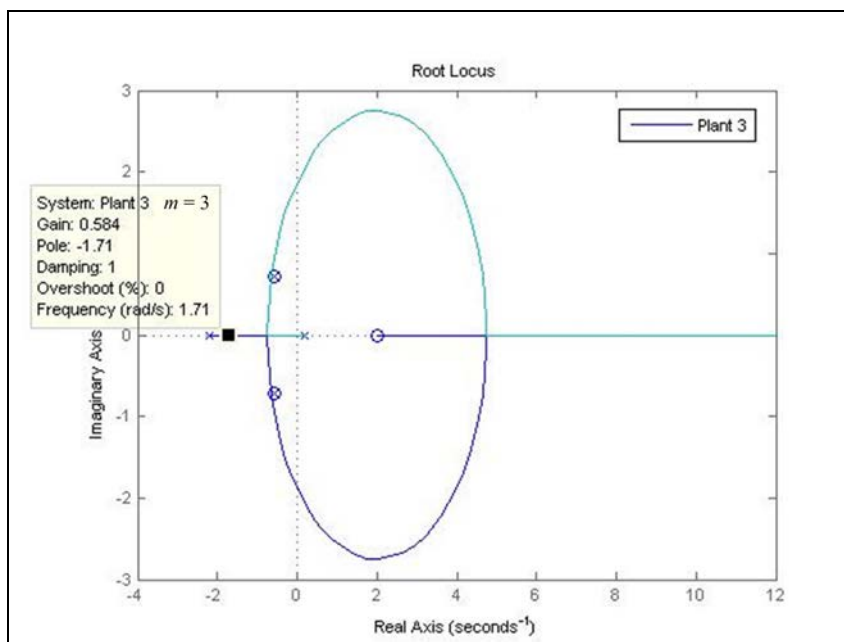
แผนภาพโพลที่แสดงในรูปที่ 3.58 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก และถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย ซึ่งสามารถสรุปสมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของระบบได้ดังตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.18 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ กรณี $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ (พลาเน็ต 2)

	ค่าเกณฑ์ตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	4.94	9.08	—	12	∞	1	0
ระบบวงปิด $K_P = 0.8878$	0.3944	0.4998	3.3	11.1	13	14.9859	54.9386	1.1240	0.3598
ระบบวงปิด $K_P = 0.6791$	0.3446	0.3346	3.8	12.8	13.1	15.1454	54.7612	0.9854	0.3130
ระบบวงปิด $K_P = 0.5591$	0.3138	0.2494	4.16	14	13.1	15.0071	54.8023	0.8927	0.2856

ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างมาก กล่าวคือ ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลานิ่งสั้นกว่าช่วงเวลานิ่งของผลตอบสนองที่เกิดจากพลาเน็ต มีปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่อยู่ภายในข้อกำหนด เพราะระบบวงปิดมีคู่โพลเด่น และโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นในตำแหน่งตามที่ต้องการในระนาบเอส ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก ดังนั้นข้อกำหนดที่มีความเหมาะสมในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อชดเชยพลาเน็ตเป็นสิ่งที่สำคัญ ในที่นี้คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดี จากการกำหนดความต้องการปริมาณการพุ่งเกินของผลตอบสนอง และคำนวณหาข้อกำหนดช่วงเวลาเข้าที่ที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการเทียบสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโพลในระบบวงปิด ซึ่งวิธีนี้เป็นการกำหนดตำแหน่งโพลทั้งหมดในระบบวงปิด

พลาเน็ต 3 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 7\text{ s}$ จึงระบุเป็นคู่โพลเด่นได้คือ $p_{1,2} = -0.5714 \pm j0.7108$ เมื่อพิจารณาสมการ (2.27) สามารถวาดแผนภาพโพลัสกราก (ทางเดินราก) เพื่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีได้ดังรูปที่ 3.59



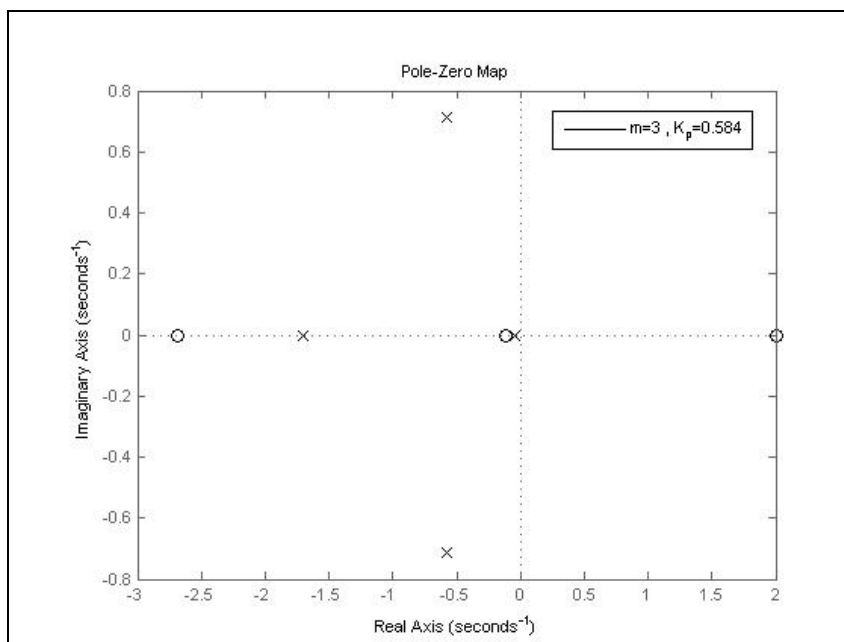
รูปที่ 3.59 แผนภาพโลโก้สรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลาเน็ต 3

จากรูปที่ 3.59 อาจสังเกตได้ว่า แผนภาพโลโก้สรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบนี้ ไม่สามารถกำหนดให้ $m = 4$ หรือ $m = 5$ ได้ ดังนั้นเมื่อ กำหนดให้โพลจริงใด ๆ ของระบบวงปิดมีระยะห่างจากแกนจินตภาพไปซ้ายมือของระนาบเอส เป็นจำนวนสามเท่า ($m = 3$) ของระยะห่างระหว่างแกนจินตภาพและคู่โพลเด่น จะได้ว่า $ma = 3 \times (-0.5714) = -1.7143$ นั่นคือระบบวงปิดมีโพลจริงในตำแหน่ง -1.7143 ซึ่งมีค่าเกน K_p คือ 0.584 คำนวณค่าเกน K_I และ K_D จากสมการ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ แสดงการวิเคราะห์ ผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังต่อไปนี้

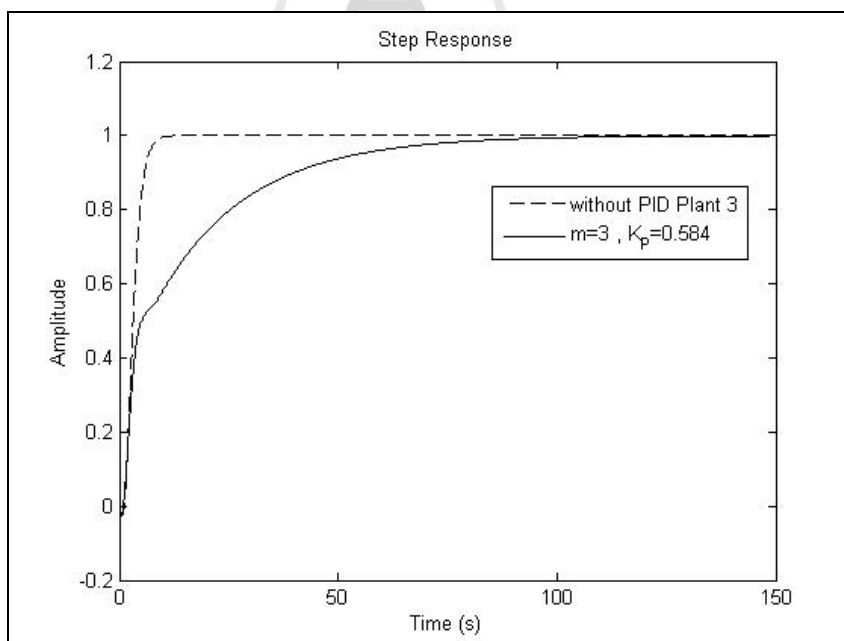
ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : 2, -0.1202 , -2.6868

โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด : -1.7058 , -0.0474 , $-0.5714 \pm j0.7108$

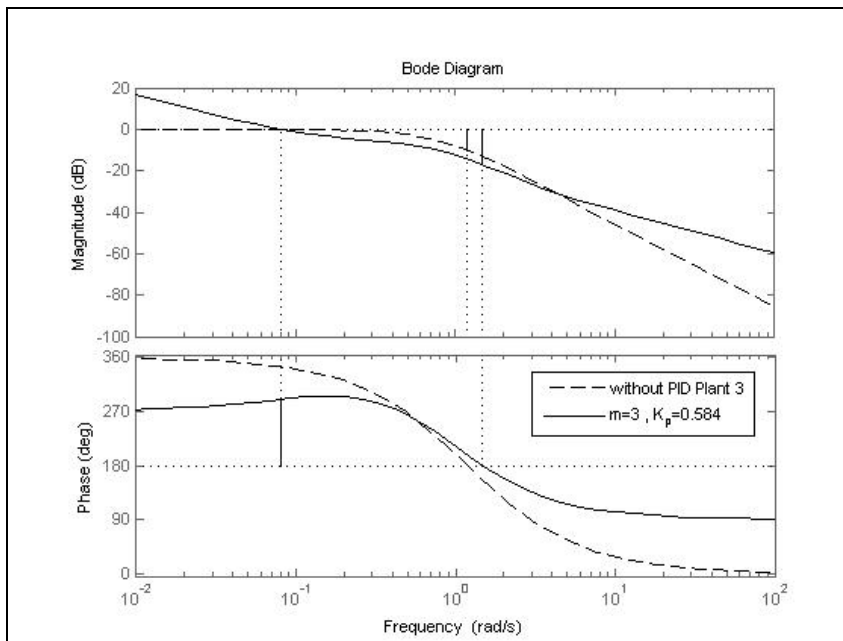
เมื่อพิจารณา $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 0.584$ จากแผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิดที่ แสดงในรูปที่ 3.60 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดในกรณีที่ $K_p = 0.584$ มีคู่โพลเด่นคือ $-0.5714 \pm j0.7108$ และมีโพลจริง -1.7058 อยู่ห่างจากคู่โพลเด่นไปทางซ้ายของระนาบเอสประมาณสามเท่า ตามที่ต้องการ ผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นดังกล่าว แม้ระบบวงปิดจะมีโพลจริง -0.0474 และซีโรจริง -0.1202 อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากกว่า แต่โพลและซีโรดังกล่าวมีตำแหน่ง ใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดการหักล้างอิทธิพลซึ่งกันและกันเกือบสมบูรณ์ ระบบวงปิดมีซีโรอยู่ทาง ด้านขวาของระนาบเอสทำให้ผลตอบสนองเกิดปริมาณการพุ่งต่ำ อิทธิพลจากคู่โพลเด่นทำให้ผล ตอบสนองมีสมรรถนะเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 3.61 และตารางที่ 3.19



รูปที่ 3.60 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 0.584$



รูปที่ 3.61 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3$



รูปที่ 3.62 แผนภาพ โบคของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3$

แผนภาพ โบคที่แสดงในรูปที่ 3.62 อธิบายได้ว่าระบบที่มีตัวควบคุม ผลตอบสนองในโดเมนความถี่มี $GM = 17.07$ dB และ $PM = 109.35^\circ$ นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีขึ้นและอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย

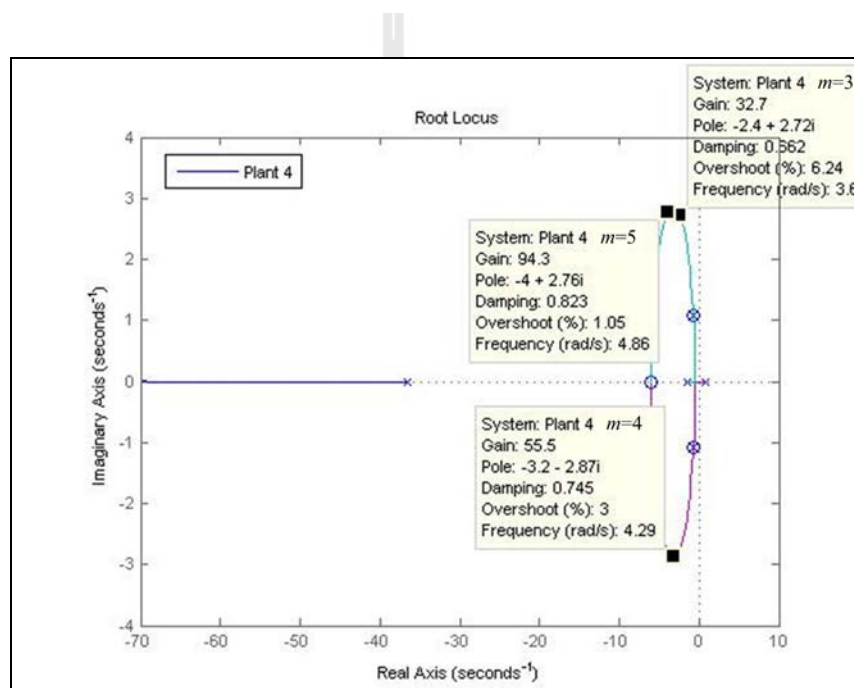
ตารางที่ 3.19 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 3)

	ค่าเกณฑ์ตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลานต์	—	—	4.1	7.91	—	10.10	∞	1.1832	0
ระบบวงปิด $K_p = 0.584$	0.0672	0.2081	38.5	73.6	—	17.07	109.35	1.4774	0.0801

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลานต์ 3 และตัวควบคุมพีไอดี การใช้แนวทางที่ 3 คำนวณค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม ไม่สามารถชดเชยพลานต์ภายใต้ข้อกำหนดที่มีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าช่วงเวลาเข้าที่ที่เกิดจากผลตอบสนองของพลานต์ได้ เพราะค่าเกณฑ์ K_p ที่ได้จากแผนภาพโลโก้สติก จะทำให้ระบบวงปิดมีโพลอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอสและระบบวงปิดขาดเสถียรภาพ เมื่อ m มีค่า

เพิ่มขึ้น ระบบวงปิดจะให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาที่นานกว่า แต่มีปริมาณการพุ่งเกินต่ำกว่า ทำให้สมรรถนะของผลตอบสนองมีแนวโน้มเกินจากข้อกำหนดมากขึ้น เนื่องจากพลานต์คือระบบที่ไม่มีเฟสต่ำสุด (Non-Minimum Phase System) จะได้ว่าระบบวงปิดคือระบบที่ไม่มีเฟสต่ำสุดเช่นเดียวกัน ทำให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาที่นานกว่าข้อกำหนด แต่ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีมาก

พลานต์ 4 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5\text{ s}$ จึงระบุเป็นคู่โพลเด่นได้คือ $p_{1,2} = -0.8000 \pm j1.0915$ เมื่อพิจารณาสมการ (2.27) สามารถวาดแผนภาพโลกัสราก (ทางเดินราก) เพื่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีได้ดังรูปที่ 3.63



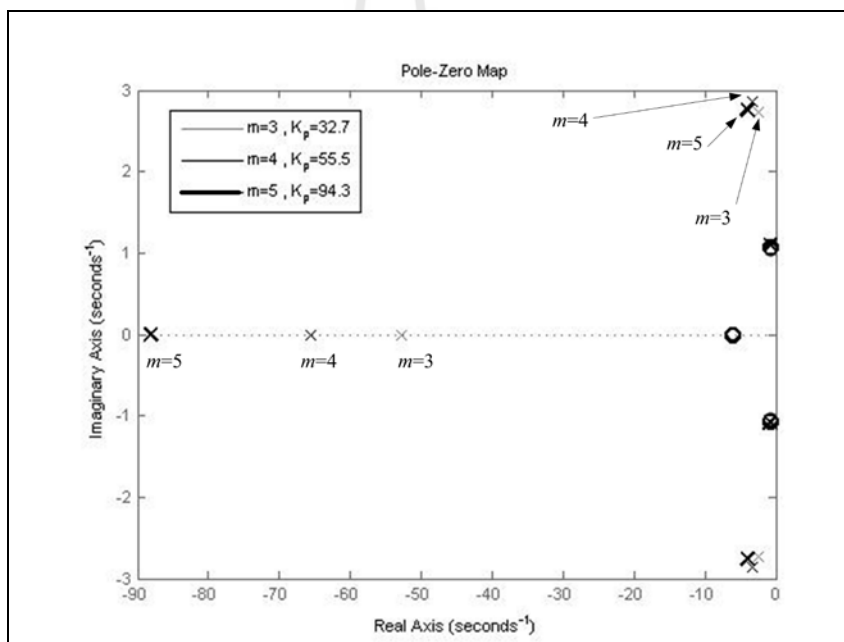
รูปที่ 3.63 แผนภาพโลกัสรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 4

จากรูปที่ 3.63 กำหนดให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนของระบบวงปิดมีระยะห่างจากแกนจินตภาพไปซ้ายมือของระนาบเอสเป็นจำนวนสามเท่า ($m = 3$) ของระยะห่างระหว่างแกนจินตภาพและคู่โพลเด่น จะได้ว่า $ma = 3 \times (-0.8000) = -2.4000$ นั่นคือระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนในตำแหน่ง $-2.4000 \pm j2.7265$ ซึ่งมีค่าเกน $K_p = 32.7$ เมื่อ $m = 4$ จะได้ว่า $ma = 4 \times (-0.8000) = -3.2000$ นั่นคือระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนในตำแหน่ง $-3.2000 \pm j2.8692$ ซึ่งมีค่าเกน $K_p = 55.5$ และเมื่อ $m = 5$ จะได้ว่า $ma = 5 \times (-0.8000) = -4.0000$ นั่นคือระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนในตำแหน่ง $-4.0000 \pm j2.7636$ ซึ่งมีค่าเกน $K_p = 94.3$ จึงแสดงการวิเคราะห์ผลการจำลองสถานการณ์เป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีแรก $K_p = 32.7$ กรณีที่สอง $K_p = 55.5$ และ

กรณีสุดท้าย $K_p = 94.3$ คำนวณค่าเกน K_I และ K_D จากสมการ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับจากการออกแบบมีข้อมูลดังแสดงต่อไปนี้

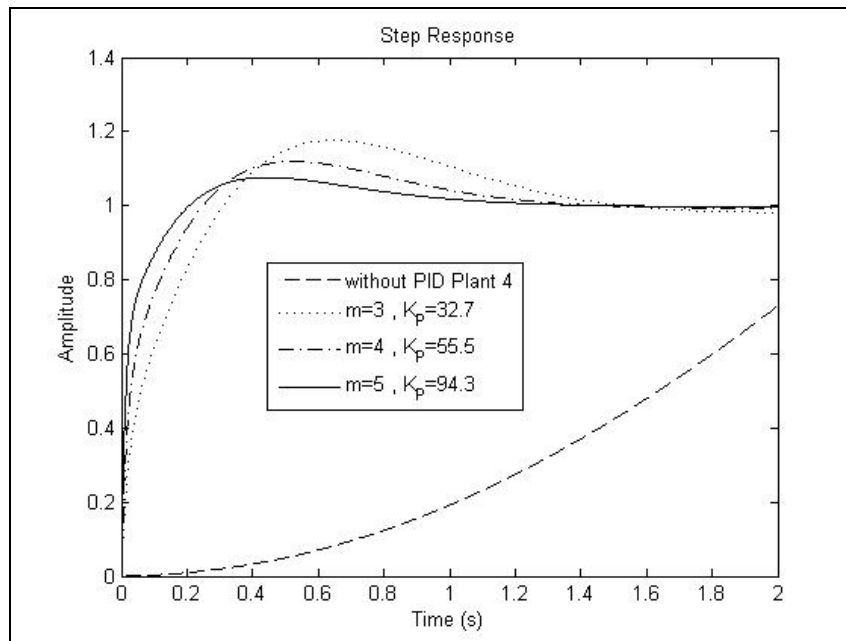
ตารางที่ 3.20 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 4)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุม และ $K_p = 32.7$	ซีโร : $-0.7699 \pm j1.0371$, -6 , -6 โพล : -52.8438 , $-2.3969 \pm j2.7265$, $-0.8000 \pm j1.0915$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุม และ $K_p = 55.5$	ซีโร : $-0.7820 \pm j1.0594$, -6 , -6 โพล : -65.4890 , $-3.1992 \pm j2.8692$, $-0.8000 \pm j1.0915$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุม และ $K_p = 94.3$	ซีโร : $-0.7893 \pm j1.0726$, -6 , -6 โพล : -88.1403 , $-3.9986 \pm j2.7636$, $-0.8000 \pm j1.0915$

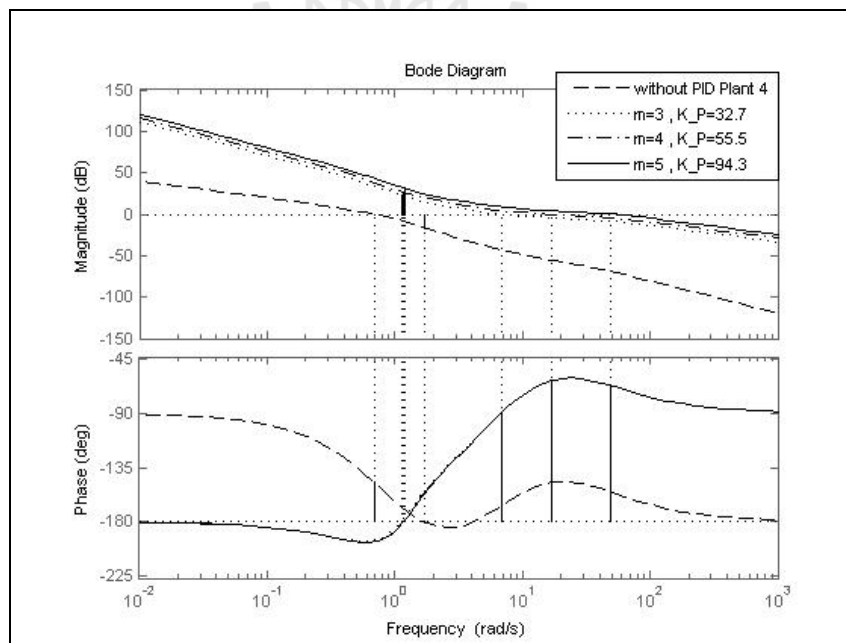


รูปที่ 3.64 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.64 และตารางที่ 3.20 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดในทุกกรณีมีคู่โพลเด่นตามที่ต้องการคือ $-0.8000 \pm j1.0915$ แต่ผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน เพราะคู่โพลเด่น $-0.4848 \pm j0.6031$ มีคู่ซีโรเชิงซ้อนอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งของคู่โพลเด่นมาก ทำให้เกิดการหักล้างอิทธิพลซึ่งกันและกันอย่างสมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์ ส่งผลให้สมรรถนะผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 3.65



รูปที่ 3.65 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5



รูปที่ 3.66 แผนภาพโบดของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลาเน็ตและระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.65 อธิบายได้ว่าระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่อยู่ภายในข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ เมื่อพิจารณา $m = 3$ และ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 32.7$ และ $K_p = 55.5$ ตามลำดับ ระบบวงปิดมีปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าข้อกำหนด ซึ่งระบบวงปิดให้สมรรถนะของผลตอบสนองมีช่วงเวลายาวขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่สั้นมาก ๆ เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในโดเมนความถี่ จะได้ว่าระบบที่มีตัวควบคุม GM มีค่าติดลบ เมื่อค่าเกน K_p เพิ่มขึ้น GM จะมีค่าลดลง แต่ PM มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงได้ในแผนภาพโบลด์รูปที่ 3.66 และสามารถสรุปสมรรถนะของผลตอบสนองได้ดังตารางที่ 3.21

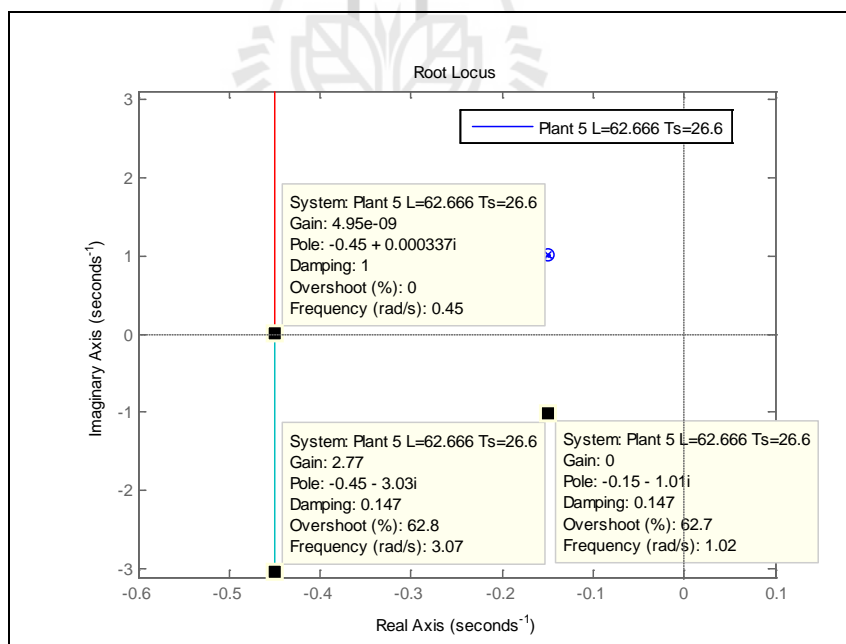
ตารางที่ 3.21 ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4)

	ค่าเกนตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	—	—	—	15.628	32.951	1.6901	0.6877
ระบบวงปิด $K_p = 32.7$	35.4282	21.2375	0.235	1.37	17.6	-22.5471	89.93	1.1326	6.7939
ระบบวงปิด $K_p = 55.5$	61.5253	35.4875	0.17	1.17	11.9	-26.5105	117.198	1.1705	16.8798
ระบบวงปิด $K_p = 94.3$	105.9361	59.7375	0.118	0.979	7.65	-30.7511	112.906	1.1929	48.7476

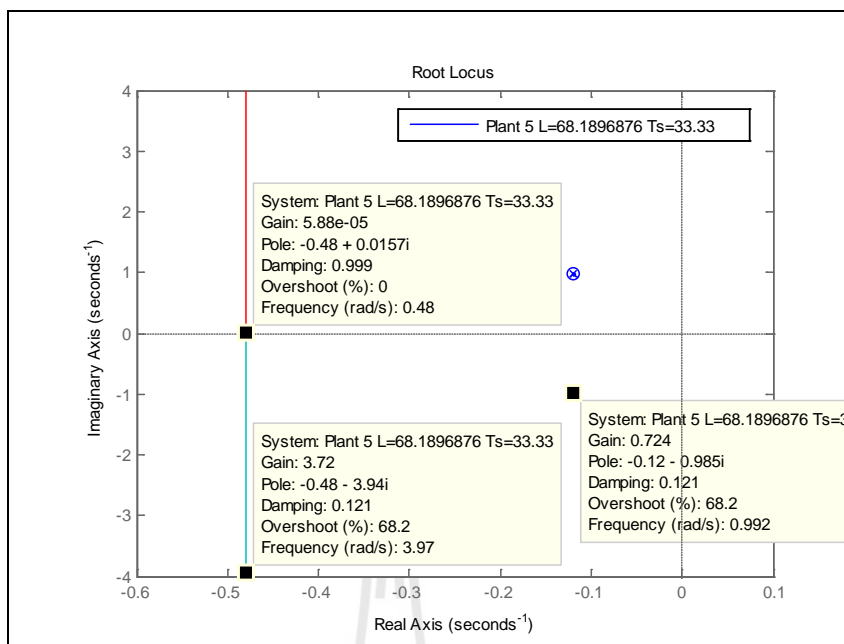
เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลาเน็ต 4 และตัวควบคุมพีไอดี การใช้แนวทางที่ 3 คำนวณค่าเกนของตัวควบคุม ระบบวงปิดได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน ที่มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่นเป็นจำนวน m เท่า ทำให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่อยู่ภายในข้อกำหนด และซีโรของระบบวงปิดคือซีโรของพลาเน็ต ทำให้ผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าข้อกำหนด เมื่อ m มีค่าเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะมีช่วงเวลายาวขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่สั้นลง และปริมาณการพุ่งเกินลดลง ทำให้สมรรถนะของผลตอบสนองมีแนวโน้มอยู่ในข้อกำหนดมากขึ้น เนื่องจากแผนภาพโบลด์รูปมีลักษณะทางเดินที่แคบและอยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมาก ทำให้ตัวควบคุมมีค่าเกนอยู่อย่างจำกัด ถ้าเลือกค่าเกนตัวควบคุมไม่เหมาะสม ระบบวงปิดอาจจะมีโพลอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส และระบบวงปิดอาจจะมีเสถียรภาพได้ง่าย

พลาเน็ต 5 ต้องพิจารณาแผนภาพโบลด์รูป (ทางเดินราก) ที่แสดงในรูปที่ ค.1 ถึง รูปที่ ค.16 ในภาคผนวก ค. ซึ่งอธิบายได้ว่าการใช้แนวทางที่ 3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่กำหนดที่ชัดเจน พลาเน็ต 5 คืองานที่มีต้นทุนทางด้านเวลา เพราะเมื่อค่าเกน K_p มีการเปลี่ยนแปลง โพลอื่น ๆ ที่ไม่

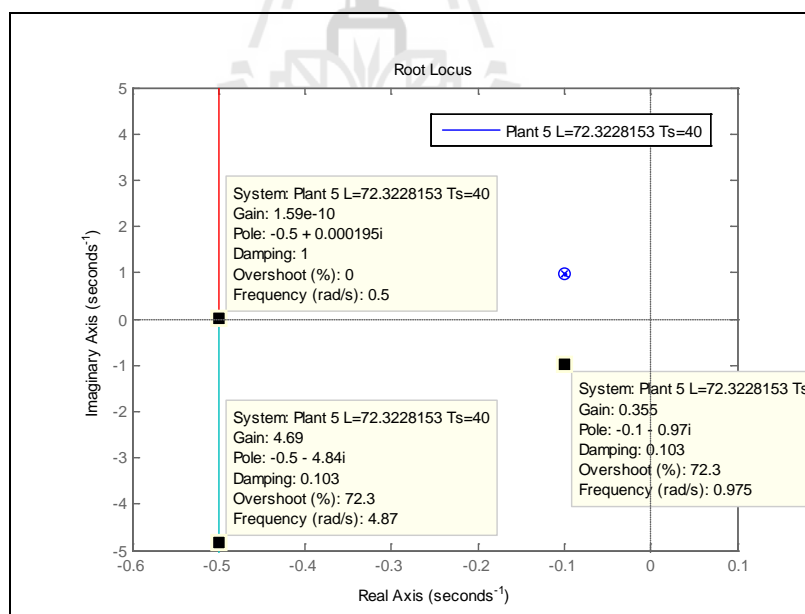
เป็นคู่โพลเด่นจะมีระยะห่างจากแกนจินตภาพมากกว่าระยะห่างจากแกนจินตภาพของคู่โพลเด่นไปทางด้านซ้ายของระนาบเอสเป็นจำนวน m เท่า ถ้าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าจะทำให้โพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นมีระยะห่างจากแกนจินตภาพไปทางด้านซ้ายของระนาบเอสมากขึ้น และถ้าข้อกำหนดมีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า จะทำให้โพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นและเป็นจุดเริ่มต้นของทางเดินราก มีตำแหน่งใกล้กับแกนจริงมากกว่า และคู่โพลเด่นจะมีระยะห่างจากแกนจริงมากขึ้นด้วย นั่นคือถ้าต้องการให้โพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นมีระยะห่างจากแกนจินตภาพไปทางด้านซ้ายของระนาบเอสมากกว่า ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบต้องมีช่วงเวลาเข้าที่นานขึ้น ดังนั้นข้อกำหนดที่เหมาะสมในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเพื่อชดเชยพลานต์ 5 เมื่อ $m = 3$ คือ $P.O. \leq 62.666076\%$ และ $t_s \leq 26.6$ s จึงระบุเป็นคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.1504 \pm j1.0108$ เมื่อ $m = 4$ ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ คือ $P.O. \leq 68.1896876\%$ และ $t_s \leq 33.33$ s จึงระบุเป็นคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.1200 \pm j0.9847$ และเมื่อ $m = 5$ ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ คือ $P.O. \leq 72.3228153\%$ และ $t_s \leq 40$ s ซึ่งสามารถระบุเป็นคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.1000 \pm j0.9695$ ซึ่งวาดแผนภาพโพล์สกรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีของพลานต์ 5 เมื่อ $m = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ จากสมการ (2.27) ได้ดังในรูปที่ 3.67 ถึงรูปที่ 3.69



รูปที่ 3.67 แผนภาพโพล์สกรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 5 เมื่อ $m = 3$



รูปที่ 3.68 แผนภาพโถกัสรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 5 เมื่อ $m = 4$



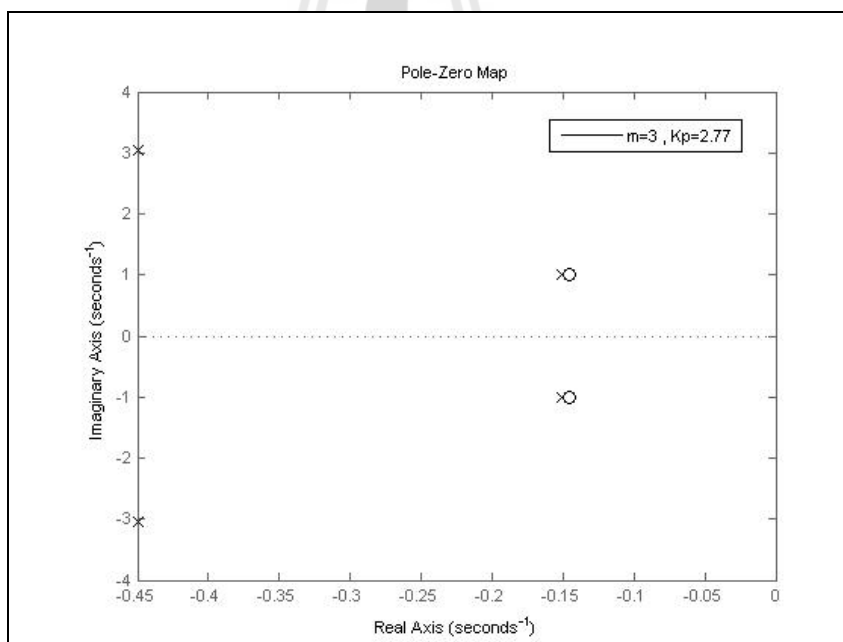
รูปที่ 3.69 แผนภาพโถกัสรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมของพลานต์ 5 เมื่อ $m = 5$

จากรูปที่ 3.67 ถึงรูปที่ 3.69 เมื่อกำหนดให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนของระบบวงปิดมีระยะห่างจากแกนจินตภาพไปซ้ายมือของระนาบเอสเป็นจำนวนสามเท่า ($m = 3$) ของระยะห่างระหว่างแกนจินตภาพและคู่โพลเด่น จะได้ว่า กำหนดให้ $m = 3$ จะได้ $ma = 3 \times 0.1504 = 0.4511$ นั่นคือ

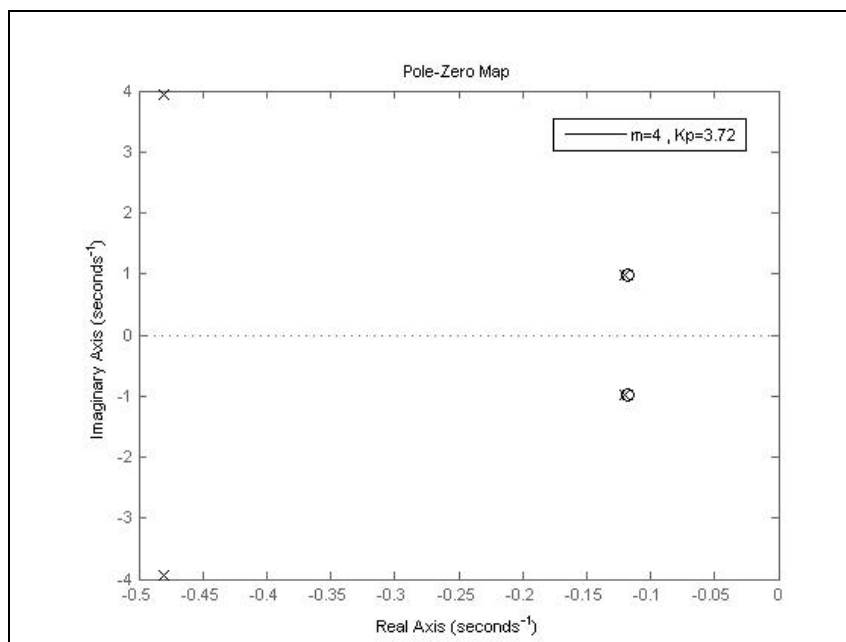
ค่าเกน K_p มีค่าเท่ากับ 2.7700 เมื่อกำหนดให้ $m = 4$ จะได้ $ma = 4 \times 0.1200 = 0.4800$ นั่นคือค่าเกน K_p มีค่าเท่ากับ 3.72 และเมื่อกำหนดให้ $m = 5$ จะได้ $ma = 5 \times 0.1000 = 0.5000$ นั่นคือค่าเกน K_p มีค่าเท่ากับ 4.69 ใช้สมการที่ (2.28) และ (2.29) คำนวณหาค่าเกน K_I และ K_D ในแต่ละกรณีตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.22 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 5)

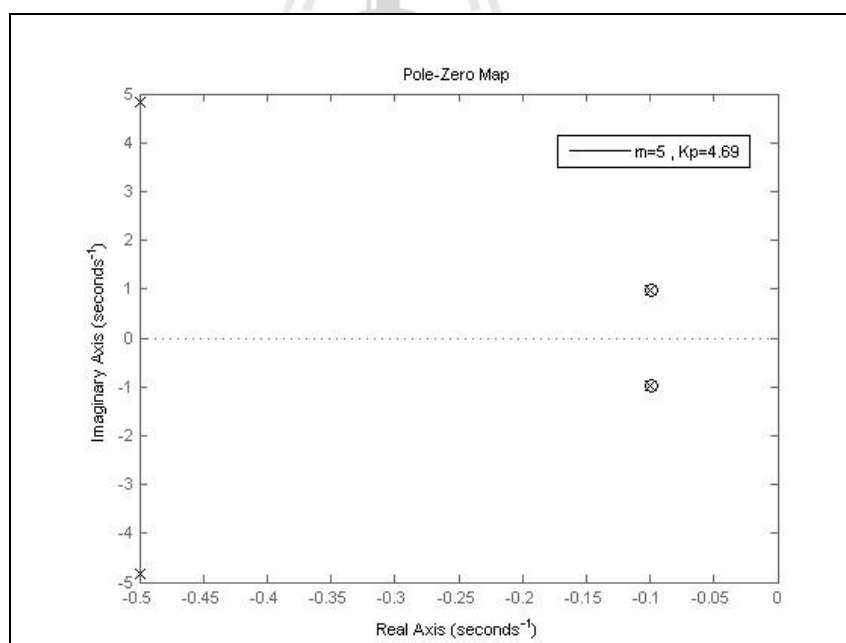
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 2.7700$	ซีโร : $-0.1415 \pm j1.0053$ โพล : $-0.4496 \pm j3.0348$, $-0.1504 \pm j1.0108$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 3.72$	ซีโร : $-0.1181 \pm j0.9845$ โพล : $-0.4800 \pm j3.9368$, $-0.1200 \pm j0.9847$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 4.69$	ซีโร : $-0.0992 \pm j0.9707$ โพล : $-0.5000 \pm j4.8425$, $-0.1000 \pm j0.9695$



รูปที่ 3.70 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 3$ ในกรณีที่ $K_p = 2.7700$



รูปที่ 3.71 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 4$ ในกรณีที่ $K_p = 3.72$

