วงจรตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการบวกแรงดันในการต่ออนุกรม

นายวิชาติ ถูกหมาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ปีการศึกษา 2565

วงจรตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการบวกแรงดันในการต่ออนุกรม

นายวิชาติ ถูกหมาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

A PID controller circuit based on voltage adder in series connection

Wichat Tookmai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Graduate Study, Faculty of Engineering
Southeast Asia University
Academic Year 2022

Copyright by Southeast Asia University

ชื่อวิทยานิพนธ์	วงจรตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการบวกแรงดันในการต่ออนุกรม
ชื่อนักศึกษา	นายวิชาติ ถูกหมาย
รหัสนักศึกษา	6444010002
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วิโรจน์ จงชนะชววัฒน์)

..... กรรมการ

(รศ. ดร.อดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร)

..... กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

(รศ. ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์)

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

..... คณบดี

(ดร.ภานุวัฒน์ แตระกุล)

วันที่สอบ: 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2566

Thesis Title	A PID controller circuit based on voltage adder in series connection
Student Name	Mr.Wichat Tookmai
Student ID	6444010002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Ittipong Chaisayun

Examining Committee

Wirote Jongchanachavawat ..... Chairman

(Asst. Prof. Dr.Wirote Jongchanachavawat)

A. Monpapassorn ..... Member

(Assoc. Prof. Dr.Adisak Monpapassorn)

Ittipong Chaisayun ..... Member (Thesis Advisor)

(Assoc. Prof. Dr.Ittipong Chaisayun)

This Thesis has been approved to be a Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering Graduate Study, Faculty of Engineering

..... Dean

(Dr.Panuwat Taerakul)

Examination Date: July 29, 2023

ชื่อวิทยานิพนธ์ วงจรตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการบวกแรงดันในการต่ออนุกรม
ชื่อนักศึกษา นายวิชาติ ถูกหมาย
รหัสนักศึกษา 6444010002
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2565
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรควบคุมพีไอดีโดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส วงจรควบคุมพีไอดีนี้ มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไป และสามารถปรับค่าเกณฑ์ K_P, K_I, K_D ได้อย่างอิสระด้วยตัวต้านทาน การวิเคราะห์วงจรทางคณิตศาสตร์พบว่าค่าความไวของอุปกรณ์ต่างๆ ต่อ พารามิเตอร์ K_P, K_I, K_D มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมพีไอดีด้วย LTspice พบว่าวงจรสามารถปรับค่า K_P, K_I, K_D ได้อย่างอิสระ ขณะที่วงจรบริโภคกำลังไฟฟ้า 0.6 วัตต์เมื่อใช้แรงดันไฟเลี้ยง ±15 โวลต์ นอกจากนี้ ตัวควบคุมพีไอดีได้นำไปทดสอบทำงานร่วมกับพลานต์อันดับสามแบบวงรอบปิด ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม LTspice เปรียบเทียบกับ MATLAB พบว่ามีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน และตัวควบคุมพีไอดีนี้ยังถูกนำไปใช้งานในการควบคุมวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงแบบบัคก์

Thesis Title	A PID controller circuit based on voltage adder in series connection
Student Name	Mr. Wichat Tookmai
Student ID	6444010002
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Academic Year	2022
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipong Chaisayun

Abstract

This paper proposes a PID controller employing current feedback operational amplifier (CFOA). The advantage of proposed circuit are independently adjustable parameters (K_P, K_I, K_D) by resistors and commercially available used devices. Mathematical analyses find that the active and passive element sensitivities are equal to unity in magnitude. Simulation results using LTspice are shown that the parameters (K_P, K_I, K_D) can be independently adjusted and the power consumption of PID controller circuit is 0.6 W at ±15 V supply voltages. In addition, this PID circuit is demonstrated on a close loop system with the third order plant. The simulation results using LTspice are compared with those using MATLAB, it is found that both results are consistent. The proposed PID controller is utilized to regulate the DC-DC buck converter

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ ทั้งในด้านวิชาการ และการด้านดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

รองศาสตรจารย์ ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณามอบหมายงานวิจัยอันเป็นประโยชน์ ได้อุทิศความรู้ ความสามารถ ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

คณาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้จากการเข้าเรียนในรายวิชาบัณฑิตศึกษา ถ่านทอดประสบการณ์อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดเพื่อน พี่ น้อง บัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์แห่งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู สนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา

นายวิชาติ ถูกหมาย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญตาราง..... ..... ฉ
สารบัญภาพ..... ..... ช

บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... .. 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย..... .. 2
1.3 สมมติฐานการวิจัย..... . 2
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์..... 2
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย..... 2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี.....4
2.2 คุณสมบัติของวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส..... 15
2.3 แบบจำลองการทำงานของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส 23

บทที่ 3 การออกแบบวงจรควบคุมพีไอดีโดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส
3.1 ตัวควบคุมพีไอดี 28
3.2 ผลการจำลองการทำงานโดยใช้ LTspice 32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การวิเคราะห์วงจรในกรณีใช้แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟตรง.....35

3.4 การวิเคราะห์วงจรในกรณีใช้แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับ..... 36

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้วงจรตัวควบคุมพีไอดีในระบบอันดับสาม

4.1 การออกแบบระบบอันดับสาม..... 39

4.2 การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีการปรับอัตราขยายโดยใช้ LTspice..... 41

4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของ Chien Hrones Reswick โดยใช้ LTspice.....43

4.4 การเปรียบเทียบผลของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของ CHR โดยใช้ LTspice และ MATLAB..... 49

4.5 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดี ในวงจรแปลผันแบบบักค์ 51

บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 54

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 54

เอกสารอ้างอิง..... 55

ภาคผนวก ก โปรแกรมจำลองการทำงานของ UA741 และ AD844..... 57

ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่..... 64

ประวัติผู้เขียน..... 69

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 ตารางที่ 4.1 สูตรการปรับจูนของ CHR สำหรับการควบคุมแบบติดตามอินพุต..... 44
4.2 ตารางที่ 4.2 สูตรการปรับจูนของ CHR สำหรับการควบคุมแบบกำจัดสัญญาณรบกวน.... 44

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบพี 6
2.2 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตขององค์ประกอบพี..... 6
2.3 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบไอ..... 7
2.4 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตขององค์ประกอบไอ..... 8
2.5 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบดี..... 9
2.6 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตขององค์ประกอบดี..... 10
2.7 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวควบคุมพีไอ..... 10
2.8 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ..... 11
2.9 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวควบคุมพีดี..... 12
2.10 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมพีดี..... 12
2.11 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวควบคุมพีไอดี..... 14
2.12 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี..... 14
2.13 วงรอบของการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี..... 14
2.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรภายในของวงจรขยายป้อนกลับกระแส..... 15
2.15 วงจรขยายป้อนกลับกระแส (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล..... 15
2.16 โครงสร้างภายในของวงจรขยายป้อนกลับกระแสเบอร์ AD844.....16
2.17 วงจรภายในออปแอมป์ป้อนกลับกระแส AD844.....17
2.18 แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันที่สร้างจาก CFOA 19
2.19 วงจรแหล่งจ่ายไม่อิสระที่สร้างจาก CFOA 21
2.20 วงจรตามแรงดัน.....22
2.21 วงจรตามกระแส.....22
2.22 วงจรอินทิเกรเตอร์.....23
2.23 วงจรดิฟเฟอร์เรนเชียล.....23
2.24 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟตรง.....24
2.25 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองภาพที่ 2.24 กับ แบบจำลองระดับทรานซิสเตอร์ของ AD844.....25
2.26 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับ.....26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

2.27 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองภาพที่ 2.26 กับ แบบจำลองระดับทรานซิสเตอร์ของ AD844.....27
3.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอดี.....28
3.2 วงจรรวมตัวควบคุมพีไอดี.....29
3.3 วงจรตัวควบคุมไอ.....30
3.4 วงจรตัวควบคุมพี.....30
3.5 วงจรตัวควบคุมดี.....31
3.6 ลักษณะของสัญญาณอินพุตแบบ Unit Step.....33
3.7 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_P มีค่าต่างๆ.....33
3.8 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_I มีค่าต่างๆ.....34
3.9 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_D มีค่าต่างๆ.....35
3.10 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟตรง.....36
3.11 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับ.....37
3.12 วงจรตัวควบคุมไอ.....37
3.13 วงจรตัวควบคุมพี.....38
3.14 วงจรตัวควบคุมดี.....38
4.1 วงจรของระบบอันดับสามที่สร้างจากออปแอมป์.....39
4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอันดับสาม.....40
4.3 กระแสเอาต์พุตของวงจรระบบอันดับสาม.....41
4.4 บล็อกไดแกรมแสดงสมการการควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยาย.....42
4.5 วงจรของการควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยาย.....42
4.6 กระแสเอาต์พุตของการควบคุมวงจรรอบปิดด้วยอัตราขยาย.....43
4.7 ผลการตอบสนองโดเมนเวลาสำหรับสูตรการปรับสูตรของ CHR 44
4.8 ระบบอันดับสาม.....45
4.9 ซิมูลิงค์ระบบอันดับสาม.....45
4.10 ผลซิมูลิงค์ระบบอันดับสา.....46
4.11 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี.....47
4.12 วงจรของการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี.....48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.13 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดี.....48
4.14 การทดสอบตัวควบคุมด้วยพีไอดีกับพลานต์อันดับสามด้วยซิมูลิงค์ 49
4.15 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดีโดย MATLAB.....50
4.16 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดีโดย LTspice.....50
4.17 วงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบไม่มีการป้อนกลับ.....51
4.18 เอาต์พุตของวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบไม่มีการป้อนกลับ.....51
4.19 วงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบมีการป้อนกลับ.....52
4.20 เอาต์พุตของวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบมีการป้อนกลับ.....52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวควบคุมหรือตัวชดเชยที่มีใช้ในระบบควบคุมทำหน้าที่ให้ระบบมีผลการตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ โดยตัวควบคุมที่นิยมใช้มากที่สุดคือตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-derivative: PID) ทั้งนี้เพราะตัวควบคุมแบบพีไอดี มีความสามารถในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่าย มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และราคาถูก[1] ในปัจจุบันนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีส่วนใหญ่จะเป็นแบบดิจิตอล[1]เพราะมีข้อดีคือมีความหยืดหยุ่นและความเชื่อถือสูง แต่ตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะลอก[2-3]ยังมีข้อดีกว่าในเรื่องความเร็วในการตอบสนองที่เร็วกว่าและถ้านำตัวควบคุมไปสร้างเป็นวงจรรวม ตัวควบคุมแบบแอนะลอกจะใช้พื้นที่น้อยกว่าและบริโภคกำลังไฟน้อยกว่า เมื่อไม่นานมานี้ก็มีการรวมตัวควบคุมทั้งดิจิตอลและแอนะลอกให้ทำงานด้วยกันเพื่อจะได้รับจุดเด่นของทั้งคู่[4] เดิมทีการสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะลอกจะใช้ออปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แต่ด้วยข้อจำกัดของออปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ในเรื่องความถี่ตอบสนองและอัตราสลูว์ (Slew Rate) ที่ต่ำ จึงได้มีการนำเสนอตัวควบคุมพีไอดีที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แอคตีฟที่ทันสมัย เช่น งานวิจัย[5] ใช้วงจรสายพานกระแสรุ่น งานวิจัย[6] ใช้วงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส งานวิจัย[7] ใช้วงจรขยายความนำ และ งานวิจัย[8-9] ใช้วงจรขยายผลต่างกระแส โดยงานวิจัย[5-7] มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไปและเกณฑ์ K_P, K_I, K_D สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระแต่ข้อด้อยคือใช้อุปกรณ์แบบแอคตีฟจำนวนมากทำให้วงจรมีขนาดที่ใหญ่และกินกำลังไฟฟ้าที่สูง ขณะที่งานวิจัย[8-9] มีข้อดีคือเกณฑ์ K_P K_I K_D สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระ ข้อด้อยคือวงจรขยายผลต่างกระแส ยังไม่มีขายในท้องตลาดแต่ก็สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยใช้ ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส 2 ตัว [9] เมื่อเร็วๆนี้ได้เสนอตัวควบคุมพีไอดี[10] ที่มีข้อเด่นคือใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสที่หาซื้อได้ทั่วไปเพียง 3 ตัวและสามารถปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมได้อย่างอิสระ แต่มีข้อด้อยคือต้องปรับค่าด้วยตัวเก็บประจุซึ่งเป็นเรื่องยากที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบที่สามารถปรับค่าได้ ในบทความนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะลอก โดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier: CFOA หรือ CFA) ที่สามารถปรับค่าอัตราขยายต่างๆอย่างอิสระด้วยตัวต้านทาน

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงขอนำเสนอตัวควบคุมพีไอดี โดยการสังเคราะห์ในรูปของการควบคุมแบบแอนะล็อก โดยใช้อุปกรณ์คือ วงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส (Current Feedback

Operational Amplifier: CFOA หรือ CFA) ซึ่งวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส มีข้อดีกว่าออปแอมป์ในหลายเรื่อง เช่น ตอบสนองความถี่สูงกว่า ทำงานในโหมดของกระแส ใช้แรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำกว่าใช้กำลังน้อยกว่าและ วงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส ยังเป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ในประเทศไทยแต่ราคายังสูงเมื่อเทียบกับออปแอมป์ แต่อย่างไรก็ตามในอนาคตอันใกล้นี้ราคาอุปกรณ์ตัวนี้จะลดลงและหาได้ง่ายในประเทศไทยที่ผ่านมาการนำวงจรสายพานกระแสและวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแสมาสร้างเป็นตัวควบคุมพีไอดี [6]-[8] แต่ยังไม่มีการนำมาสร้างเป็นตัวควบคุมพีไอดี ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำ วงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแสมาสร้างเป็นตัวควบคุมพีไอดี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบวงจรตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

1.2.2 เพื่อออกแบบระบบควบคุมวงจรรอบปิดโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี Chien Hrones Reswick (CHR)

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวควบคุมด้วย LTspice กับ MATLAB

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

1.3.1 การทดสอบตัวควบคุมแบบแอนะลอกโดยใช้ LTspice จะสอดคล้อง MATLAB

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1.4.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

1.4.2 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธีของ Chien Hrones Reswick (CHR)

1.4.3 ทดสอบระบบที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้โปรแกรม LTspice และ MATLAB

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

1.5.1 ศึกษาคุณสมบัติตัวควบคุมพีไอดี

1.5.2 ศึกษาการจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดี

1.5.3 ศึกษาการทำงานของโปรแกรม LTspice เพื่อเลียนแบบการทำงานของตัวควบคุมพีไอดีของงานวิจัยที่นำเสนอ

1.5.4 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และหาผลลัพธ์ด้วยการวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ทางสมการคณิตศาสตร์

1.5.5 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และทดสอบโดยใช้โปรแกรม LTspice และ MATLAB

1.5.6 เก็บรวบรวมผลและวิเคราะห์ผลการทำงาน

1.5.7 สรุป อภิปรายผล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ตัวควบคุมพีไอดี โดยการสังเคราะห์ในรูปของการควบคุมแบบแอนะล็อกโดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

1.6.2 ได้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบโดย Chien Hrones Reswick (CHR)

1.6.3 ได้ผลของการทดสอบระบบควบคุมป้อนกลับโดยใช้โปรแกรม LTspice เทียบกับ MATLA

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ จะนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีวงจรการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และคุณสมบัติของวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดี เป็นตัวควบคุมที่ได้รับการนำมาประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี ค.ศ.1939 [7] และยังคงได้รับการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วยองค์ประกอบพี (P-Element) หรือพร๊อพพอชันนัลเทอม (Proportional term), องค์ประกอบไอ (I-Element) หรืออินทิกรัลเทอม (Integral term) และองค์ประกอบดี (D-Element) หรือเดริเวทีฟเทอม (Derivative term) ด้วยโครงสร้างดังกล่าว บางครั้งจะพบว่าตัวควบคุมพีไอดีได้รับการเรียกขานว่าตัวควบคุมแบบสามพจน์ (Three-term controller)

ให้ $\mathrm{G_c(s)}$ คือฟังก์ชั่นของตัวควบคุมพีไอดี

$$G_c\,(s) \;=\; K_p \;+\; \frac{K_I}{s} \;+\; K_D s \tag{2.1}$$

เมื่อ K_P คือ เกนของพร๊อพพอชันนัลเทอม (proportional gain)

K_I คือ เกนของอินทิกรัลเทอม (integral gain)

K_D คือ เกนของเดริเวทีฟเทอม (derivative gain

บางครั้งจะพบว่า $G_c(s)$ ของตัวควบคุมพีไอดีได้รับการเขียนเป็นดังสมการ (2.2)

$$G_C(s) = K_C\ \left(1 \;+\; \frac{1}{\tau_i s} \;+\; \tau_d s\right) \tag{2.2}$$

เมื่อ K_c คือ เกนของตัวควบคุม (gain of controller)

τ_i คือ ค่าคงที่เวลาของอินทิกรัลเทอม (integral time constant)

τ_d คือ ค่าคงที่เวลาของเดริเวทีฟเทอม (derivative time constant)

เมื่อนำเอาสมการ (2.1) เปรียบเทียบกับสมการ (2.2) จะพบว่า

$$\left.\begin{aligned} K_P &= K_C \\ K_I &= \frac{K_C}{\tau\ i} \\ K_D &= K_C\tau_d \end{aligned}\right\} \qquad (2.3)$$

จากสมการ (2.1) กำหนดให้ E(s) เป็นตัวแปรอินพุต และ U(s) เป็นตัวแปรเอาต์พุตของ G(s)จะได้

$$G_C(s) = \frac{Us}{Es}$$

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

หรือจากสมการ (2.2) จะพบว่า

$$u(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} + \int e(t)dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

พิจารณาแต่ละองค์ประกอบของตัวควบคุมพีไอดี ได้ดังต่อไปนี้

องค์ประกอบพี (P-Element)

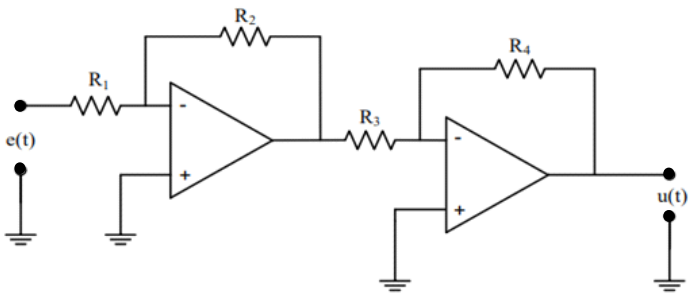
ตัวอักษร “P” ย่อมาจากคำ “Proportional” ซึ่งแปลว่า “สัดส่วน” หมายความว่าสัญญาณเอาต์พุตขององค์ประกอบพีจะมีลักษณะเป็นสัดส่วนตรงกับสัญญาณอินพุต ฟังก์ชั่นขององค์ประกอบพีคือ K_P หรือถ้าให้ e(t) เป็นตัวแปรอินพุตและ u(t) เป็นตัวแปรเอาต์พุต จะเขียนได้ว่า

$$u(t) = K_P e(t)$$

$$U(s) = K_P E(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P = K_C \qquad (2.4)$$

องค์ประกอบพีมีโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบพี

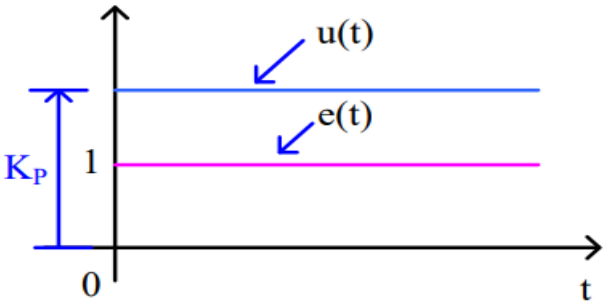
จากภาพที่ 2.1 จะได้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเป็น

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_2R_4}{R_1R_3} \tag{2.5}$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.4) และ (2.5) จะพบว่า

$$K_P = \frac{R_2R_4}{R_1R_3}$$

ถ้าอินพุต e(t) มีลักษณะเป็น unit step เอาต์พุต u(t) จะมีลักษณะเป็น step เช่นกัน แต่ขนาดจะขึ้นอยู่กับ K_P ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตขององค์ประกอบพี

องค์ประกอบไอ (I-Element)

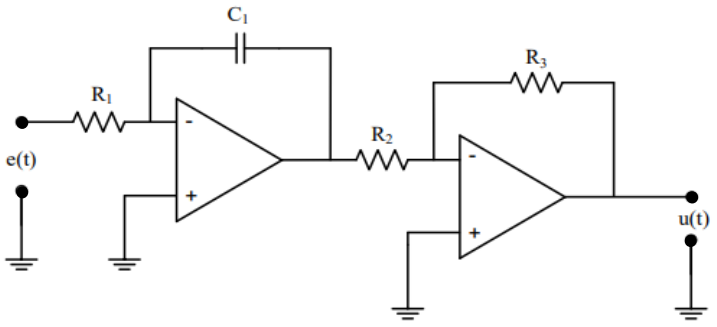
ตัวอักษร “I” ย่อมาจากคำ “Integral” ซึ่งแปลว่า “บูรณาการ” หมายความว่า สัญญาณเอาต์พุตขององค์ประกอบไอจะมีลักษณะเป็นการอินทิเกรตสัญญาณอินพุต ฟังก์ชั่นขององค์ประกอบไอคือ $\frac{K_I}{s}$ ถ้าให้ e(t) เป็นอินพุตและ u(t) เป็นเอาต์พุตจะเขียนได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \tag{2.6}$$

$$U(s) = \frac{K_I}{s} E(s)$$

$$u(t) = K_I \int e(t)dt = \frac{K_c}{\tau_i} \int e(t)dt$$

โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบไอจะเป็นดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบไอ

