การศึกษาการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ

Study of DC Motor Speed Control Based on PI Controller

นายชนะชัย คะณะวาปี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสยาม
พุทธศักราช 2562

การศึกษาการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ

Study of DC Motor Speed Control Based on PI Controller

นายชนะชัย คะณะวาปี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสยาม
พุทธศักราช 2562

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบปริญญานิพนธ์
(ผศ.ดร.ยงยุทธ นารายณ์)

..... กรรมการ
(ผศ.วิภาวัลย์ นาคทรัพย์)

..... กรรมการ
(ดร.วินัย ศิลารวม)

....
(ผศ.ดร.ยงยุทธ นารายณ์) (ผศ.สราวุฒิ วรสุมันต์)
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อโครงงาน การศึกษาการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ
หน่วยกิต 3 หน่วยกิต
จัดทำโดย นายชนะชัย คะณะวาปี 5504200017
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ยงยุทธ นาราษฎร์
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
พุทธศักราช 2561

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการศึกษาควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอบนพื้นฐานการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการพุ่งเกินในระบบควบคุมวงรอบปิดที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่ออินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันได ระบบที่นำเสนอประกอบด้วย ตัวควบคุมพีไอ วงจรเอชีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกพิกัด 1.1 kW, 220 V, 6.5 A, 3,000 rpm ตัววัดความเร็วรอบโดยใช้แสง วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน และวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ และการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการทดสอบระบบที่นำเสนอ พบว่ากรณีที่ปรับค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีค่าน้อยมาก ผลตอบสนองจะไม่เกิดการพุ่งเกินแต่เกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว ส่วนกรณีปรับค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีที่มีค่ามาก ๆ ผลตอบสนองจะเกิดการออสซิเลต ซึ่งเมื่อเพิ่มตัวควบคุมไอเข้าไปในระบบจะทำให้มีเสถียรภาพที่ดีได้ผลใกล้เคียงกับค่าคาดการณ์ไว้

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง / ตัวควบคุมพีไอ / การควบคุมความเร็วรอบ

Project Title:	Study of DC Motor Speed Control Based on PI Controller
Credits:	3 Units
By:	Mr. Chanashai Chanawapi 5504200017
Advisor:	Asst. Prof. Dr. Yongyuth Naras
Degree:	Bachelor of Engineering
Major:	Electrical Engineering
Faculty:	Engineering
Year:	2018

Abstract

This project presents of the study of DC motor speed control based on PI controller using minimum overshoot PI controller design. The designed method was based on adjusting the PI controller parameters to avoid an overshoot in the closed-loop system step response for controlling DC motors. The proposed system was composed of a series PI controller, AC to DC converter, a DC motor rated at 1.1 kW, 220 V, 6.5 A, 3000 rpm, optical tachometer, frequency to voltage converter (F/V) and analog to digital converter (A/D). A computer program was simulated for the designed parameters of PI controller and calculated all parameters of motor from a mathematic model. The experimental results were found that when the gain of the PI controller was decreased. It created a steady state error of the system. As the proportional gain factor K increases, the steady state error of the system decreases, but leads to overshooting and oscillation of the system response. Integral control eliminates the steady state error to agree with the predicted value.

Keywords: DC motor / PI Controller / Speed Control

Approved by

.....

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ แม้จะมีปัญหามากมายหลาย ๆ ด้านก็ตาม ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คุณสมบัติของมอเตอร์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แต่ปัญหาต่าง ๆก็สามารถบรรลุผลไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากผู้จัดทำได้รับได้รับการแนะนำ และอนุเคราะห์ช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.ยงยุทธ นาราษฎร์ และ ผศ.วิภาวัลย์ นาคทรัพย์ รวมทั้งคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรมไฟฟ้าที่ให้ความสะดวกในการทำงาน พร้อมทั้งให้กำลังใจและคำปรึกษาที่ดีซึ่งมีผลทำให้ปริญญานิพนธ์นี้ จัดทำขึ้นเป็นไปอย่างมีลำดับขั้นตอนตามวัตถุประสงค์และขอบเขตที่ตั้งไว้ทุกประการ ดังนั้นผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณบุคคลดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวนามที่ให้การอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ตามต้องการ

นายชนะชัย คะณะวาปี

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ระบบควบคุม	3
2.2 การหาผลตอบสนองของระบบ	5
2.3 คุณสมบัติของตัวควบคุม	6
2.4 การออกแบบตัวควบคุม	7
2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	16
2.6 พารามิเตอร์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	18
2.7 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	21
2.8 การวิเคราะห์ระบบมอเตอร์ไฟตรง	22
2.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์	26
2.10 การทดสอบระบบควบคุมจากผลตอบสนองของระบบ	27
2.11 ระบบควบคุมแบบ Feed Forward	27
2.12 SCR	28
2.13 คุณลักษณะของ SCR และ การใช้งาน	30
2.14 วัดความเร็วรอบมอเตอร์	34

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 โครงงานที่นำเสนอ	36
3.1 บล็อกไดอะแกรมรวมของโครงงานที่นำเสนอ	36
3.2 ตัวควบคุม PI	37
3.3 วงจรเอซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์	40
3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	42
3.5 การออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์โดยใช้วิธีการ Simulink	47
3.6 วงจรแปลงความถี่	48
บทที่ 4 การทดลองและผล	50
4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	50
4.2 การทดสอบ	53
4.3 ผลการทดสอบ	59
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลของโครงงาน	65
5.2 ปัญหาที่พบในการทำโครงงาน	65
5.3 วิธีแก้ไขและข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	66
ประวัติผู้เขียน	70

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบป้อนกลับ 3
รูปที่ 2.2 การต่อระบบควบคุมป้อนกลับเมื่อ H(s) = 1 4
รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย 5
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วน 8
รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบสัดส่วน 8
รูปที่ 2.6 วงจรตัวควบคุมแบบสัดส่วน 8
รูปที่ 2.7 วงจรตัวควบคุมแบบไอ 10
รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบไอ 10
รูปที่ 2.9 ภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ 11
รูปที่ 2.10 วงจรแบบอนุพันธ์ 11
รูปที่ 2.11 ก. ภาพบล็อกของแบบสัดส่วนร่วมกันแบบไอ 12
รูปที่ 2.12 วงจรแบบสัดส่วนร่วมกันแบบไอ 12
รูปที่ 2.13 ภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอนุพันธ์ 12
รูปที่ 2.14 วงจรแบบสัดส่วนรวมกันแบบอนุพันธ์ 13
รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมแบบสัดส่วนร่วมกับบูรณการและอนุพันธ์ 14
รูปที่ 2.16 วงจรตัวควบคุม พีไอดี (PID-Controller) 14
รูปที่ 2.17 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบลูปปิด (Transfer Function of PID) 14
รูปที่ 2.18 ผลการตอบสนองของแพลนจากการป้อนอินพุต ยูนิต สเต็ป 15
รูปที่ 2.19 กฎการปรับของ ซิงเกิล-นิโคล พื้นฐานบน Step Response ของ Plant (อันดับหนึ่ง) 16
รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 16
รูปที่ 2.21 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย 19
รูปที่ 2.22 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 22
รูปที่ 2.23 วงจรของมอเตอร์ไฟตรง (DC Motor Circuit) 23
รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมของระบบมอเตอร์ไฟตรง 24
รูปที่ 2.25 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิด 25
รูปที่ 2.26 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นกับวงจรChopper และวงจร PID (โดยค่า K คือค่าอัตราการขยายวิกฤต) 25
รูปที่ 2.27 ระบบงาน (Plant) ในโปรแกรม Simulink 27
รูปที่ 2.28 รูปแบบการควบคุมแบบ Feed Forward 28

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.29 แบบจำลองสำหรับหาผลตอบสนองในระบบควบคุมแบบ Feed Forward 28
รูปที่ 2.30 โครงสร้าง สัญลักษณ์และวงจรสมมูลย์ของ SCR 29
รูปที่ 2.31 วงจรการทดสอบคุณลักษณะและกราฟคุณลักษณะของ SCR 30
รูปที่ 2.32 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นใช้ SCR และรูปคลื่นอินพุตเอาต์พุตที่มุมจุดชนวน 31
รูปที่ 2.33 วงจรเรียงกระแสแบบเต็ม คลื่นของ SCR ที่ใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง 32
รูปที่ 2.34 รูปคลื่นสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง 32
รูปที่ 2.35 วงจรเรียงกระแสเต็ม คลื่นแบบบริดจ์ใช้ SCR 33
รูปที่ 2.36 รูปคลื่นสัญญาณวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ 33
รูปที่ 2.37 TACHOMETER 34
รูปที่ 2.38 มาตรวัดรอบ (TACHO METER) RPM 34
รูปที่ 3.1 โครงงานที่นำเสนอ 36
รูปที่ 3.2 ตัวควบคุมพีไอที่ใช้ 37
รูปที่ 3.3 วงจรตัวควบคุมแบบ P 38
รูปที่ 3.4 ตัวควบคุมแบบ PI 39
รูปที่ 3.5 วงจร AC/DC Rectifier แบบเฟสเดี่ยวรูปคลื่น 40
รูปที่ 3.5 วงจร ZOH 41
รูปที่ 3.7 วงจรทดสอบความต้านทานอาร์เมเจอร์ 43
รูปที่ 3.8 วงจรทดสอบหาค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์ 44
รูปที่ 3.9 วงจรทดสอบหาค่าคงที่เวลาของมอเตอร์ 46
รูปที่ 3.10 Wave from Diagram ของการทดสอบแบบรันดาวน์ 47
รูปที่ 3.11 การสร้างแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม Simulink (P Control) 48
รูปที่ 3.12 การสร้างแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม Simulink (PI Control) 48
รูปที่ 3.13 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน 49
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 50
รูปที่ 4.2 เครื่องคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค 51
รูปที่ 4.3 ตัวควบคุมพีไอ 51
รูปที่ 4.4 มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 52
รูปที่ 4.5 Electric Generator 52
รูปที่ 4.6 สโคป 53

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ด้วยพีไอ 54
รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมลูปเปิด 54
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมกรณีพีอย่างเดียว 55
รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมกรณีไออย่างเดียว 56
รูปที่ 4.11 บล็อกไดอะแกรมกรณีพีไอ 57
รูปที่ 4.12 บล็อกไดอะแกรมของลูปปิด 58
รูปที่4.13 วงจรที่ใช้ในการทดลอง 69
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบตัวควบคุมพี 62
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอ 64

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของระบบควบคุม 6
ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์จากเอกสารข้อมูล 19
ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ ที่ใช้เทียบเคียง 20
ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย 21
ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของบล็อกต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์ สามารถหาได้จากไลบารี่ 26
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแบบลูปเปิด 59
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบพี 59
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบพีไอ 60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงงาน

ระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่ ระบบควบคุมแบบเปิด และระบบควบคุมแบบปิด โดยที่ระบบควบคุมแบบเปิดนั้น เอาต์พุตที่ได้จะไม่สามารถควบคุมได้ ส่วนระบบควบคุมแบบปิดนั้นเอาต์พุตที่ได้จะป้อนกลับมายังอินพุตหรือสัญญาณกระตุ้นเพื่อควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และให้ค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่เป็นได้ ในการออกแบบระบบนั้นเริ่มด้วยการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ จากนั้นออกแบบระบบโดยแบบจำลอง และ นำไปทดสอบจริง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้งานอุตสาหกรรม เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมความเร็วได้ง่าย [1] ในตัวควบคุมที่นิยมใช้กันมากคือตัวควบคุมแบบสัดส่วน – ปริพันธ์ (Proportional – Integral ; PI) [2] ซึ่งถือว่าเป็นตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสม การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องเข้าใจให้ถ่องแท้

โครงงานนี้จึงได้นำเสนอระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยการวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบ แล้วใช้การจำลองแบบโดยโปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์และนำไปทดสอบจริงโดยทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานของระบบทั้งหมด

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมทั้งหมด

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอและผลตอบสนองของระบบ

1.2 ขอบเขตความสามารถของโครงงาน

1.3.1 ใช้ตัวควบคุมพีไอที่เป็นระบบอนาลอกต่อแบบผสมประกอบด้วย ออปแอมป์ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

1.3.2 ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก พิกัด 1.1 kW, 3,000 rpm และแทคโคเจนเนอเรเตอร์ พิกัด 0.75 kW, 2,850 rpm

1.3.3 ใช้ตัววัดความเร็วรอบโดยใช้แสง วงจรเอซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

1.3.4 โปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์จำลองการควบคุมแบบเปิดและระบบควบคุมแบบปิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

1.4.1 เกิดความรู้ความเข้าใจในการวิเคราะห์ระบบควบคุม

1.4.2 สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม

1.4.3 นำข้อดีของตัวควบคุมมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์และระบบอื่นได้

มหาวิทยาลัยสยาม
SIAM UNIVERSITY

บทที่ 2

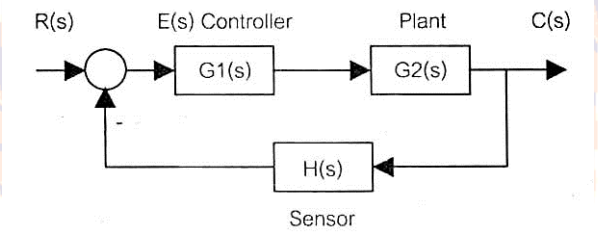
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ระบบควบคุม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น คุณลักษณะของ SCR และ การใช้งาน และการวัดความเร็วรอบมอเตอร์ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control System) โดยทั่วไปจะมีการต่อระบบควบคุมดังแสดงตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. ชุดควบคุม (Controller) ใช้ G1(s) แทนสมการของระบบ
2. ระบบงาน (Plant) ใช้ G2(s) แทนสมการของระบบ
3. ชุดตรวจจับ (Sensor) ใช้ H(s) แทนสมการของระบบ



รูปที่ 0.1 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

จากรูปที่ 2.1 เป็นการต่อระบบโดยนำชุดควบคุมมาต่อแบบอนุกรมกับระบบงาน โดยมีสัญญาณ R(s) เป็นอินพุตของระบบ และมีสัญญาณ C(s) เป็นเอาต์พุตของระบบ สัญญาณอินพุตจะถูกป้อนเข้าชุดควบคุมเพื่อส่งสัญญาณไปทำการควบคุมระบบงาน และชุดตรวจจับจะรับสัญญาณเอาต์พุตจากระบบงานมาทำการปรับอัตราการขยาย เพื่อนำไปหักล้างกับสัญญาณอินพุต สำหรับควบคุมให้ระบบงานมีการทำงานได้อย่างต่อเนื่องและคงที่ต่อไป

การวิเคราะห์สมการเพื่อหาฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของระบบ สามารถหาได้ ดังนี้

จากบล็อกไดอะแกรม เมื่อนำบล็อก G1(s) มาต่ออนุกรมกับบล็อก G2(s) จะเป็นการนำค่าอัตราการขยายของทั้งสองบล็อกคูณกัน เขียนสมการ ได้เป็น

$$G(s)=G1(s).G2(s)$$

เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุต C(s) เท่ากับอัตราการขยายของระบบ คูณด้วยอินพุต ดังนั้นจะได้

$$C(s)=G(s).E(s)$$

เมื่อ $E(s)=R(s)-H(s).C(s)$

จะได้

$$C(s)=G(s).\left[R(s)-H(s).C(s)\right]$$

$$C(s)=G(s).R(s)-G(s).H(s).C(s)$$

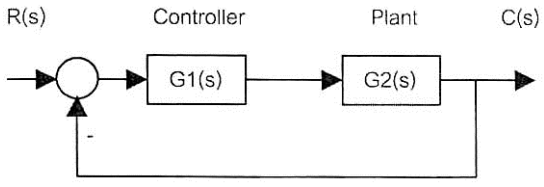
$$C(s)+G(s).H(s).C(s)=G(s).R(s)$$

$$C(s)\left[1+G(s).H(s)\right]=G(s).R(s)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{\left[1+G(s).H(s)\right]} \qquad (2.1)$$

สมการที่ (2.1) เรียกว่า สมการฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ของระบบ ซึ่งเป็นการส่งผ่านสัญญาณจากอินพุตของระบบไปสู่เอาต์พุตของระบบ เมื่อทำการกำหนดให้ชุดตรวจจับ H(s) มีค่าอัตราการขยายเป็น 1 (Unity Feedback) จากผังไดอะแกรมในรูปที่ 2.1 สามารถเขียนใหม่ ได้ดังรูปที่ 2.2 และสามารถเขียนสมการฟังก์ชันโอนย้ายได้ใหม่ ดังสมการที่ (2.2)

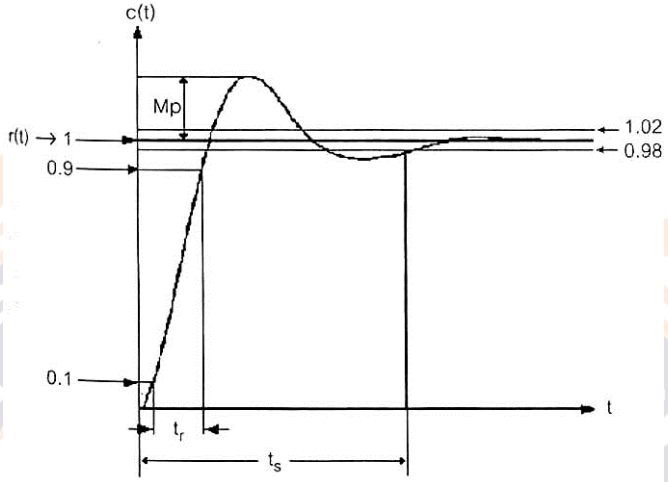
$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)}=\frac{G1(s).G2(s)}{\left[1+G1(s).G2(s)\right]} \qquad (2.2)$$



รูปที่ 0.2 การต่อระบบควบคุมป้อนกลับเมื่อ H(s) = 1

2.2 การหาผลตอบสนองของระบบ

ในระบบควบคุมทั่วไป สามารถหาผลตอบสนองของระบบได้โดยป้อนสัญญาณอินพุต r(t) ที่เป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit Step Function) และพิจารณาผลของสัญญาณเอาต์พุต c(t) ที่ได้ ซึ่งลักษณะทั่วไปของผลตอบสนองของระบบ (Unit Step Response) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 0.3 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

การพิจารณาถึงคุณสมบัติของผลตอบสนอง สามารถพิจารณาได้จากช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งค่าของช่วงเวลาต่าง ๆ ที่นิยมนำไปออกแบบหรือนำไปพิจารณาถึงคุณภาพของระบบ มีดังนี้

1. Rise Time (t_r) คือ ช่วงเวลาที่ระบบทำงานในช่วงเริ่มต้น โดยคิดที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 90 % (0.1 – 0.9 V) ถ้า Rise Time มีค่าน้อยจะแสดงว่าระบบทำงานได้เร็วในช่วงแรก

2. Setting Time (t_s) คือ ช่วงเวลาก่อนที่สัญญาณจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) ปกติจะวัดจากระดับ ±2 % ถึง ±5 % ของค่า Steady State จากรูปที่ 2.3 เมื่อค่า Steady State มีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต คือ 1 ดังนั้นเมื่อทำการวัดที่ระดับ ±2 % จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ระดับ 0.98 – 1.02 V ถ้าค่า Setting Time มีค่าน้อย แสดงว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะทำงานคงที่เร็วขึ้น

3. Steady State Error (e_{ss}) เป็นค่าความผิดพลาดจากผลต่างระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$e_{ss} = r(t)-c(t) \qquad (2.3)$$

เมื่อ $r(t)$ คือ แรงดันอินพุต

$c(t)$ คือ แรงดันเอาต์พุต

4. Maximum Overshoot (Mp) เป็นค่าของผลตอบสนองที่แกว่งขึ้นสูงกว่าระดับอินพุตในช่วงเริ่มทำงาน ถ้าค่า Mp มีค่ามาก จะทำให้ระบบทำงานแกว่งหรือกระเพื่อม และจะส่งผลให้ช่วงเวลา Setting Time นานขึ้น แต่ค่า Mp ที่มีค่ามาก ก็จะส่งผลดี คือ จะทำให้ระดับของ Steady State Error ลดลงได้

2.3 คุณสมบัติของตัวควบคุม

ระบบควบคุมโดยทั่วไป สามารถแบ่งคุณสมบัติของระบบได้เป็น 4 แบบ สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

1. ระบบควบคุมแบบ P (P Controller) จะมีคุณสมบัติลดค่า Rise Time (t_r) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้น ในช่วงแรกเพิ่ม Over Shoot (Mp) ทำให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มต้น แต่ส่งผลให้ค่า Steady State Error ลดลง

2. ระบบควบคุมแบบ PD (PD Controller) จะมีคุณสมบัติลด Over Shoot (Mp) ทำให้ระบบมีการแกว่งน้อยลงในช่วงเริ่มต้นลด Setting Time (t_s) ทำให้ระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady State) เร็วขึ้น

3. ระบบควบคุมแบบ PI (PI Controller) จะมีคุณสมบัติลดค่า Rise Time (t_r) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรกกำจัดค่า Steady State Error (e_{ss}) เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตเทียบเท่ากับค่าอินพุต

4. ระบบควบคุมแบบ PID (PID Controller) เป็นการนำคุณสมบัติของระบบควบคุมทั้ง 3 แบบ คือ P, PD และ PI มารวมกัน โดยสามารถกำหนดค่าอัตราการขยายทั้ง 3 แบบ คือ P, I และ D ได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถออกแบบระบบควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ โดยทำการปรับค่าอัตราการขยายทั้ง 3 แบบ และนำมาพิจารณาผลตอบสนองที่ได้ เมื่อปรับค่าอัตราการขยายจนได้ผลตอบสนองตามต้องการแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปติดตั้งหรือออกแบบเป็นวงจรให้งานต่อไป