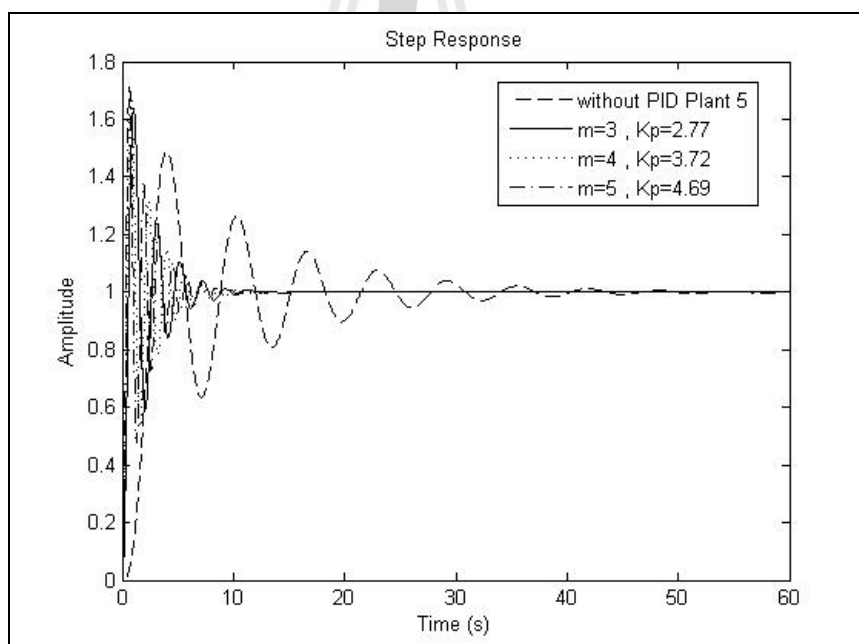


รูปที่ 3.72 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด เมื่อ $m = 5$ ในกรณีที่ $K_p = 4.69$

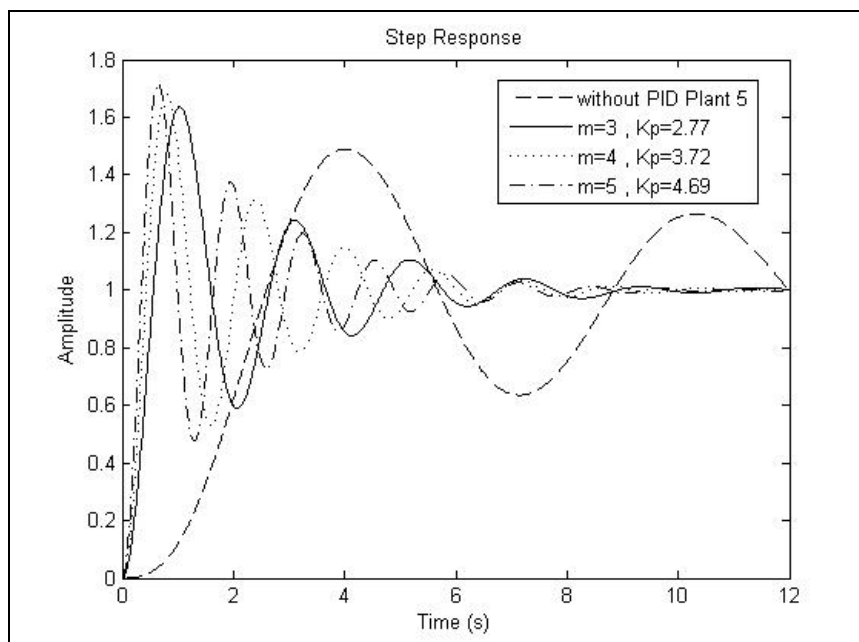
ระบบวงปิดมีโพลและซีโรที่แสดงได้ในรูปที่ 3.70 ถึงรูปที่ 3.72 และในตารางที่ 3.22 คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่นประมาณ 3, 4 และ 5 เท่า ตามลำดับ ผลตอบสนองจะได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน และคู่ซีโรสังยุค

เชิงซ้อน แต่คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่าคู่โพลเด่นและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน เพราะคู่โพลเด่นและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนมีตำแหน่งใกล้กันมากในระนาบเอส ทำให้คู่โพลเด่นและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนมีอิทธิพลหักล้างซึ่งกันและกันเกือบสมบูรณ์ คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีอิทธิพลที่ทำให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่และปริมาณการพุ่งเกินอยู่ในข้อกำหนด เมื่อค่าเกน K_p มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีมุมมากขึ้น เป็นเหตุให้ผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินเพิ่มขึ้น

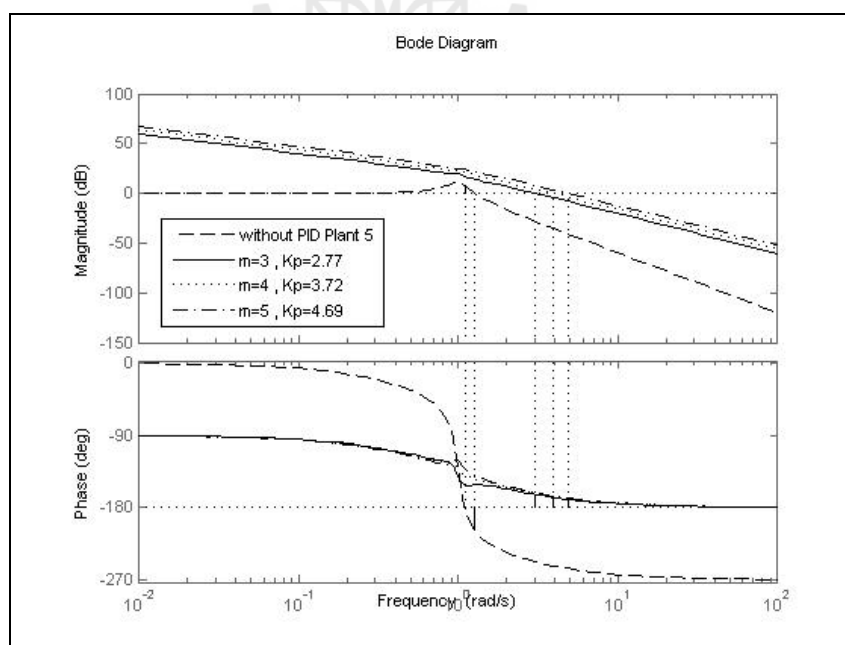
ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.73 และรูปที่ 3.74 อธิบายได้ว่า พลานต์ให้ผลตอบสนองที่มีปริมาณการพุ่งเกินสูง ($P.O. = 49\%$) และมีช่วงเวลาเข้าที่นานมาก ($t_s = 35.9$ วินาที) แต่พลานต์มีเสถียรภาพ เนื่องจากพลานต์มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.1 \pm j0.995$ ที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมาก ทำให้พลานต์มีผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่นานมาก ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะอยู่ในข้อกำหนด เมื่อพิจารณาค่าเกน K_p ที่เพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะมีช่วงเวลารั้งขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่า แต่มีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า



รูปที่ 3.73 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5



รูปที่ 3.74 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (ขยาย) ของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5



รูปที่ 3.75 แผนภาพโบดของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์ และตัวควบคุม (with PID) กรณี $m = 3, 4$ และ 5

แผนภาพโพลที่แสดงในรูปที่ 3.75 อธิบายได้ว่า ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม ระบบมี $PM = -27.7^\circ$ และ $GM = -7.13$ dB นั่นคือระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ตและตัวควบคุมแบบสัดส่วน $K_p = 1$ ขาดเสถียรภาพ ในกรณีที่มีตัวควบคุม ระบบมี $PM = 16.4508^\circ$, $PM = 13.7875^\circ$ และ $PM = 11.7537^\circ$ ตามลำดับ สรุปสมรรถนะของผลตอบสนองได้ดังตารางที่ 3.23

ตารางที่ 3.23 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	–	–	1.5	35.9	49	-7.13	-27.7	1.0955	1.25
ระบบวงปิด $K_p = 2.7700$	9.8306	9.5273	0.379	8.58	63.7	∞	16.4508	∞	3.0054
ระบบวงปิด $K_p = 3.72$	15.4786	15.7433	0.289	8.12	68.1	∞	13.7875	∞	3.9088
ระบบวงปิด $K_p = 4.69$	22.5150	23.6500	0.232	7.86	71.9	∞	11.7537	∞	4.8172

เมื่อพิจารณาแผนภาพโพลกราฟ จะได้ว่าค่าเกณฑ์ K_p มากที่สุดคือค่าอนันต์ ถ้าเลือกค่าเกณฑ์ K_p ที่มีค่ามากเกินไป ผลตอบสนองที่ได้จะมีปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าข้อกำหนด ดังนั้นในกรณีที่ $m = 3$ ค่าเกณฑ์ K_p สูงสุดคือค่าเกณฑ์ K_p ที่ทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจินตภาพเท่ากับสามเท่าของขนาดส่วนจินตภาพของคู่โพลเด่น เป็นผลให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีมุมเท่ากับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย และในกรณีที่ $m = 4$ และ 5 ค่าเกณฑ์ K_p สูงสุดคือค่าเกณฑ์ K_p ที่ทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจินตภาพเท่ากับสี่เท่า และห้าเท่าของขนาดส่วนจินตภาพของคู่โพลเด่นตามลำดับ

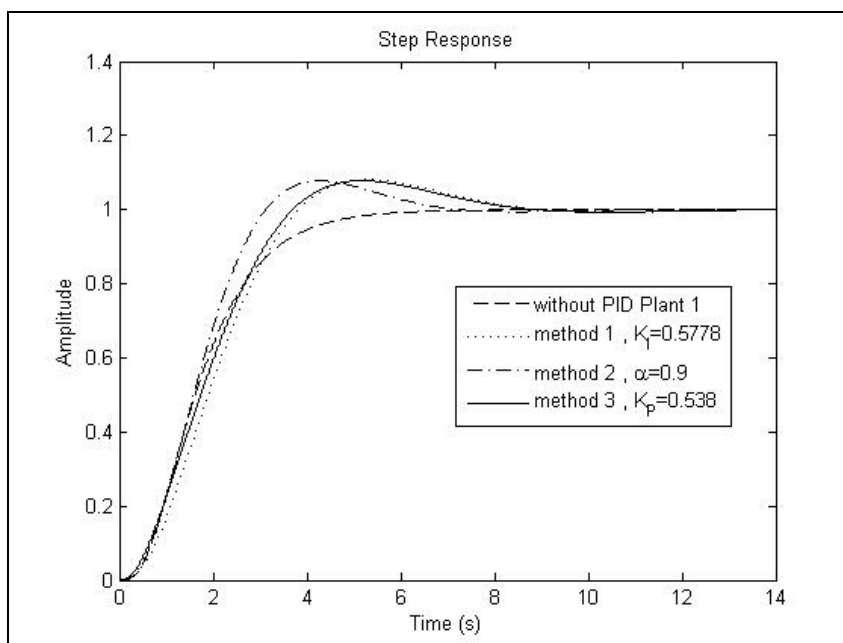
3.2.4 เปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมทั้งสาม

แนวทาง

หัวข้อนี้เป็นการนำผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสามแนวทางที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต ในกรณีที่ระบบวงปิดให้สมรรถนะของผลตอบสนองดีที่สุดภายใต้ข้อกำหนดที่พิจารณาในหัวข้อ 3.2.1 ถึงหัวข้อ 3.2.3 ที่ผ่านมา เพื่อ

เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการออกแบบในแต่ละแนวทาง โดยมีผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 5 พลานต์ดังนี้

พลานต์ 1



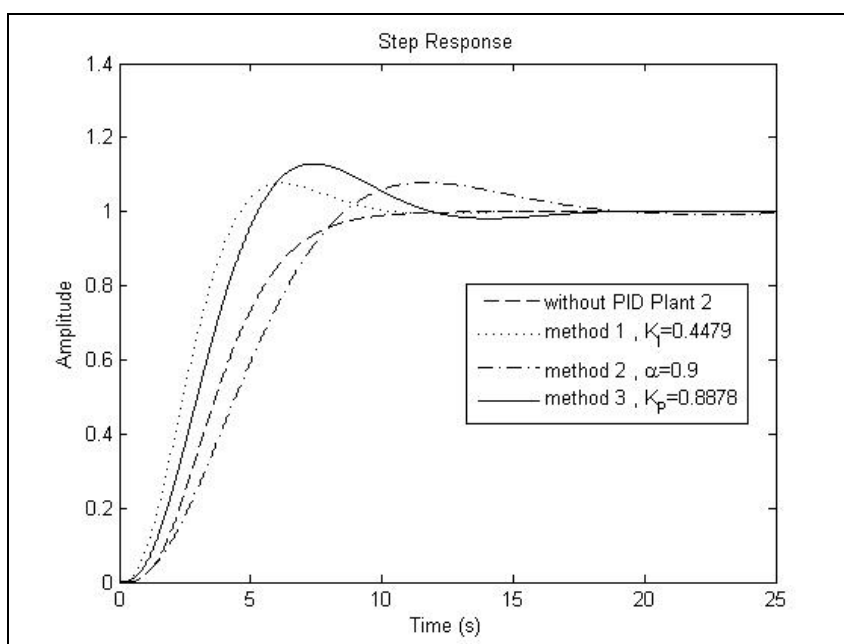
รูปที่ 3.76 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง

ตารางที่ 3.24 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 1)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_p	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลานต์	—	—	—	2.7	5.02	—	16.5873	∞	2.8283	0
แนวทางที่ 1	0.4579	0.5778	0.0669	2.46	7.85	8.16	22.5586	60	2.7006	0.5174
แนวทางที่ 2	0.6791	0.6840	0.0610	1.96	6.28	7.79	18.0587	60	2.5452	0.6255
แนวทางที่ 3	0.5380	0.6273	0.1495	2.46	7.7	7.83	29.5666	61.1615	4.8790	0.5461

สมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.76 และตารางที่ 3.24 อาจสังเกตได้ว่า ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่สองให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะดีที่สุด ในขณะที่แนวทางที่สามให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ดีที่สุด

พลาเน็ต 2



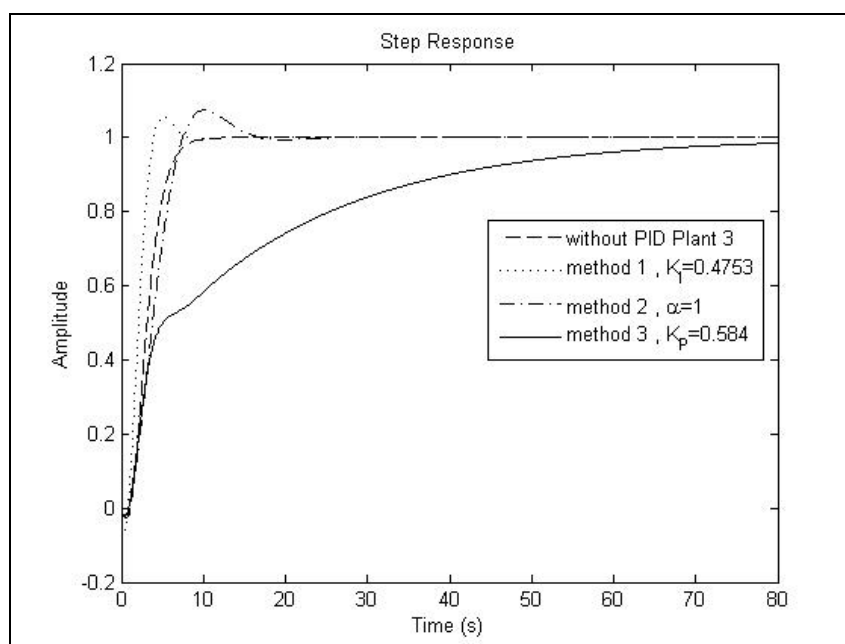
รูปที่ 3.77 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต 2 (without PID Plant 2) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง

ตารางที่ 3.25 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 2)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	—	4.94	9.08	—	12.0412	∞	1.0000	0
แนวทางที่ 1	1.2000	0.4479	0.9506	2.85	8.99	7.79	15.5677	60	1.4518	0.4170
แนวทางที่ 2	0.4005	0.2451	0.2076	5.41	16.9	7.88	18.0620	60	0.9000	0.2273
แนวทางที่ 3	0.8878	0.3944	0.4998	3.3	11.1	13	14.9849	54.9345	1.1240	0.3598

สมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.77 และตารางที่ 3.25 อาจสังเกตได้ว่า ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่หนึ่งให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะดีที่สุด ในขณะที่แนวทางที่สองให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ดีที่สุด

พลาเน็ต 3



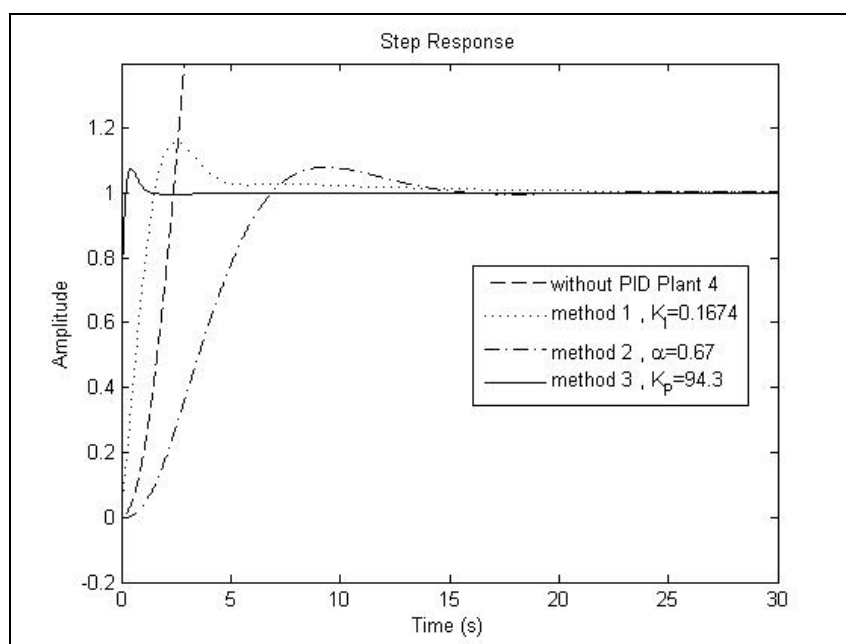
รูปที่ 3.78 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง

ตารางที่ 3.26 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 3)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะใน โดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	—	4.1	7.91	—	10.1031	∞	1.1832	0
แนวทางที่ 1	1.1448	0.4753	0.6987	2.21	6.88	5.59	11.9465	60	1.6843	0.4770
แนวทางที่ 2	0.4000	0.2804	0.2003	4.63	14.6	7.4	18.0625	60	1.1833	0.2616
แนวทางที่ 3	0.5840	0.0672	0.2081	38.5	73.6	—	17.0689	109.3468	1.4775	0.0801

สมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.78 และตารางที่ 3.26 อาจสังเกตได้ว่า ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่หนึ่งให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะดีที่สุด ในขณะที่แนวทางที่สามให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ดีที่สุด

พลาเน็ต 4



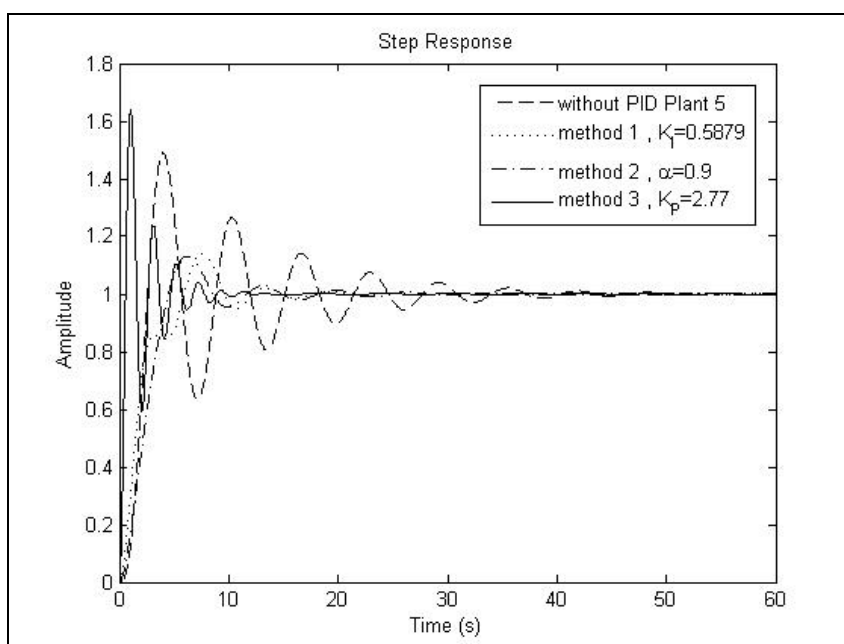
รูปที่ 3.79 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง

ตารางที่ 3.27 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 4)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	—	—	—	—	15.6280	32.9509	1.6901	0.6877
แนวทางที่ 1	1.8940	0.1674	1.9838	1.19	11.3	15.7	∞	60	0	1.2341
แนวทางที่ 2	0.3047	0.0003	-0.0593	4.32	13.8	8	18.0628	60	1.1324	0.2832
แนวทางที่ 3	94.3	105.9361	59.7375	0.118	0.979	7.65	-30.7511	112.9064	1.1929	48.7476

สมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.79 และตารางที่ 3.27 อาจสังเกตได้ว่า ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่สามให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะดีที่สุด ในขณะที่แนวทางที่สองให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ดีที่สุด

พลาเน็ต 5



รูปที่ 3.80 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลาเน็ต 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทาง

ตารางที่ 3.28 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาเน็ต 5)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม			สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่						
	K_P	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)
พลาเน็ต	—	—	—	1.5	35.9	49	-7.1306	-27.7190	1.0955	1.2534
แนวทางที่ 1	0.2104	0.5879	0.8619	4.69	13.8	14.2	∞	60	∞	1.1077
แนวทางที่ 2	0.0208	0.5060	0.4920	3.16	16.7	13.1	13.3165	60	0.9559	0.4601
แนวทางที่ 3	2.77	9.8306	9.5273	0.379	8.58	63.7	∞	16.4508	∞	3.0054

สมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 3.80 และตารางที่ 3.28 อาจสังเกตได้ว่า ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่สองให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ที่มีสมรรถนะดีที่สุด

3.3 สรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต ด้วยวิธีการออกแบบทั้งสามแนวทาง แนวทางแรกคือ วิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นและส่วนเฟสที่ใช้ข้อกำหนดในโดเมนเวลาคำนวณหาตำแหน่งของคู่โพลเด่น โดยอาศัยการใช้ข้อกำหนดในโดเมนความถี่ (ส่วนเฟส) และคู่โพลเด่นคำนวณหาจุดตัดของกราฟและคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยากพลาเน็ตเดียวกันและข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบเป็นชุดเดียวกัน ถ้าค่าเกน K_f ที่ได้จากจุดตัดกราฟมีมากกว่าหนึ่งค่าและมีความสอดคล้องกับเงื่อนไข ระบบวงปิดจะมีผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่ใส่ส่วนเฟสตรงกับข้อกำหนด และมีคู่โพลเด่นในตำแหน่งที่ต้องการบนระนาบเอส แต่จะมีซีโรและโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบวงปิดมีสมรรถนะของผลตอบสนองที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ข้อกำหนดในโดเมนเวลามีผลกระทบต่อสมรรถนะและพลวัตของผลตอบสนอง กล่าวคือ ถ้าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบต้องการให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นเกินไปและมีปริมาณการพุ่งเกินต่ำมาก (ข้อกำหนดที่เข้มงวด) ค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการคำนวณอาจจะทำให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพหรือมีผลตอบสนองที่แสดงสมรรถนะมากกว่าข้อกำหนด ถ้าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบต้องการให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่นานมากขึ้นและมีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า ระบบวงปิดอาจจะให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะตามความต้องการ (ไม่เกินจากข้อกำหนด) หรือมากกว่าข้อกำหนด และค่าเกน K_f แต่ละค่าที่มีความสอดคล้องกับเงื่อนไขอาจจะเป็นค่าที่เหมาะสมหรือไม่เหมาะสม ดังนั้นผู้ออกแบบจึงควรศึกษาระบบอย่างถี่ถ้วน เพราะแต่ละระบบต้องการเงื่อนไขข้อกำหนดที่เหมาะสมแตกต่างกัน

แนวทางที่สองคือ การใช้วิธีส่วนเฟสอัตราขยายและส่วนเฟสที่แม่นยำ ผลการจำลองสถานการณ์มีค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีที่คำนวณได้จากข้อกำหนดในโดเมนความถี่ที่ประกอบด้วยส่วนเฟสอัตราขยายและส่วนเฟสที่ต้องการ ถ้าข้อกำหนด GM , PM และ α สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการ (2.22) ระบบวงเปิดที่มีพลาเน็ตและตัวควบคุมพีไอดีจะให้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่มี GM และ PM ตรงกับข้อกำหนด ถ้า α มีค่ามากกว่าค่า α วิกฤต ระบบวงปิดจะขาดเสถียรภาพ และถ้า α มีค่ามากกว่าค่าหนึ่ง ผลตอบสนองในโดเมนความถี่อาจจะ GM น้อยกว่าข้อกำหนด เมื่อพิจารณาการใช้แนวทางที่ 2 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตเดียวกัน ถ้าข้อกำหนดในโดเมนความถี่มีความแตกต่างกัน ค่า α วิกฤตจะมีค่าแตกต่างกัน ถ้าระบุข้อกำหนดที่มี GM และ PM ค่ามาก ระบบวงปิดอาจจะให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลารื่นและช่วงเวลารื่นเข้าที่นานขึ้น ซึ่งอาจไม่สามารถทำนายสมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาได้อย่างแม่นยำ เพราะหนังสือ Modern Control Engineering ของ Katsuhiko Ogata กล่าวไว้ว่า “ระบบอันดับสองที่ไม่เป็นระบบมาตรฐานและระบบอันดับสูงกว่า

สอง แพบจะไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองในโดเมนเวลา (ผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่) และผลตอบสนองในโดเมนความถี่ หรือมีความสัมพันธ์กันอย่างไม่ชัดเจน เพราะโพลและซีโรที่เพิ่มเติมในระบบจะเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ดังกล่าว (ความสัมพันธ์นี้มีอยู่จริงในระบบอันดับสองมาตรฐานเท่านั้น เพราะระบบอันดับสองมาตรฐานคือระบบที่ไม่มีซีโรและมีโพลสองตัวเท่านั้น ทำให้ส่วนเพื่อเฟสมีความสัมพันธ์กับปริมาณการพุ่งเกินอย่างชัดเจน)”

แนวทางที่สามใช้ข้อกำหนดค่านวมหาอัตราส่วนการหน่วง (ζ) และความถี่ธรรมชาติ (ω_n) ทำให้ระบุคู่โพลเด่นเชิงซ้อนของระบบวงปิดได้ ต่อมาใช้คู่โพลเด่นดังกล่าวหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกน K_p , K_I และ K_D ของตัวควบคุม ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบมีผลกระทบต่อสมรรถนะของผลตอบสนอง การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยากแต่ละพลาเน็ตต้องการข้อกำหนดที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของระบบวงปิดในกรณีที่ทำให้สมรรถนะดีที่สุด เพื่อชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต สรุปได้ว่าในแต่ละแนวทางและข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบมีความเหมาะสมชดเชยพลาเน็ตในรูปแบบแตกต่างกัน ภายใต้ข้อกำหนดที่พิจารณาอาจสังเกตได้ว่าแนวทางแรกเหมาะสมใช้ชดเชยพลาเน็ต 2 และ 3 แนวทางที่สองเหมาะสมใช้ชดเชยพลาเน็ต 1 และ 5 และแนวทางที่สามเหมาะสมใช้ชดเชยพลาเน็ต 4 มากกว่า เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบจะได้ว่า แนวทางแรกอาจมีค่าเกน K_I ให้เลือกมากกว่าหนึ่งค่าแต่ทุกค่าล้วนให้ค่าส่วนเพื่อเฟสที่แม่นยำ แนวทางที่สองสามารถให้ค่าส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และแนวทางสามอาจกล่าวได้ว่า ให้ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามที่คาดหวังมากที่สุด กล่าวคือระบบวงปิดให้สมรรถนะของผลตอบสนองเกินกว่าข้อกำหนด เนื่องจากแนวทางที่สามใช้แผนภาพโลกสกรากเพื่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งกำหนดให้โพลใด ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นในระบบวงปิดมีระยะห่างจากแกนจินตภาพไปทางซ้ายมือของระนาบเอสมากกว่าระยะห่างระหว่างคู่โพลเด่นและแกนจินตภาพไม่น้อยกว่า m เท่า ซึ่งในบางครั้งผู้ออกแบบอาจประสบปัญหาไม่สามารถกำหนดให้ $m \geq 3$ ได้ ทำให้ผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากโพลอื่นใด ๆ ที่ไม่ใช่คู่โพลเด่นมากบ้างน้อยบ้าง ส่งผลให้สมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงปิดเกินจากข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงคิดพัฒนาแนวทางที่สามให้สามารถชดเชยพลาเน็ตที่มีรูปแบบที่หลากหลายได้มากขึ้นจากการนำอินทิเกรตกำลังสองของความผิดพลาดของผลตอบสนอง และมุมของคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน (ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่น) ที่เท่ากับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแนวทางที่สาม เพื่อให้เกิดความแน่นอนในการเลือกค่าเกนของตัวควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะได้นำเสนอในบทต่อไป

บทที่ 4

แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล โดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม

4.1 บทนำ

แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม เป็นการออกแบบในทางโดเมนเวลา วิธีการนี้ใช้ข้อกำหนดสมรรถนะในโดเมนเวลาในการวางตำแหน่งโพลเด่น แนวทางการออกแบบวิธีนี้ได้มาจากการพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ หรือแนวทางที่สาม (Wang และคณะ, 2009) ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 ที่ผ่านมา เนื่องด้วยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีดังกล่าว ไม่มีหลักการที่แน่นอนในการเลือกค่าเกน K_p ที่เหมาะสม เป็นเหตุให้ผู้วิจัยสนใจการหาค่าเกน K_p ที่เหมาะสม และเมื่อพิจารณาแนวทางที่สาม พบว่าให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวม (integral of squared error : ISE) ที่มีค่าสูงพอสมควร ผู้วิจัยจึงเลือกพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม กล่าวคือผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบต้องมีค่า ISE น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ที่ทำให้ผลตอบสนองยังคงมีสมรรถนะไม่มากกว่าข้อกำหนดหรือคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีมุมเท่ากับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น ทำให้เกิดความแน่นอนในการเลือกค่าเกน K_p ที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม เพื่อให้ได้วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่สามารถนำไปใช้กับพลาเน็ตอันดับสูงและมีความซับซ้อนได้ด้วย ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสมและอธิบายตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้วิธีนี้เพื่อชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก (พลาเน็ต 1)

4.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลโดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (แนวทางที่ 4) มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าอัตราส่วนการหน่วง (ζ) และความถี่ธรรมชาติ (ω_n) และใช้สมการ (2.16) คำนวณหาคู่โพลเด่น $p_{1,2} = -a \pm jb$ ที่มีตำแหน่งอยู่ในด้านซ้ายมือของระนาบเอส คู่โพลเด่นนี้มีมุมการหน่วง $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$

ขั้นตอนที่ 2 ใช้สมการ (2.27) วาดแผนภาพโพลัสราก

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้ $K_{P,\min} > \max\{2aX_1, -2aX_2\}$ คือ ค่าเริ่มต้นของค่าเกน K_P

$$\text{โดยที่ } X_1 = \frac{1}{2b} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right] + \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right],$$

$$X_2 = \frac{1}{2b} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right] - \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G_p(p_1)} \right]$$

และค่าเกน K_P ที่ทำให้โพลัสของรากตัดกับแกนจินตภาพ คือ ค่าสิ้นสุด หรือ $K_{P,\max}$ (เมื่อ K_P มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $K_{P,\min} \leq K_P \leq K_{P,\max}$ ระบบควบคุมวงปิดต้องมีโพลทุกตัวอยู่ในด้านซ้ายมือของระนาบเอส นั่นคือระบบวงปิดต้องมีเสถียรภาพ) และกำหนดให้ $K_P = K_{P,\min}$

ขั้นตอนที่ 4 ใช้สมการ (2.28) และ (2.29) คำนวณหาค่าเกน K_I และ K_D ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบว่าผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยมีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) = 0$ หรือไม่ โดยที่ $E(s) = \mathcal{L}\{e(t)\}$ และ $R(s) = (1/s)$ (สัญญาณอ้างอิงหรือ setpoint คือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย) ถ้า $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ ให้ดำเนินการต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบว่าโพลของระบบวงปิดทุกตัวมีตำแหน่งอยู่ในด้านซ้ายมือของระนาบเอสหรือไม่ เพราะถ้ามีโพลตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไปอยู่ในด้านขวามือของระนาบเอสหรืออยู่บนแกนจินตภาพ แสดงว่าระบบควบคุมวงปิดไม่มีเสถียรภาพ นั่นคือ $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \rightarrow \infty$ เมื่อระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพ (stable) ให้ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 7 ใช้สมการ (4.1) และ (4.2) คำนวณหาค่า $E(s)$ และ $E(-s)$

$$E(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s) + A_1(s)e^{-Ls}} \quad (4.1)$$

$$E(-s) = \frac{B_0(-s)}{A_0(-s) + A_1(-s)e^{Ls}} \quad (4.2)$$

โดยที่ $B_0(s) = 2aD(s)$, $A_0(s) = 2asD(s)$ และ

$$A_1(s) = 2a(K_D s^2 + K_P s + K_I)N(s)$$

$$A_1(s) = [(K_P + 2aX_2)s^2 + 2aK_P s + (a^2 + b^2)(K_P - 2aX_1)]N(s)$$

ขั้นตอนที่ 8 กำหนดค่าความผิดพลาดกำลังสองรวม (ISE) โดยใช้สูตรดัชนีสมรรถนะดังต่อไปนี้

$$J_0 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (4.3)$$

$$J_0 = -\sum_{i=1}^k \text{Res}[E(s) \cdot E(-s) ; p_i] \quad (4.4)$$

โดยที่ k คือจำนวนโพลของ $E(s) \cdot E(-s)$ ที่อยู่ทางด้านขวามือของระนาบเอส ถ้าโพล p_i คือโพลที่ไม่ใช่โพลซ้ำ จะได้ว่า

$$\text{Res}[E(s) \cdot E(-s) ; p_i] = \lim_{s \rightarrow p_i} (s - p_i) \cdot E(s) \cdot E(-s) \quad (4.5)$$

แต่ถ้าโพล p_i คือโพลที่ซ้ำกัน r ตัว จะได้ว่า

$$\text{Res}[E(s) \cdot E(-s) ; p_i] = \frac{1}{(r-1)!} \cdot \lim_{s \rightarrow p_i} \frac{d^{r-1} [(s - p_i)^r \cdot E(s) \cdot E(-s)]}{ds^{r-1}} \quad (4.6)$$

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดผลบวกเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ ผลบวกเรซิดิวที่ได้ คือ ความผิดพลาดกำลังสองรวม (ผลบวกเรซิดิวนี้จะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการอินทิเกรต e^2 ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) จนถึงเวลานอนต์ ($t \rightarrow \infty$) เพราะการอินทิเกรตดังกล่าวไม่สามารถทำได้โดยตรง) (Hwang and Hsiao, 2002)

ขั้นตอนที่ 10 ใช้ระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี หรือระเบียบวิธีการค้นหากำลังสามในการเพิ่มค่าเกน K_P หรือลดค่าเกน K_P และดำเนินการซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4 ถึง 9 เพื่อค้นหาค่าเกน K_P ที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมมีค่าน้อยที่สุด ($J_{0,\min}$) (minimum ISE)

ขั้นตอนที่ 11 ตรวจสอบว่าระบบควบคุมวงปิดมีผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยที่ทำให้เกิดปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่มากกว่าข้อกำหนดหรือไม่ ถ้าปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับข้อกำหนด นั่นคือค่าเกน K_p , K_I และ K_D ที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 คือ ค่าที่เหมาะสมมากที่สุด สามารถให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดเป็นไปตามข้อกำหนดและได้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด ($J_{0,\min}$) (minimum ISE)

ขั้นตอนที่ 12 แต่ถ้าผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่มากกว่าข้อกำหนด จะต้องเลือกค่าเกน K_p , K_I และ K_D ค่าอื่นที่มีความเหมาะสมรองลงมา ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกค่าเกน K_p ที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $p_{3,4} = -a' \pm jb'$ ที่ให้มุม $\theta' = \tan^{-1}\left(\frac{b'}{a'}\right)$ เท่ากับหรือใกล้เคียงกับมุมการหน่วง $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$ ของคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ ในขั้นตอนที่ 1 เพราะต้องการให้ผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่ไม่มากกว่าข้อกำหนด (ตามข้อกำหนดที่ใช้แบบเดิม) และเมื่อ $\theta' \approx \theta$ จะประมาณได้ว่าอัตราส่วนการหน่วง (ζ) ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม

ขั้นตอนที่ 13 ใช้ระเบียบวิธีการค้นหาของพีโบนาสซี หรือระเบียบวิธีการค้นหาลำดับสามในการเพิ่มค่าเกน K_p หรือลดค่าเกน K_p และใช้สมการ (2.28) และ (2.29) คำนวณหาค่าเกน K_I และ K_D จากนั้นหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด ต่อมาคำนวณหาโพลของระบบวงปิด และดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 12 ถ้ามุม θ' มีค่าแตกต่างจากมุม θ ต้องดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 12 และ 13 จนกว่ามุม θ' จะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับมุม θ ดังนั้นจะได้ค่าเกน K_p , K_I และ K_D ที่มีความเหมาะสมรองลงมา และให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดเป็นไปตามข้อกำหนดและได้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ($J_{0,\text{near_min}}$) (near minimum ISE)

ดังนั้นจะได้ค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสมเพื่อใช้ชดเชยพลานต์ให้มีสมรรถนะผลตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ

4.3 ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลโดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม

ต้องการสมรรถนะของผลตอบสนองเช่นเดียวกับแนวทางการออกแบบที่สามคือข้อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25\text{ s}$ ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดีได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาตำแหน่งของคู่โพลเด่นบนระนาบเอส

- ข้อกำหนด $H = P.O. \leq 8\%$ จะได้ว่า $\zeta \geq 0.6266$

- ข้อกำหนด $t_s \leq 8.25$ s จะได้ว่า $\omega_n \leq 0.7738$
- แทนค่า ζ และ ω_n ลงในสมการที่ (2.16) จะได้ว่า $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$
- คำนวณมุมการหน่วงของคู่โพลเด่นได้เป็น $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.6031}{0.4848}\right) = 0.8936$ เรเดียน

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่า X_1 และ X_2 เพื่อวาดแผนภาพโวกัสรากลจากสมการ (2.27)