จากภาพที่ 2.3 จะเขียนสมการได้เป็น

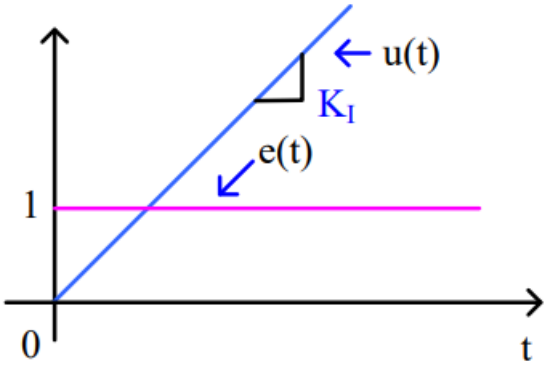
$$u(t) = \frac{R_3}{R_1} \frac{1}{R_1 C_1} \int e(t)dt$$

$$U(s) = \frac{R_3}{R_2}\frac{1}{R_1 C_1}E(s)$$
$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_3}{R_2 R_1 C_1 s} \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.6) และ (2.7) จะพบว่า

$$K_I = \frac{1}{R_3 R_1 C_1}$$

ถ้าอินพุต e(t) มีลักษณะเป็น unit step เอาต์พุต u(t) จะมีลักษณะเป็น ramp ที่ค่าความชัน ขึ้นอยู่กับ K_I ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตขององค์ประกอบไอ

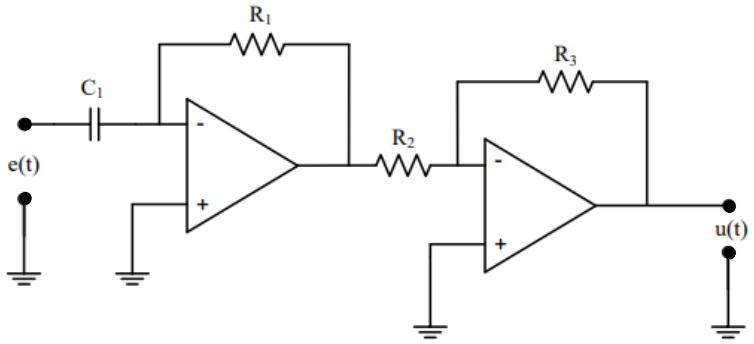
องค์ประกอบดี (D-Element)

ตัวอักษร “D” ย่อมาจากคำ “Derivative” ซึ่งแปลว่า “อนุพันธ์” หมายความว่าสัญญาณเอาต์พุตขององค์ประกอบดีจะมีลักษณะเป็นการทำอนุพันธ์สัญญาณอินพุต ฟังก์ชั่นขององค์ประกอบดีคือ $K_D s$ ถ้าให้ e(t) เป็นอินพุตและ u(t) เป็นเอาต์พุต จะเขียนได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_D}{s} \quad (2.8)$$
$$U(s) = K_D s E(s)$$

$$u(t)=K_D\frac{de(t)}{dt}=K_C\tau_d\frac{de(t)}{dt}$$

โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบดีจะเป็นดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ขององค์ประกอบดี

จากภาพที่ 2.5 จะเขียนสมการได้เป็น

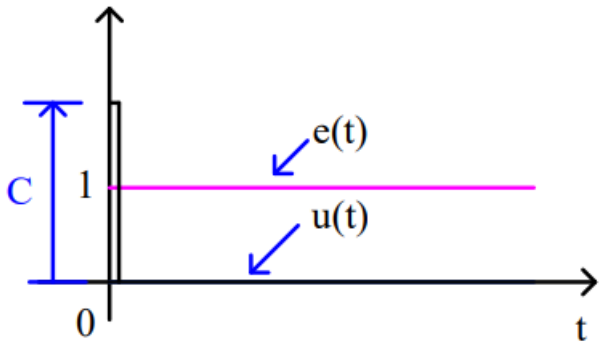
$$u(t)=\frac{R_3}{R_2}R_1C_1\frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)}=\frac{R_3}{R_2}R_1C_1 \qquad (2.9)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.8) และ (2.9) จะพบว่า

$$K_D=\frac{R_3}{R_2}R_1C_1$$

ถ้าอินพุต e(t) มีลักษณะเป็น unit step เอาต์พุต u(t) จะมีลักษณะเป็นดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตขององค์ประกอบดี

ส่วน C ของกราฟ u(t) ในภาพที่ 2.6 ในทางทฤษฎีจะมีค่าเป็น ∞ แต่ในทางปฏิบัติขึ้นอยู่เงื่อนไขทางกายภาพของระบบหรือวงจร กล่าวคือส่วน C จะแปรผันตรงกับค่า K_D

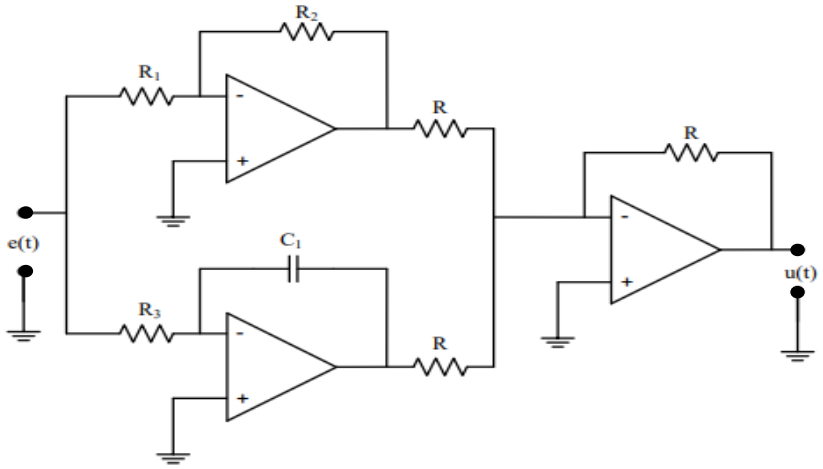
ตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller)

หากนำเอาองค์ประกอบพีและไอมารวมกัน จะสามารถพิจารณาได้เป็นตัวควบคุมพีไอ ซึ่งมีฟังก์ชั่นคณิตศาสตร์เป็น

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s}$$

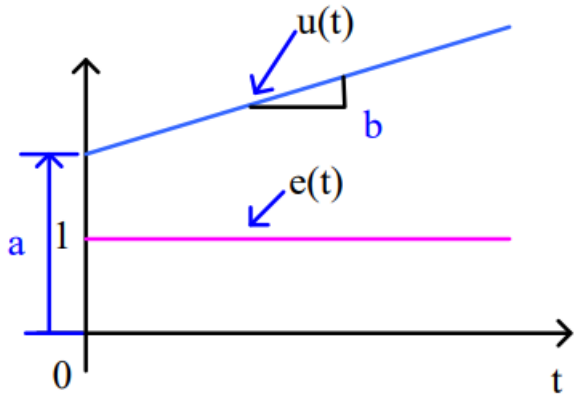
$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t)dt$$

ตัวควบคุมพีไอมีองค์ประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวควบคุมพีไอ

ถ้าอินพุต e(t) มีลักษณะเป็น unit step เอาต์พุต u(t) ของตัวควบคุมพีไอจะมีลักษณะเป็นดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ

จากภาพที่ 2.8 ขนาด a ของสัญญาณ u(t) แปรผันตรงกับค่า K_P ขณะที่ความชัน b แปรผันตรงกับค่า K_I

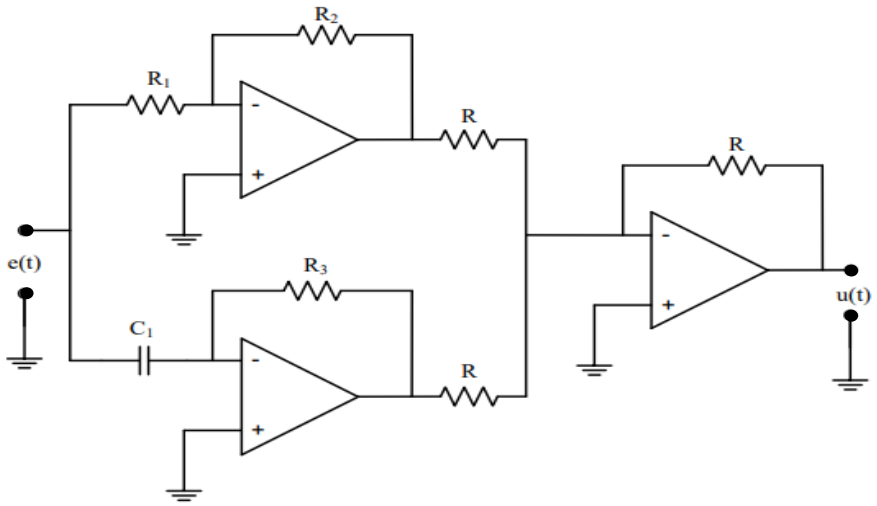
ตัวควบคุมพีดี (PD-Controller)

หากนำเอาองค์ประกอบพีและดีมารวมกัน จะสามารถพิจารณาได้เป็นตัวควบคุมพีดี ซึ่งมีฟังก์ชั่นคณิตศาสตร์เป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + K_D s$$

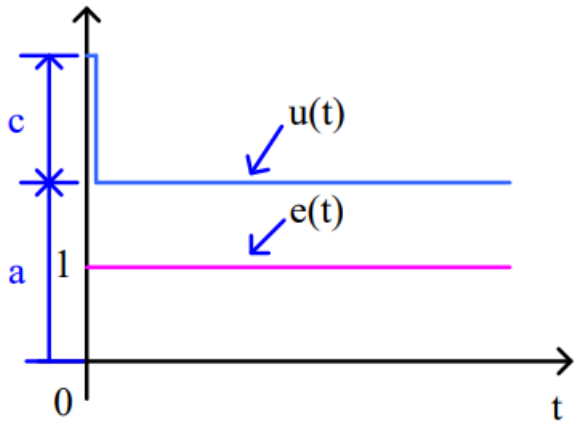
$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

ตัวควบคุมพีดีมีองค์ประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวควบคุมพีดี

ถ้าอินพุต e(t) มีลักษณะเป็น unit step เอาต์พุต u(t) ของตัวควบคุมพีดีจะมีลักษณะเป็นดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมพีดี

จากภาพที่ 2.10 ขนาด a ของสัญญาณ u(t) แปรผันตรงกับค่า K_P ขณะที่ขนาด c แปรผันตรงกับค่า K_D

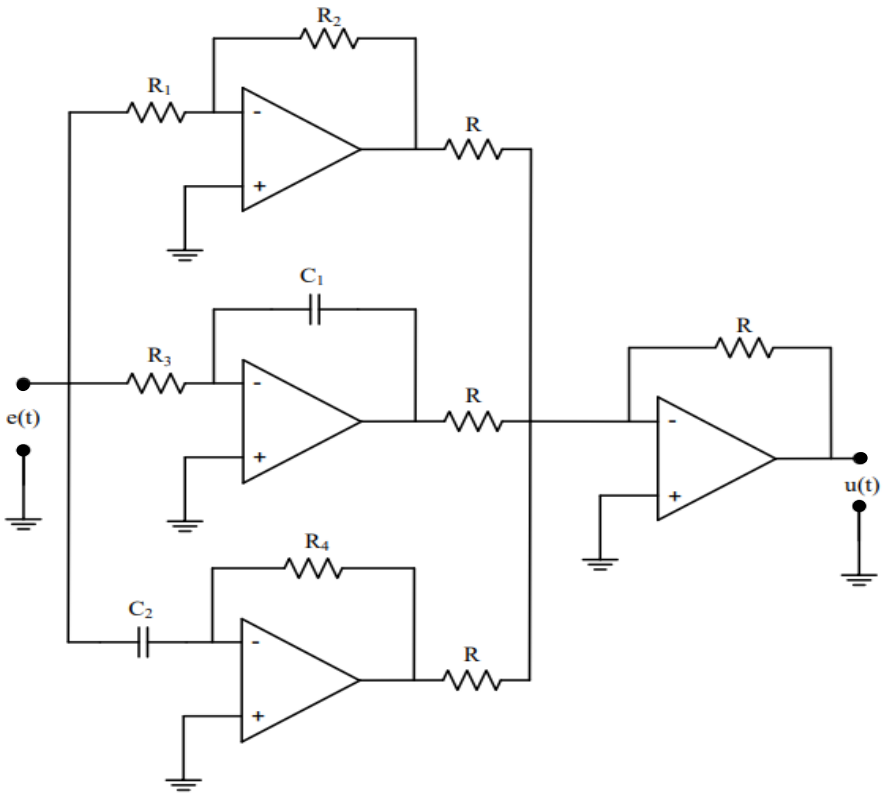
ตัวควบคุมพีไอดี (PID-Controller)

หากนำเอาองค์ประกอบพี,ไอ และดี มารวมกัน จะสามารถพิจารณาได้เป็นตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งมีฟังก์ชั่นคณิตศาสตร์เป็น

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

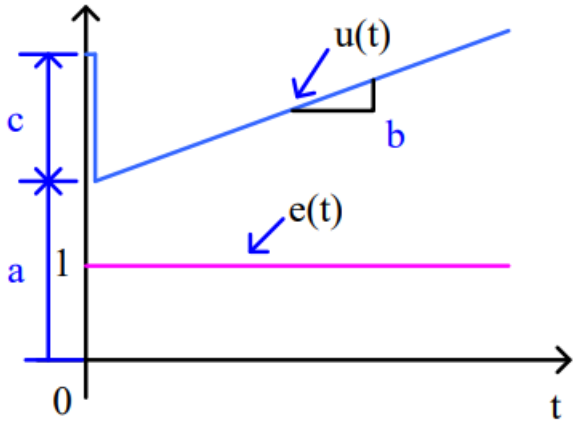
$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

ตัวควบคุมพีไอดีมีองค์ประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวควบคุมพีไอดี

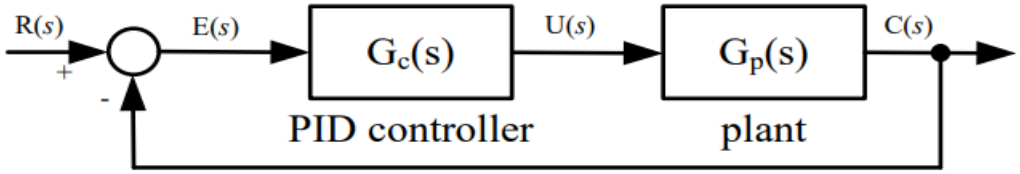
ถ้าอินพุต e(t) มีลักษณะเป็น unit step เอาต์พุต u(t) ตัวควบคุมพีไอดีจะมีลักษณะเป็นดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี

จากภาพที่ 2.12 ขนาด a ของสัญญาณ u(t) แปรผันตรงกับค่า K_P ขณะที่ขนาด c แปรผันตรงกับค่า K_D ส่วนความชัน b แปรผันตรงกับ K_I

ในวงรอบของการควบคุม (control loop) จะพบว่าตัวควบคุมพีไอดีมักจะถูกวางไว้ที่ตำแหน่งป้อนไปข้างหน้า เพื่อทำหน้าที่รับสัญญาณคลาดเคลื่อนของระบบ มาสร้างสัญญาณควบคุมและส่งไปควบคุมกระบวนการอีกต่อหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 วงรอบของการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี

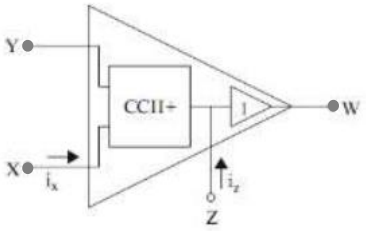
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสามารถดำเนินการด้วยเทคนิควิธีที่หลากหลาย ขอเพียงทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนภายใต้การควบคุมเท่านั้น ซึ่งอาจอยู่ในรูปของ ทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นโดเมน s หรือในรูปของสมการอนุพันธ์ธรรมดา แต่ถ้ากระบวนการมีความ ซับซ้อนทางกายภาพมากจนไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบข้างต้นได้ หรือสามารถกระทำได้แต่ค่อนข้างยากลำบากและอาจประสบกับการลงทุนที่ค่อนข้างสูง ฉะนั้นการ ออกแบบตัวควบคุม

ที่ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ หรือที่รู้จักกันในนามของระเบียบวิธีแบบอมตะ (classical method) ก็เป็นอันไร้ประโยชน์

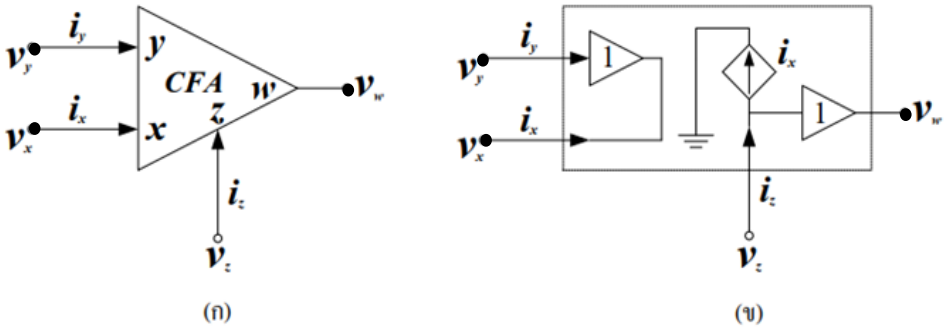
อย่างไรก็ตามได้มีนักทฤษฎีระบบนาม Ziegler และ Nichols ได้เสนอวิธีการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี โดยอาศัยการปฏิบัติจริงกับระบบ (experiment) โดยไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแต่อย่างใด หรือหากทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ยังสามารถใช้วิธีการดังกล่าวได้เช่นกัน

2.2 คุณสมบัติของวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

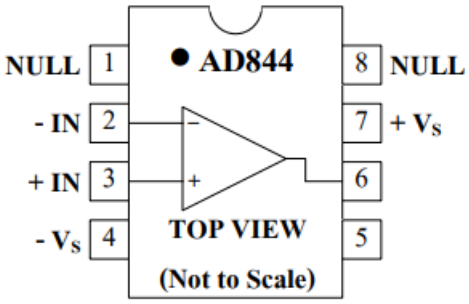
2.2.1 โครงสร้างและวงจรภายในออปแอมป์ป้อนกลับกระแส



ภาพที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรภายในของวงจรขยายป้อนกลับกระแส



ภาพที่ 2.15 วงจรขยายป้อนกลับกระแส (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

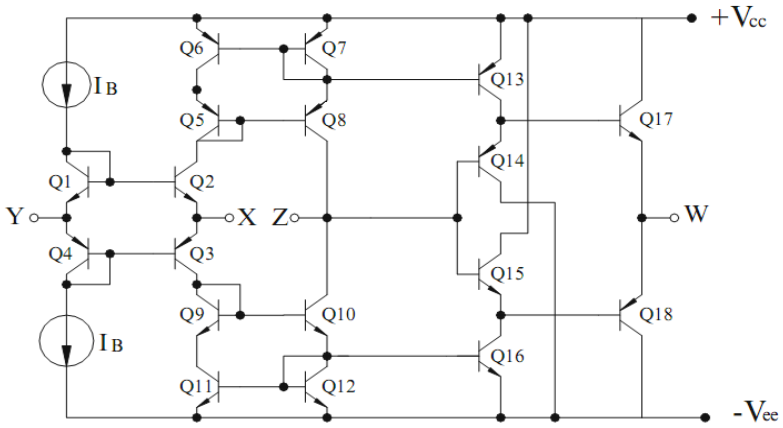


ภาพที่ 2.16 โครงสร้างภายในของวงจรขยายป้อนกลับกระแสเบอร์ AD844

วงจรขยายป้อนกลับกระแสเป็นอุปกรณ์ที่มี 4 ขาประกอบด้วยขาอินพุต 2 ขาคือขา y และขา x ทำหน้าที่เป็นรับแรงดันและกระแสอินพุตตามลำดับส่วนขาเอาต์พุตมี 2 ขาคือขา z และขา w ที่ให้เอาต์พุตเป็นกระแสและแรงดันตามลำดับซึ่งบล็อกไดอะแกรมของวงจรภายในของวงจรออป-แอมป์ป้อนกลับกระแสแสดงได้ดังภาพที่ 2.16 และแสดงสมการของอินพุตและเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 2.10

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ I_w \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

จากวงจรสมมูลในภาพที่ 2.15 พบว่าที่ขา y มีวงจรกันชนแรงดัน (Voltage buffer) อยู่ ดังนั้นที่ขา y จะมีความต้านทานสูงมากกระแสจึงไม่สามารถไหลเข้าที่ขา y ได้ (i_y=0) หรือพูดได้ว่าที่ขา y เหมาะที่จะป้อนอินพุตเป็นแรงดันส่วนที่ขา x จะมีความต้านทานต่ำมากโดยที่ขา x เหมาะที่จะป้อนอินพุตเป็นกระแสในขณะที่กระแสเอาต์พุตที่ขา z จะมีขนาดกระแสเท่ากับกระแสที่ไหลเข้าที่ขา x (i_z=i_x) ซึ่งมีข้อควรทำความเข้าใจว่า i_x และ i_z มีจะทิศเหมือนกันนั่นคือหาก i_x มีทิศทางไหลเข้า i_z ก็จะไหลเข้าด้วยส่วนแรงดันขา w จะเท่ากับแรงดันที่ขา z ซึ่งในทางอุดมคติความต้านทานที่ขั้ว w จะมีค่าต่ำโดยวงจรขยายป้อนกลับกระแสที่ถูกผลิตอยู่ในรูปแบบของวงจรรวมและได้รับความนิยมเบอร์ AD844 โครงสร้างภายในแสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 วงจรภายในออปแอมป์ป้อนกลับกระแส AD844