ตารางที่ 0.1 คุณสมบัติของระบบควบคุม

ระบบควบคุม	Rise Time (t_s)	Maximum Overshoot (Mp)	Setting Time (t_s)	Steady State Error (e_{ss})
แบบ P	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงน้อย	ลด
แบบ I	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	กำจัด
แบบ D	เปลี่ยนแปลงน้อย	ลด	ลด	เปลี่ยนแปลงน้อย

เขียนฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function: T(s)) ของระบบควบคุมแบบ PID ได้ดังนี้

$$T(s)= K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \qquad (2.4)$$

เมื่อ K_P ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P

K_I ค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบ I

K_D ค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนชิเอท สัญญาณของตัวควบคุมแบบ D

2.4 การออกแบบตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นตัวควบคุมอัตโนมัติที่มีหน้าที่นำสัญญาณจากทางออก(Output) ของระบบมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณทางเข้า(Input) ของระบบผลของการเปรียบเทียบที่ได้จะมีค่าเบี่ยงเบนหรือค่าผิดพลาด (Error) หลังจากนั้นตัวควบคุมอัตโนมัติก็จะนำเอาสัญญาณผิดพลาดนี้ไปสร้างสัญญาณใหม่ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมระบบให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการนั่นย่อมหมายถึงค่าผิดพลาดของสัญญาณได้ลดลงจนเป็นศูนย์หรือน้อยที่สุดแล้วนั้นเองซึ่งสามารถแบ่งตัวควบคุมอัตโนมัตินี้ได้ตามชนิดของสัญญาณดังนี้

1. ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P-Controller)
2. ตัวควบคุมแบบบูรณการ (I- Controller)
3. ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D - Controller)
4. ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบบูรณการ (PI-Controller)
5. ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบอนุพันธ์ (PD-Controller)
6. ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบบูรณการอนุพันธ์ (PID-Controller)

2.4.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P-Controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P-Controller) นี้เป็นตัวควบคุมที่ไม่มีการหน่วงระหว่างสัญญาณทางเข้า กับสัญญาณทางออกแต่สัญญาณทางออกจะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณทางเข้าอัตราขยายเป็นพารามิเตอร์ที่ทาให้ขนาดของสัญญาณทางเข้าและสัญญาณทางออกเกิดความแตกต่างกันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v_{out}(t) = K_P v_{in}(t) \qquad (2.5)$$

เมื่อ

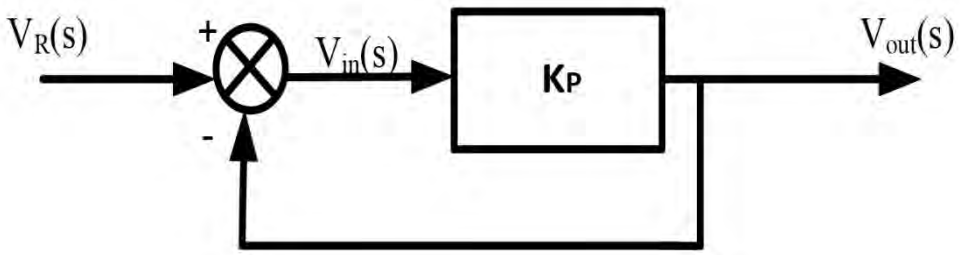
$v_{out}(t)$ คือสัญญาณทางออกของตัวควบคุม

$v_{in}(t)$ คือสัญญาณผิดพ ลาดที่เกิดขึ้นหรือสัญญาณทางเข้า

K_P คือความไวของสัดส่วนหรืออัตราการขยาย

เขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ได้

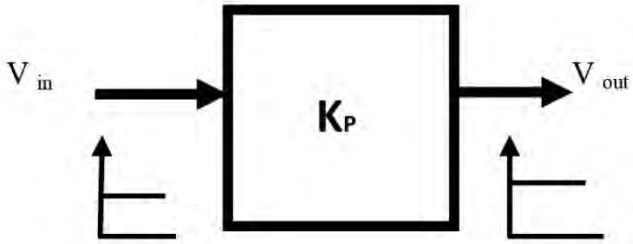
$$F(s)=\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}=K_P \tag{2.6}$$



รูปที่ 0.4 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

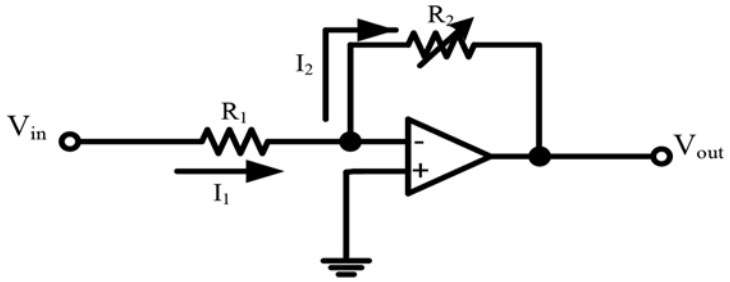
เมื่อ $V_R(s)$ เป็นสัญญาณอ้างอิง

หรือเขียนแสดงในภาพของผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได (Step Response)



รูปที่ 0.5 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วนดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 0.6 วงจรตัวควบคุมแบบสัดส่วน

จากภาพสามารถปรับ K_P ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนได้โดยการปรับที่ตัวต้านทาน R_1 และหรือ R_2 ก็ได้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนนี้ ได้สัญญาณทางออกเป็นสัดส่วนกับสัญญาณทางเข้า และตอบสนองได้เร็ว นั่นคือไม่มีการหน่วงเวลานั่นเอง

2.4.2 ตัวควบคุมแบบไอ (I- Controller)

ตัวควบคุมแบบบูรณการ เป็นตัวควบคุมที่ให้สัญญาณทางออกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณผิดพลาด หรือสัญญาณทางเข้าซึ่งสัญญาณทางออกที่ออกจากตัวควบคุมก็คือพื้นที่ของสัญญาณผิดพลาดหรือสัญญาณทางเข้านั้นเอง เขียนสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$v_{out}(t) = K_I \int v_{in}(t)dt$$

$$v_{out}(t) = \frac{1}{T_I} \int v_{in}(t)dt \qquad (2.7)$$

เมื่อ K_I และ T_I เป็นอัตราการขยาย และค่าคงตัวทางเวลาของการควบคุมแบบไอตามลำดับ จากสมการ (2.7) เขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนได้

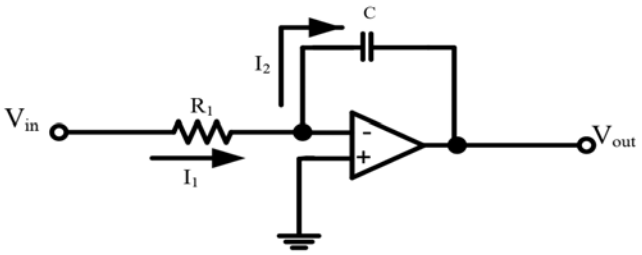
$$F(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_I}{s} = \frac{1}{T_I s} \qquad (2.8)$$

วงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบไอ แสดงดังรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยออปแอมป์ ตัวต้านทานและตัวเก็ปประจุ ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตดังสมการที่ (2.9)

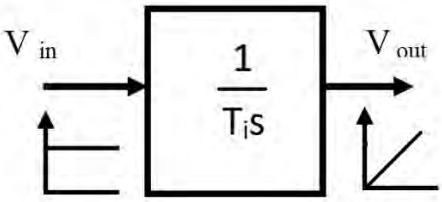
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{R_1 C s} \qquad (2.9)$$

เมื่อ $T_I = R_1 C$

เขียนแทนด้วยบล็อกและตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได ได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 0.7 วงจรตัวควบคุมแบบไอ



รูปที่ 0.8 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบไอ

การควบคุมแบบไอนี้ จะทำให้ระบบมีความแม่นยำซึ่งก็หมายถึงสัญญาณทางออกที่ออกจากตัวควบคุม จะติดตามสัญญาณทางเข้าได้ตลอดเวลา

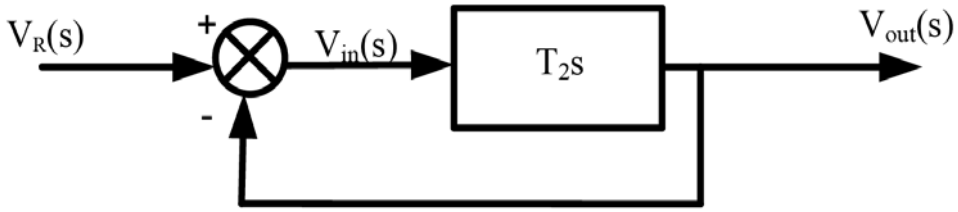
2.4.3 การกระทำแบบดี (D - Action)

การกระทำแบบดีจะเป็นตัวควบคุมที่ให้สัญญาณทางออกเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

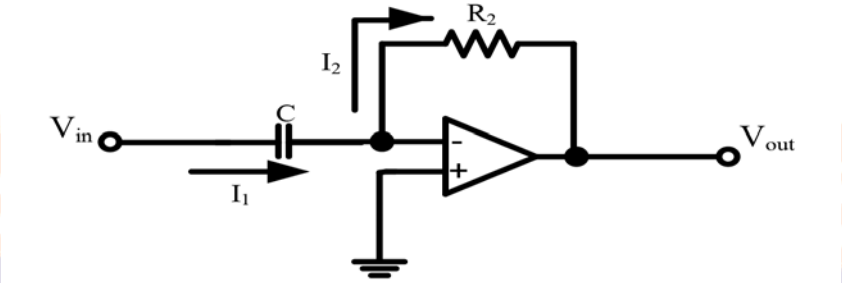
$$V_{out}(t) = T_2 \frac{d}{dt} V_{in}(t) \qquad (2.10)$$

เมื่อ T_2 คือ Derivative time จากสมการดังกล่าวว่ามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนได้

$$F(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = T_2 s \qquad (2.11)$$



รูปที่ 0.9 ภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์



รูปที่ 0.10 วงจรแบบอนุพันธ์

2.4.4 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบไอ (PI-Controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการนี้เป็นการนำเอาคุณสมบัติของตัวควบคุมทั้งสองมารวมกัน ดังนั้นสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมชนิดนี้คือ

$$V_{out}(t) = G_P.\left(V_{in}(t) + \frac{1}{T_1}\int V_{in}\,dt\right)$$

แปลงลาปลาซ

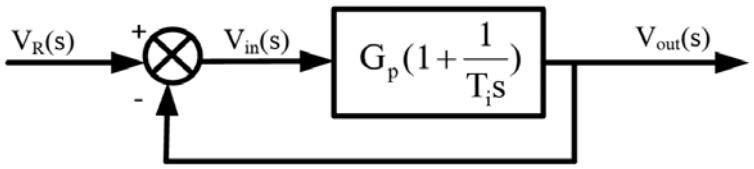
$$V_{out}(s) = G_p.\left(V_{in}(s) + \frac{1}{T_1 s}V_{in}(s)\right)$$

$$= G_p.\left(1+\frac{1}{T_1 G_P}\right) V_{in}(s)$$

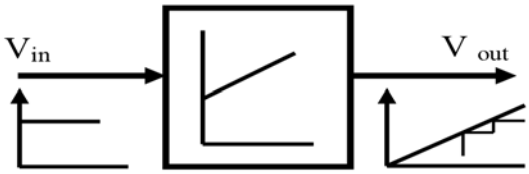
$$F(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = G_P\left(1+\frac{1}{T_1 s}\right) \qquad (2.12)$$

เมื่อให้ $T_i = T_1 G_P$

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน จะพบว่าค่าของ G_p และ T_i สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ หน่วยการปรับค่า T_i จะมีผลต่อตัวควบคุมแบบไอแต่ถ้าปรับความไวของสัดส่วน G_P จะมีผลทั้งหมด สามารถนำฟังก์ชันถ่ายโอนตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบบูรณาการแสดงดังรูปที่ 2.11 และวงจรแสดงดังรูปที่ 2.12



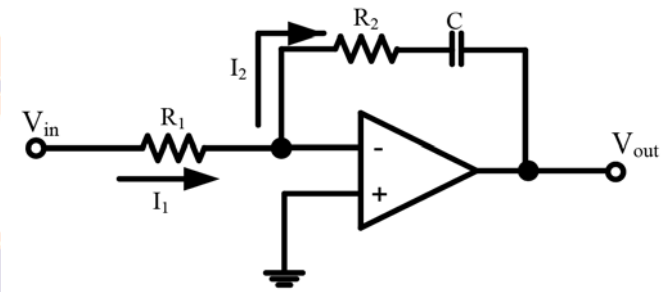
(ก)



(ข)

รูปที่ 0.11 ก. ภาพบล็อกของแบบสัดส่วนร่วมกันแบบไอ

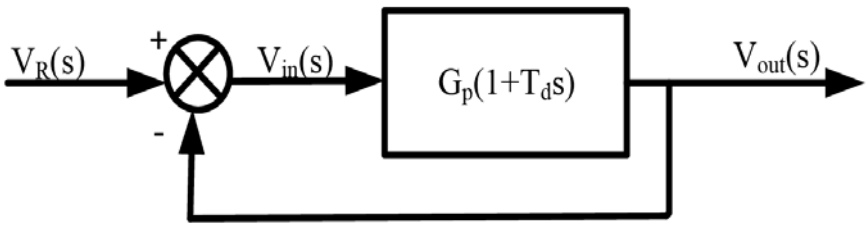
ข. ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบไอ



รูปที่ 0.12 วงจรแบบสัดส่วนร่วมกันแบบไอ

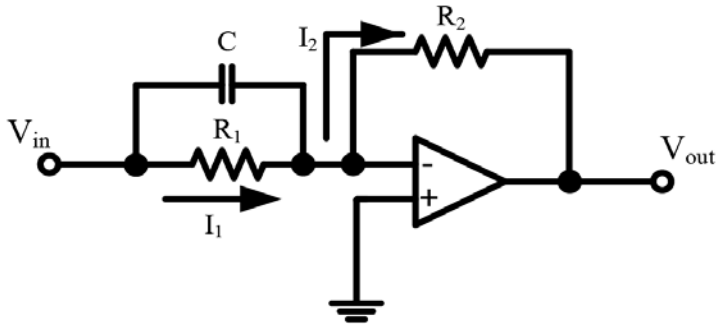
2.4.5 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบอนุพันธ์ (PD-Controller)

ตัวควบคุมแบบนี้เป็นการนำเอาคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบสัดส่วนกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ มารวมกันดังนั้นสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมชนิดนี้คือ



รูปที่ 0.13 ภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอนุพันธ์

ในการควบคุมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Proportional Rate Controller เมื่อพิจารณารูปที่ 2.13 สามารถสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาทำหน้าที่ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 0.14 วงจรแบบสัดส่วนรวมกันแบบอนุพันธ์

2.4.6 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบบูรณการและอนุพันธ์ (PID-Controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกันแบบบูรณาการและอนุพันธ์นี้เป็นการรวมเอาคุณสมบัติของตัวควบคุมทั้งสามแบบมารวมกันดังนั้นสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมชนิดนี้ก็คือ

$$V_{out}(t)=G_p.V_{in}(t)+\frac{1}{T_1}V_{in}(t)+T_2\frac{d}{dt}V_{in}(t) \qquad (2.13)$$

เปลี่ยนเป็นสมการ Laplace's Transforms ได้ดังนี้

$$V_{out}(s)=G_P\,V_{in}(s)+\frac{1}{T_1(s)}\,V_{in}(s)+T_2sV_{in}(s) \qquad (2.14)$$

$$V_{out}(s)=G_P\,V_{in}(s)\left(1+\frac{1}{T_1sG_P}+\frac{T_2s}{G_P}\right)$$

เมื่อให้ $T_d=\frac{T_2}{G_P}$

เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้

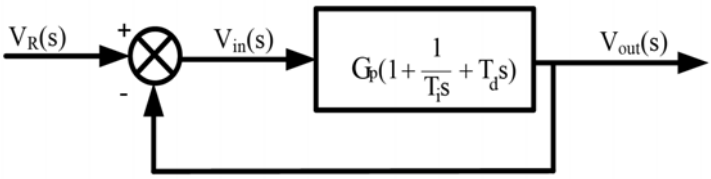
$$F(s)=\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \qquad (2.15)$$

$$=G_P\left(1+\frac{1}{T_1s}+T_ds\right) \qquad (2.16)$$

เมื่อ G_p = Proportional Gain

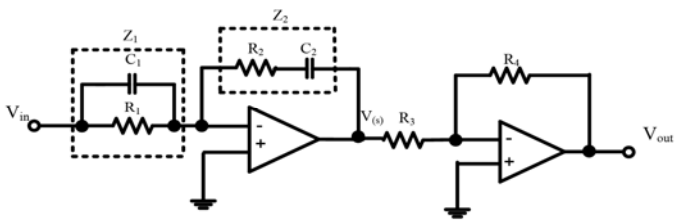
T_i = Integral Time

T_d = Derivative Time



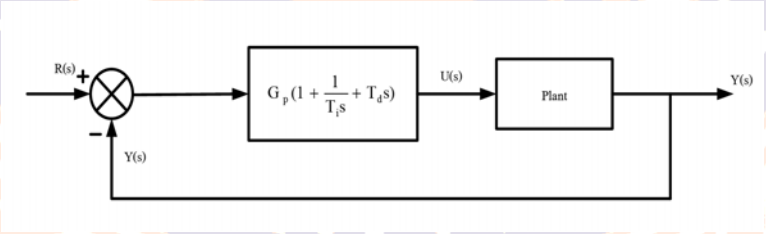
รูปที่ 0.15 บล็อกไดอะแกรมแบบสัดส่วนร่วมกับบูรณการและอนุพันธ์

เมื่อพิจารณาจากภาพ สามารถสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาทำหน้าที่ได้ดังนี้



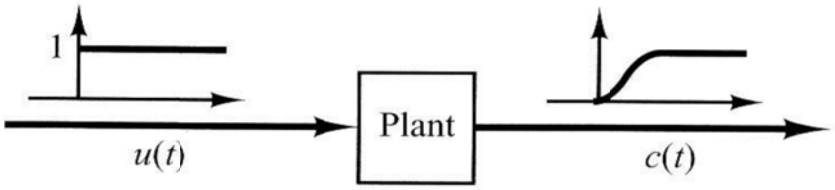
รูปที่ 0.16 วงจรตัวควบคุม พีไอดี (PID-Controller)

2.4.7 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ ของตัวควบคุม PID โดยใน Ziegler – Nichols Tuning Rule

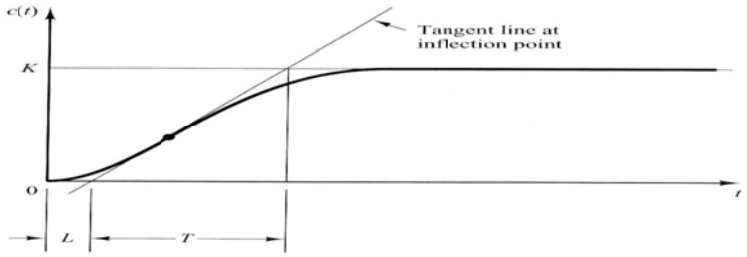


รูปที่ 0.17 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบลูปปิด (Transfer Function of PID)

จากรูปที่ 2.17 เป็นการแสดงลูปปิดของระบบ (Plant) ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม PID เพื่อจะนำไปหาค่า T และ L



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 0.18 ก.ผลการตอบสนองของแพลนจากการป้อนอินพุต ยูนิต สเต็ป

ข.กราฟการตอบสนองรูปเอส.และช่วงเวลาค่า T และ L

จากรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นการหาค่า T และ L จากการตอบสนอง Open loop ของระบบ และนำค่า T และ L ไปหาค่า K_p, T_i, T_d

Ziegler–Nichols Tuning Rule Based on Step Response of Plant (First Method)

Type of Controller	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

(ก)

Type of Controller	K_p	K_i	K_d
P	$0.50K_{cr}$	-	-
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1.2K_{cr}}{P_{cr}}$	-
PID	$0.6K_{cr}$	$\frac{2K_{cr}}{P_{cr}}$	$\frac{K_{cr}P_{cr}}{8}$

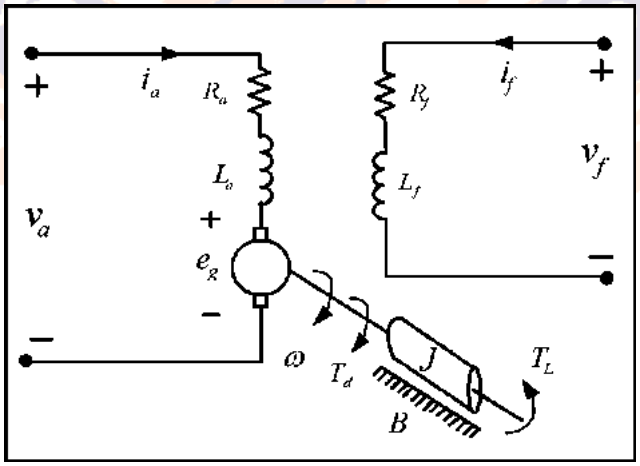
(ข)

รูปที่ 0.19 ก. กฎการปรับของ ซิงเกิล-นิโคล พื้นฐานบน Step Response ของ Plant (อันดับหนึ่ง)

ข. แสดงการหาค่า K_p, K_i, K_d จากวิธี ซิงเกิล-นิโคล แบบที่ 2

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถหาได้จากสมการพื้นฐานของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (Chapman, 1999) โดยจะ พิจารณาจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรอาร์เมเจอร์ (armature circuit) และ วงจรสนาม (field circuit) ที่แยกอิสระจากกันดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 0.20 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.20 อธิบายความหมายของพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลได้ดังนี้

V_a คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ (V)

V_f คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรสนาม (V)

i_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

i_f คือ กระแสสนาม (A)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)

L_f คือ ความเหนี่ยวนาทางด้านสนาม (H)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

R_f คือ ความต้านทานสนาม (Ω)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ ($km \cdot m^2$)

B คือ ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด ($N \cdot m \cdot s / rad$)

e_g คือ แรงดันย้อนกลับ (V)