- คำนวณหาค่า X_1 จาก $X_1 = \frac{1}{2b} \text{Im}\left[\frac{-1}{G_p(p_1)}\right] + \frac{1}{2a} \text{Re}\left[\frac{-1}{G_p(p_1)}\right]$ จะได้

$$X_1 = \frac{1}{2(0.6031)} \text{Im}\left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)}\right] + \frac{1}{2(0.4848)} \text{Re}\left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)}\right]$$

$$X_1 = \frac{1}{2(0.6031)} \text{Im}\left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351}\right] + \frac{1}{2(0.4848)} \text{Re}\left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351}\right]$$

$$X_1 = \frac{1}{2(0.6031)}(-0.5416) + \frac{1}{2(0.4848)}(-0.0424) = -0.4928$$

- คำนวณหาค่า X_2 จาก $X_2 = \frac{1}{2b} \text{Im}\left[\frac{-1}{G_p(p_1)}\right] - \frac{1}{2a} \text{Re}\left[\frac{-1}{G_p(p_1)}\right]$ จะได้

$$X_2 = \frac{1}{2(0.6031)} \text{Im}\left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)}\right] - \frac{1}{2(0.4848)} \text{Re}\left[\frac{-1}{G(-0.4848 + j0.6031)}\right]$$

$$X_2 = \frac{1}{2(0.6031)} \text{Im}\left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351}\right] - \frac{1}{2(0.4848)} \text{Re}\left[\frac{-1}{0.1436 - j1.8351}\right]$$

$$X_2 = \frac{1}{2(0.6031)}(-0.5416) - \frac{1}{2(0.4848)}(-0.0424) = -0.4053$$

- เมื่อ $N(s)$ คือ เศษของฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต มีค่าเป็น 1
 $D(s)$ คือ ส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต มีค่าเป็น

$$0.01563 s^4 + 0.2344 s^3 + 1.094 s^2 + 1.875 s + 1$$

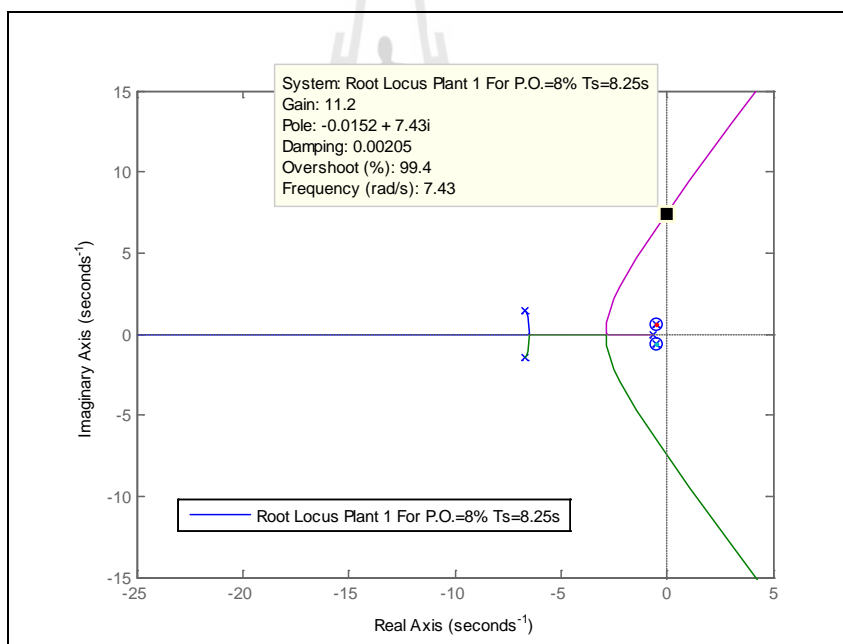
L คือ ประวิงเวลาของพลานต์ มีค่าเป็น 0

- จากสมการ (2.27) จะได้

$$\bar{G}(s) = \frac{N(s)[s^2 + 2as + (a^2 + b^2)]e^{-Ls}}{2aD(s)s + 2aX_2N(s)s^2e^{-Ls} - 2a(a^2 + b^2)X_1N(s)e^{-Ls}}$$

$$\bar{G}(s) = \frac{s^2 + 0.9697s + 0.5988}{0.01516s^5 + 0.2273s^4 + 1.061s^3 + 1.425s^2 + 0.9697s + 0.2861}$$

- วาดแผนภาพโวกัสรากจากสมการ (2.27) ได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 แผนภาพโวกัสรากพลานต์ 1 ที่ได้จากข้อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s และมีค่าเกน $K_{P,\max} = 11.2$ คือค่าที่ทำให้โวกัสของรากตัดกับแกนจินตภาพ

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าเกน K_p เริ่มต้น จากเงื่อนไขสมการ $K_{p,\min} > \max\{2aX_1, -2aX_2\}$ จะได้ว่า $K_{p,\min} > \max\{2(0.4848)(-0.4928), -2(0.4848)(-0.4053)\}$ นั่นคือ $K_{p,\min} > \max\{-0.4778, 0.3930\}$ ดังนั้น $K_{p,\min} > 0.3930$ คือ ค่าเริ่มต้นของค่าเกน K_p และจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าเกน $K_p = 11.2$ เป็นค่าที่ทำให้โวกัสรากตัดกับแกนจินตภาพ นั่นหมายความว่าค่าสิ้นสุดของค่าเกน K_p หรือ $K_{p,\max} = 11.2$ ดังนั้นจะได้ว่าเมื่อค่าเกน K_p มีค่าอยู่

ในช่วง $K_{P,\min} \leq K_P \leq K_{P,\max}$ ระบบควบคุมวงปิดจะมีโพลทุกตัวอยู่ในด้านซ้ายมือของระนาบเอสเสมอ

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้ $K_P = K_{P,\min} = 0.3930$ คำนวณค่าเกน K_I และ K_D

- จากสมการ (2.28) จะได้ค่าเกน $K_I = 0.5377$
- จากสมการ (2.29) จะได้ค่าเกน $K_D = -0.00004858$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบว่าผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยมีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) = 0$ หรือไม่ โดยที่ $E(s) = \mathcal{L}\{e(t)\}$ และ $R(s) = (1/s)$ ถ้า $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ ให้ดำเนินการต่อไป

- พบว่า $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ จึงดำเนินการต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบว่าโพลของระบบวงปิดทุกตัวมีตำแหน่งอยู่ในด้านซ้ายมือของระนาบเอสหรือไม่ เพราะถ้ามีโพลตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไปอยู่ในด้านขวามือของระนาบเอสหรืออยู่บนแกนจินตภาพ แสดงว่าระบบควบคุมวงปิดไม่มีเสถียรภาพ นั่นคือ $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \rightarrow \infty$

- ตำแหน่งโพลของระบบวงปิดที่ได้เป็นดังนี้ -7.8565 , -4.5705 , -1.6001 และ $-0.4848 \pm j0.6031$ ดังนั้นเมื่อระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพ (stable) จึงดำเนินการต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณ $E(s)$ และ $E(-s)$

- จากสมการ (4.1) จะได้ $E(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s) + A_1(s)e^{-Ls}}$

$$E(s) = \frac{0.01516s^4 + 0.2273s^3 + 1.061s^2 + 1.818s + 0.9697}{0.01516s^5 + 0.2273s^4 + 1.061s^3 + 1.818s^2 + 1.351s + 0.5214}$$

- จากสมการ (4.2) จะได้ $E(-s) = \frac{B_0(-s)}{A_0(-s) + A_1(-s)e^{Ls}}$

$$E(-s) = \frac{-0.01516s^4 + 0.2273s^3 - 1.061s^2 + 1.818s - 0.9697}{0.01516s^5 - 0.2273s^4 + 1.061s^3 - 1.818s^2 + 1.351s - 0.5214}$$

โดยที่ $D(s) = 0.01563s^4 + 0.2344s^3 + 1.094s^2 + 1.875s + 1$

$$B_0(s) = 2aD(s) = 0.01516s^4 + 0.2273s^3 + 1.061s^2 + 1.818s + 0.9697$$

$$A_0(s) = 2asD(s) = 0.01516s^5 + 0.2273s^4 + 1.061s^3 + 1.818s^2 + 0.9697s$$

$$A_1(s) = 2a(K_D s^2 + K_P s + K_I)N(s)$$

$$A_1(s) = [(K_P + 2aX_2)s^2 + 2aK_P s + (a^2 + b^2)(K_P - 2aX_1)]N(s)$$

$$A_1(s) = -4.711e-05s^2 + 0.3811s + 0.5214$$

และ $D(-s) = 0.01563s^4 - 0.2344s^3 + 1.094s^2 - 1.875s + 1$

$$B_0(-s) = 2aD(-s) = 0.01516s^4 - 0.2273s^3 + 1.061s^2 - 1.818s + 0.9697$$

$$A_0(-s) = 2a(-s)D(-s) = -0.01516s^5 + 0.2273s^4 - 1.061s^3 + 1.818s^2 - 0.9697s$$

$$A_1(-s) = 2a(K_D(-s)^2 + K_P(-s) + K_I)N(-s)$$

$$A_1(-s) = [(K_P + 2aX_2)(-s)^2 + 2aK_P(-s) + (a^2 + b^2)(K_P - 2aX_1)]N(-s)$$

$$A_1(-s) = -4.711e-05s^2 - 0.3811s + 0.5214$$

ขั้นตอนที่ 8 $E(s) \cdot E(-s)$ มีโพลทุกตัวอยู่ในตำแหน่งด้านซ้ายมือและด้านขวามือของระนาบเอส ดังนี้ -7.8565 , 7.8565 , -4.5705 , 4.5705 , -1.6001 , 1.6001 , $-0.4848 \pm j0.6031$ และ $0.4848 \pm j0.6031$

- จากสมการ (4.3) สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดกำลังสองรวม (ISE) โดยใช้สูตรดัชนีสมรรถนะ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลบวกเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ ในสมการ (4.4) จึงทำการหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวม (ISE) จากผลบวกเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ โดยที่ k คือจำนวนโพลของ $E(s) \cdot E(-s)$ ที่อยู่ทางด้านขวามือของระนาบเอส ถ้าโพล p_i คือโพลที่ไม่ใช่โพลซ้ำ จะได้ว่าต้องคำนวณเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ จากสมการ (4.5) แต่ถ้าโพล p_i คือโพลที่ซ้ำกัน r ตัว จะได้ว่าต้องคำนวณเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ จากสมการ (4.6) เนื่องจากโพลของ $E(s) \cdot E(-s)$ ที่อยู่ทางด้านขวามือของระนาบเอส คือ 7.8565 ,

4.5705 , 1.6001 และ $0.4848 \pm j0.6031$ เป็นโพลที่ไม่ใช่โพลซ้ำ มีจำนวน 5 โพล ($k = 5$) จะได้ว่า

- จากสมการ (4.5) คำนวณเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$

$$E = E(s) \cdot E(-s) = \frac{-0.0002297s^8 + 0.01951s^6 + 3.469e-18s^5 - 0.3283s^4 - 2.776e-17s^3 + 1.248s^2 - 0.9403}{0.0002297s^10 - 0.01951s^8 - 6.939e-18s^7 + 0.3398s^6 - 2.602e-17s^5 - 0.6767s^4 - 1.11e-16s^3 - 0.07146s^2 - 0.2719}$$

$$\text{Res}[E(s) \cdot E(-s) ; p_i] = \lim_{s \rightarrow p_i} (s - p_i) \cdot E(s) \cdot E(-s)$$

$$= \lim_{s \rightarrow 7.8565} (s - 7.8565) \cdot E(s) \cdot E(-s) = 0.0023$$

$$= \lim_{s \rightarrow 4.5705} (s - 4.5705) \cdot E(s) \cdot E(-s) = -0.0230$$

$$= \lim_{s \rightarrow 1.6001} (s - 1.6001) \cdot E(s) \cdot E(-s) = 0.0698$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0.4848 + j0.6031} (s - 0.4848 + j0.6031) \cdot E(s) \cdot E(-s) = -0.8167 - j0.2212$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0.4848 - j0.6031} (s - 0.4848 - j0.6031) \cdot E(s) \cdot E(-s) = -0.8167 + j0.2212$$

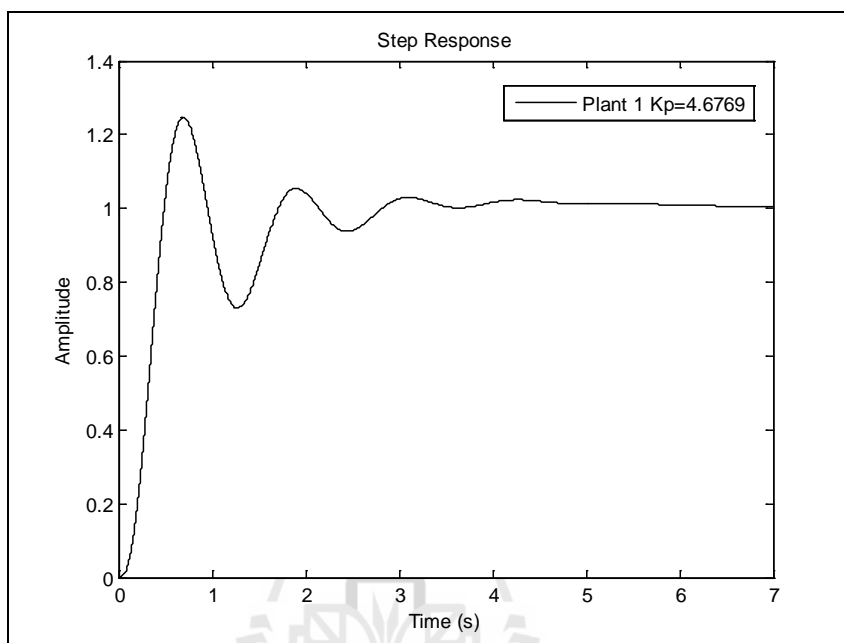
ขั้นตอนที่ 9 คำนวณผลบวกเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ ผลบวกเรซิดิวที่ได้ คือ ความผิดพลาดกำลังสองรวม (ผลบวกเรซิดิวนี้จะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการอินทิเกรต e^2 ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) จนถึงเวลานันต์ ($t \rightarrow \infty$) เพราะการอินทิเกรตดังกล่าวไม่สามารถทำได้โดยตรง) (Hwang and Hsiao, 2002)

- ผลบวกเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ คือ $0.0023 - 0.0230 + 0.0698 - 0.8167 + j0.2212 - 0.8167 - j0.2212 = -1.5841$ แต่เนื่องจากการคำนวณเรซิดิวทำในทิศทวนเข็มนาฬิกา แต่การอินทิเกรต e^2 ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) จนถึงเวลานันต์ ($t \rightarrow \infty$) ของเส้นโค้งวงปิด (contour) อินทิเกรตในทิศตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นผลบวกเรซิดิวของ $E(s) \cdot E(-s)$ จึงมีค่าเป็น 1.5841 ตามสมการ (4.4)

ขั้นตอนที่ 10 ใช้ระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี หรือระเบียบวิธีการค้นหากำลังสามในการเพิ่มค่าเกน K_p หรือลดค่าเกน K_p และดำเนินการซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4 ถึง 9 เพื่อค้นหาค่าเกน K_p ที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมมีค่าน้อยที่สุด ($J_{0,\min}$) (minimum ISE)

- พบว่า เมื่อ $K_p = 4.6769$ จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด $J_{0,\min} = 0.2867$

ขั้นตอนที่ 11 ตรวจสอบว่าระบบควบคุมวงปิดมีผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ที่ทำให้เกิดปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่มากกว่าข้อกำหนดหรือไม่



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบวงปิดด้วยวิธีหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด (minimum ISE) โดยที่ $K_p = 4.6769$

- จากผลตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมในรูปที่ 4.2 พบว่า มี $t_r = 0.296$ วินาที $t_s = 4.5$ วินาที และมี $P.O. = 24.6\%$ นั้นหมายความว่า $P.O.$ สูงกว่าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ จึงต้องดำเนินการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีค่าอื่นที่มีความเหมาะสมรองลงมาเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบวงปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในขั้นตอนถัดไป แต่ถ้า $P.O.$ และ t_s มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ ค่าเกณฑ์ K_p , K_I และ K_D ที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 คือ ค่าที่เหมาะสมมากที่สุด ให้หยุดการดำเนินการไว้ในขั้นตอนนี้

ขั้นตอนที่ 12 เนื่องจากผลตอบสนองมี $P.O.$ และหรือ t_s มากกว่าที่กำหนดไว้ จึงต้องเลือกค่าเกณฑ์ K_p , K_I และ K_D ค่าอื่นที่เหมาะสมรองลงมา ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกค่าเกณฑ์ K_p ที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $p_{3,4} = -a' \pm jb'$ ที่ให้มุม $\theta' = \tan^{-1}\left(\frac{b'}{a'}\right)$

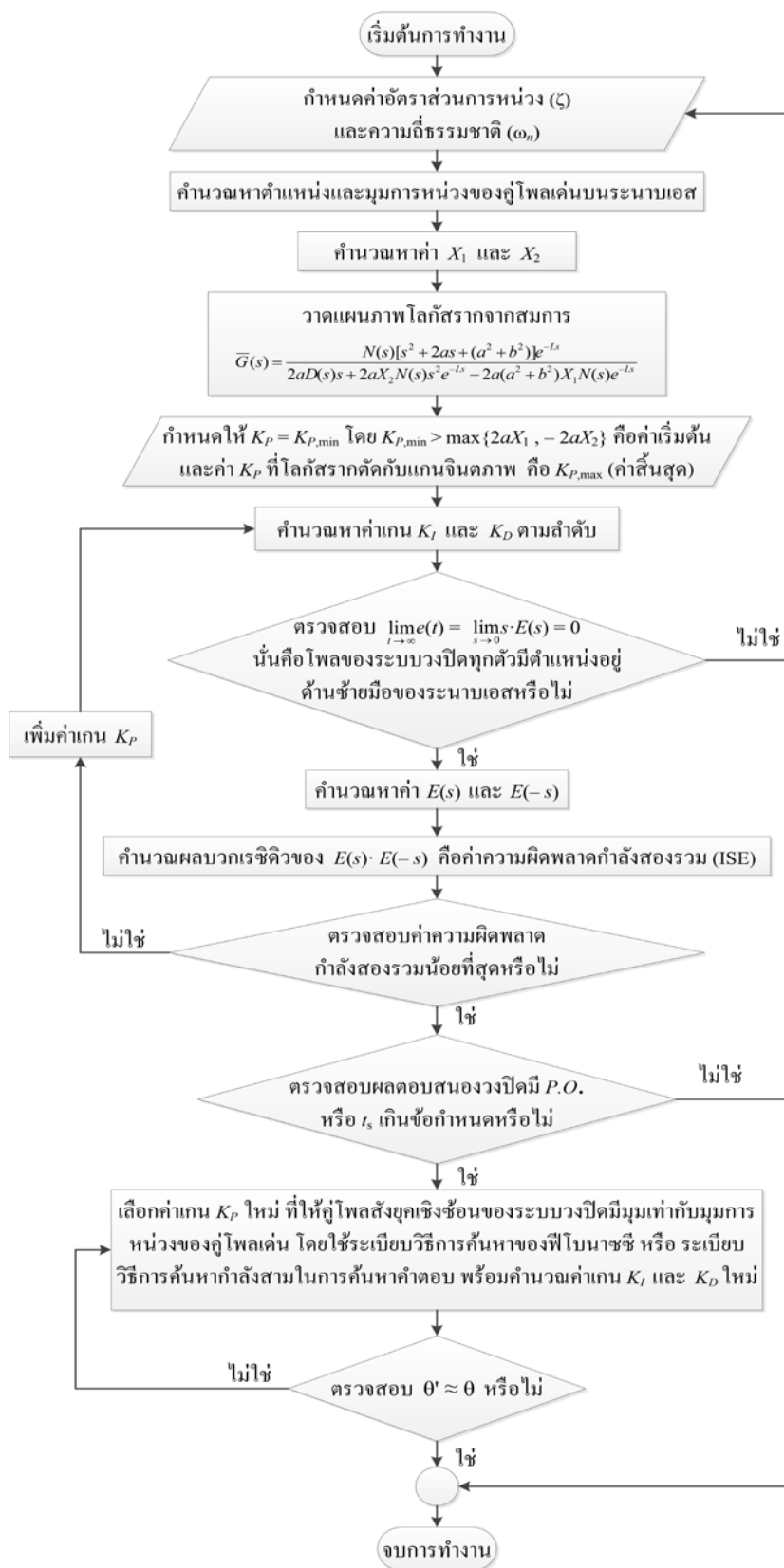
เท่ากับหรือใกล้เคียงกับมุมการหน่วง $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$ ในขั้นตอนที่ 1 เพราะต้องการให้ผลตอบสนองมี $P.O.$ และ t_s ไม่มากกว่าข้อกำหนด เมื่อ $\theta' \approx \theta$ จะประมาณได้ว่าอัตราส่วนการหน่วง (ζ) ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม

ขั้นตอนที่ 13 ใช้ระเบียบวิธีการค้นหาของพีโบนาสซี หรือระเบียบวิธีการค้นหากำลังสามในการเพิ่มค่าเกน K_P หรือลดค่าเกน K_P และใช้สมการ (2.28) และ (2.29) คำนวณหาค่าเกน K_I และ K_D จากนั้นหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด ต่อมาคำนวณหาโพลของระบบวงปิด และดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 12 ถ้ามุม θ' มีค่าแตกต่างจากมุม θ ต้องดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 12 และ 13 จนกว่ามุม θ' จะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับมุม θ ค่าเกน K_P ที่ให้คู่โพล $p_{3,4}$ มีมุมเท่ากับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ คือ $K_P = 1.3856$ และจะได้ว่า $p_{3,4} = -a' \pm jb' = -2.2512 \pm j2.8001$ ซึ่งมีมุม $\theta' = \tan^{-1}\left(\frac{b'}{a'}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2.8001}{2.2512}\right) = 0.8936$ เรเดียน

- จากสมการ (2.28) จะได้ค่าเกน $K_I = 1.1507$
- จากสมการ (2.29) จะได้ค่าเกน $K_D = 1.0236$
- ทำซ้ำในตั้งแต่ขั้นตอนที่ 5 ถึง 9 จะได้ว่า ผลบวกเรซิดิว มีค่าเป็น 0.6018

ค่าเกน K_P , K_I และ K_D ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือค่าที่เหมาะสมรองลงมา โดยการดำเนินงานตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นสามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 4.3





รูปที่ 4.3 แผนภูมิของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล โดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม

จำลองสถานการณ์และพิจารณาผลตอบสนองของระบบเมื่อค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึง 13 ใช้ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกทั้ง 5 พลาเน็ต โดยมีผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงในบทที่ 5 ต่อไป การค้นหาค่าเกณฑ์ K_p ที่ทำให้ระบบวงปิดมีมุมของคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนเท่ากับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น ในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ ระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี หรือระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีสมรรถนะสูง และถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีอัตราการเข้าสู่คำตอบที่รวดเร็ว เพื่อให้การค้นหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมเป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยพลาเน็ต 1 ถึง พลาเน็ต 4 ใช้ระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม และพลาเน็ต 5 ใช้ระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี เนื่องจากระเบียบวิธีการค้นหากำลังสามให้อัตราการเข้าสู่ที่รวดเร็วกว่า แต่ไม่สามารถค้นหาค่าเกณฑ์ K_p ของตัวควบคุมที่ชดเชยพลาเน็ต 5 ได้ จึงได้อธิบายหลักการทำงานของทั้งสองระเบียบวิธีการค้นหาไว้ดังนี้

4.4 ระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี (Fibonacci Search Method)

ระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี เกิดจากการแก้ปัญหาบางประการของระเบียบวิธีการค้นหาตามกริด กล่าวคือระเบียบวิธีการค้นหาตามกริดสามารถค้นหาค่าต่ำสุดได้ โดยอาศัยการคำนวณค่าฟังก์ชันที่จุดต่าง ๆ จากการสร้างกริดขึ้นมา ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันทุกจุดบนกริดที่สร้างขึ้น ทำให้การคำนวณไม่มีสมรรถนะดีเท่าที่ควร เช่น ถ้าทำการสร้างกริดโดยแบ่งเป็น 4 ช่วงในแต่ละรอบการคำนวณจะต้องคำนวณค่าฟังก์ชันทั้งสิ้น 5 จุด และถ้าใช้จำนวนรอบทั้งหมด 20 รอบ จะใช้การคำนวณค่าฟังก์ชันทั้งหมด 100 จุด และถ้าแบ่งเป็น 8 ช่วง จะต้องใช้การคำนวณ 9 จุดต่อรอบ ในจำนวน 20 รอบการคำนวณนั้น จะใช้การคำนวณค่าฟังก์ชันทั้งสิ้น 180 จุด เป็นต้น จึงเกิดเป็นปัญหาที่ว่า

1. ถ้ากำหนดจำนวนครั้งของการคำนวณค่าฟังก์ชันในแต่ละรอบของการค้นหา ทำอย่างไรจึงจะสามารถระบุช่วงที่มีค่าต่ำสุดอยู่ได้ โดยทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของจุดต่ำสุดที่ประมาณได้กับจุดต่ำสุดที่แท้จริงน้อยที่สุด
2. เมื่อกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างจุดคำตอบจากจุดต่ำสุด จะทำให้จำนวนการคำนวณค่าของฟังก์ชันที่ใช้น้อยที่สุดได้อย่างไร
3. เมื่อกำหนดค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของการประมาณค่าต่ำสุดในช่วงการค้นหา $[a, b]$ และเมื่อกำหนดจำนวนครั้งในการคำนวณค่าของฟังก์ชัน ค่าสูงสุดของ $b - a$ ต้องมีค่าเท่าใดสำหรับจำนวนการคำนวณค่าฟังก์ชันดังกล่าว

ในปี 1953 เกียเฟอร์ (Kiefer) นักคณิตศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าคำตอบของปัญหาดังกล่าว มีความสัมพันธ์กับลำดับตัวเลขฟีโบนาสซี (Fibonacci number) ที่นิยามโดย

$$F_0 = F_1 = 1 ; F_N = F_{N-1} + F_{N-2} \text{ สำหรับ } N \geq 2$$

ลีโอนาร์โด (Leonardo) แห่งปิซา (Pisa) ค.ศ. 1175 – 1230 ค้นพบลำดับตัวเลขนี้จากการสำรวจปัญหาจำนวนประชากรของกระต่าย ตัวอย่างของลำดับนี้ 16 อันดับแรกเป็นดังนี้

1 1 2 3 5 8 13 21 34 55 89 144 233 377 610 987

โดยการแก้ปัญหามการผลต่างข้างต้น จะคำนวณ F_N ได้ดังนี้

$$F_N = \frac{\sqrt{5}}{5(2^{N+1})} \left[(\sqrt{5}+1)^{N+1} + (-1)^N (\sqrt{5}-1)^{N+1} \right] \text{ โดยที่ } N = 0, 1, \dots$$

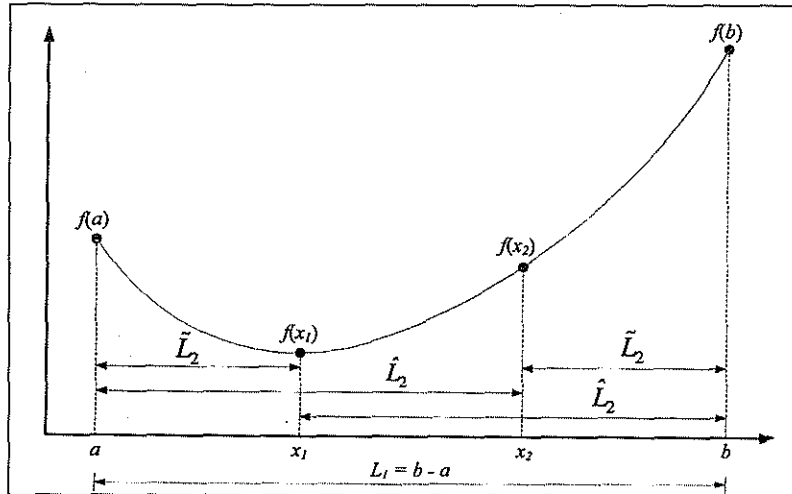
หรืออยู่ในรูปลิมิตต่อไปนี้

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{F_N}{F_{N+1}} = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$$

วิธีการนี้กำหนดให้ช่วงของการค้นหาเป็นค่าดังนี้

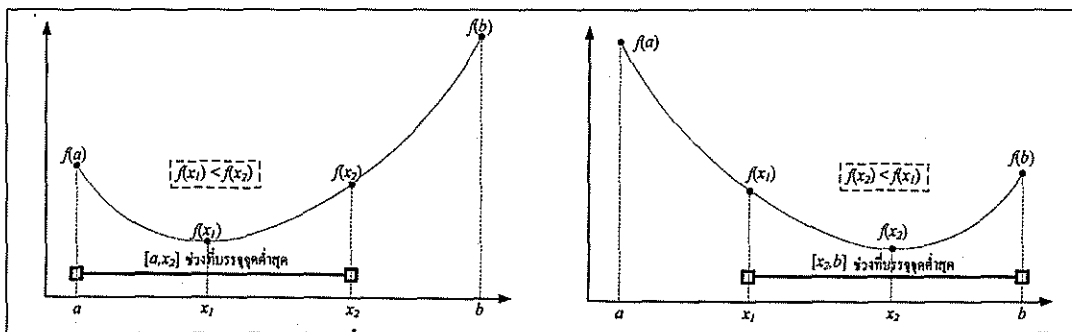
$$F_N \times \delta = b - a \text{ นั่นคือ } \delta = \frac{b-a}{F_N} \leq \varepsilon \text{ โดยที่ } a, b, \delta \text{ และ } \varepsilon \text{ เป็นค่าจริง}$$

เมื่อกำหนดค่า a, b, ε และ $L_1 = b - a$ จำนวนช่วงที่แบ่งหาได้จากการคำนวณค่าตัวเลขลำดับฟีโบนาสซี F_N ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้เงื่อนไข $\delta \leq \varepsilon$ เป็นจริง โดยที่ ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดที่ยอมรับได้ ตัวเลข N ที่ได้จากสมการดังกล่าวเป็นตัวกำหนดจำนวนรอบในการคำนวณของระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี วิธีการนี้ใช้การคำนวณจุดภายในช่วง $[a, b]$ จำนวน 2 จุด คือ x_1 และ x_2 โดยที่จุดทั้งสองอยู่ห่างจากขอบการค้นหาเป็นระยะ L_2 เท่ากัน ดังรูปต่อไปนี้



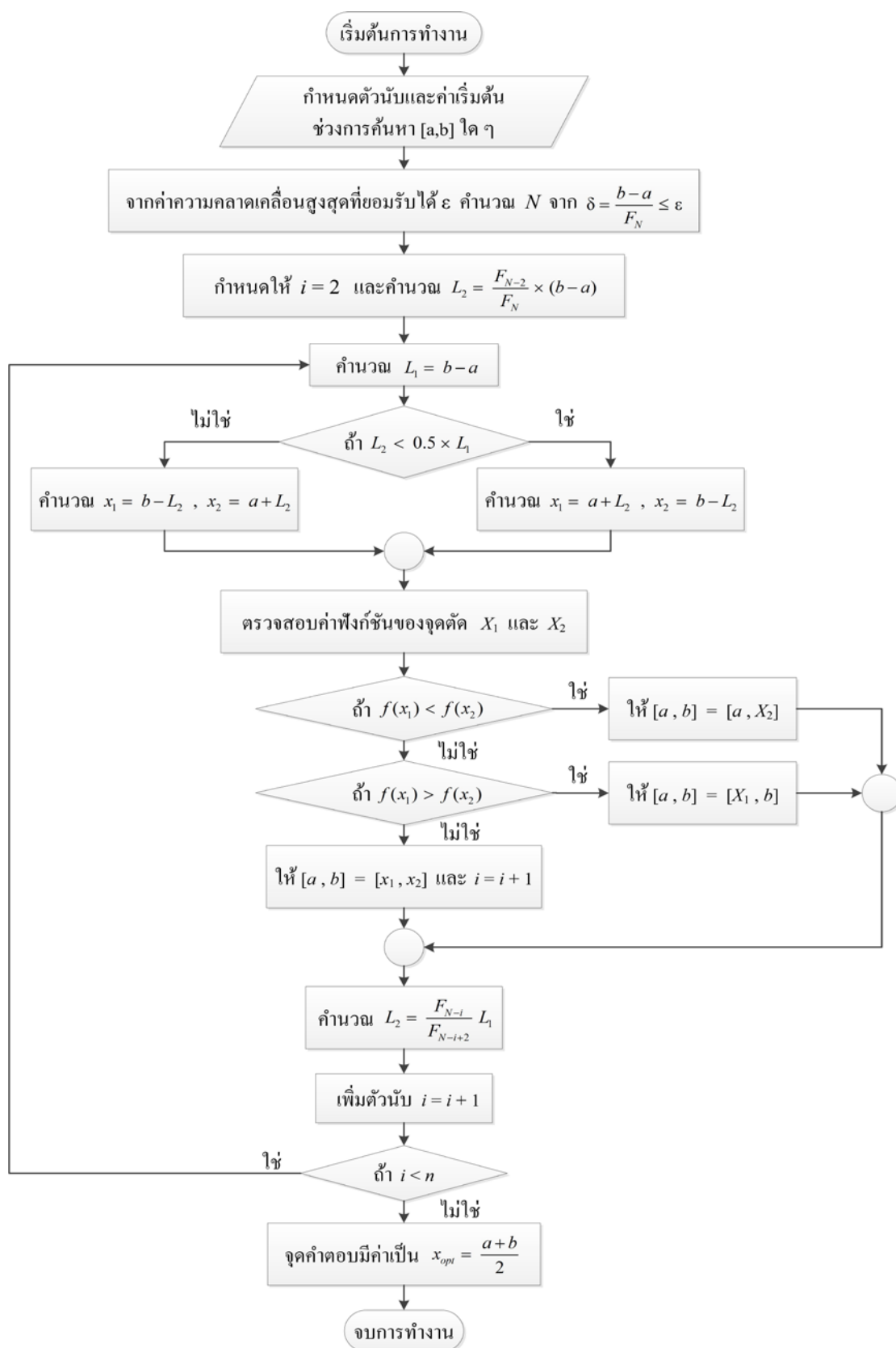
รูปที่ 4.4 การแบ่งจุดเพื่อคำนวณสำหรับระเบียบวิธีฟีโบนาชซี

จากรูปที่ 4.4 กำหนดให้ $L_1 = \tilde{L}_2 + \hat{L}_2$ เสมอ การเลือกกระยะ L_2 สามารถลดช่วงให้มีค่าเท่ากับ \tilde{L}_2 หรือ \hat{L}_2 ได้ จึงทำให้ลำดับของจุด x_1 และ x_2 อาจจะสลับกันได้ในกรณีคำนวณรอบ แต่ปัญหานี้ไม่ใช่เรื่องใหญ่ เนื่องจากอัลกอริทึมการตรวจสอบที่รัดกุมสามารถแก้ปัญหานี้ได้ ปัญหาที่สำคัญกว่าคือ การลดขอบเขตของช่วงการค้นหา $[a, b]$ สามารถทำได้อย่างไร โดยอาศัยการใช้ตัวเลขลำดับฟีโบนาชซี จะได้ความสัมพันธ์ $L_2 = \frac{F_{k-2}}{F_k} L_1$ ถ้ากำหนดให้ $a < x_1 < x_2 < b$ ช่วงการค้นหาจะถูกลดรูปได้สองกรณี ได้แก่ $[a, x_2]$ หรือ $[x_1, b]$ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การลดขอบเขตช่วงการค้นหาสำหรับระเบียบวิธีฟีโบนาชซี

อัลกอริทึมการค้นหาค่าต่ำสุดด้วยระเบียบวิธีฟีโบนาชซี สามารถอธิบายสรุปเป็นขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังแผนภูมิในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภูมิอัลกอริทึมการค้นหาจุดต่ำสุดด้วยระเบียบวิธีไฟโบนาซชี

4.5 ระเบียบวิธีการค้นหาค่ากำลังสาม (Cubic Search Method)

ระเบียบวิธีการค้นหาค่ากำลังสาม (Cubic Search Method) ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีในการค้นหาคำตอบที่มีสมรรถนะมากที่สุดวิธีหนึ่ง ใช้การคำนวณอนุพันธ์อันดับหนึ่งซึ่งมีอัตราการลู่เข้าที่รวดเร็วมาก วิธีการนี้อาศัยการประมาณค่าฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าต่ำสุดด้วยฟังก์ชันกำลังสามหรือพหุนามอันดับที่สามในรูป $Q(x) = px^3 + qx^2 + rx + s$ โดยต้องการข้อมูลของจุดพร้อมอนุพันธ์ที่จุดดังกล่าวเพียง 2 จุดเท่านั้น จากเงื่อนไขของค่าอนุพันธ์ที่จุดต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ

$$\frac{d}{dx}Q(x) = 3px^2 + 2qx + r = 0 \quad (4.7)$$

จุดต่ำสุดจากเงื่อนไขดังกล่าว สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\hat{x} = \frac{-q \pm \sqrt{q^2 - 3pr}}{3p} \quad (4.8)$$

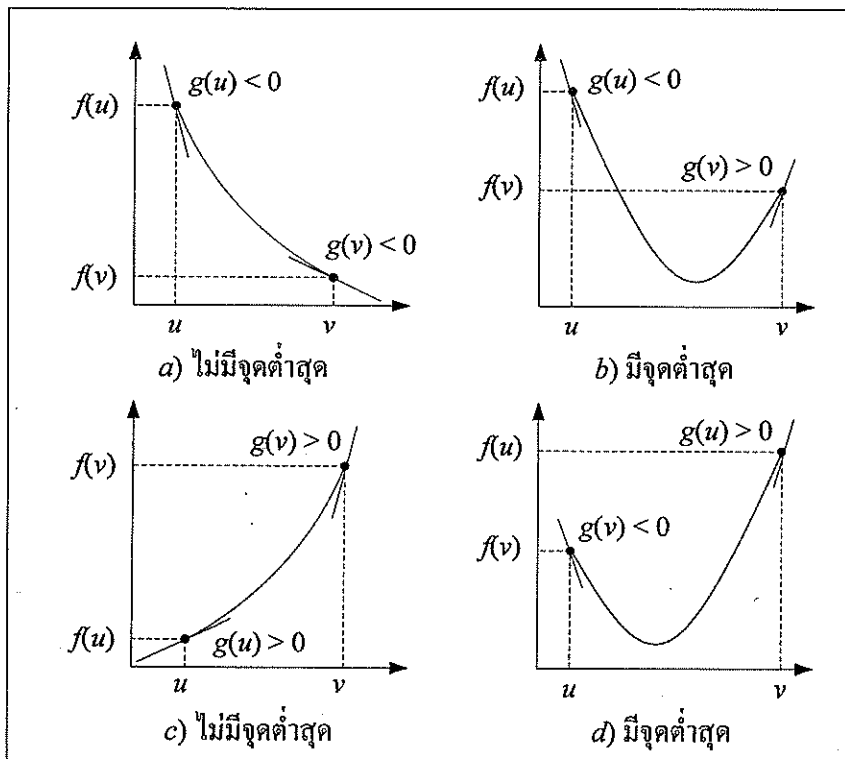
จากจุดที่ได้ จะมี 2 จุดด้วยกัน การหาจุดต่ำสุด ต้องการข้อมูลเพิ่มเติม จากอนุพันธ์อันดับสอง ตามสมการ(4.7) ซึ่งอนุพันธ์อันดับสองที่จุดต่ำสุดจะต้องมีค่าเป็นบวก

ค่า \hat{x} สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ ซึ่งได้ทำการเสนอและพิสูจน์โดยเดวิดสัน (Davidon) ในปี 1959 ในที่นี้จะข้ามบทพิสูจน์ที่มาของสูตรดังกล่าว จะได้ว่า

$$\hat{x} = a + (b-a) \left\{ 1 - \frac{g(b) + V - W}{g(b) - g(a) + 2V} \right\} \quad (4.9)$$

โดย $V = \sqrt{W^2 - g(a)g(b)}$

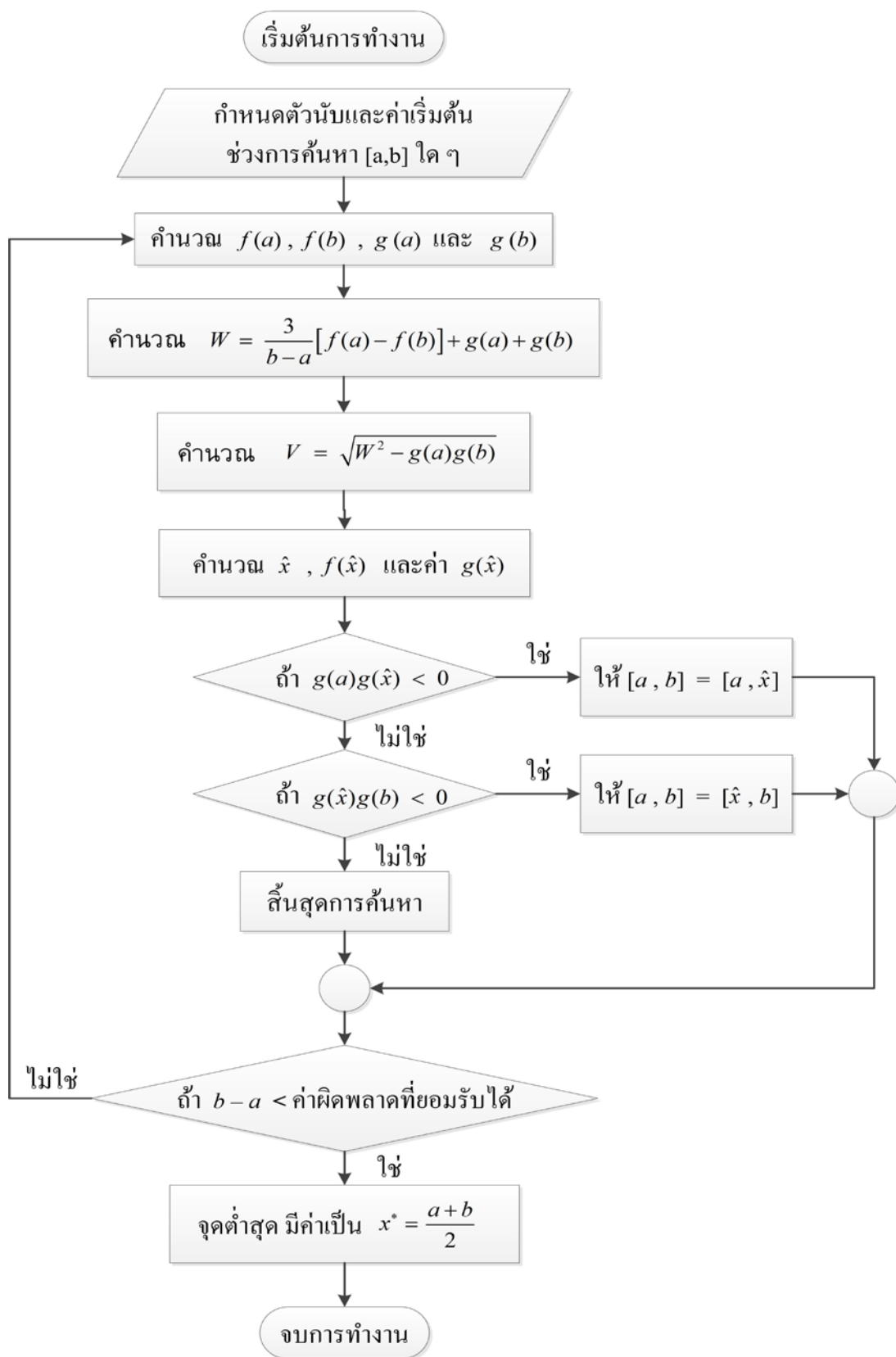
$$W = \frac{3}{b-a} [f(a) - f(b)] + g(a) + g(b)$$