วงจรภายในออปแอมป์ป้อนกลับกระแสในภาพที่ 2.16 เป็นเบอร์ AD844 จากบริษัท Analog Devices ซึงเป็นไอซีที่ใช้งานประเภทความเร็วสูง ผลิตขึ้นจากเทคโนโลยีไบโพล่าทรานซิสเตอร์ มีค่าแบนด์วิธประมาณ 60 MH_Z ที่อัตราขยายเท่ากับ หนึ่งเท่า และ ประมาณ 33 MHZ ที่อัตราขยายเท่ากับ สิบเท่า ให้การตอบสนองต่อสัญญาณขนาดใหญ่ได้เร็วมาก และมีสมรรถนะด้านไฟตรงที่ดีเยี่ยม มีอัตราสลูร์ที่สูงประมาณ 2000 V/μs AD844 เหมาะสำหรับการใช้งานในวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน วงจรขยายแบบกลับเฟส วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส การประยุกต์ใช้งานที่ถูกแนะนำโดยผู้ผลิต คือ วงจรขยายอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล และวงจรที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก วงจรขยายสัญญาณ pulse วงจร video - buffer และ cable drivers เป็นต้น

AD844 สามารถทำไปใช้แทนออปแอมป์ทั่วไป ซึ่งจากโครงสร้างที่เป็นวงจรป้อนกลับกระแสทำให้มีสมรรถนะด้านไฟสลับที่ดีกว่า มีความเป็นเชิงเส้นที่สูงกว่า และตอบสนองสัญญาณ pulse ได้ดีจากภาพที่ 2.14 และสมการที่ 2.13 เรายังสามารถพูดได้ว่าออปแอมป์ป้อนกลับกระแสสร้างขึ้นจากวงจรสายพานกระแสยุคที่ 2 แบบบวก (positive type second generation current conveyor) ต่อกับวงจรกันชนแรงดัน (voltage buffer)

2.2.2 ลักษณะเด่นและด้อยของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อดี และข้อเสีย และสาเหตุของข้อดี และข้อเสียของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสเมื่อเปรียบเทียบกับออปแอมป์ทั่วไป

1 ลักษณะที่เด่นของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสมีดังนี้

1.1 ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสมีอัตราสลูว์ที่สูงทั้งนี้ เนื่องจากออปแอมป์ป้อนกลับแรงดันใช้วงจรดิฟเฟอร์เชียลเป็นอินพุตทำให้ช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานแคบว่า ขณะที่

ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสที่ ใช้วงจรกันชนแรงดันเป็นอินพุตและเพราะอัตราสลูว์ที่สูงทำให้แบนด์วิธสูงตาม

1.2 ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสสามารถมีอัตราขยายที่ปรับได้ขณะที่แบนด์วิธคงที่

2. ลักษณะที่ด้อยหรือข้อจำกัดของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสคือ

2.1 ความถูกต้องแม่นยำในสัญญาณไฟตรงต่ำกว่าออปแอมป์ทั่วไป

2.2 แรงดันออฟเซตมีค่ามากกว่าออปแอมป์ทั่วไป ทั้งนี้เกิดจากการใช้ทรานซิสเตอร์ทั้ง พีเอ็นพี และ เอ็นพีเอ็น

2.3 มีค่าการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอินพุต (CMRR) และค่าการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากไฟเลี้ยงต่ำกว่าออปแอมป์ทั่วไป ทั้งนี้เกิดจากความไม่สมพงษ์กันของคู่ทรานซิสเตอร์อินพุต [1]

นอกจากนี้ยังพบปัญหาอื่นในการใช้งานเช่น

2.4 การป้อนกลับระหว่างพอร์ต X และ W อาจเป็นสาเหตุของความไม่มีเสถียรภาพของวงจร

2.5 ผลกระทบของคาปาซิเตอร์แฝงที่ พอร์ต X และ Z อาจเป็นสาเหตุของค่า Peak resonace ของเอาต์พุต การ layout ที่ดีและการออกแบบที่เหมาะสมจะลดปัญหานี้ได้

2.3.3 วงจรพื้นฐานที่สร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ในหัวนี้จะแสดงตัวอย่างของวงจรพื้นฐานที่สร้างขึ้นจากออปแอมป์ป้อนกลับกระแส ได้แก่ วงจรขยาย วงจรแหล่งจ่ายไม่อิสระ วงจรตามแรงดัน วงจรตามกระแส วงจรดิพเฟอเรนเชียล และวงจรอินทิเกรเตอร์ เป็นต้น

1. วงจรแหล่งจ่ายไม่อิสระ

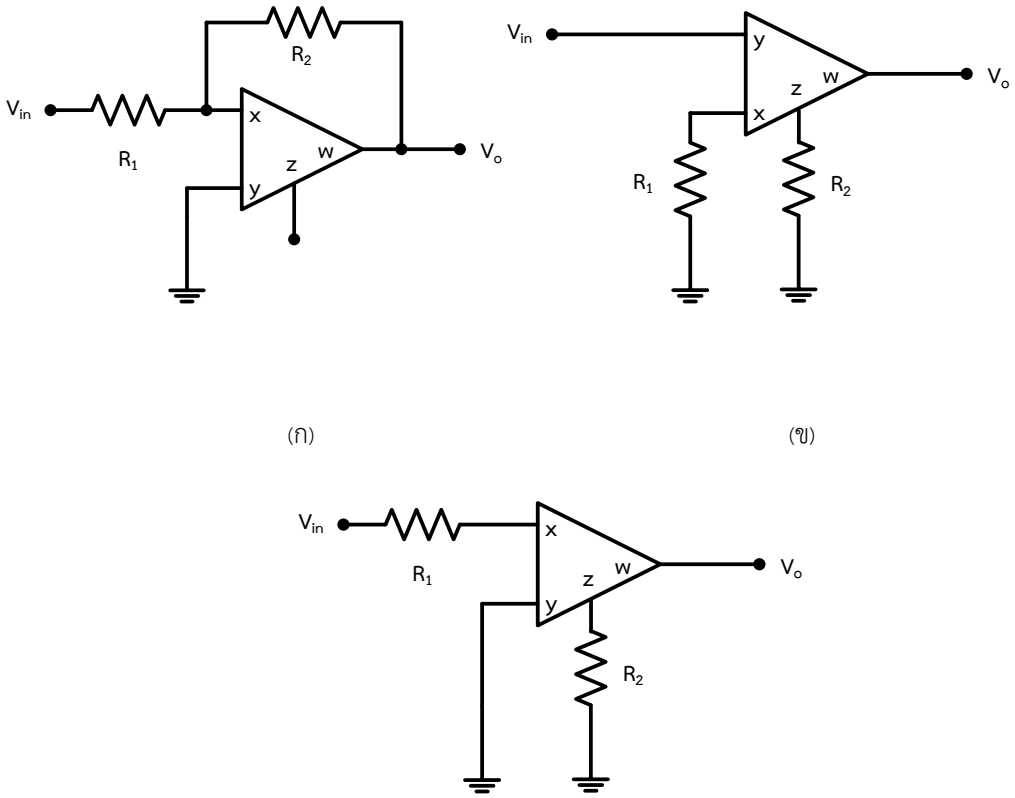
วงจรแหล่งจ่ายไม่อิสระหรือวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน (หรือกระแส) ที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (หรือกระแส) มีด้วยกัน 4 แบบคือ

1. แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Voltage- Source: VCVS)

2. แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Voltage- Source: CCVS)

3. แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Current- Source: VCCS)

4. แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Current- Source: CCCS)



ภาพที่ 2.18 แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันที่สร้างจาก CFOA

1.1 ตัวอย่างของ แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Voltage Source: VCVS) ได้แสดงในภาพที่ 3 จำนวน 3 วงจร โดยความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตของแต่งละวงจรแสดงได้ดังนี้

ภาพที่ 2.18 (ก) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันแบบกลับเฟส

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

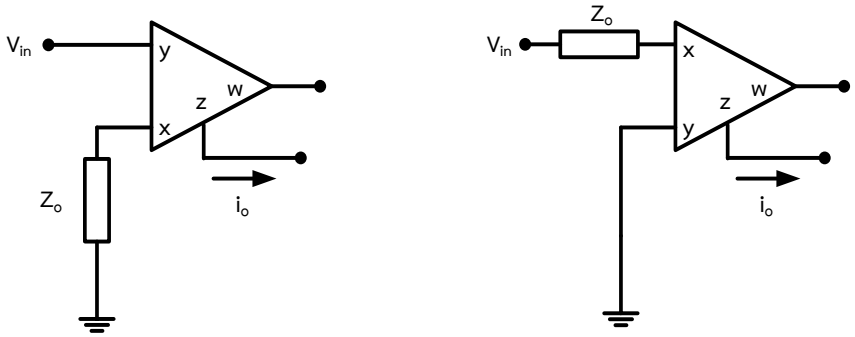
ภาพที่ 2.18 (ข) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันแบบไม่กลับเฟส

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1}$$

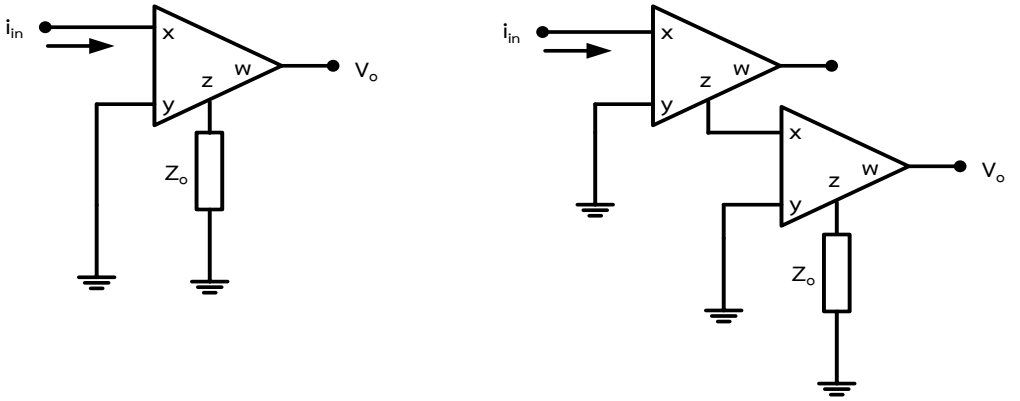
ภาพที่ 2.18 (ค) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันแบบกลับเฟสอีกแบบหนึ่ง

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

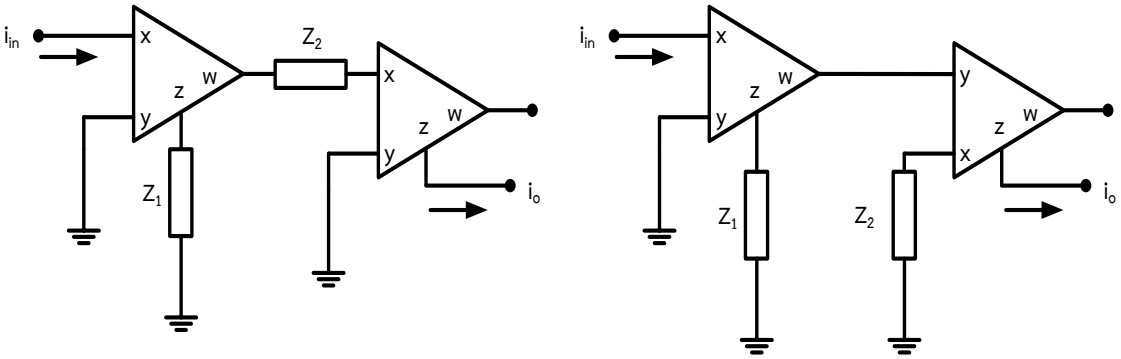
1.2 ตัวอย่างของ แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Current Source: VCCS) แสดงในภาพที่ 2.20 (ก) แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Voltage Source: CCVS) แสดงในภาพที่ 2.20 (ข) แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Current Source: CCCS) แสดงในภาพที่ 2.19 (ค) จำนวนอย่างละ 2 วงจร



(ก)



(ข)

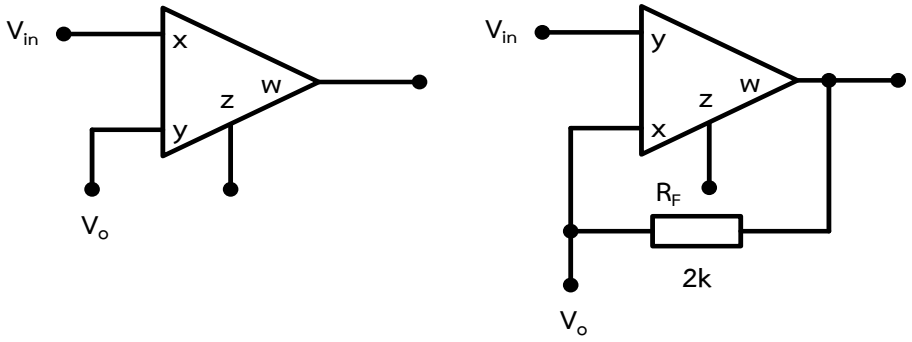


(ค)

ภาพที่ 2.19 วงจรแหล่งจ่ายไม่อิสระที่สร้างจาก CFOA
(ก) แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน
(ข) แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส
(ค) แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยกระแส

เมื่อเปรียบวงจรดังกล่าวที่ถูกสร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน เราจะพบว่าวงจรแหล่งจ่ายไม่อิสระที่ถูกสร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับกระแสมีข้อดีกว่าเช่น ใช้จำนวนตัวต้านทานน้อยกว่า และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานที่มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน(component matching) และไม่ข้อจำกัดในเรื่องผลคูณของเกณฑ์และแบนด์วิธที่มีค่าคงที่เหมือนของวงจรที่สร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน

2. วงจรตามแรงดัน



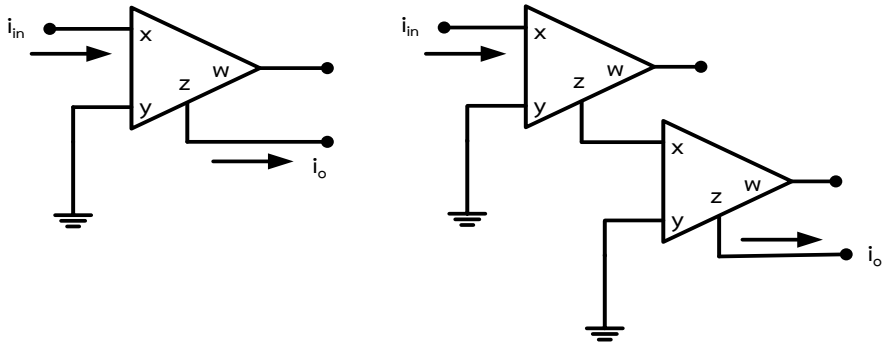
(ก) (ข)

ภาพที่ 2.20 วงจรตามแรงดัน

วงจรตามแรงดันภาพที่ 2.20 (ก) เป็นวงจรอย่างง่ายที่อาศัยคุณสมบัติของวงจรตามแรงดันที่อยู่ภายใน CFOA สำหรับวงจรตามแรงดันภาพที่ 2.20 (ข) เป็นวงจรที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่ม R_F เข้าไปเพื่อให้ความถี่ตอบสนองสูงขึ้น [3]

3. วงจรตามกระแส

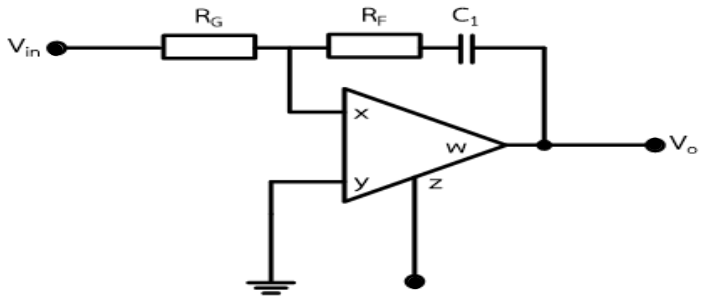
วงจรตามกระแสในภาพที่ 2.21 ไม่ต้องการตัวต้านทานใดๆมาต่อร่วม และทั้งสองวงจรมีความต้านทานอินพุตที่ต่ำมาก และความต้านทานเอาต์พุตที่สูงมาก



ภาพที่ 2.21 วงจรตามกระแส

4. วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์แบบกลับเฟสในภาพที่ 2.22 นี้ใส่ R_F เพื่อป้องกันความไม่เสถียรของวงจรที่เกิดจากการป้อนกลับจาก พอร์ต w ไป x โดยสมการความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังสมการ

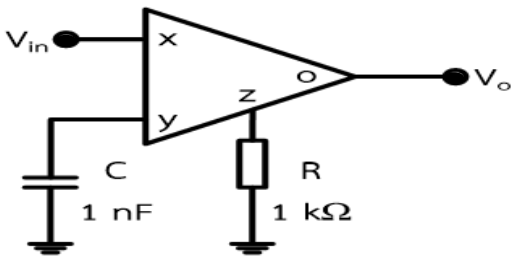


ภาพที่ 2.22 วงจรอินทิเกรเตอร์

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\left(\frac{R_F}{R_G}\right)\left[\frac{s+\frac{1}{R_F C_F}}{s}\right] \tag{2.11}$$

5. วงจรดิฟเฟอร์เรนเชียล

วงจรดิฟเฟอร์เรนเชียลแบบไม่กลับเฟสดังภาพที่ 2.23 สำหรับวงจรดิฟเฟอร์เรนเชียลแบบอื่นๆ ได้นำเสนอไว้ในบทความ [1] และสำหรับการทดสอบแบบจำลองการทำงานของ CFOA เราจะใช้วงจรวงจรดิฟเฟอร์เรนเชียลนี้ ในการทดสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองการทำงานของ CFOA



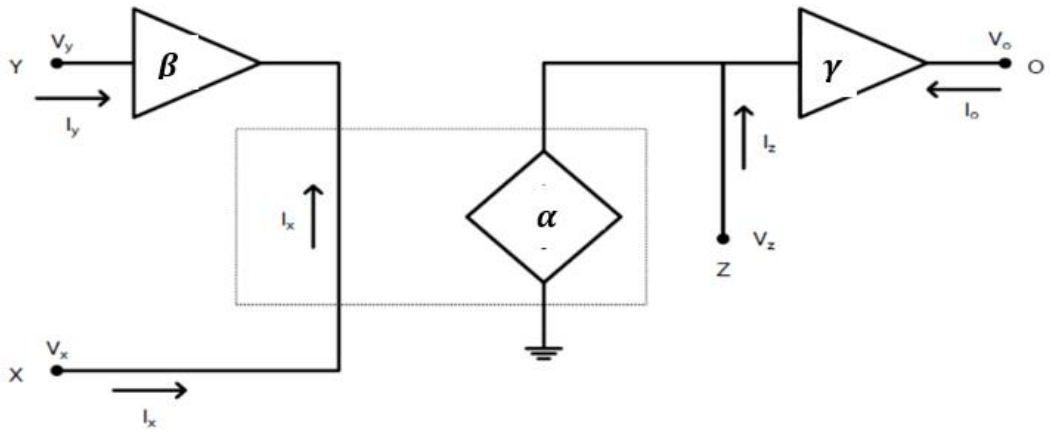
ภาพที่ 2.23 วงจรดิฟเฟอร์เรนเชียล

2.3 แบบจำลองการทำงานของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ที่ผ่านมาเราวิเคราะห์วงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแสโดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.13) ซึ่งเป็นลักษณะของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสในอุดมคติ ในทางปฏิบัติมีผลกระทบหลายอย่างเช่นผลกระทบทางด้านไฟตรง และไฟสลับ

1. แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟตรง

แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA นี้ได้รวมกระทบทางด้านไฟตรงความสัมพันธ์ของพอร์ตต่างแสดงได้ในสมการที่ (2.11) และ ภาพที่ 2.23



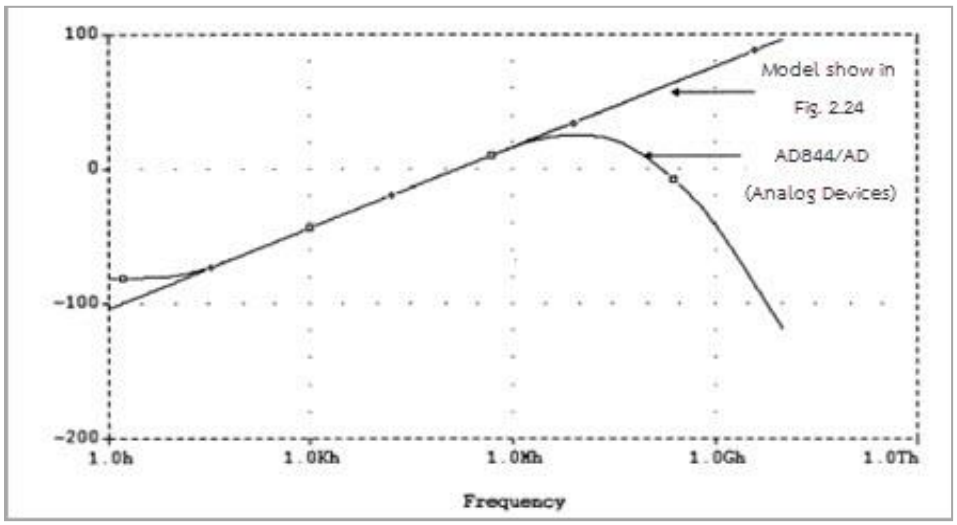
ภาพที่ 2.24 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟตรง

แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA ในภาพที่ 2.24 ได้รับการนำไปใช้อ้างอิงอย่างมาก [5-7] โดยแบบจำลองนี้ได้รวมค่าความผิดพลาดตามกระแสและแรงดัน (the currents and voltages tracking errors) เข้าไปในวงจรตามกระแสและตามแรงดันของ CFOA และกำหนดให้อัตราขยายแรงดันของพอร์ต x เทียบ y คือ β_{xy} อัตราขยายแรงดันของพอร์ต w เทียบ z คือ γ_{zw} และอัตราขยายกระแสของพอร์ต z เทียบ x คือ α_{xz} ในทางอุดมคติค่า $\beta_{xy} = \gamma_{zw} = \alpha_{xz} = 1$

สมการของอินพุตและเอาต์พุตของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ I_w \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

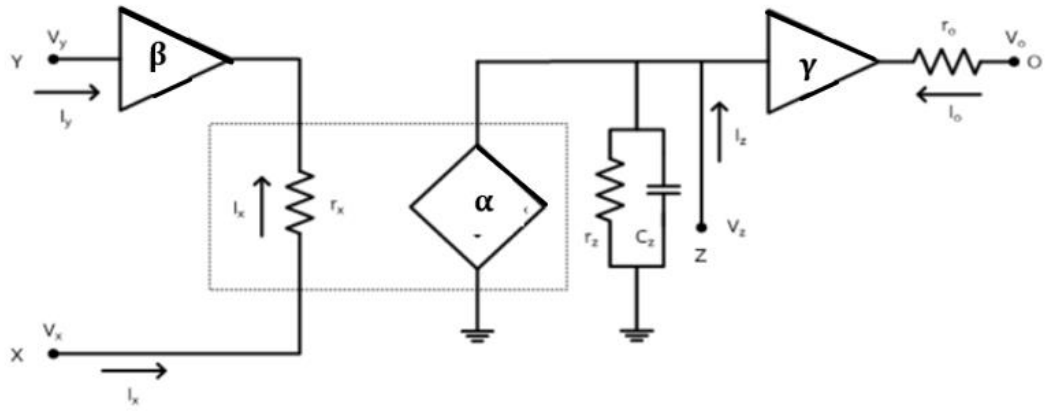
วงจรดิฟเฟอร์เรนเชียลแบบไม่กลับเฟส ถูกเลือกใช้เพื่อทดสอบผลของแบบจำลองการทำงานของ CFOA กับแบบจำลองระดับทรายซิสเตอร์ของ AD844



ภาพที่ 2.25 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองภาพที่ 2.24 กับ แบบจำลองระดับทรานซิสเตอร์ของ AD844

โดยเมื่อนำแบบจำลองภาพที่ 2.24 มาจำลองการทำงานเป็นวงจรดิพเฟอเรนเชียนลจะให้ผลลัพธ์ในภาพที่ 2.25 โดยภาพที่ 2.25 นี้จะเปรียบเทียบแบบจำลองภาพที่ 2.24 กับแบบจำลองในระดับทรานซิสเตอร์ของ AD844 จาก analog device จะสังเกตว่าช่วงความถี่ปานกลางแบบจำลองภาพที่ 2.26 ให้ผลตอบสนองเหมือนกับแบบจำลองของ AD844 จาก analog device แต่ช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำมีค่าต่างกันมาก

2. แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับ

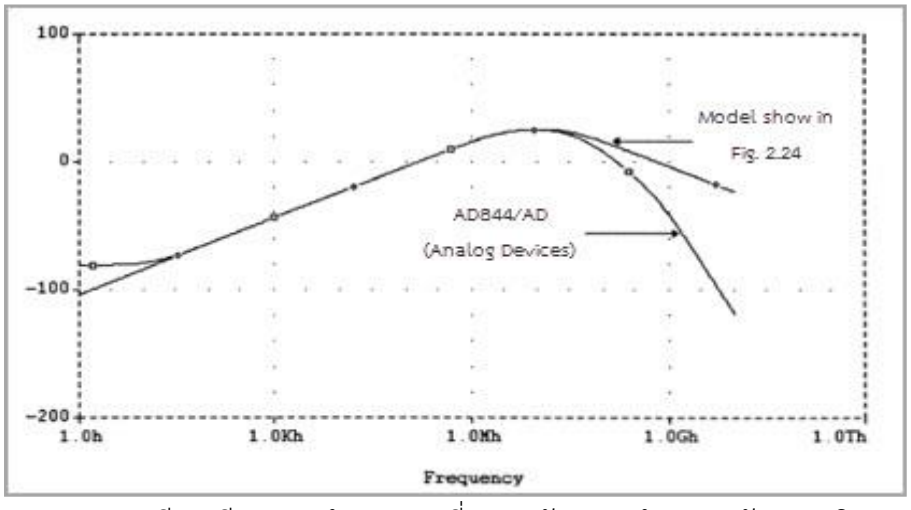


ภาพที่ 2.26 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับ

เพื่อการปัญหาความถูกต้องแม่นยำทางด้านความถี่สูงและต่ำ จึงได้รวมความต้านทานและความจุแฝงที่พอร์ตต่างๆ ดังภาพที่ 2.26 และสมการที่ (2.12) เมื่อนำแบบจำลองรูปที่2.26 มาจำลองการทำงานเป็นวงจรดิพเฟอเรนเชียล จะให้ผลลัพธ์ในภาพที่ 2.27 โดยภาพที่ 2.27 นี้จะเปรียบเทียบแบบจำลองภาพที่ 2.26 กับแบบจำลองในระดับทรานซิสเตอร์ของ AD844 จาก analog device จะสังเกตว่าช่วงความถี่สูงแบบจำลองภาพที่ 2.26 ให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับแบบจำลองของ AD844 จาก analog device แต่ช่วงความถี่ต่ำผลตอบสนองมีค่าต่างกันมาก อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยนำเสนอแบบจำลองของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสเพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองในระดับทรานซิสเตอร์ของ AD844หลายบทความ [4]

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_x & \beta & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & \left(\frac{1}{r_z}+sC_z\right) & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & r_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ I_w \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

และจากวัดค่าพารามิเตอร์ของ AD 844 ได้ค่า R_x = 50 Ω, R_z = 3MΩ, C_z = 5 pF และ R_o = 15 Ω ขณะที่ ค่าอัตราขยาย $\beta \approx \alpha \approx \gamma \approx 1$



ภาพที่ 2.27 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองภาพที่ 2.26 กับ แบบจำลองระดับทรานซิสเตอร์ของ AD844

ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับ AD844 ในภาพที่ 2.25 พบว่ายังมีความแตกต่างกันมากทั้งด้านความถี่สูงและต่ำ จึงได้มีนักวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองที่มีความถูกต้องมากขึ้น [4] แต่แบบจำลองที่ ที่มีความถูกต้องมากขึ้นก็จะมาพร้อมจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มซึ่งส่งผลต่อความยากในการคำนวณ

บทที่ 3

การออกแบบวงจรควบคุมพีไอดีโดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการดำเนินการวิจับวิทยานิพนธ์ ซึ่งเริ่มจากการออกแบบวงจรตัวควบคุม PID ให้มีคุณสมบัติของการทำงานตรงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบผลการทำงาน ของวงจรที่ออกแบบและวิเคราะห์การตอบสนองของตัวควบคุมแต่ล่ะส่วนและการทำงานทั้งระบบด้วยโปรแกรม LTspice เพื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม MATLAB

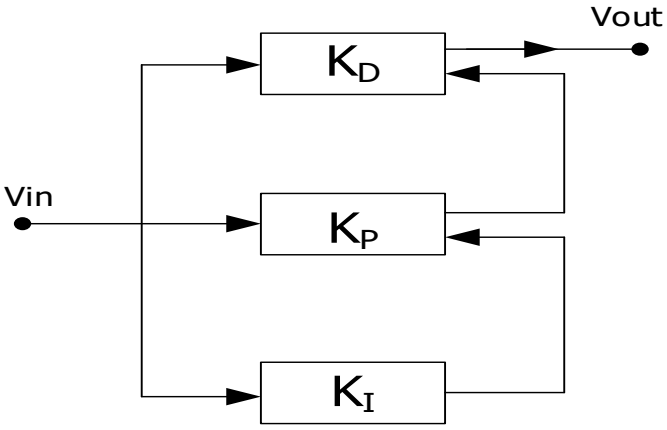
3.1 ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยใช้การบวกแรงดันในการต่ออนุกรมนี้สร้างขึ้นจากวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส จำนวน 3 ตัว ตัวต้านทาน 4 ตัว และตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัว ตัวควบคุมพีไอดี นี้ประกอบด้วยองค์ประกอบและคุณสมบัติต่างๆ คือ 1.) องค์ประกอบ P มีคุณสมบัติให้เอาต์พุตเป็นสัดส่วนต่ออินพุต 2.) องค์ประกอบ I มีคุณสมบัติให้เอาต์พุตเป็นการอินทิเกรตอินพุต 3.) องค์ประกอบ D มีคุณสมบัติให้เอาต์พุตที่เป็นการอนุพันธ์อินพุต

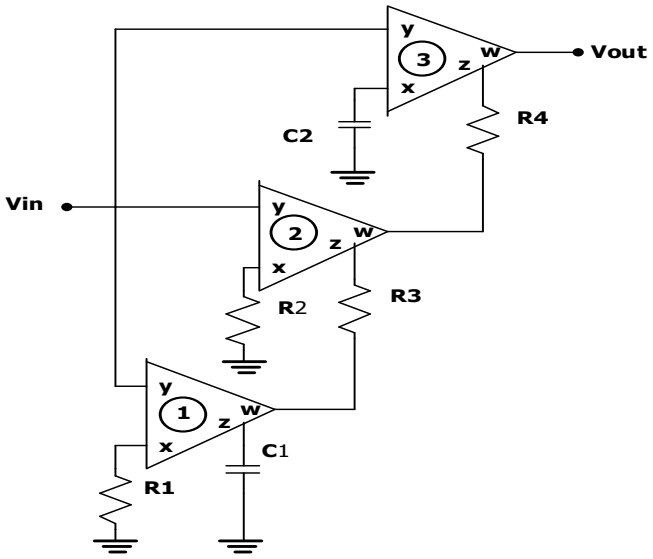
ตัวควบคุมแบบพีไอดี ได้รับการนำเสนอครั้งแรกโดย [3] ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมดังนี้

$$\mathrm{T(s)} = \frac{V_O}{V_I} = \mathrm{K_P} + \frac{\mathrm{K_I}}{\mathrm{s}} + \mathrm{K_D s} \tag{3.1}$$

จากสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดี ใน (3.1) สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 3.1



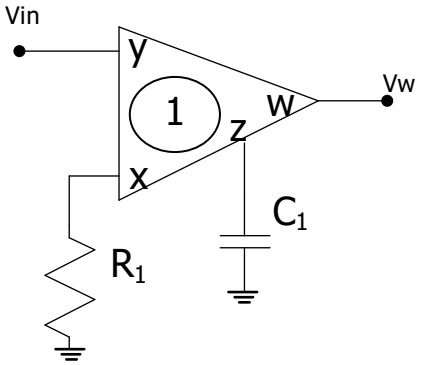
ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอดี



ภาพที่ 3.2 วงจรรวมตัวควบคุมพีไอดี

จากวงจรรวมตัวควบคุมพีไอดี ในภาพที่ 3.2 สามารถแยกส่วนการทำงานในแต่ล่ะส่วนออกเป็นวงจรต่างๆ ดังนี้ 1.วงจรตัวควบคุมไอ 2. วงจรตัวควบคุมพี 3. วงจรตัวควบคุมดี โดยมีรายละเอียดของวงจรและสมการคุณสมบัติของวงจรดังต่อไปนี้

1.วงจรตัวควบคุมไอ

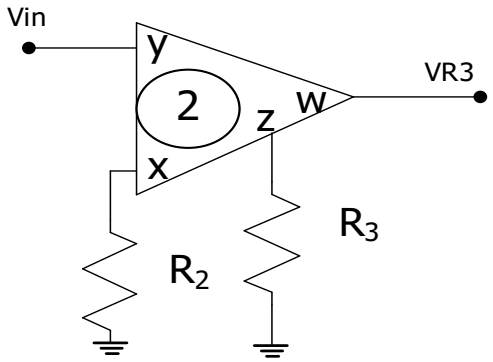


ภาพที่ 3.3 วงจรตัวควบคุมไอ

โดยที่ CFOA _1 R_1 และ C_1 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมไอ ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุต v_{w1} แสดงได้ดังนี้

$$v_{w1} = \left(\frac{1}{sR_1C_1}\right) v_{in} \tag{3.2}$$

2. วงจรตัวควบคุมพี

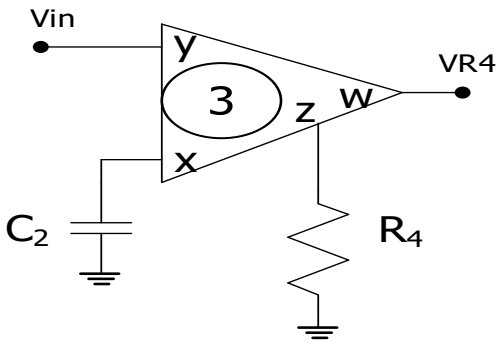


ภาพที่ 3.4 วงจรตัวควบคุมพี

ขณะที่ CFOA _2 R_2 และ R_3 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพี ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต และแรงดันที่ตกคร่อม v_{R3} แสดงได้ดังนี้

$$v_{R3} = \frac{R_3}{R_2} v_{in} \tag{3.3}$$

3. วงจรตัวควบคุมดี



ภาพที่ 3.5 วงจรตัวควบคุมดี

ขณะที่ CFOA _3 R_4 และ C_2 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมดี ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันที่ตกคร่อม v_{R4} แสดงได้ดังนี้

$$v_{R4} = sC_2R_4v_{in} \tag{3.4}$$

และแรงดันเอาต์พุตของวงจร เกิดจากการต่อนุกรมของแรงดันเอาต์พุตขององค์ประกอบต่างๆ ซึ่งมีการเป็น $v_{out} = v_{w1}+v_{R3}+v_{R4}$ และฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุมพีไอดีในภาพที่ 3.2 คือ

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(\frac{R_3}{R_2} + \frac{1}{sR_1C_1} + sC_2R_4\right) \tag{3.5}$$

พารามิเตอร์ K_P K_I K_D คือ

$$K_P = \frac{R_3}{R_2} \tag{3.6}$$

$$K_I = \frac{1}{R_1C_1} \tag{3.7}$$

$$K_D = C_2R_4 \tag{3.8}$$

จากสมการที่ (7) - (9) จะเห็นว่าอัตราขยายของตัวควบคุมสามารถปรับได้โดยอิสระจากกัน โดยอัตราขยายขององค์ประกอบพี สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_3 อัตราขยายขององค์ประกอบไอ สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_1 และ C_1 และอัตราขยายขององค์ประกอบ ดี สามารถปรับอย่าง

อิสระได้ด้วย R_4 และ C_2 จากสมการดังกล่าว เราสามารถคำนวณหาค่าความไว (Sensitivity) ของค่าพารามิเตอร์ K_P K_I K_D ต่อค่า R และ C ต่างๆได้ดังนี้

ค่าความไวของ K_P ต่อการเปลี่ยนแปลง R_3 หาได้จาก

$$S_{R_3}^{K_P} = \frac{dK_P}{K_P} = \frac{R_3}{dR_3}$$

$$S_{R_3}^{K_P} = \frac{1}{R_2}\left(\frac{R_3}{K_P}\right) = \frac{R_3}{R_2}\frac{1}{\frac{R_3}{R_2}} = 1$$

และในทำนองเดียวกันค่าความไวของ K_P , K_I, K_D ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า R และ C

$$S_{R_3}^{K_P} = -S_{R_2}^{K_P} = 1 \tag{3.9}$$

$$S_{R_1,C_1}^{K_I} = -1 \tag{3.10}$$

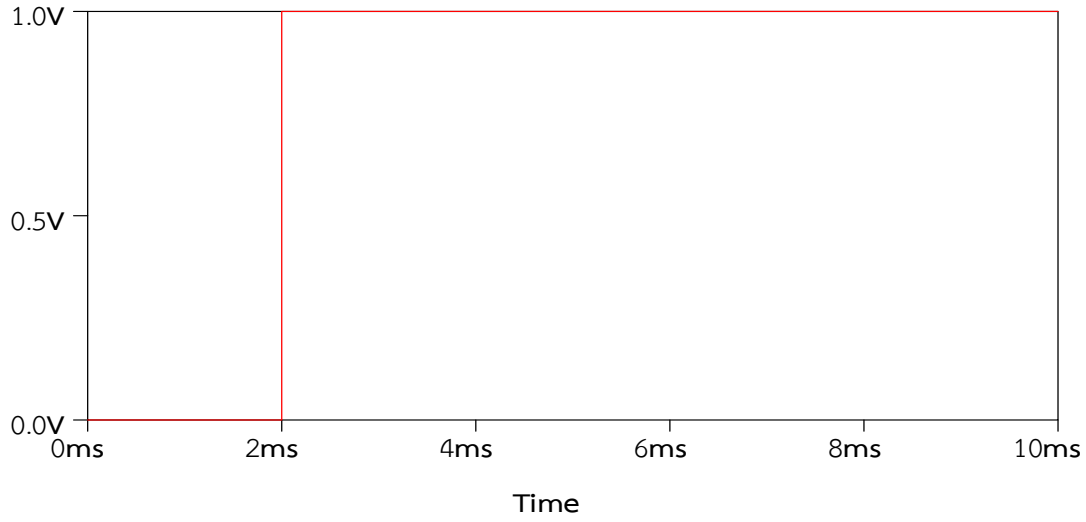
$$S_{R_4,C_2}^{K_D} = 1 \tag{3.11}$$

3.2 ผลการจำลองการทำงานโดยใช้ LTspice

เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี วงจรควบคุม พีไอดี ในภาพที่ 3.2 ได้ถูกนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม LTspice สำหรับวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแสในภาพที่ 3.2 ใช้แบบจำลอง(Macro- Model) ของ AD844 จาก Analog Devices ในการทดสอบนี้ใช้ไฟเลี้ยง ± 15V และเพื่อเห็นภาพการปรับค่าของเกณฑ์ K_P, K_I, K_D ได้อย่างชัดเจน จึงกำหนดค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

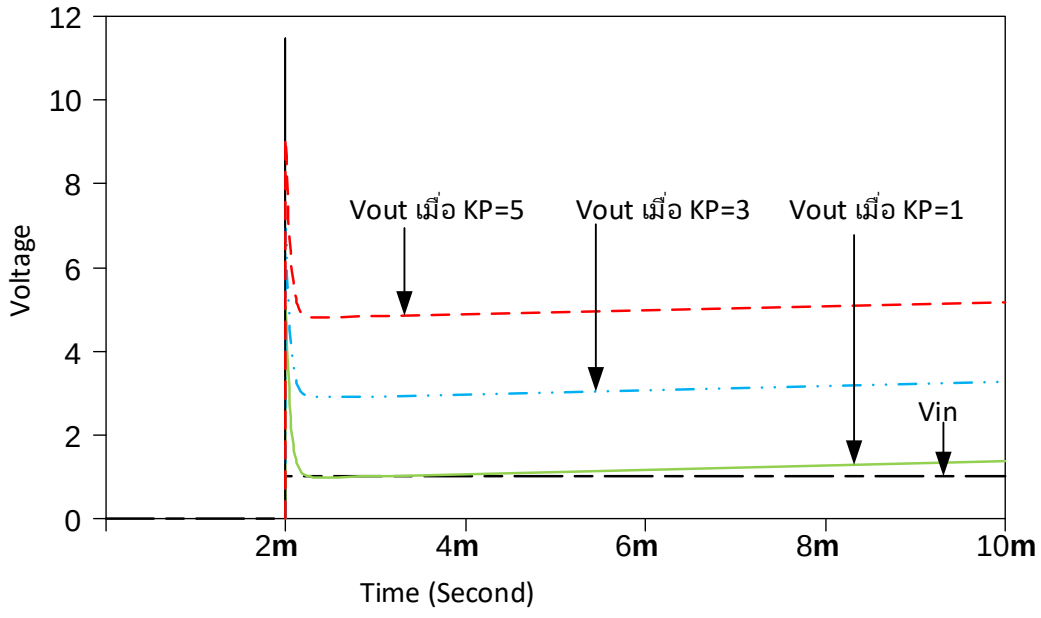
C_1 =1μF, C_2 =1μF, R_1 = 20 kΩ, R_2 =1kΩ, R_3 =1kΩ และ R_4 = 20 kΩ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า K_P = 1, K_I = 500 และ K_D = 0.02 ในการทดสอบพบว่า วงจรควบคุมพีไอดีนี้บริโภคกำลังไฟฟ้า 0.6 วัตต์ และการทดสอบผลตอบสนองในโดเมนเวลาโดยจะป้อนอินพุต V_{in} เป็นสัญญาณขั้นบันได ขนาด 1 โวลต์และวัดแรงดันเอาต์พุต V_{out}

3.3.1 การทดสอบตัวควบคุมพีไอดี โดยการป้อนสัญญาณอินพุตแบบ Unit Step แรงดันขนาด 1 โวลต์



