การปรับปรุงผลตอบสนองทรานเซียนของระบบควบคุมความเร็ว ดีซีมอเตอร์ โดยการควบคุมแบบหลายลูป

TRANSIENT RESPONSE IMPROVEMENT OF DC MOTOR SPEED CONTROL WITH MULTIPLE LOOPS

กีรติ พิฑูรพงศ์

KEERATI PITOONPONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-388-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงผลตอบสนองทรานเซียนของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ โดยการควบคุมแบบหลายลูป

TRANSIENT RESPONSE IMPROVEMENT OF DC MOTOR SPEED CONTROL WITH MULTIPLE LOOPS

T032884

กีรติ พิฑูรพงศ์

KEERATI PITOONPONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-388-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 32884
วัน, เดือน, ปี 14 มิ.ย. 2542

TRANSIENT RESPONSE IMPROVEMENT OF DC MOTOR SPEED CONTROL WITH MULTIPLE LOOPS

KEERATI PITOONPONG

A THESIS SUBMITTED IN PERTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELETRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1999

ISBN 974-622-388-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงผลตอบสนองทรานเซียนของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์โดยการควบคุมแบบหลายลูป
นักศึกษา	นายกีรติ พิฑูรพงศ์
รหัสประจำตัว	37061171
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการพัฒนาระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจากระบบชนิดคาสเคส 2 ลูปที่ใช้กันทั่วไปซึ่งประกอบด้วยลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในและลูปควบคุมความเร็วอยู่ภายนอก โดยนำเสนอระบบควบคุมความเร็วคาสเคส 3 ลูปที่ประกอบไปด้วยลูปควบคุมโวลท์เตจ ลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมความเร็วต่อคาสเคสเป็นชั้นต่อกัน โดยตัวควบคุมทั้งหมดใช้แบบ PI ซึ่งออกแบบโดยใช้วิธีโมดูลัสออปติมัม (Modulus optimum) และซิมเมตริคอลออปติมัม (Symmetrical optimum) การเพิ่มลูปควบคุมภายในสุดชนิดโวลท์เตจเข้าไปช่วยให้ระบบควบคุมความเร็วแบบ 3 ลูปมีผลการตอบสนองต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลดได้ดีกว่าแบบ 2 ลูป โดยผลการทดลองเปรียบเทียบจากระบบที่นำเสนอเปรียบเทียบกับระบบแบบเดิมแสดงให้เห็นว่าเวลาในการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบดีขึ้น 28.8% และต่อสเตปโหลดดีขึ้น 31% และยังลดโอเวอร์ชูทของระบบจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดลง 32.5% นอกจากนี้ถ้าในลูปควบคุมความเร็วของระบบที่นำเสนอใช้ตัวควบคุมแบบ PID แต่ลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจยังคงใช้ตัวควบคุมแบบ PI จากผลการทดลองเปรียบเทียบจากระบบที่นำเสนอกับระบบแบบเดิม สังเกตได้ว่าเวลาในการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบดีขึ้น 64.3% และต่อสเตปโหลดดีขึ้น 65.5% และยังลดโอเวอร์ชูทของระบบจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดลง 69.3% อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Transient Response Improvement of DC Motor Speed Control with Multiple Loops.
Student	Mr. Keerati Pitoonpong
Student ID.	37061171
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Dr. Nontawat Chuladaycha
Thesis Co-advisor	Assoc.Prof.Dr. Yothin Prempraneerach

ABSTRACT

This thesis presents development of permanent magnet DC-motor speed control system. The typical speed control system consists of two loop controllers, i.e. current and speed. This thesis presents three-loop speed control system, which consists of voltage controller, current controller and speed controller. The PI controller of each loop is designed by Modulus and Symmetrical optimum method. By adding voltage control loop into the control system, the transient response to the step input and step load in comparing with the two-loop speed control system has improved. According to experimental results, the settling time of the system response to the step input and step load are improved by 28.8% and 31% respectively. Moreover, the overshoot of system with step load is reduced by 32.5%. If the speed controller of three-loop system is replaced by PID type controller, the settling time of system response to the step input and step load are improved by 64.3% and 65.5% respectively. Therefore, the overshoot of system response to step load is reduced by 69.3%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ และการตรวจสอบจาก ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ และ รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อ.วันชัย ริ้วรุจา และ อ.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดและการออกแบบวงจร

ขอขอบคุณ อ.วิชิต ศิริโชติ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านวิธีการทดสอบระบบ

ขอขอบคุณ คุณสราวุฒิและคุณธนิน ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

กีรติ พิฑูรพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................II
กิตติกรรมประกาศ....................III
สารบัญ....................IV
สารบัญตาราง....................VI
สารบัญภาพ....................VII
สัญญลักษณ์....................XII
บทที่ 1 บทนำ....................1

บทที่ 2 ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร....................4
2.1 หลักการทำงานพื้นฐานของดีซีมอเตอร์....................4
2.2 ชนิดของดีซีมอเตอร์....................4
2.3 สมการทางคณิตศาสตร์และทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของดีซีมอเตอร์....................6
2.4 ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์....................11
2.5 การวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของดีซีมอเตอร์....................13

บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุม....................17
3.1 ระบบที่เหมาะสมโดยทั่วไป....................17
3.2 การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม....................20
3.3 การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม....................24
3.4 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่มีตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดใหญ่....................27
3.5 การแก้ไขโอเวอร์ชูทจากการออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม....................29
3.6 การตอบสนองของระบบต่อสิ่งรบกวนภายนอก....................31
3.7 การแบ่งระบบออกเป็นส่วนย่อย....................33
3.8 วงจรของตัวควบคุม....................34
3.9 ระบบของดีซีมอเตอร์....................37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบหลายลูป....40
4.1 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบสองลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI....41
4.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI....49
4.3 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปความเร็ว....58
4.4 สรุปผลการออกแบบระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์....63

บทที่ 5 การทดลองระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์....64
5.1 การทดลองในด้านการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วต่อสเตปอินพุท....66
5.2 การทดลองในด้านการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วต่อสเตปโหลด....66
5.3 รูปแบบการทดลองระบบควบคุมความเร็ว....67
5.4 ผลการทดลองของระบบที่ 1....68
5.5 ผลการทดลองของระบบที่ 2....72
5.6 ผลการทดลองของระบบที่ 3....76
5.7 ผลการทดลองของทั้งสามระบบ....80

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์....81

บรรณานุกรม....85

ภาคผนวก....87

ประวัติผู้เขียน....90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 สรุปค่าคงที่ทางเวลาของการประมาณลูปควบคุมให้เป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง..................34
4.1 สรุปผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์..................63
5.1 ผลการตอบสนองต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลดของระบบควบคุมความเร็ว
ดีซีมอเตอร์จากการทดลอง..................80
6.1 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบจากการจำลองระบบ
ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการทดสอบระบบจริง..................81
6.2 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบจากการจำลองระบบ
ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการทดสอบระบบจริง..................82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 แสดงสัญลักษณ์ของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร.....5
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและกระแสที่ไหลผ่านอาร์มาเจอร์.....5
2.3 แสดงวงจรทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์.....6
2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์.....8
2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์ในรูปของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง และอินทิเกรเตอร์.....9
2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์อย่างง่าย.....10
2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของทาโคเจนเนอร์เรเตอร์.....12
2.8 แสดงการใช้งานทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ในการควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์.....12
2.9 แสดงการวัดค่าความต้านทานของดีซีมอเตอร์.....13
2.10 แสดงการวัดค่าคงที่ทางเวลาทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์.....14
2.11 แสดงการวัดค่าคงที่ทางเวลาเชิงกลของดีซีมอเตอร์.....14
2.12 แสดงการวัดค่าคงที่แรงดันย้อนกลับของดีซีมอเตอร์.....15
2.13 แสดงตัวนำขดเป็นวงอยู่ภายในสนามแม่เหล็ก.....15
3.1 แสดงระบบควบคุมแบบปิด.....18
3.2 แสดงลักษณะการตอบสนองในเชิงความถี่ของระบบที่เหมาะสม.....19
3.3 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ I ที่ออกแบบโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม.....20
3.4 แสดงการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีโมดูลัส ออปติมัม.....21
3.5 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม.....22
3.6 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ออกแบบโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม.....23
3.7 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบโดยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม.....24
3.8 แสดงลักษณะอัตราขยายของระบบเปิดในเชิงความถี่.....25
3.9 แสดงการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบที่ใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ซิมเมตริคอลออปติมัม.....26
3.10 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ออกแบบโดยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม.....27
3.11 แสดงระบบที่มีตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดใหญ่.....28