รูปที่ 4.7 การตรวจสอบช่วงที่มีจุดต่ำสุดบรรจุอยู่ด้วยระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม

ในการพิจารณาว่าช่วงการค้นหาย่อยช่วงใดระหว่าง $[a, \hat{x}]$ และ $[\hat{x}, b]$ ที่มีจุดต่ำสุดบรรจุอยู่ให้ใช้หลักการดังนี้

ถ้าผลคูณของค่าอนุพันธ์ที่จุดขอบของช่วงที่พิจารณา $[u, v]$ น้อยกว่าศูนย์ $g(u)g(v) < 0$ ช่วงที่พิจารณานี้มีจุดต่ำสุดบรรจุ แต่ถ้า $g(u)g(v) > 0$ ช่วงดังกล่าวไม่มีจุดต่ำบรรจุอยู่พิจารณาได้จากรูปที่ 4.7 ดังนั้นในการพิจารณาดังนี้ทำการประเมินว่า ช่วงใด $[a, \hat{x}]$ หรือ $[\hat{x}, b]$ ที่มีจุดต่ำสุดบรรจุอยู่ และจะทำการแบ่งช่วงย่อย ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความกว้างของช่วงในการค้นหา มีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ จุดต่ำสุดที่ประมาณได้ คือ จุดกึ่งกลางของช่วงการค้นหาสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการข้างต้นนั่นเอง อัลกอริทึมการค้นหาจุดต่ำสุดด้วยระเบียบวิธีการค้นหากำลังสามสามารถอธิบายสรุปเป็นขั้นตอนการดำเนินงาน ได้ดังแผนภูมิในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภูมิอัลกอริทึมการค้นหาจุดต่ำสุดด้วยระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม

เนื่องจากระเบียบวิธีการค้นหาของพีโบนาสซี และระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีสมรรถนะ ถึงแม้จะมีระเบียบวิธีการอื่น ๆ ที่อาจจะนำมาใช้งานได้ เช่น ระเบียบวิธีการนิวตัน ที่มีสมรรถนะสูง แต่ข้อดีที่สำคัญของวิธีการนิวตันคือ การไม่อาจจะรับประกันจุดคำตอบได้ในทุกกรณี การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีนิวตันนั้นจะลู่เข้า ก็ต่อเมื่อทุก ๆ รอบการคำนวณค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันผลเฉลยที่ถูกปรับปรุงมีค่าเป็นบวกทุกค่า ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกระเบียบวิธีการค้นหาของพีโบนาสซี และระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม เพื่อใช้แก้ปัญหาค้นหาค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาดกำลังสองรวม ในการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลโดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด

4.6 การตรวจสอบคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าหรือเท่ากับขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่นสามเท่า ($m \geq 3$) สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีที่ชดเชยพลานต์ 1

แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีโอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม สามารถออกแบบตัวควบคุมพีโอดีเพื่อชดเชยพลานต์ให้มีผลตอบสนองของระบบวงปิดไม่เกินจากข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ และให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม โดยอาศัยการเลือกค่าเกน K_p ที่ทำให้ระบบวงปิดมีมุมของคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนเท่ากับหรือใกล้เคียงกับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น แต่สำหรับบางพลานต์หรือบางข้อกำหนด อาจประสบปัญหาผลตอบสนองของระบบวงปิดยังคงเกินกว่าข้อกำหนด นั่นเป็นเพราะระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีขนาดของส่วนจริงน้อยกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่นสามเท่า จึงได้มีการพิสูจน์ให้เห็นว่าคำตอบของปัญหาดังกล่าว มีความสัมพันธ์กับสมการสร้างทางเดินราก (root-locus) เพื่อใช้ตรวจสอบการมีหรือไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่ให้ $m \geq 3$ ถ้ามีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่ให้ $m \geq 3$ นั้นทำให้ผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นมากกว่าคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน เป็นผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองในโดเมนเวลาอยู่ภายในข้อกำหนด แต่ถ้าไม่มี นั้นหมายถึงผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่นและคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนไปพร้อม ๆ กัน อาจเป็นผลให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองในโดเมนเวลาเกินกว่าข้อกำหนด

จากสมการลักษณะเฉพาะในสมการ (2.2) สามารถเขียนได้เป็น

$$1 + K_p \bar{G}(s) = 0$$

และ $\bar{G}(s)$ ในสมการ (2.27) เมื่อไม่พิจารณาพจน์ประวิงเวลาสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\bar{G}(s) = \frac{(s^2 + 2as + a^2 + b^2)N(s)}{2asD(s) + 2a(X_2s^2 - X_1(a^2 + b^2))N(s)} ; s = p_3 \quad (4.10)$$

ในระบบวงปิดอาจไม่มีค่าเกน K_p ใด ๆ ที่ทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมี $m \geq 3$ ดังนั้นการมีหรือไม่มีของคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มี $m \geq 3$ สามารถพิจารณาได้จากสมการลักษณะเฉพาะ

$$G_C(s) = -\frac{1}{G_P(s)} \Big|_{s=-ma+j\omega} \quad (4.11)$$

โดยที่ คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คือ $s = -ma \pm j\omega = p_{3,4}$

อัตราส่วนของส่วนจริงคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนกับส่วนจริงของคู่โพลเด่น คือ $m = \frac{Re(p_{3,4})}{Re(p_{1,2})}$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต (พลาเน็ต 1) คือ

$$G_P(s) = \frac{1}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

แทนค่าเกน K_I และ K_D ของตัวควบคุมพีไอดีจากสมการ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ ลงในสมการ (4.11) จะได้ว่า สมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$\begin{aligned} & (K_P + 2aX_2)(-ma + j\omega)^2 + 2aK_P(-ma + j\omega) + (a^2 + b^2)(K_P - 2aX_1) \\ & = -2a \frac{-ma + j\omega}{G_P(-ma + j\omega)} \end{aligned} \quad (4.12)$$

ในเทอม $\frac{-ma + j\omega}{G_P(-ma + j\omega)}$ เมื่อแทนค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต (พลาเน็ต 1) คือ

$$G_P(s) = \frac{1}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad \text{โดยที่ } s = -ma + j\omega \text{ จะสามารถกระจายได้เป็น}$$

$$\begin{aligned} & a_4(-ma + j\omega)^5 + a_3(-ma + j\omega)^4 + a_2(-ma + j\omega)^3 + a_1(-ma + j\omega)^2 \\ & + a_0(-ma + j\omega) = (a_3 - 5a_4ma)\omega^4 + [10a_4m^3a^3 + ma(3a_2 - 6a_3ma) \\ & - a_1]\omega^2 + ma(a_1ma - a_0) + m^3a^3(a_3ma - a_2) - a_4m^5a^5 \\ & + j\omega[a_4\omega^4 + (4a_3ma - a_2 - 10a_4m^2a^2)\omega^2 + a_0 - 2a_1ma \\ & + m^2a^2(3a_2 - 4a_3ma) + 5a_4m^4a^4] \end{aligned} \quad (4.13)$$

จากสมการลักษณะเฉพาะ จะได้ว่า

$$(m^2a^2 - 2ma^2 + a^2 + b^2)K_P + 2a[m^2a^2X_2 - (a^2 + b^2)X_1] - (K_P + 2aX_2)\omega^2 + j2a\omega[K_P(1 - m) - 2maX_2] + 2a \frac{-ma + j\omega}{G_P(-ma + j\omega)} = 0 \quad (4.14)$$

จากสมการ (4.14) สามารถแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้เป็น 2 สมการ คือ

$$2a(a_3 - 5a_4ma)\omega^4 + \{2a[10a_4m^3a^3 + ma(3a_2 - 6a_3ma) - a_1 - X_2] - K_P\}\omega^2 + 2a[ma(a_1ma - a_0) + m^3a^3(a_3ma - a_2) - a_4m^5a^5 + m^2a^2X_2 - (a^2 + b^2)X_1] + K_P(m^2a^2 - 2ma^2 + a^2 + b^2) = 0 \quad (4.15)$$

$$2a\omega[a_4\omega^4 + (4a_3ma - a_2 - 10a_4m^2a^2)\omega^2 + a_0 - 2a_1ma + m^2a^2(3a_2 - 4a_3ma) + 5a_4m^4a^4 - 2maX_2 + K_P(1 - m)] = 0 \quad (4.16)$$

จัดรูปสมการ (4.15) และ (4.16) ให้เพียง 2 ตัวแปร คือ K_P และ ω ได้ว่า

$$A\omega^4 + (B - K_P)\omega^2 + C + DK_P = 0 \quad (4.17)$$

$$E\omega^4 + F\omega^2 + G + HK_P = 0 \quad (4.18)$$

สามารถจัดรูปสมการ (4.18) ได้ว่า

$$K_P = -(1/H)(E\omega^4 + F\omega^2 + G) \quad (4.19)$$

เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของส่วนจริงคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนกับส่วนจริงของคู่โพลเด่น (m) และส่วนจินตภาพของคู่สังยุคเชิงซ้อน (ω) โดยการแทนค่า K_P ลงในสมการพหุนาม (4.17) และ (4.18) ดังนั้นจะเหลือเพียงตัวแปร ω จะได้ว่า

$$E\omega^6 + (AH - ED + F)\omega^4 + (BH - FD + G)\omega^2 + CH - GD = 0 \quad (4.20)$$

โดยที่ $A = 2a(a_3 - 5a_4ma)$

$$B = 2a(10a_4m^3a^3 + ma(3a_2 - 6a_3ma) - a_1) - 2aX_2$$

$$C = 2a(ma(a_1ma - a_0) + m^3a^3(a_3ma - a_2) - a_4m^5a^5) + 2a(m^2a^2X_2 - (a^2 + b^2)X_1)$$

$$D = m^2a^2 - 2ma^2 + a^2 + b^2$$

$$E = a_4$$

$$F = -(a_2 - 4a_3ma + 10a_4m^2a^2)$$

$$G = a_0 - 2a_1ma + m^2a^2(-4a_3ma + 3a_2) + 5a_4m^4a^4 - 2maX_2$$

$$H = 1 - m$$

เนื่องจากพลาเน็ตเป็นระบบอันดับสี่ ดังนั้นระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีจะเป็นระบบอันดับห้า โพลในระบบวงปิดจึงมีทั้งสิ้น 5 ตัว ซึ่งโพล 2 ใน 5 ตัว จะต้องเป็นคู่โพลเด่นอย่างแน่นอน โพลที่เหลือ 3 ตัว ในระบบอาจจะเป็นโพลจริงทั้ง 3 ตัว หรือเป็นคู่โพลสังยุค 1 คู่ ร่วมกับโพลจริง 1 ตัว คำตอบของสมการพหุนาม (4.20) สามารถอธิบายลักษณะของโพลในระบบวงปิดได้ดังนี้

ถ้าคำตอบของสมการพหุนาม (4.20) ประกอบด้วย จำนวนจริงซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ 2 จำนวน และจำนวนเชิงซ้อน 4 จำนวน โพลของระบบวงปิดที่ได้รับ คือ คู่โพลเด่น 1 คู่ ร่วมกับโพลจริงซ้ำกัน 2 ตัวที่มี $m \geq 3$ และโพลจริงอีก 1 ตัว

ถ้าคำตอบของสมการพหุนาม (4.20) ประกอบด้วย จำนวนเชิงซ้อน 4 จำนวน และเป็นจำนวนจริง 2 จำนวนที่มีขนาดเท่ากันแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม โพลของระบบวงปิดที่ได้รับ คือ คู่โพลเด่น 1 คู่ ร่วมกับคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน 1 คู่ที่มี $m \geq 3$ และโพลจริงอีก 1 ตัว

และถ้าคำตอบของสมการพหุนาม (4.20) ประกอบด้วย จำนวนเชิงซ้อน 6 จำนวน นั้นหมายความว่า ระบบวงปิดที่ได้รับไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่น เกิน 3 เท่า เพราะคำตอบของสมการพหุนามคือค่า ω ที่เป็นส่วนจินตภาพของคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน ดังนั้นจึงต้องมีค่าเป็นจำนวนจริงเท่านั้น

ค่าเกณฑ์ K_p ที่ทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่นมากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่า ($m \geq 3$) คำนวณได้จากการแทนค่า ω ที่เป็นคำตอบจำนวนจริงของสมการพหุนาม (4.20) ลงในสมการ

$$K_p = -[1/(D - \omega^2)](A\omega^4 + B\omega^2 + C) \quad (4.21)$$

ตัวอย่างตรวจสอบการมีหรือไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่ทำให้ $m \geq 3$ สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 1

$$\text{ข้อกำหนด } P.O. \leq 8\% \text{ และ } t_s \leq 8.25 \text{ s} \text{ กรณี } \theta' = \theta$$

ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม คือ $K_p = 1.386$ $K_I = 1.151$ และ $K_D = 1.024$

$$A = 0.0568 \quad B = 0.5580 \quad C = -1.8126 \quad D = 3.4784$$

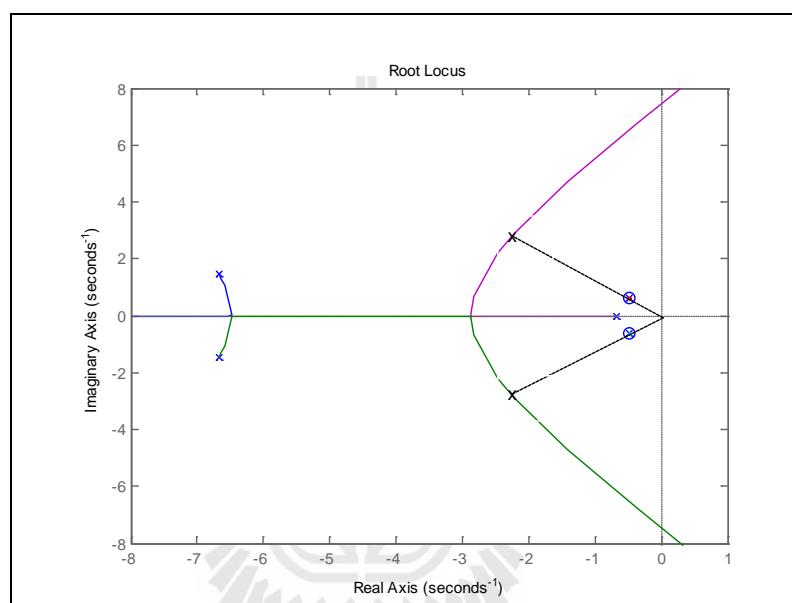
$$E = 0.0156 \quad F = 0.2243 \quad G = 2.3243 \quad H = -3.6400$$

คำตอบของสมการพหุนาม คือ $\omega = \pm 2.8041, -0.6031 \pm j1.7648, 0.6031 \pm j1.7648$

$$\text{จะได้ } p_{1,2} = -0.485 \pm j0.603 \quad \theta \approx \pm 51.2^\circ$$

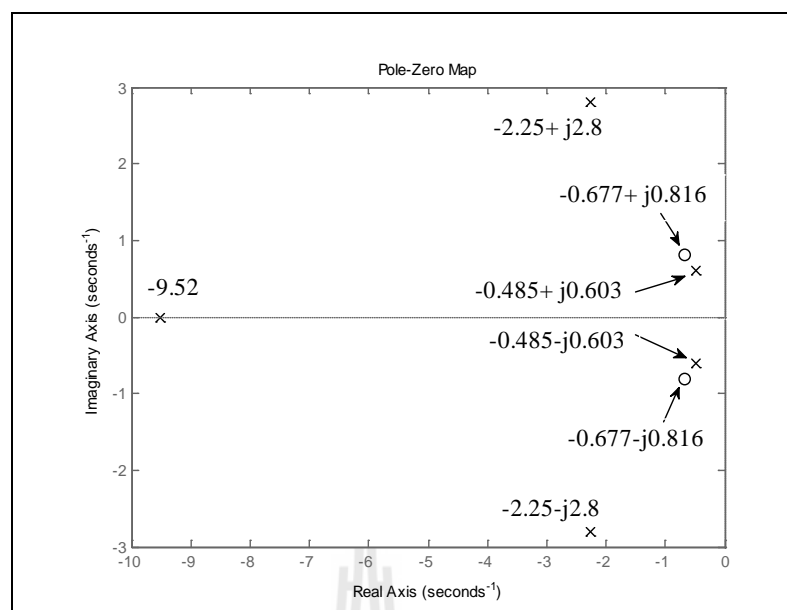
$$p_{3,4} = -2.25 \pm j2.8041 \quad \theta' \approx \pm 51.2^\circ$$

$$m = (2.25 \div 0.485) = 4.64 \quad \text{นั่นคือ มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่ให้ค่า } m \geq 3$$

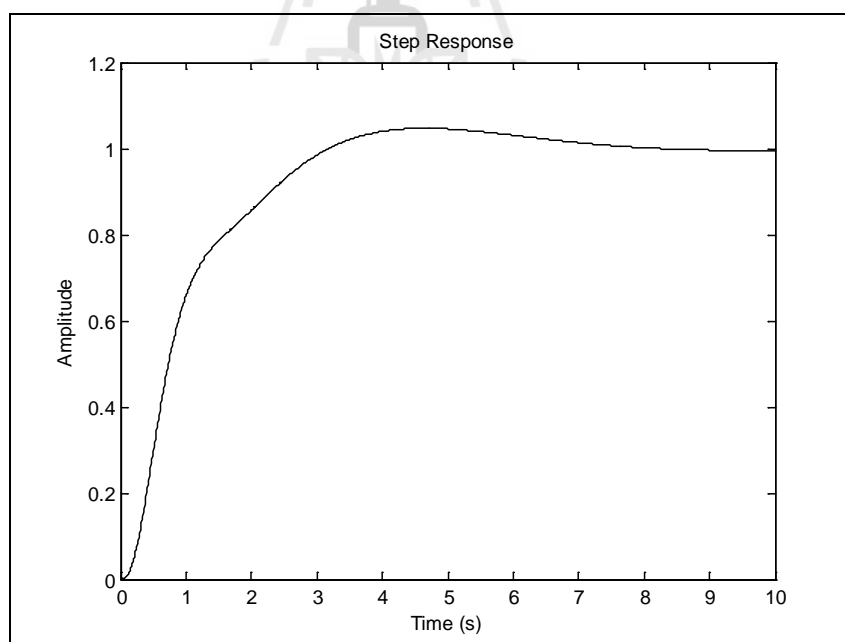


รูปที่ 4.9 แผนภาพโพล์-ซาร์ก เมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s

กรณีให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คือ $-2.25 \pm j2.8041$ และมีค่า $m = 4.64$



รูปที่ 4.10 แผนผังโพลและซีโร เมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s
กรณี $\theta' = \theta$ โดยที่ $K_p = 1.3856$



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองในโดเมนเวลา เมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s
กรณี $\theta' = \theta$ โดยที่ $K_p = 1.3856$

แผนภาพโพล์ซราก เมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s ที่แสดงในรูปที่ 4.9 อธิบายได้ว่า ค่าเกน $K_p = 1.3856$ ที่ทำให้ระบบวงปิดมีมุมของคู่โพล์สังยุคเชิงซ้อนเท่ากับหรือ

ใกล้เกี่ยวกับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่น 4.64 เท่า โดยที่คู่โพลเด่นอยู่ในตำแหน่ง $p_{1,2} = -0.485 \pm j0.603$ และคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนอยู่ในตำแหน่ง $p_{3,4} = -2.25 \pm j2.8041$ คู่โพลทั้งสองมีมุม $\approx \pm 51.2^\circ$ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.10 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่แสดงในรูปที่ 4.11 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุม ให้ผลตอบสนองมี $t_s = 6.67$ s และ $P.O. = 4.8\%$ ซึ่งอยู่ภายในข้อกำหนด

ข้อกำหนด $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5$ s กรณีใกล้จุด breakaway

ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม คือ $K_p = 1.56$ $K_I = 1.4$ และ $K_D = 0.44$

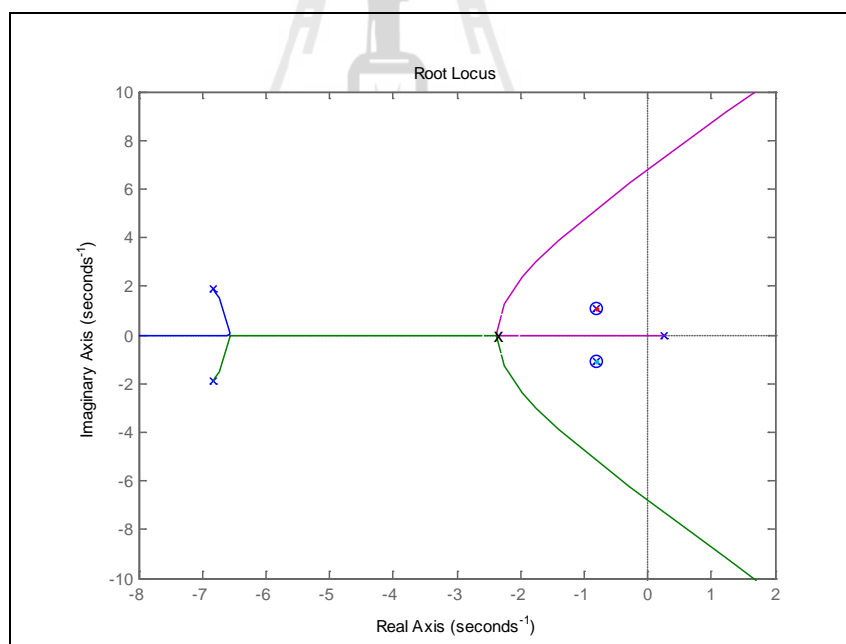
$$A = 0.0749 \quad B = 0.9529 \quad C = -5.8448 \quad D = 3.7514$$

$$E = 0.0156 \quad F = 0.2560 \quad G = 3.0986 \quad H = -2.000$$

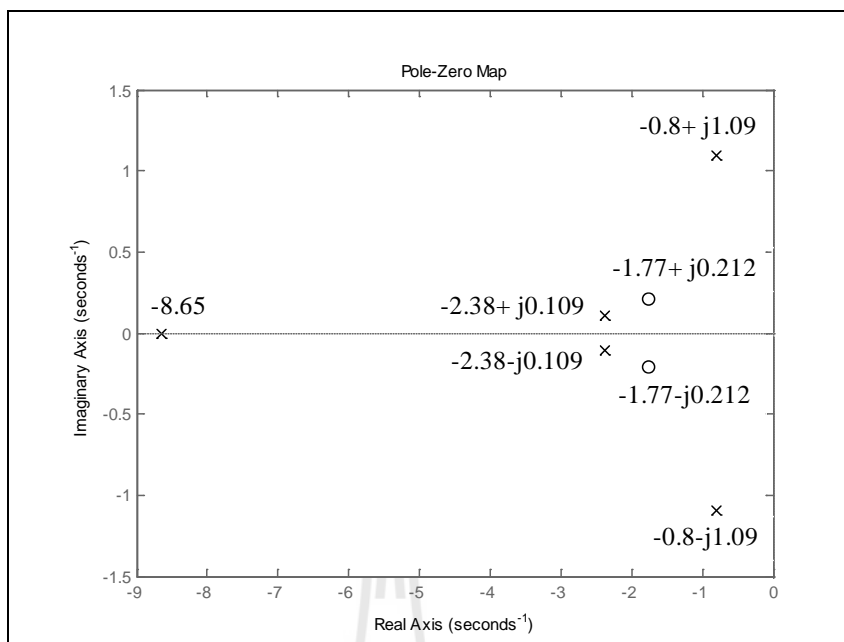
คำตอบของสมการพหุนาม คือ $\omega = -1.0915 \pm j1.6000, 1.0915 \pm j1.6000, \pm j0.5453$

$$\text{จะได้ } p_{1,2} = -0.800 \pm j1.09 \quad p_{3,4} = -2.38 \pm j0.109$$

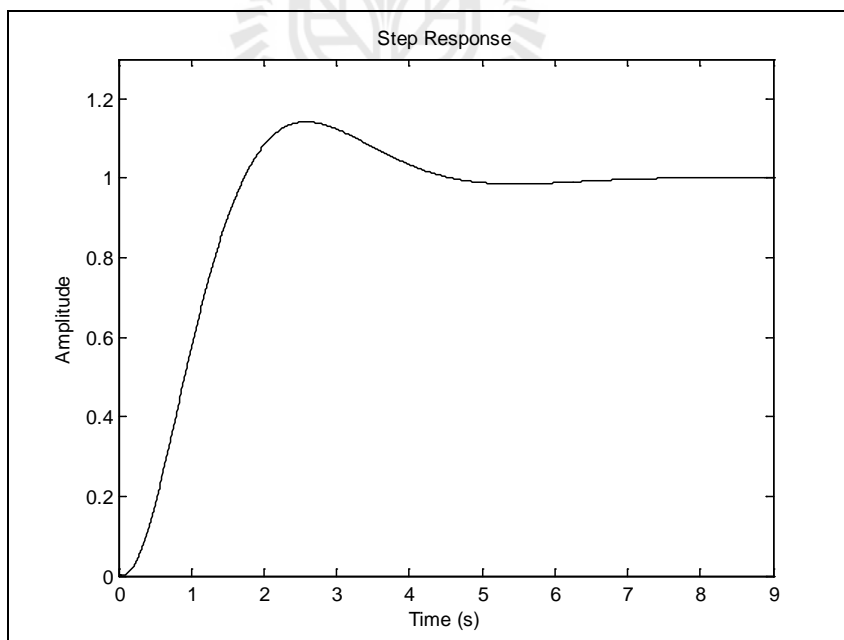
$$m = (2.38 \div 0.8) = 2.975 \quad \text{นั่นคือ ไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่ให้ค่า } m \geq 3$$



รูปที่ 4.12 แผนภาพโกล์สตราค เมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5$ s
ที่จุด Break Away มีค่า $m = 2.97$



รูปที่ 4.13 แผนผังโพลและซีโร เมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5$ s
ที่จุด Break Away โดยที่ $K_p = 1.56$



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาเมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5$ s
ที่จุด Break Away โดยที่ $K_p = 1.56$

แผนภาพโลโก้สกราก เมื่อข้อกำหนด $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 5$ s ที่แสดงในรูปที่ 4.12 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดไม่สามารถมีค่าเกน K_p ใด ๆ ที่ทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่นมากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่า ($m \geq 3$) เพราะคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีขนาดขนาดของส่วนจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ใกล้จุด breakaway) มีขนาดขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่น 2.97 เท่า โดยที่คู่โพลเด่นอยู่ในตำแหน่ง $p_{1,2} = -0.800 \pm j1.09$ และคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนอยู่ในตำแหน่ง $p_{3,4} = -2.38 \pm j0.109$ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.13 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่แสดงในรูปที่ 4.14 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุม ให้ผลตอบสนองมี $t_s = 4.21$ s และ $P.O. = 14.2\%$ ซึ่งปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าข้อกำหนด เพราะผลตอบสนองได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน และได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน ซึ่งมีตำแหน่งใกล้เคียงกันในระนาบเอส

การตรวจสอบคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มี $m \geq 3$ สำหรับแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (ที่ชดเชยพลานต์ 1) ด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม จะสามารถรับรองสมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบวงปิดให้เป็นไปตามที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

4.7 สรุป

บทที่ 4 นี้ได้อธิบายขั้นตอนของแนวทางที่ 4 ที่ใช้ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และแสดงตัวอย่างการออกแบบ ซึ่งเป็นแนวทางที่พัฒนามาจากแนวทางที่ 3 นั่นคือ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม มีทั้งหมด 13 ขั้นตอนการออกแบบ ขั้นตอนก่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนกว่าทุกวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ภายใต้อายุขัยและความยุ่งยากและซับซ้อนที่มากขึ้นสามารถรับรองระบบควบคุมวงปิดว่ามีเสถียรภาพ และให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม นอกจากนี้บทที่ 4 ได้อธิบายการใช้สมการพหุนามตรวจสอบการมีหรือไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่ $m \geq 3$ ซึ่งเกิดจากการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลานต์ 1

บทที่ 5

ผลการจำลองสถานการณ์จากแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลและให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทที่ 5 คือการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต ตัวควบคุมพีไอดีมีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากวิธีการจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ความผิดพลาดกำลังสองรวม (ISE) น้อยที่สุดแบบเหมาะสม (หรือแนวทางที่ 4) ตัวควบคุมพีไอดีมีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากขั้นตอนการออกแบบที่ 1 ถึง 13 ในบทที่ 4 จากนั้นนำตัวควบคุมพีไอดีดังกล่าวเชื่อมต่อเข้ากับพลาเน็ตทำให้เกิดระบบควบคุมวงปิด ต่อมาจำลองสถานการณ์และพิจารณาผลตอบสนองของระบบวงปิดในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงขึ้นบันไดหนึ่งหน่วย รวมถึงพิจารณาเสถียรภาพสัมพัทธ์ นอกจากนี้ได้อธิบายสรุปการนำวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (near minimum ISE) ไปใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยากแต่ละพลาเน็ต

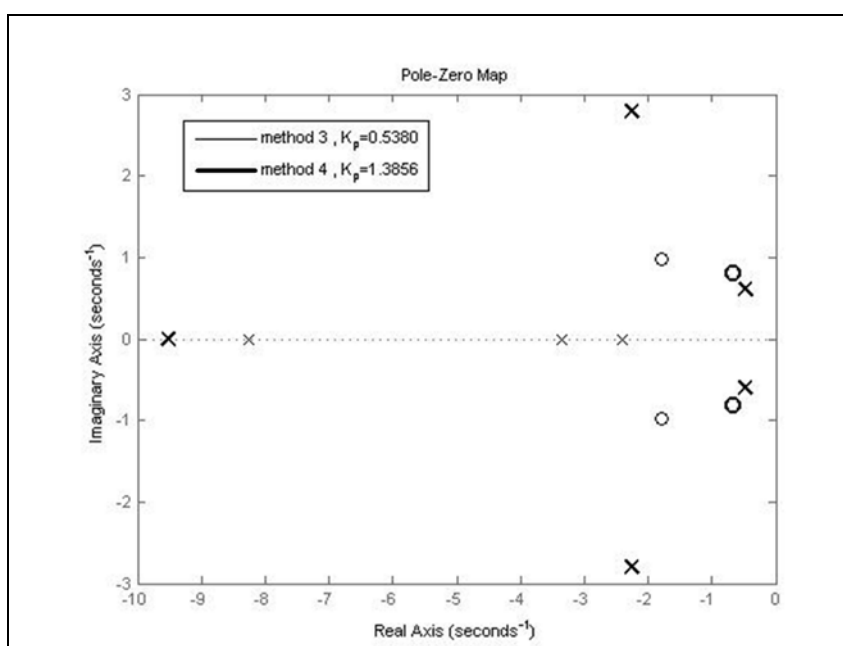
5.2 ผลการจำลองสถานการณ์

ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต ต่อมาจำลองสถานการณ์ระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ตควบคุมยากแต่ละพลาเน็ตและตัวควบคุมพีไอดี ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างผลตอบสนองที่เกิดจากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยแนวทางที่ 3 (ซึ่งนำเสนอไว้ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.2.3) ในกรณีที่ผลตอบสนองมีสมรรถนะดีที่สุดสำหรับแต่ละพลาเน็ต และผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยแนวทางที่ 4 ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ตมีผลการจำลองสถานการณ์ดังนี้

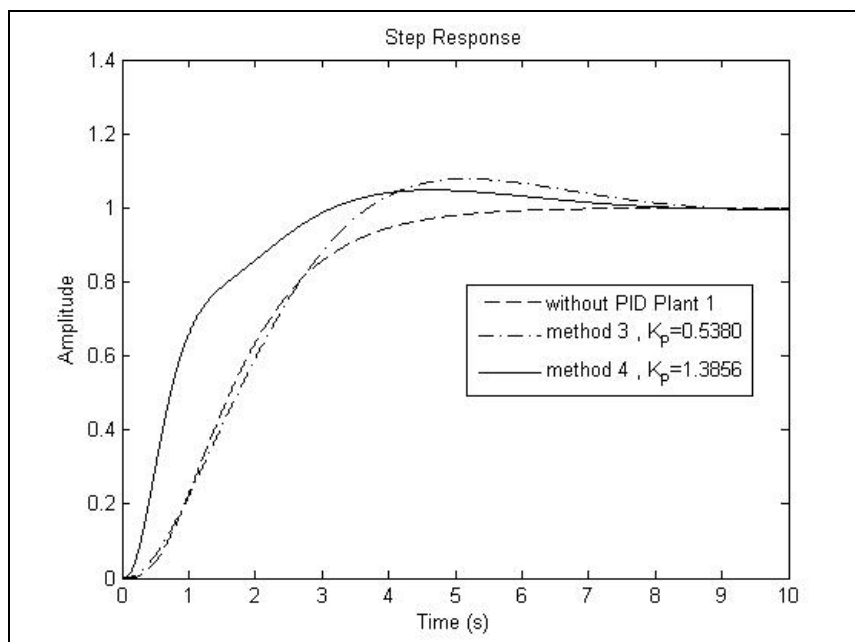
พลาเน็ต 1 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 8.25$ s จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$ เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาเน็ต 1 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 3 จะได้ว่าในกรณีที่ $m = 5$ และ $K_p = 0.5380$ ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีที่สุด จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางที่ 4 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.3 สรุปข้อมูลที่สำคัญได้ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาเน็ต 1)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.5380$	ซีโร : $-1.8 \pm j0.979$ โพล : -8.25 , -3.36 , -2.42 , $-0.485 \pm j0.603$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 1.3856$	ซีโร : $-0.677 \pm j0.816$ โพล : -9.52 , $-2.25 \pm j2.8$, $-0.485 \pm j0.603$

รูปที่ 5.1 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่ $K_p = 0.538$ และ $K_p = 1.3856$

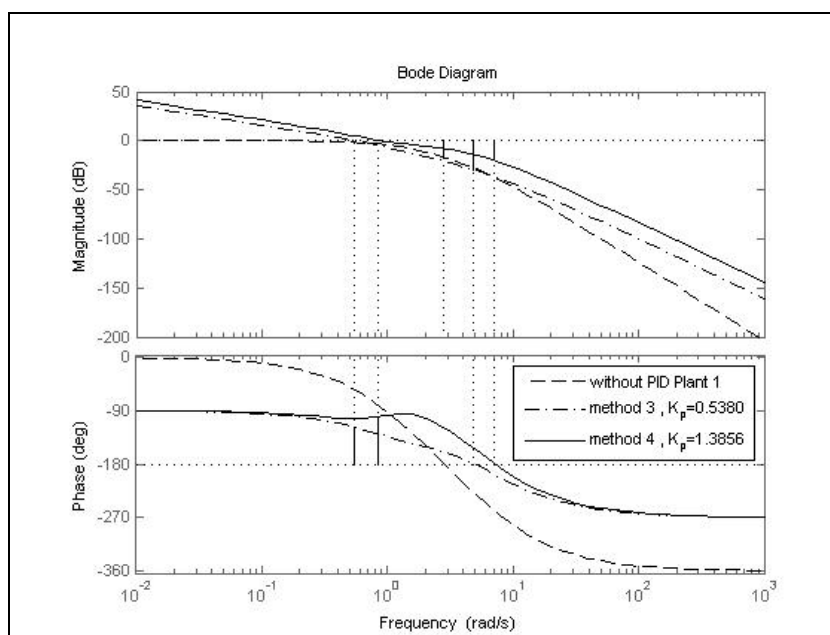
จากข้อมูลในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 อธิบายได้ว่า เมื่อพิจารณาการใช้แนวทางที่ 3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 1 จะได้ว่าระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น $p_{1,2} = -0.4848 \pm j0.6031$ แต่เมื่อพิจารณาการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมที่ชดเชยพลาเน็ต 1 จะได้ว่าระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $p_{3,4} = -2.25 \pm j2.8$ มากกว่าอิทธิพลของคู่โพลเด่น เพราะคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.677 \pm j0.816$ มีตำแหน่งใกล้เคียงกับคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ ทำให้คู่ซีโรดังกล่าวมีอิทธิพลหักล้างอิทธิพลของคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ เป็นผลให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $p_{3,4} = -2.25 \pm j2.8$ มีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า แต่เนื่องจากคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ และคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $p_{3,4}$ มีมุมเท่ากันและคู่โพล $p_{3,4}$ มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ เกินสามเท่า ทำให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะไม่เกินจากข้อกำหนด



รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีนี้ $K_p = 0.5380$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีนี้ $K_p = 1.3856$

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 5.2 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 5.2 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่ 4 ให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีช่วงเวลายื่น ช่วงเวลาเข้าที่ และปริมาณการพุ่งเกินน้อยกว่าผลตอบสนองที่ได้จากแนวทางที่ 3 และผลตอบสนองมีสมรรถนะไม่เกินจากข้อกำหนดที่ใช้ ออกแบบ $t_s \leq 8.25$ วินาที และ $P.O. \leq 8\%$ รวมถึงผลตอบสนองให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยกว่า

พลานต์ (ระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่มีค่าเกน $K_p = 1$) มี $GM = 16.5873$ dB แต่ไม่สามารถหาค่า PM ได้ ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่ 3 ให้ $PM = 61.2^\circ$ และ $GM = 29.6$ dB และระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่ 4 ให้ $PM = 79.3^\circ$ และ $GM = 20.1$ dB นั่นคือระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดี ซึ่งมีความหมายว่าถ้าระบบวงปิดมีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย ซึ่งแสดงผลตอบสนองใน โดเมนความถี่ได้ในแผนภาพโบดรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนภาพโบดของพลานต์ 1 (without PID Plant 1) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีนี้ $K_p = 0.5380$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีนี้ $K_p = 1.3856$

ตารางที่ 5.2 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 1)

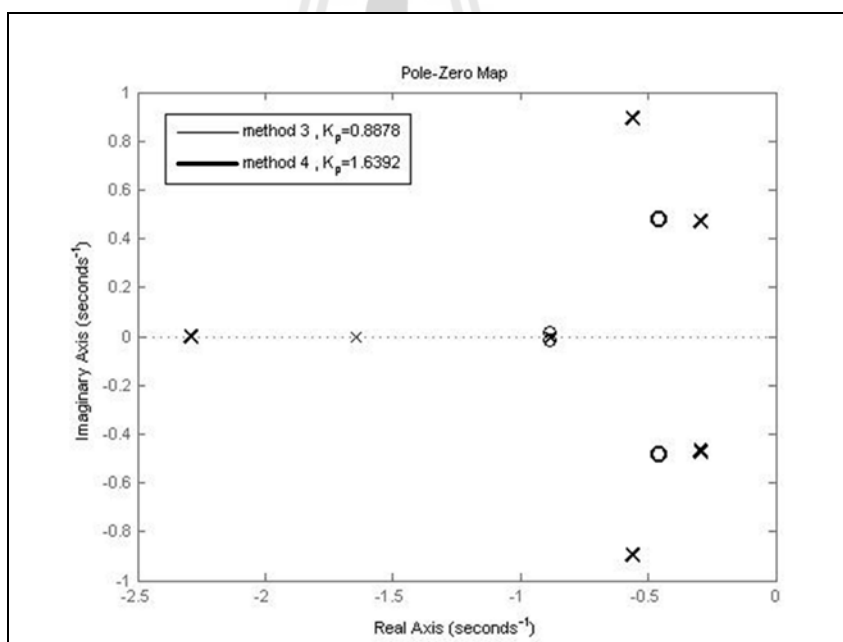
	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่							
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)	ISE
พลานต์	—	—	2.7	5.02	—	16.58	∞	2.8283	0	5.6813
ระบบวงปิด $K_p = 0.5380$	0.6273	0.1495	2.46	7.7	7.83	29.6	61.2	4.88	0.546	1.2997
ระบบวงปิด $K_p = 1.3856$	1.1507	1.0236	2.01	6.67	4.8	20.1	79.3	7.16	0.851	0.6017