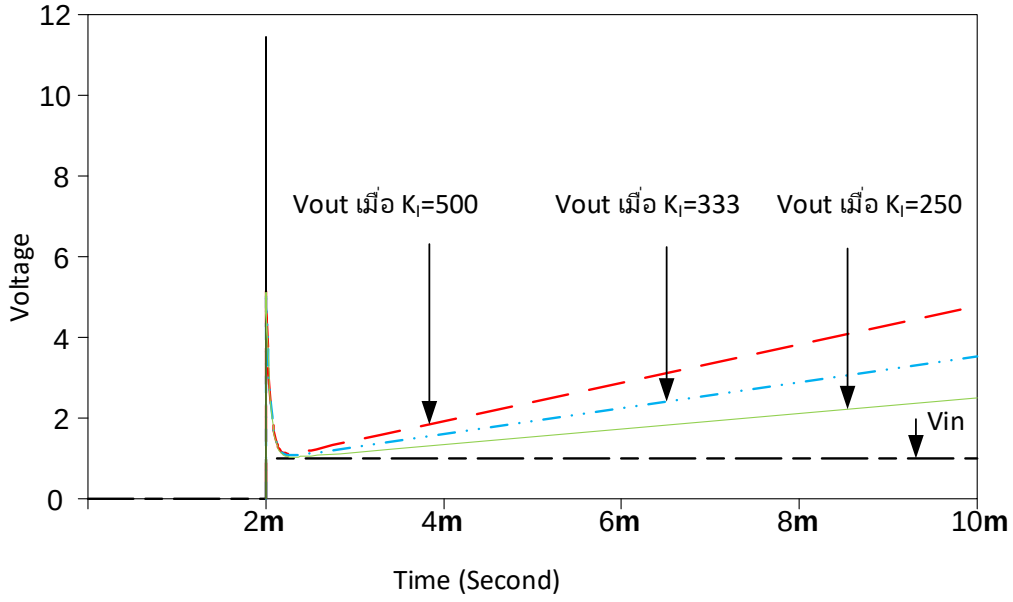
ภาพที่ 3.6 ลักษณะของสัญญาณอินพุตแบบ Unit Step

สำหรับการทดสอบตัวควบคุมพีไอดี ที่ออกแบบ โดยการป้อนสัญญาณอินพุติแบบ Unit Step ขนาดแรงดัน 1 โวลต์ โดยให้ผลการตอบสนองสัญญาณด้านเอาต์พุตของตัวควบคุมในแต่ละส่วนดังแสดงในภาพต่อไปนี้



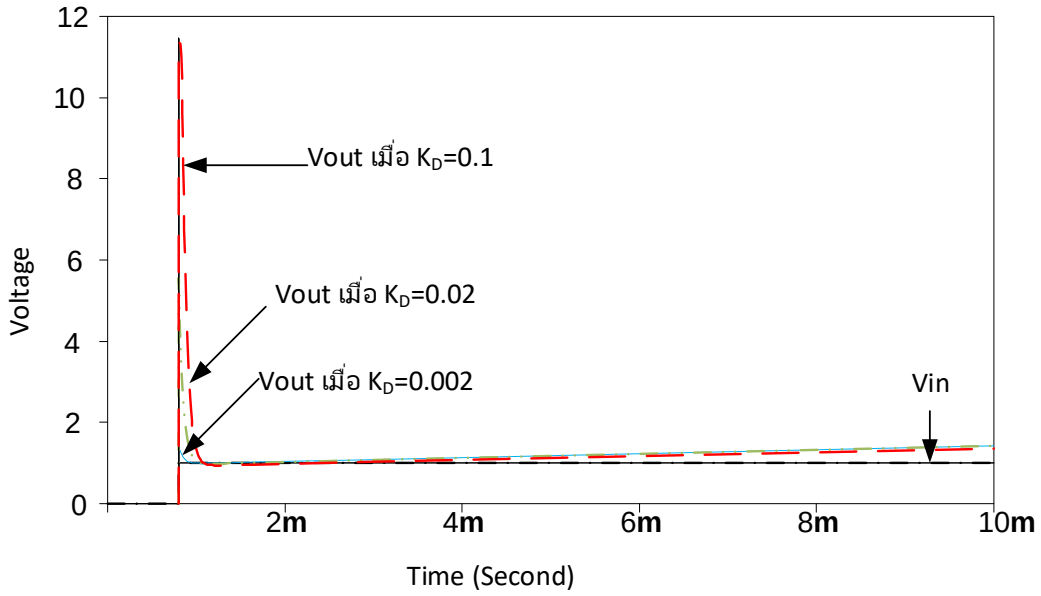
ภาพที่ 3.7 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_P มีค่าต่างๆ

ภาพที่ 3.7 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_I และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ค่า K_P เปลี่ยนแปลงตามนี้คือ 1, 3 และ 5 โดยการปรับค่า R_2 เป็น 1kΩ , 3kΩ และ 5kΩ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะเป็นแปรผันตรงกับค่า K_P



ภาพที่ 3.8 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_I มีค่าต่างๆ

ภาพที่ 3.8 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_P และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ K_I เปลี่ยนแปลงตามนี้ 250, 333 และ500 โดยการให้ C_1=0.1μF และปรับค่า R_1 เป็น 40kΩ, 30kΩ,และ 20kΩ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะมีค่าความชันที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_I

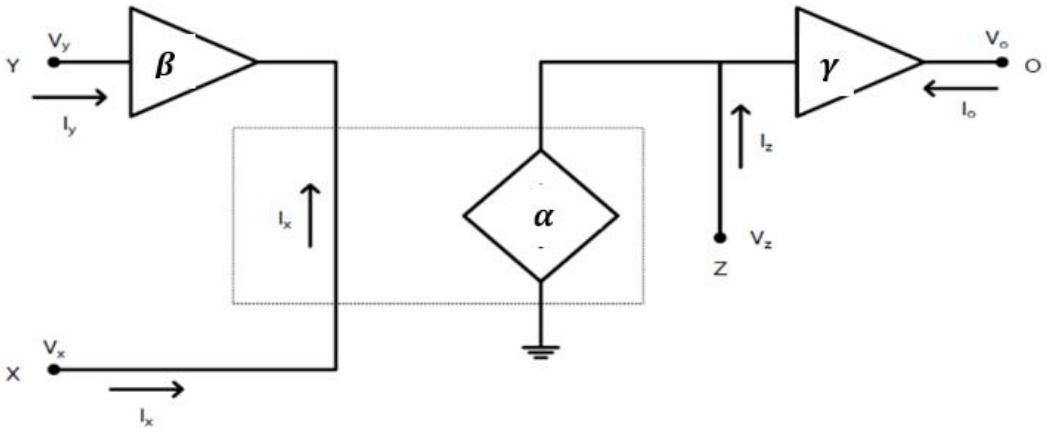


ภาพที่ 3.9 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_D มีค่าต่างๆ

และภาพที่ 3.9 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อ K_I และ K_P มีค่าคงที่ขณะที่ K_D เปลี่ยนแปลงตามนี้ 0.1, 0.02 และ 0.002 โดยการปรับค่า R_4 เป็น 100kΩ , 20kΩ และ 2kΩ ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะมีค่าการตอบสนองในช่วงเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_D การทดสอบการบริโภคกำลังไฟฟ้าของตัวควบคุมที่นำเสนอในภาพที่ 3.2 พบว่าบริโภคกำลังไฟฟ้า 0.6 วัตต์ และเมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีทั่วไป (ภาพที่ 2.11) ที่ใช้ออปแอมป์ 741 พบว่าบริโภคกำลังไฟฟ้า 0.8 วัตต์ ดังนั้นสรุปว่าตัวควบคุมที่นำเสนอนี้บริโภคกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า

3.3 การวิเคราะห์วงจรในกรณีใช้แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟตรง

ในกรณีที่วงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส ที่ใช้ในตัวควบคุมพีไอดี เกิดความไม่เป็นอุดมคติสามารถวิเคราะห์ได้จาก



ภาพที่ 3.10 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟตรง

$$I_Y = 0 \tag{3.12}$$

$$V_X = \beta V_Y \tag{3.13}$$

$$I_Z = \pm \alpha i_X \tag{3.14}$$

$$V_O = \gamma V_Z \tag{3.15}$$

เมื่อ γ, β และ α เป็นค่าส่งผ่านของแรงดันและกระแสที่สามารถเบี่ยงเบนจากหนึ่งได้ เมื่อมีการพิจารณาความผิดพลาดนี้แล้ว สามารถหาอัตราขยายของ แต่ละองค์ประกอบได้ใหม่จาก

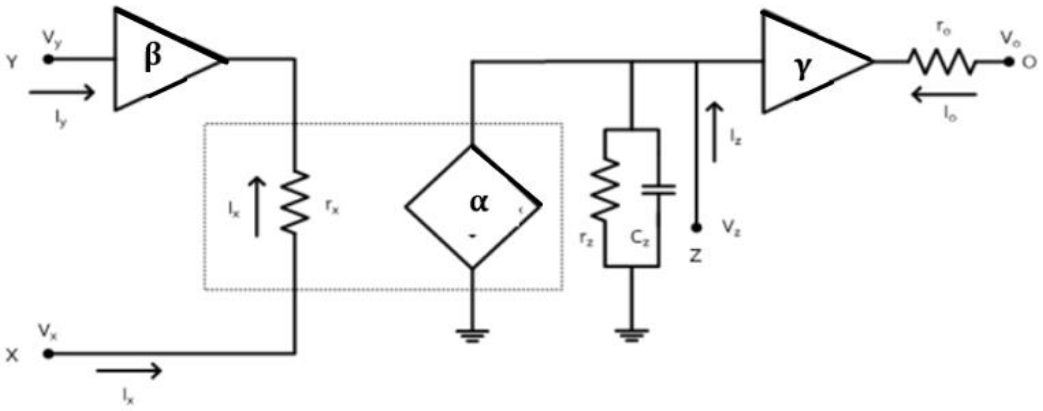
$$K_P = \beta_2 \alpha_2 \gamma_2 \frac{R_3}{R_2} \tag{3.16}$$

$$K_I = \beta_1 \alpha_1 \gamma_1 \frac{1}{R_1 C_1} \tag{3.17}$$

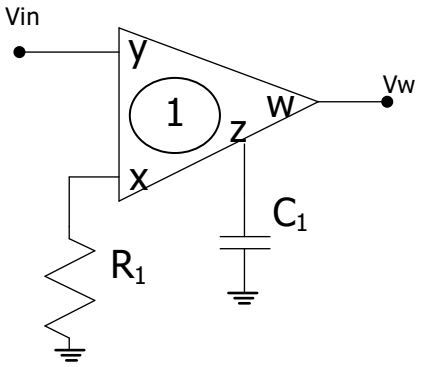
$$K_D = \beta_3 \alpha_3 \gamma_3 R_4 C_2 \tag{3.18}$$

3.4 การวิเคราะห์วงจรในกรณีใช้แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับ

ในการวิเคราะห์หาหาอัตราขยายของ แต่ละองค์ประกอบ เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับทำได้โดยแบบจำลองของ CFOA ภาพที่ 3.11 แทนในวงจร ตัวควบคุมพีไอดี ภาพที่ 3.12,3.13 และ 3.14 จะสามารถหาอัตราขยายของ แต่ละองค์ประกอบได้ใหม่ดังนี้

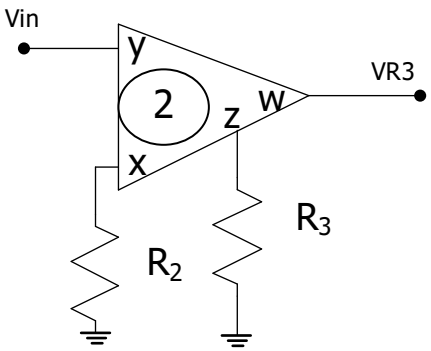


ภาพที่ 3.11 แบบจำลองอย่างง่ายของ CFOA เมื่อคิดกระทบทางด้านไฟสลับ



ภาพที่ 3.12 วงจรตัวควบคุมไอ

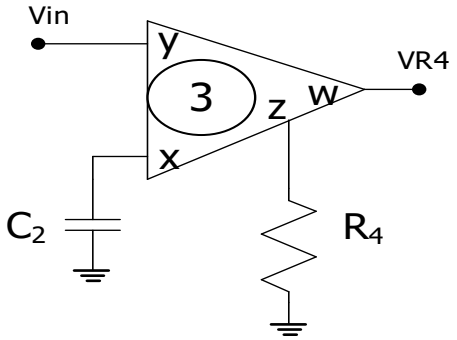
$$K_I = \frac{R_{Z1}}{(R_1+R_{X1})(C_1+C_{Z1})R_{Z1}\left(s+\frac{1}{(C_1+C_{Z1})R_{Z1}}\right)} \quad (3.19)$$



ภาพที่ 3.13 วงจรตัวควบคุมพี

$$K_P = \frac{R_{Z2}}{(R_2+R_{x2})(R_{Z2}sC_{z2}+1)} \quad (3.20)$$

เมื่อ $R_{Z2} = R_3 \parallel R_z$



ภาพที่ 3.14 วงจรตัวควบคุมดี

$$K_D = \frac{sC_1R_{Z5}}{(R_{X3}sC_1+1)(C_{Z3}R_{Z5}+1)} \quad (3.21)$$

เมื่อ $R_{Z5} = R_4 \parallel R_{Z3}$

บทที่ 4

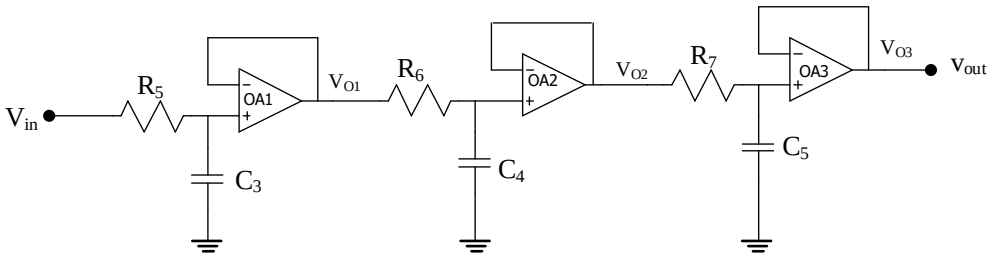
การประยุกต์ใช้วงจรตัวควบคุมพีไอดีในระบบอันดับสาม

ในบทที่ 4 เป็นการนำเสนอตัวควบคุมพีไอดี ที่ออกแบบมาทดสอบกับระบบอันดับสาม โดยมีการทดสอบทั้งในโดเมลเวลา เพื่อให้เห็นคุณสมบัติการตอบสนองและเสถียรภาพของตัวควบคุม และการเปรียบเทียบสัญญาณจากการจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟฟฟ้า LTspice กับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อต่างๆ ดังนี้

4.1 การออกแบบระบบอันดับสาม

4.1.1 การออกแบบระบบอันดับสาม

วงจรของระบบอันดับสามที่ออกแบบสำหรับใช้ร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี



ภาพที่ 4.1 วงจรของระบบอันดับสามที่สร้างจากออปแอมป์

จากภาพที่ 4.1 สำหรับวงจรอันดับสามที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยออปแอมป์และอุปกรณ์อื่นๆ ดังนี้ ตัวต้านทาน R_5, R_6, R_7 = 100KΩ ตัวเก็บประจุ C_3, C_4, C_5 = 10μF

โดยมีฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรดังนี้

$$\frac{V_{O1}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{R_5C_3}}{s+\frac{1}{R_5C_3}} \tag{4.1}$$

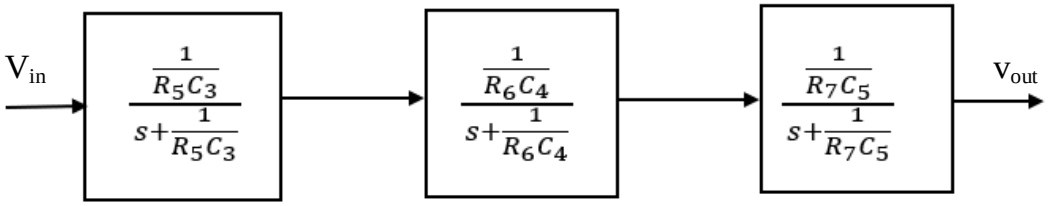
$$\frac{V_{O2}}{V_{01}} = \frac{\frac{1}{R_6C_4}}{s+\frac{1}{R_6C_4}} \tag{4.2}$$

$$\frac{V_{O3}}{V_{O2}} = \frac{\frac{1}{R_7C_5}}{s+\frac{1}{R_7C_5}} \tag{4.3}$$

เมื่อแทนสมการที่ 4.1 ลงในสมการที่ 4.2 และแทนสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.3 สามารถหาค่า V_{out} ได้ดังสมการที่ 4.4 เมื่อพิจารณา V_{out} = V_3

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{R_5R_6R_7C_3C_4C_5}}{\left(s+\frac{1}{R_5C_3}\right)\left(s+\frac{1}{R_6C_4}\right)\left(s+\frac{1}{R_7C_5}\right)} \quad (4.4)$$

หรือสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอันดับสาม

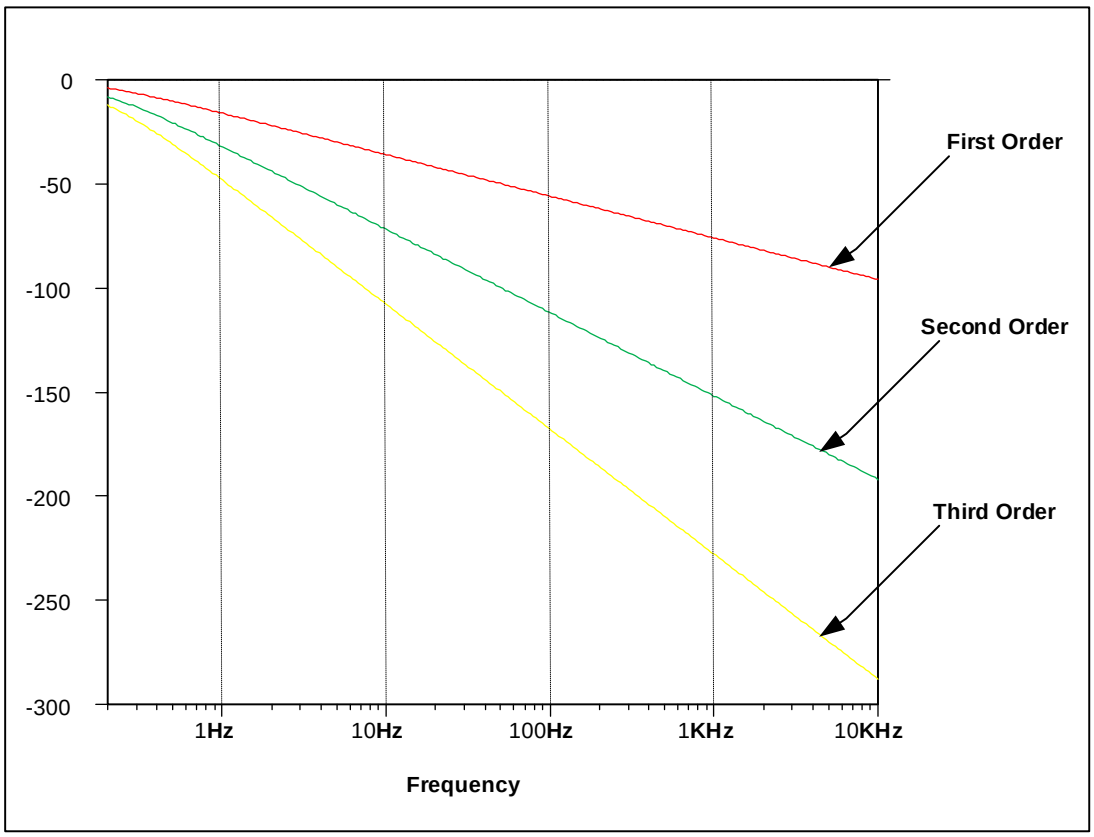
เพราะฉะนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรอับสามจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{R_5R_6R_7C_3C_4C_5}}{s^0\left(s+\frac{1}{R_5C_3}\right)\left(s+\frac{1}{R_6C_4}\right)\left(s+\frac{1}{R_7C_5}\right)} \quad (4.5)$$

จากภาพที่ 4.1 เป็นวงจรของระบบอันดับที่สร้างขึ้นจากการนำวงจร RC จำนวน 3 ชุด มาต่ออนุกรมกันเพื่อเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบ

4.1.2 การทดสอบวงจรของระบบอันดับสาม

เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีที่ผ่านมา วงจรของระบบอันดับสามในภาพที่ 4.1 ถูกนำมาเลียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม LT Spice ในการทดสอบนี้มีค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ C_1 = C_2 = C_3 = 10 μF, R_5 = R_6 = R_7 = 100 kΩ เป็นการทดสอบในโดเมนความถี่ ป้อนอินพุตเป็นแรงดันกระแสสลับขนาด 1 โวลต์เมื่อความถี่ปรับค่าจาก 0.1 Hz ถึง 10 kHz และวัดแรงดันเอาต์พุต