เอกสารนี้เป็นของ... เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3.12 แสดงการเพิ่มตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูทต่อสเตปอินพุท.....29
3.13 แสดงการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบที่ใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม และเพิ่มตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูท.....30
3.14 แสดงระบบที่ให้อินพุทเป็น 0 เพื่อพิจารณาผลตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอก (Z).....31
3.15 แสดงการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกอย่างทันทีทันใดของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีโมดูลัสออปติมัม.....32
3.16 แสดงการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกอย่างทันทีทันใดของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีซิมเมตริคอลออปติมัม.....32
3.17 แสดงระบบที่ใช้ตัวควบคุม 2 ตัว.....33
3.18 แสดงการสังเคราะห์ตัวควบคุม PI โดยใช้ออปแอม[3,5].....34
3.19 แสดงการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID โดยใช้ออปแอม[3].....35
3.20 แสดงวงจรสมูทติ้ง[1,11].....36
3.21 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการจ่ายโวลท์เตจให้กับส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์.....37
3.22 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและสัญญาณที่นำไปใช้งาน.....38
3.23 แสดงระบบของดีซีมอเตอร์.....39
4.1 แสดงระบบของดีซีมอเตอร์.....40
4.2 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสองลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI.....41
4.3 แสดงการพิจารณาโวลท์เตจย้อนกลับให้เป็นการรบกวนจากภายนอก.....41
4.4 แสดงลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสองลูป.....42
4.5 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสองลูป.....44
4.6 แสดงลูปควบคุมความเร็วที่มีลูปควบคุมกระแสที่ประมาณเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งอยู่ภายใน.....45
4.7 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสองลูปที่มีตัวสมูทติ้ง.....46
4.8 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมแบบสองลูปต่อสเตปอินพุท (a) และสเตปโหลด (b)..46
4.9 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสองลูป.....48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.10 แสดงภาพถ่ายของวงจรจริงของตัวควบคุมในลูปกระแสและตัวควบคุมในลูปความเร็ว ในแผงวงจรเดียวกัน....48
4.11 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI....49
4.12 แสดงลูปควบคุมโวลท์เตจ....50
4.13 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมโวลท์เตจของระบบควบคุมแบบสามลูป....51
4.14 แสดงลูปควบคุมกระแสที่มีลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายใน....52
4.15 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI สำหรับลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสามลูป....53
4.16 แสดงระบบควบคุมความเร็วที่มีลูปควบคุมกระแสและโวลท์เตจอยู่ภายใน....54
4.17 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปที่มีวงจรสมูทติ้ง....55
4.18 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมแบบสามลูปต่อสเตปอินพุท (a) และสเตปโหลด (b)....56
4.19 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสามลูป....57
4.20 แสดงภาพถ่ายของวงจรจริงของตัวควบคุมในลูปโวลท์เตจ, ลูปกระแสและลูปความเร็ว....58
4.21 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปควบคุมความเร็ว....58
4.22 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปที่มีตัวสมูทติ้งโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปควบคุมความเร็ว....59
4.23 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปควบคุมความเร็วต่อสเตปอินพุท (a) และสเตปโหลด (b)....60
4.24 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PID ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสามลูป....62
4.25 แสดงภาพถ่ายของวงจรจริงของตัวควบคุมในลูปโวลท์เตจ, ลูปกระแสและลูปความเร็ว โดยตัวควบคุมในลูปความเร็วเป็นแบบ PID....62
5.1 ลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบ 2 ลูป....64

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ... ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

5.2 ลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบ 3 ลูป.. 65
5.3 ภาพถ่ายระบบที่ใช้ในการทดลอง..65
5.4 แสดงดีซีมอเตอร์และโหลดที่ต่อตัวคู่ควบเข้าด้วยกัน...67
5.5 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 1 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หยุดนิ่ง
ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที..68
5.6 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 2 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1500 รอบต่อนาที..........69
5.7 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 3 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที
และกลับมายังที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที..69
5.8 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 4 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด..........................70
5.9 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 5 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 75% ของพิกัดโหลด............................70
5.10 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 6 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 25% ของพิกัดโหลด............................71
5.11 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 1 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หยุดนิ่ง
ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที..72
5.12 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 2 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1500 รอบต่อนาที.........73
5.13 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 3 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที
และกลับมายังที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที..73
5.14 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 4 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด..........................74
5.15 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 5 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน
ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 75% ของพิกัดโหลด............................74

เอกสารนี้เป็น...ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

5.16 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 6 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 25% ของพิกัดโหลด......75
5.17 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 1 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หยุดนิ่ง ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที......76
5.18 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 2 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1500 รอบต่อนาที......77
5.19 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 3 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน ที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที และกลับมายังที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที......77
5.20 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 4 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด......78
5.21 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 5 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 75% ของพิกัดโหลด......78
5.22 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 6 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุน ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 25% ของพิกัดโหลด......79
6.1 แสดงการเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปอินพุทของระบบทั้งสาม......82
6.2 แสดงการเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสาม......83
6.3 แสดงการเปรียบเทียบโอเวอร์ชูทจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสาม จากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์......83
6.4 แสดงการเปรียบเทียบโอเวอร์ชูทจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสาม จากระบบจริง......84
7.1 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านของส่วนป้อนกลับโวลท์เตจและกระแส......88
7.2 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านของส่วนป้อนกลับความเร็วจากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์......88
7.3 แสดงตัวขับดีซีมอเตอร์หรือไดร์ฟเวอร์......89
7.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมภายในของวงจรขับดีซีมอเตอร์[14]......89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญลักษณ์

i_a	:	กระแสที่ไหลเข้าอาร์มาเจอร์
p_1,p_2	:	ค่าโพลทั้งสองของดีซีมอเตอร์
t_f	:	แรงบิดต้านจากความฝืด
t_g	:	แรงบิดที่เกิดจากดีซีมอเตอร์
t_L	:	แรงบิดต้านจากโหลด
t_m	:	แรงบิดที่ต้านการหมุนของดีซีมอเตอร์
t_r	:	ค่าไรซ์ไทม์
t_s	:	ค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว
v_a	:	โวลท์เตจที่จ่ายให้กับดีซีมอเตอร์
v_b	:	โวลท์เตจย้อนกลับของดีซีมอเตอร์
v_g	:	ระดับสัญญาณที่ได้จากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์
A_a	:	ค่าอัตราขยายสัญญาณของไดร์ฟเวอร์
A_{fc}	:	ค่าอัตราขยายสัญญาณของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านของลูปควบคุมกระแส
A_{fv}	:	ค่าอัตราขยายสัญญาณของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านของลูปควบคุมโวลท์เตจ
A_{fw}	:	ค่าอัตราขยายสัญญาณของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านของลูปควบคุมความเร็ว
A_m	:	ค่าอัตราขยายสัญญาณของส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์
A_r	:	ค่าอัตราขยายสัญญาณของตัวควบคุม
A_s	:	ค่าอัตราขยายสัญญาณของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง
C_n	:	ค่าตัวเก็บประจุใดๆ
R_n	:	ค่าตัวต้านทานใดๆ
D	:	ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดวิสคอร์ส
$F_w(s)$	:	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบควบคุมแบบปิดหรือระบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$F_o(s)$	:	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของตัวควบคุมและองค์ประกอบของระบบ
$G_m(s)$	:	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของดีซีมอเตอร์
$I_a(s)$	:	กระแสที่ไหลเข้าอาร์มาเจอร์ในโดเมน s
J	:	โมเมนท์ของแรงเฉื่อยทั้งหมด
J_L	:	โมเมนท์ของแรงเฉื่อยจากโหลด
J_m	:	โมเมนท์ของแรงเฉื่อยในดีซีมอเตอร์
K_E	:	ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับหรืออีเอ็มเอฟโวลท์เตจสำหรับดีซีมอเตอร์
K_T	:	ค่าคงที่แรงบิดสำหรับดีซีมอเตอร์
K_{Tg}	:	ค่าคงที่ของระดับสัญญาณต่อความเร็วรอบของทาโคเจนเนอร์เรเตอร์
L_a	:	ค่าความเหนี่ยวนำภายในของดีซีมอเตอร์
R , R_L	:	ค่าความต้านทานภายในของดีซีมอเตอร์
T_1,T_2,T_3,T_4	:	ค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งใดๆ
T_a	:	ค่าคงที่ทางเวลาของไดร์ฟเวอร์
T_e	:	ผลรวมของค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดเล็ก
T_{fc}	:	ค่าคงที่ทางเวลาของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านของลูปควบคุมกระแส
T_{fv}	:	ค่าคงที่ทางเวลาของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านของลูปควบคุมโวลท์เตจ
T_{fw}	:	ค่าคงที่ทางเวลาของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านของลูปควบคุมความเร็ว
$T_g(s)$	:	แรงบิดที่เกิดจากดีซีมอเตอร์ในโดเมน s
T_i	:	ค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุม
$T_L(s)$	:	แรงบิดต้านจากโหลดในโดเมน s
T_o	:	ค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวอินทิเกรเตอร์
T_{sm}	:	ค่าคงที่ทางเวลาของตัวสมูทติ้ง
T_v	:	ค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณของตัวควบคุม
$V_a(s)$	:	โวลท์เตจที่จ่ายให้กับดีซีมอเตอร์ในโดเมน s
$V_b(s)$	:	โวลท์เตจย้อนกลับของดีซีมอเตอร์ในโดเมน s
$V_i(s)$	:	สัญญาณคำสั่งที่ป้อนให้ระบบควบคุม
$V_o(s)$	:	สัญญาณที่ได้จากระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z_{step}	:	สิ่งรบกวนภายนอกอย่างทันทีทันใด
θ	:	ระยะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์
τ_e	:	ค่าคงที่ทางเวลาทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์
τ_m	:	ค่าคงที่ทางเวลาเชิงกลของดีซีมอเตอร์
ω	:	ความเร็วเชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ระบบการควบคุมความเร็วของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรนิยมใช้กันทั่วไปในงานด้านอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบแขนของหุ่นยนต์ และในระบบของเครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) ดีซีมอเตอร์ที่ใช้มีทั้งแบบที่สามารถปรับเส้นแรงแม่เหล็กได้และแบบเส้นแรงแม่เหล็กคงที่ ซึ่งระบบควบคุมความเร็วสำหรับดีซีมอเตอร์แบบปรับเส้นแรงแม่เหล็กได้นั้นต้องมีแหล่งควบคุมปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจากภายนอก ส่วนดีซีมอเตอร์แบบเส้นแรงแม่เหล็กคงที่นั้นได้แก่ ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร ไม่ต้องมีการเพิ่มเติมแหล่งควบคุมปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจากภายนอก การออกแบบระบบควบคุมความเร็วจึงสะดวกและประหยัดกว่า

ระบบควบคุมความเร็วของดีซีมอเตอร์โดยทั่วไปเป็นแบบ 2 ลูป[1,2,3,4,5,6,7] ที่ประกอบด้วยลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมความเร็ว โดยตัวควบคุมของลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมความเร็วก็จะเป็นการควบคุมแบบ PI ซึ่งค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวจากการตอบสนองต่อคำสั่งแบบทันทีทันใดยังมีค่ามาก และเมื่อโหลดของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจะทำให้เกิดโอเวอร์ชูทสูง ซึ่งการนำไปใช้งานในบางกรณียังยอมรับไม่ได้