T_l คือ แรงบิดของโหลด ($N \cdot m$)

T_d คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ($N \cdot m$)

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ในรูปที่ 2.20 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ได้ดังสมการที่ (2.17)

$$va = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \qquad (2.17)$$

พิจารณากรณีกระแสสนามมีค่าคงที่ และเมื่อ $e_g = k_e \omega$ ดังนั้น สมการของแรงดันทางด้าน วงจรอาร์เมเจอร์ จะได้ดังสมการที่ (2.18) เมื่อ k_e คือ ค่าคงที่ของแรงดันยอ้นกลับ และเมื่อพิจารณาสมการการหมุนของมอเตอร์ จะได้ ดังสมการที่ (2.19)

$$va = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_e \omega \qquad (2.18)$$

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \qquad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) เมื่อกระแสสนามมีค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อแทนค่า ในสมการที่ (2.19) จะได้ดังสมการที่ (2.20) ดังนี้

$$k_t i_a = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \qquad (2.20)$$

เมื่อ k_t คือค่าคงที่ของแรงบิดและโดยส่วนใหญ่แล้วจะกำหนดให้ $k^e = k_t = k(N \cdot m / A)$

จากสมการที่ (2.17) และ (2.18) เมื่อจัดรูปสมการใหม่และเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสถานะ (state equation) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-k}{L_a} \\ \frac{k}{J} & \frac{-B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ T_L \end{bmatrix}$$

2.6 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบค่าพารามิเตอร์ ของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมดัง กล่าว และเนื่องจากทางบริษัทผู้ผลิตให้ข้อมูลของค่าพารามิเตอร์มาแค่บางค่าเท่านั้นด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ ตามแนวทางดังต่อไปนี้

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แนวทางดังนี้

แนวทางที่ 1 การหาค่าพารามิเตอร์ จากเอกสารข้อมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ที่ใช้ในการวิจัยมีลักษณะตามรูปที่ 2.21 ซึ่งทางผู้ผลิตจะมีเอกสารข้อมูลของมอเตอร์ แนบมาด้วย แสดงได้ตามตารางที่ 2.2

รูปที่ 0.21 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 0.2 ค่าพารามิเตอร์จากเอกสารข้อมูล

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
พิกัดความเร็ว	3000	rpm
แรงดันอาร์เมเจอร์ (v_a)	220	V
กระแสอาร์เมเจอร (i_a)	6.5	A

แนวทางที่ 2 การหาค่าพารามิเตอร์จากการวัดค่า

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเอกสารข้อมูลไม่เพียงพอจึงต้องหาค่าพารามิเตอร์จากการวัดค่าและหาค่าเฉลี่ย โดยใช้อุปกรณ์ทางการวัดคือ ดิจิตอลมลัติมิเตอร์ และ RLC มิเตอร์ซึ่งได้ทำการวัดจากมอเตอร์ในรูปที่ 2.21 และทำการวัดค่าจานวน 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

แนวทางที่ 3 การหาค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

การหาค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณจะใช้วิธีการเทียบเคียงทั้งนี้ เนื่องจากพารามิเตอร์บางตัวมีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณ ยกตัวอย่างเช่น การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J) จำเป็นต้องทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ และน้ำหนักของโรเตอร์ ในการคำนวณซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถถอดตัวโรเตอร์ออกมาวัด และชั่งน้ำหนักได้เนื่องจากไม่มีความชำนาญในการประกอบตัวมอเตอร์ ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ เกิดความเสียหายได้ เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าว จึงได้ใช้การคำนวณโดยการเทียบเคียงกับมอเตอร์อีกพิกัดหนึ่ง ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิดเดียวกัน และมีลักษณะการใช้งานเหมือนกัน แต่มี

พิกัดมากกว่าใช้เป็นตัวเทียบเคียง(Kuhn, Komperda and Leuschke, 2010) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ ตามตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 0.3 พารามิเตอร์ ที่ใช้เทียบเคียง

พารามิเตอร์	หน่วย
แรงดันอาร์เมเจอร์ (v_a)	V
แรงดันสนาม (v_f)	V
ค่าความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์ (R_a)	Ω
ค่าความต้านทานของวงจรสนาม (R_f)	Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรอาร์เมเจอร (L_a)	mH
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรสนาม (L_f)	H
ค่าคงที่ของมอเตอร์ (k)	$N \cdot n / A$
ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B)	$N \cdot m \cdot s / rad$
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J)	$kg \cdot m^2$

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โดยการเทียบเคียง จะคำนวณเทียบเคียงจากค่าพิกัดกำลังงานของมอเตอร์ทั้งสองซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาด้วยวิธีนี้ คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์ (k)ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J) สามารถแสดงการคานวณหาค่า พารามิเตอร์ได้ดังนี้

เมื่อ k_u เป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

k_c เป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ ที่ใช้เทียบเคียง

P_u เป็นพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

P_c เป็นพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้เทียบเคียง

B_u ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืดที่ใช้ในงานวิจัย

B_c เป็นค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืดที่ใช้เทียบเคียง

J_u เป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

J_c เป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ที่ใช้ทียบเคียง

การคำนวณหาค่าคงที่ของมอเตอร์

การคานวณหาค่า k สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.21)

$$k_u = \frac{P_u}{P_c} \times k_c \qquad (2.21)$$

การคำนวณหาค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด (B)

การคำนวณหาค่า B สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.22)

$$Bu = \frac{P_u}{P_c} \times B_c \qquad (2.22)$$

การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ (J)

การคานวณหาค่า J สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.23)

$$J_u = \frac{P_u}{P_c} \times J_c \qquad (2.23)$$

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยทั้งการหาค่าจากเอกสารข้อมูล การวัดค่า และการคำนวณเทียบเคียงสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 0.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
พิกัดความเร็ว	3000	rpm
แรงดันอาร์เมเจอร์ (v_a)	220	V
กระแสอาร์เมเจอร์ (i_a)	6.5	A
ค่าความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์ (R_a)	3.10	Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรอาร์เมเจอร์ (L_a)	7.897×10-4	mH

2.7 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การออกแบบตัวควบคุมพีไอ จำเป็นต้องทราบบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณา เพื่อนำไปสู่การหาฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งการหาบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง (Rashid, 2004) จะพิจารณาจากสมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการที่ (2.18) และ (2.20) โดยทำการแปลงสมการที่ (2.18) และ (2.20) ให้อยู่ในรูป

โดเมนเอสโดยใช้การแปลงลาปลาซ พร้อมทั้งพิจารณาค่าเริ่มต้นต่าง ๆ เป็นศูนย์แสดงได้ตามสมการที่ (2.24) และ (2.25) ดังนี้

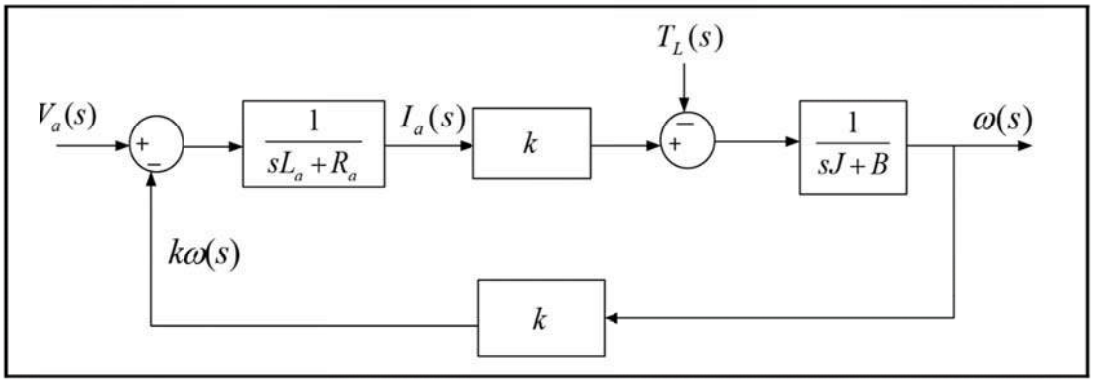
$$v_a(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + k\omega(s) \tag{2.24}$$

$$kI_a(s) = sJ\omega(s) + B\omega(s) + T_L(s) \tag{2.25}$$

จากสมการที่ (2.24) และ (2.25) เมื่อนามาจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปสมการของกระแสอาร์เมเจอร์ และความเร็วเชิงมุมจะได้ดังสมการที่ (2.26) ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - k\omega(s)}{sL_a + R_a} \tag{2.26}$$

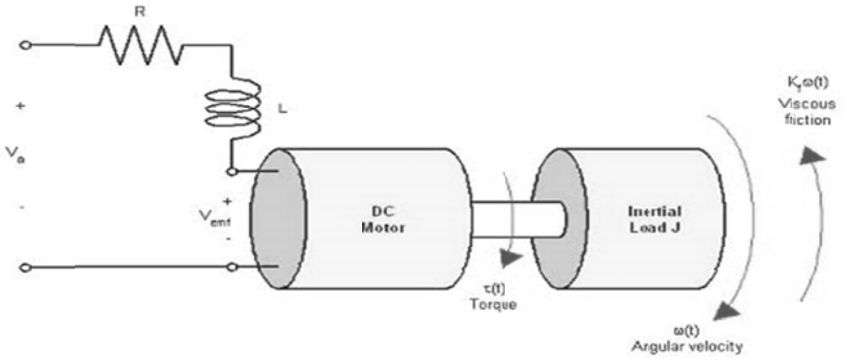
จากความสัมพันธ์ของสมการทางไฟฟ้าในสมการที่ (2.26) สามารถนามาจัดรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์เมเจอร์และความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามแผนภาพบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 0.22 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

2.8 การวิเคราะห์ระบบมอเตอร์ไฟตรง

มอเตอร์ไฟตรง (DC Motor) สามารถเขียนเป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างทั้งทางด้านไฟฟ้าและทางกล ได้ดังรูปที่ 2.23 โดยสามารถแยกโครงสร้างได้ตามสัญลักษณ์ ดังนี้



รูปที่ 0.23 วงจรของมอเตอร์ไฟตรง (DC Motor Circuit)

สมการทางไฟฟ้า (Electric Equation)

$$V_a = Ri + L\frac{di}{dt} + V_{emf} \quad (2.27)$$

สมการทางเครื่องจักรกล (Machine Equation)

$$V_{emf} = K_b\omega \quad (2.28)$$

$$T = K_m i \quad (2.29)$$

สมการทางกล (Mechanical Equation)

$$T = T_d + J\frac{d\omega}{dt} + K_f\omega \quad (2.30)$$

เมื่อ V_a = armature voltage

R = winding resistance

L = winding inductance

T = Induced Torque

T_d = Load Torque

i = armature current

J = Moment of Initia

K_b = Back emf constant

K_m = Torque constant

K_f = mechanical damper

V_{emf} = emf voltage

ทำการแปลงลาปลาซ สมการ (2.27) ถึง (2.30) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

จาก (2.27) $$V_a(s)-V_{emf}(s) = (Ls+R)I(s)$$

จะได้ $$I(s)= \frac{V_a(s)-V_{emf}(s)}{(Ls+R)} \quad (2.31)$$

จาก (2.29) $$T(s) = K_m \times I(s) \quad (2.32)$$

แทน (2.31) ใน (2.32) จะได้

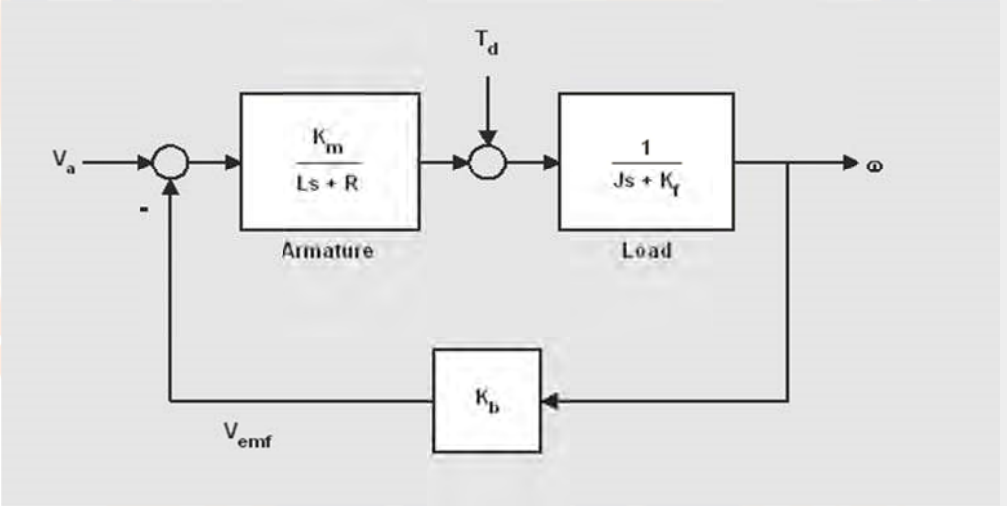
$$T(s) = K_m \times \frac{V_a(s)-V_{emf}(s)}{(Ls+R)} \quad (2.33)$$

จาก (2.30) $$T(s) = T_d(s) + (J.s+K_f)\omega(s)$$

จะได้ $$\omega(s) = \frac{T(s) - T_d(s)}{(J.s+K_f)} \quad (2.34)$$

จาก (2.28) $$V_{emf}(s) = K_b \times \omega(s) \quad (2.35)$$

สามารถแทนระบบในรูปของฟังก์ชันโอนย้าย ได้ดังรูปที่ 2.24



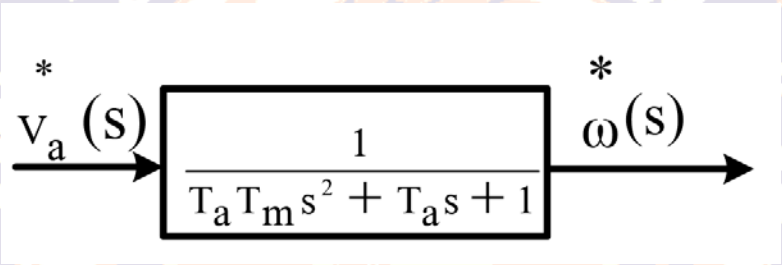
รูปที่ 0.24 ไดอะแกรมของระบบมอเตอร์ไฟตรง

2.8.1 สมการถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิด

$$\mathbf{T(s)} = \frac{\dfrac{1}{(T_a s+1)(T_m s)}}{1+\dfrac{1}{(T_a s+1)(T_m s)}}$$

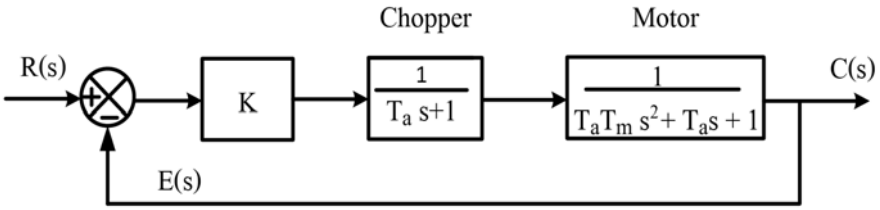
$$\mathbf{T(s)} = \frac{1}{T_a T_m s^2 + T_a s + 1}$$

จากสมการ (2.34) บล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันการถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิดได้ดังภาพที่ 2.8



รูปที่ 0.25 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิด

นำบล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันการถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิดรวมกับบล็อกวงจร Chopper กับค่าอัตราการขยาย จากตัวควบคุม PID ในที่นี้ กำหนดเป็นค่า K ดังภาพที่ 2.9



รูปที่ 0.26 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นกับวงจรChopper และวงจร PID (โดยค่า K คือค่าอัตราการขยายวิกฤต)

2.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ระบบโดยโปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์สามารถสรุปวิธีการเขียนใช้งาน ได้ดังนี้

1. เปิดโปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์และเข้าโปรแกรมโดยกดปุ่ม Simulink (ปุ่มด้านซ้ายของเครื่องหมาย ? หรือเลือกจากเมนู) จอจะแสดงหน้าต่าง Simulink Library Browser ให้บนจอ
2. เปิดไฟล์เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ โดย File / New เลือก Model จอจะแสดงหน้าต่างสำหรับเขียนโมเดลมาให้ และให้ทำการเลื่อนหน้าต่างไปทางขวาอยู่คู่กับหน้าต่างของ Simulink Library Browser เพื่อความสะดวกในการวาดรูป
3. ทำการวาดผังไดอะแกรมที่ต้องการ โดยเลือก Block จาก Library ต่าง ๆ เมื่อพบแล้วให้กดเมาส์ที่รูปแล้วลากมายังหน้าต่างที่จะทำการวาด หลังจากนั้นให้ทำการลากเส้นเชื่อมต่อระบบให้ครบ
4. ให้กำหนดชื่อบล็อกตามรูป และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทุกบล็อก โดยดับเบิลคลิกที่บล็อกและกำหนดค่าให้ตรงตามที่ต้องการ
5. ดูผลลัพธ์เอาต์พุตได้ โดยสั่งที่เมนู Simulation / Start แล้วทำการดับเบิลคลิกที่บล็อกเอาต์พุต คือ Scope หลังจากนั้นให้กดปุ่ม Auto scale หรือปุ่มรูปกล้องส่องทางไกล เพื่อปรับภาพให้เหมาะสม และสามารถทำการปรับค่าสเกลในแนวนอน เพื่อดูรูปสัญญาณให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ โดยกดที่ปุ่ม Parameters และให้กำหนดค่าช่วงเวลาของแกนในแนวนอน (Time range) ตามต้องการ

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของบล็อกต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์ สามารถหาได้จากไลบารี่ ซึ่งมีดังนี้

Block Diagram	Library
Constant	Sources
Sum	Math
PID	Simulink Extras / Additional Linear
Transfer Function	Continuous
Scope	Sinks

หมายเหตุ

1. บล็อก Sum สามารถเลือก / เพิ่ม เครื่องหมาย + - ได้โดยดับเบิลคลิกที่รูปบล็อก และเปลี่ยนเครื่องหมายโดยใส่ที่ช่อง List of signs
2. การหมุนรูป ทำได้โดยกดปุ่ม Ctrl + R

2.10 การทดสอบระบบควบคุมจากผลตอบสนองของระบบ

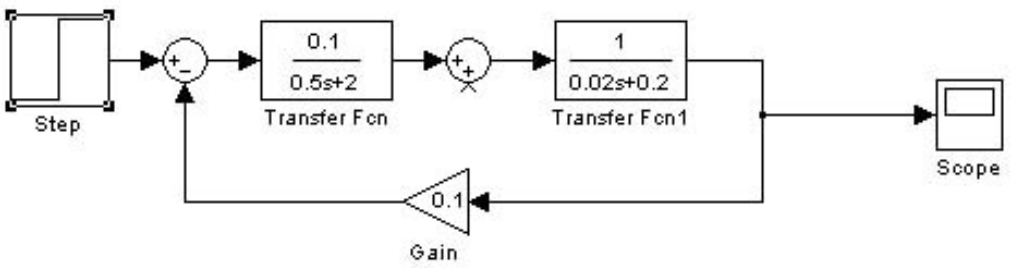
2.10.1 ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบงาน (Plant)

กำหนดให้ระบบมอเตอร์ไฟตรง มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

$R = X.X\ \Omega \quad L = X.X\ H \quad K_m = K_b = X \quad K_f = X.X\ N.m.s$

$J = X.XX\ kg.m^2/s^2$

สามารถเขียนไดอะแกรมฟังก์ชันโอนย้ายของระบบงานในโปรแกรม Simulink ได้ดังรูปที่ 2.25

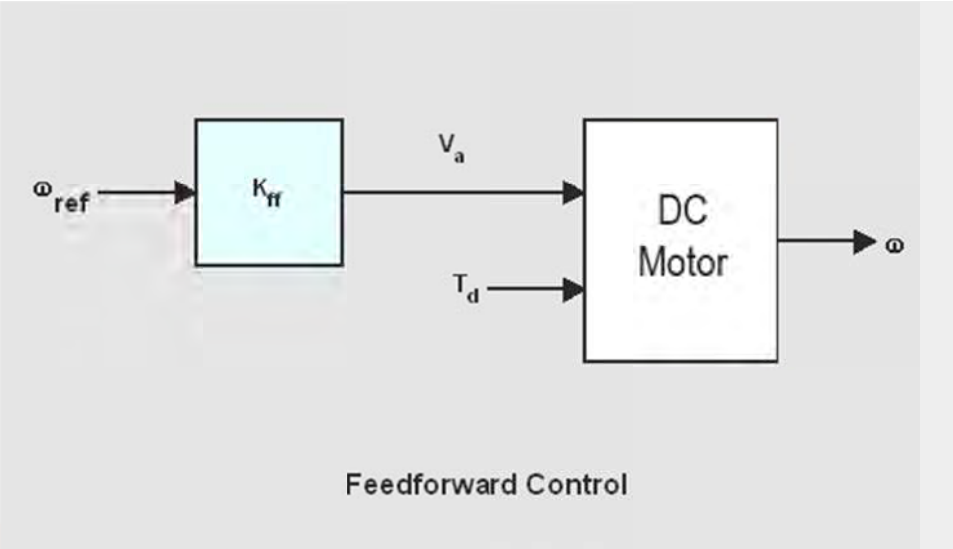


รูปที่ 2.27 ระบบงาน (Plant) ในโปรแกรม Simulink

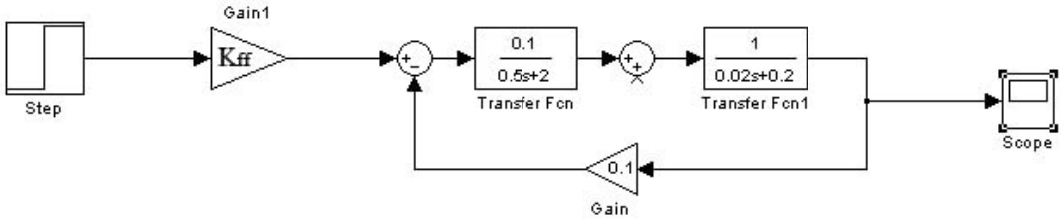
ทำการจำลองแบบระบบ แล้วบันทึกข้อมูลผลตอบสนองของระบบที่ได้ (ภาวะที่ยังไม่มีระบบควบคุม)