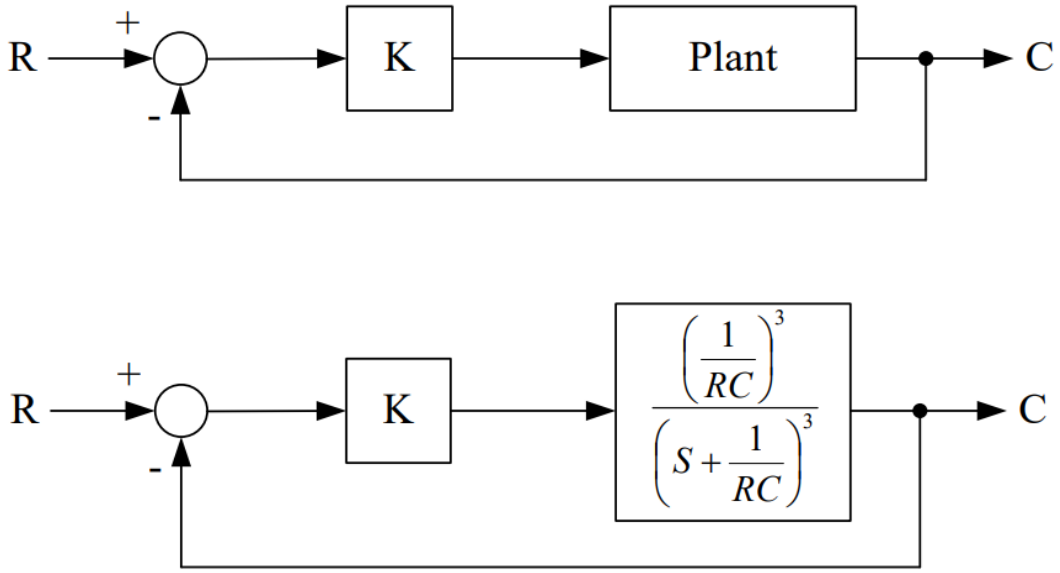


ภาพที่ 4.3 แรงดันเอาต์พุตของวงจรระบบอันดับสาม

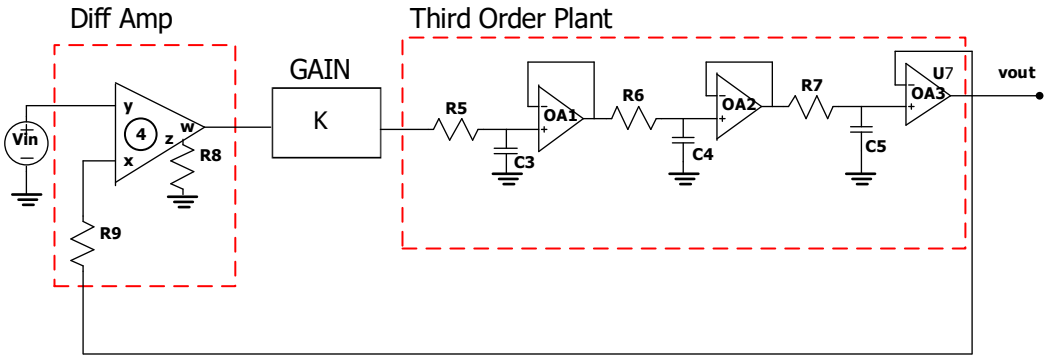
4.2 การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีการปรับอัตราขยายโดยใช้ LTspice

4.2.1 การออกแบบระบบควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยาย

สมการของการควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยายแสดงในบล็อกไดแกรม



ภาพที่ 4.4 บล็อกไดแกรมแสดงสมการการควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยาย



ภาพที่ 4.5 วงจรของการควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยาย

สมการระบบควบคุมวงรอบปิดด้วยอัตราขยาย

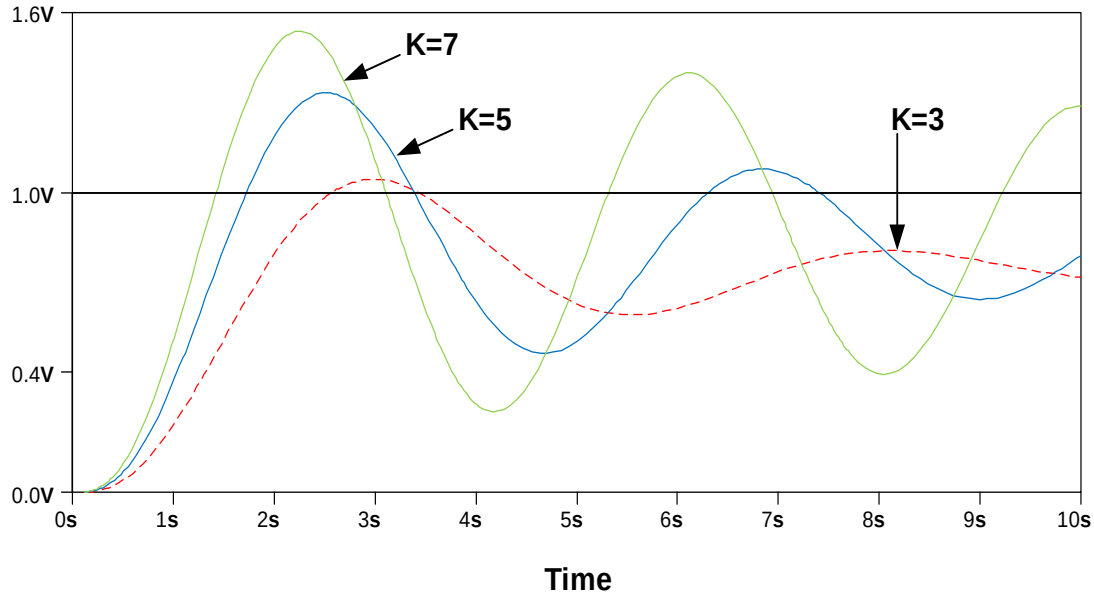
$$\frac{C}{R}=\frac{\frac{\frac{K}{(RC)^3}}{\left(s+\frac{1}{RC}\right)^3}}{\frac{\frac{K}{(RC)^3}}{\left(s+\frac{1}{RC}\right)^3}+1}=\frac{\frac{K}{(RC)^3}}{\frac{K}{(RC)^3}+\left(s+\frac{1}{RC}\right)^3} \tag{4.6}$$

สมการของรากคือ

$$\frac{K}{(RC)^3}+\left(s+\frac{1}{RC}\right)^3=0$$

4.2.2 การทดสอบวงจรของการควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยาย

เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีที่ผ่านมา วงจรของการควบคุมแบบวงรอบปิดด้วยอัตราขยายในภาพที่ 4.3 ถูกนำมาเลียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม LTspice ในการทดสอบนี้มีค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ C_3 = C_4 = C_5 = 1 μF, R_8 = R_9 = 3 kΩ, R_5 = R_6 = R_7 = 1 kΩ, และอัตราขยาย คือ R_{10}= 1 kΩ, R_{11}=7 kΩ เป็นการทดสอบในโดเมนความถี่ ป้อนอินพุตเป็นแรงดันขั้นบันไดขนาด 1 โวลต์และวัดแรงดันเอาต์พุต ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 แรงดันเอาต์พุตของการควบคุมวงจรรอบปิดด้วยอัตราขยาย

4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของ Chien Hrones Reswick โดยใช้ LTspice

4.3.1 ระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของ Chien Hrones Reswick (CHR)

ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยใช้สูตรของ Chien Hrones Reswick วิธีของ Chien Hrones Reswick (CHR) ใช้ออกแบบตัวควบคุมโดยมุ่งเน้นไปที่ ทำให้เอาต์พุตติดตามอินพุต หรือ ให้ลดสัญญาณรบกวนซึ่งต่างจากของ ziegler-nichols ที่ทำทั้งสองอย่างคือให้เอาต์พุตติดตามอินพุต และ ให้ลดสัญญาณรบกวน สูตรของการปรับจูนถูกแสดงในตาราง

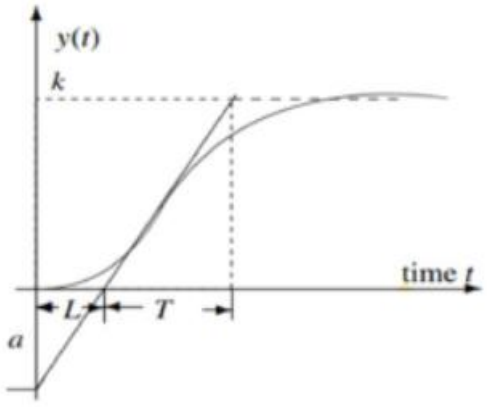
ตารางที่ 4.1 สูตรการปรับจูนของ CHR สำหรับการควบคุมแบบติดตามอินพุต

Controller type	With 0% overshoot			With 20% overshoot		
	K_P	T_i	T_d	K_P	T_i	T_d
P	0.3/a			0.7/a		
PI	0.35/a	1.2T		0.6/a	T	
PID	0.6/a	T	0.5L	0.95/a	1.4T	0.47L

ตารางที่ 4.2 สูตรการปรับจูนของ CHR สำหรับการควบคุมแบบกำกัดสัญญาณรบกวน

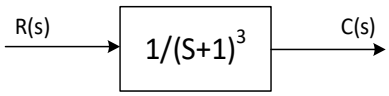
Controller type	With 0% overshoot			With 20% overshoot		
	K_P	T_i	T_d	K_P	T_i	T_d
P	0.3/a			0.7/a		
PI	0.6/a	4T		0.7/a	2.3L	
PID	0.95/a	2.4T	0.42L	1.2/a	2L	0.42L

เมื่อ a=KL/T



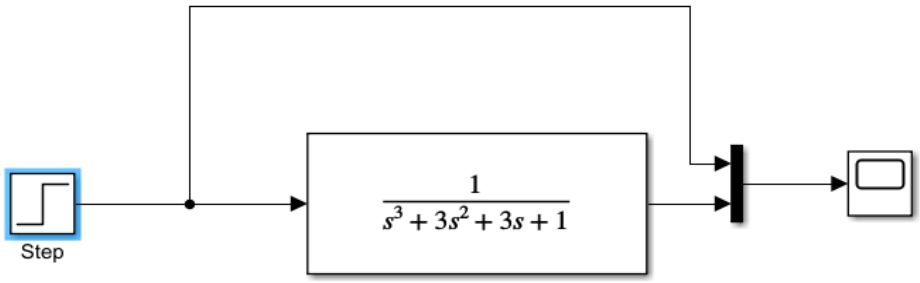
ภาพที่ 4.7 ผลการตอบสนองโดเมนเวลาสำหรับสูตรการปรับสูตรของ CHR

ทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ให้กับระบบในภาพที่ 4.8 ด้วยวิธีการของ CHR ที่ควบคุมเอาต์พุตมีการพุ่งเกินประมาณ 20 %

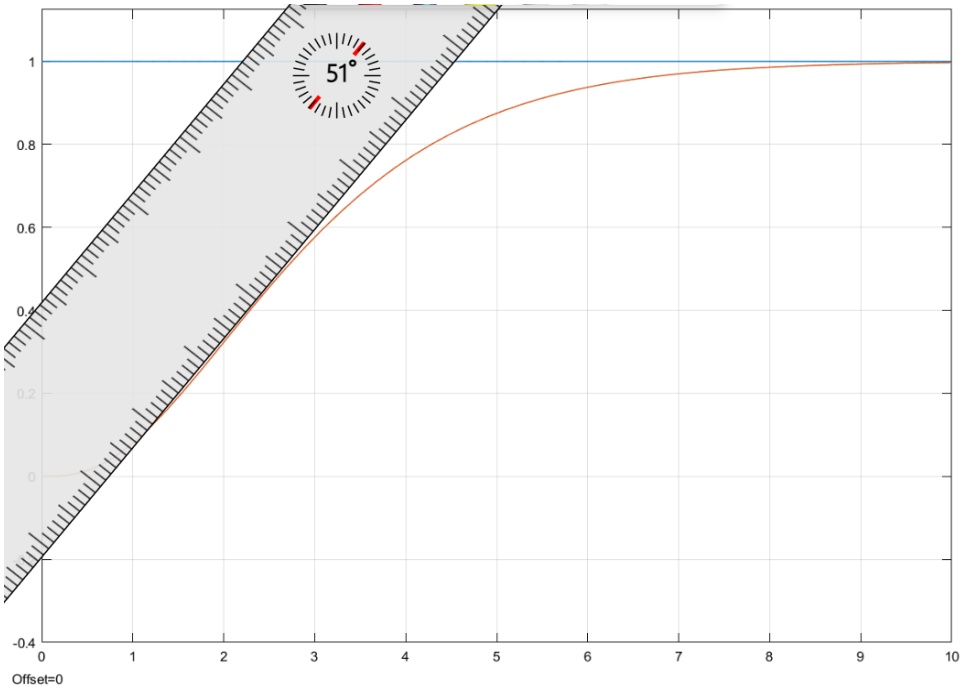


ภาพที่ 4.8 ระบบอันดับสาม

4.3.1.1 วาดระบบตามภาพ ในซิมูลิงค์เพื่อทดสอบหาผลการตอบสนองของสัญญาณขั้นบันได



ภาพที่ 4.9 ซิมูลิงค์ระบบอันดับสาม



ภาพที่ 4.10 ผลซิมูลิงค์ระบบอันดับสาม

4.3.1.2 นำผลตอบสนองที่ได้มาวัดค่า T=3.75, L=0.75, a=KL/T=0.20

4.3.1.3 คำนวณหาค่า K_c , τ_i, τ_d

$$K_c = \frac{0.95}{a} = \frac{0.95}{0.2} = 4.75$$

$$\tau_i = 1.4T = 1.4(3.75) = 5.25$$

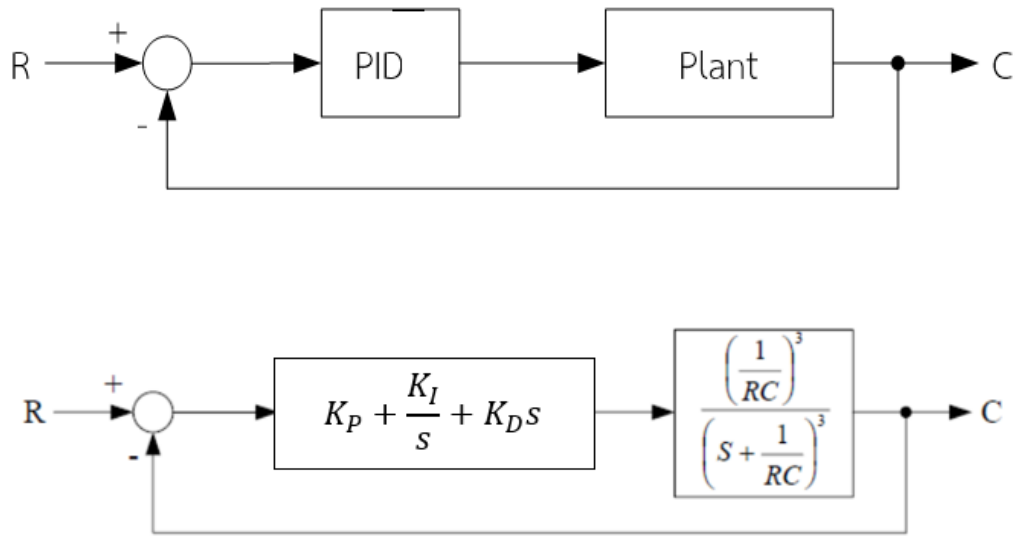
$$\tau_d = 0.47L = 0.47(0.75) = 0.35$$

$$G_c(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \quad (4.7)$$

$$G_c(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) = 4.75 + \frac{0.90}{s} + 1.66 \quad (4.8)$$

4.3.2 การควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี

สมการของการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี แสดงในบล็อกไดอะแกรม



ภาพที่ 4.11 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี

$$\frac{C}{R} = \frac{\left(K_P+\frac{K_I}{s}+K_D s\right)\frac{\frac{1}{(RC)^3}}{\left(s+\frac{1}{(RC)}\right)^3}}{\left(K_P+\frac{K_I}{s}+K_D s\right)\frac{\frac{1}{(RC)^3}}{\left(s+\frac{1}{RC}\right)^3}+1} \tag{4.9}$$

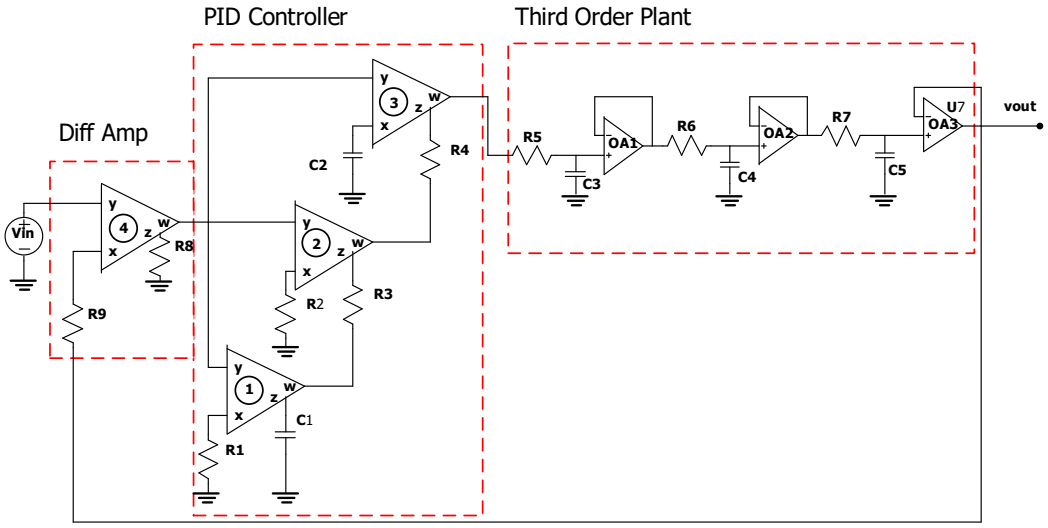
$$\frac{C}{R} = \frac{\frac{1}{(RC)^3}\left(K_P+\frac{K_I}{s}+K_D s\right)}{\frac{1}{(RC)^3}\left(K_P+\frac{K_I}{s}+K_D s\right)+\left(s+\frac{1}{RC}\right)^3} \tag{4.10}$$

สมการของรากคือ $$\frac{1}{(RC)^3}\left(K_P+\frac{K_I}{s}+K_D s\right)+\left(s+\frac{1}{(RC)}\right)=0$$

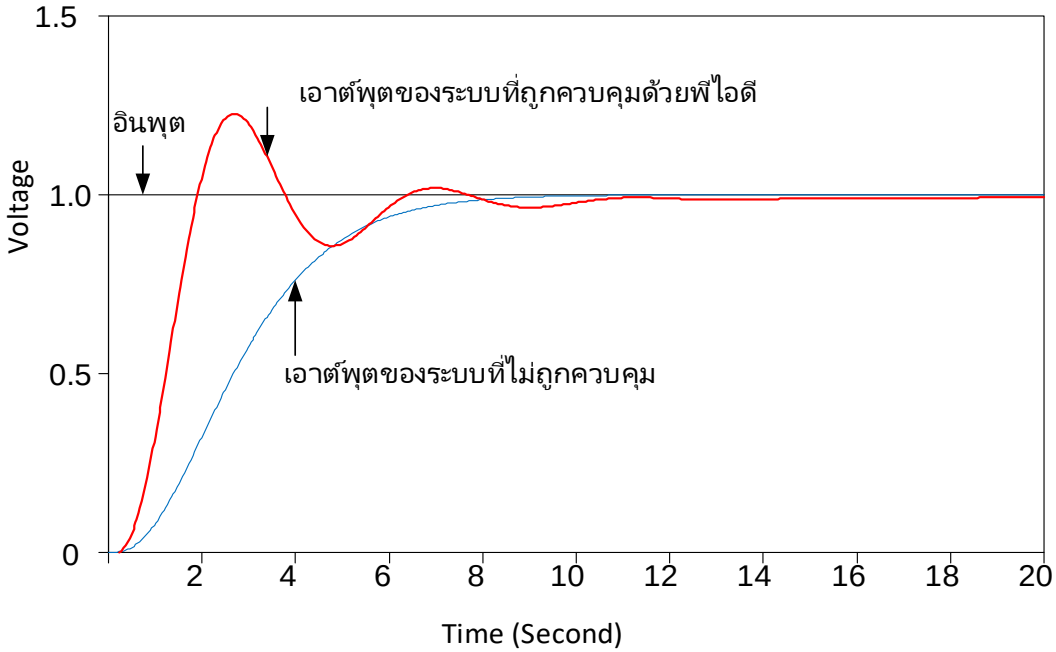
4.3.3 การทดสอบวงจรของการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี

เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีที่ผ่านมา วงจรของการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดีในภาพที่ 4.13 ด้วยวิธีการของ Chien Hrones Reswick (CHR) [13] จะได้ค่า K_P = 4.75, K_I = 1 และ K_D = 1.5 โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ในตัวควบคุมพีไอดีมีค่าต่างๆ ดังนี้ C_1 =200μF, C_2 =10 μF, R_1 = 5 kΩ, R_2 =2 kΩ, R_3 =9.5 kΩ และ R_4 =150 kΩ สำหรับระบบ

อันดับสามใช้ค่า $C_4 = C_5 = C_6 = 10\ \mu F$, $R_5 = R_6 = R_7 = 100\ k\Omega$ และวงจรลบสัญญาณแรงดันใช้ค่า $R_8 = R_9 = 10\ k\Omega$ เป็นการทดสอบในโดเมนเวลา ป้อนอินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันไดขนาด 1 โวลต์ และวัดแรงดันเอาต์พุต ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.12 วงจรของการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดี

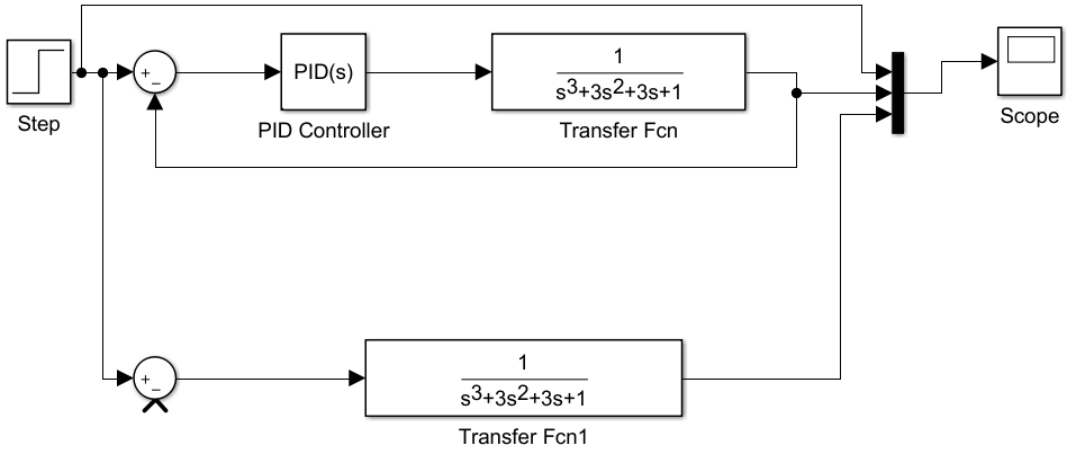


ภาพที่ 4.13 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดีโดยใช้ LTspice