จากแนวคิดในการเพิ่มลูปควบคุมกระแสเข้าไปในลูปควบคุมความเร็วยังช่วยลดเวลาในการตอบสนองต่อคำสั่งและลดผลกระทบจากโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะของการควบคุมแบบหลายลูปซ้อนกัน[1,3] ถ้าสามารถแบ่งการควบคุมเป็นลูปควบคุมย่อยลงได้อีกก็จะช่วยลดเวลาการตอบสนองต่อคำสั่งและลดผลกระทบจากโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งการเพิ่มลูปควบคุมโวลท์เตจเข้าไปภายในลูปควบคุมกระแสก็เป็นวิธีหนึ่งในการแบ่งการควบคุมออกเป็นลูปย่อย ซึ่งจะส่งผลถึงลูปควบคุมความเร็วทำให้สามารถลดเวลาในการตอบสนองต่อคำสั่งและลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงโหลดได้

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบ 3 ลูป ที่ประกอบไปด้วยลูปควบคุมความเร็ว ลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจ โดยออกแบบตัวควบคุมแบบ PI ที่เหมาะสมและดีที่สุดของแต่ละลูปด้วยวิธีโมดูลัสและซิมเมตริคอลออปติมัม[1,3] การเพิ่มลูปควบคุมโวลท์เตจเข้าไปจะทำให้การตอบสนองของระบบดีขึ้นกว่าแบบ 2 ลูป โดยผลการทดลองจากระบบที่ออกแบบจริงแสดงให้เห็นว่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวในการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบดีขึ้น 28.8% และต่อสเตปโหลดดีขึ้น 31% และยังลดโอเวอร์ชูทของระบบจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดลง 32.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่ามิได้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ถ้าในลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมความเร็วแบบ 3 ลูปที่นำเสนอ ใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจตัวควบคุมคงเป็นแบบ PI ผล

การทดลองจากระบบที่ออกแบบจริงแสดงให้เห็นว่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวในการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบดีขึ้น 64.3% และต่อสเตปโหลดดีขึ้น 65.5% และยังลดโอเวอร์ชูทของระบบจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดลง 69.3% อีกด้วย

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกตามบทต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงลักษณะของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ดีซีมอเตอร์แบบนี้เป็นหลัก โดยจะกล่าวรวมถึงสมการทางคณิตศาสตร์และทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างโวลท์เตจที่ป้อนให้กับดีซีมอเตอร์และความเร็วเชิงมุมของดีซีมอเตอร์ ในรูปของลาปลาส-ทรานสฟอร์ม และแสดงบล็อกไดอะแกรมที่สัมพันธ์กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของดีซีมอเตอร์[8,9] เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วต่อไป

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมของระบบใดๆ ที่ประกอบไปด้วย ตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง ตัวอินทิเกรเตอร์ และค่าคงที่ใดๆให้เหมาะสม โดยพิจารณาผลจากการตอบสนองต่อสเตปอินพุทในด้านของโอเวอร์ชูทและเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยอาศัยวิธีโมดูลัสออปติมัมและซิมเมตริคอลออปติมัมในการออกแบบตัวควบคุม ตลอดจนวิธีพิจารณาลูปควบคุมที่ออกแบบด้วยสองวิธีดังกล่าวให้เป็นเพียงตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบหลายลูปซ้อนกัน และการสังเคราะห์วงจรของตัวควบคุมแบบ PI และ PID และวงจรสมูทติ้ง โดยใช้วงจรรวมออปแอม[3,10,11]

บทที่ 4 กล่าวถึงการนำวิธีการออกแบบในบทที่ 3 มาใช้กับระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ ที่ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ โดยออกแบบระบบควบคุมความเร็วเป็น 3 ระบบเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้แก่

1. แบบ 2 ลูปที่มีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งหมด

2. แบบ 3 ลูปที่มีลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งหมด

3. แบบ 3 ลูปที่มีลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งหมด ยกเว้นตัวควบคุมในลูปควบคุมความเร็วใช้ตัวควบคุมแบบ PID

ผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมของระบบทั้ง 3 สามารถแสดงได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์[12,13] พิจารณาผลจากการตอบสนองของระบบจากเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวและโอเวอร์ชูทต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลด และการออกแบบหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรของตัวควบคุมแบบ PI, PID และวงจรสมูทติ้ง โดยใช้หลักการจากบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 แสดงผลการทดลองจากระบบที่ออกแบบจริงด้วยรูปถ่ายจากดิจิตอลสตอเรจสโคป

ที่แสดงให้เห็นค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวและโอเวอร์ชูทของระบบต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลดของระบบทั้ง 3 ระบบที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะระบบที่ออกแบบจริง โดยนำผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างระบบควบคุมความเร็วแบบ 2 ลูปและระบบควบคุมความเร็วแบบ 3 ลูปกับผลจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในด้านของโอเวอร์ชูทและเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

ดีซีมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานทางไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเชิงกล อุปกรณ์ที่ใช้งานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับดีซีมอเตอร์นั้น ใช้งานได้ง่ายและสะดวกมีราคาถูกกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นๆ [2]

2.1 หลักการทำงานพื้นฐานของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์มีหลักการทำงานคือ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลในตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยตัวนำจะขดกันเป็นวงซ้อนกันหลายวงเพื่อให้ได้แรงที่มากระทำกับตัวนำมากขึ้น โดยสนามแม่เหล็กนั้นกำเนิดจากแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแท่งแม่เหล็กถาวรซึ่งมักติดกับส่วนที่คงที่ของมอเตอร์ที่เรียกว่าสเตเตอร์ (Stator)

ขดตัวนำที่ใช้อาจจะมีได้หลายขด โดยใช้คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านในการจัดทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านแต่ละขดตัวนำ เพื่อให้เกิดแรงกระทำกับขดตัวนำในทิศทางที่ให้เกิดการหมุนได้อย่างต่อเนื่อง โดยขดตัวนำเรียกว่าอาร์มาเจอร์ (Armature) เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมดีซีมอเตอร์ จะมีกระแสไหลผ่านทางบรัชหรือแปรงถ่าน คอมมิวเตเตอร์ และอาร์มาเจอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดูดและผลักกับสนามแม่เหล็กที่มาจากสเตเตอร์ ทำให้คอมมิวเตเตอร์และอาร์มาเจอร์หมุน[2]

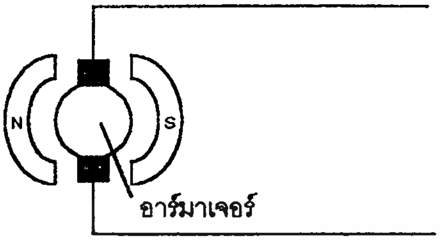
2.2 ชนิดของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์ยังแบ่งตามขนาดของกำลังออกได้เป็นสองประเภทได้แก่ ประเภทที่มีกำลังตั้งแต่หนึ่งแรงม้าขึ้นไปและประเภทที่มีกำลังต่ำกว่าหนึ่งแรงม้า ประเภทที่มีกำลังต่ำกว่าหนึ่งแรงม้ายังแบ่งออกได้อีกหลายชนิด ตามรูปแบบของการให้กำเนิดสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ ได้แก่

1. ชนิดที่ใช้ขดตัวนำต่ออนุกรมกันกับอาร์มาเจอร์ของดีซีมอเตอร์ (Strainght - series motors) เพื่อให้กำเนิดสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์
2. ชนิดที่ใช้ขดตัวนำสองขดต่ออนุกรมกันกับอาร์มาเจอร์ของดีซีมอเตอร์ (Split - series motors) โดยขดตัวนำทั้งสองต่อขนานและกลับด้านกัน
3. ชนิดที่ใช้ขดตัวนำต่อขนานกันกับอาร์มาเจอร์ของดีซีมอเตอร์ (Shunt motors)
4. ชนิดที่ใช้ขดตัวนำต่ออนุกรมกับอาร์มาเจอร์ และอีกขดหนึ่งต่อขนานกับอาร์มาเจอร์ของดีซีมอเตอร์ (Compound motors)

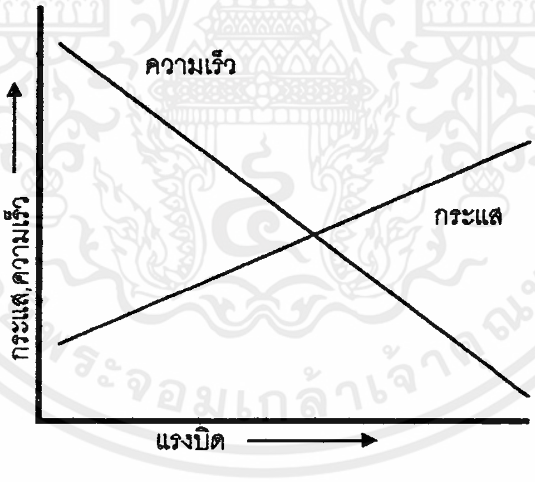
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชนิดที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะให้ค่าของสนามแม่เหล็กคงที่ โดยแสดงลักษณะของดีซีมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

ดีซีมอเตอร์ชนิดต่างๆ ดังกล่าวมีความสัมพันธ์ที่ผกผันกันระหว่างความเร็วและกระแสที่ไหลผ่านอาร์มาเจอร์ ซึ่งดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรนั้นมีความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเชิงเส้นมากกว่าดีซีมอเตอร์ชนิดอื่นๆ โดยแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกระแสของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและกระแสที่ไหลผ่านอาร์มาเจอร์

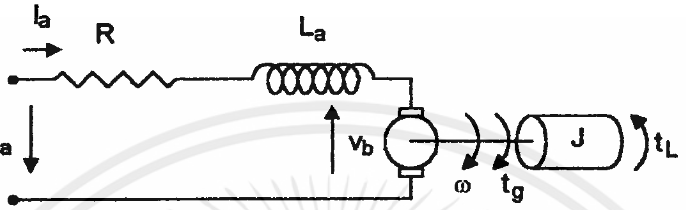
ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรเป็นหลักเนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความเร็วเป็นเชิงเส้นมากกว่าแบบอื่นๆ และไม่ต้องใช้กระแสจากแหล่งอื่นเพื่อให้กำเนิดสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ และมีน้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการทางคณิตศาสตร์และทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของดีซีมอเตอร์

สมการทางคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์แบ่งออกเป็นสมการทางไฟฟ้าและเชิงกล

สมการทางไฟฟ้า พิจารณาดีซีมอเตอร์จากวงจรสมมูลซึ่งประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน R และตัวเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า L_a เมื่อมอเตอร์หมุนจะเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ v_b ออกมา ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงวงจรทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์

ถ้าให้โวลท์เตจตกคร่อมดีซีมอเตอร์ v_a จะมีกระแสไหลเท่ากับ i_a โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-1)

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R\,i_a + v_b \qquad (2\text{-}1)$$

v_b เป็นแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดจากการหมุนของดีซีมอเตอร์ โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุม ω ของดีซีมอเตอร์ดังนี้

$$v_b = K_E\,\omega \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่ K_E เป็นค่าคงที่แรงดันย้อนกลับหรืออีเอ็มเอฟโวลท์เตจสำหรับดีซีมอเตอร์ ดังนั้นจะได้สมการทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์ดังนี้

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R\,i_a + K_E\,\omega \qquad (2\text{-}3)$$

สมการเชิงกล พิจารณาดีซีมอเตอร์ในทางเชิงกล ขณะหมุนเมื่อไม่มีโหลดจะประกอบไปด้วยแรงต้านต่างๆได้แก่ จากโมเมนท์ของแรงเฉื่อยในดีซีมอเตอร์ J_m แรงบิดต้านจากความฝืด t_f และแรงบิดต้านที่แปรผันตามความเร็วเชิงมุม ω ดังนั้นจะได้แรงบิดที่ต้านการหมุนของดีซีมอเตอร์

t_m ขณะไม่มีโหลด ดังนี้

$$t_m = t_f + D\,\omega \tag{2-5}$$

เมื่อ D เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดวิสคอร์ส

เนื่องจากดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีค่าสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์คงที่ แรงบิด t_g จึงมีความสัมพันธ์กับกระแสที่ไหลผ่านอาร์มาเจอร์ i_a ดังนี้

$$t_g = K_T\, i_a \tag{2-4}$$

โดยที่ K_T เป็นค่าคงที่แรงบิดสำหรับดีซีมอเตอร์

ถ้าดีซีมอเตอร์มีโหลด (t_L) ต่ออยู่ด้วย โดยให้โมเมนท์ของแรงเฉื่อยจากโหลดเป็น J_L และแรงบิดต้านจากโหลดเป็น t_L ดังนั้นจะได้สมการของแรงบิด t_g คือ

$$t_g = (J_m + J_L)\frac{d\omega}{dt} + D\omega + t_f + t_L \tag{2-6}$$

ให้โมเมนท์ของแรงเฉื่อยทั้งหมดได้แก่ J_m และ J_L เท่ากับ J และผลจากความฝืด t_f ที่น้อยมาก และอาศัยสมการ (2-3) , (2-4) และ (2-6) ให้รูปแบบของลาปลาสทราสฟอร์มและจัดรูปแบบใหม่จะได้สมการ (2-7) , (2-8) และ (2-9) ตามลำดับ

$$V_a(s) = (sL_a + R)I_a(s) + K_E\,\omega(s)$$

จัดรูปแบบใหม่ได้

$$V_a(s) - K_E\,\omega(s) = (sL_a + R)I_a(s) \tag{2-7}$$

$$T_g(s) = K_T\, I_a(s) \tag{2-8}$$

$$T_g(s) = (Js + D)\omega(s) + T_L(s)$$

จัดรูปแบบใหม่ได้

$$T_g(s) - T_L(s) = (Js + D)\omega(s) \tag{2-9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2-7) จะได้ $I_a(s)$ ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_E\,\omega(s)}{(sL_a + R)} \qquad (2\text{-}10)$$

แทนค่าสมการ (2-10) ลงในสมการ (2-8) จะได้ $T_g(s)$ ดังนี้

$$T_g(s) = K_T\,\frac{V_a(s) - K_E\,\omega(s)}{(sL_a + R)} \qquad (2\text{-}11)$$

แทนค่าสมการ (2-11) ลงในสมการ (2-9) จะได้ดังนี้

$$K_T\,\frac{V_a(s) - K_E\,\omega(s)}{(sL_a + R)} - T_L(s) = (Js + D)\omega(s) \qquad (2\text{-}12)$$

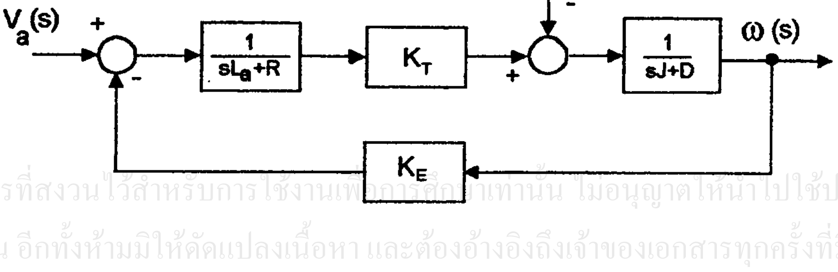
จัดรูปแบบสมการ (2-12) จะได้สมการของระบบที่มีสองอินพุทได้แก่ $V(s)$ และ $T_L(s)$ และเอาท์พุทเป็นความเร็วเชิงมุม $\omega(s)$ ดังนี้

$$\omega(s) = \frac{K_T}{(sL_a+R)(sJ+D)+K_E\,K_T}V(s) - \frac{(sL_a+R)}{(sL_a+R)(sJ+D)+K_E\,K_T}T_L(s) \qquad (2\text{-}13)$$

ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างโวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์กับความเร็วเชิงมุม เมื่อให้ T_L=0 ในกรณีที่ไม่มีโหลด ดังนี้

$$G_m(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{(sL_a+R)(sJ+D)+K_E\,K_T} \qquad (2\text{-}14)$$

โดยอาศัยสมการ (2-7) , (2-8) และ (2-9) สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.4 [8]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์

จากภาพที่ 2.4 ดีซีมอเตอร์ประกอบไปด้วยส่วนทางไฟฟ้าที่แสดงได้โดยอาศัยสมการ (2-7) ซึ่งมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างกระแสและโวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์ดังนี้

$$\frac{I_a(s)}{V_a(s) - K_E\,\omega(s)} = \frac{1}{(sL_a + R)} = \frac{1/R}{(s\,L_a/R + 1)} \qquad (2\text{-}15)$$

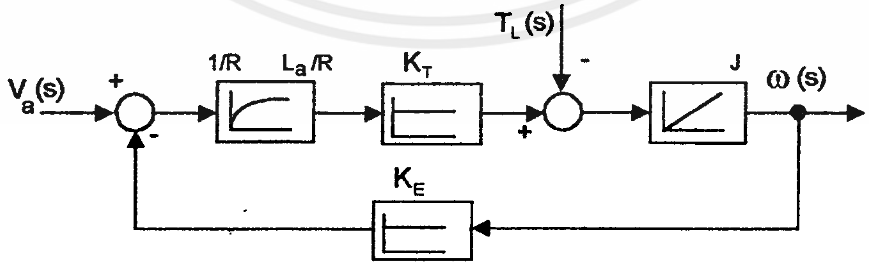
ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างกระแสและโวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์มีลักษณะเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ทางเวลา L_a/R และมีค่าอัตราขยายสัญญาณ 1/R

ส่วนเชิงกลของดีซีมอเตอร์แสดงได้โดยอาศัยสมการ (2-9) ซึ่งมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างความเร็วเชิงมุมและแรงบิดดังนี้

$$\frac{\omega(s)}{T_g(s) - T_L(s)} = \frac{1}{(Js + D)} = \frac{1}{Js}\,,\ D \approx 0 \qquad (2\text{-}16)$$

ซึ่งมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างความเร็วเชิงมุมและแรงบิดมีลักษณะเป็นตัวอินทิเกรเตอร์ที่มีค่าคงที่ในการอินทิเกรตสัญญาณ J เมื่อค่า D มีค่าน้อยมากๆ

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส และความเร็วรอบกับโวลท์เตจย้อนกลับมีลักษณะเป็นสัดส่วนคงที่ ซึ่งมีลักษณะเป็นค่าอัตราขยายสัญญาณ K_T และ K_E ตามลำดับ ดังนั้นสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมใหม่จากภาพที่ 2.4_ได้โดยแสดงลักษณะรูปของการตอบสนองต่อสเตปอินพุทในเชิงเวลาของแต่ละส่วนแทนสมการของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น เพื่อง่ายแก่การเข้าใจลักษณะการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของแต่ละส่วน โดยระบุค่าอัตราขยายสัญญาณและค่าคงที่ทางเวลาไว้ด้านบนของแต่ละส่วน โดยแสดงดังภาพที่ 2.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาพที่ 2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์ในรูปของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งและอินทิเกรเตอร์

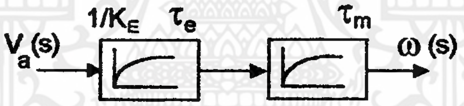
สำหรับดีซีมอเตอร์ที่มีค่า D น้อยมากจนสามารถประมาณเป็นศูนย์สามารถประมาณทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของดีซีมอเตอร์จากสมการ (2-14) ได้ดังสมการ (2-17)

$$G_m(s) = \frac{K_T}{s^2 L_a J + sRJ + K_E K_T} = \frac{1/K_E}{s^2 \frac{L_a J}{K_E K_T} + s\frac{RJ}{K_E K_T} + 1} \qquad (2\text{-}17)$$

ถ้าจัดรูปแบบของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นให้อยู่ในรูปที่แสดงค่าคงที่ทางเวลาทางไฟฟ้า τ_e และค่าคงที่ทางเวลาเชิงกล τ_m ดังนี้

$$G_m(s) = \frac{1/K_E}{(s\tau_m+1)(s\tau_e+1)} = \frac{1/K_E}{s^2\tau_m\tau_e + s(\tau_e+\tau_m) + 1} \qquad (2\text{-}18)$$