2.11 ระบบควบคุมแบบ Feed Forward

เป็นการควบคุมระบบ โดยไม่มีการป้อนค่าเอาต์พุตย้อนกลับเข้ามา มีลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 2.26



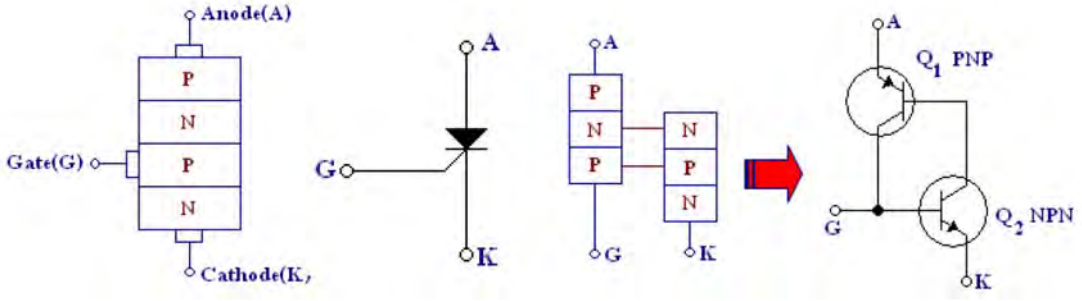
รูปที่ 2.28 รูปแบบการควบคุมแบบ Feed Forward



รูปที่ 2.29 แบบจำลองสำหรับหาผลตอบสนองในระบบควบคุมแบบ Feed Forward

2.12 SCR

SCR มีขาสำหรับต่อใช้งาน 3 ขา ประกอบด้วย แอโนด (Anode , A) แคโถด (Cathode , K) และเกต (Gate , G) มนัจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้เพียงทิศทางเดียวเหมือนไดโอด จะแตกต่างก็ตรงที่มันสามารถควบคุมให้นำกระแสหรือไม่นำกระแสได้โดยทำการควบคุมมุมในการทริก(Trigger) ที่ขาเกต ส่วนกระแสหลักที่ใช้ในการขับโหลด คือ กระแสแอโนด (I_A) ที่ไหลจากขาแอโนดไปยังแคโถด

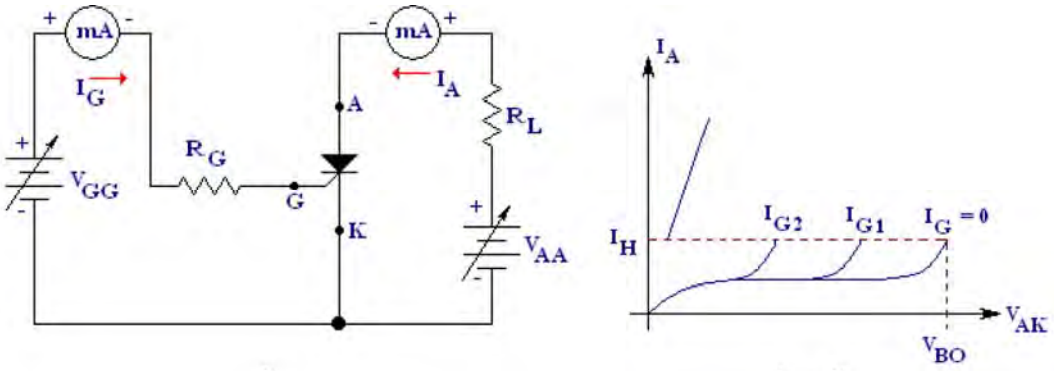


ก) โครงสร้าง ข) สัญลักษณ์ ค) วงจรสมมูลย์

รูปที่ 2.30 โครงสร้าง สัญลักษณ์และวงจรสมมูลย์ของ SCR

โครงสร้างของ SCR ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ PNPN 4 ชั้นประกบกัน ตามรูปที่ 2.28 ก) สาร P ที่อยู่ริมสุดจะต่อขาแอโนด (A) ออกมาใช้งาน ส่วนขา N ด้านริมสุดฝั่งตรงข้ามจะต่อเป็นขาแคโถด (K) ออกมาใช้งาน ในส่วนตอนกลางซึ่งเป็นรอยต่อ PN จะต่อขาเกต(G) ที่สาร P ออกมาใช้สาหรับควบคุมการไหลของกระแส I_A เมื่อพิจารณาสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.28ข) จะเห็นว่ามีสัญลักษณ์เหมือนไดโอดเพียง แต่เพิ่ม ขาเกตขึ้นมาอีกหนึ่งขา ดังนั้นมันจึงเป็นอุปกรณ์ที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้เพียงทิศทางเดียวเหมือนไดโอด จะแตกต่างตรงที่สามารถควบคุมปริมาณของแรงดันและกระแสที่จะให้ผ่านไปยังโหลดได้ ในส่วนของวงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.28 ค) จะมีลักษณะคล้ายการนำทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN มาต่อร่วมกันซึ่งมันเป็นเพียงลักษณะทางโครงสร้างทั่วไปแต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถนาทรานซิสเตอร์มาต่อเพื่อ ให้ทำหน้าที่เป็น SCR ได้ เนื่องจาก SCR จะใช้กับงานที่ต้องการกระแสและแรงดันสูงมาก แต่สาหรับทรานซิสเตอร์แล้วส่วนที่เป็นขาเบสจะทนกระแสได้น้อยมาก จึงไม่อาจนำทรานซิสเตอร์มาต่อเพื่อใช้งานแทน SCR ได้

2.13 คุณลกัษณะของ SCR และ การใช้งาน



(ก) วงจรทดสอบคุณลักษณะของ SCR (ข) กราฟคุณลักษณะของ SCR

รูปที่ 2.31 วงจรการทดสอบคุณลักษณะและกราฟคุณลักษณะของ SCR

พิจารณาการหาคุณลักษณะของ SCR จากรูปที่ 2.29 ก) โดยการทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟตรง สมมติว่า ในขณะเริ่มต้นให้ $V_{GG} = 0$ V จากนั้น ทำการปรับเพิ่ม V_{AA} ขึ้นไปเรื่อย ๆ (ขณะนี้เรียกว่าไม่มีการทริกที่เกต $I_g = 0$) เมื่อปรับเพิ่ม V_{AA} ไปจนถึงค่า V_{BO} (Break over voltage) SCR จะนำกระแสได้และมีกระแส I_A ไหลผ่านโหลด R_L แต่วิธีการนี้ จะไม่นิยมใช้เพราะจะทำให้เกิดอันตรายต่อโหลดและ SCR เนื่องจาก V_{BO} อาจมีค่าสูงเกินกว่าที่โหลดจะรับได้และ SCR จะเกิดความเครียดจากแรงดันที่มีค่าสูงเกินไปจนอาจเสียหายได้เช่นกัน

วิธีการที่จะไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อโหลดและ SCR ก็คือการป้อนกระแสทริกที่เกต (I_G)โดยสมมติว่าโหลดต้องการแรงดันค่าหนึ่ง เราก็ปรับ V_{AA} ให้ใกลเคียงกับแรงดันที่โหลดต้องการจากนั้น ทำการปรับค่า VGG ให้ได้กระแส I_G ค่าหนึ่ง สมมุติว่า ขณะนี้คือ I_{G1} (พิจารณารูปกราฟ 2.25 ข) SCR จะนากระแสโดยมีแรงดันตกคร่อมที่ขา A_K ไม่ถึงช่วง V_{BO} และถ้าเพิ่ม I_G ให้มากขึ้นสมมติเป็น I_G 2 แรงดันที่ตกคร่อมขา A_K ในช่วงการนำกระแสก็จะยิ่งน้อยลงดังนั้น แรงดันส่วนใหญ่จึงไปตกคร่อมโหลด R_L แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นขาเกตจะต้องได้รับไฟบวกในการทริกเท่านั้น จึงจะสามารถนำกระแสได้ เนื่องจากขาเกตกับแคโถดเป็นรอยต่อ PN เหมือนรอยต่อของไดโอดต้องได้รับไบแอสตรง SCR จึงจะนำกระแสได้โดยปกติทั่วไปในวงจรไฟตรงเมื่อ SCR นำกระแสค่าแรงดัน V_{AK} จะน้อยมากใกล้ศูนย์ ดังนั้นค่ากระแส I_A ขณะ SCR นำกระแสอาจหาได้จาก

$$I_A = \frac{V_{AA}}{R_L} \qquad (2.36)$$

เมื่อ SCR นากระแสในวงจรไฟตรงแล้วแม้ว่าจะตัดแหล่งจ่ายไฟ V_{GG} ออกไป SCR ก็จะยังคงนำกระแสได้อยู่ต่อไปเพราะรอยต่อ PN ที่ขา G_K ลดค่าความต้านทานลงมาภายหลังได้รับการ ทริกที่ขา G

แรงดันตกคร่อมรอยต่อ PN ที่ขา G_K จึงใกล้ศูนย์มากแรงดันที่ A เทียบกับ K จึงมีค่าประมาณใกลศูนย์เช่นกัน เนื่องจากเกิดกระแส I_A ไหลอย่างต่อเนื่องเพราะฉะนั้น โหลด R_L จึงสามารถทางานได้อย่างต่อเนื่อง

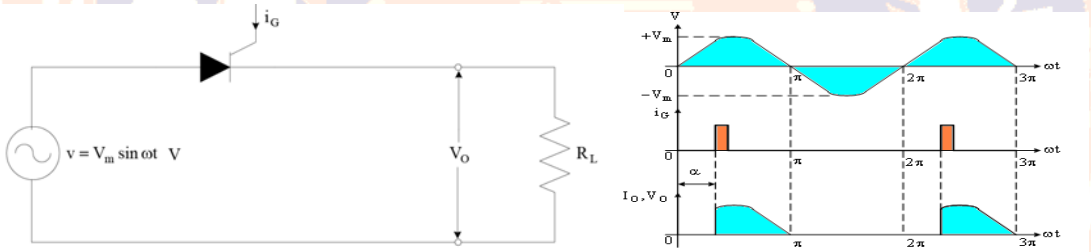
พิจารณาต่อไปถ้า I_A มีค่าลดลงจะด้วยเหตุผลใดก็ตาม SCR จะยังคงนำกระแสได้ตราบใดที่ค่ากระแส I_A ไม่ต่ำกว่ากระแสยึด (Holding current , IH) แต่ถ้าเมื่อใด I_A ต่ำกว่าIH SCR จะหยุดนำกระแสทันทีถ้าจะให้นำกระแสใหม่จะต้องทาการทริกที่ขาเกตอีกครั้งมันจึงจะนำกระแสได้โดยมีข้อแม้ว่า I_A ต้องไม่น้อยกว่า IH

อย่างไรก็ตามการจะให้ SCR นำกระแสได้อย่างปลอดภัย จะต้องยึด หลักดังนี้

1. ไบแอสขั้วบวกที่แอโนดเทียบกับแคโถด
2. ไบแอสไฟบวกที่ขั้วเกตเทียบกับแคโถด (เรียกว่าทริกเกอร์ที่เกต)
3. ถ้าต้องการให้ SCR หยุดนำกระแสต้องลดค่า I_A ให้ต่ำกว่า IH หรือตัดวงจรการไหลของกระแส I_A

จากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ SCR ในเบื้องต้น จะเห็นได้ว่าสามารถนำ SCR มาใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟตรงที่โหลดได้ซึ่งก็สามารถจัดวงจรได้ทั้งแบบครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นเช่นเดียวกันกับการใช้ไดโอด

2.13.1 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นใช้ SCR



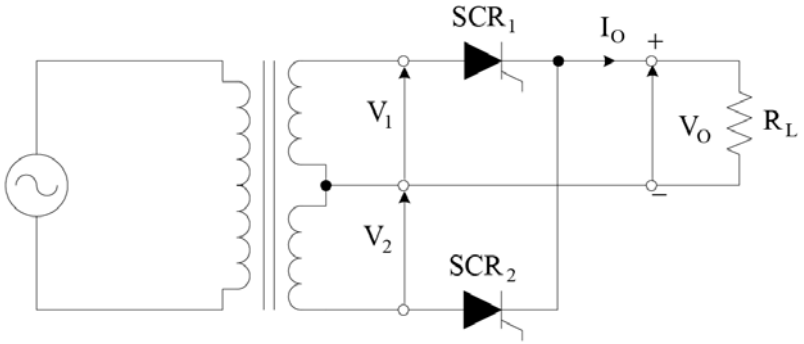
ก) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นใช้ SCR ข) รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันด้านอินพุตและเอาต์พุต

รูปที่ 2.32วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นใช้ SCR และรูปคลื่นอินพุตเอาต์พุตที่มุมจุดชนวน

พิจารณารูปที่ 2.30 เป็นวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่ใช้ SCR โดยมีมุมจุดชนวนที่ขาเกต(ทริกเกอร์) อยู่ที่มุม a เมื่อ SCR นำกระแสจะเห็นได้ว่ากระแสโหลดและแรงดันที่โหลด (I_Oและ V_O) จะเริ่มที่มุม a ไปจนถึง π ตามลักษณะของรูปคลื่นไปสลับด้านบวก แต่เมื่อไฟสลับไปอยู่ที่ช่วงสัญญาณด้านลบ SCR จะไม่ยอมให้ I_O และ V_O ผ่านไปยังโหลด R_L ได้จนกว่าจะมีสัญญาณด้านบวกรอบใหม่เข้ามาและเมื่อถึงช่วงมุมจุดชนวนเกตที่มุม a SCR จึงจะยอมให้ I_O และ V_O ผ่านไปยังโหลด R_L ได้

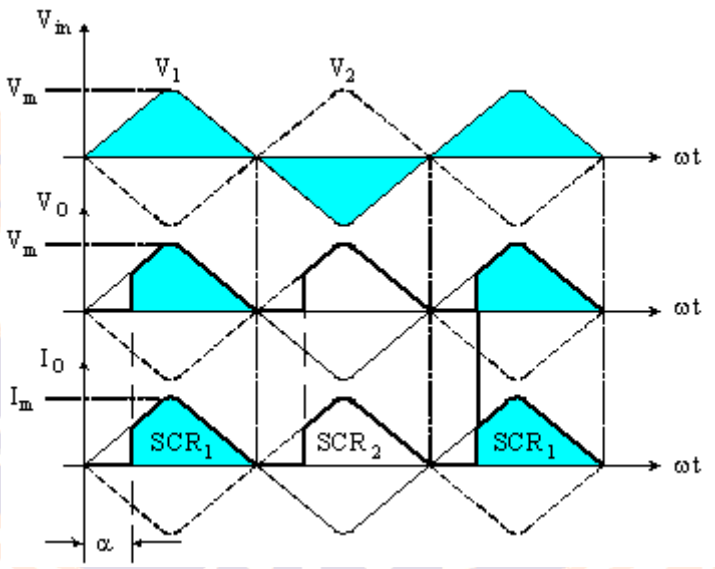
การใช้งาน SCR ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะพิจารณาเป็น 2 แบบ คือในกรณีของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้ห้ามหม้อแปลงมีแท็ปกลางและกรณีของวงจรบริดจ์

2.13.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง



รูปที่ 2.33 วงจรเรียงกระแสแบบเต็ม คลื่นของ SCR ที่ใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

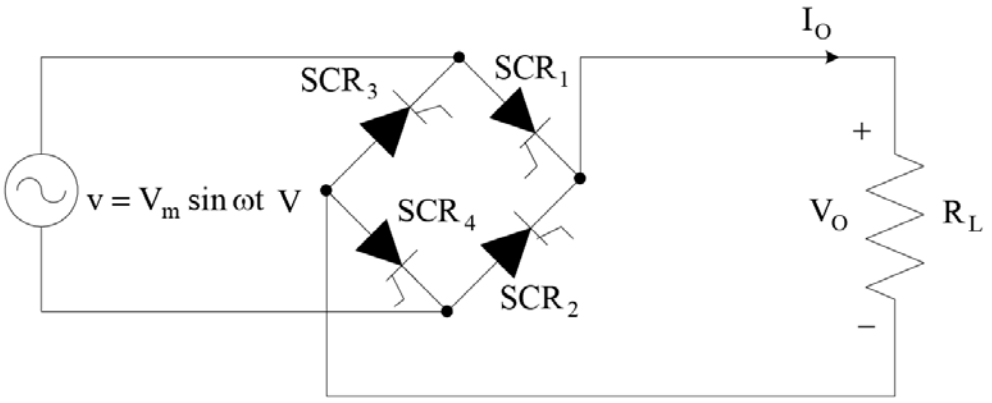
พิจารณาวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลางดังรูปที่ 2.31 จะมีลักษณะเหมือนกันกับการทางานจะเหมือนกับวงจรเรียงกระแสที่ใช้ได้โอดเพียงแต่กรณีนี้ สามารถควบคุมปริมาณกระแสและแรงดันที่เอาต์พุตได้ดังนั้นในการคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันที่เอาต์พุตจึงคำนวณและสามารถพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณรูปที่ 2.32 ได้ดังนี้



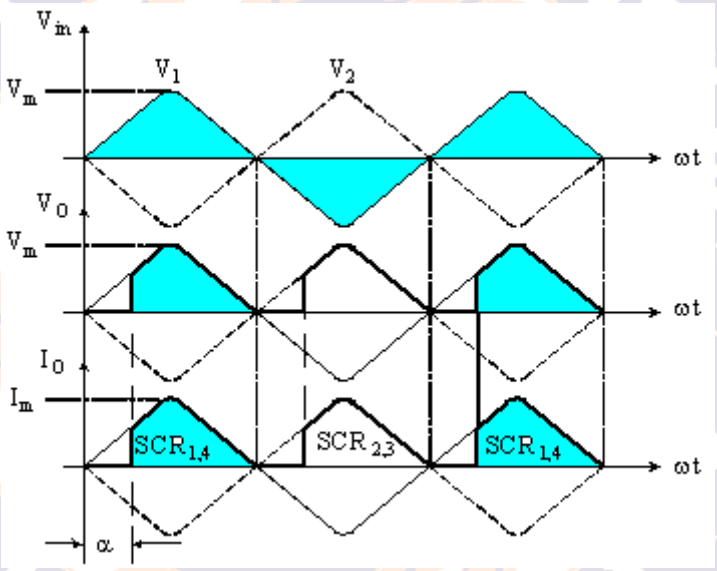
รูปที่ 2.34 รูปคลื่นสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

เมื่อพิจารณาวงจรรูปที่ 2.31 และรูปคลื่นสัญญาณรูปที่ 2.32 การควบคุมมุมการนำกระแสของ SCR สามารถควบคุมได้ตั้งแต่ 0° ถึง 180° นั่นคือสามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะไปตกคร่อมที่โหลด R_L ได้โดยเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจากรูปที่ 2.32 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลด R_L จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมในการทริก หรือ $a=0°$ และแรงดันตกคร่อมโหลดจะเป็นศูนย์เมื่อมุมในการทริก หรือ $a=180°$

2.13.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น แบบบริดจ์



รูปที่ 2.35 วงจรเรียงกระแสเต็ม คลื่นแบบบริดจ์ใช้ SCR



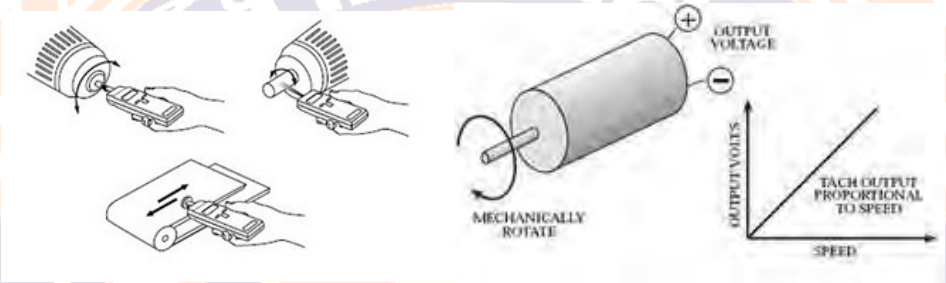
รูปที่ 2.36 รูปคลื่นสัญญาณวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

เมื่อพิจารณาวงจรรูปที่ 15.9 และรูปคลื่นสัญญาณรูปที่ 2.34 การควบคุมมุมการนำกระแสของ SCR ยังคงสามารถควบคุมได้ตั้งแต่ 0° ถึง 180° นั่นคือ สามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะไปตกคร่อมที่โหลด R_L ได้แต่จะ มี SCR ทำหน้าที่ในการเรียงกระแสรูปคลื่นสัญญาณครึ่งไซเกิลละ 2 ตัวและเมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณจากรูปที่ 2.34 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลด R_L จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมในการทริกหรือ α=180° เช่นเดียวกันกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลางอีกทั้งค่าของแรงดันตกคร่อมโหลดจะเป็นศูนย์เมื่อตำแหน่งของมุมในการทริก หรือ α=180°

2.14 วัดความเร็วรอบมอเตอร์

การวัดระยะการหมุน

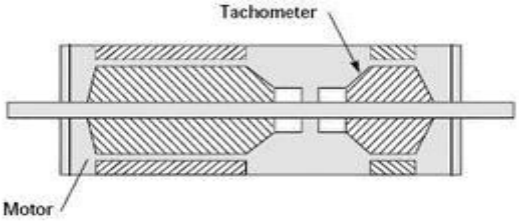
มาตรอัตรารอบ (tachometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการหมุนของเพลา ล้อ หรือ โรเตอร์ ในมอเตอร์ หรือเครื่องจักรต่าง ๆ โดยปกติแล้วจะแสดงผลอยู่ในรูปของจำนวนรอบต่อนาที (rpm) มาตรอัตรารอบมีหลายแบบขึ้นกับหลักการทำงาน ตัวอย่างเช่น อาศัยหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่ความต่างศักย์ที่ส่งออกมาแปรผันตรงกับความเร็วเชิงมุมที่วัด หรือ อาศัยหลักการตรวจนับสัญญาณพัลส์ที่มีการส่งออกมาเมื่อมีการหมุนครบรอบในช่วงเวลาหนึ่ง หรือ อาศัยหลักการสะท้อนของแสง มาตรอัตรารอบมีทั้งแบบสัมผัสและไม่สัมผัส รูปที่ 2.35 แสดงตัวอย่างการใช้งานมาตรอัตรารอบในลักษณะต่าง ๆ



รูปที่ 2.37 TACHOMETER.