เมื่อพิจารณาการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีซดเซพลานต์ 1 จะได้ว่าระบบวงเปิดให้ผลตอบสนองที่มีปริมาณการพุ่งเกินต่ำกว่าและมีช่วงเวลาเข้าที่สั้นกว่าผลตอบสนองที่ได้จากแนวทางที่ 3 และยังให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยกว่ามาก จึงสรุปได้ว่าแนวทางที่ 4 ปรับปรุงสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงปิดที่มีพลานต์ 1 และมีความผิดพลาดกำลังสองรวม น้อยที่สุดแบบเหมาะสม

พลานต์ 2 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 14\%$ และ $t_s \leq 13.59$ s จึงสามารถระบุเป็นคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.2942 \pm j0.4701$ เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วย พลานต์ 2 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 3 จะได้ว่าในกรณีนี้ $m = 3$ และ $K_p = 0.8878$ ให้ผลตอบแทนที่มีสมรรถนะดีที่สุด จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบแทนที่เกิดจากแนวทางที่ 4 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.6 สรุปสมรรถนะได้ดังตารางที่ 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.3 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลานต์ 2)

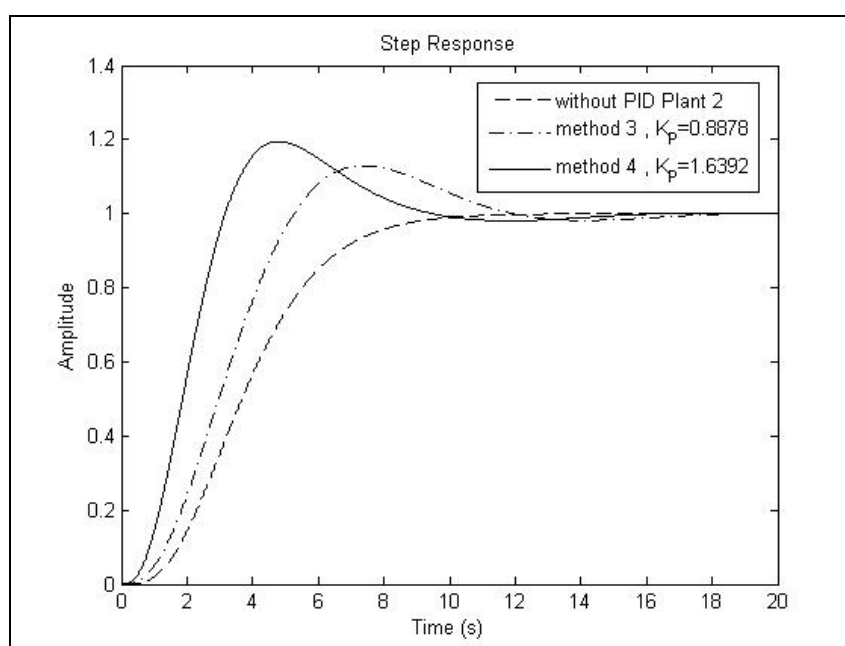
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.8878$	ซีโร : $-0.8882 \pm j0.0172$ โพล : -1.6465 , -0.8858 , -0.8795 , $-0.2942 \pm j0.4701$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 1.6392$	ซีโร : $-0.4613 \pm j0.4798$ โพล : -2.2906 , $-0.5605 \pm j0.8962$, $-0.2942 \pm j0.4701$



รูปที่ 5.4 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีนี้ $K_p = 0.8878$ และ $K_p = 1.6392$

ภายใต้ข้อกำหนดดังกล่าวที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมชดเชยพลานต์ 2 ต้องการให้ระบบวงปิดมีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบซ้ำกัน 2 ตัวที่จุดแยก (breakaway) ของทางเดินรากในตำแหน่งที่ห่างจากแกนจินตภาพไปทางซ้ายของระนาบเอสเป็นจำนวนสามเท่า ($m = 3$) ของขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่น ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 (หน้า 83 – 84) ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่สามให้คู่

โพลเด่น และ โพลจริงอื่น ๆ อยู่ในตำแหน่งตามที่ต้องการ ทำให้ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลเด่น แต่ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่ 4 ได้เปลี่ยนโพลที่เป็นจำนวนจริงลบซ้ำกันที่จุดแยกนี้ให้กลายเป็นคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีระยะห่างจากแกนจินตภาพน้อยกว่า 3 เท่าของขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่น ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.4 และในตารางที่ 5.3 ทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.5605 \pm j0.8962$ คู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.4613 \pm j0.4798$ และคู่โพลเด่น $-0.2942 \pm j0.4701$ ทำให้ผลตอบสนองมี *P.O.* สูงกว่าข้อกำหนด

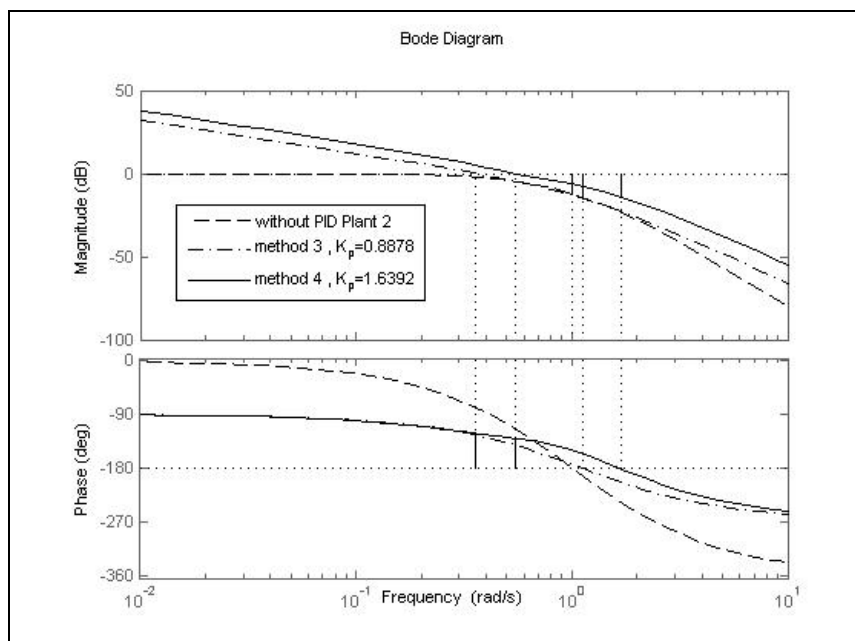


รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม กรณีที่ $K_p = 0.8878$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่ $K_p = 1.6392$

ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.5 อธิบายได้ว่า ระบบวงปิดให้สมรรถนะของผลตอบสนองในโดเมนเวลามีช่วงเวลายื่นสั้นกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากพลานต์ แนวทางที่ 3 ให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลายื่นเข้าที่ และปริมาณการพุ่งเกินอยู่ภายในข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ แนวทางที่ 4 มีช่วงเวลายื่น และช่วงเวลายื่นเข้าที่สั้นที่สุด แต่มีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าข้อกำหนด

ผลตอบสนองในโดเมนความถี่เมื่อพิจารณาความถี่พลาตกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (แนวทางที่ 4) พบว่า ระบบวงปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเฟสน้อยกว่าส่วนเพื่อ

อัตราขยายและส่วนเฟสที่ เกิดจากแนวทางที่สาม แต่ระบบวงปิดทั้งสองยังคงมีเสถียรภาพ สัมพัทธ์ที่ดี สามารถแสดงผลตอบสนองในโดเมนความถี่ได้ดังในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แผนภาพโบดของพลานต์ 2 (without PID Plant 2) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่ $K_p = 0.8878$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่ $K_p = 1.6392$

ตารางที่ 5.4 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 2)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่							
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)	ISE
พลานต์	—	—	4.94	9.08	—	12.0412	∞	1	0	6.5416
ระบบวงปิด $K_p = 0.8878$	0.3944	0.4998	3.3	11.1	13	14.9849	54.9345	1.1240	0.3598	2.3333
ระบบวงปิด $K_p = 1.6392$	0.7871	1.7769	1.97	8.67	19.5	13.7341	49.2467	1.6793	0.5511	1.5319

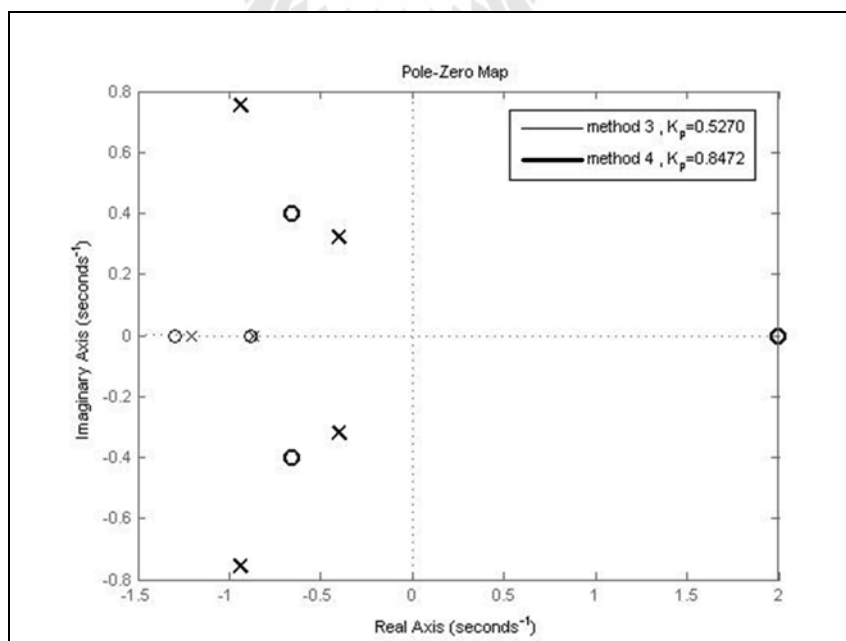
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแนวทางที่ 3 และผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแนวทางที่ 4 ที่พิจารณาเฉพาะความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบ

เหมาะสม จะได้ว่าผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางที่ 4 ให้สมรรถนะมีช่วงเวลาขึ้น และช่วงเวลาที่เข้าที่สั้นกว่า แต่มีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า และยังมีควมผิดพลาดกำลังสองรวมต่ำกว่า ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมชดเชยพลานต์ 2 จะทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่รวดเร็วกว่าและความผิดพลาดกำลังสองรบน้อยกว่าผลตอบสนองที่ได้จากแนวทางที่ 3 ซึ่งได้อธิบายก่อนหน้านี

พลานต์ 3 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 2\%$ และ $t_s \leq 10$ s จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.4000 \pm j0.3212$ เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลานต์ 3 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 3 จะได้ว่าในกรณีที่มี $m = 3$ และ $K_p = 0.5270$ ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีที่สุด จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางที่ 4 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.9 สรุปข้อมูลที่สำคัญได้ดังตารางที่ 5.5 และ 5.6

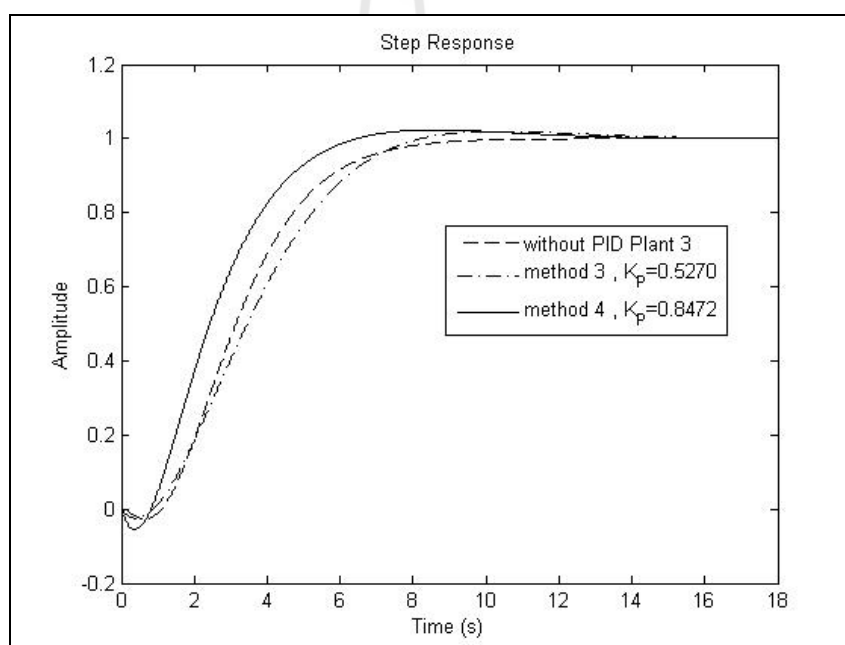
ตารางที่ 5.5 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลานต์ 3)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.5270$	ซีโร : -1.2976 , -0.8825 , 2.0000 โพล : -1.2097 , -0.8694 , -0.4000 \pm j0.3212
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 0.8472$	ซีโร : 2.0000 , -0.6598 \pm j0.3999 โพล : -0.9395 \pm j0.7545 , -0.4000 \pm j0.3212



รูปที่ 5.7 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่มี $K_p = 0.5270$ และ $K_p = 0.8472$

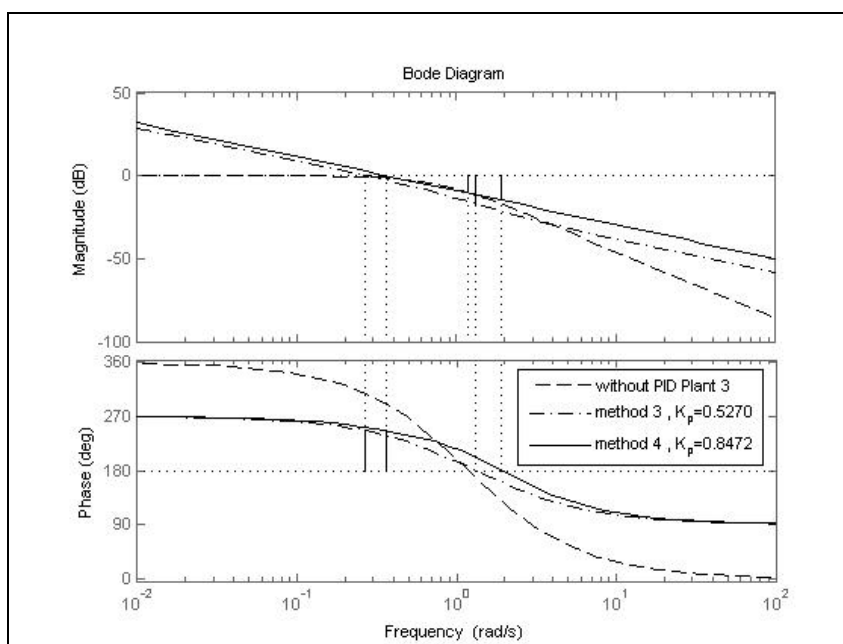
จากข้อมูลในตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.7 อธิบายได้ว่า การใช้แนวทางที่ 3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ซดเซพลาคด์ 3 จะทำให้ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่น $p_{1,2} = -0.4000 \pm j0.3212$ คือคู่โพลเด่นที่แท้จริง เพราะโพลที่เป็นจำนวนจริงลบ -0.8694 มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับซีโรที่เป็นจำนวนจริงลบ -0.8825 ทำให้โพลและซีโรดังกล่าวมีอิทธิพลหักล้างซึ่งกันและกัน และโพลที่เป็นจำนวนจริงลบ -1.2097 มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจริงของคู่โพลเด่นสามเท่า และเมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (แนวทางที่ 4) จะได้ว่าระบบวงปิดมีคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.6598 \pm j0.3999$ อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับคู่โพลเด่น $p_{1,2} = -0.4000 \pm j0.3212$ แต่ไม่อยู่ในบริเวณที่ใกล้กันมากจนทำให้คู่โพลเด่นและคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนมีอิทธิพลหักล้างซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือคู่โพลเด่น คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน และคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนมีอิทธิพลถึงผลตอบสนอง ทำให้ผลตอบสนองมี *P.O.* สูงกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย



รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่มี $K_p = 0.5270$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 0.8472$

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 5.8 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 5.6 อธิบายได้ว่า การใช้แนวทางที่ 3 ออกแบบตัวควบคุมในกรณีที่มี $K_p = 0.527$ ได้ให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่มีช่วงเวลายื่นนานกว่าพลานต์เล็กน้อย ($t_r = 4.64 \text{ s} > 4.1 \text{ s}$) แต่มีช่วงเวลาเข้าที่และปริมาณการพุ่งเกินอยู่ภายในข้อกำหนด ($t_s = 7.57 \text{ s}$)

< 10 s และ $P.O. = 1.98\% < 2\%$) เมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสมในกรณีนี้ที่ $K_p = 0.8472$ ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มี t_r สั้นกว่าผลตอบสนองของพลานต์และแนวทางที่ 3 มี t_s นานกว่า แต่ยังคงอยู่ภายในข้อกำหนด ($t_s = 9.60$ s < 10 s) และมี $P.O.$ สูงกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย ($P.O. = 2.33\% > 2\%$) (ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะนี้คือผลตอบสนองแบบเรียบ (smooth response))



รูปที่ 5.9 แผนภาพโบคของพลานต์ 3 (without PID Plant 3) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีนี้ที่ $K_p = 0.5270$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีนี้ที่ $K_p = 0.8472$

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในโดเมนความถี่ที่แสดงในรูปที่ 5.9 จะอธิบายได้ว่าพลานต์ (ระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่มีค่าเกน $K_p = 1$) มี $GM = 10.1$ dB แต่ไม่สามารถหาค่า PM ได้ เมื่อพิจารณาแนวทางที่ 3 ระบบวงปิดมี $PM = 65.8749^\circ$ และ $GM = 16.896$ dB และเมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (แนวทางที่ 4) ระบบวงปิดมี $PM = 65.8990^\circ$ และ $GM = 14.6732$ dB นั่นคือระบบวงปิดแต่ละระบบมี PM และ GM อยู่ในเกณฑ์ดี แต่ในแนวทางที่ 3 และในแนวทางที่ 4 ที่พิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ระบบวงปิดมี GM มากกว่า GM ของพลานต์ ซึ่งหมายความว่าระบบวงปิดนี้มีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีกว่า และถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบจะไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่าย

พลาตันต์มีค่า $ISE = 6.3948$ ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แนวทางที่ 3 ให้ค่า $ISE = 2.7396$ และเมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ค่า $ISE = 2.0210$ จะได้ว่าระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่ 4 มีค่า ISE น้อยกว่าค่า ISE ของพลาตันต์มาก และน้อยกว่าค่า ISE ที่ได้จากแนวทางที่ 3 ดังนั้นเมื่อพิจารณาการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาตันต์ 3 จะได้ว่าระบบวงปิดให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลายื่นสั้นกว่า และมีช่วงเวลาย้ำที่ไม่มากกว่าข้อกำหนด แต่มีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย และให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมต่ำกว่าแนวทางที่ 3 สรุปข้อมูลที่สำคัญได้ดังตารางที่ 5.6

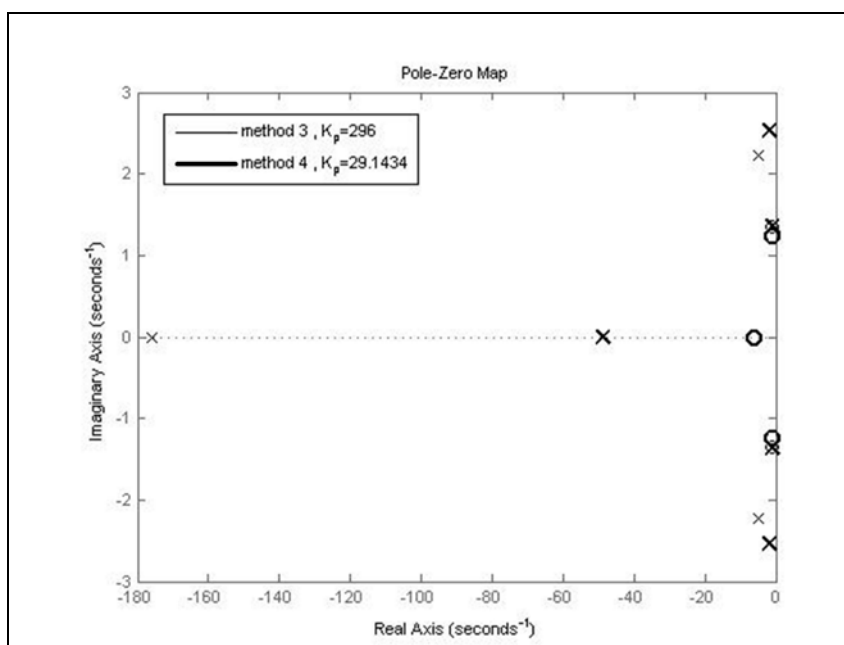
ตารางที่ 5.6 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลาตันต์ 3)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่							
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)	ISE
พลาตันต์	–	–	4.1	7.91	–	10.10	∞	1.1832	0	6.3948
ระบบวงปิด $K_P = 0.5270$	0.2768	0.2417	4.64	7.57	1.98	16.896	65.8749	1.3137	0.2686	2.7396
ระบบวงปิด $K_P = 0.8472$	0.3821	0.6420	3.48	9.6	2.33	14.6732	65.8990	1.8998	0.3613	2.0210

พลาตันต์ 4 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ข้อกำหนดคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 4$ s จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -1.0000 \pm j1.3644$ เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลาตันต์ 4 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 3 จะได้ว่า ในกรณีนี้ $m = 5$ และ $K_P = 296$ ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีที่สุด จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางที่ 4 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.12 สรุปข้อมูลที่สำคัญได้ดังตารางที่ 5.7 และ 5.8

ตารางที่ 5.7 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลาตันต์ 4)

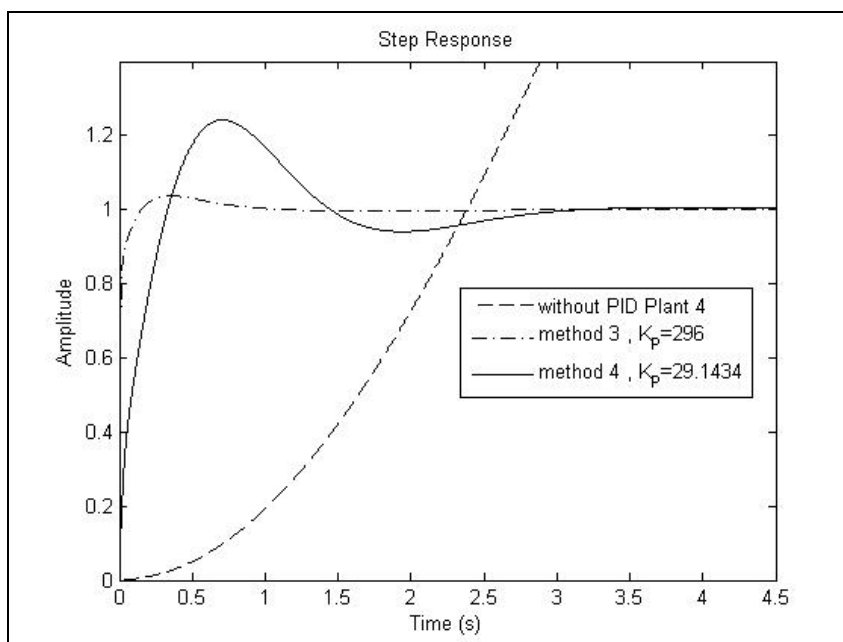
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_P = 296$	ซีโร : -6 , -6 , -0.9882 \pm j1.3521 โพล : -175.7500 , -5.0123 \pm j2.2239 , -1.0000 \pm j1.3644
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_P = 29.1434$	ซีโร : -6 , -6 , -0.8915 \pm j1.2430 โพล : -48.6268 , -1.8595 \pm j2.5371 , -1.0000 \pm j1.3644



รูปที่ 5.10 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่ $K_p = 296$ และ $K_p = 29.1434$

จากข้อมูลในตารางที่ 5.7 และในรูปที่ 5.10 อธิบายได้ว่า เนื่องจากพลานต์มีตัวอินทิเกรต พลานต์จึงมีโพลที่จุดกำเนิด และพลานต์มีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบ -1 ซ้ำกันสองตัว ซึ่งอยู่ใกล้แกนจินตภาพ มีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบ -36 จำนวนหนึ่งตัว และมีซีโรที่เป็นจำนวนจริงลบ -6 ซ้ำกันสองตัว แนวทางที่ 3 ไม่สามารถทำให้คู่โพล $p_{1,2} = -1.0000 \pm j1.3644$ เป็นคู่โพลเด่นที่แท้จริงได้ เพราะคู่ซีโร $-0.9882 \pm j1.3521$ หักล้างอิทธิพลคู่โพล $p_{1,2}$ ทำให้คู่โพล $-5.0123 \pm j2.2239$ มีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า เนื่องจากคู่โพล $-5.0123 \pm j2.2239$ มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าขนาดของส่วนจินตภาพ (คู่โพลมีมุมน้อยกว่า 45°) และมีตำแหน่งห่างจากแกนจินตภาพไกลกว่าคู่โพลเด่นมากกว่าสามเท่า ทำให้ระบบวงปิดมีสมรรถนะของผลตอบสนองไม่มากกว่าข้อกำหนด แต่เมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (แนวทางที่ 4) จะได้ว่าคู่โพล $p_{1,2} = -1.0000 \pm j1.3644$ ไม่สามารถเป็นคู่โพลเด่นที่แท้จริงได้ เพราะคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.8915 \pm j1.2430$ มีตำแหน่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียง ทำให้คู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนและคู่โพลเด่นมีอิทธิพลหักล้างกันบางส่วน คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-1.8595 \pm j2.5371$ จึงมีอิทธิพลถึงผลตอบสนองมากกว่า เนื่องจากคู่โพล $-1.8595 \pm j2.5371$ มีขนาดของส่วนจริงน้อยกว่าขนาดของส่วนจินตภาพ (คู่โพลมีมุมมากกว่า 45°) และมีตำแหน่งอยู่ห่างจากแกนจินตภาพไกล

กว่าคู่โพลเด่นน้อยกว่าสามเท่า ทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน คู่โพลเด่น และคู่ซิงโครไนซ์เชิงซ้อน นั่นคือผลตอบสนองมีปริมาณการพุ่งเกินมากกว่าข้อกำหนด

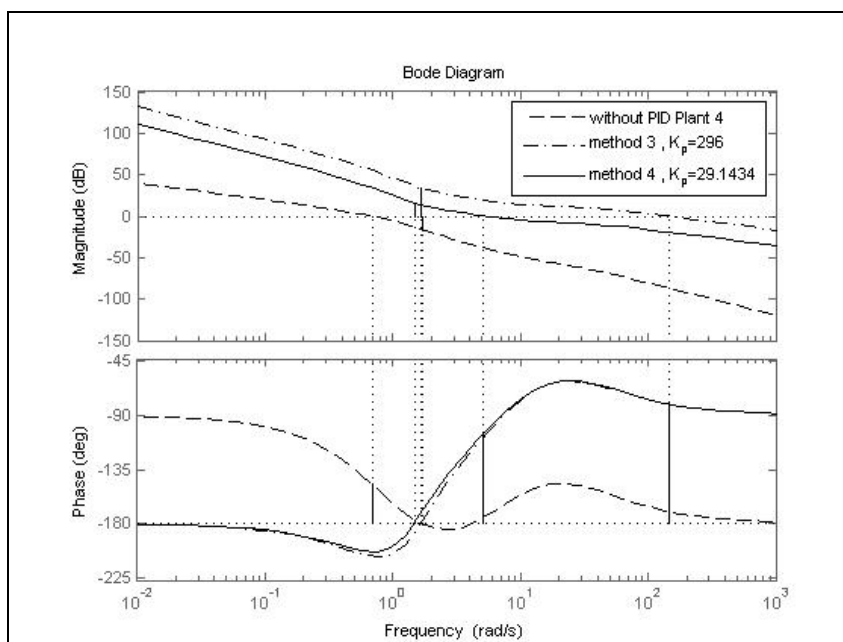


รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม กรณีที่ $K_p = 296$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่ $K_p = 29.1434$

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 5.11 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 5.8 อธิบายได้ว่าพลานต์ขาดเสถียรภาพ เพราะพลานต์เป็นระบบแบบชนิดหนึ่ง (type 1 system) กล่าวคือถ้าสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณอินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย พลานต์จะให้ผลตอบสนองที่มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะไม่มีขอบเขต แต่เมื่อใช้แนวทางที่ 3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีในกรณีที่ $K_p = 296$ จะได้ว่าผลตอบสนองมีสมรรถนะดีขึ้น กล่าวคือผลตอบสนองมี $t_r = 0.038$ วินาที $t_s = 0.644$ วินาที และ $P.O. = 3.72\%$ ซึ่งอยู่ภายในข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ ($t_s \leq 4$ วินาที และ $P.O. \leq 10\%$) และเมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสมในกรณีที่ $K_p = 29.1434$ ผลตอบสนองมี $t_r = 0.262$ วินาที $t_s = 2.66$ วินาที และ $P.O. = 24.2\%$

ระบบวงเปิดที่ประกอบด้วยพลานต์และตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่มีค่าเกน $K_p = 1$ มี $PM = 32.9509^\circ$ และ $GM = 15.6280$ dB แนวทางที่ 3 ให้ระบบวงปิดมี $PM = 99.1759^\circ$ และ $GM = -34.0436$ dB และเมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (แนวทางที่

4) ระบบวงปิดมี $PM = 74.1402^\circ$ และ $GM = -16.3910$ dB นั่นคือระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีทำให้ PM อยู่ในเกณฑ์ดี แต่ GM มีค่าติดลบ ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบวงปิดมีหรือไม่ มีเสถียรภาพสัมพัทธ์ แสดงผลตอบสนองในโดเมนความถี่ได้ดังในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แผนภาพโบคของพลานต์ 4 (without PID Plant 4) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีนี้ $K_p = 296$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีนี้ $K_p = 29.1434$

ตารางที่ 5.8 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 4)

	ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่							
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)	ISE
พลานต์	—	—	—	—	—	15.6280	32.9509	1.6901	0.6877	∞
ระบบวงปิด $K_p = 296$	420.0529	149.7741	0.038	0.644	3.72	-34.0436	99.1759	1.6697	145.6313	0.0049
ระบบวงปิด $K_p = 29.1434$	38.2448	16.3458	0.262	2.66	24.2	-16.3910	74.1402	1.4755	5.1309	0.0902

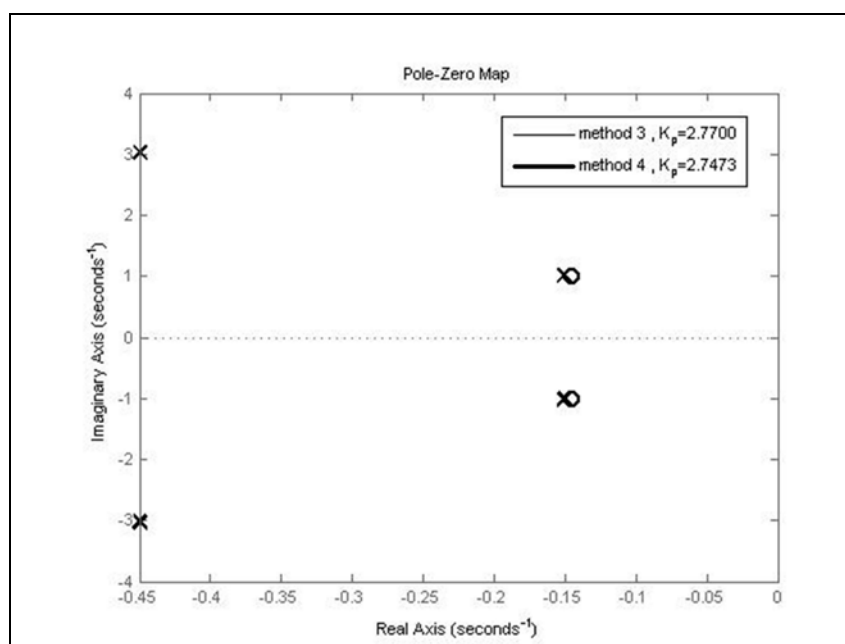
เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ของระบบวงปิดที่เกิดจากการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมชดเชยพลานต์ 4 จะอธิบายได้ว่าไม่สามารถคำนวณหาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดได้ เพราะถ้าค่าเกน K_p มีค่าเพิ่มขึ้น โพลสังยุคเชิงซ้อน 1 คู่ จะมีตำแหน่งเข้าใกล้คู่ซีโร $z_{1,2} = -6$ มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนจะมีตำแหน่งเข้าใกล้ตำแหน่งของคู่โพลเด่นมากขึ้น ทำให้เกิดการหักล้างอิทธิพลซึ่งกันและกันระหว่างคู่โพลสองคู่นี้และคู่ซีโรสองคู่นี้ได้มากขึ้น เนื่องจากพลานต์ 4 คือพลานต์ที่มีอันดับสี่ ทำให้ระบบวงปิดมีโพลทั้งหมด 5 ตัว เมื่อค่าเกน K_p มีค่าสูงมาก ระบบวงปิดจึงมีผลตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากโพลที่เป็นจำนวนจริงลบโพลเดียวมากกว่า และโพลดังกล่าวจะมีตำแหน่งห่างออกจากแกนจินตภาพไปทางซ้ายของระนาบเอสมากขึ้น ทำให้ระบบวงปิดมีพฤติกรรมคล้ายกับระบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา (time constant) น้อยมาก นั่นคือเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยถึงระบบวงปิด ผลตอบสนองที่ได้จึงเหมือนกับสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยมาก ซึ่งหมายความว่าผลตอบสนองมีความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถหาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดได้ เพราะถ้าค่าเกน K_p มีค่าสูงกว่า ผลตอบสนองจะมีความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยกว่า แต่ยังคงพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสมได้ แนวทางที่ 3 ให้ค่า $ISE = 0.0049$ และเมื่อพิจารณาความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม จะได้ว่า $ISE = 0.0902$ ดังนั้นการใช้วิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลานต์ 4 จะทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองช้ากว่า มีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า และมีความผิดพลาดกำลังสองรวมมากกว่าการใช้แนวทางที่ 3

หมายเหตุ ค่าคงตัวเวลา (time constant) คือ $\frac{1}{|p_1|}$ โดยที่ p_1 คือโพลที่เป็นจำนวนจริงลบที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพมาทางด้านซ้ายของระนาบเอส ถ้า $|p_1|$ มีค่ามาก จะทำให้ค่าคงตัวเวลา $\frac{1}{|p_1|}$ มีค่าน้อยมาก

พลานต์ 5 ภายใต้ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบคือ $P.O. \leq 62.666076\%$ และ $t_s \leq 26.6$ s จึงระบุคู่โพลเด่นได้ว่า $p_{1,2} = -0.1504 \pm j1.0108$ เมื่อพิจารณาระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลานต์ 5 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกนที่คำนวณได้จากแนวทางที่ 3 จะได้ว่าในกรณีที่มี $m = 3$ และ $K_p = 2.7700$ ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีที่สุด จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางที่ 4 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.15 สรุปข้อมูลที่สำคัญได้ดังตารางที่ 5.9 และ 5.10

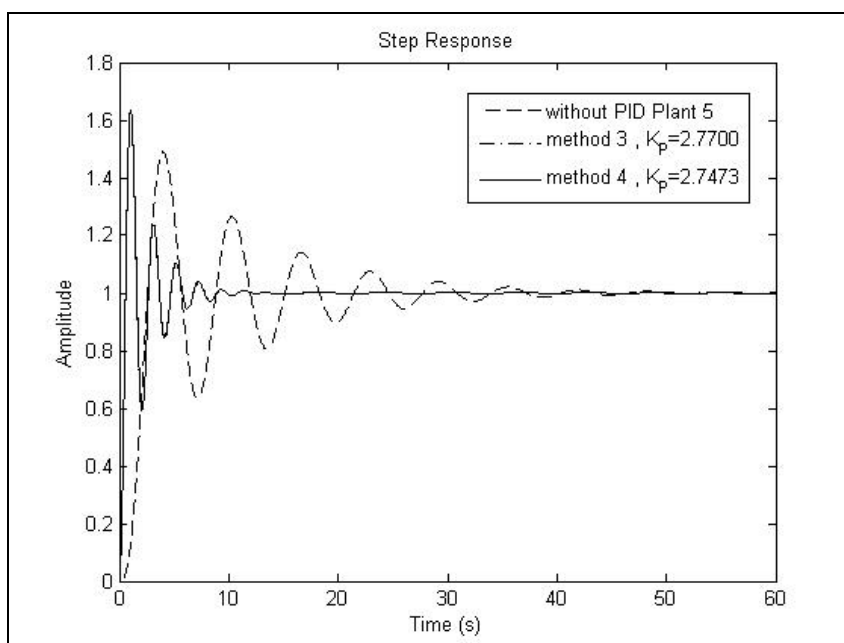
ตารางที่ 5.9 ซีโรและโพลของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี (พลานต์ 5)

ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 2.7700$	ซีโร : $-0.1454 \pm j1.0053$ โพล : $-0.4496 \pm j3.0348$, $-0.1504 \pm j1.0108$
ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมและ $K_p = 2.7473$	ซีโร : $-0.1453 \pm j1.0053$ โพล : $-0.4496 \pm j3.0224$, $-0.1504 \pm j1.0108$



รูปที่ 5.13 แผนผังโพลและซีโรของระบบวงปิด ในกรณีที่มี $K_p = 2.7700$ และ $K_p = 2.7473$

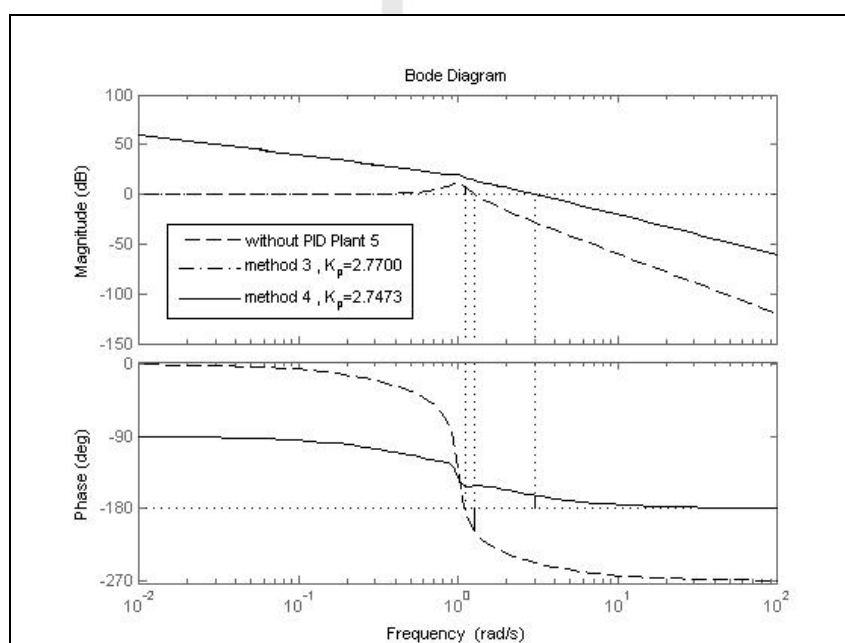
จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 5.9 และในรูปที่ 5.13 อธิบายได้ว่า การใช้แนวทางที่ 3 ออกแบบตัวควบคุม จะทำให้ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่น $p_{1,2} = -0.1504 \pm j1.0108$ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นแท้จริงได้ เพราะคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.1454 \pm j1.0053$ มีตำแหน่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน ทำให้คู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อนและคู่โพลเด่นมีอิทธิพลหักล้างซึ่งกันและกัน เป็นผลให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.4496 \pm j3.0348$ มีอิทธิพลถึงผลตอบสนองแทนที่คู่โพลเด่น $p_{1,2}$ และ การใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุม จะทำให้ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่น $p_{1,2} = -0.1504 \pm j1.0108$ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นแท้จริงได้เช่นเดียวกัน เพราะคู่ซีโรสังยุคเชิงซ้อน $-0.1453 \pm j1.0053$ มีอิทธิพลหักล้างอิทธิพลของคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ ทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.4496 \pm j3.0224$ มีอิทธิพลถึงผลตอบสนองแทนที่คู่โพล $p_{1,2}$ นั่นคือการใช้แนวทางที่ 3 และแนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมที่ซัดเซพลาเน็ต 5 จะทำให้ระบบวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากแกนจินตภาพมาทางด้านซ้ายไกลกว่าคู่โพลเด่น $p_{1,2}$ เป็นผลให้ระบบวงปิดมีช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองสั้นกว่าข้อกำหนด



รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และของระบบวงปิด (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีนี้ $K_p = 2.7700$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีนี้ $K_p = 2.7473$

ผลการจำลองสถานการณ์ของพลานต์และระบบวงปิดที่แสดงในรูปที่ 5.14 และสมรรถนะของผลตอบสนองที่แสดงในตารางที่ 5.10 อธิบายได้ว่า พลานต์คือระบบอันดับสามที่มีผลตอบสนองเกิดการแกว่ง (oscillation) และผลตอบสนองมี $t_r = 1.5$ วินาที $t_s = 35.9$ วินาที และ $P.O. = 49\%$ เนื่องจากพลานต์มีโพลที่เป็นจำนวนจริงลบ -1 และคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน $-0.1000 \pm j0.9950$ ที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมาก ถ้าพลานต์มีการรบกวนจากภายนอกหรือมีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง พลานต์จะมีโอกาสขาดเสถียรภาพได้ง่าย เมื่อพิจารณาผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางที่ 3 ในกรณีนี้ $K_p = 2.7700$ และแนวทางที่ 4 ในกรณีนี้ $K_p = 2.7473$ ระบบวงปิดทั้งสองให้ผลตอบสนองที่มี t_r และ t_s สั้นกว่า แต่มี $P.O.$ สูงกว่าผลตอบสนองของพลานต์ และระบบวงปิดทั้งสองยังคงให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะไม่เกินจากข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ

ระบบวงเปิดที่ประกอบด้วยพลานต์และตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่มีค่าเกน $K_p = 1$ มี $PM = -27.719^\circ$ และ $GM = -7.1306$ dB ค่าลบของ PM และ GM ทั้งคู่มีความหมายว่าระบบวงปิดที่ประกอบด้วยพลานต์และตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่มีค่าเกน $K_p = 1$ ขาดเสถียรภาพ เมื่อใช้แนวทางที่ 3 ออกแบบตัวควบคุม ระบบวงปิดมี $PM = 16.4508^\circ$ แต่ไม่สามารถหาค่า GM ได้ และเมื่อใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุม ระบบวงปิดมี $PM = 16.5143^\circ$ แต่ไม่สามารถหาค่า GM ได้ เช่นเดียวกัน นั่นคือระบบวงปิดมี PM น้อย และมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ไม่ดี ซึ่งหมายความว่าถ้ามีการรบกวนจากภายนอก ระบบวงปิดจะขาดเสถียรภาพได้ง่าย แสดงผลตอบสนองในโดเมนความถี่ได้ดังในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แผนภาพโบคของพลานต์ 5 (without PID Plant 5) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) จากแนวทางที่สาม ในกรณีที่มี $K_p = 2.7700$ และแนวทางที่สี่ ในกรณีที่มี $K_p = 2.7473$

ตารางที่ 5.10 ค่าเกนของตัวควบคุม สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (พลานต์ 5)

	ค่าเกนของตัวควบคุม		สมรรถนะในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่							
	K_I	K_D	t_r (s)	t_s (s)	$P.O.$ (%)	GM (dB)	PM (deg)	ω_g (rad/s)	ω_p (rad/s)	ISE
พลานต์	—	—	1.5	35.9	49	-7.1306	-27.719	1.0955	1.2534	17.059

ระบบวงปิด $K_p = 2.7700$	9.8306	9.5273	0.379	8.58	62.7	∞	16.4508	∞	3.0054	0.6150
ระบบวงปิด $K_p = 2.7473$	9.7518	9.4518	0.381	8.61	62.6	∞	16.5143	∞	2.9928	0.6154

นอกจากนี้พลาเน็ตให้ผลตอบสนองที่มีค่า $ISE = 17.059$ ที่ค่อนข้างสูง แต่แนวทางที่ 3 ให้ค่า $ISE = 0.6150$ และแนวทางที่ 4 ให้ค่า $ISE = 0.6154$ ที่น้อยกว่าค่า ISE ของพลาเน็ต ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 3 และแนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ต 5 จะทำให้ระบบวงปิดมีสมรรถนะของผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกันหรือเหมือนกัน

5.3 สรุป

บทที่ 5 ได้นำเสนอการใช้วิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (near minimum ISE) หรือแนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต ระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางนี้อาจจะให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าหรือดีน้อยกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้แนวทางที่ 3 และอาจทำให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะเกินข้อกำหนดหรือไม่มากกว่าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ เพราะแนวทางที่ 4 ใช้อัลกอริทึมหรือระเบียบวิธีบางวิธีค้นหาคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีตำแหน่งอยู่บนทางเดินรากหรือทางเดินโพลของระบบวงปิด ระเบียบวิธีดังกล่าวต้องการขอบเขตเริ่มต้นของการค้นหาซึ่งเป็นทางเดินรากที่อยู่ในบริเวณด้านซ้ายของแกนจินตภาพบนระนาบเอส ทำให้คู่โพลสังยุคเชิงซ้อนไม่มีตำแหน่งอยู่ในบริเวณด้านขวาของแกนจินตภาพ เป็นผลให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพ อัลกอริทึมสองอัลกอริทึมที่ทำหน้าที่ค้นหาคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนคือระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม (cubic search method) ที่ใช้ฟังก์ชันกำลังสามหรือพหุนามอันดับสามประมาณค่า และระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี (Fibonacci search method) หรือวิธีการค้นหาตามกริดที่ใช้การคำนวณค่าฟังก์ชันที่จุดต่าง ๆ จากการสร้างกริดและการเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันทุกจุดบนกริดที่สร้างขึ้น การใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต จะสรุปได้ดังนี้

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลาเน็ต 1 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 4 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาจะมีสมรรถนะไม่มากกว่าข้อกำหนด มี t_r , t_s และ $P.O.$ น้อยกว่า และให้ค่า ISE น้อยกว่าผลตอบสนองที่ได้จากการใช้แนวทางที่ 3 นั่นคือผลตอบสนองมี

สมรรถนะดีกว่า และระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีขึ้น ดังนั้นแนวทางที่ 4 จะปรับปรุงสมรรถนะของผลตอบสนองระบบวงปิดที่มีพลานต์ 1

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลานต์ 2 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 4 ในกรณีที่ $m = 3$ ผลตอบสนองมี *P.O.* เกินกว่าข้อกำหนด แต่ให้ค่า ISE น้อยกว่าผลตอบสนองที่ได้จากการใช้แนวทางที่ 3 เพราะคู่โพลตั้งขั้วเชิงซ้อนมีระยะห่างจากแกนจินตภาพน้อยกว่า 3 เท่าของขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่น ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมชดเชยพลานต์ 2 จะทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่รวดเร็วกว่าผลตอบสนองที่ได้จากแนวทางที่ 3 แต่มีปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลานต์ 3 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 4 ผลตอบสนองจะมี t_r สั้นกว่าผลตอบสนองของพลานต์และผลตอบสนองที่เกิดจากแนวทางที่ 3 แต่มี t_s นานกว่า ผลตอบสนองให้ค่า ISE น้อยกว่า และมี t_s ไม่เกินจากข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ ($t_s = 9.60 \text{ s} < 10 \text{ s}$) แต่มี *P.O.* มากกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย ($P.O. = 2.33\% > 2\%$) ดังนั้นการใช้แนวทางที่ 4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลานต์ 3 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบวงปิดมีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่าและปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้แนวทางที่ 3

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลานต์ 4 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 4 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาจะไม่มี ISE น้อยที่สุด ผลตอบสนองจะให้ปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่าข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ แต่มีช่วงเวลาเข้าที่ไม่มากกว่าข้อกำหนด และผลตอบสนองให้ปริมาณการพุ่งเกินสูงกว่า มีช่วงเวลาเข้าที่นานกว่า และให้ค่า ISE มากกว่าผลตอบสนองที่เกิดจากการใช้แนวทางที่ 3

เมื่อระบบวงปิดประกอบด้วยพลานต์ 5 และตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์คำนวณได้จากแนวทางที่ 4 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาจะไม่มี ISE น้อยที่สุด ผลตอบสนองให้สมรรถนะไม่เกินจากข้อกำหนด และมีสมรรถนะเหมือนกับสมรรถนะของผลตอบสนองที่ได้จากการใช้แนวทางที่ 3 เพราะแนวทางที่ 4 ให้โพลและซีโรของระบบวงปิดเหมือนกับโพลและซีโรของระบบวงปิดที่ได้จากแนวทางที่ 3

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งได้อธิบายแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งหมดสี่แนวทาง สามแนวทางแรกเป็นสิ่งที่มีการปฏิบัติมาก่อนแล้ว กล่าวคือ แนวทางแรก วิธีการวางตำแหน่งโพลเด่นและการกำหนดส่วนเพื่อเฟสเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Wei และคณะ, 2010) แนวทางที่สอง การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ระบบวงปิดมีส่วนเพื่ออัตราขยายและส่วนเพื่อเฟสที่ต้องการได้อย่างแม่นยำตรง (Wang, Fung และ Zhang, 1999) แนวทางที่สาม การวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำตรงเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Wang และคณะ, 2009) และแนวทางที่สี่ ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ที่น่าเสนอ เป็นการปรับปรุงแนวทางที่สามในการวางตำแหน่งโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นโพลเด่น เพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองมีค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม (ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ที่ทำให้ผลตอบสนองยังคงมีสมรรถนะไม่เกินจากข้อกำหนดในโดเมนเวลา หรือคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนมีมุมเท่ากับมุมการหน่วงของคู่โพลเด่น) ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับจูนแต่ละแนวทางใช้ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต ที่ Aström และ Hägglund ได้นำเสนอไว้ในปี ค.ศ. 2000 เพื่อยืนยันแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีว่ามีวิธีใดบ้างในสี่แนวทางที่สามารถชดเชยพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ตได้ และระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่ดีขึ้น การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าว สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย วิธีการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย ตลอดจนชี้ให้เห็นถึงพลาเน็ตควบคุมยาก 5 พลาเน็ต ซึ่งได้นำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้าของ Aström และ Hägglund (2000) ที่นำมาใช้ชดเชยสมรรถนะของผลตอบสนองในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยก่อนหน้า

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสามแนวทางที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมทั้งอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมและแสดงตัวอย่างการออกแบบในแต่ละแนวทาง และยังกล่าวถึงความสำคัญของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการควบคุมกระบวนการและเครื่องจักรกล และด้วยเงื่อนไขหรือข้อจำกัดบาง

ประการของตัวควบคุมพีไอดี รวมถึงรูปแบบของพลาเน็ตทำให้ระบบควบคุมวงปิดสร้างผลตอบสนองที่มีสมรรถนะเกินข้อกำหนดหรือไม่ตรงตามความต้องการในโดเมนเวลา เพราะตัวควบคุมพีไอดีไม่สามารถชดเชยพลาเน็ตได้อย่างสมบูรณ์ หรือตัวควบคุมพีไอดีอาจจะมีค่าเกณฑ์ที่ไม่เหมาะสม ซึ่งค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมคำนวณได้จากแนวทางการออกแบบแต่ละแนวทาง

บทที่ 3 ได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ของการชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกทั้ง 5 พลาเน็ต เมื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยสามแนวทางการออกแบบก่อนหน้าในที่ศึกษา แนวทางแรกอาศัยจุดตัดกราฟของความสัมพันธ์สำหรับการออกแบบค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดี แนวทางที่สองอาศัยความสัมพันธ์ทางพีชคณิตสำหรับการออกแบบค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดี และแนวทางที่สามอาศัยแผนภาพโลกัสราก ด้วยการกำหนดระยะห่างระหว่างส่วนจริงของโพลอื่น ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นและส่วนจริงของคู่โพลเด่น (m) ซึ่งไม่มีซีโรในบริเวณใกล้เคียง โดยปกติกำหนดให้ $m \in [3, 5]$ ผลลัพธ์จากการออกแบบทั้งสามแนวทางอธิบายได้ว่า ผลตอบสนองในภาพรวมของทั้ง 5 พลาเน็ต เป็นไปในทิศทางที่ค่อนข้างดี ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่นและผลตอบสนองในโดเมนความถี่มีส่วนเพื่อเฟสและส่วนเพื่ออัตราขยายตรงตามข้อกำหนดที่ใช้ ออกแบบ แต่ในบางพลาเน็ตหรือในบางข้อกำหนด ระบบวงปิดอาจมีโพลอื่นใด ๆ ที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับคู่โพลเด่น หรืออยู่ใกล้แกนจินตภาพมากกว่าคู่โพลเด่น และอาจจะมีซีโรอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับคู่โพลเด่น ทำให้ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่มีสมรรถนะเกินจากข้อกำหนด จึงสรุปได้ว่าในแต่ละแนวทางที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกแต่ละพลาเน็ต จะมีข้อกำหนดที่เหมาะสมแตกต่างกัน นอกจากนี้แนวทางการออกแบบทั้งสามแนวทางสามารถให้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยกได้ในระดับที่น่าพอใจ

บทที่ 4 นำเสนอแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำตรงและให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ซึ่งพัฒนามาจากแนวทางที่ 3 ที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 2 การออกแบบยังคงอาศัยแผนภาพโลกัสราก พร้อมกับการใช้ระเบียบวิธีการค้นหาของพีโบนาสซี หรือระเบียบวิธีการค้นหากำลังสาม สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ระบบวงปิดมีคู่โพลเด่นและคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่ไม่เป็นคู่โพลเด่นในตำแหน่งที่ต้องการในระนาบเอสและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม รวมถึงการตรวจสอบการมีหรือไม่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนที่มีขนาดของส่วนจริงมากกว่าหรือเท่ากับสามเท่าของขนาดส่วนจริงของคู่โพลเด่น ($m \geq 3$) สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

บทที่ 5 ได้แสดงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ชดเชยพลาเน็ตควบคุมยก 5 แบบ ด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำตรงและให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ระบบวงปิดบางระบบ (เช่น ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 1) ที่ได้จากการ

ออกแบบให้ผลตอบสนองในโดเมนเวลาที่เป็นไปตามข้อกำหนดทั้งทางด้านปริมาณการพุ่งเกิน และช่วงเวลาเข้าที่ รวมถึงให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความผิดพลาดกำลังสองรวมที่ได้จากแนวทางที่ 3 แต่ระบบวงปิดอื่น ๆ บางระบบ (เช่น ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 4) ให้ผลตอบสนองเกินจากข้อกำหนดและให้ความผิดพลาดกำลังสองรวมมากกว่า ระบบวงปิดที่มีพลาเน็ต 4 ไม่สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดได้ แต่ในภาพรวม ระบบวงปิดให้ผลตอบสนองในระดับที่น่าพอใจ แต่อาจไม่สะดวกต่อการใช้งาน เพราะมีขั้นตอนการออกแบบที่ซับซ้อน

ผลลัพธ์จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการออกแบบทั้งสี่แนวทางมีความเหมาะสมในการชดเชยพลาเน็ตที่แตกต่างกัน เนื่องจากพฤติกรรมของแต่ละพลาเน็ตมีข้อจำกัดในการออกแบบตัวควบคุมที่แตกต่างกัน แต่ในภาพรวมให้ผลการจำลองสถานการณ์ในระดับพอใจ ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันได้ว่าแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทั้งสี่ สามารถชดเชยพลาเน็ตควบคุมยากได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้ ทำให้เกิดแนวคิดหรือข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. ควรพัฒนา และขยายขีดความสามารถของอัลกอริทึมการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล โดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ซึ่งเป็นการออกแบบตัวควบคุมในโดเมนเอสเพียงอย่างเดียว ให้สามารถออกแบบตัวควบคุมในโดเมนความถี่ไปพร้อม ๆ กัน เพื่อเพิ่มสมรรถนะของผลตอบสนองให้ดียิ่งขึ้น

2. ควรพัฒนาอัลกอริทึมการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล โดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม ให้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น Graphical User Interface (GUI) เพื่อเพิ่มความสะดวก รวดเร็วในการคำนวณ และลดความยุ่งยากซับซ้อน ในขั้นตอนการออกแบบของผู้ใช้งาน พร้อมแสดงผลการรันโปรแกรมโดยอัตโนมัติ เพียงให้ผู้ใช้งานกรอกฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ตและค่าสมรรถนะของผลตอบสนองที่ต้องการ

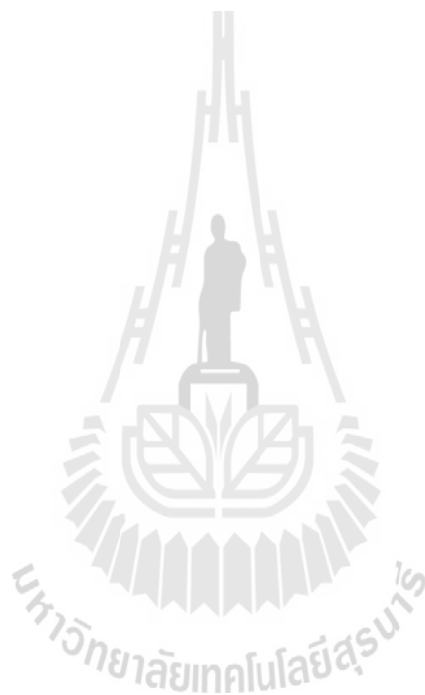
3. เนื่องจากงานวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่ได้นำเสนอตัวอย่างพลาเน็ตที่มีเวลาประวิง ทั้งนี้อาจศึกษาค้นคว้า และหาข้อสรุป เกี่ยวกับการชดเชยพลาเน็ตที่มีเวลาประวิงเมื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการจัดวางตำแหน่งโพล โดยให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม เพื่อยืนยันว่าวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้สามารถประยุกต์ใช้กับพลาเน็ตที่มีโครงสร้างแบบหลากหลายได้อย่างครอบคลุม


รายการอ้างอิง

- ธนัชชัย กุลวรรณิษพงษ์ (2554). การหาค่าเหมาะที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศรารุณี สุจิตจร (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Ang, K.H., Chong, G., and Li, Y. (2005). PID Control System Analysis, Design and Technology. **IEEE Trans on Control Systems Technology**. 13(4): 559-576.
- Aström, K.J., and Hägglund, T. (1984). Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins. **Automatica**. 20(5): 645-651.
- Aström, K.J., and Hägglund, T. (2000). Benchmark Systems for PID Control. **Proceedings of IFAC Conference on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control**. 165-166.
- Cominos, P., and Munro, N. (2002). PID Controllers: Recent Tuning Methods and Design to Specification. **IEE Proc.-Control Theory Appl**. 149(1): 46-53.
- Ho, M.-T., and Wang, H.-S. (2003). PID Controller Design with Guaranteed Gain and Phase Margins. **Asian Journal of Control**. 5(3): 374-381.
- Ho, W.K., Gan, O.P., Tay, E.B., and Ang, E.L. (1996). Performance and Gain and Phase Margins of Well-Known PID Tuning Formulas. **IEEE Trans. Control Systems Technology**. 4(4): 473-477.
- Ho, W.K., Hang, C.C., and Cao, L.S. (1995). Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications. **Automatica**. 31(3): 497-502.
- Ho, W.K., Lim, K.W., and Xu, W. (1998). Optimal Gain and Phase Margin Tuning for PID Controllers. **Automatica**. 34(8): 1009-1014.
- Hwang, C., and Hsiao, C.-Y. (2002). A New Approach to Mixed H_2 / H_∞ Optimal PI/PID Controller Design. **Ind. Eng. Chem. Res**. 41: 6107-6119.
- Wang, Q.-G., Fung, H.-W., and Zhang, Y. (1999). PID Tuning with Exact Gain and Phase Margins. **ISA Trans**. 38: 243-249.

Wang, Q.-G., Zhang, Z., Aström, K.J., and Chek, L.S. (2009) Guaranteed Dominant Pole Placement with PID Controllers. **Journal of Process Control** 19: 349-352.

Wei, T., Junmei, H., Jie, W., and Qing-Guo, W. (2010). A PID Tuning Method Based on Dominant Poles and Phase Margin. **29th Chinese Control Conf., Beijing, China.** 3402-3405.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a lotus flower. The emblem is topped by a tall, tiered spire. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ก

การเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามคุณลักษณะที่เกิดจากการวางโพลวงปิด
และพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิด

การเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะที่เกิดจากการวางโพลวงปิดและพหุนามลักษณะเฉพาะของระบบควบคุมวงปิด

เนื่องด้วยผลการจำลองสถานการณ์ของแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ เมื่อชดเชยพลาเน็ต 2 ภายใต้การกำหนดเงื่อนไข $t_s \leq 10$ s และ $P.O. \leq 2\%$ ถึง 10% พบว่าคู่โพลเด่นไม่สามารถส่งอิทธิพลเด่นต่อผลตอบสนองของระบบวงปิดได้ ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาจึงไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง ผู้วิจัยจึงพยายามทดลองใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อการระบุเงื่อนไขข้อกำหนดให้ได้ตำแหน่งคู่โพลเด่นเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการออกแบบและยังคงส่งอิทธิพลเด่นต่อผลตอบสนองของระบบวงปิด พบว่าเทคนิคการระบุเงื่อนไขข้อกำหนดด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโพลในระบบวงปิดสามารถให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพึงพอใจ จึงทดสอบชดเชยพลาเน็ต 2 ด้วยเทคนิคดังกล่าว และเนื่องจากพลาเน็ต 2 เป็นระบบอันดับ 4 เมื่อมีตัวควบคุมพีไอดีระบบวงปิดจะกลายเป็นระบบอันดับ 5 ในทันที จะได้ว่าโพลในระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมมีทั้งสิ้น 5 ตัว สามารถแสดงสัมประสิทธิ์ของ s กำลังต่าง ๆ ในระบบอันดับ 5 ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 & (s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s + p_4)(s + p_5) \\
 &= (s^2 + p_1s + p_2s + p_1p_2)(s + p_3)(s + p_4)(s + p_5) \\
 &= (s^3 + p_1s^2 + p_2s^2 + p_3s^2 + p_1p_2s + p_1p_3s + p_2p_3s + p_1p_2p_3)(s + p_4)(s + p_5) \\
 &= (s^4 + p_1s^3 + p_2s^3 + p_3s^3 + p_4s^3 + p_1p_2s^2 + p_1p_3s^2 + p_1p_4s^2 + p_2p_3s^2 + p_2p_4s^2 \\
 &\quad + p_3p_4s^2 + p_1p_2p_3s + p_1p_2p_4s + p_1p_3p_4s + p_2p_3p_4s + p_1p_2p_3p_4)(s + p_5) \\
 &= s^5 + p_1s^4 + p_2s^4 + p_3s^4 + p_4s^4 + p_5s^4 + p_1p_2s^3 + p_1p_3s^3 + p_1p_4s^3 + p_1p_5s^3 \\
 &\quad + p_2p_3s^3 + p_2p_4s^3 + p_2p_5s^3 + p_3p_4s^3 + p_3p_5s^3 + p_4p_5s^3 + p_1p_2p_3s^2 \\
 &\quad + p_1p_2p_4s^2 + p_1p_2p_5s^2 + p_1p_3p_4s^2 + p_1p_3p_5s^2 + p_1p_4p_5s^2 + p_2p_3p_4s^2 \\
 &\quad + p_2p_3p_5s^2 + p_2p_4p_5s^2 + p_3p_4p_5s^2 + p_1p_2p_3p_4s + p_1p_2p_3p_5s + p_1p_2p_4p_5s \\
 &\quad + p_1p_3p_4p_5s + p_2p_3p_4p_5s + p_1p_2p_3p_4p_5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= s^5 + (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5)s^4 + (p_1p_2 + p_1p_3 + p_1p_4 + p_1p_5 + p_2p_3 + p_2p_4 \\
&\quad + p_2p_5 + p_3p_4 + p_3p_5 + p_4p_5)s^3 + (p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 + p_1p_2p_5 + p_1p_3p_4 \\
&\quad + p_1p_3p_5 + p_1p_4p_5 + p_2p_3p_4 + p_2p_3p_5 + p_2p_4p_5 + p_3p_4p_5)s^2 \\
&\quad + (p_1p_2p_3p_4 + p_1p_2p_3p_5 + p_1p_2p_4p_5 + p_1p_3p_4p_5 + p_2p_3p_4p_5)s + p_1p_2p_3p_4p_5
\end{aligned}$$

พิจารณาพลาเน็ตควบคุมยกพลาเน็ต 2 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

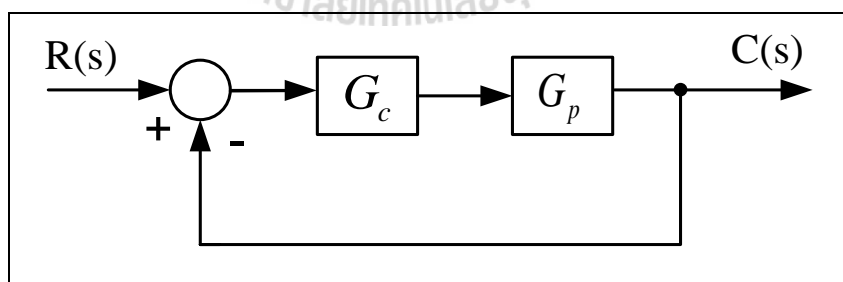
$$G_{p2}(s) = \frac{1}{(s+1)^4} = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดี คือ $\frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดี ดังนี้

$$\frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s(s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1)} = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s} \quad (\text{ก.1})$$

โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับมีโครงสร้างดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 โครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับ

สมรรถนะการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี พิจารณาที่การตอบสนองต่ออินพุต $R(s)$ แบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ตามโครงสร้างในแผนภาพรูปที่ ก.1

จากโครงสร้างของระบบควบคุมป้อนกลับดังรูปที่ ก.1 อาจเขียนแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดได้ดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{GH}{1+GH} = \frac{\frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s}}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s + K_D s^2 + K_p s + K_I}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 4s^2 + s + K_D s^2 + K_p s + K_I}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s^5 + 4s^4 + 6s^3 + (4 + K_D)s^2 + (1 + K_p)s + K_I} \quad (ก.2)$$

ระบบวงปิดของพลานต์ 2 เป็นระบบอันดับ 5 ดังนั้นระบบวงปิดจึงมีโพล 5 ตัว คือ

$$(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s + p_4)(s + p_5)$$

$$= s^5 + (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5)s^4 + (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_1 p_5 + p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_2 p_5 + p_3 p_4 + p_3 p_5 + p_4 p_5)s^3 + (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_2 p_5 + p_1 p_3 p_4 + p_1 p_3 p_5 + p_1 p_4 p_5 + p_2 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_5 + p_2 p_4 p_5 + p_3 p_4 p_5)s^2 + (p_1 p_2 p_3 p_4 + p_1 p_2 p_3 p_5 + p_1 p_2 p_4 p_5 + p_1 p_3 p_4 p_5 + p_2 p_3 p_4 p_5)s + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \quad (ก.3)$$

สามารถเขียนสมการตามความสัมพันธ์ของโพลในระบบวงปิด ได้จากสมการ (ก.2) และ (ก.3) ว่า

$$s^5 + 4s^4 + 6s^3 + (4 + K_D)s^2 + (1 + K_p)s + K_I$$

$$= s^5 + (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5)s^4 + (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_1 p_5 + p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_2 p_5 + p_3 p_4 + p_3 p_5 + p_4 p_5)s^3 + (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_2 p_5 + p_1 p_3 p_4 + p_1 p_3 p_5 + p_1 p_4 p_5 + p_2 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_5 + p_2 p_4 p_5 + p_3 p_4 p_5)s^2 + (p_1 p_2 p_3 p_4 + p_1 p_2 p_3 p_5 + p_1 p_2 p_4 p_5 + p_1 p_3 p_4 p_5 + p_2 p_3 p_4 p_5)s + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \quad (ก.4)$$

ด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ในสมการ (ก.4) สามารถแยกเป็นสมการพีชคณิตได้ 5 สมการดังต่อไปนี้

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 4 \quad (\text{ก.5})$$

$$p_1p_2 + p_1p_3 + p_1p_4 + p_1p_5 + p_2p_3 + p_2p_4 + p_2p_5 + p_3p_4 + p_3p_5 + p_4p_5 = 6 \quad (\text{ก.6})$$

$$p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 + p_1p_2p_5 + p_1p_3p_4 + p_1p_3p_5 + p_1p_4p_5 + p_2p_3p_4 + p_2p_3p_5 + p_2p_4p_5 + p_3p_4p_5 - 4 = K_D \quad (\text{ก.7})$$

$$p_1p_2p_3p_4 + p_1p_2p_3p_5 + p_1p_2p_4p_5 + p_1p_3p_4p_5 + p_2p_3p_4p_5 - 1 = K_P \quad (\text{ก.8})$$

$$p_1p_2p_3p_4p_5 = K_I \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อกำหนดให้โพลตำแหน่งต่าง ๆ เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} s_1 = -p_1 = -a + jb & ; p_1 = a - jb \\ s_2 = -p_2 = -a - jb & ; p_2 = a + jb \\ s_3 = -p_3 = -3a & ; p_3 = 3a \\ s_4 = -p_4 = -3a & ; p_4 = 3a \\ s_5 = -p_5 = -(3+c)a & ; p_5 = (3+c)a \end{aligned}$$

แทนที่โพลตำแหน่งต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.5) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 &= a - jb + a + jb + 3a + 3a + (3+c)a \\ &= (11+c)a = 4 \end{aligned} \quad (\text{ก.10})$$

จากสมการ (ก.10) จะได้ว่า $a = \frac{4}{(11+c)} \rightarrow c = \frac{4}{a} - 11 > 0$

แทนค่า $c = \frac{4}{a} - 11 > 0$ ลงในสมการ $p_5 = (3+c)a$ จะได้

$$p_5 = (3+c)a = \left(3 + \frac{4}{a} - 11\right)a = 4 - 8a = 4(1-2a) > 0$$

แทนที่โพลตำแหน่งต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & P_1P_2 + P_1P_3 + P_1P_4 + P_1P_5 + P_2P_3 + P_2P_4 + P_2P_5 + P_3P_4 + P_3P_5 + P_4P_5 \\ & = -42a^2 + 32a + b^2 = 6 \end{aligned} \quad (\text{ก.11})$$

จากสมการ $c = \frac{4}{a} - 11 > 0$ ดังนั้นจะได้ว่า $a < \frac{4}{11}$ สามารถคำนวณหาค่าตัวแปร a ในสมการ (ก.11) ได้ดังต่อไปนี้

$$a = \frac{32 \pm \sqrt{32^2 + 168(b^2 - 6)}}{84} < \frac{4}{11}$$

เมื่อ $\frac{4}{11} = 0.3636$ และ $\frac{32}{84} = 0.3809$ นั่นคือ

กรณีถ้า $a = \frac{32 + \sqrt{32^2 + 168(b^2 - 6)}}{84} < \frac{4}{11}$ ไม่สามารถทำให้สมการเป็นจริงได้

กรณีถ้า $a = \frac{32 - \sqrt{32^2 + 168(b^2 - 6)}}{84} < \frac{4}{11}$ จึงจะสามารถทำให้สมการเป็นจริง

ดังนั้นถ้า $\frac{32 - \sqrt{32^2 + 168(b^2 - 6)}}{84} > 0$ จะได้ว่า $b^2 < 6$ นั่นหมายความว่า $0 \leq b \leq \sqrt{6}$

จากสมการมุมการห้วงของคู่โพล $\frac{b}{a} = \tan(\beta)$ นั่นคือ $b = a \tan(\beta)$

แทนค่า $b = a \tan(\beta)$ ลงในสมการ $-42a^2 + 32a + b^2 = 6$ จะได้ว่า

$$-42a^2 + 32a + a^2 \tan^2(\beta) = 6$$

$$(42 - \tan^2(\beta))a^2 - 32a + 6 = 0$$

$$a = \frac{32 - \sqrt{32^2 - 24(42 - \tan^2(\beta))}}{2(42 - \tan^2(\beta))} < \frac{4}{11}$$

$$\tan^4(\beta) - 41.375 \tan^2(\beta) - 26.25 < 0$$

$$\tan^2(\beta) = \frac{41.375 \pm \sqrt{(41.375)^2 + 4(26.25)}}{2}$$

$$\tan^2(\beta) = 42, -0.625$$

ดังนั้น $0 < \tan(\beta) < \sqrt{42}$

จากสมการมุมการหน่วงของคูโพล $\tan(\beta) = \frac{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta \omega_n} = \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} = \frac{b}{a}$

จะได้ $b = \frac{a \sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}$

เมื่อ $0 < \tan(\beta) < \sqrt{42}$ จะได้ว่า $0 < \cos(\beta) < \frac{1}{\sqrt{1+42}}$

เนื่องจาก $\zeta = \cos(\beta)$ ดังนั้น $0 < \zeta < \frac{1}{\sqrt{43}}$

จึงอาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนการหน่วง คือ $0 < \zeta < 0.1525$

จากนั้นคำนวณย้อนกลับหาปริมาณการพุงเกินที่สามารถระบุเงื่อนไขข้อกำหนด

$$\zeta = \frac{\left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}}$$

$$\zeta^2 = \frac{\left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}{\pi^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}$$

$$\zeta^2 \left(\pi^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2 \right) = \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2$$

$$\pi^2 \zeta^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2 \zeta^2 = \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2$$

$$\pi^2 \zeta^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2 \zeta^2 - \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2 = 0$$

$$\pi^2 \zeta^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2 (\zeta^2 - 1) = 0$$

$$\left(\ln \frac{H}{100}\right)^2 = \frac{-\pi^2 \zeta^2}{(\zeta^2 - 1)}$$

$$\ln \frac{H}{100} = \sqrt{\frac{-\pi^2 \zeta^2}{(\zeta^2 - 1)}}$$

$$\frac{H}{100} = e^{\sqrt{\frac{-\pi^2 \zeta^2}{(\zeta^2 - 1)}}}$$

$$H = e^{\sqrt{\frac{-\pi^2 \zeta^2}{(\zeta^2 - 1)}}} \times 100$$

เมื่อ $\zeta \leq 0.1525$ สามารถคำนวณหาปริมาณการฟุ้งเกินสูงสุดได้ว่า

$$H = e^{\sqrt{\frac{-\pi^2 (0.1525)^2}{(0.1525^2 - 1)}}} \times 100 = 61.582\%$$

ดังนั้นจึงกล่าวโดยสรุปได้ว่า หากต้องการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีชดเชยพลานต์ 2 โดยใช้เทคนิคการระบุเงื่อนไขข้อกำหนดด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโพลในระบบวงปิด เพื่อให้ผลตอบสนองมีตำแหน่งคู่โพลเด่นเป็น $p_{1,2} = a \pm jb$ โพลในตำแหน่งถัดไปเป็นโพลจริง ซึ่งมีระยะห่างจากส่วนจริงของคู่โพลเด่นไปทางซ้ายมือบนระนาบเอสเป็นจำนวน 3 เท่า ($m = 3$) $p_{3,4} = 3a$ และโพลจริงตัวสุดท้ายมีระยะห่างจากส่วนจริงของคู่โพลเด่นไปทางซ้ายมือบนระนาบเอสมากกว่าจำนวน 3 เท่า $p_5 = (3+c)a$ อย่างถูกต้องและแม่นยำ ต้องกำหนดเงื่อนไขปริมาณการพุ่งเกินในการออกแบบภายใน $0\% \leq H \leq 61.582\%$ หากกำหนดให้ปริมาณการพุ่งเกินสูงหรือมากกว่า 61.5846% จะไม่สามารถคาดคะเนผลตอบสนองของระบบวงปิดว่าเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการออกแบบได้อย่างแม่นยำหรือไม่

จากนั้นประยุกต์ใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโพลในระบบวงปิดในแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ เพื่อชดเชยพลานต์ 2 ภายใต้การกำหนดเงื่อนไขปริมาณการพุ่งเกินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10% แสดงได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนดปริมาณการพุ่งเกินเป็น $H \leq 10\%$ สามารถคำนวณอัตราส่วนการหน่วง คือ

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{H}{100}\right)^2}} = \frac{\sqrt{\left(\ln \frac{10}{100}\right)^2}}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{10}{100}\right)^2}} = 0.5912$$

จะได้

$$\tan(\beta) = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = \frac{\sqrt{1-(0.5912)^2}}{0.5912} = 1.3644$$

$$b^2 = a^2 \tan^2(\beta) = (1.3644)^2 a^2 = 1.8615a^2$$

แทนค่า b^2 ลงในสมการ (ก.6) จะได้ว่า

$$-42a^2 + 32a + b^2 = 6$$

$$42a^2 - 32a - 1.8615a^2 + 6 = 0$$

$$40.1385a^2 - 32a + 6 = 0$$

$$a = \frac{32 \pm \sqrt{32^2 - (4)(40.1385)(6)}}{2(40.1385)} = 0.4957, 0.3016$$

เนื่องจาก $a < \frac{4}{11}$ นั่นคือ $a < 0.3636$ ดังนั้นคำตอบคือ $a = 0.3016$

แทนค่า $a = 0.3016$ ลงในสมการ $b = \frac{a\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$ จะได้ค่าตัวแปร b คือ

$$b = \frac{a\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = (0.3016)(1.3644) = 0.4115$$

เนื่องจาก $b \leq \sqrt{6}$ นั่นคือ $b \leq 2.4495$ ดังนั้น $b = 0.4115$ จึงเป็นคำตอบที่ถูกต้อง

ดังนั้น จะได้ตำแหน่งคู่โพลเด่นเป็น $-p_{1,2} = -a \pm jb = -0.3016 \pm j0.4115$

จากสมการ $c = \frac{4}{a} - 11 > 0$ สามารถคำนวณหาค่าตัวแปร c ได้ว่า

$$c = \frac{4}{a} - 11 = \frac{4}{0.3016} - 11 = 2.2626$$

แทนค่าตัวแปร a, b และ c ลงในสมการออกแบบกำหนดตำแหน่งโพลวงปิดทั้ง 5 ตำแหน่ง จึงสามารถออกแบบตำแหน่งโพลได้เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} s_1 = -p_1 = -a + jb & \quad ; \quad p_1 = a - jb & = 0.3016 - j0.4115 \\ s_2 = -p_2 = -a - jb & \quad ; \quad p_2 = a + jb & = 0.3016 + j0.4115 \\ s_3 = -p_3 = -3a & \quad ; \quad p_3 = 3a & = 3(0.3016) & = 0.9048 \\ s_4 = -p_4 = -3a & \quad ; \quad p_4 = 3a & = 3(0.3016) & = 0.9048 \\ s_5 = -p_5 = -(3+c)a & \quad ; \quad p_5 = (3+c)a & = (3+2.2626)(0.3016) & = 1.5872 \end{aligned}$$

จะได้ว่า เมื่อกำหนดเงื่อนไขปริมาณการพุ่งเกินเป็น $H \leq 10\%$ ออกแบบตัวควบคุมพีไอ ดีด้วยเทคนิคการเทียบสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโพลในระบบวงปิดเพื่อชดเชยพลาเน็ต 2 สามารถออกแบบตำแหน่งโพลได้เป็น $p_1 = 0.3016 - j0.4115$, $p_2 = 0.3016 + j0.4115$, $p_3 = 0.9048$, $p_4 = 0.9048$ และ $p_5 = 1.5872$

คำนวณค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ จากตำแหน่งโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยการเทียบสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโพลในระบบวงปิด ได้ดังนี้

แทนค่าโพลตำแหน่งที่ 1 ($-p_1$) ลงในสมการ $\frac{-1}{G(-p_1)}$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\frac{-1}{G(-p_1)} &= \frac{-1}{1} = \frac{-1}{1} = \frac{-1}{1} \\ &= \frac{-1}{((-p_1)+1)^4} = \frac{-1}{(-a+jb+1)^4} = \frac{-1}{(-0.3016+j0.4115+1)^4} \\ &= \frac{-1}{1} = \frac{-1}{1} \\ &= \frac{-1}{(0.6984+j0.4115)^4} = \frac{-1}{(-0.2290+j0.3661)^4} \\ \frac{-1}{G(-p_1)} &= \frac{-1}{-1.2280-j1.9637} = 0.2289 - j0.3661\end{aligned}$$