จากสมการ (2-18) เป็นลักษณะของตัวหน่วงเวลาอันดับสองที่มีค่าอัตราขยายสัญญาณโดยรวมเท่ากับ $1/K_E$ โดยตัวหน่วงเวลาอันดับสองนี้เกิดจากตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งสองตัวที่มีค่าคงที่ทางเวลา τ_e และ τ_m ต่ออนุกรมกันสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์อย่างง่าย

โดยทั่วไปแล้วค่าของ τ_m มากกว่า τ_e หลายเท่า ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่า $(\tau_e + \tau_m)$ เท่ากับ τ_m ดังนั้นจากสมการ (2-17) และ (2-18)

$$G_m(s) = \frac{1/K_E}{s^2\tau_m\tau_e + s\tau_m + 1} = \frac{1/K_E}{s^2 \frac{L_a J}{K_E K_T} + s\frac{RJ}{K_E K_T} + 1} \qquad (2\text{-}19)$$

โดยที่

$$\tau_m = \frac{RJ}{K_E K_T} \qquad (2\text{-}20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_e = \frac{L_a}{R} \qquad (2\text{-}21)$$

จากภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของดีซีมอเตอร์นั้น มีความสัมพันธ์ในเชิงผกผันกัน ถ้ามีแรงบิดมากขึ้นความเร็วจะลดลง จากสมการที่ (2-13) ความเร็วของดีซีมอเตอร์ขึ้นอยู่กับโวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์และแรงบิดจากโหลดด้วย ในสภาวะที่โวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์คงที่ ความเร็วก็จะคงที่ด้วย แต่ถ้าแรงบิดจากโหลดสูงขึ้นความเร็วจะลดลง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มโวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์เพื่อให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจนเท่าเดิม ดังนั้นการควบคุมโวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์จึงเป็นการควบคุมความเร็วด้วย ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของการควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์โดยการตรวจจับสัญญาณความเร็วจากอุปกรณ์ที่เหมาะสม

2.4 ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์

ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยให้โวลท์เตจเป็นสัดส่วนกับความเร็วเชิงมุม ใช้ในการตรวจสอบความเร็วของมอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วให้เป็นไปตามต้องการ ซึ่งช่วยให้ระบบควบคุมความเร็วมีความแน่นอนและมีเสถียรภาพดียิ่งขึ้น[6]

ในระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์จะใช้ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์แบบดีซีด้วย ซึ่งทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ดังกล่าวมีการทำงานในลักษณะตรงกันข้ามกับดีซีมอเตอร์ ซึ่งคล้ายกับดีซีเจนเนอร์เรเตอร์แต่ระดับสัญญาณที่ได้มีขนาดต่างกัน โดยดีซีทาโคเจนเนอร์เรเตอร์จะให้ระดับสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลาในระดับที่นำไปตรวจสอบได้ง่าย ซึ่งกำลังงานที่ได้ต่ำกว่าดีซีเจนเนอร์เรเตอร์จึงเหมาะกับงานที่อยู่ในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนต่ำและระยะทางไม่ไกลมาก

สัญญาณที่ได้จากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมตามสมการดังนี้

$$v_g = K_{Tg}\frac{d\theta}{dt} = K_{Tg}\omega \qquad (2\text{-}22)$$

โดยที่ v_g = ระดับสัญญาณที่ได้ (V)

θ = ระยะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ (rad)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

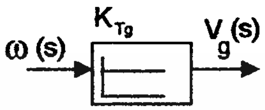
K_{Tg} = ค่าคงที่ของระดับสัญญาณต่อความเร็วรอบหรือค่าอัตราขยายสัญญาณของทาโคเจนเนอร์เรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ในรูปของลาปลาสทรานสฟอร์มดังนี้

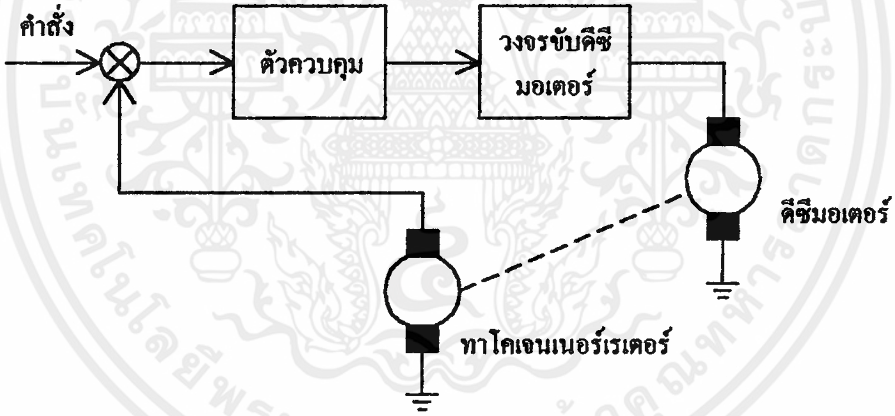
$$\frac{v_g(s)}{\omega(s)} = K_{Tg} \qquad (2\text{-}23)$$

แสดงบล็อกไดอะแกรมของทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ได้ในลักษณะของอัตราขยายสัญญาณดังนี้



ภาพที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของทาโคเจนเนอร์เรเตอร์

ลักษณะการใช้งานทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ในการควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แสดงได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงการใช้งานทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ในการควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์

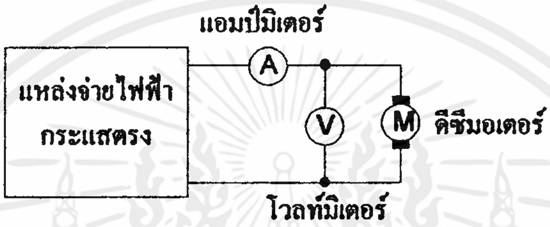
การแสดงทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรในรูปขององค์ประกอบระบบควบคุมพื้นฐานได้แก่ ตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง อินทิเกรเตอร์ และค่าคงที่ในการขยายสัญญาณนั้น สามารถนำค่าคงที่ต่างๆ ขององค์ประกอบระบบดังกล่าวมาช่วยในการออกแบบระบบควบคุมความเร็ว โดยใช้ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบดีซีมอเตอร์ได้แก่ ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของดีซีมอเตอร์

2.5.1 ค่าความต้านทาน (R)

เป็นการวัดค่าความต้านทานที่เกิดจากคอมมิวเตเตอร์ แปรงถ่าน และจากอาร์มาเจอร์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับดีซีมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ จากสมการ (2-3) ถ้าอยู่ในสภาวะที่กระแสคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่มีผลจากความเหนี่ยวนำของอาร์มาเจอร์ และวัดค่าโวลท์เตจที่ตกคร่อมดีซีมอเตอร์ (v_a) และกระแสที่ไหล (i_a) ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้มีค่าเท่ากับ v_a/i_a



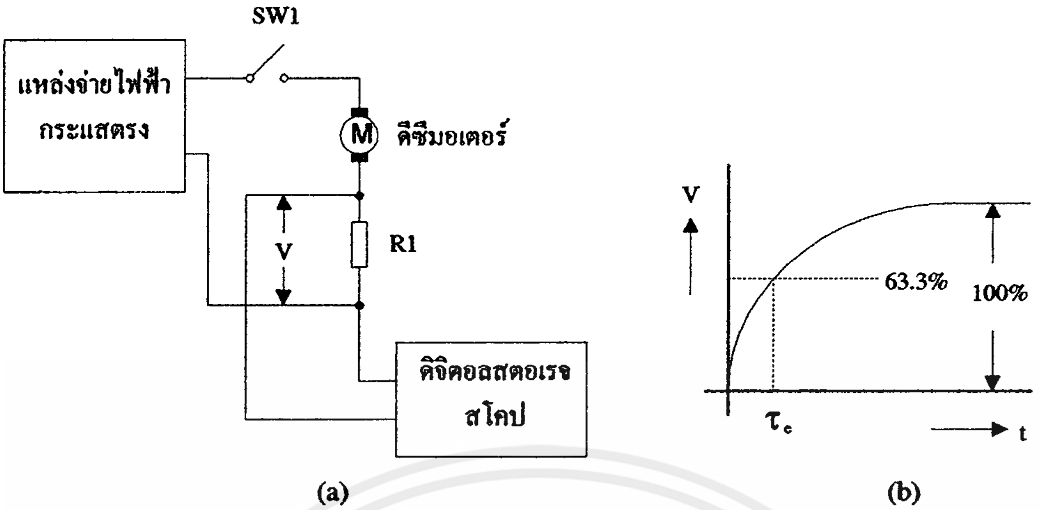
ภาพที่ 2.9 แสดงการวัดค่าความต้านทานของดีซีมอเตอร์

2.5.2 ค่าความเหนี่ยวนำ (L_a)

การวัดค่าความเหนี่ยวนำของอาร์มาเจอร์ สามารถพิจารณาได้จากสมการ (2-15) ถ้ายึดแกนของดีซีมอเตอร์เอาไว้ไม่ให้หมุน จะไม่มีผลจากโวลท์เตจย้อนกลับ ($K_e\omega(s)$) ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างกระแสที่ไหลในอาร์มาเจอร์และโวลท์เตจที่จ่ายให้กับดีซีมอเตอร์ ในลักษณะของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง

การพิจารณาลักษณะของการตอบสนองของกระแสต่อโวลท์เตจที่เป็นสเตปอินพุทจากดิจิตอลสตอเรจสโคป โดยอาศัยความต้านทาน R_I ที่มีค่าความต้านทานน้อยกว่าความต้านทานของดีซีมอเตอร์มากๆ เพื่อให้มีผลกับค่าคงที่ทางเวลาทางไฟฟ้าที่ต้องการวัดให้น้อยที่สุด แสดงลักษณะการวัดดังภาพที่ 2.10 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