Tachometer สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ป้อนกลับได้ โดยส่วนมากจะใช้ป้อนกลับอัตราเร็วของมอเตอร์ การทำงานใช้หลักการง่ายคือนำดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์ที่ต้องการควบคุม นั่นคือหากมอเตอร์ที่เราต้องการควบคุมเกิดหมุน ดีซีมอเอตร์ก็ให้ค่าความต่างศักย์ออกมา เราสามารถนำค่า ความต่างศักย์นี้ไปใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับให้กับระบบควบคุมได้

ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กนิยมนำมาใช้เป็นตัวป้อนกลับอัตราเร็วของระบบเซอร์โวโดยจะต้อง มีการชดเชยความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิรวมทั้งใช้ silver เป็นคอมมิวเตเตอร์เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือเมื่อ ใช้งานที่อัตราเร็วต่ำ ๆหรือกระแสต่ำ ๆ ดังนั้นรับบเซอร์โวจึงนิยมติด Tachometer (Small permanent magnet DC motor) เข้ากับระบบเลย ดังรูป



รูปที่ 2.38 มาตรวัดรอบ (TACHO METER) RPM

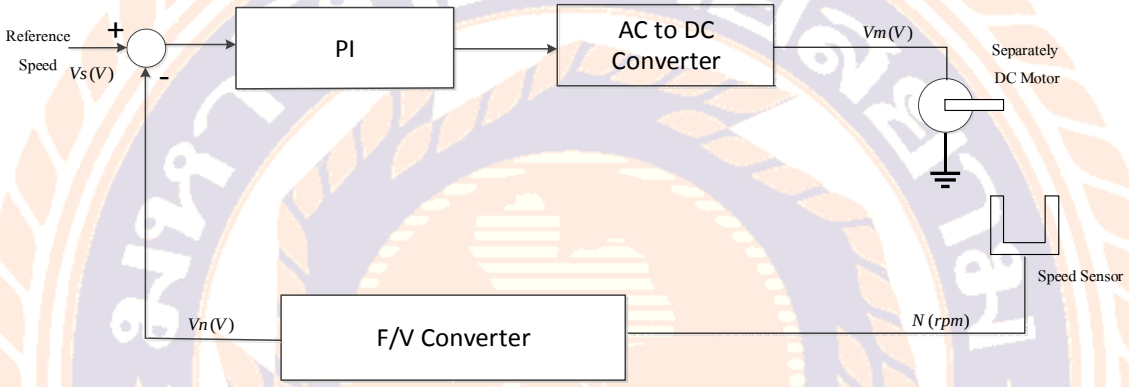
สำหรับมาตรวัดรอบ ก็เหมือนกับมาตรวัดความร้อน คือรถยนต์ส่วนใหญ่จะมีการติดตั้งมา ให้จากโรงงานอยู่แล้ว แต่สาเหตุที่มีบางคนต้องไปติดเพิ่มอาจจะมาจากเหตุผลต่างกันไป บางคนอาจคิดว่าเป็นอุปกรณ์ตกแต่งสร้างความสวยงาม หรือความเท่ แต่กับบางคนอาจ จะเป็นสิ่งจำเป็นจริง ๆอย่างรถยนต์ที่ผ่านการโมดิฟายเปลี่ยนไปใช้แคมฯ องศาสูงมาก ๆ จนทำให้สามารถเร่งรอบได้มากกว่าเดิม ซึ่งวัดรอบที่มีติดมากับรถ ไม่สามารถแสดงข้อมูล ได้เพียงพอ จึงต้องหาอันใหม่มาติดเข้าไป หรือในรถยนต์ที่ทำขึ้นมาสำหรับการแข่งขัน ควอเตอร์ไมล์ซึ่งจังหวะการเปลี่ยนเกียร์ ถือเป็นสิ่งที่ต้องการให้ความสำคัญมาก การตัดสิน แพ้ชนะอยู่ที่เวลาเพียงเศษเสี้ยววินาที ดังนั้นมาตรวัดรอบที่มาพร้อมไฟเตือน จึงกลายเป็น อุปกรณ์ช่วยได้อย่างหนึ่ง อย่างไรก็ตามการแพ้ชนะไม่ได้เพียงอุปกรณ์ที่ว่าเท่านั้น จังหวะ ฝีมือ สมาธิ ในการเปลี่ยนเกียร์ของผู้ขับขี่เป็นเรื่องที่สำคัญกว่า

บทที่ 3

โครงงานที่นำเสนอ

โครงงานนี้นำเสนอ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 3.1

3.1 บล็อกไดอะแกรมรวมของโครงงานที่นำเสนอ

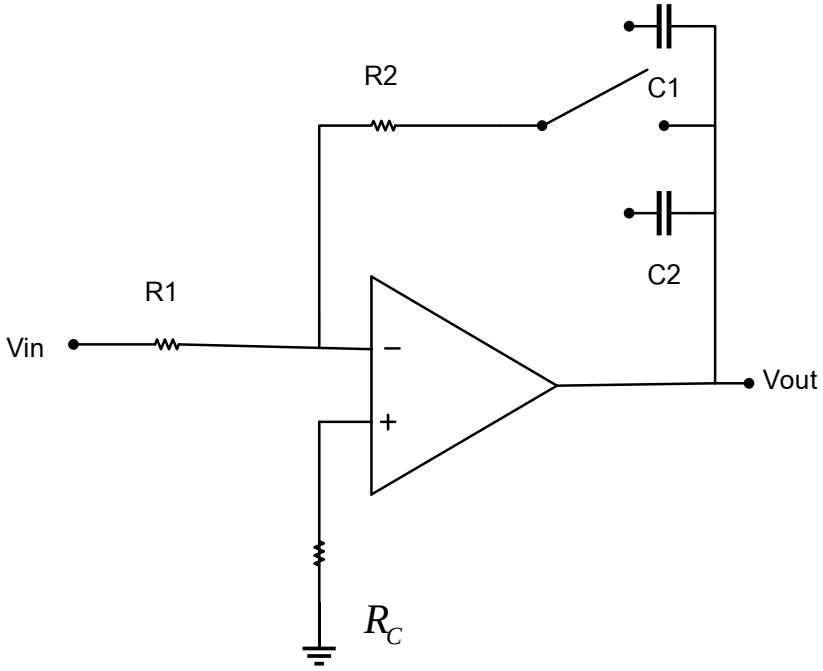


รูปที่ 0.1 โครงงานที่นำเสนอ

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ประกอบด้วย ตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบอนุกรม วงจรเอซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (AC to DC Converter) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก แทคโคเจนเนอเรเตอร์ (Tachogenerator) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่เปลี่ยนสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยอัตราคงที่ (หน่วยเป็น V/rpm) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ตั้งไว้ ในการทำโครงงานนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของตัวควบคุมพีไอ และระบบควบคุม ด้วยโปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวควบและระบบที่เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่เป็นได้ แล้วทำการทดสอบระบบจริง เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้

3.2 ตัวควบคุม PI

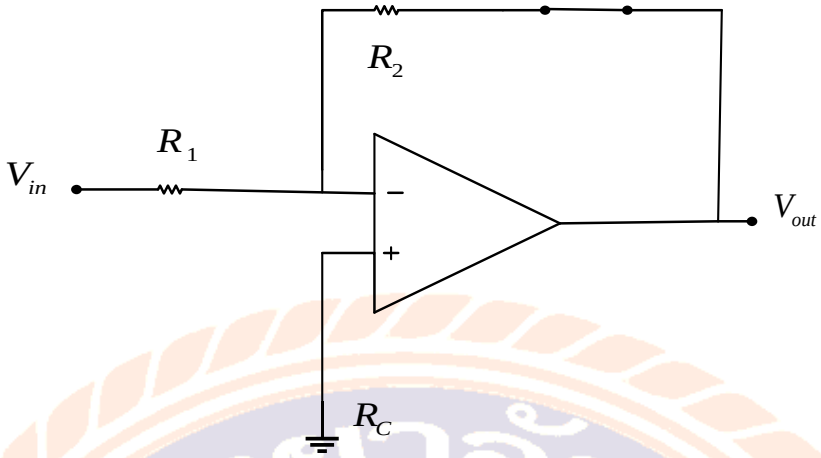
ในโครงงานนี้เลือกใช้ตัวควบคุม PI แบบอนุกรมโดยสามารถเลือกค่าตัวเก็บประจุได้ 2 ค่า วงจรแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 0.2 ตัวควบคุมพีไอที่ใช้

3.2.1 กรณีตัวควบคุมแบบ P อย่างเดียว

วงจรตัวควบคุมแบบ P แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย ออปแอมป์ และ ตัวต้านทาน 2 ตัว เป็นวงจรแบบขยายสัญญาณกลับเฟส



รูปที่ 0.3 วงจรตัวควบคุมแบบ P

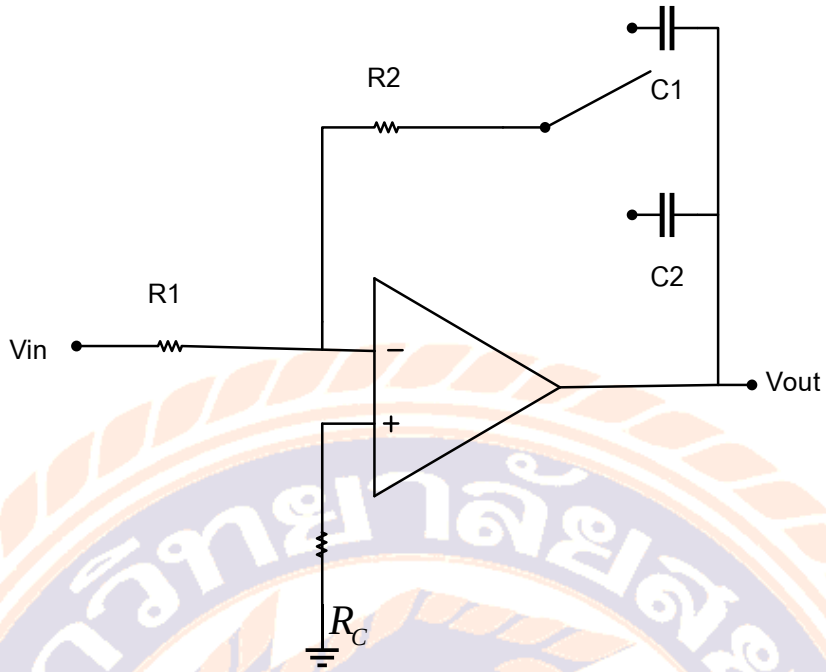
หาฟังชันการถ่ายโอนได้เป็นดังสมการที่ (3.1)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_2}{R_1} \tag{3.1}$$

เมื่ออัตราการขยายของตัวควบคุมมีค่าเป็น $K_p = \frac{R_2}{R_1}$ ส่วนเครื่องหมายลบแสดงถึงการกลับเฟสของสัญญาณที่เอาต์พุต

3.2.2กรณีตัวควบคุมแบบ PI

วงจรตัวควบคุมแบบ PI แสดงดังรูปที่ 3.4 เป็นตัวควบคุมแบบอนุกรม ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ 2 ลักษณะที่ขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุ C1 และ C2



รูปที่ 0.4 ตัวควบคุมแบบ PI

กำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ ทำการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 3.4 เป็นดังนี้

เมื่อ $Z_f = R_2 + ZC$

$$= R_2 + \frac{1}{sC} = \frac{R_2 Cs + 1}{sC}$$

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

$$= -\left[\frac{R_2 Cs + 1}{sC}\right]\frac{1}{R1}$$

$$= \left[\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1 Cs}\right]$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}\left[1 + \frac{1}{R_2 Cs}\right] \qquad (3.2)$$

เมื่อ $K_P = \frac{R_2}{R_1}$, $T_i = R_2 C$ จะสังเกตได้ว่าในสมการที่ (3.2) ค่าอัตราการขยายของ K_P มีผลต่อค่าคงตัวทางเวลาของตัวควบคุมแบบ I

3.3 วงจรเอซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

วงจร AC/DC rectifier ที่ใช้ในโครงงานนี้ เป็นแบบ Single- phase half-wave controlled rectifier หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วงจร Zero Order Hold :ZOH อุปกรณ์ใช้คือ Thyristor (Silicon controlled rectifiers :SCR) จำนวน 4 ตัว ต่อแบบบริดจ์ และต่อร่วมกับโหลด ที่ถูกควบคุมด้วยสัญญานพัลส์ที่มีมุมเป็น $\propto$ แสดงดังรูปที่ 3.5

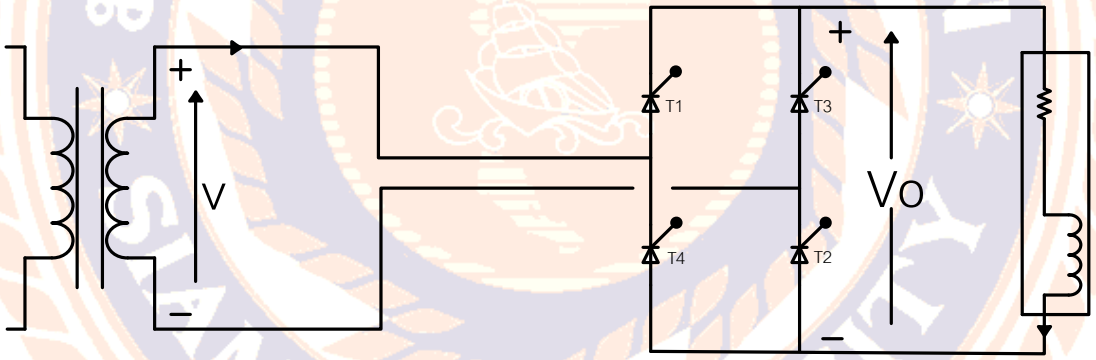
กรณีโหลดของ Rectifier เป็นวงจร L-R ที่มีค่าคงตัวเวลา $T = \frac{L}{R}$ ถ้ากระแสเอาต์พุตต่อเนื่อง แล้วค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต DC เป็น

$$V_d = V_{d\text{-}max} \cos \propto \qquad (3.3)$$

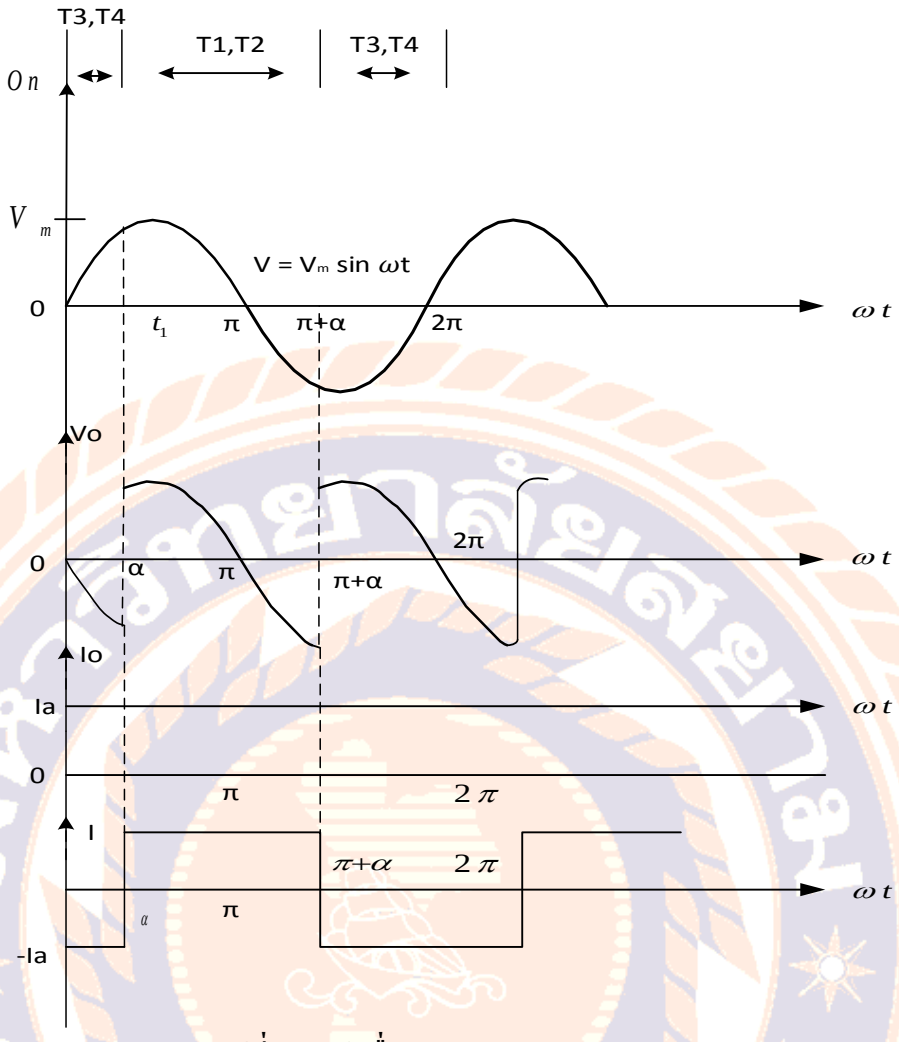
เมื่อ $\propto$ มุมทริกของสัญญาณพัลส์

V_d แรงดันเฉลี่ยของเอาต์พุต DC

$V_{d\text{-}max}$ แรงดันเฉลี่ยที่เอาต์พุต DC มีค่าสูงสุดเป็น $\propto = 0$



รูปที่ 0.5 วงจร AC/DC Rectifier แบบเฟสเดียว



รูปที่ 0.6 รูปคลื่นของวงจร ZOH

จากรูปที่ 3.5 ได้กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสอินพุตและเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 3.6 สมมติว่า ความถี่ของสัญญานอินพุตของ Rectifier มีค่าเป็น $f = 50\text{Hz}$ (T=$\frac{1}{f} = 20$ ms) แล้ววงจรนี้จะทำงานครึ่งคลื่น นั่นคือ มุมเหนี่ยวนำที่ $180^{\bullet}$ (หรือ πrad) ในช่วงเวลา 10 ms กระแสจะทำงาน ON และกระแสจะหยุดทำงาน Off ครึ่งคลื่น แรงดันเอาต์พุตจะไม่ถูกควบคุมในครึ่งคลื่น เมื่อมีการจ่ายสัญญาณพัลส์เข้าไปในวงจร ดังนั้นอุปกรณ์โหลดจะรักษาแรงดันเอาต์พุตใน 1 คาบเวลาของ $\frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$ เมื่อมี f เป็น 2 เท่าของความถี่อินพุตนั้นเอง ดังนั้นอัตราการขยายของฟังชันถ่ายโอนในช่วงที่สุ่มสัญญาณ $\frac{T}{2}$ = 10 ms ในระบบหนึ่งหน่วยมีค่าเป็น

$$G(t) = \frac{V_o}{V_{in}}\Big|_{\text{per-unit}} = 1$$

วงจร AC/DC Rectifier ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นอุปกรณ์หนึ่งทำหน้าที่หน่วงเวลาในโดเมน s ซึ่งเวลาการหน่วงนั้นเป็นช่วงเวลาในการสุ่ม T มีค่าเป็น σ ความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าเป็น f= 50 Hz และการหน่วงเวลา T=σ=20 ms ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนในระบบ per-unit เป็น

$$G(s) = e^{-Ts}=e^{-\sigma s} \qquad (3.4)$$

เมื่อ T=ช่วงเวลาการสุ่ม (Sampling interval)

σ=ควบเวลาในการเปลี่ยน (Commutation Period)

ในการควบคุมกระแสหรือควบคุมความเร็ว (Current & speed Control System) มีผลตอบสนองเป็น 0.1-1 s จะพิจารณาว่าการสุ่มสัญญาณ 20 ms มีค่าน้อยมากๆ นั่นคือ Ts = σs $\rightarrow$ 0 สมการ (3.4) เขียนใหม่ได้เป็น

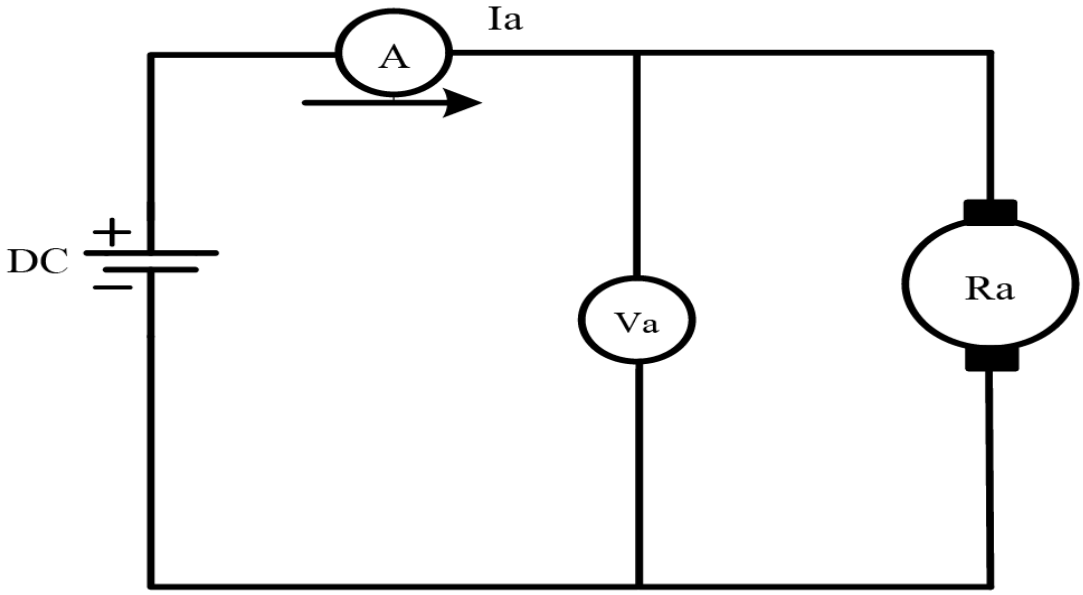
$$G(s)=e^{-\sigma s} = 1-\sigma s = \frac{1}{1+\sigma s} = 1 \qquad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.5) แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเอซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในโครงงานนี้มีค่าหนึ่ง