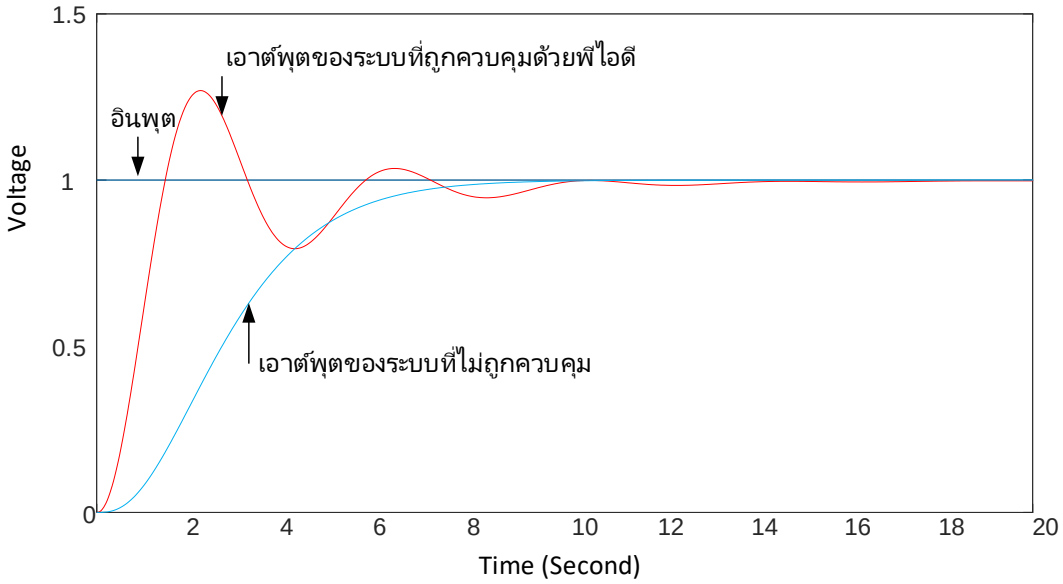
เมื่อเปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุม กับ เอาต์พุตของระบบที่ไม่มีการควบคุม พบว่า ระบบที่ถูกควบคุม มีเวลาขึ้น(rise time) ที่เร็วกว่า และมีการพุ่งเกิน(overshoot) ขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุม ไม่มีการพุ่งเกิน

4.4 การเปรียบเทียบผลของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของ CHR โดยใช้ LTspice กับ MATLAB

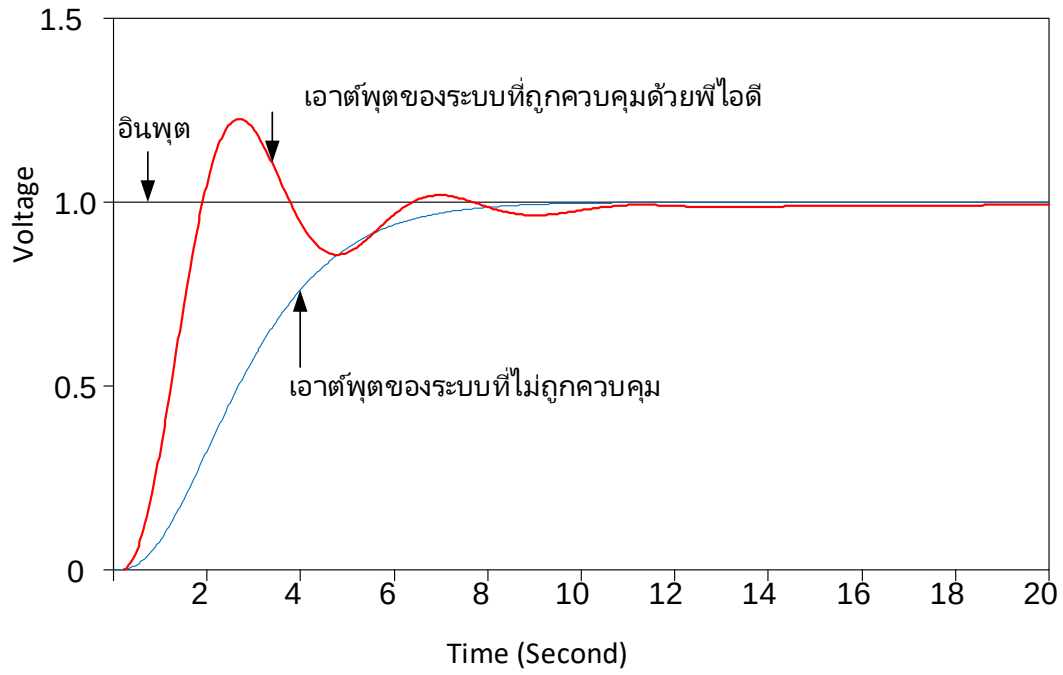
เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีที่ผ่านมา วงจรของการควบคุมวงรอบปิดด้วยวงจรควบคุมพีไอดีในภาพที่ 4.13 ด้วยวิธีการของ Chien Hrones Reswick (CHR) [13] จะได้ค่า K_P = 4.75, K_I = 1 และ K_D = 1.5 เป็นการทดสอบในโดเมนเวลา ป้อนอินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันได ขนาด 1 โวลต์และวัดแรงดันเอาต์พุต ในโปรแกรม MATLAB ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.14 การทดสอบตัวควบคุมด้วยพีไอดีกับพลานต์อันดับสามด้วยซิมูลิงค์



ภาพที่ 4.15 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดีโดย MATLAB

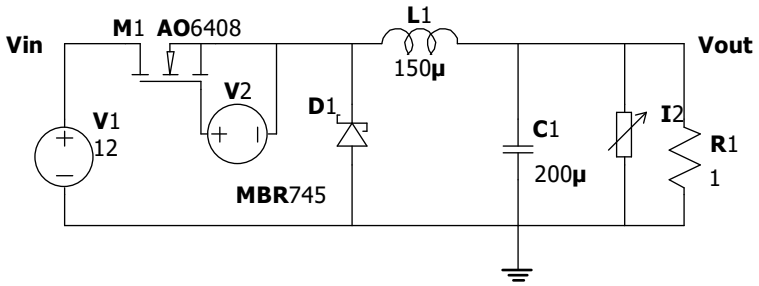


ภาพที่ 4.16 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดีโดย LTspice

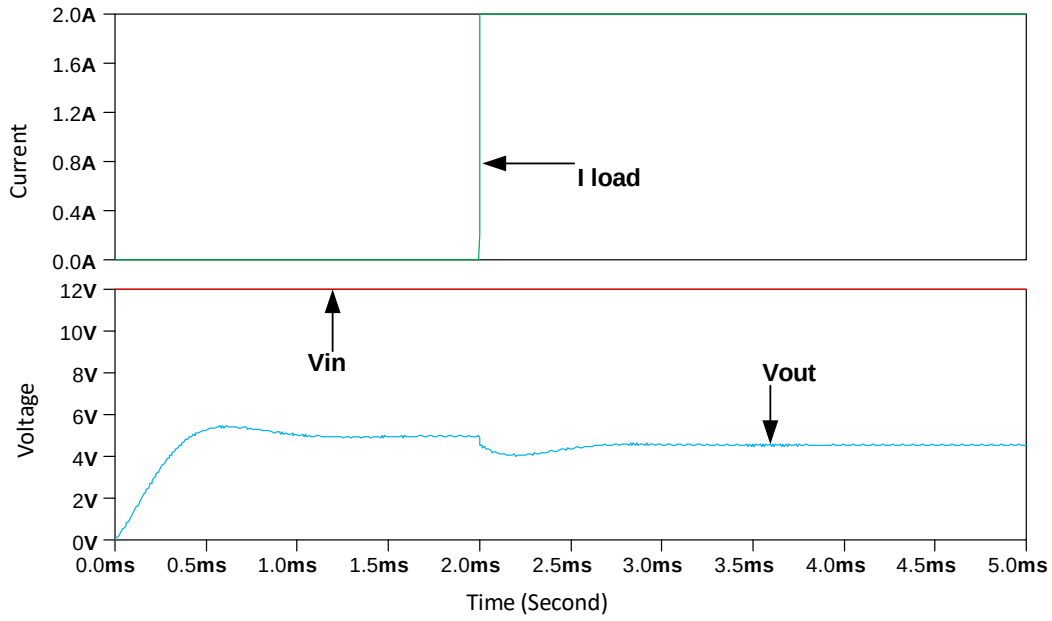
พบว่ามีความสอดคล้องกัน คือ มีค่าเวลา เวลาขึ้น เวลาคงตัว และการพุ่งเกินที่ใกล้เคียงกัน

4.5 การประยุกต์ใช้วงจรตัวควบคุมพีไอดี ในวงจรแปลผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบบักค์ (DC-DC buck converter)

เพื่อยืนยันการทำงานของตัวควบคุมพีไอดีในวิทยานิพนธ์นี้ เราได้นำตัวควบคุมพีไอดีไปประยุกต์ใช้ในวงจรแปลงแรงดัน DC เป็น DC ชนิด Buck converter โดยเลือกใช้วงจร Buck converter [14] ที่แปลงแรงดันจากอินพุต 12 V ออกเป็นแรงดันเอาต์พุต 5 V ขนาด 100 W ดังแสดงในภาพที่ 4.17

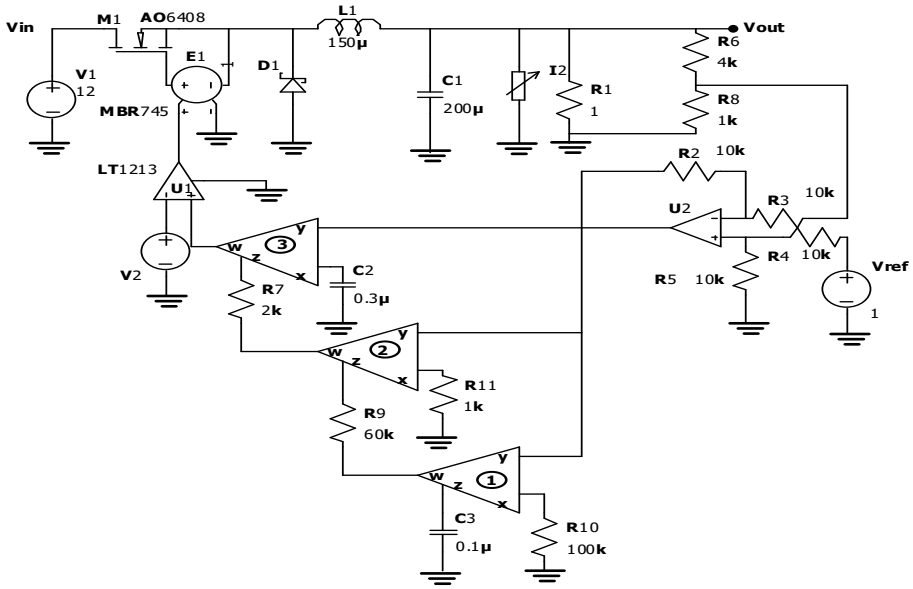


ภาพที่ 4.17 วงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบไม่มีการป้อนกลับ

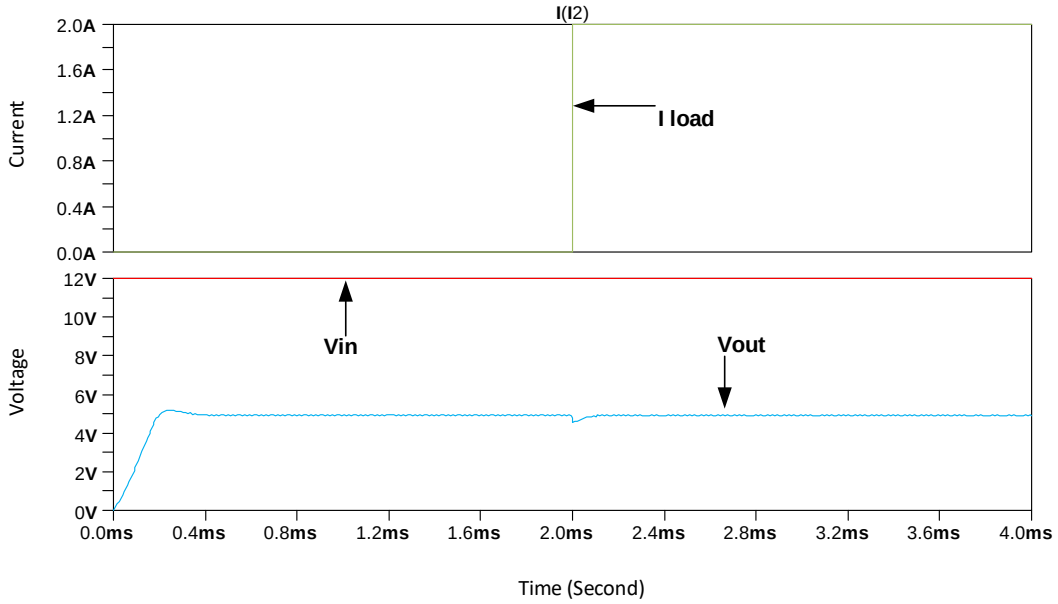


ภาพที่ 4.18 เอาต์พุตของวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบไม่มีการป้อนกลับ

ภาพที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบพบว่าในวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์แบบไม่มีการป้อนกลับ มีเวลาขึ้น (Rise time) ประมาณ 0.5 ms และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด (โหลดดึงกระแสเพิ่มขึ้น 2 A) พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีการกระเพื่อมและมีระดับแรงดันที่ต่ำลง



ภาพที่ 4.19 วงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบมีการป้อนกลับ



ภาพที่ 4.20 เอาต์พุตของวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ แบบมีการป้อนกลับ

เมื่อนำวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์มาป้อนกลับด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่นำมาเสนอในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 4.19 และให้ผลลัพธ์ของวงจรดังภาพที่ 4.20 พบว่ามีเวลาขึ้น (Rise Time) 0.3

ms และเมื่อโหลดดึงกระแสเพิ่มขึ้น 2 A แรงดันเอาต์พุตมีการกระเพื่อมเล็กน้อยขณะที่แรงดันเอาต์พุตคงที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาการออกแบบและการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการบวกแรงดันด้วยการต่ออนุกรมและประยุกต์ใช้งานกับระบบอันดับสามและวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์ได้ข้อสรุปงานวิจัยดังต่อไปนี้

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและการทดสอบตัวควบคุมพีไอดี โดยอาศัยการบวกแรงดันด้วยการต่ออนุกรมด้านเอาต์พุตขององค์ประกอบพี, องค์ประกอบไอ และองค์ประกอบดี ทำให้ตัด CFOA ที่ทำหน้าที่บวกแรงดันออกไปได้ ทำให้วงจรที่นำเสนอนี้ใช้ CFOA เพียง 3 ตัว ได้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์และขอบเขตที่กำหนด กล่าวคือ (1) ได้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี โดยอาศัยการบวกแรงดัน ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี คืออัตราขยายของตัวควบคุมตัวควบคุมพีไอดีนี้สามารถปรับค่าอัตราขยายได้อิสระจากกันด้วยการปรับพารามิเตอร์ โดยค่า K_P สามารถปรับค่าด้วย R_2, R_3, ค่า K_I สามารถปรับค่าด้วย R_I, C_I, ค่า K_D สามารถปรับค่าด้วย R_4,

การนำตัวควบคุมพีไอดี โดยอาศัยการบวกแรงดันด้วยการต่ออนุกรมไปประยุกต์ใช้งานกับพลานซ์ระบบอันดับและวงจรบักค์คอนเวอร์เตอร์พบว่าสามสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี และเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก LTspice และ MATLAB มีความสอดคล้องกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ควรมีการสร้างตัวควบคุมพีไอดีจริงในบอร์ดทดลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] K. J. Astrom, and T. Hagglund, PID Controllers: Theory Design and Tuning, North Carolina: Instrument Society of America, 1995.

[2] L Jia, D Wang, J Fu, YF Liu, PC Sen, “A novel analog implementation of capacitor charge balance controller with a practical extreme voltage detector,” Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 IEEE, 245-252

[3] K. Jang, J.-M. Choi, C. Park, J. Choi, “A voltage-mode DC-DC converter with enhanced transient responses,” IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 20-23 May 2012

[4] M. Huang and Y. Lu, “An analog-proportional digital-integral multi-loop digital LDO with fast response, improved PSR and zero minimum load current,” in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf. (CICC), Apr. 2019, pp. 1–4.

[5] C. Erdal, H. Kuntman, and S. Kafali, “A current controller conveyor-based proportion-integral-Derivative (PID) controller,” Istanbul university eng. Journal of electrical & electronics, vol. 4, no. 2, pp. 1243-1248, 2004.

[6] C. Erdal, “A new current-feedback-amplifiers (CFAs) based proportional-integral-derivative (PID) Controller realization and calculating optimum parameter tolerances,” Pakistan Journal of Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 56-59, 2002.

[7] C. Erdal, A. Toker, and C. Acar, “OTA-C based Proportional-Integral-Derivative Controller and calculating optimum parameter tolerances,” Turkish J. Elect. Enging Comput. Sci., Elektrik, 9(2) (2001), 189–198.

[8] Ali Ümit Keskin, “Design of a pid controller circuit employing CDBAa,” Int. J. Electr. Eng. Educ. 43(1),48-56(2006)

[9] สมเกียรติ เพียงพรานทอง และ อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห, “การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วงจรขยายบัฟเฟอร์ของผลต่างกระแส,” หน้า95-100, การประชุมวิชาการสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, 24-25, มิถุนายน 2565

[10] Z. Gülru, C. Taşkıran, H. Sedef & F. Anda, “A New PID Controller Circuit Design Using CFOAs,” Circuits Syst Signal Process 40, 1166–1182 (2021)

[11] Analog Devices, “Linear products data book”, Norwood, Ma, 1990.

[12] S. Jung and R. C. Dorf, “Analytic PIDA Controller Design Technique for A Third Order System,” Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control, Japan, 13 Dec. 1996, pp. 2513-2518

[13] D. Xue. Y. Chen. And D. P. Atherton. Linear feedback central: analysis and design with MATLAB Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007

[14] Aziz, MM Abdel, A. A. Mahfouz, and D. M. Khorshied. “Simplified approaches for controlling dc-dc power converter.” International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) 4.02 (2012): 792-804

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมแบบจำลองของ UA741 และ AD844

แบบจำลองของไอซีออปแอมป์ 741 (UA741 Spice Model)

```
* UA741 OPERATIONAL AMPLIFIER "MACROMODEL" SUBCIRCUIT
* CREATED USING PARTS RELEASE 4.01 ON 07/05/89 AT 09:09
* (REV N/A)      SUPPLY VOLTAGE: +/-15V
* CONNECTIONS:   NON-INVERTING INPUT
*               | INVERTING INPUT
*               | | POSITIVE POWER SUPPLY
*               | | | NEGATIVE POWER SUPPLY
*               | | | | OUTPUT
*               | | | | |
.SUBCKT UA741    1 2 3 4 5
*
  C1   11 12 4.664E-12
  C2    6  7 20.00E-12
  DC    5 53 DX
  DE   54  5 DX
  DLP  90 91 DX
  DLN  92 90 DX
  DP    4  3 DX
  EGND 99  0 POLY(2) (3,0) (4,0) 0 .5 .5
  FB    7 99 POLY(5) VB VC VE VLP VLN 0 10.61E6 -10E6 10E6 10E6 -10E6
  GA 6  0 11 12 137.7E-6
  GCM 0  6 10 99 2.574E-9
  IEE  10  4 DC 10.16E-6
  HLIM 90  0 VLIM 1K
  Q1   11  2 13 QX
  Q2   12  1 14 QX
  R2    6  9 100.0E3
  RC1   3 11 7.957E3
  RC2   3 12 7.957E3
  RE1  13 10 2.740E3
```

```
  RE2   14 10 2.740E3
  REE   10 99 19.69E6
  RO1    8  5 150
  RO2    7 99 150
  RP     3  4 18.11E3
  VB     9  0 DC 0
  VC 3 53 DC 2.600
  VE    54  4 DC 2.600
  VLIM  7  8 DC 0
  VLP   91  0 DC 25
  VLN    0 92 DC 25
.MODEL DX D(IS=800.0E-18)
.MODEL QX NPN(IS=800.0E-18 BF=62.50)
.ENDS
```

แบบจำลองของไอซีออปแอมป์ป้อนกลับกระแส AD844 (AD844 Spice Model)

```
* AD844 SPICE Macro-model
* Description: Amplifier
* Generic Desc: 60 MHz, 2000 V/us  Op Amp
* Developed by: JCB / PMI
* Revision History: 08/10/2012 - Updated to new header style
* 1.0 (07/1991)
* Copyright 1991, 2012 by Analog Devices, Inc.
*
* Refer to
http://www.analog.com/Analog_Root/static/techSupport/designTools/spiceMod
els/license/spice_general.html for License Statement.  Use of this model
* indicates your acceptance with the terms and provisions in the License
Statement.
*
* BEGIN Notes:
*
* Not Modeled:
*
* Parameters modeled include:
*
* END Notes
*
* Node assignments
*              non-inverting input
*              | inverting input
*              || positive supply
*              |||  negative supply
*              |||| |  output
*              |||| | |  compensation node
*              |||| | | |
```

```
.SUBCKT AD844   1 2 99 50 28 12
*
* INPUT STAGE
*
R1    99   8      1E3
R2    10 50      1E3
V1    99   9      11
D1    9    8      DX
V2    11 50      11
D2    10 11      DX
I1    99   5      258E-6
I2    4   50      258E-6
Q1    50   3   5   QP
Q2    99   3   4   QN
Q3    8    6 30   QN
Q4    10   7 30   QP
R3    5    6      300E3
R4    4    7      300E3
*C1    99   6      8.8E-15
*C2    50   7      8.8E-15
*
* INPUT ERROR SOURCES
*
GB1   99   1      POLY(1)   1   22   150E-9   90E-9
GB2   99 30      POLY(1)   1   22   200E-9   90E-9
VOS   3    1      50E-6
LS1   30   2      1E-8
CS1   99   2      1E-12
CS2   50   2      1E-12
*EREF 97   0      22   0   1*
* GAIN STAGE & DOMINANT POLE*
```

```
R5   12 97     3E6
C3   12 97     5.5E-12
G1   97 12     99  8  1E-3
G2   12 97     10 50  1E-3
V3   99 13     4.3
V4   14 50     4.3
D3   12 13     DX
D4   14 12     DX
*
* POLE AT 70 MHZ
*
R8  17 97     1E6
C4  17 97     3.18E-15
G4  97 17     12 22  1E-6
*
* POLE AT 300 MHZ
*
R12 21 97     1E6
C8  21 97     0.318E-15
G8  97 21     17 22  1E-6
*
* OUTPUT STAGE
*
ISY 99 50     5.1E-3
R13 22 99     16.7E3
R14 22 50     16.7E3
R15 27 99     30
R16 27 50     30
L2  27 28     6E-8
G9  25 50     21 27  33.33E-3
G10 26 50     27 21  33.33E-3
```

```
G11 27 99      99 21  33.33E-3
G12 50 27      21 50  33.33E-3
V5  23 27      0.5
V6  27 24      0.5
D5  21 23      DX
D6  24 21      DX
D7  99 25      DX
D8  99 26      DX
D9  50 25      DY
D10 50 26      DY
*
* MODELS USED
*
.MODEL QN    NPN(BF=1E9 IS=1E-15)
.MODEL QP    PNP(BF=1E9 IS=1E-15)
.MODEL DX    D(IS=1E-15)
.MODEL DY    D(IS=1E-15 BV=50)
.ENDS
```

ภาคผนวก ข.