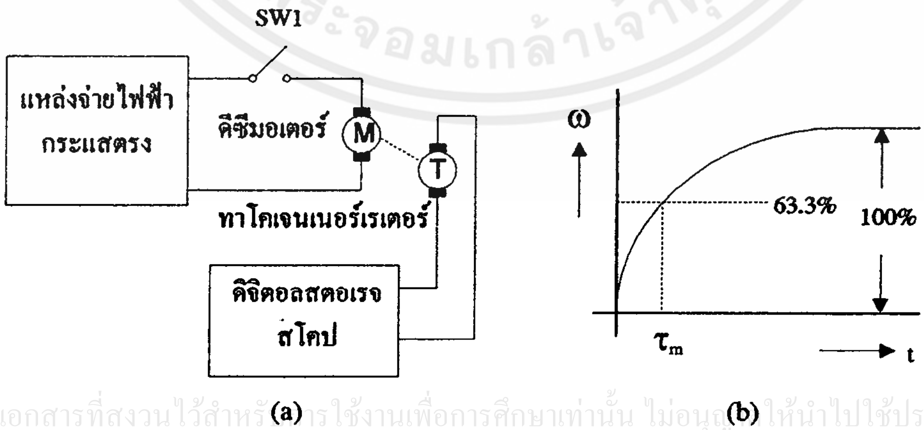


ภาพที่ 2.10 แสดงการวัดค่าคงที่ทางเวลาทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์

ค่าคงที่ทางเวลาได้จากเวลาที่ใช้ไปเมื่อเพิ่มขึ้นถึงระดับ 63.3% ของระดับคงที่ (100%) ดังภาพที่ 2.10 (b) โดยอาศัยสมการ (2-21) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ $\tau_e R$

2.5.3 ค่าโมเมนท์ของแรงเฉื่อย (J)

ได้จากการวัดค่าคงที่ทางเวลาเชิงกลของดีซีมอเตอร์ โดยป้อนโวลท์เตจเป็นสเตปอินพุทให้กับดีซีมอเตอร์ที่ต่อตัวคู่ควบเข้ากับทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ และวัดค่าเวลาที่ใช้ไปเมื่อความเร็วถึงระดับ 63.3% ของความเร็วคงที่ (100%) และอาศัยสมการ (2-20) จะได้ค่าโมเมนท์ของแรงเฉื่อยเท่ากับ $\tau_m K_e K_t/R$ แสดงวิธีการวัดและลักษณะการตอบสนองของความเร็วต่อสเตปอินพุทดังภาพที่ 2.11 (a) และ (b) ตามลำดับ

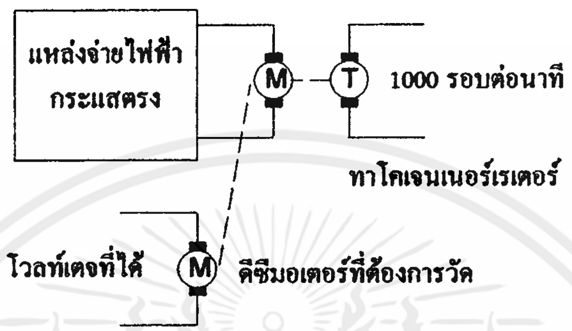


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.11 แสดงการวัดค่าคงที่ทางเวลาเชิงกลของดีซีมอเตอร์

2.5.4 ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับของดีซีมอเตอร์ (K_E)

เป็นค่าโวลท์เตจที่วัดได้จากดีซีมอเตอร์เมื่อหมุนอยู่ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ซึ่งจะได้ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับในหน่วย โวลท์ต่อพันรอบต่อนาที โดยดีซีมอเตอร์ที่ต้องการวัดหมุนโดยอาศัยแรงจากดีซีมอเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ต่อตัวคู่ควบเข้าด้วยกัน ดังภาพที่ 2.12

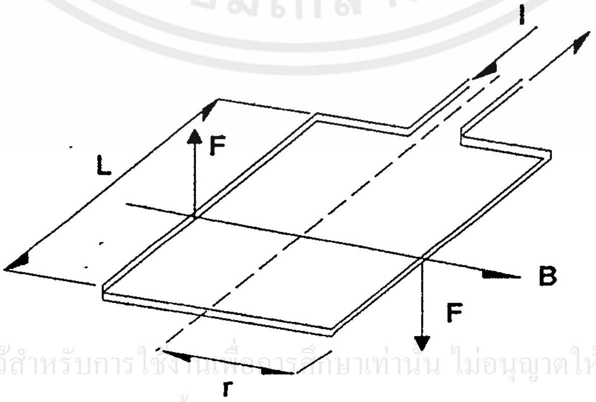


ภาพที่ 2.12 แสดงการวัดค่าคงที่แรงดันย้อนกลับของดีซีมอเตอร์

ถ้าให้กระแส I แอมป์ ไหลผ่านตัวนำความยาว L เมตร ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น B เทสล่า จะเกิดแรงกระทำกับตัวนำ F นิวตัน ดังต่อไปนี้

$$F = BLI \qquad (2\text{-}24)$$

ถ้าตัวนำดังกล่าวขดเป็นวง โดยส่วนที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก L เมตร ดังภาพที่ 2.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.13 แสดงตัวนำขดเป็นวงอยู่ภายในสนามแม่เหล็ก

จากภาพที่ 2.13 ขดตัวนำเคลื่อนที่เป็นวงกลมห่างจากจุดศูนย์กลางเป็นระยะ r เมตร จะเกิดแรง F ทั้งสองด้านของตัวนำจึงได้แรงเป็นสองเท่าของตัวนำเส้นเดียว ถ้าให้แรงบิด T รอบจุดศูนย์กลางเท่ากับ F.r ดังนั้นสามารถเปลี่ยนสมการ (2-24) ให้อยู่ในรูปของแรงบิด T ได้ดังนี้

$$T = [2BLr]\, I \qquad (2\text{-}25)$$

จากสมการ (2-25) ส่วนที่อยู่ในวงเล็บเป็นค่าคงที่สำหรับกรณีของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร ถ้าเปรียบเทียบกับสมการ (2-4) คือค่า K_T ในหน่วยของ นิวตันเมตรต่อแอมป์ นั่นเอง

ถ้าตัวนำมีความยาว L เมตร เคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น B เทสล่า ด้วยความเร็ว v เมตรต่อวินาที จะเกิดโวลท์เตจตกคร่อมตัวนำ v_b โวลท์ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_b = BLv \qquad (2\text{-}26)$$

ถ้าตัวนำขดเป็นวงดังภาพที่ 2.13 ตัวนำเคลื่อนที่เป็นวงกลมห่างจากจุดศูนย์กลางเป็นระยะ r เมตร ดังนั้นจะเกิดโวลท์เตจ v_b เป็นสองเท่าของตัวนำเส้นเดียว ถ้าความเร็ว v สัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุม ω โดย v=r.ω ดังนั้นสามารถเปลี่ยนสมการ (2-26) ให้อยู่ในรูปของความเร็วเชิงมุม ω ได้ดังนี้

$$v_b = [2BLr]\, \omega \qquad (2\text{-}27)$$

จากสมการ (2-27) ส่วนที่อยู่ในวงเล็บเป็นค่าคงที่สำหรับกรณีของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร ถ้าเปรียบเทียบกับสมการ (2-2) คือค่า K_E ในหน่วยของ โวลท์ต่อเรเดียนต่อวินาที นั่นเอง

จากสมการ (2-25) และ (2-27) จะเห็นได้ว่าค่า K_E และ K_T มีค่าเท่ากันเมื่ออยู่ในหน่วยดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 3

การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมนั้น สามารถออกแบบได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมสำหรับแต่ละระบบโดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและรูปแบบของระบบที่ต้องการควบคุม แต่ถ้าระบบประกอบไปด้วยตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง อินทิเกรเตอร์ และค่าคงที่ในการขยายสัญญาณ เช่น ระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ สามารถใช้วิธีโมดูลัสและซิมเมตริคอลออปติมัมเพื่อการออกแบบตัวควบคุมแบบ I , PI และ PID สำหรับระบบได้ เนื่องจากสามารถออกแบบได้สะดวกและได้ผลดี[1,3,7]

ระบบควบคุมอาจจะมีเพียงลูปควบคุมเดียวหรือหลายลูปควบคุมซ้อนกันอยู่ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการออกแบบและคุณสมบัติของระบบ ระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์เป็นตัวอย่างของระบบควบคุมที่สามารถใช้การควบคุมความเร็วเพียงลูปเดียวได้ แต่ถ้าเพิ่มการควบคุมกระแสเข้าไปภายในลูปควบคุมความเร็วซึ่งเป็นลักษณะของการควบคุมแบบสองลูป จะช่วยลดผลจากค่าคงที่ทางเวลาต่างๆ ภายในลูปควบคุมกระแส ซึ่งทำให้ลูปควบคุมความเร็วโดยรวมมีการตอบสนองต่อคำสั่งได้รวดเร็วยิ่งขึ้นและช่วยลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอกได้[1,2,3,4,5,6,7]

จากแนวความคิดในการเพิ่มเติมลูปควบคุมย่อยเข้าไป ซึ่งจะช่วยลดผลจากค่าคงที่ทางเวลาดังกล่าว ถ้าเพิ่มเติมลูปควบคุมโวลท์เตจเข้าอยู่ภายในลูปควบคุมกระแสซึ่งเป็นลักษณะของการควบคุมแบบสามลูป ก็จะช่วยลดผลจากค่าคงที่ทางเวลาภายในของลูปควบคุมโวลท์เตจ ทำให้ผลจากค่าคงที่ทางเวลาภายในลูปควบคุมกระแสลดลง ซึ่งจะช่วยให้ลูปควบคุมความเร็วมีการตอบสนองต่อคำสั่งได้รวดเร็วยิ่งขึ้นและลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอกได้ดียิ่งขึ้นกว่าการควบคุมแบบสองลูปดังกล่าว

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมแต่ละลูปนั้นสามารถใช้การออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัมและซิมเมตริคอลออปติมัมได้ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองแบบนี้ต่อไป