3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยตัวควบคุม PI จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ก่อน เพื่อที่จะได้ค่าพารามิเตอร์ ที่ได้จากการทดสอบไปออกแบบเป็นระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์

3.4.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์ของมอเตอร์ (R_a)



รูปที่ 0.7 วงจรทดสอบความต้านทานอาร์เมเจอร์

ขนาดพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พิกัดแรงดัน	220	V_{DC}
พิกัดกระแส	6.5	A
พิกัดกำลังงาน	1,100	W
ความเร็วรอบสูงสุด	3,000	rpm

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้กับวงจรได้เท่ากับขนาดกระแสพิกัดในขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง วัดกระแสและแรงดัน

แรงดันที่วัดได้	20.25	V
กระแสที่วัดได้	6.52	A

ทำการคำนวณหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์ของมอเตอร์จากสูตร

$$R_a = \frac{V_a}{I_a} \qquad (3.6)$$

โดยที่

R_a = ความต้านทานอาเมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Ω)

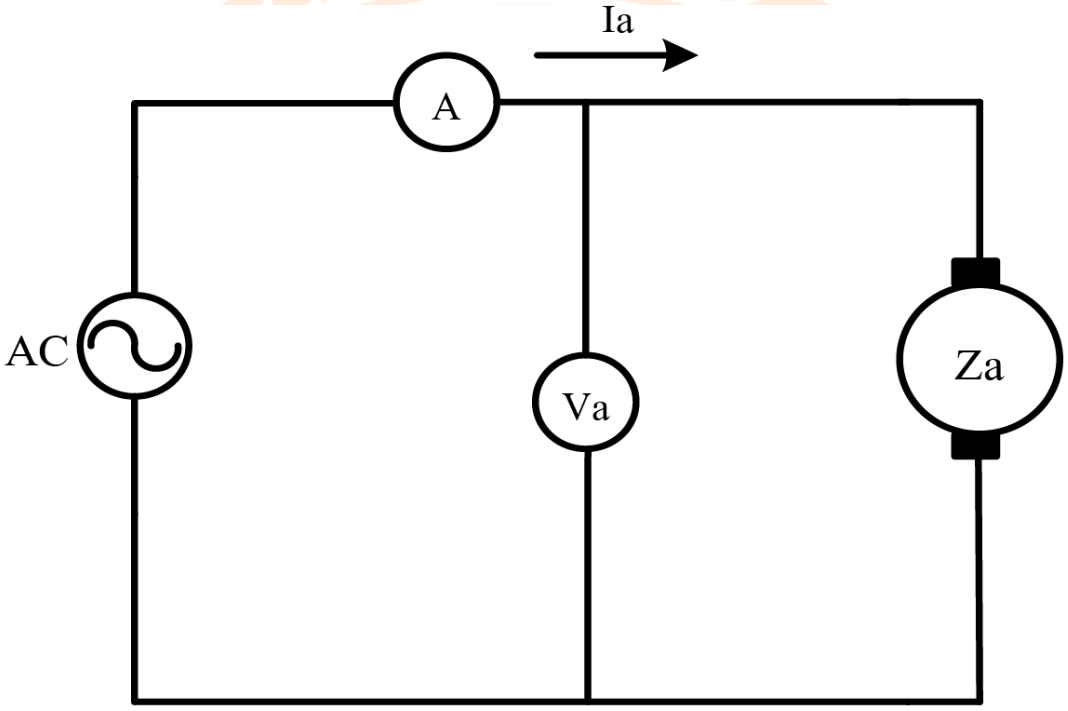
V_a = ค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (V)

I_a = ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า (A)

จะได้

$$R_a = \frac{20.25}{6.52} = 3.10 \ \Omega$$

3.4.2 การทดสอบเพื่อหาค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์ต่อวงจรการทดสอบ (L_a)



รูปที่ 0.8 วงจรทดสอบหาค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์

ขนาดพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พิกัดแรงดัน	220	V_{DC}
พิกัดกระแส	6.5	A
พิกัดกำลังงาน	1,100	W
ความเร็วรอบสูงสุด	3,000	rpm

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (AC) ให้กับวงจรได้เท่ากับขนาดกระแสพิกัดในขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง วัดกระแสและแรงดัน

แรงดันที่วัดได้	93	V

กระแสที่วัดได้ 6.5 A

คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จากสูตร

$$Z_a = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (3.7)$$

โดยที่

Za = ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Ω)

จะได้ว่า

$$Z_a = \frac{93}{6.5} = 14.31\ \Omega$$

คำนวณหาค่ารีแอคแตนซ์ของมอเตอร์จากสูตร

$$X_L = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2} \quad (3.8)$$

โดยที่

X_L = ค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Ω)

จะได้ว่า

$$X_L = \sqrt{(14.31)^2 - (3.1)^2} = 13.97\ \Omega$$

คำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์จากสูตร

$$L_a = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (3.9)$$

โดยที่

L_a = ค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์ (H)

f = ค่าความถี่ = 50 Hz

จะได้ว่า

$$L_a = \frac{13.97}{2\pi(50)} = 44.47\ \text{mH}$$

การคำนวณหาค่าคงที่ของเวลาของวงจรอาร์เมเจอร์จากสูตร

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \qquad (3.10)$$

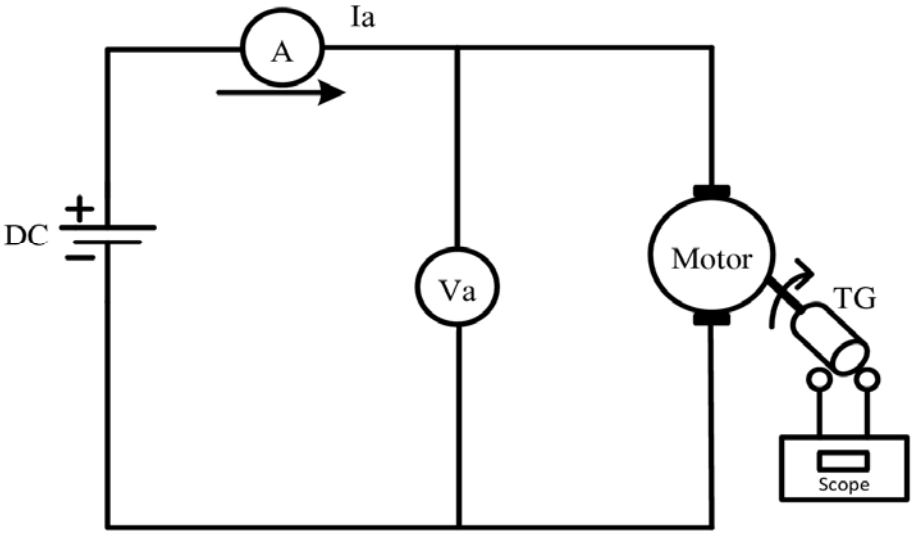
โดยที่

T_a = ค่าคงที่ของเวลาสาหรับวงจรอาร์เมเจอร์ (s)

จะได้ว่า

$$T_a = \frac{44.47\text{mH}}{3.1\Omega} = 14.34\,\text{ms}$$

3.4.3 การหาค่าคงที่ของเวลาทางกลของการเคลื่อนของมอเตอร์ แบบ Rundown-Test



รูปที่ 0.9 วงจรทดสอบหาค่าคงที่ของเวลาทางกลของมอเตอร์

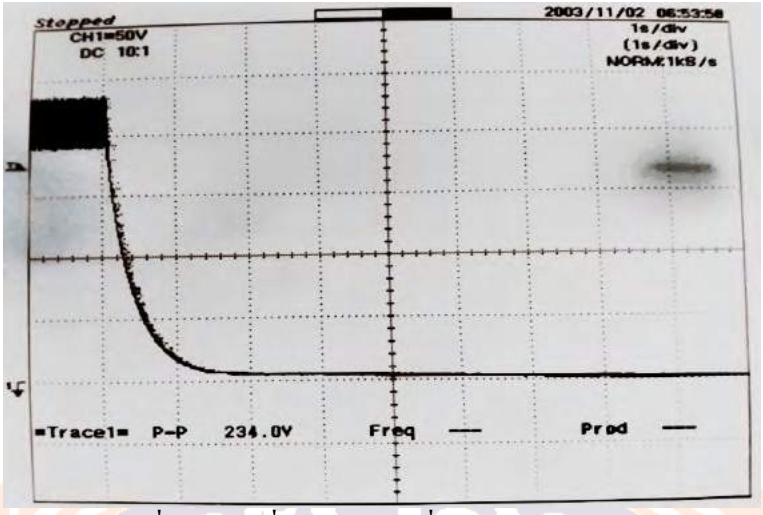
จ่ายแรงดันไฟฟ้า 200 v ให้กับวงจรวัดค่าต่าง ๆ ของวงจร

แรงดันที่วัดได้คือ 200 V

กระแสที่วัดได้คือ 1.2 A

ความเร็วรอบที่วัดได้คือ 3,000 rpm

หยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทันทีบันทึกผลของแรงดันเอาต์พุตซึ่งมีลักษณะของWave from Diagram ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 0.10 รูปคลื่นของเอาต์พุตที่ทดสอบแบบรันดาวน์

จากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นำมาคำนวณหาค่าคงที่ของเวลาทางกลของมอเตอร์ โดยที่สัญญาณ 1 ช่อง มีค่าเท่ากับ 1.0 s จะได้ T_m มีค่าเท่ากับ 2 ช่อง x 1.0 s = 2 s

3.5 การออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์โดยใช้วิธีการ Simulink

การออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์โดยใช้วิธี Simulink จากระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. Motor) สร้างระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยการนำมาจำลองลงในระบบ Simulink ได้ดังต่อไปนี้

-พิมพ์คำว่า Simulink ลงบนคำสั่งของหน้าต่างคำสั่ง

-จะปรากฏหน้า ต่าง Library Simulink ที่ประกอบด้วย Back diagram ต่าง ๆ ขึ้นมา

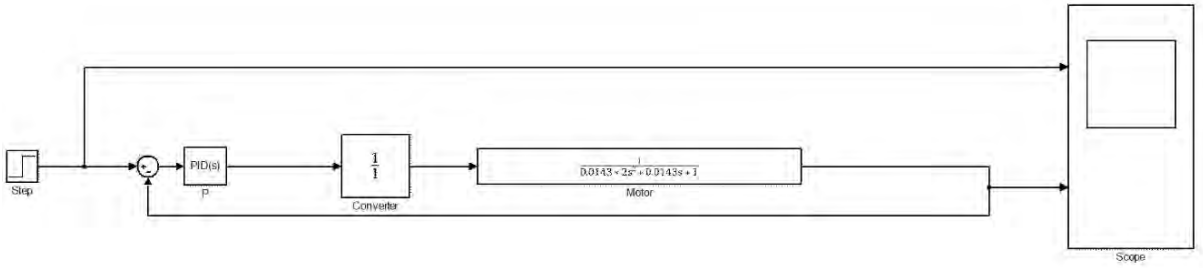
-เลือกเมนู File>New>Model บนหน้า ต่าง Library Simulink

-จะปรากฏหน้า ต่างการทำงานของ Simulink ที่มีชื่อ Default ว่า United

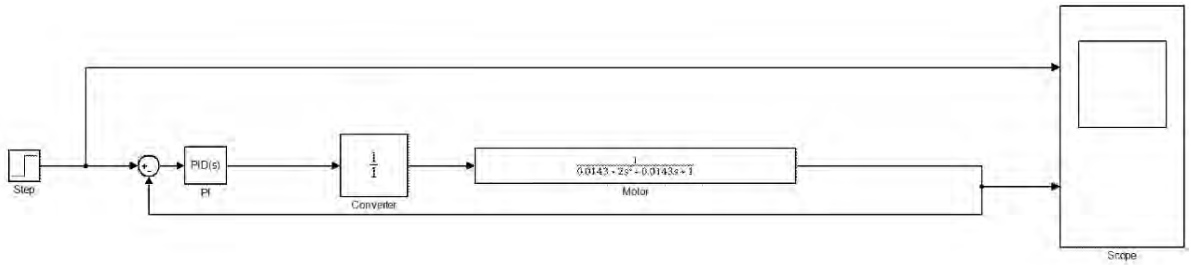
-แล้วทำการเลือก Block ที่ต้องการใช้งาน โดยการดับเบิลคลิกที่ Block diagram ของหมวดหมู่ที่ต้องการเลือก

-จะปรากฏหน้าต่างแสดง Block ต่าง ๆ ของหมวดที่ได้เลือกไว้

-ในการวิเคราะห์แบบจำลองของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมด้วยพีและ พีไอ ประกอบด้วย Block การทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ โดยบล็อกในส่วนของมอเตอร์นั้นจะเลือกค่าพารามิเตอร์ตามที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.4 และฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการในรูปที่ 2.25



รูปที่ 0.11 การสร้างแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม Simulink (P Control)

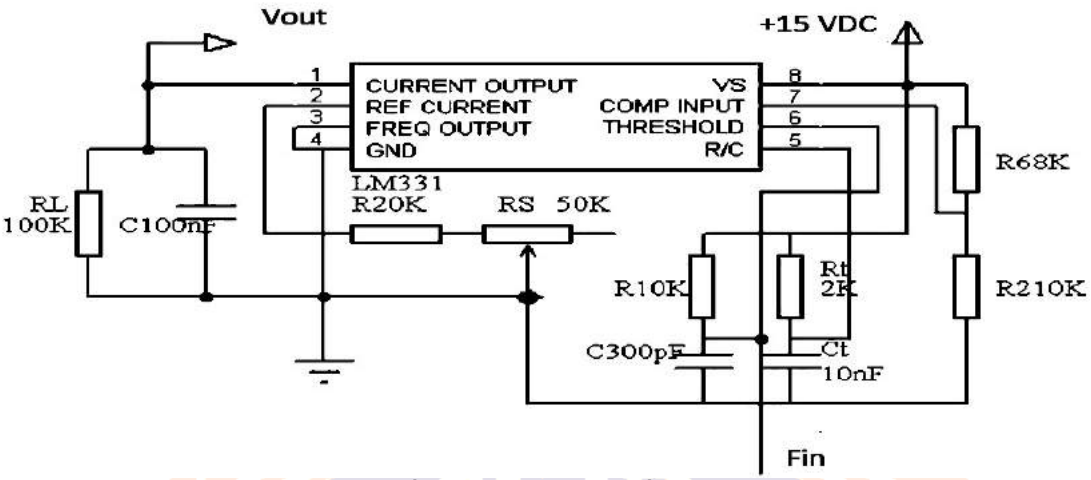


รูปที่ 0.12 การสร้างแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม Simulink (PI Control)

3.6 วงจรแปลงความถี่

ในโครงงานนี้จะใช้วงจร F / V (Frequency to Voltage Converter) ไอซีเบอร์ LM331 เป็นตัวแปลงสัญญาณความถี่ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-5 โวลต์เพื่อป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบ และแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลส่งข้อมูลป้อนกลับเข้าไปยังระบบเพื่อทำการประมวลผลเปรียบเทียบกับ ค่าสัญญาณที่ควบคุม (Set Point) โดยสื่อสารข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS-232 และทำการประมวลผลวนลูปอย่างต่อเนื่องจนกว่าค่าที่ควบคุม (Set Point, SV) จะเท่ากับค่าที่วัดได้ (Process Value, PV) สมการความสัมพันธ์ของความถี่อินพุตและแรงดันเอาต์พุตแสดงดังสมการที่ (3.11)

$$V_{out} = F_{in} \times 2.09 \times \frac{R_L}{R_s} \times (R_i \times C_1) \qquad (3.11)$$



รูปที่ 0.13 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

บทที่ 4

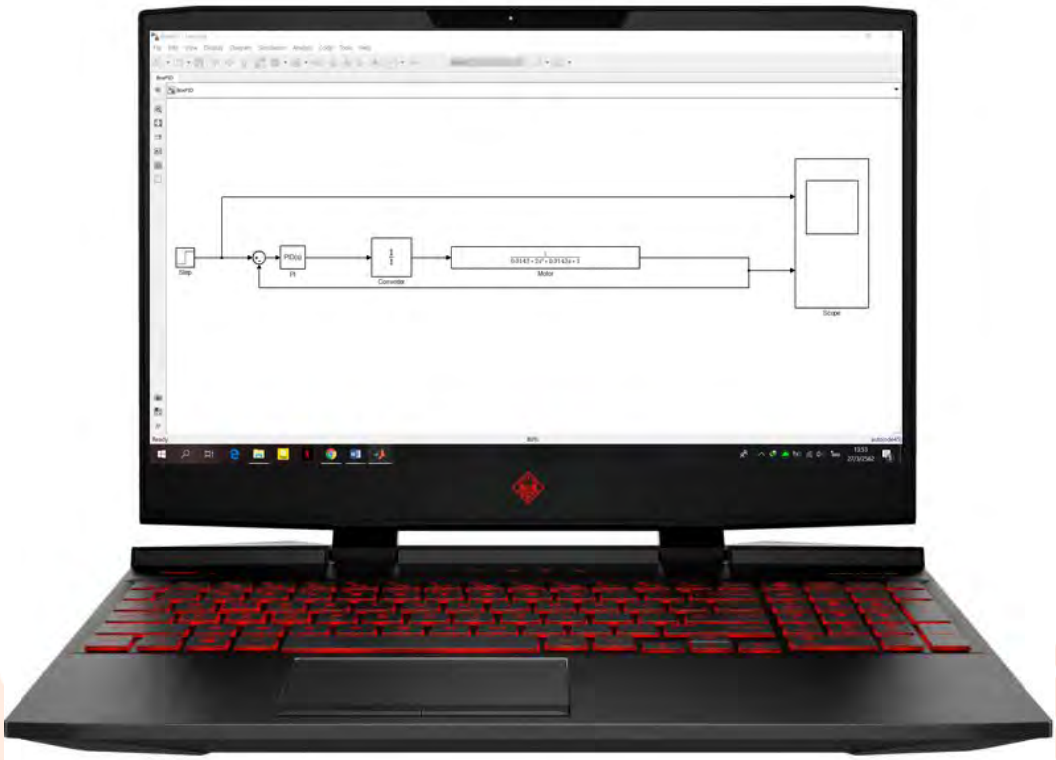
การทดลองและผล

ในการศึกษาการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ได้ทำการจำลองแบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการทดลองเพื่อดูผลการทำงานที่ได้เปรียบเทียบกัน จากบล็อกไดอะแกรมของโครงงานที่นำเสนอโดยในลำดับแรกได้ทำการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบทางแบบด้านคณิตศาสตร์เบื้องต้นก่อน เพื่อจะได้มั่นใจในทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องว่ามีความถูกต้องหรือไม่อย่างไร หลังจากนั้นจะทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

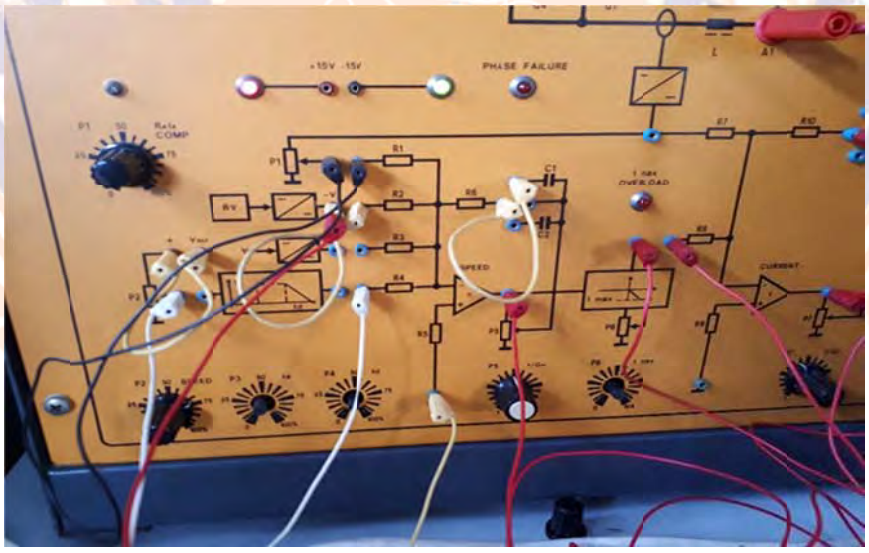
4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้าฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกพิกัดแรงดัน 1.1 kW 3,000 rpm แทคโคเจนมิเตอร์ พิกัดแรงดัน 0.75 kW 2,850 rpm ตัวควบคุมพีไอแบบอนุกรม วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน วงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล สโคป ดิจิตอลมิตเตอร์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.1-4.6

รูปที่ 4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.2 เครื่องคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค



รูปที่ 4.3 ตัวควบคุมพีไอ

รูปที่ 4.3 มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

รูปที่ 4.5 Electric Generator

รูปที่ 4.4 สโคป

4.2 การทดสอบ

4.2.1 ขั้นตอนการทดลองระบบโดยใช้โปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