คำนวณค่า X_1 และ X_2 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีต่อไป

$$\text{โดยที่ } X_1 = \frac{1}{2b} \text{Im} \left[\frac{-1}{G(-p_1)} \right] + \frac{1}{2a} \text{Re} \left[\frac{-1}{G(-p_1)} \right]$$

$$X_1 = \frac{1}{2(0.4115)} \text{Im}[0.2289 - j0.3661] + \frac{1}{2(0.3016)} \text{Re}[0.2289 - j0.3661]$$

$$X_1 = \frac{1}{0.8230} (-0.3661) + \frac{1}{0.6032} (0.2289)$$

$$X_1 = -0.4448 + 0.3795$$

$$X_1 = -0.0653$$

$$\text{และ } X_2 = \frac{1}{2b} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G(p_1)} \right] - \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G(p_1)} \right]$$

$$X_2 = \frac{1}{2(0.4115)} \operatorname{Im}[0.2289 - j0.3661] - \frac{1}{2(0.3016)} \operatorname{Re}[0.2289 - j0.3661]$$

$$X_2 = \frac{1}{0.8230} (-0.3661) - \frac{1}{0.6032} (0.2289)$$

$$X_2 = -0.4448 - 0.3795$$

$$X_2 = -0.8243$$

จากสมการ (2.28) สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม K_I ได้ว่า

$$K_I = \frac{a^2 + b^2}{2a} K_p - (a^2 + b^2) X_1$$

$$K_I = \frac{0.3016^2 + 0.4115^2}{2(0.3016)} K_p - (0.3016^2 + 0.4115^2)(-0.0653)$$

$$K_I = \frac{0.2603}{0.6032} K_p - (0.2603)(-0.0653)$$

$$K_I = 0.4315K_p + 0.0170 \quad (\text{ก.12})$$

เมื่อแทนตำแหน่งโพลวงปิดทั้ง 5 ลงในสมการ (ก.9) จะได้ว่า

$$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 = K_I$$

$$(0.3016 - j0.4115)(0.3016 + j0.4115)(0.9048)(0.9048)(1.5872) = K_I$$

$$0.3382 = K_I$$

แทนค่า $K_I = 0.3382$ ลงในสมการ (ก.12) จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม K_P ดังนี้

$$0.3382 = 0.4315K_P + 0.0170$$

$$0.4315K_P = 0.3382 - 0.0170$$

$$K_P = \frac{0.3382 - 0.0170}{0.4315}$$

$$K_P = 0.7444$$

แทนค่า $K_P = 0.7444$ และ $X_2 = -0.8243$ ลงในสมการ (2.29) จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม K_D ดังนี้

$$K_D = \frac{1}{2a} K_P + X_2$$

$$K_D = \left[\frac{1}{2(0.3016)} 0.7444 \right] - 0.8243$$

$$K_D = 0.4098$$

แทนค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีและตำแหน่งโพลวงปิดทั้ง 5 ลงในสมการพีชคณิต (ก.6) ถึง (ก.9) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบ

จากสมการ (ก.5) จะได้ว่า

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 4$$

$$0.3016 - j0.4115 + 0.3016 + j0.4115 + 0.9048 + 0.9048 + 1.5872 = 4$$

จากสมการ (ก.6) จะได้ว่า

$$p_1p_2 + p_1p_3 + p_1p_4 + p_1p_5 + p_2p_3 + p_2p_4 + p_2p_5 + p_3p_4 + p_3p_5 + p_4p_5 = 6$$

$$\begin{aligned} 0.2603 + (0.2729 - j0.3723) + (0.2729 - j0.3723) + (0.4787 - j0.6531) \\ + (0.2729 + j0.3723) + (0.2729 + j0.3723) + (0.4787 + j0.6531) \\ + 0.8187 + 1.4361 + 1.4361 = 6 \end{aligned}$$

จากสมการ (ก.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 + p_1p_2p_5 + p_1p_3p_4 + p_1p_3p_5 + p_1p_4p_5 \\ + p_2p_3p_4 + p_2p_3p_5 + p_2p_4p_5 + p_3p_4p_5 - 4 = K_D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.2355 + 0.2355 + 0.4131 + (0.2469 - j0.3369) + (0.4331 - j0.5910) \\ + (0.4331 - j0.5910) + (0.2469 + j0.3369) + (0.4331 + j0.5910) \\ + (0.4331 + j0.5910) + 1.2994 - 4 = K_D \end{aligned}$$

$$0.4099 = K_D$$

จากสมการ (ก.8) จะได้ว่า

$$p_1p_2p_3p_4 + p_1p_2p_3p_5 + p_1p_2p_4p_5 + p_1p_3p_4p_5 + p_2p_3p_4p_5 - 1 = K_P$$

$$0.2131 + 0.3738 + 0.3738 + (0.3919 - j0.5347) + (0.3919 + j0.5347) - 1 = K_P$$

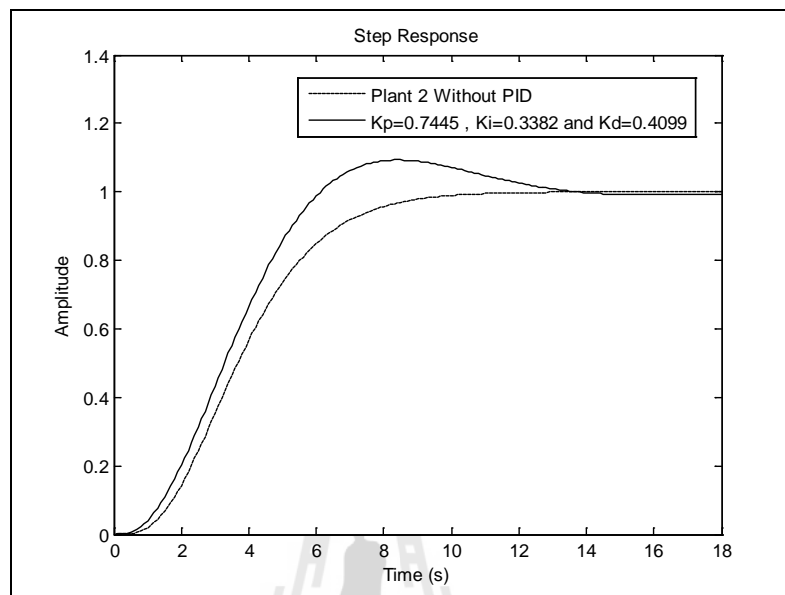
$$0.7445 = K_P$$

จากสมการ (ก.9) จะได้ว่า

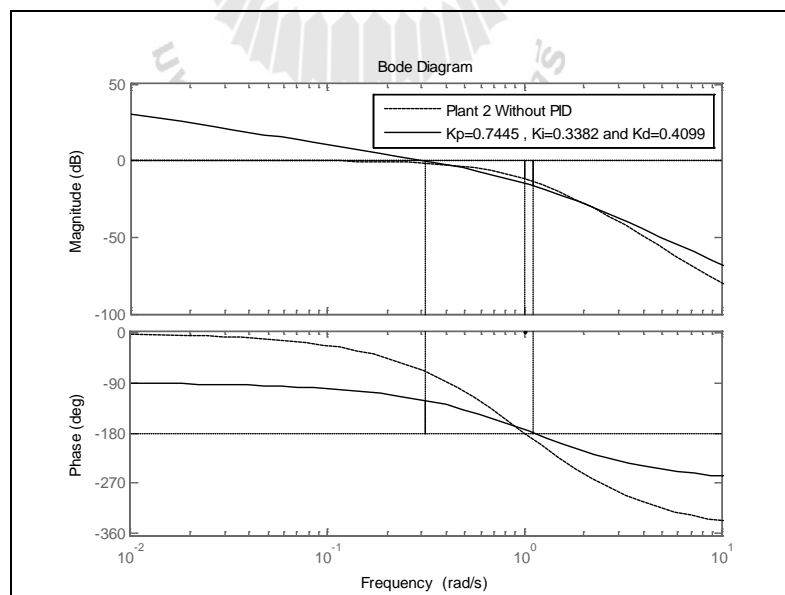
$$p_1p_2p_3p_4p_5 = K_I$$

$$0.3382 = K_I$$

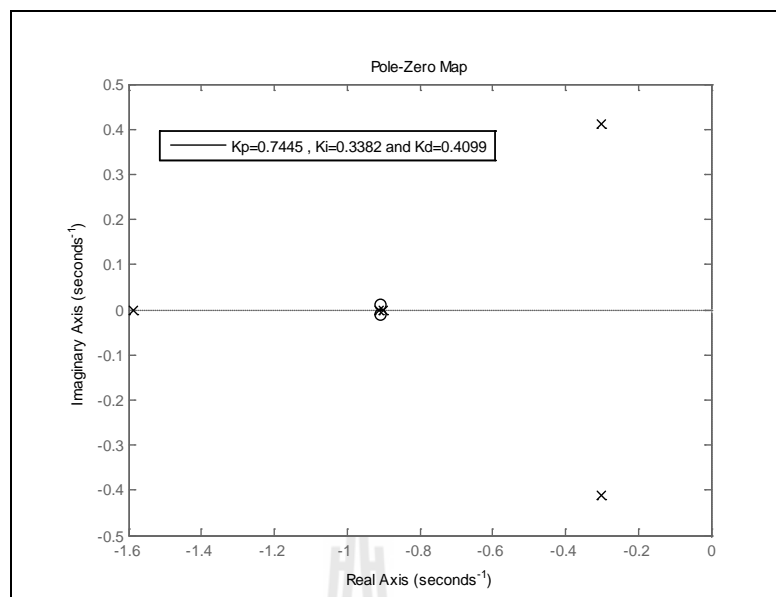
ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี คือ $K_P = 0.7445$, $K_I = 0.3382$ และ $K_D = 0.4099$ เมื่อชดเชยพลานต์ 2 จะได้ผลการจำลองสถานการณ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.2 ผลตอบสนองในโดเมนเวลาต่ออินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ 2 (without PID) และของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_P = 0.7445$ ตามลำดับ



รูปที่ ก.3 แผนภาพโบดของพลานต์ 2 (without PID) และระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุม (with PID) โดยที่ $K_P = 0.7445$ ตามลำดับ



รูปที่ ก.4 แผนผัง โพลและซีโรของระบบวงปิด (with PID) โดยที่ $K_p = 0.7445$

จากผลการจำลองสถานการณ์ ดังรูปที่ ก.2 อธิบายได้ว่าพลานต์ 2 (ระบบวงเปิดที่ไม่มีตัวควบคุม) มี $t_r = 4.94$ s , $t_s = 9.08$ s ไม่ปรากฏ $P.O.$ เมื่อชดเชยพลานต์ด้วยตัวควบคุมพีไอดีพบว่าผลตอบสนองทางโดเมนเวลาของระบบวงปิดมี $t_r = 3.83$ s , $t_s = 12.3$ s และ $P.O. = 9.33$ % อาจกล่าวได้ว่าระบบวงปิดมีสมรรถนะเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบที่ต้องการ $H \leq 10$ % เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางโดเมนความถี่ในรูปที่ ก.3 พบว่าพลานต์มี $GM = 12.0412$ dB และ $PM = -180^\circ$ ในขณะที่ระบบวงเปิดที่มีพลานต์และตัวควบคุมมี $GM = 16.1775$ dB และ $PM = 58.4269^\circ$ แสดงได้ว่าเมื่อชดเชยพลานต์ 2 ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดีขึ้นและไม่ขาดเสถียรภาพได้ง่ายเมื่อระบบมีการรบกวนจากภายนอก จากรูปที่ ก.4 จะได้ว่าระบบวงปิดมีคู่โพลเด่นคือ $p_{1,2} = -0.3016 \pm j0.4115$, $p_3 = -0.8988$, $p_4 = -0.9107$ และ $p_5 = -1.5873$ และคู่ซีโร $z_{1,2} = -0.9085 \pm j0.0117$ ซึ่งแสดงได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์ให้ผลตอบสนองของระบบอยู่ในเกณฑ์ดี เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบ



ภาคผนวก ข

โครงสร้างของโปรแกรม MATLAB ช่วยในการออกแบบตามแนวทางใหม่
ที่นำเสนอ

```

#####
%โปรแกรม MATLAB สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีด้วยระเบียบวิธีการค้นหาค่าสาม
%โดย รัชชัย กุลรวรานิชพงษ์ ปรับปรุงโดย กิตติวงศ์ สุธรรมโน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

function [xmin,fmin]=cubicsearch1(fobj,xinterval,vtol,ftol,opt)
k = 0;
ferr = inf;
% gmin = inf;
f0 = inf;
xl = xinterval(1);
xu = xinterval(2);
fa = feval(fobj,xl);
fb = feval(fobj,xu);
ga = fgradnum1(fobj,xl);
gb = fgradnum1(fobj,xu);
    if opt==1
        fprintf('\n K          xl          xu          xmin
fmin          xu-xl          gmin \n');
    end

while (xu-xl > vtol) && (ferr > ftol)
    k = k+1;
    W = 3*(fa-fb)/(xu-xl)+ga+gb;
    V = sqrt(W*W-ga*gb);
    U = 1-(gb+V-W)/(gb-ga+2*V);
    xmin = xl+(xu-xl)*U;
    fmin = feval(fobj,xmin);
    gmin = fgradnum1(fobj,xmin);
    if (ga<0)&&((gmin>0)|| (fmin>fa))
        xu = xmin;
        fb = fmin;
        gb = gmin;
    else
        xl = xmin;
        fa = fmin;
        ga = gmin;
    end
    ferr = abs(f0-fmin);
    f0 = fmin;
    if (opt==1)
        fprintf('%3d %12.8f %12.8f %12.8f %15e %15e %15e
\n',k,xl,xu,xmin,fmin,xu-xl,gmin);
        %disp([k xl xu xmin fmin xu-xl gmin]);
    end
end

return

```

```
#####
%โปรแกรม MATLAB สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีโอดีด้วยระเบียบวิธีการค้นหาของฟีโบนาสซี
%โดย รัชชัย กุลาวานิชพงษ์ ปรับปรุงโดย กิตติวงศ์ สุธรรมโน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

function [xmin,fmin] = fibosearch1(funcnt,a,b,error)
    f(1) = 1;
    f(2) = 1;
    N = 1;
    min_error = 1;
    fprintf('%8d %8d ',f(1),f(2));
    while(min_error> error)
        N = N + 1;
        f(N+1)=f(N)+f(N-1);
        min_error = (b-a)/f(N+1);
        fprintf('%8d ',f(N+1));
        if mod(N+1,10)==0
            fprintf('\n');
        end
    end
    L1 = b-a;
    fprintf('\n K          a          X1          X2          b
f((b+a)/2)\n');
    for K=2:N
        L2 = (f(N-K+1)/f(N+3-K))*L1;
        if L2 < (L1/2)
            L2 = L1-L2;
        end
        X1 = b-L2;
        X2 = a+L2;
        fa = feval(funcnt,a);
        fx1 = feval(funcnt,X1);
        fx2 = feval(funcnt,X2);
        fb = feval(funcnt,b);

        fprintf('%3d %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f ',N-
K+2,a,X1,X2,b);

        if fx1 < fx2
            b = X2;
        elseif fx1 > fx2
            a = X1;
        else a = X1; b = X2 ;
        end
        L1 = b-a;
        fmin = feval(funcnt,((b+a)/2));
        fprintf(' %15e \n',fmin);
    end
    xmin = (b+a)/2;
    fmin = feval(funcnt,xmin);
end
```



```

#####
%โปรแกรม MATLAB สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำและให้ค่าความผิดพลาด
%กำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม โดย สุนทรี แสงศรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

// ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดี
function error =f_H2_kp(X)

// ป้อนค่าปริมาณการพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองที่ต้องการ
s=tf('s');
L=10;
Ts=5;

// กำหนดคู่โพลเด่น  $p_{1,2}$ 
Damped_ratio=sqrt((log(L/100))^2/((pi^2)+(log(L/100))^2));
Wn=4/(Damped_ratio*Ts);
Pole1=(-Damped_ratio*Wn)+(i*Wn*sqrt(1-Damped_ratio^2));
Pole2=(-Damped_ratio*Wn)-(i*Wn*sqrt(1-Damped_ratio^2));
a=-real(Pole1);
b=imag(Pole1);

// กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานต์
G1 =1/((0.01563*s^4)+(0.2344*s^3)+(1.094*s^2)+(1.875*s)+1); %Plant1
Gp1=1/((0.01563*Pole1^4)+(0.2344*Pole1^3)+(1.094*Pole1^2)
+(1.875*Pole1)+1);
% G1=1/((s+1)^4); %Plant2
% Gp1=1/((Pole1^4)+(4*Pole1^3)+(6*Pole1^2)+(4*Pole1)+1);
% G1=(-0.5*s+1)/((s+1)^3) %Plant3
% Gp1=(-0.5*Pole1+1)/((Pole1^3)+(3*Pole1^2)+(3*Pole1)+1);
% G1=((s+6)^2)/(s*((s+1)^2)*(s+36)); %Plant4
% Gp1=((Pole1^2)+(12*Pole1)+36)/((Pole1^4)+(38*Pole1^3)+(73*Pole1^2)
+(36*Pole1));
% G1=1/(s^3+1.2*s^2+1.2*s+1); %Plant5
% Gp1=1/((Pole1^3)+(1.2*Pole1^2)+(1.2*Pole1)+1);

// กำหนด  $X_1$  และ  $X_2$ 
Re1=real(-1/Gp1);
Im1=imag(-1/Gp1);
X1=((1/(2*b))*Im1)+((1/(2*a))*Re1);
X2=((1/(2*b))*Im1)-((1/(2*a))*Re1);

// วาดแผนภาพทางเดินราก
N=1;
% N=(-0.5*s+1); %plant3
% N=(s+6)^2; %plant4
D=(0.01563*s^4)+(0.2344*s^3)+(1.094*s^2)+(1.875*s)+1; %plant1
% D=(s^4)+(4*s^3)+(6*s^2)+(4*s)+1; %plant2
% D=((s^3)+(3*s^2)+(3*s)+1); %plant3
% D=((s^4)+(38*s^3)+(73*s^2)+(36*s)); %plant4
% D=((s^3)+(1.2*s^2)+(1.2*s)+1); %plant5
L=0;

```

```
Gs1=(N*(s^2+2*a*s+(a^2+b^2))*exp(-L*s))/(2*a*D*s+(2*a*X2*N*s^2*
    exp(-L*s))-(2*a*(a^2+b^2)*X1*N*exp(-L*s)));
rlocus(Gs1)
```

```
// ป้อนค่าเกน  $K_p$  เพื่อคำนวณค่าเกน  $K_I$  และ  $K_D$ 
```

```
Kp = X;
Ki=((a^2+b^2)/(2*a))*Kp-((a^2+b^2)*X1);
Kd=((1/(2*a))*Kp)+X2;
%roots([Kd Kp Ki]);
```

```
// คำนวณค่า  $E(s) \cdot E(-s)$  และค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด
```

```
DS=(0.01563*s^4)+(0.2344*s^3)+(1.094*s^2)+(1.875*s)+1; %plant1(s)
% DS=(s^4)+(4*s^3)+(6*s^2)+(4*s)+1; %plant2(s)
% DS=((s^3)+(3*s^2)+(3*s)+1); %plant3(s)
% DS=((s^4)+(38*s^3)+(73*s^2)+(36*s)); %plant4(s)
% DS=((s^3)+(1.2*s^2)+(1.2*s)+1); %plant5(s)
B0=2*a*DS;
A0=2*a*s*DS;
A1=((Kp+(2*a*X2))*s^2+(2*a*Kp*s)+((a^2+b^2)*(Kp-(2*a*X1))))*N;

DS_S=(0.01563*(-s)^4)+(0.2344*(-s)^3)+(1.094*(-s)^2)
    +(1.875*(-s))+1; %plant1(-s)
% DS_S=((-s)^4)+(4*(-s)^3)+(6*(-s)^2)+(4*(-s))+1; %plant2(-s)
% DS_S(((s^3)+(3*(-s)^2)+(3*(-s))+1); %plant3(-s)
% DS_S(((s^4)+(38*(-s)^3)+(73*(-s)^2)+(36*(-s))); %plant4(-s)
% DS_S(((s^3)+(1.2*(-s)^2)+(1.2*(-s))+1); %plant5(-s)
B0_S=2*a*DS_S;
A0_S=2*a*(-s)*DS_S;
A1_S(((Kp+(2*a*X2))*(-s)^2+(2*a*Kp*(-s))+((a^2+b^2)*(Kp-
    (2*a*X1))))*N;

Z0=(1/2)*A0*B0*B0_S;
Z1=-1/2*A1*B0*B0_S;
Z0_S=(1/2)*A0_S*B0_S*B0;
Z1_S=-1/2*A1_S*B0_S*B0;
ds=(A0*A0_S)-(A1*A1_S); %delta(s)
ds_S=(A0_S*A0)-(A1_S*A1); %delta(-s)

NZ=(Z0+(Z1*exp(-L*s)));
NZ_S=(Z0_S+(Z1_S*exp(L*s)));
DZ=ds*(A0+(A1*exp(-L*s)));
DZ_S=ds*(A0_S+(A1_S*exp(L*s)));

ZS=(Z0+(Z1*exp(-L*s)))/(ds*(A0+(A1*exp(-L*s))));
ZS_S=(Z0_S+(Z1_S*exp(L*s)))/(ds_S*(A0_S+(A1_S*exp(L*s))));

ES=B0/(A0+(A1*exp(-L*s)));
ES_S=B0_S/(A0_S+(A1_S*exp(L*s)));
E=ES*ES_S;

po=pole(ES);
for n=1:length(po)
    if real(po(n))>0
        fprintf('Do not find residue ');
        fprintf('%3.7f \n',po(n));
```

```

        return
    end
end

[num,den]=tfdata(E,'v');
[r,p,k] = residue(num,den);
res=0;
for h=1:length(den)-1
    if real(p(h))>0
        res=res+r(h);
    end
end
error = -res; // คำนวณค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุด หลังจากบรรทัดนี้ให้
คอมเม้น code ด้านล่างทั้งหมด เหลือไว้แต่เพียง คำสั่ง return ในบรรทัดสุดท้าย เพื่อปิดการ
ทำงานในคำสั่ง function ของบรรทัดแรก

// คำนวณค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ให้คอมเม้น code คำสั่ง
error = -res; ในบรรทัดก่อนหน้า

J=-res;

Gc=Kp+(Ki/s)+(Kd*s); %Controller
G=feedback(Gc*G1,1,-1);
c1lp = pole(G);
new_dam = -a;
for q=1:length(c1lp)
    if ((abs(real(c1lp(q)))>(a + 0.01))&&(abs(imag(c1lp(q)))>(b +
0.01)))
        new_dam = c1lp(q);
    end
end
new_dam_ang = atan((abs(imag(new_dam)))/(abs(real(new_dam))));
% if (new_dam_ang>atan(b/a))
% return
% end

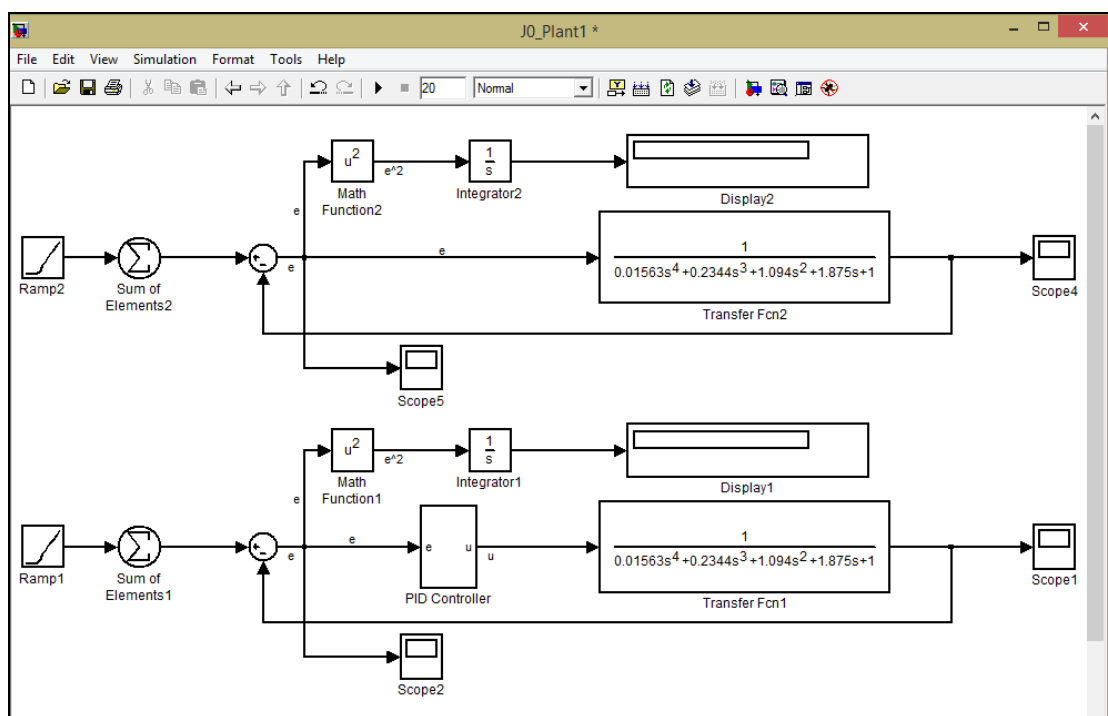
error = abs(new_dam_ang - atan(b/a));
return

```

```

#####
%โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดแบบเหมาะสม
% โดย สุนทรี แสงศรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

```



รูปที่ ข.1 โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับหาค่าความผิดพลาดกำลังสองรวมน้อยที่สุดของพลานต์ 1 (ด้านบน) และของระบบวงปิด (ด้านล่าง)

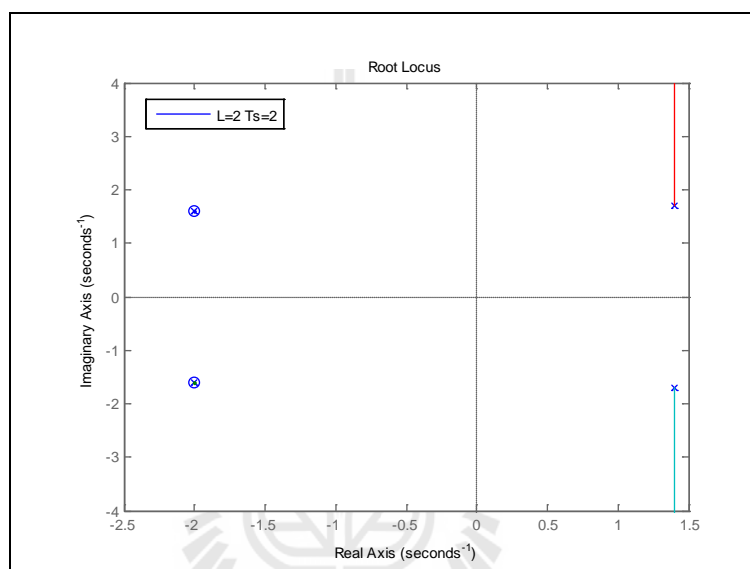


ภาคผนวก ค

ผลการจัดอันดับสถานการณืเพิ่มเติม

ผลการจำลองสถานการณ์เพิ่มเติม

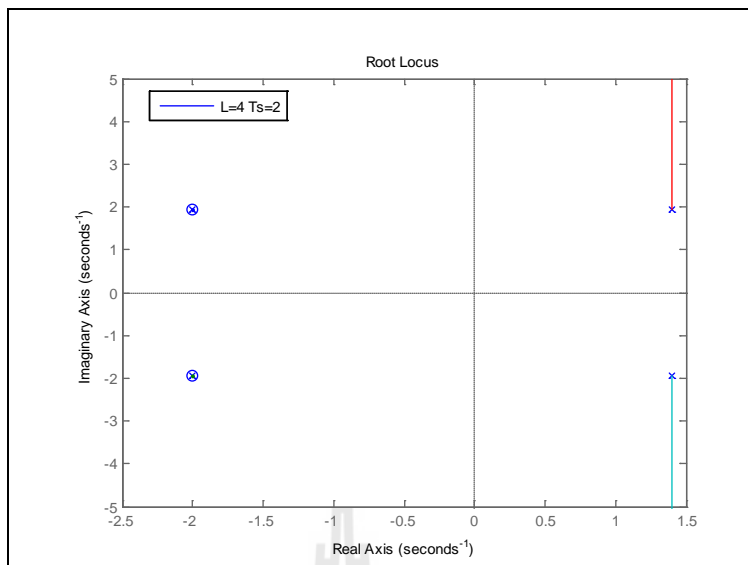
ผลการจำลองสถานการณ์เพิ่มเติมที่แสดงในภาพผนวก ก. เป็นผลการจำลองสถานการณ์ของพลาตควบคุมยากพลาต 5 เมื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ เพื่อเป็นการชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างทางเดินรากของโพลและเงื่อนไขข้อกำหนดสำหรับการออกแบบ ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.1 แผนภาพโลกักรากเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 2\%$ และ $t_s \leq 2$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-2.0000 \pm j1.6061$

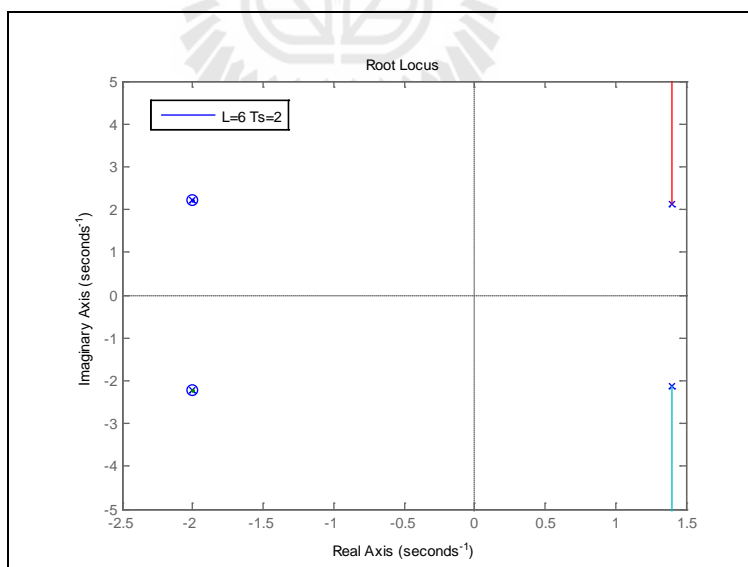
จะได้ว่า โพล คือ $-2.0000 \pm j1.6061$, $1.4000 \pm j1.7017$



รูปที่ ค.2 แผนภาพโถกัศรากลเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 4\%$ และ $t_s \leq 2$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-2.0000 \pm j1.9520$

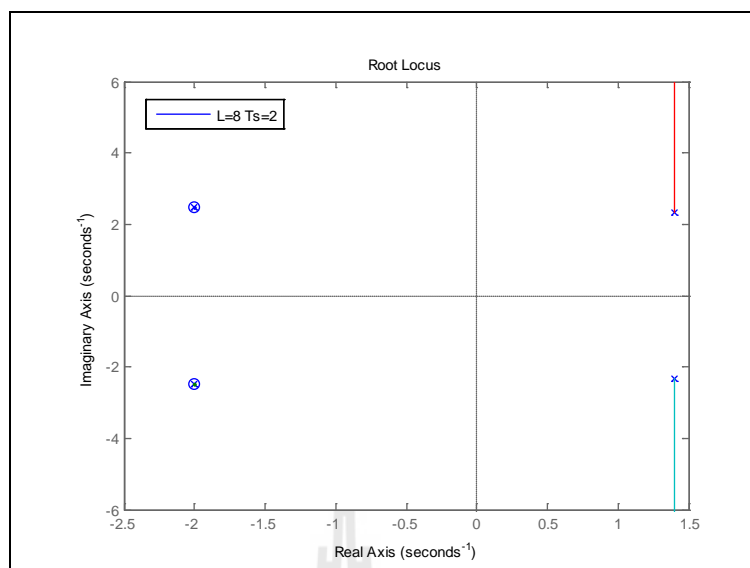
จะได้ว่า โพล คือ $-2.0000 \pm j1.9520$, $1.4000 \pm j1.9383$



รูปที่ ค.3 แผนภาพโถกัศรากลเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 6\%$ และ $t_s \leq 2$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-2.0000 \pm j2.2333$

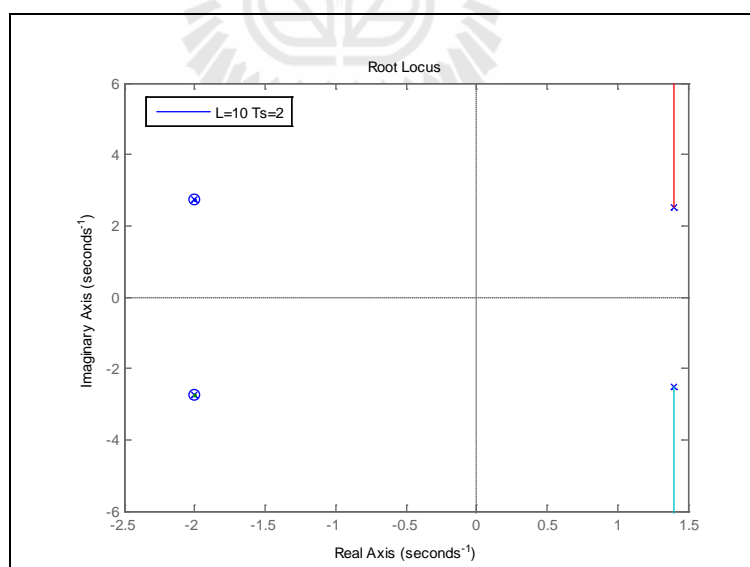
จะได้ว่า โพล คือ $-2.0000 \pm j2.2333$, $1.4000 \pm j2.1404$



รูปที่ ค.4 แผนภาพโถกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 8\%$ และ $t_s \leq 2$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-2.0000 \pm j2.4877$

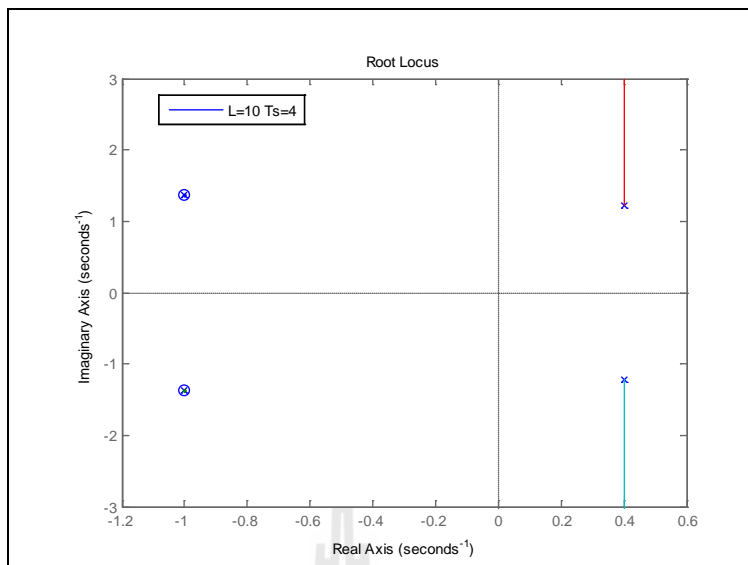
จะได้ว่า โพล คือ $-2.0000 \pm j2.4877$, $1.4000 \pm j2.3285$



รูปที่ ค.5 แผนภาพโถกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 2$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-2.0000 \pm j2.7288$

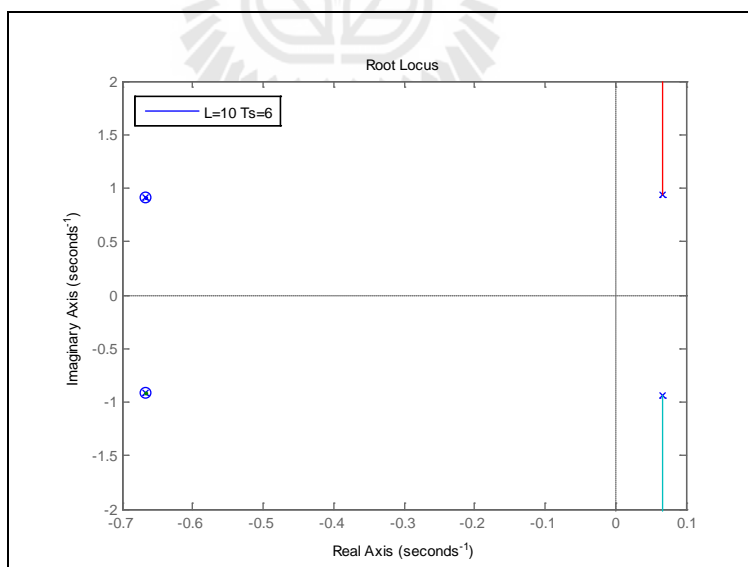
จะได้ว่า โพล คือ $-2.0000 \pm j2.7288$, $1.4000 \pm j2.5104$



รูปที่ ค.6 แผนภาพโถกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 4$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-1.0000 \pm j1.3644$

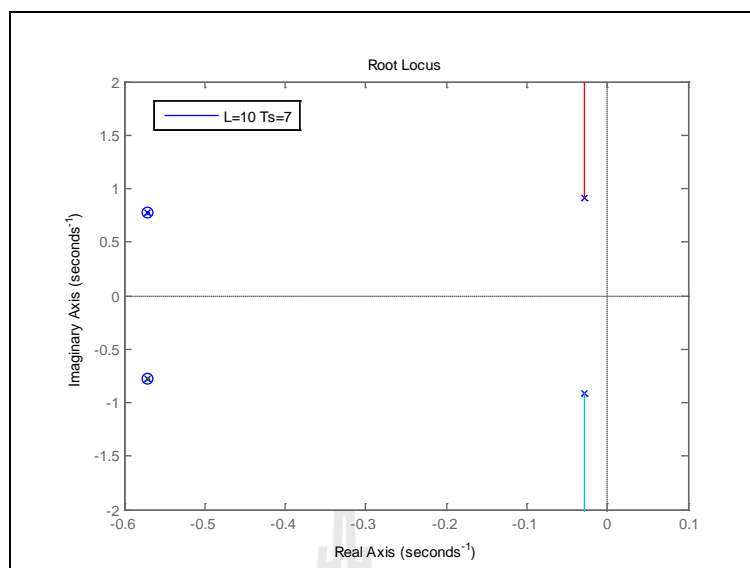
จะได้ว่า โพล คือ $-1.0000 \pm j1.3644$, $0.4000 \pm j1.2184$



รูปที่ ค.7 แผนภาพโถกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 6$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.6667 \pm j0.9096$

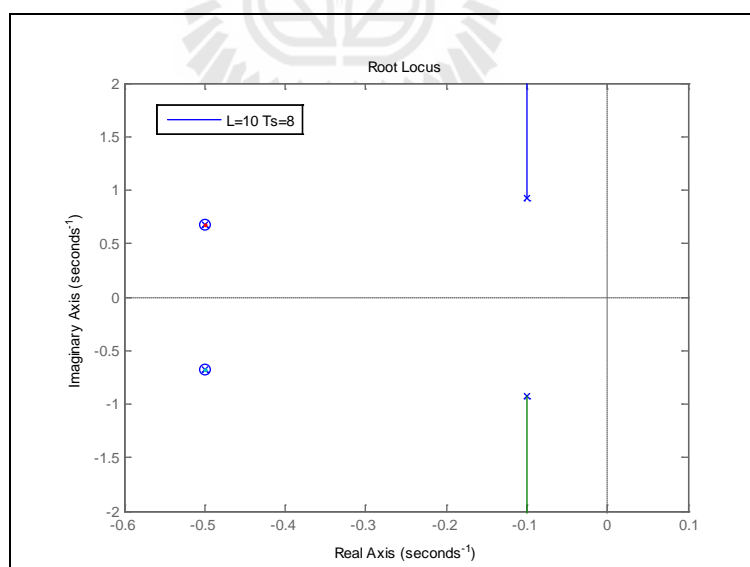
จะได้ว่า โพล คือ $-0.6667 \pm j0.9096$, $0.0667 \pm j0.9342$



รูปที่ ค.8 แผนภาพโถกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 7$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.5714 \pm j0.7796$