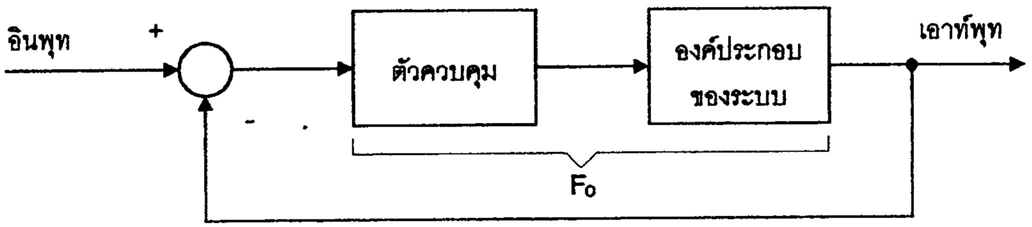
3.1 ระบบที่เหมาะสมโดยทั่วไป

ถ้าให้ระบบควบคุมแบบปิดในภาพที่ 3.1 แสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$F_w(s) = \frac{F_o(s)}{1+F_o(s)} \tag{3-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32884



ภาพที่ 3.1 แสดงระบบควบคุมแบบปิด

โดยที่

$F_o(s)$ เป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของตัวควบคุม (Controller) และองค์ประกอบของระบบ

$F_w(s)$ เป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบควบคุมแบบปิดหรือระบบป้อนกลับ

ระบบจะสามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้รวดเร็วเพียงใดขึ้นอยู่กับตัวควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบได้ดีที่สุดตามคุณสมบัติของระบบนั้น โดยทำให้ระบบมีการตอบสนองต่ออินพุทให้ได้เร็วที่สุด ถ้าพิจารณาระบบในเชิงความถี่ ตัวควบคุมต้องทำให้ขนาดของ $F_w(s)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของระบบ[3] เพื่อว่าเมื่อระบบได้รับคำสั่งอินพุทแบบทันทีทันใดหรือเป็นสเตป ระบบสามารถเข้าสู่จุดที่ต้องการให้ได้อย่างเร็วที่สุด

โดยทั่วไปแล้ว $F_w(s)$ จะมีลักษณะในสองรูปแบบดังนี้

$$F_w(s) = \frac{b_0}{a_0 + sa_1 + s^2 a_2} \tag{3-2}$$

$$F_w(s) = \frac{b_0 + sb_1}{a_0 + sa_1 + s^2 a_2 + s^3 a_3} \tag{3-3}$$

จากสมการที่ (3-2) ถ้าให้ $b_0 = a_0$ โดยพิจารณาเฉพาะขนาดของ $F_w(s)$ ที่ความถี่ใดๆ เมื่อ $s=j\omega$ ดังนั้น

$$|F_w(\omega)| = \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + \omega^2(a_1^2 - 2a_0 a_2) + \omega^4 a_2^2}} \tag{3-4}$$

ที่ความถี่ต่ำๆ สมการ (3-4) จะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อสัมประสิทธิ์ของ ω^2 มีค่าเป็น 0 ดังนั้นค่าของ $a_1^2 - 2a_0 a_2 = 0$ จะได้สมการเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมดังนี้

ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_1^2 = 2a_0 a_2 \tag{3-5}$$

และจากสมการที่ (3-3) ให้ $b_0 = a_0$ และ $b_1 = a_1$ จะได้ลักษณะคล้ายกับสมการที่ (3-4) ดังนี้

$$|F_w(\omega)| = \sqrt{\frac{a_0^2+\omega^2 a_1^2}{a_0^2+\omega^2(a_1^2-2a_0a_2)+\omega^4(a_2^2-2a_1a_3)+\omega^6 a_3^2}} \qquad (3\text{-}6)$$

จะได้สมการเบื้องต้นดังนี้

$$a_1^2 = 2a_0a_2 \qquad (3\text{-}7)$$

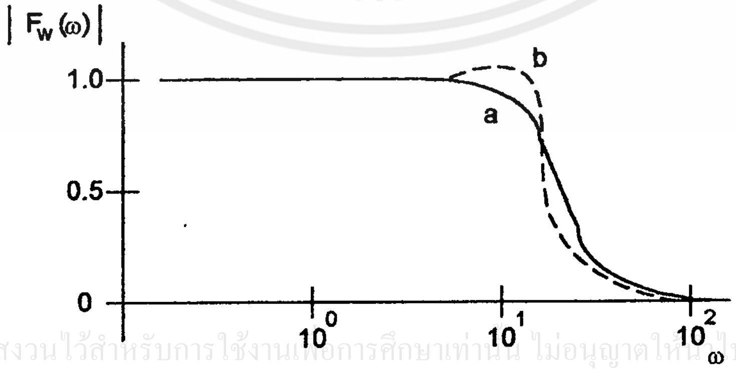
$$a_1^2 = 2a_1a_3 \qquad (3\text{-}8)$$

จากสมการ (3-4) และ (3-6) ถ้าแทนสมการเบื้องต้นที่ได้เข้าไปจะได้ดังนี้

$$|F_w(\omega)| = \sqrt{\frac{1}{1+\omega^4(a_2/a_0)^2}} \qquad (a)$$

$$|F_w(\omega)| = \sqrt{\frac{1+\omega^2(a_1/a_0)^2}{1+\omega^6(a_3/a_0)^2}} \qquad (b)$$

สมการที่ได้เป็นสมการของระบบที่เหมาะสมและมีค่าเป็น 1 ที่ความถี่เป็น 0 แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะมีค่าใกล้ 1 ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ แสดงลักษณะที่ได้ในเชิงความถี่ของสมการ a และ b ได้ดังภาพที่ 3.2 การแสดงรูปร่างของขนาดอัตราขยายของระบบในเชิงความถี่เรียกว่าโมดูลัสของระบบ[3]



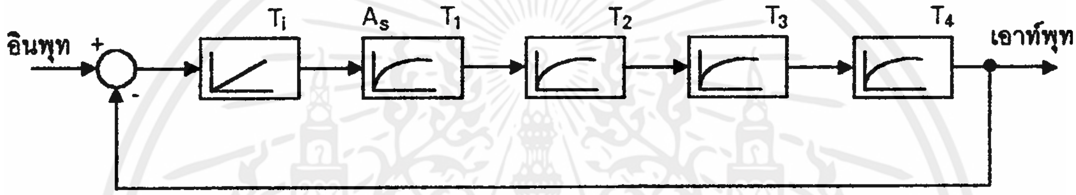
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะการตอบสนองในเชิงความถี่ของระบบที่เหมาะสม

3.2 การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม

การออกแบบตัวควบคุมโดยพิจารณาจากลักษณะการตอบสนองในเชิงความถี่ เพื่อใช้ในการควบคุมให้อัตราขยายมีค่าเข้าใกล้หนึ่งให้มากที่สุดตลอดย่านความถี่ เสมือนเป็นการควบคุมรูปร่างของอัตราขยายในเชิงความถี่หรือโมดูลัสของระบบให้เหมาะสม ซึ่งเป็นลักษณะของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม การควบคุมอัตราขยายให้มีค่าเป็นหนึ่งคือการควบคุมให้ค่าเอาท์พุทของระบบมีค่าเท่ากับอินพุทซึ่งหมายถึงระบบสามารถทำงานได้ตามคำสั่งที่ให้ไป

ถ้าระบบที่ต้องการออกแบบประกอบไปด้วยตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งหลายตัว โดยมีค่าคงที่ทางเวลาเป็น T_1 ,T_2 ,T_3 และ T_4 ตามลำดับ ถ้าค่าคงที่ทางเวลาดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถใช้ตัวควบคุมแบบ I ได้ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ I ที่ออกแบบโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นระหว่างอินพุทและเอาท์พุทของระบบเปิดในภาพที่ 3.3 เป็นดังสมการที่ (3-9)

$$F_w(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{A_s}{1+sT_e} \qquad (3\text{-}9)$$

โดยที่ A_s คือค่าอัตราขยายสัญญาณของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง

T_i คือค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบ I

T_e เป็นผลรวมของค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งทั้งหมด มีค่าเท่ากับ $T_1+T_2+T_3+T_4$

ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบปิดดังสมการที่ (3-10)

$$F_w(s) = \frac{A_s}{A_s+sT_i+s^2T_iT_e} \qquad (3\text{-}10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (3-10) จะอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3-2) โดยที่

$$a_0 = A_s \text{ , } a_1 = T_i \text{ , } a_2 = T_i T_e$$

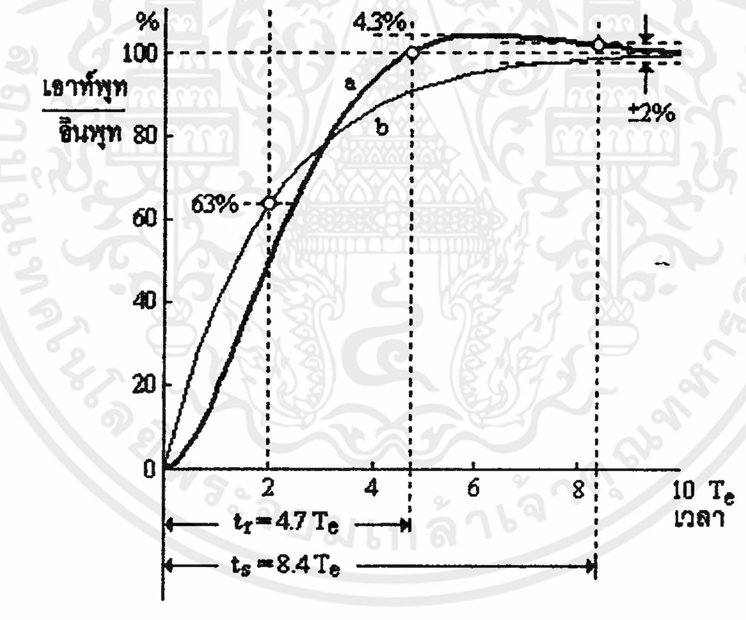
จากสมการที่ (3-5) จะได้ค่าคงที่ในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบ I ดังนี้

$$T_i = 2A_s T_e \qquad (3\text{-}11)$$

นำค่า T_i ที่ได้นี้ไปแทนลงในสมการที่ (3-10) จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีโมดูลัสออปติมัมดังนี้

$$F_w(s) = \frac{1}{1+s2T_e+s^2 2T_e^2} \qquad (3\text{-}12)$$

การตอบสนองต่อสเตปอินพุทของสมการที่ (3-12) เป็นดังภาพที่ 3.4



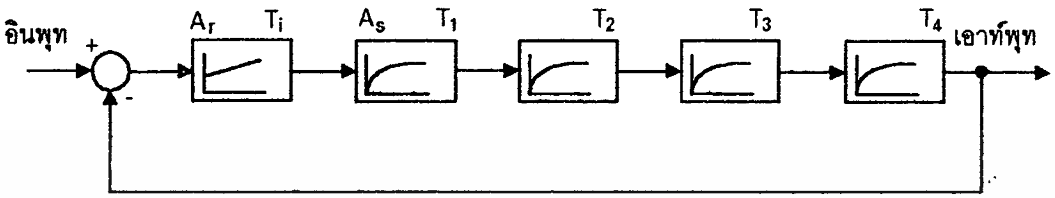
ภาพที่ 3.4 แสดงการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม