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15
15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

วงจรตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการบวกแรงดันในการต่ออนุกรม

A PID controller circuit based on voltage adder in series connection

วิชาติ ดูดหมาย และ อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์
Wichat Thookmai and Ittipong Chaisayun
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 Email: S6444010002@sau.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรควบคุมพีไอดีโดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส วงจรควบคุมพีไอดีนี้ มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไปและสามารถปรับค่าเกณฑ์ K_p, K_I, K_D ได้อย่างอิสระด้วยตัวต้านทาน การวิเคราะห์วงจรทางคณิตศาสตร์พบว่าค่าความไวของอุปกรณ์ต่างๆ ต่อพารามิเตอร์ K_p, K_I, K_D มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมพีไอดีด้วย LTspice พบว่าวงจรสามารถปรับค่า K_p, K_I, K_D ได้อย่างอิสระ ขณะที่วงจรบริโภคกำลังไฟฟ้า 0.6 วัตต์เมื่อใช้แรงดันไฟเลี้ยง ±15 โวลต์

คำสำคัญ: วงจรควบคุมพีไอดี, ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส, วงจรขยายป้อนกลับ

Abstract

This paper proposes a PID controller employing current feedback operational amplifier (CFOA). The advantage of proposed circuit are independently adjustable parameters (K_p, K_I, K_D) by resistors and commercially available used devices. Mathematical analyses find that the active and passive element sensitivities are equal to unity in magnitude. Simulation results using LTspice are shown that the parameters (K_p, K_I, K_D) can be independently adjusted and the power consumption of PID controller circuit is 0.6 W at ±15 V supply voltages.

Keywords: PID controller circuit, current feedback op-amp, feedback amplifier

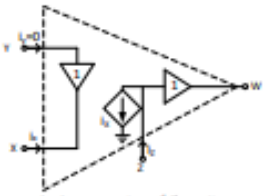
1. บทนำ

ตัวควบคุมหรือตัวชดเชยที่นิยมใช้ในระบบควบคุมทำหน้าที่ให้ระบบมีผลการตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ โดยตัวควบคุมที่นิยมใช้มากที่สุดคือตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-derivative: PID) ทั้งนี้เพราะตัวควบคุมแบบพีไอดี มีความสามารถในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ง่าย มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และราคาถูก[1] ในปัจจุบันนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีส่วนใหญ่จะเป็นแบบดิจิตอล [1]เพราะมีข้อดีคือมีความเหมือนหนุ่นและความเชื่อถือสูง แต่ตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะลอก[2-3]ยังมีข้อดีกว่าในเรื่องความเร็วในการตอบสนองที่เร็วกว่าและถ้าบ้าตัวควบคุมไปสร้างเป็นวงจรรวม ตัวควบคุมแบบแอนะลอกจะใช้พื้นที่น้อยกว่าและบริโภคกำลังไฟน้อยกว่า เมื่อไม่นานมานี้ก็มีการรวมตัวควบคุมทั้งดิจิตอลและแอนะลอกให้ทำงานด้วยกันเพื่อจะได้รับจุดเด่นของทั้งคู่[4] เช่นเดียวกับการสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะลอกจะใช้ออปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แต่ด้วยข้อจำกัดของออปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ในเรื่องความยื่ดลอบสนองและอัตราสลูว์ (Slew Rate) ที่ต่ำ จึงได้มีการนำเสนอตัวควบคุมพีไอดีที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แอคตีฟที่หาซื้อได้ เช่น งานวิจัย[5] ใช้วงจรสายพานกระแสรุ่น งานวิจัย[6] ใช้วงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแส งานวิจัย[7] ใช้วงจรขยายความนำ และ งานวิจัย[8-9] ใช้วงจรขยายผลต่างกระแส โดยงานวิจัย[5-7] มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไปและเกณฑ์ K_p, K_I, K_D สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระแต่ข้อด้อยคือใช้อุปกรณ์แบบแอคตีฟจำนวนมากทำให้วงจรมีขนาดที่ใหญ่และกินกำลังไฟฟ้าที่สูง ขณะที่งานวิจัย[8-9] มีข้อดีคือเกณฑ์ K_p, K_I, K_D สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระ ข้อด้อยคือวงจรขยายผลต่างกระแส ยังไม่มีขายในท้องตลาดแต่ก็สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยใช้ ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส 2 ตัว[9] เมื่อเร็วๆนี้ได้เสนอตัวควบคุมพีไอดี[10] ที่มีข้อเด่นคือใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสที่หาซื้อได้ทั่วไปเพียง 3 ตัวและสามารถปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมได้อย่างอิสระ แต่มีข้อด้อยคือต้องปรับค่าด้วยตัวเก็บประจุซึ่งเป็นเรื่องยากที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบที่สามารถปรับค่าได้ ในบทความนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะลอก โดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier: CFOA หรือ CFA) ที่สามารถปรับค่าอัตราขยายต่างๆอย่างอิสระด้วยตัวต้านทาน

2. หลักการทำงาน

2.1 ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ออปแอมป์ปัจจุบันกลับกระแส(CFA) ประกอบด้วยวงจรตามแรงดัน ของวงจรและวงจรตามกระแส 1 วงจร ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ปัจจุบันกลับกระแสแบบทุดุลศาสตร์

จากรูปที่ 1 ขา y เป็นอินพุตแรงดันที่มีอิมพีแดนซ์สูงของออปแอมป์ปัจจุบันกลับกระแส ทำหน้าที่เป็นอินพุตของวงจรตามแรงดันที่ให้เอาท์พุตเป็นแรงดันที่ ขา x ขณะที่ ขา x ยังเป็นอินพุตกระแสด้วยที่ทำหน้าที่เป็นวงจรตามกระแสที่ให้เอาท์พุตเป็นกระแสที่ ขา z และ ที่ขา z นี้ยังทำหน้าที่เป็นอินพุตของวงจรตามแรงดันที่ให้เอาท์พุตเป็นแรงดันที่ ขา w ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ขาต่างๆเป็นดังนี้

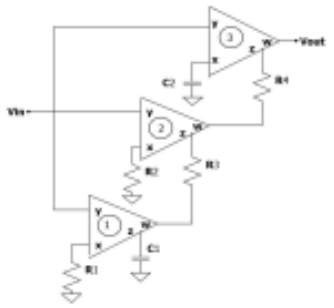
$$i_y = 0, i_x = i_z, v_x = v_y, v_w = v_z \quad (1)$$

2.2 วงจรตัวควบคุม พีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี [1]มีฟังก์ชันถ่ายโอน ในโดเมนเอส (s-domain) T(s) ดังนี้

$$T(s) = \frac{V_O}{V_i} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2)$$

เมื่อ s คือ จำนวนเชิงซ้อน (Complex Number) K_p คืออัตราขยายขององค์ประกอบพี K_I คืออัตราขยายขององค์ประกอบไอ K_D คืออัตราขยายขององค์ประกอบดี บทความนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดี ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรตัวควบคุมพีไอดี

วงจรตัวควบคุมพีไอดีนี้ใช้ ออปแอมป์ปัจจุบันกลับกระแส เพียง 3 ตัวเท่านั้น โดยที่ CFOA_1 R_1 และ C_1 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมไอ ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุต v_{w1} แสดงได้ดังนี้

$$v_{w1} = \left(\frac{1}{sR_1C_1}\right) v_{in} \quad (3)$$

ขณะที่ CFOA_2 R_2 และ R_3 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพี ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันที่ตกคร่อม v_{R3} แสดงได้ดังนี้

$$v_{R3} = \frac{R_3}{R_2} v_{in} \quad (4)$$

ขณะที่ CFOA_3 R_4 และ C_2 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมดี ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันที่ตกคร่อม v_{R4} แสดงได้ดังนี้

$$v_{R4} = sC_2R_4 v_{in} \quad (5)$$

และแรงดันเอาต์พุตของวงจร เกิดจากการซ้อนทุกรมของแรงดันเอาต์พุตขององค์ประกอบต่างๆ ซึ่งมีการเป็น $v_{out} = v_{w1}+v_{R3}+v_{R4}$ และฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุมพีไอดีในรูปที่ 2 คือ

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(\frac{R_3}{R_2} + \frac{1}{sR_1C_1} + sC_2R_4\right) \quad (6)$$

พารามิเตอร์ K_p K_I K_D คือ

$$K_P = \frac{R_3}{R_2} \quad (7)$$

$$K_I = \frac{1}{R_1C_1} \quad (8)$$

$$K_D = C_2R_4 \quad (9)$$

จากสมการที่ (7) - (9) จะเห็นว่าอัตราขยายของตัวควบคุมสามารถปรับได้โดยอิสระจากกัน โดย อัตราขยายขององค์ประกอบพี สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_3 อัตราขยายขององค์ประกอบไอ สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_1 และ C_1 และอัตราขยายขององค์ประกอบ ดี สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_4 และ C_2 จากสมการดังกล่าว เราสามารถคำนวณหาค่าความไว(Sensitivity)ของค่าพารามิเตอร์ K_P K_I K_D ต่อค่า R และ C ต่างๆ ได้ดังนี้

$$S_{R_3}^{K_P} = -S_{R_2}^{K_P} = 1 \quad (10)$$

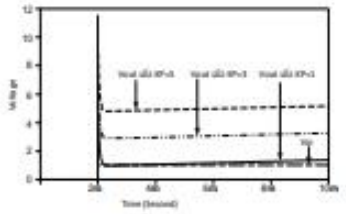
$$S_{R_1,C_1}^{K_I} = -1 \quad (11)$$

$$S_{R_4,C_2}^{K_D} = 1 \qquad (12)$$

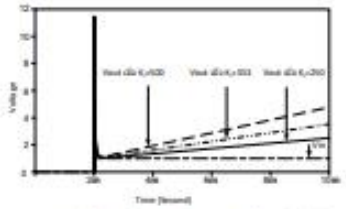
3. ผลการจำลองการทำงานโดยใช้ LTspice

เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี วงจรควบคุม พีไอดี ในรูปที่ 2 ได้ถูกนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม LTspice สำหรับวงจรออปแอมป์ป้อนกลับกระแสในรูปที่ 1(ก) ใช้แบบจำลอง(Macro-Model) ของ AD844 จาก Analog Devices ในการทดสอบนี้ใช้ไฟเลี้ยง ± 15V และเพื่อหาช่วงการปรับค่าของเกนซ์ K_P, K_I, K_D ได้อย่างชัดเจน จึงกำหนดค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

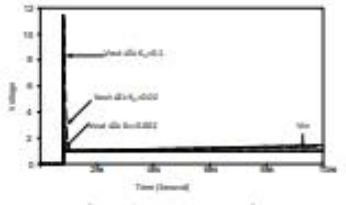
C_1 =1μF, C_2 =1μF, R_1 = 20 kΩ, R_2 =1kΩ, R_3 =1kΩ และ R_4 = 20 kΩ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า K_P = 1, K_I = 500 และ K_D = 0.02 ในการทดสอบพบว่าวงจรควบคุมพีไอดีนี้บริโภคกำลังไฟฟ้า 0.6 วัตต์ และการทดสอบผลตอบสนองในโดเมนเวลาโดยจะป้อนอินพุต V_{in} เป็นสัญญาณขั้นบันไดขนาด 1 โวลต์และวัดแรงดันเอาต์พุต V_{out}



รูปที่ 3 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_P มีค่าต่างๆ



รูปที่ 4 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_I มีค่าต่างๆ

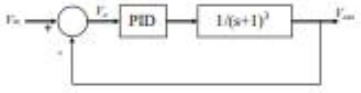


รูปที่ 5 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_D มีค่าต่างๆ

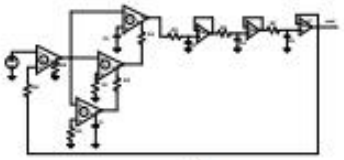
รูปที่ 3 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_I และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ค่า K_P เปลี่ยนแปลงตามนี้คือ 1, 3 และ 5 โดยการปรับค่า R_2 เป็น 1kΩ , 3kΩ และ 5kΩ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะเป็นแปรผันตรงกับค่า K_P รูปที่ 4 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_P และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ K_I เปลี่ยนแปลงตามนี้ 250, 333 และ500 โดยการให้ C_1=0.1μF และปรับค่า R_3 เป็น 400Ω, 300Ω,และ 200Ω ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะมีค่าความชันที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_I และรูปที่ 5 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อ K_I และ K_P มีค่าคงที่ขณะที่ K_D เปลี่ยนแปลงตามนี้ 0.1, 0.02 และ 0.002 โดยการปรับค่า R_4 เป็น 100kΩ , 20kΩและ 2kΩ ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะมีค่าการลอบสนองในช่วงเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_D

4. การประยุกต์ใช้งานของตัวควบคุมพีไอดี

ในหัวข้อนี้เป็นการนำตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบมาทดสอบกับพลานต์อันดับสามซึ่งถือว่าเป็นพลานต์ที่ควบคุมได้ยากเพราะอันดับของพลานต์สูงว่า ชิโว่ของตัวควบคุมพีไอดี[12]โดยจะทดสอบในโดเมนเวลา บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ แสดงในรูป 6 (ก) วงจรที่ใช้จำลองการทำงานของตัวควบคุม พีไอดี กับพลานต์ แสดงในรูป 6(ข) ในการทดสอบนี้จะใช้พลานต์อันดับสามที่สร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับแรงดันแบบอุดมคติ(OA1-OA3) เพราะต้องการให้มีคุณสมบัติตามสมการ (13) ขณะที่ตัวเปรียบเทียบแรงดัน(CFOA_4)และตัวควบคุมพีไอดี (CFOA_1, CFOA_2และ CFOA_3) จะสร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับกระแส(AD844)



(ก)



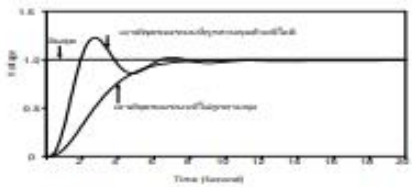
(ข)

รูปที่ 6 ระบบควบคุมป้อนกลับ
(ก) บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ
(ข) การแทนบล็อกไดอะแกรมด้วยวงจร

พลานต์อันดับสามในรูปที่ 6 ประกอบด้วย OA1-OA3 R_x-R, และ C_x-C_3 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \qquad (13)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีของระบบในรูป 6 ด้วยวิธีการของ Chien Hrones Reswick(CHR) [13] จะได้ค่า $K_p = 4.75$, $K_i = 1$ และ $K_d = 1.5$ โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ในตัวควบคุมพีไอดีมีค่าต่างๆ ดังนี้ C_1 =200μF, C_2 =10 μF, R_1 = 5 kΩ, R_2 =2 kΩ, R_3 =9.5 kΩ และ R_4 =150 kΩ สำหรับระบบขับเคลื่อนสายใช้ค่า $C_a = C_b = C_c$ =10 μF, $R_a = R_b = R_c$ =100 kΩ และวงจรตรวจสัญญาณแรงดันใช้ค่า $R_x = R_y$ =10 kΩ



รูปที่ 7 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดี

เมื่อเปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุม กับ เอาต์พุตของระบบที่ไม่มีการควบคุม พบว่า ระบบที่ถูกควบคุม มีเวลาขึ้น(rise time) ที่เร็วกว่า และมีการพุ่งเกิน(overshoot) ขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุม ไม่มีการพุ่งเกิน

5. สรุป

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี โดยอาศัยการบวกแรงดันด้วยการต่ออนุกรมด้านเอาต์พุตขององค์ประกอบที่, องค์ประกอบไอ และองค์ประกอบดี ทำให้ได้ตัว CFOA ที่ทำหน้าที่บวกแรงดันออกไปได้ ทำให้วงจรที่นำเสนอนี้ใช้ CFOA เพียง 3 ตัว ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ที่อัตราขยายของตัวควบคุม (K_p K_i และ K_d) สามารถปรับได้อย่างอิสระได้ด้วยตัวต้านทาน ในการประยุกต์ใช้งาน ได้นำตัวควบคุมพีไอดี ที่ออกแบบมาทดสอบกับพลานต์ขับเคลื่อนสาย

เอกสารอ้างอิง

[1] K. J. Astrom, and T. Hagglund, PID Controllers: Theory Design and Tuning, North Carolina: Instrument Society of America, 1995.

[2] L. Jia, D. Wang, J. Fu, YF Liu, PC Sen, "A novel analog implementation of capacitor charge balance controller with a practical extreme voltage detector," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 IEEE, 245-252

[3] K. Jung, J.-M. Choi, C. Park, J. Choi, "A voltage-mode DC-DC converter with enhanced transient responses," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 20-23 May 2012

[4] M. Huang and Y. Lu, "An analog-proportional digital-integral multi-loop digital LDO with fast response, improved PSR and zero minimum load current," in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf. (CICC), Apr. 2019, pp. 1–4.

[5] C. Erdal, H. Kuntman, and S. Kafali, "A current controller conveyor-based proportion-integral-Derivative (PID) controller," Istanbul university eng. Journal of electrical & electronics, vol. 4, no. 2, pp. 1243-1248, 2004.

[6] C. Erdal, "A new current-feedback-amplifiers (CFAs) based proportional-integral-derivative (PID) Controller realization and calculating optimum parameter tolerances," Pakistan Journal of Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 56-59, 2002.

[7] C. Erdal, A. Toker, and C. Acar, "OTA-C based Proportional-Integral-Derivative Controller and calculating optimum parameter tolerances," Turkish J. Elect. Enging Comput. Sci., Elektrik, 9(2) (2001), 189-198.

[8] Ali Ümit Keskin, "Design of a pid controller circuit employing CDBAs," Int. J. Electr. Eng. Educ. 43(1),48-56(2006)

[9] สมเกียรติ เพียงพรานทอง และ อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์, "การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วงจรขยายบัฟเฟอร์ของผลต่างกระแส," หน้า195-100, การประชุมวิชาการสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, 24-25, มิถุนายน 2565.

[10] Z. Gidra, C. Taşkonan, H. Sedef & F. Anda, "A New PID Controller Circuit Design Using CFOAs," Circuits Syst Signal Process 40, 1166–1182 (2021)

[11] Analog Devices, "Linear products data book", Norwood, Ma, 1990.

[12] S. Jung and R. C. Dorf, "Analytic PIDA Controller Design Technique for A Third Order System," Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control, Japan, 13 Dec. 1996, pp. 2513-2518

[13] D. Xue, Y. Chen, And D. P. Atherton, Linear feedback control: analysis and design with MATLAB Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007

ชื่อ-นามสกุล นายวิชาติ ลูกหมาย
ที่อยู่ปัจจุบัน 117/11 หมู่ที่ 4 ต.กุ้งธน อ.บาง
ประอิน จ.พระนครศรีอยุธยา 13160
Email : S6444010002@uau.ac.th
เบอร์โทรศัพท์ : 092-3488309
ประวัติการศึกษา : กำลังศึกษา ปริญญาโท
วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
งานวิจัยที่สนใจ PID

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ–นามสกุล นายวิชาติ ถูกหมาย

วัน เดือน ปีเกิด 19 มิถุนายน พ.ศ.2521

ที่อยู่ปัจจุบัน 117/11 หมู่ 7 ตำบลคุ้งลาน อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
โทร. 092-3488309

ประวัติการศึกษา 2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน บริษัท เฟิร์ส เทคโนโลยี่ จำกัด

ความชำนาญเฉพาะด้าน

1.ระบบโซล่าเซลล์

2.ระบบควบคุม

ผลงานทางวิชาการขณะศึกษา

1.วิชาติ ถูกหมาย, อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์, “วงจรตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการบวกแรงดันในการต่ออนุกรม,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า(EENET 2023) ครั้งที่ 15 วันที่ 1-3 พฤษภาคม 2566