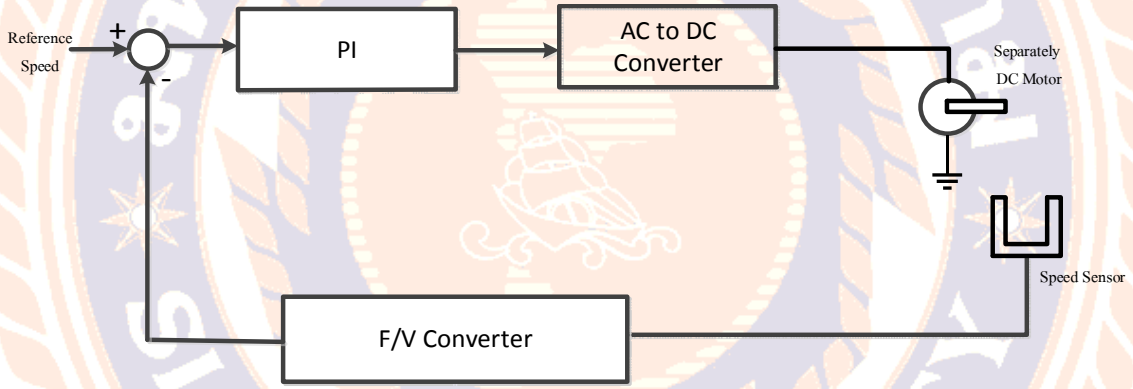
การวิเคราะห์ระบบโดยโปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถสรุปวิธีการเขียนใช้งาน ได้ดังนี้

1. เปิดโปรแกรมจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ และเข้าโปรแกรมโดยกดปุ่ม Simulink (ปุ่มด้านซ้ายของเครื่องหมาย ? หรือเลือกจากเมนู) จอจะแสดงหน้าต่าง Simulink Libraly Browser ให้บนจอ
2. เปิดไฟล์เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่ โดย File / New เลือก Model จอจะแสดงหน้าต่างสำหรับเขียนโมเดลมาให้ และให้ทำการเลื่อนหน้าต่างไปทางขวาอยู่คู่กับหน้าต่างของ Simulink Library Browser เพื่อความสะดวกในการวาดรูป
3. ทำการวาดผังไดอะแกรมที่ต้องการ โดยเลือก Block จาก Library ต่าง ๆ เมื่อพบแล้วให้กดเมาส์ที่รูปแล้วลากมายังหน้าต่างที่จะทำการวาด หลังจากนั้นให้ทำการลากเส้นเชื่อมต่อระบบให้ครบ
4. ให้กำหนดชื่อบล็อกตามรูป และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทุกบล็อก โดยดับเบิลคลิกที่บล็อกและกำหนดค่าให้ตรงตามที่ต้องการ

5. ดูผลลัพธ์เอาต์พุตได้ โดยสั่งที่เมนู Simulation / Start แล้วทำการดับเบิลคลิกที่บล็อกเอาต์พุต คือ Scope หลังจากนั้นให้กดปุ่ม Autoscale หรือปุ่มรูปกล้องส่องทางไกล เพื่อปรับภาพให้เหมาะสม และสามารถทำการปรับค่าสเกลในแนวนอน เพื่อดูรูปสัญญาณให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ โดยกดที่ปุ่ม Parameters และให้กำหนดค่าช่วงเวลาของแกนในแนวนอน (Time range) ตามต้องการ

หมายเหตุ

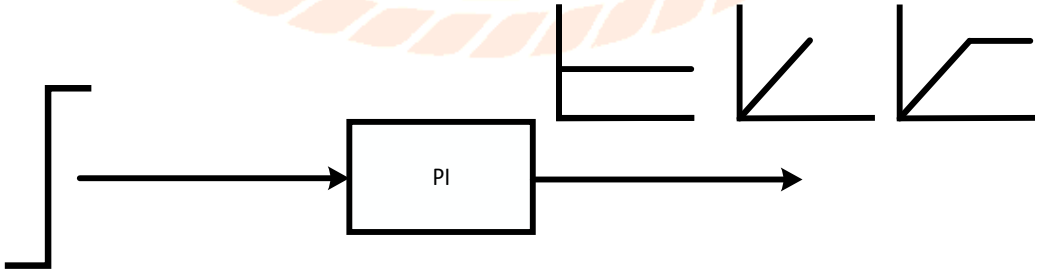
1. บล็อก Sum สามารถเลือก / เพิ่ม เครื่องหมาย + - ได้โดยดับเบิลคลิกที่รูปบล็อก และเปลี่ยนเครื่องหมายโดยใส่ที่ช่อง List of signs
2. การหมุนรูป ทำได้โดยกดปุ่ม Ctrl + R



รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ด้วยพีไอ

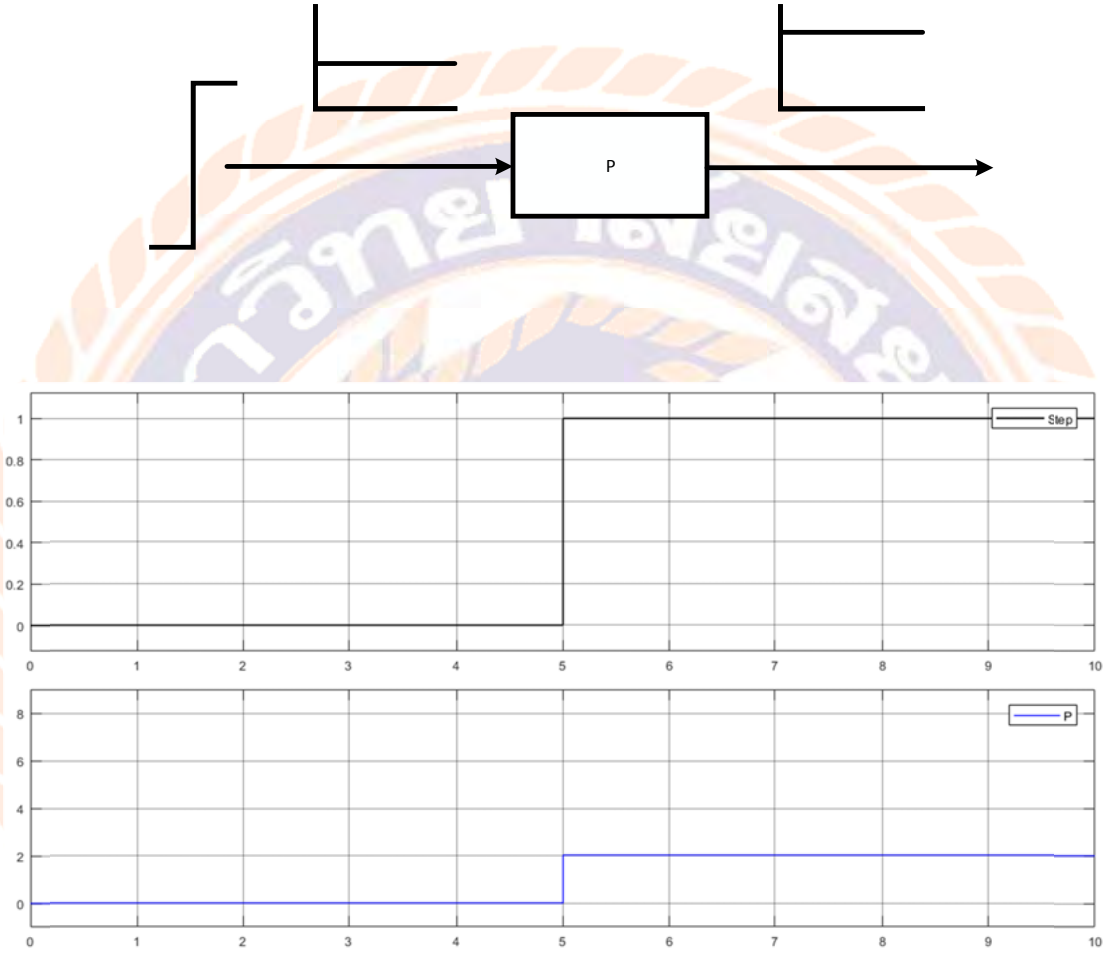
จากรูปที่ 4.7 ซึ่งจะจำลองได้ 2 กรณีดังนี้

4.2.2 ลูปเปิด



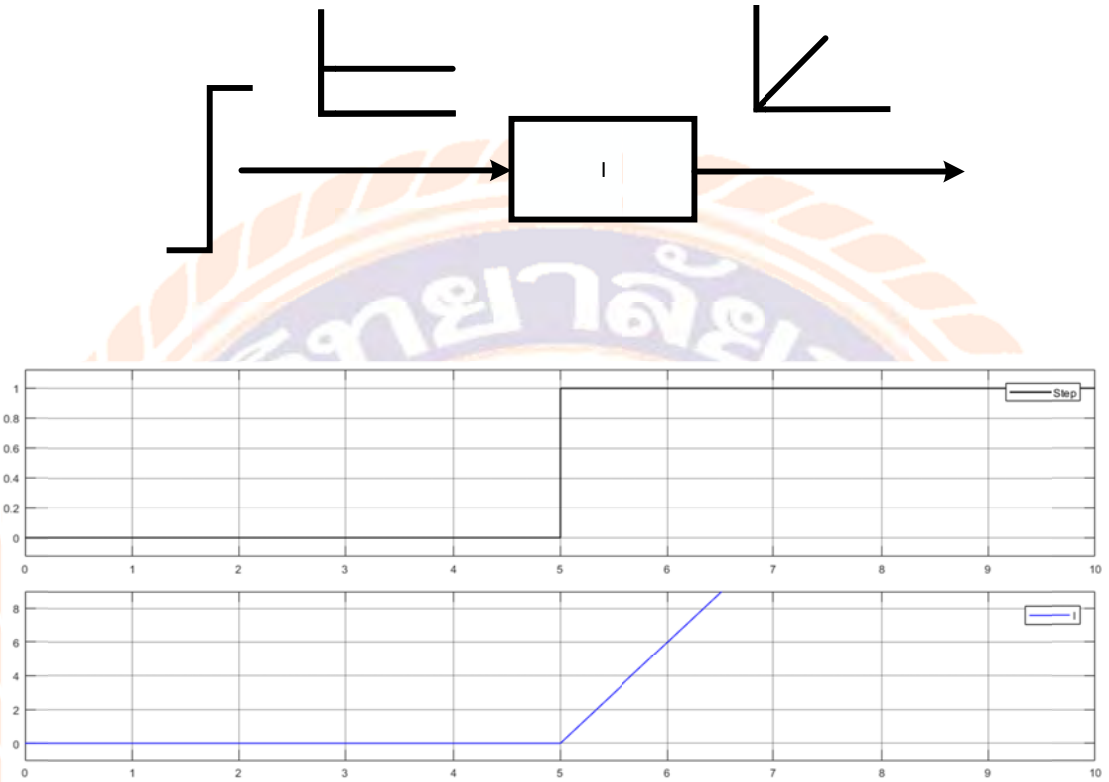
รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมลูปเปิด

กรณีที่ 1 เมื่อป้อนอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยให้กับตัวควบคุมแบบพี เมื่อกำหนดให้อัตราการขยาย Kp=2ได้เอาต์พุตเป็นดังรูปที่ 4 9



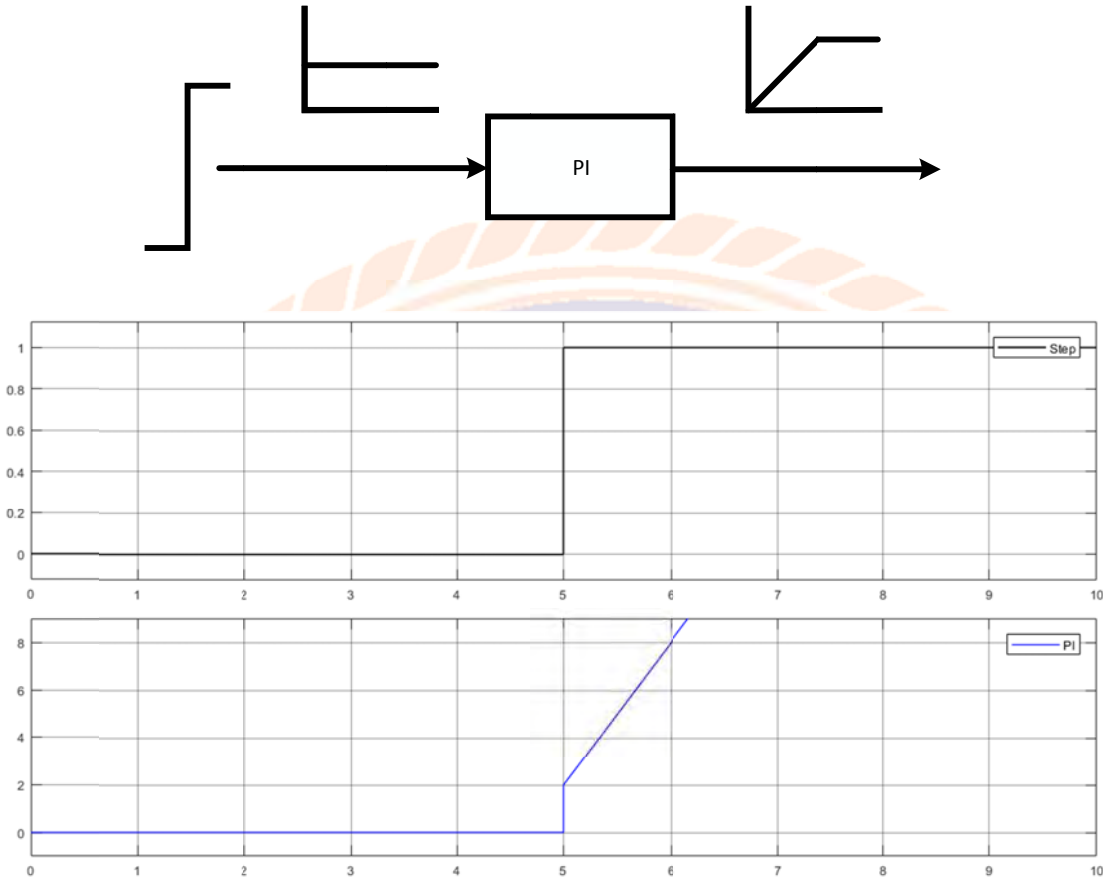
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของอินพุตและเอาต์พุตกรณีตัวควบคุมพีอย่างเดียว

กรณีที่ 2 เมื่อป้อนอินพุตฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยให้กับตัวควบคุมไออย่างเดียวได้ความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตเป็นดังรูปที่ 4.10 เมื่อกำหนดให้ Ki=6



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นของอินพุตและเอาต์พุตกรณีตัวควบคุมไออย่างเดียว

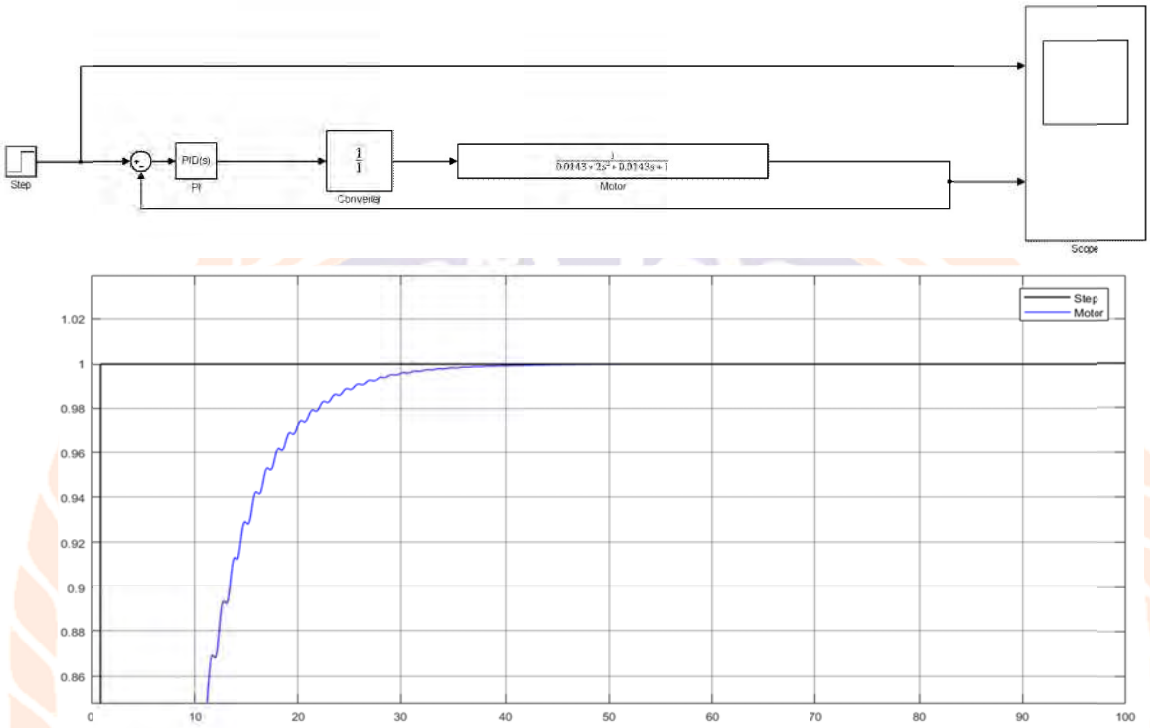
กรณีที่ 3 เมื่อป้อนอินพุตฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยให้กับตัวควบคุมพีไอได้ความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตเป็นดังรูปที่ 4.11 เมื่อกำหนดให้ Kp=2 และ Ki=6



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นของอินพุตและเอาต์พุตกรณีตัวควบคุมไอพี

4.2.3ลูปปิด

ระบบควบคุมแบบปิด กำหนดให้อินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ผ่านตัวควบคุมพีไอ วงจรเอซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ โดยนำเอาต์พุตของมอเตอร์ที่เป็นความเร็วรอบป้อนกลับมายังอินพุต เมื่อกำหนดให้ K_p= 9.99e-05 และ K_I = 1869 และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นของอินพุตและเอาต์พุตกรณีตัวควบคุมพีไอในลูปปิด

4.3 ผลการทดสอบ

4.3.1 การทดสอบระบบ

จากรูปที่ 3.1 และรูปที่ 4.1 ทำการทดสอบระบบในกรณีไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุมในระบบ หาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่จุดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบระบบกรณีไม่มีตัวควบคุม

Vs (V)	1.38	1.55	1.73	1.96	2.14	2.32
Vm (V)	20	30	44	62	74	86
N (rpm)	200	400	600	800	1000	1200
Vn (V)	-0.82	-1.34	-1.9	-2.65	-3.18	-3.78

Vs (V)	2.51	2.69	2.92	3.11	3.35	
Vm (V)	100	114	126	140	155	
N (rpm)	1400	1600	1800	2000	2200	
Vn (V)	-4.35	-4.9	-5.54	-6.06	-6.67	

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบระบบโดยใช้ตัวควบคุมพี

Vs (V)	1.62	2.38	3	3.7	4.45	5
Vm (V)	17	30	45	58	73	85
N (rpm)	200	400	600	800	1000	1200
Vn (V)	-0.7	-1.4	-1.94	-2.5	-3.1	-3.73

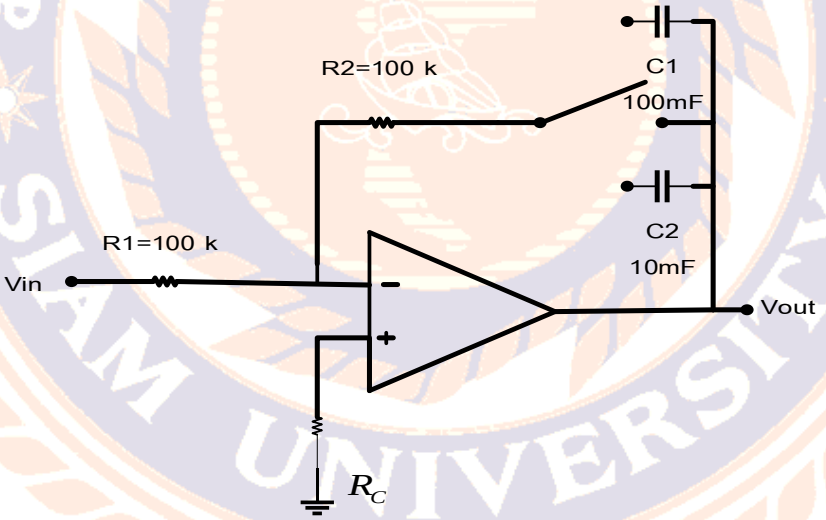
Vs (V)	5.8	6.45	7.2	7.74		
Vm (V)	100	113	12	138		
N (rpm)	1400	1600	1800	2000		
Vn (V)	-4.33	-4.9	-5.51	-6.06		

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

Vs (V)	0.69	1.34	1.95	2.54	3.16	3.72
Vm (V)	15	31	45	59	73	86
N (rpm)	200	400	600	800	1000	1200
Vn (V)	-0.69	-1.35	-1.96	-2.56	-3.18	-3.74

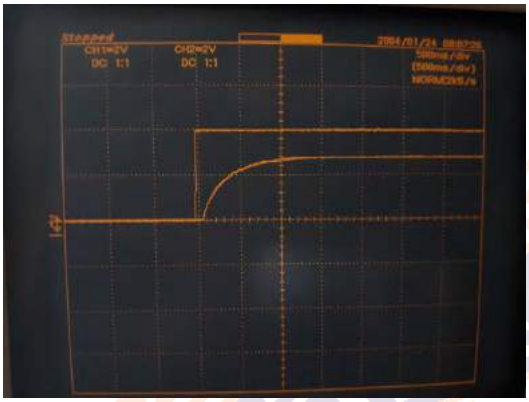
Vs (V)	4.31	4.88	5.45	6.02	6.61	
Vm (V)	100	114	125	140	155	
N (rpm)	1400	1600	1800	2000	2200	
Vn (V)	-4.35	-4.92	-5.5	-6.06	-6.68	