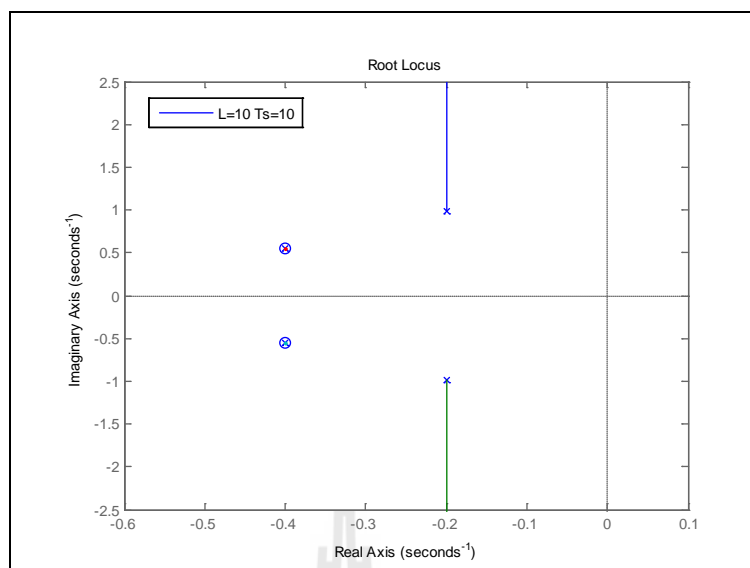
จะได้ว่า โพล คือ $-0.5714 \pm j0.7796$, $-0.0286 \pm j0.9097$



รูปที่ ค.9 แผนภาพโถกัศจรรย์เมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 8$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.5000 \pm j0.6822$

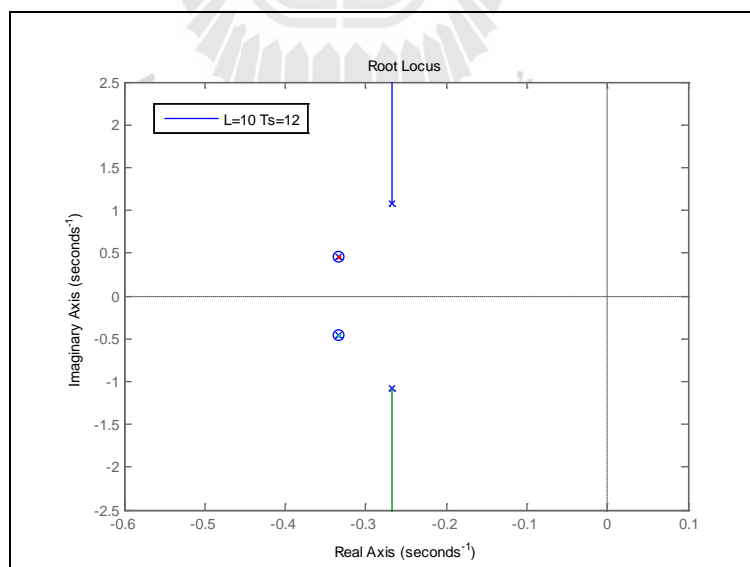
จะได้ว่า โพล คือ $-0.5000 \pm j0.6822$, $-0.1000 \pm j0.9203$



รูปที่ ค.10 แผนภาพโลโก้สรากเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 10$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.4000 \pm j0.5458$

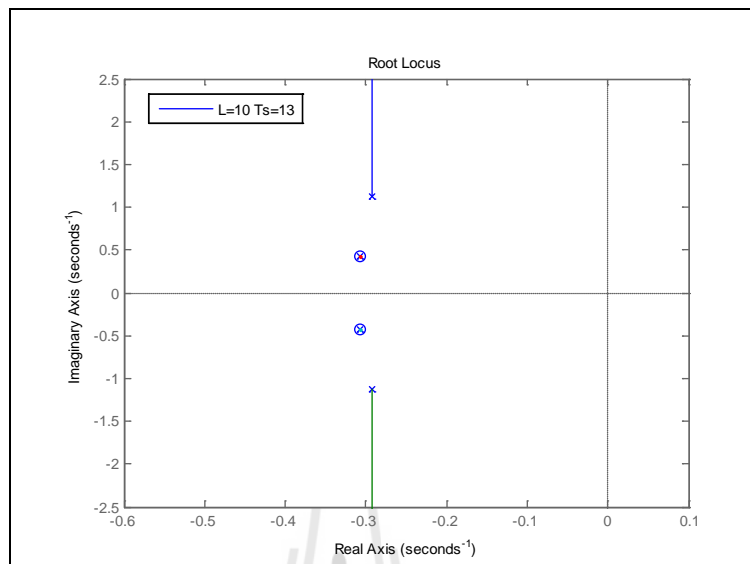
จะได้ว่า โพล คือ $-0.4000 \pm j0.5458$, $-0.2000 \pm j0.9905$



รูปที่ ค.11 แผนภาพโลโก้สรากเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 12$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.3333 \pm j0.4548$

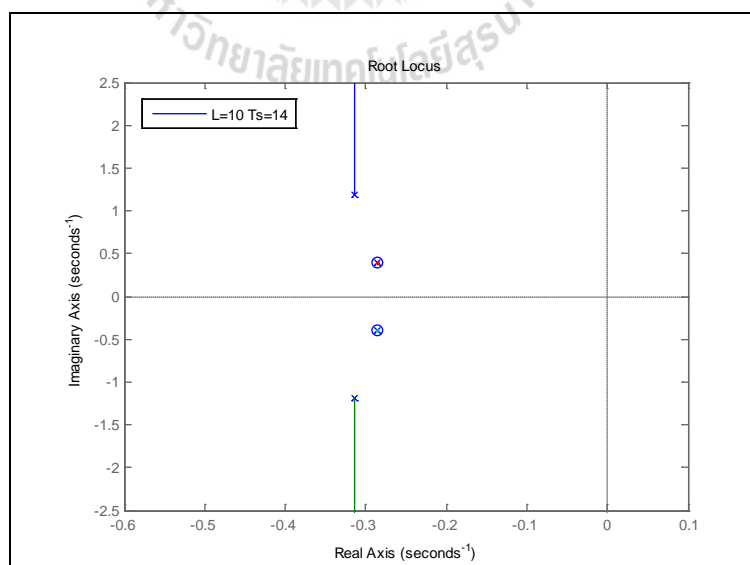
จะได้ว่า โพล คือ $-0.3333 \pm j0.4548$, $-0.2667 \pm j1.0838$



รูปที่ ค.12 แผนภาพโล่ัศรากลเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 13$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.3077 \pm j0.4198$

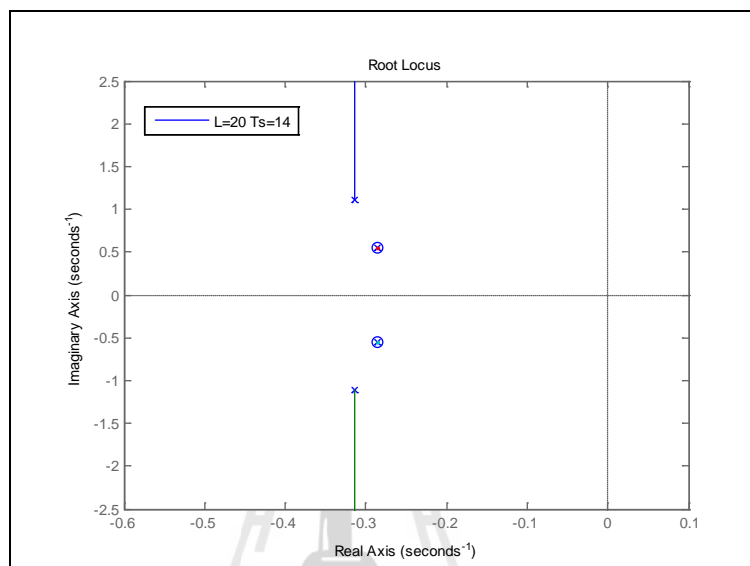
จะได้ว่า โพล คือ $-0.3077 \pm j0.4198$, $-0.2923 \pm j1.1323$



รูปที่ ค.13 แผนภาพโถกัศรากลเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 10\%$ และ $t_s \leq 14$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.2857 \pm j0.3898$

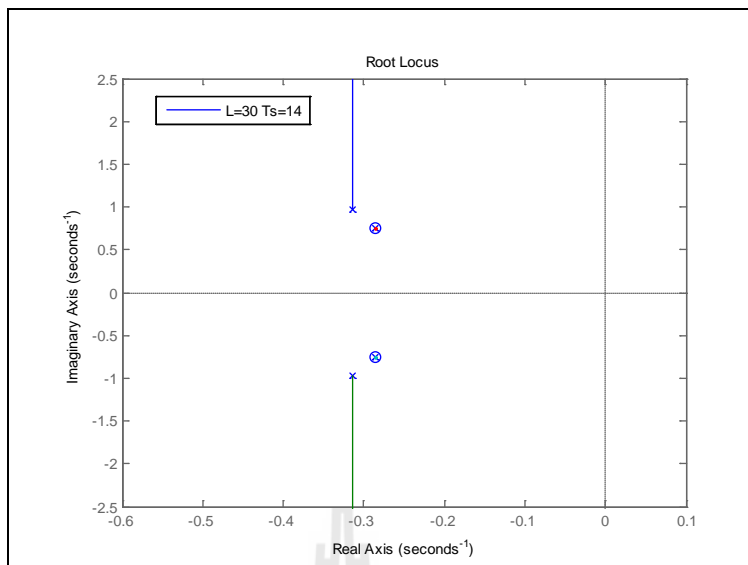
จะได้ว่า โพล คือ $-0.3143 \pm j1.1808$, $-0.2857 \pm j0.3898$



รูปที่ ค.14 แผนภาพโถกัศรากลเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 20\%$ และ $t_s \leq 14$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.2857 \pm j0.5577$

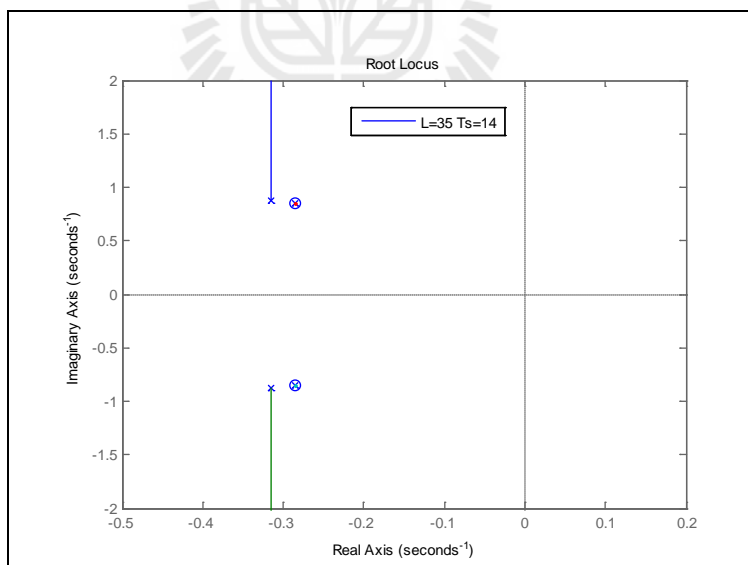
จะได้ว่า โพล คือ $-0.3143 \pm j1.1042$, $-0.2857 \pm j0.5577$



รูปที่ ค.15 แผนภาพโลโก้สรากเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 30\%$ และ $t_s \leq 14$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.2857 \pm j0.7455$

จะได้ว่า โพล คือ $-0.3143 \pm j0.9747$, $-0.2857 \pm j0.7455$



รูปที่ ค.16 แผนภาพโลโก้สรากเมื่อข้อกำหนดในการออกแบบคือ $P.O. \leq 35\%$ และ $t_s \leq 14$ s

จะได้ว่า ซีโร คือ $-0.2857 \pm j0.8550$

จะได้ว่า โพล คือ $-0.3143 \pm j0.8702$, $-0.2857 \pm j0.8550$

จากแผนภาพโลกัศรากลในรูปที่ ค.1 ถึง ค.16 พบว่าแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี แนวทางที่ 3 ไม่สามารถใช้กับพลานต์ 5 ได้อย่างสะดวกและเหมาะสมมากนัก เนื่องจากการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม K_p ที่จะทำให้โพลอื่นใด ๆ ซึ่งไม่ใช่คู่โพลเด่นห่างออกไปทางซ้ายมือของคู่โพลเด่นเป็นจำนวน m เท่า เพื่อให้ระบบวงปิดที่มีเสถียรภาพและมีสมรรถนะของผลตอบสนองเป็นไปตามที่คาดหวัง จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดเงื่อนไขข้อกำหนดช่วงเวลาเข้าที่ โดยที่ยิ่งมาก ยิ่งทำให้ทางเดินรากของโพลหรือค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม K_p มีระยะห่างจากคู่โพลเด่นไปทางซ้ายมือของระนาบเอสமாகขึ้น และเงื่อนไขข้อกำหนดปริมาณการพุ่งเกินเป็นดัชนีชี้ว่า หากยังกำหนดเงื่อนไขปริมาณการพุ่งเกินมาก ยิ่งทำให้จุดเริ่มต้นทางเดินรากของโพลอื่นใด ๆ ในพลานต์ 5 เข้าใกล้แกนจริงมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันคู่โพลเด่นจะมีระยะห่างจากแกนจริงมากขึ้นด้วย นั่นหมายความว่า หากต้องการออกแบบให้โพลอื่นใด ๆ ซึ่งไม่ใช่คู่โพลเด่นมีระยะห่างจากคู่โพลเด่นไปทางซ้ายมือของระนาบเอสமாகเท่าใด ยิ่งต้องกำหนดเงื่อนไขช่วงเวลาเข้าที่ในการออกแบบนานขึ้น



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a central figure of a person stands within a triangular frame. The base of the emblem is a circular seal containing a lotus flower. The entire logo is rendered in a light gray color.

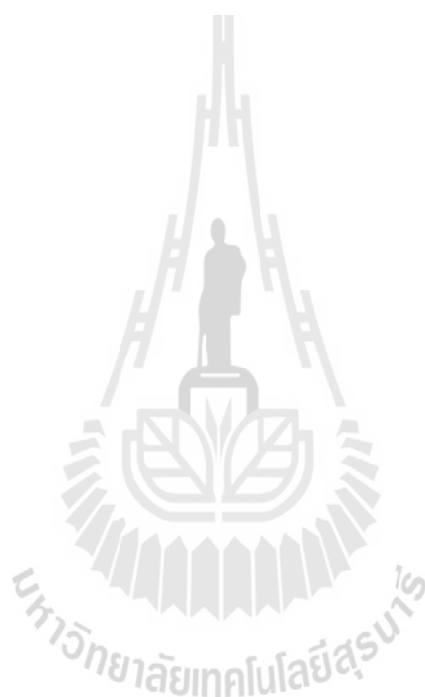
ภาคผนวก ง

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Sangtungong, W., Seangsri, S., and Sujitjorn, S. (2014). Dominant Pole-Placement and Extra Conjugate-Pole Assignment with the PID Controller. **iEECON2014**.



Dominant Pole-Placement and Extra Conjugate-Pole Assignment with the PID Controller

Wirote Sangtungong, Soontaree Seangsri

School of electrical engineering, Institute of engineering
Suranaree of university technology (SUT)
111, University avenue, Muang district, Nakhon ratchasima,
30000, Thailand, cewirote@sut.ac.th, soontaree.g@gmail.com

Sarawat Sujitjorn

Synchrotron light research institute (Public organization)
111, University avenue, Muang district, Nakhon ratchasima,
30000, Thailand, sarawat.sujitjorn@slri.or.th

Abstract—This article concentrates on the progression from the recent guaranteed dominant-pole placement method to the additional pole-assignment for any of other poles so that the performance-index of the closed-loop response becomes less or minimum as possible and the response performance remains within the preset requirements. Generally the pole assignment offers an extra pair of conjugate poles at two definite points on the left half-side of the s -plane. One type of the benchmark plants is regulated by the PID controller which its three gains are provided through both these pole placement and assignment methods. The polynomial equation will be proposed to establish its roots as the existence or absence of such a pair of conjugate poles. When compared to another example ignoring the requirements, the closed-loop response will be enhanced if these conjugate poles are recognized. Without a pair of them, the response with performance nearer to the requirements will be preferred.

Index Terms—Benchmark plant, conjugate-pole assignment, dominant-pole placement, PID controller, polynomial equation.

I. INTRODUCTION

The PID controller has been exploited widely for process control and plenty of compensation against the behavior of the linear time-invariant plants. There has been a variety of vast techniques for designing and tuning the three gains of such a PID controller in time and frequency domains [1]. Among them one method for guaranteed dominant-pole placement has become effective with the selective fourth-order stable plant bearing two real double-poles [2]. A pair of dominant-poles being complex-conjugate typifies the requirements on the closed-loop response, such as overshoot and settling-time. In order to ensure the dominance of them and the closed-loop stability, all the closed-loop poles must lie in the left half-side of the s -plane and any of other poles have to be located at least thrice more distantly from the imaginary axis than the dominant-poles are done. Therein the response curve could be regulated towards performance what is needed under those requirements. One controller parameter is employed as the variable gain and all other parameters are derived from the characteristic equation in terms of this gain so that such fixed dominant-poles and other poles movable along their root-loci are encountered. How the variable gain should be varied in order to improve the performance-index of the closed-loop response to become lower or minimum as feasible together

with the response performance being simultaneously within the requirements will be further investigated for a benchmark plant compensated by the PID controller. As stated improvement some of other poles often become an extra pair of conjugate pole and another is one real pole. Moreover, the existence of such a pair of conjugate poles will be also verified from the proposed polynomial equation. The contents of the paper are organized as follows. The benchmark plant will be declared and the method on guaranteed dominant-pole placement as well as the evaluation of one performance-index is reviewed briefly. The decision on an extra pair of conjugate poles and such a proposed polynomial equation will be clarified. Some illustrations also are exemplified and finally the conclusion is summarized.

II. PRELIMINARY AND REVIEW

When the benchmark plant is considered for the purpose in testing, its transfer function is designated as

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(\gamma s+1)(\gamma^2 s+1)(\gamma^3 s+1)} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (1)$$

at $\gamma = 0.5$ [3]. On the other portion of the overall system, the PID controller serving compensation to such a plant has its form of

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (2)$$

The closed-loop system that consists of the above plant and controller belongs to the unity feedback one. The three gains of the PID controller are determined through three following procedures. With beginning the first step a pair of closed-loop complex-conjugate dominant-poles that are denoted as $p_{1,2} = -a \pm jb$ must be assigned from the performance requirements of the closed-loop response in time or frequency domain. Herein, prescribing the percent overshoot and the settling-time of the unit-step response by $p_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ and $\omega_n = (4/\zeta T_s)$ allows the dominant-poles to be placed at two certain points on the left half-side of the s -plane [4]. The percent overshoot H is able to be converted into the damping ratio via

$\zeta = \frac{\ln(0.01 \cdot H)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(0.01 \cdot H))^2}}$ and ω_n is the undamped natural

frequency. In the next stage two design formulae are adopted to indicate the relation between K_I and K_F as well as between K_D

and K_p . These formulae are $K_I = \frac{a^2 + b^2}{2a} K_p - (a^2 + b^2) X_1$ and

$K_D = \frac{1}{2a} K_p + X_2$ where

$$X_1 = \frac{1}{2b} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G_F(p_1)} \right] + \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G_F(p_1)} \right] \text{ and}$$

$$X_2 = \frac{1}{2b} \operatorname{Im} \left[\frac{-1}{G_F(p_1)} \right] - \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left[\frac{-1}{G_F(p_1)} \right]. \text{ Such formulae reduce}$$

the original problem to the one-parameter issue [2]. Thereafter, the interval of K_p has to be specified such that all the closed-loop poles except the chosen dominant-poles are within the desired region in the left half-side of the s -plane. These closed-loop poles are located off the dominant-poles at the left of the line $s = -ma$ where gives the ratio of the real part of them to $-a$ which exceeds m . Usually the m is set to be 3 to 5.

Some of the other closed-loop poles apart from the dominant-poles could be selected as a pair of conjugate ones. The different values of K_p affect the performance-index $J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$. In each time of progress the K_p would be changed

from the previous value, which makes K_I and K_D also alters, and then the error of the closed-loop response is observed to evaluate this relevant performance-index. In another way the residue integration method is introduced in calculating the performance-index that is integral of squared error (ISE) without running the closed-loop system [5]. The procedure regarding the aforementioned calculation can be found out

$$\text{from } J = \frac{1}{j2\pi} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \{E(s)E(-s)\} ds. \quad E(s) = \frac{R(s)}{1 + G_C(s)G_F(s)}$$

stands for the response error. $R(s) = \frac{1}{s}$ is the unit-step

reference. When the K_p is varied to an only appropriate value, such a computed performance-index becomes minimum.

III. ASSIGNMENT OF AN EXTRA PAIR OF CONJUGATE POLES

If the closed-loop response manifests either larger overshoot or longer settling-time or both of them than the requirements, this situation signifies that there are another (extra) pair of conjugate poles lying near the imaginary axis and likely nearer than the dominant ones. The K_p should be readjusted so that the extra conjugate poles are farther away from the imaginary axis. This distance brings the overshoot and settling-time being limited to some extents that are less than the predetermined values while the ISE should be preserved at the lowest one as possible. A plain and useful manner achieving the objective is to impose the angle of the extra conjugate poles to coincide with the damping angle ($\phi = \pm \cos^{-1}(\zeta)$) of the dominant ones so long as the modulus (or

magnitude) of the conjugate pole is at least thrice more than the modulus of the dominant ones ($m \geq 3$) and these conjugate poles also exist on the root-loci caused by K_p variation. There is an analytical routine for solving such conjugate poles $p_{3,4} = -a' \pm jb'$ with their angles $\phi = \pm \tan^{-1}(b'/a') = \phi$. Anyone can initiate this work by $p_3 = a'(-1 + j|\tan(\phi)|)$ and further write out the characteristic equation $1 + K_p \bar{G}(s) = 0$ with $\bar{G}(s) =$

$\frac{(s^2 + 2as + a^2 + b^2)N(s)}{2asD(s) + 2a(X_2s^2 - X_1(a^2 + b^2))N(s)}$. Putting $s = p_3$ into the characteristic equation and reforming it build up two polynomial equations containing two variables a' and K_p .

When K_p gets equipped in connection with a' from either of these equations and is folded in another equation, the numeric roots of the resultant equation having just the variable a' are able to be known and a' becomes the real roots merely whereas the complex roots are ruled out. Subsequently, b' and the conjugate poles can be cast around for by using $b' = a' \tan(\phi)$. There is also an alternative algorithm for seeking such conjugate poles. A suitable range of K_p is decided so that the K_p at the minimum ISE and the K_p at the second occurrence of the breakaway point are settled on for the largest value and the smallest one of this range ends, respectively. K_p is varied inside the range and then the characteristic equation is sorted out iteratively along the direction in which the conjugate poles are shifted towards them possessing the same angle as the damping angle. However, the modulus of such extra conjugate poles ($|p_{3,4}| = \sqrt{(a')^2 + (b')^2}$) may be less than the threefold magnitude of the dominant-poles ($m < 3$). This can lead to either of the overshoot or the settling-time or both of them to be superfluous. K_p should be decreased, rendering the location of the extra conjugate poles to move further away from the imaginary axis and m to increase.

IV. THE PROPOSED POLYNOMIAL EQUATION

It is probable that there are not any conjugate poles fitting $m \geq 3$ out while guessing at K_p corresponding to $m \geq 3$ could be impractical. The presence of the extra conjugate poles holding onto $m \geq 3$ can be certified through the characteristic

equation $G_C(s) = -\frac{1}{G_F(s)} \Big|_{s=-ma+j\omega}$ underlying one of them

at $s = -ma + j\omega$ where $|\tan^{-1}(\omega/(ma))| \leq |\phi|$. The ω represents the imaginary part of the extra conjugate poles and is the new variable that has to be ascertained. When the K_I and K_D are superseded from the two design formulae, the characteristic equation becomes

$$(K_p + 2aX_2)(-ma + j\omega)^2 + 2aK_p(-ma + j\omega) + (a^2 + b^2)(K_p - 2aX_1) = -2a \frac{-ma + j\omega}{G_F(-ma + j\omega)}. \quad (3)$$

After $G_p(s) = \frac{1}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$ is noticed and s squared, s cubed as well as the fourth power of s are expressed with $s = -ma + j\omega$ some arrangements round the term $\frac{-ma + j\omega}{G_p(-ma + j\omega)}$ spread

$$\begin{aligned} & a_4(-ma + j\omega)^5 + a_3(-ma + j\omega)^4 + a_2(-ma + j\omega)^3 + a_1(-ma + j\omega)^2 \\ & + a_0(-ma + j\omega) = (a_3 - 5a_4ma)\omega^4 + [10a_4m^3a^3 + ma(3a_2 - 6a_3ma) \\ & - a_1]\omega^2 + ma(a_2ma - a_0) + m^3a^3(a_2ma - a_2) - a_4m^5a^5 \\ & + ja_4\omega^4 + (4a_3ma - a_2 - 10a_4m^2a^2)\omega^2 + a_0 - 2a_1ma \\ & + m^2a^2(3a_2 - 4a_3ma) + 5a_4m^4a^4. \end{aligned} \quad (4)$$

A sequel to the characteristic equation is conceived of as

$$\begin{aligned} & (m^2a^2 - 2ma^2 + a^2 + b^2)K_p + 2a[m^2a^2X_2 - (a^2 + b^2)X_1] \\ & - (K_p + 2aX_2)\omega^2 + j2a\omega[K_p(1 - m) - 2maX_2] \\ & + 2a\frac{-ma + j\omega}{G_p(-ma + j\omega)} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Immediately, the term $\frac{-ma + j\omega}{G_p(-ma + j\omega)}$ is substituted with

$\sum_{i=1}^5 a_{-i}(-ma + j\omega)^i$, then the real parts are aggregated and the imaginary parts are added together. The equality of the left-hand side and the right-hand side in the identical equation produces the two equations below:

$$\begin{aligned} & 2a(a_3 - 5a_4ma)\omega^4 + \{2a[10a_4m^3a^3 + ma(3a_2 - 6a_3ma) - a_1 - X_2] \\ & - K_p\}\omega^2 + 2a[ma(a_2ma - a_0) + m^3a^3(a_2ma - a_2) - a_4m^5a^5 \\ & + m^2a^2X_2 - (a^2 + b^2)X_1] + K_p(m^2a^2 - 2ma^2 + a^2 + b^2) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & 2a_4ja\omega^4 + (4a_3ma - a_2 - 10a_4m^2a^2)\omega^2 + a_0 - 2a_1ma \\ & + m^2a^2(3a_2 - 4a_3ma) + 5a_4m^4a^4 - 2maX_2 + K_p(1 - m) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

The latter of these two equations perceives $\omega = 0$ as one solution suggesting that there is at least one closed-loop pole that must be always a real number, regardless of K_p variation and an amount of m . The K_p is obtained from substituting $\omega = 0$ and one of $m \geq 3$ into the former. Anybody can contract the two equations into the compact forms that associate with two unknowns of K_p and ω at a given m below:

$$A\omega^4 + (B - K_p)\omega^2 + C + DK_p = 0 \quad (8)$$

$$E\omega^4 + F\omega^2 + G + HK_p = 0. \quad (9)$$

When the latter of them is rearranged into $K_p = -(1/H)(E\omega^4 + F\omega^2 + G)$ and the K_p in the former is replaced, the consequent proposed polynomial equation with a single variable ω is acquired as

$$E\omega^6 + (AH - ED + F)\omega^4 + (BH - FD + G)\omega^2 + CH - GD = 0. \quad (10)$$

Because there are all five closed-loop poles involved in the pondered closed-loop system and two of them have already become one pair of the dominant-poles, the remainder are either three real poles or an extra couple of the conjugate poles together with one real pole. When the solutions of the last polynomial equation comprise double zeroes and four complex numbers, the closed-loop poles become two dominant-poles, double real poles and one other real pole. The double real poles are the conjugate poles without their imaginary parts. If the solutions are composed of four complex numbers and two real ones with the same size but opposite sign, the closed-loop poles become two dominant-poles, an extra couple of the conjugate poles and one real pole. When the solutions all are the complex numbers, the closed-loop system lacks its extra conjugate poles due to excluding the ω 's that are the complex values. The pertinent K_p can be appraised from displacing the ω in $K_p = -[1/(D - \omega^2)](A\omega^4 + B\omega^2 + C)$ by the knowledge of each real ω .

V. EXAMPLES AND DISCUSSION

A few of forthcoming instances will demonstrate verification in existence of such an extra pair of conjugate poles. In the first case the percent overshoot and the settling-time are dispensed with 8% and 8.25 s, respectively. The dominant-poles are situated at $p_{1,2} = -0.485 \pm j0.603$ with their damping angle $\phi \approx \pm 51.2^\circ$ and modulus $|p_{1,2}| = \omega_n \approx 0.77$ as shown in Fig. 1. The three values of the K_p , K_p and K_D gains being 4.677, 3.183, and 4.418, respectively are informed from the residue integration principle as well as the two design formulae for the minimum ISE. Although the closed-loop response against the unit-step setpoint passes $J = 0.287$ and the settling-time of 4.5 s but it exhibits the rather substantial overshoot of 24.6% which may be unsatisfactory and surplus from the requirement as shown in Fig. 2. The rest of the closed-loop poles are positioned at $p_3 = -11.7$ and $p_{3,4} = -1.14 \pm j5.26$ with their angle $\phi \approx \pm 77.8^\circ$ and modulus $|p_{3,4}| \approx 5.38$ in the s -plane while the closed-loop zeroes are met at $z_{1,2} = -0.529 \pm j0.664$ in which are extremely adjacent to the dominant-poles. The influence of the closed-loop zeroes and the effect from the dominant-poles almost cancel each other out but incompletely. Underneath the circumstances and thanks to $m = [\text{Re}(p_{3,4}) / \text{Re}(p_{1,2})] = (1.14/0.485) \approx 2.35$ ($m < 3$), the conjugate poles play an important role in the performance and shape of the response. Both the modulus and angle of the conjugate poles are greater than those of the dominant-poles. The settling-time of the response becomes shorter than the requirement while conversely the overshoot peak is larger.

Once the K_p gain declines to 1.386, dependent on searching for the novel couple of the closed-loop conjugate poles in which feature their angles nearly agreeing with the damping angle, the ISE becomes non-minimum and the extra conjugate

poles take their locations at $p_{3,4} = -2.25 \pm j2.8$ (with their angle $\varphi \approx \pm 51.22^\circ$) where are more distant from the left-hand side of the imaginary axis as shown in Fig. 3. The closed-loop zeroes at $z_{1,2} = -0.677 \pm j0.816$ are isolated more obviously from the dominant-poles that stay at their early positions. Thus, the impact of them hardly counteracts the dominant-poles. Beneath such an event and owing to $m = [\text{Re}(p_{3,4}) / \text{Re}(p_{1,2})] = (2.25/0.485) \approx 4.64$ ($m > 3$), the dominant-poles characterizes eminently the transient response. The gains of $K_I = 1.151$ and $K_D = 1.024$ are received. The closed-loop response reveals the overshoot of 4.8% and the settling-time of 6.67 s in which are within the advisable requirements while a rise in the $J = 0.602$ is conceded as shown in Fig. 4. Therefore, the PID controller should be tuned at $K_P = 1.386$, $K_I = 1.151$ and $K_D = 1.024$.

Besides, the proposed polynomial equation can also assure whether the extra conjugate poles of interest come into existence or not. After the substitution from $a_4 = 0.01563$, $a_3 = 0.2344$, $a_2 = 1.094$, $a_1 = 1.875$, $a_0 = 1$, $m \approx 4.64$, $a = 0.485$, $b = 0.603$, and the numeric values of the other parameters into the polynomial equation with a single variable ω all the solutions of this equation cover $\omega = \pm 2.8041$, $-0.6031 \pm j1.7648$, and $0.6031 \pm j1.7648$. The key solution $\omega = \pm 2.8041$ and the imaginary part of $p_{3,4}$ ($\text{Im}(p_{3,4}) = \pm 2.8$) match up.

In next incident the percent overshoot and the settling-time are stipulated by 10% and 5 s, respectively. The dominant-poles are fixed at $p_{1,2} = -0.8 \pm j1.09$ with their damping angle $\phi \approx \pm 53.72^\circ$ and modulus $|p_{1,2}| = \omega_n \approx 1.35$ as shown in Fig. 5. Looking for an extra couple of the conjugate poles by which their angle ties in with the damping angle allocates $p_{3,4} = -1.9 \pm j2.59$ (with their angle $\varphi \approx \pm 53.74^\circ$) as well as the three gains of $K_P = 2.81$, $K_I = 2.83$ and $K_D = 1.22$ for the PID controller. The closed-loop zeroes arise at $z_{1,2} = -1.15 \pm j0.997$ where is the proximity to the dominant-poles but not adjoining to. Thus, the dominant-poles are almost unaffected from the zeroes. On account of $m = [\text{Re}(p_{3,4}) / \text{Re}(p_{1,2})] = (1.9/0.8) \approx 2.38$ ($m < 3$), both the conjugate poles and the dominant-poles give rise to the response with $J = 0.463$ concerning the overshoot of 17% beyond the requirement as shown in Fig. 6. However, the settling-time for 3.35 s is shorter than that for 5 s.

Once anyone wishes to bring about $m > 3$, the extra conjugate poles have to be removed further away from the imaginary axis and then laid on $p_{3,4} = -2.38 \pm j0.109$ where is the propinquity to the breakaway point of the root-locus as shown in Fig. 7. The closed-loop zeroes appear at $z_{1,2} = -1.77 \pm j0.212$ in which is between the dominant-poles and the conjugate poles and where the conjugate ones are nearer. Therefore, the closed-loop poles and zeroes scarcely interact on each other. The PID controller deals with its own $K_P = 1.56$, $K_I = 1.4$ and $K_D = 0.44$. Because of $m = [\text{Re}(p_{3,4}) / \text{Re}(p_{1,2})] = (2.38/0.8) \approx 2.975$ ($m < 3$), the response notifies anyone of $J = 0.713$ and the overshoot of 14.2% outside the requirement as

shown in Fig. 8. Nevertheless, the settling-time for 4.21 s is still smaller than that for 5 s.

It is questionable whether the extra conjugate poles with $m \geq 3$ are able to materialize. When the proposed polynomial equation with a single variable ω is applied and the $a_4 = 0.01563$, $a_3 = 0.2344$, $a_2 = 1.094$, $a_1 = 1.875$, $a_0 = 1$, $m = 3$, $a = 0.8$, $b = 1.09$, as well as the numeric values of the other parameters are substituted into this polynomial equation, its answers all are disclosed by the complex numbers of $\omega = \pm j0.5453$, $-1.0915 \pm j1.6$, and $1.0915 \pm j1.6$. Thus, this implies that there are solely the extra conjugate poles with $m < 3$ while the PID controller should be tuned at $K_P = 1.56$, $K_I = 1.4$ and $K_D = 0.44$ for the sake of the weaker overshoot.

VI. CONCLUSION

In this paper the three procedures for tuning the PID controller compensating the benchmark plant embraces an assignment of the dominant-poles with the intention of dropping to the one-parameter problem, a choice of the PID gains that respond to the minimum ISE, and a placement of the extra conjugate poles with $m \geq 3$ at which their angle complies with or is fewer than the damping angle of the dominant ones if the minimum ISE brings out either stronger overshoot or longer settling-time than the requirements. The proposed polynomial equation can inspect the presence or absence of such extra conjugate poles with $m \geq 3$. The first and second examples of tuning the PID controller expose a trade-off on the closed-loop responses between the minimum ISE and the performance requirements in time domain while the third and fourth ones just compromise on both the ISE and the overshoot peak. However, herein the gains of the PID controller that necessitate the responses being within the requirements or near better will be favoured in view of an obligation to the prior assignment of the dominant-poles.

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

- [1] K. J. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers, Theory, Design and Tuning*, 2nd ed., Instrument Society of America: Research Triangle Park, NC, 1995.
- [2] Q-G. Wang, Z. Zhang, K. J. Astrom, and L. S. Chek, "Guaranteed dominant pole placement with PID controller," *Journal of Process control*, vol. 19, pp. 349–352, 2009.
- [3] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Benchmark systems for PID control," *Proceedings of IFAC Conference on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control*, pp. 165–166, 2000.
- [4] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 4th ed., Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [5] E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics*, 10th ed., John Wiley and Sons: Printed in Asia, 2011.

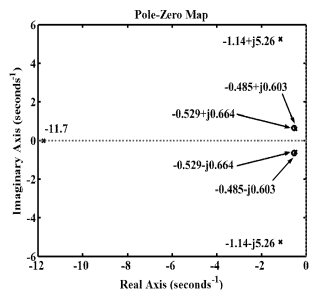


Fig. 1. Poles and zeroes in s-plane at $J = 0.287$.

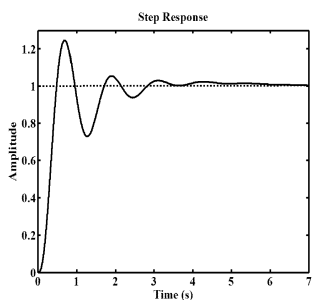


Fig. 2. Response with $T_s = 4.5$ s and $H = 24.6\%$.

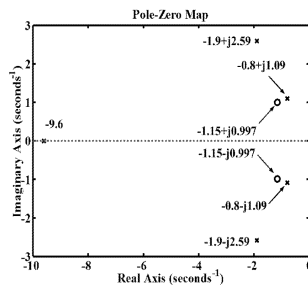


Fig. 5. Poles and zeroes in s-plane at $J = 0.463$.

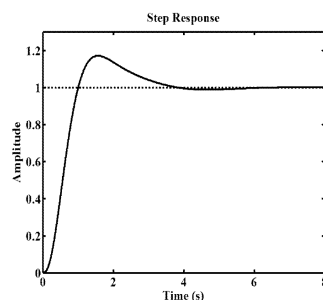


Fig. 6. Response with $T_s = 3.35$ s and $H = 17\%$.

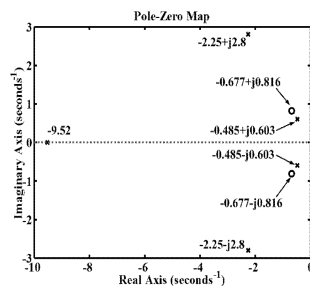


Fig. 3. Poles and zeroes in s-plane at $J = 0.602$.

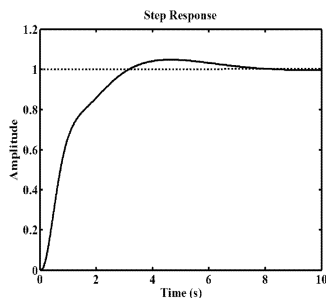


Fig. 4. Response with $T_s = 6.67$ s and $H = 4.8\%$.

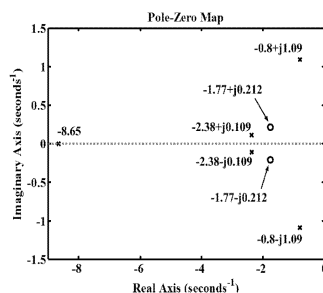


Fig. 7. Poles and zeroes in s-plane at $J = 0.713$.

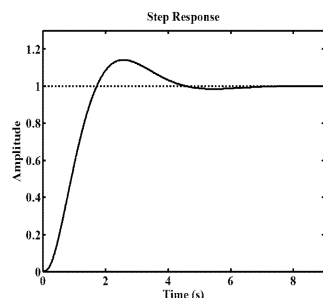


Fig. 8. Response with $T_s = 4.21$ s and $H = 14.2\%$.



iEECON2014



The 2014 International Electrical Engineering Congress

MARCH 19-21, 2014 PATTAYA BEACH, THAILAND



Best Paper Award in Electronics & Control

“Dominant pole-placement and extra conjugate-pole assignment with the PID controller”

Wirote Sangtungong, Soontaree Seangsri, Sarawut Sujitjorn

A. R. 

(Athikom Roeksabutr)
General Chair

J. Ngamroo 

(Issarachai Ngamroo)
Technical Program Chair

Somyot K. 

(Somyot Kaitwanidvilai)
Technical Conference Chair

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุนทรี แสงศรี เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนอนุบาลกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี และระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนกาญจนาอนุเคราะห์ จังหวัดกาญจนบุรี ในปี พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2554 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโท เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการระบบควบคุม (2) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ และ (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ค. ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ การออกแบบตัวควบคุม และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานระบบไฟฟ้ากำลัง