โดยที่วงจรตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13

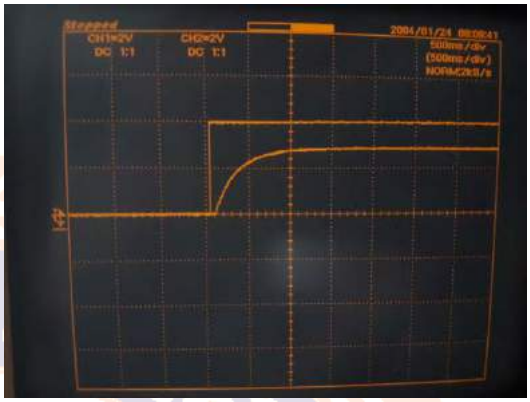


รูปที่4.11 วงจรตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการทดลอง

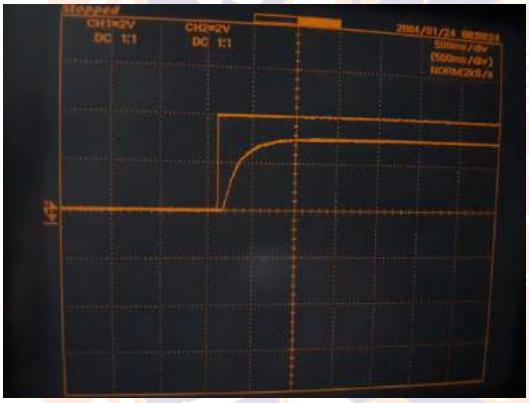
ได้ทำการทดสอบระบบโดยป้อนสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดให้กับระบบ โดยปรับค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีอย่างเดียวที่มีค่าต่าง ๆ กัน ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต แสดงในรูปที่ 4.14



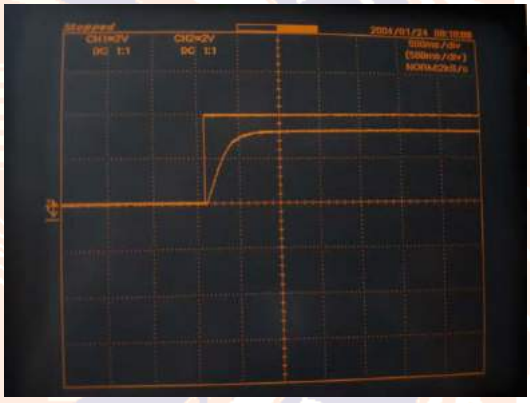
K_P=1



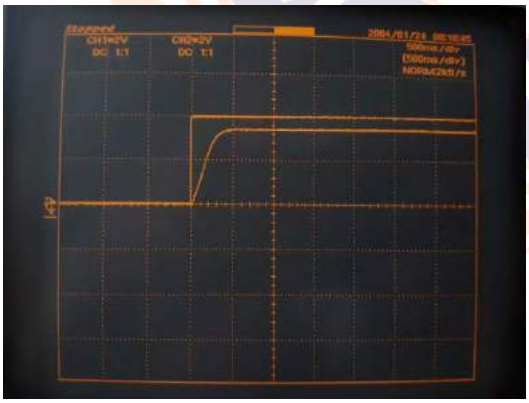
K_P=1.1



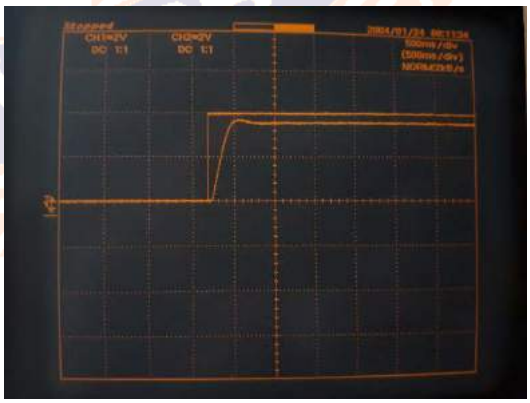
K_P=1.25



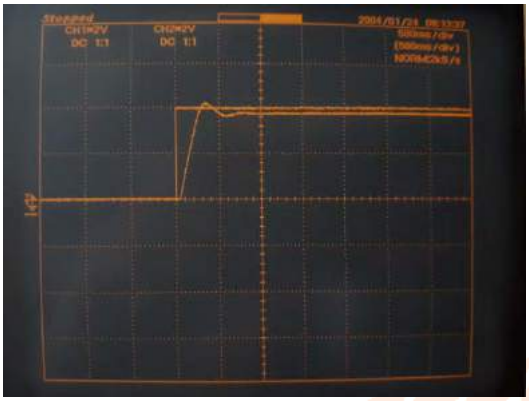
K_P=1.4



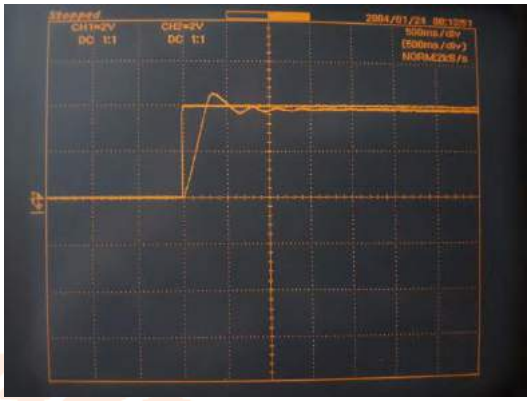
K_P=1.7



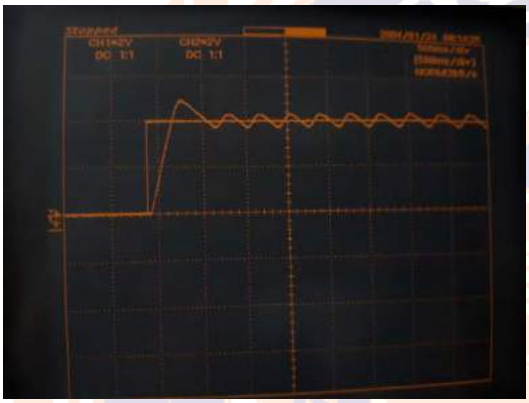
K_P=2



K_P=2.5



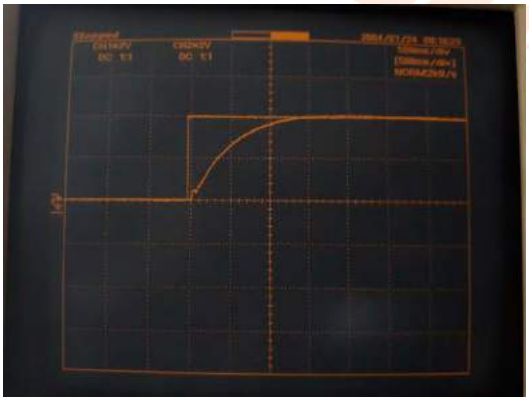
K_P=3

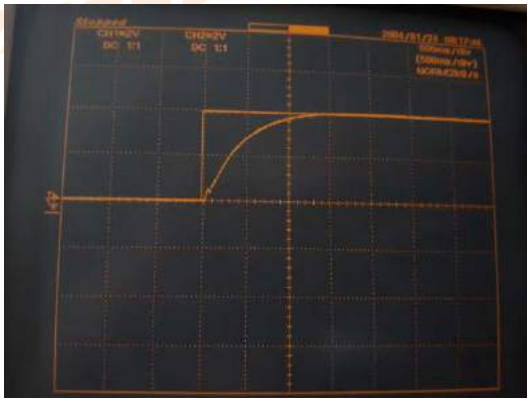


K_P=3.5

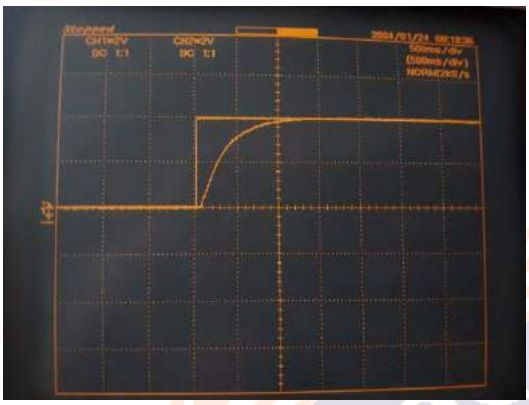
รูปที่ 4.12 ความสมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของระบบที่ค่าอัตราการขยายค่าต่าง ๆ กัน

ทำการทดสอบระบบโดยป้อนสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดให้กับระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยปรับค่าอัตราการขยาย K_p ที่มีค่าต่าง ๆ กันตามรูปที่แสดงไว้ ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต แสดงในรูปที่ 4.15 โดยกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุ C2 = 10 mF

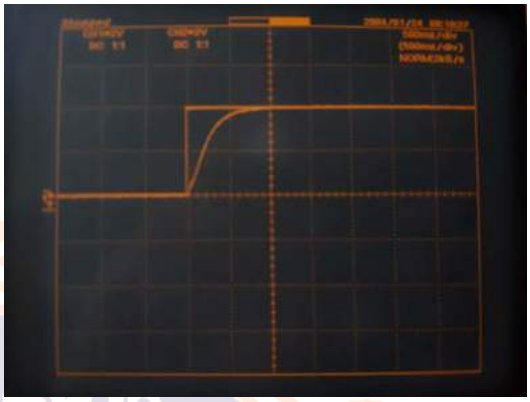




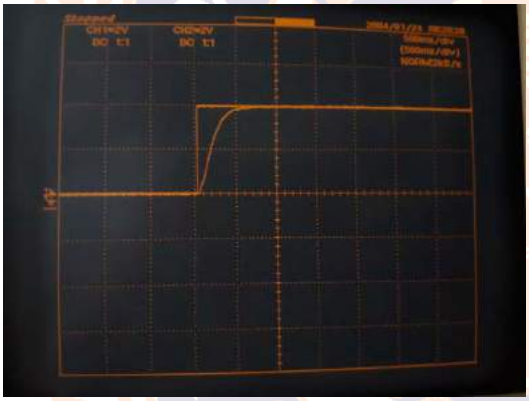
K_i=1



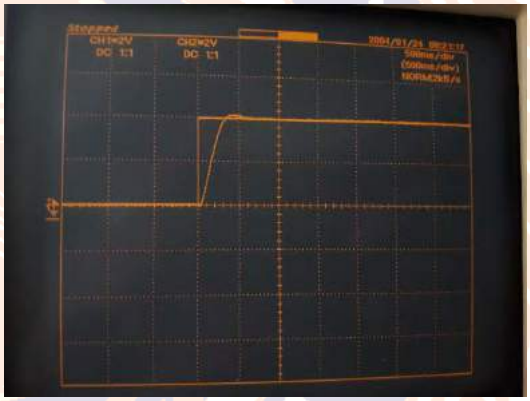
K_i=1.1



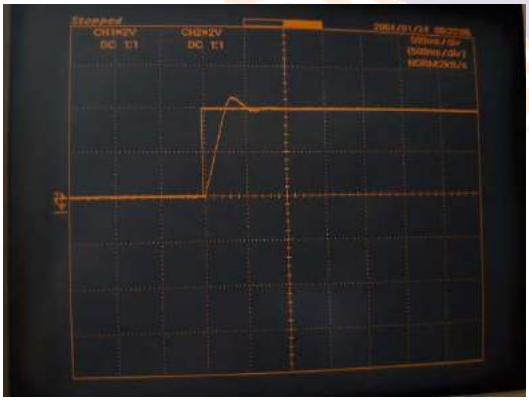
K_i=1.25



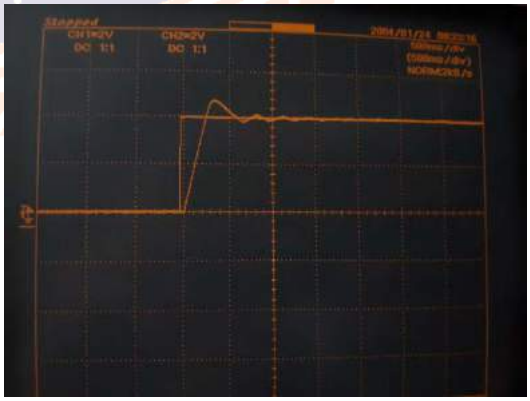
K_i=1.4



K_i=1.7

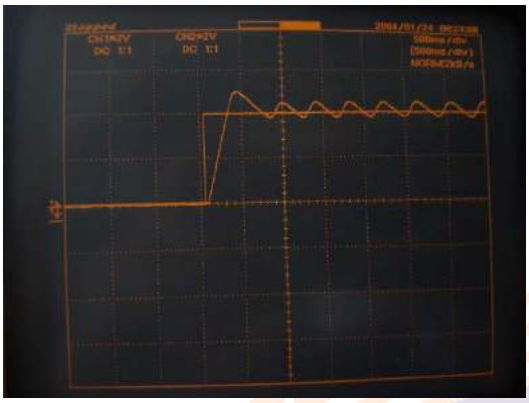


K_i=2



K_i=2.5

K_i=3



K_i=3.5

รูปที่ 4.13 ความสมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของระบบปรับค่า K_i ต่าง ๆ กัน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลของโครงงาน

5.1.1 ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อจำลองแบบการทำงานของระบบควบคุม

5.1.2 กรณี P น้อยมากจะไม่ Overshoots แต่ก็จะไม่เข้า Setpoint

5.1.3 กรณี P มากขึ้นมาอีก จะเกิดการ Overshoots และก็จะเข้า Setpoint

5.1.4 กรณี P มาก ๆ จะเกิดการ ออกซิเลต และจะไม่เข้า Setpoint

5.1.5 แก้ไขโดยการเพิ่มตัวควบคุม I เข้าไป

5.1.6 ผลการทดสอบได้ผลใกล้เคียงกับที่คาดการณ์ไว้

5.2 ปัญหาที่พบในการทำโครงงาน

5.2.1 อุปกรณ์มีความทนทานต่อแรงดันที่จำกัด ดังนั้นเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่เกินอาจทำให้อุปกรณ์เหล่านี้เสียหาย ซึ่งไม่สามารถที่จะรู้ได้และอาจทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เสียหายตามไปด้วย ดังนั้นจึงเสียเวลาในการตรวจเช็ควงจร

5.2.2 ขาดความเข้าใจระบบโดยรวม จึงทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน

5.3 วิธีแก้ไขและข้อเสนอแนะ

5.3.1 การเลือกอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในส่วนผลการทดลอง ดังนั้นควรที่จะศึกษาและทำการบันทึกค่าของอุปกรณ์ที่มีผลถูกต้องตรงตามทฤษฎี เพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการทดลอง

5.3.2 ศึกษาระบบให้เข้าใจก่อนลงปฏิบัติจริง

บรรณานุกรม

จิรายุทธ แก้วอาสา, ประมวญ คงสาคร, สุชาติ โพธิ์ศรี และชัยณรงค์ เย็นศิริ. (2549). ชุดสาธิตการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิดบนจอคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Visual Basic. *วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 2(4), 25-30.

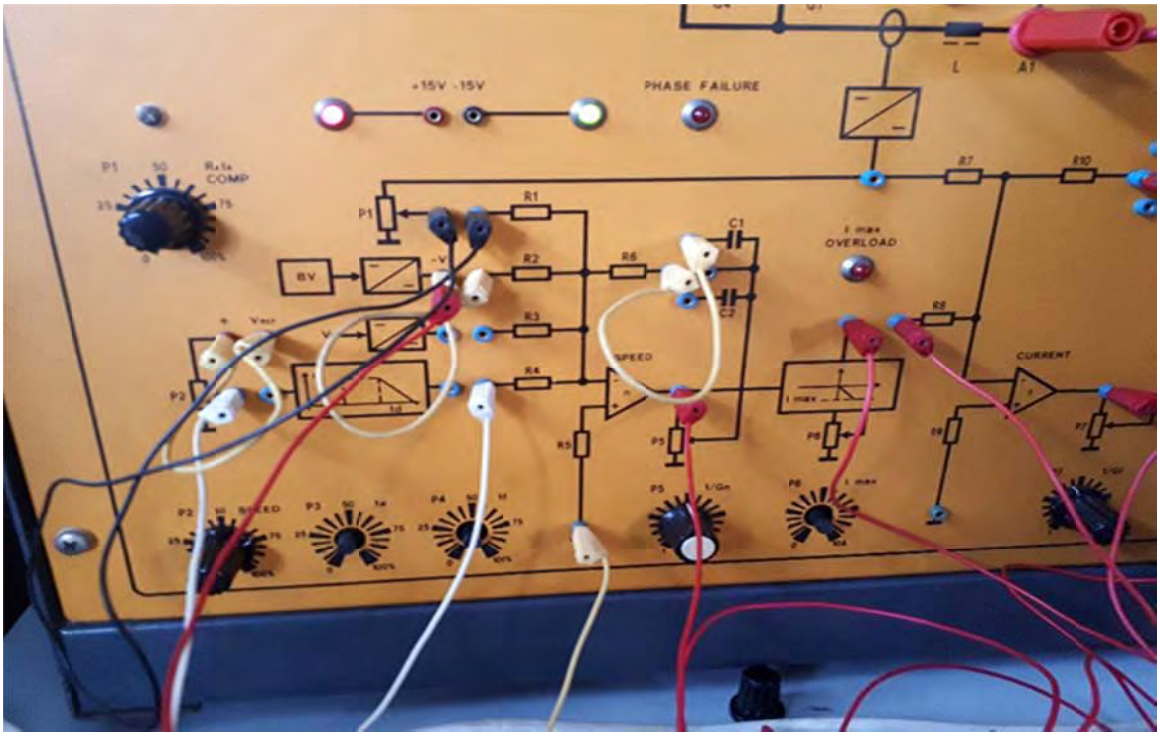
บัญชา ศรีวิโรจน์, วันชัย ทรัพย์สิงห์ และจีระศักดิ์ วงศา. (2556). การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยธนบุรี*, 7(13), 7-18.

รพีพงศ์ รัตนวรหิรัญกุล1, จิตสราญ สีกู่กา, ศราวุฒิ สุพรรณราช และเพิ่มพล กุดจอมศรี. (2556). การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมที่สุดสาหรับระบบเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ. *Journal of Information Science and Technology*, 4(1), 21-26.

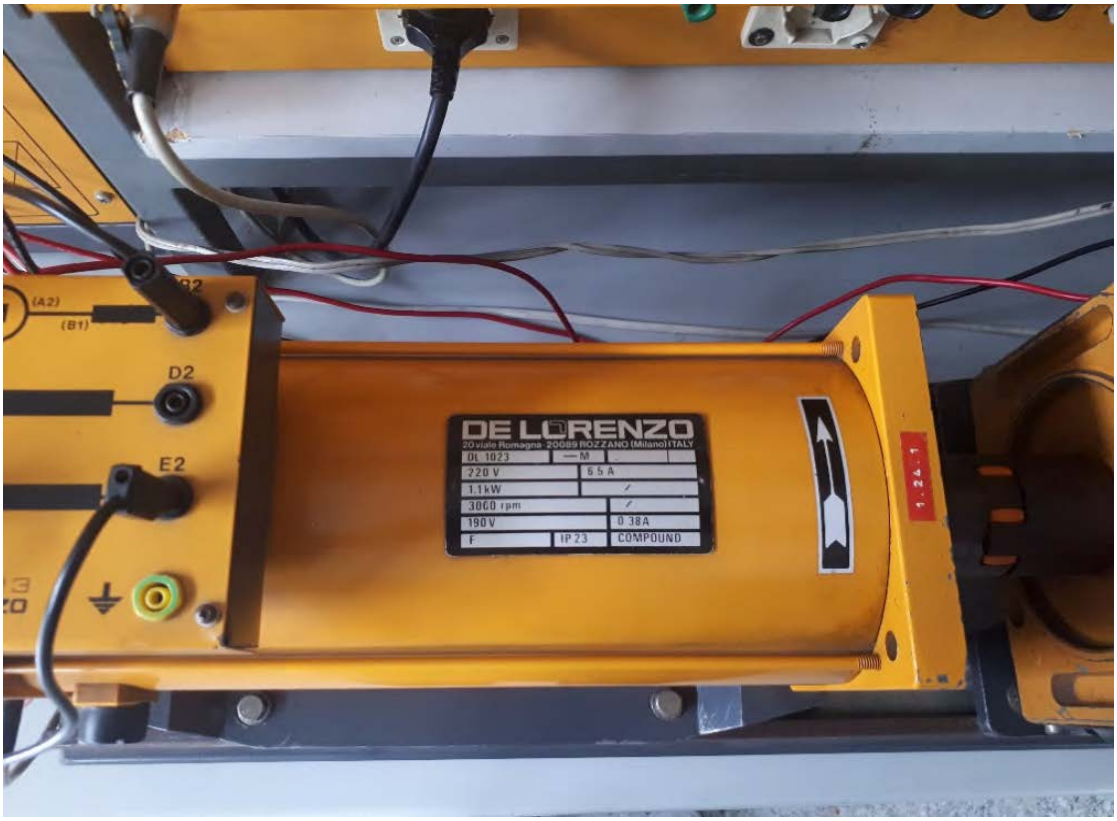
ราเชณ คณะนา และ อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์. (2562). การออกแบบวงจรตัวควบคุมพีไอดีเอแบบอเนกประสงค์ และการประยุกต์ใช้งาน. *SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์*, 5(1), 41-48.

ภาคผนวก

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ตัวควบคุมพีไอ



มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

Electric Generator

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายชนะชัย คะณะวาปี

วันเดือนปีเกิด 13 กันยายน 2536

โทร. 0652354561

วุฒิการศึกษา

2552-2555: ปวช. สาขาไฟฟ้ากำลัง เทคโนโลยีหมู่บ้านครู

2555-2562: ปริญญาตรี กำลังศึกษา วศ.บ.วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (ไฟฟ้ากำลัง) มหาวิทยาลัยสยาม

ตำแหน่ง นักศึกษา

ทุนการศึกษา กองทุนเงินกู้ยืมเพื่อการศึกษาที่ผูกกับรายได้ในอนาคต (กรอ.)

ผลงานทางวิชาการ

ชนะชัย คะณะวาปี. (เมษายน 2562). การศึกษาการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