จากภาพที่ 3.4 การตอบสนองต่อสเตปอินพุทจะมีโอเวอร์ชูท 4.3% และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ $8.4T_e$ ซึ่งแสดงโดยกราฟเส้น a สามารถประมาณการตอบสนองต่อสเตปอินพุทให้เป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งได้ โดยพิจารณาเฉพาะสัมประสิทธิ์ของ s กำลังหนึ่งในสมการ (3-12) จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ทางเวลาเท่ากับ $2T_e$ แสดงโดยกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้น b

ถ้าระบบในภาพที่ 3.3 มีค่า T_1 มากกว่าผลรวมของ T_2 , T_3 และ T_4 สามารถใช้ตัวควบคุมในแบบ PI ได้ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบเปิดในภาพที่ 3.5 เป็นตามสมการที่ (3-13) ดังนี้

$$F_w(s) = \frac{A_r(1+sT_i)}{sT_i} \cdot \frac{A_s}{1+sT_1} \cdot \frac{1}{1+sT_e} \qquad (3\text{-}13)$$

โดยที่ A_r คือค่าอัตราขยายสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PI

T_i คือค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PI

$T_e = T_2+T_3+T_4$

ตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในภาพที่ 3.5 ใช้วิธีการชดเชยตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเลือกใช้ค่าคงที่ในการอินทิเกรตสัญญาณ T_i มีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งคือ T_1 ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบปิดดังสมการที่ (3-14)

$$F_w(s) = \frac{A_rA_s}{A_rA_s+sT_1+s^2T_1T_e} \qquad (3\text{-}14)$$

สมการที่ (3-14) มีลักษณะเดียวกับสมการ (3-2) โดยที่

$$a_0 = A_rA_s \ , \ a_1 = T_1 \ , \ a_2 = T_1T_e$$

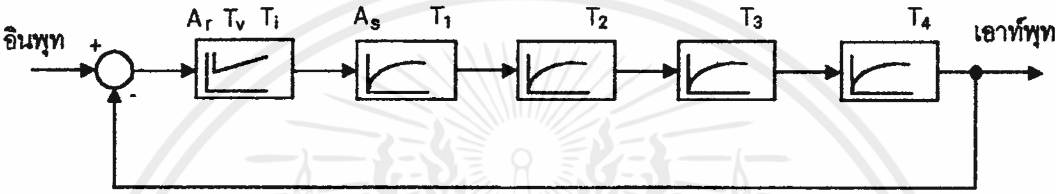
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ A_r ของตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้สำหรับระบบควบคุมดังสมการต่อไปนี้

$$A_r = \frac{T_1}{2A_sT_e} \qquad (3\text{-}15)$$

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นที่ได้ทั้งหมดเหมือนกับสมการที่ (3-12) และมีลักษณะการตอบสนองต่อสเตปอินพุทดังภาพที่ 3.4

ถ้าระบบในภาพที่ 3.3 มีค่า T_1 มากกว่า T_2 และ T_2 มีค่ามากกว่าผลรวมของค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่เหลือคือ T_3 และ T_4 สามารถใช้ตัวควบคุมแบบ PID ได้ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ออกแบบโดยวิธีโมดูลัสออปติมัม

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบเปิดในภาพที่ 3.6 เป็นตามสมการที่ (3-16) ดังนี้

$$F_w(s) = \frac{A_r(1+sT_i)(1+sT_v)}{sT_i} \cdot \frac{A_s}{1+sT_1} \cdot \frac{1}{1+sT_2} \cdot \frac{1}{1+sT_e} \qquad (3\text{-}16)$$

โดยที่ A_r คือค่าอัตราขยายสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PID

T_i คือค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PID

T_v คือค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PID

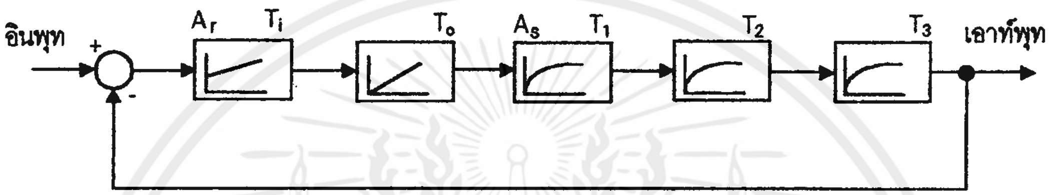
$T_e = T_3+T_4$

ตัวควบคุมแบบ PID ในภาพที่ 3.6 ใช้วิธีการชดเชยตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีขนาดใหญ่สองตัว โดยให้ค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณ T_i มีค่าเท่ากับ T_1 และค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณ T_v มีค่าเท่ากับ T_2 ดังนั้นทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบในภาพที่ 3.6 เหมือนกับสมการที่ (3-14) และมีลักษณะเดียวกับสมการ (3-2) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ A_r ของตัวควบคุมแบบ PID ตามสมการที่ (3-15) มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นโดยรวมดังสมการที่ (3-12) และมีลักษณะการตอบสนองต่อสเตปอินพุทดังภาพที่ 3.4 เช่นกัน

3.3 การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม

ซิมเมตริคอลออปติมัมเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่มีส่วนประกอบของตัวอินทิเกรเตอร์กับตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถใช้วิธีการชดเชยได้เหมือนกับวิธีโมดูลัสออปติมัม ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดการออสซิลเลต[3]

ระบบที่ประกอบด้วยตัวอินทิเกรเตอร์ที่มีค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณ T_o และตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ทางเวลา T_1 ,T_2 และ T_3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถใช้ตัวควบคุมแบบ PI ได้ ตัวอย่างของระบบแบบนี้แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ที่ออกแบบโดยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบเปิดในภาพที่ 3.7 แสดงดังสมการที่ (3-17)

$$F_w(s) = \frac{A_r(1+sT_i)}{sT_i} \cdot \frac{1}{sT_o} \cdot \frac{A_s}{1+sT_e} \qquad (3\text{-}17)$$

โดยที่ A_r คือค่าอัตราขยายสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PI

A_s คือค่าคงที่ในการขยายสัญญาณของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง

T_i คือค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PI

T_o คือค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวอินทิเกรเตอร์

$T_e = T_1+T_2+T_3$

ดังนั้นทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบปิดเป็นตามสมการที่ (3-18)

$$F_w(s) = \frac{A_r A_s(1+sT_i)}{A_r A_s + sA_r A_s T_i + s^2 T_i T_o + s^3 T_i T_o T_e} \qquad (3\text{-}18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้...ชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3-18) นั้นมีรูปแบบคล้ายกับลักษณะของสมการ (3-3) ดังนั้นถ้าให้

$$a_0 = A_r A_s \ , \ a_1 = A_r A_s T_i \ , \ a_2 = T_i T_o , \ a_3 = T_i T_o T_e$$

สามารถใช้สมการ (3-7) และ (3-8) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ A_r และ T_i ของตัวควบคุมแบบ PI ได้ดังนี้

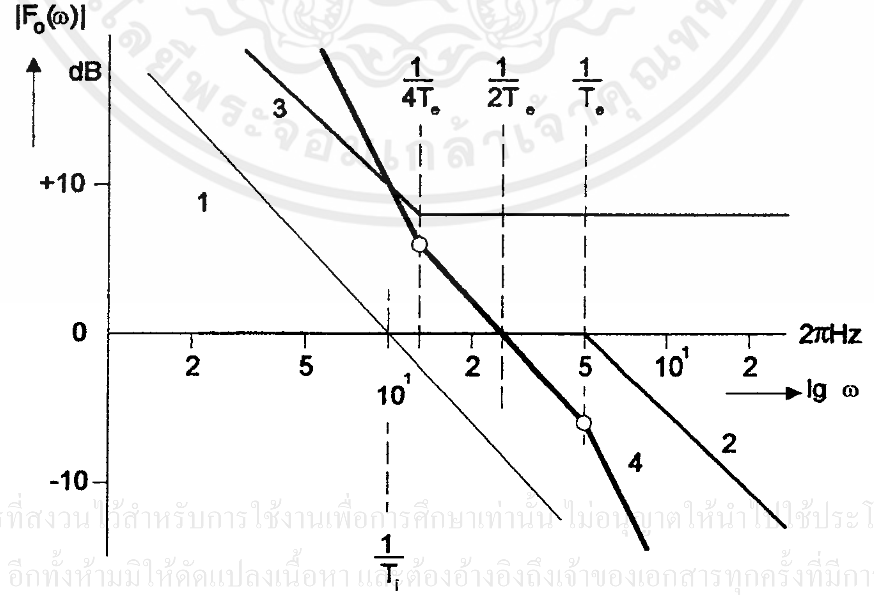
$$T_i = 4T_e \qquad (3\text{-}19)$$

$$A_r = \frac{T_o}{2A_s T_e} \qquad (3\text{-}20)$$

นำค่า T_i และ A_r ที่ได้แทนลงในสมการ (3-18) จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบที่เหมาะสมโดยวิธีซิมเมตริคออปติมัมดังนี้

$$F_w(s) = \frac{1+s4T_e}{1+s4T_e+s^2 8T_e^2+s^3 8T_e^3} \qquad (3\text{-}21)$$

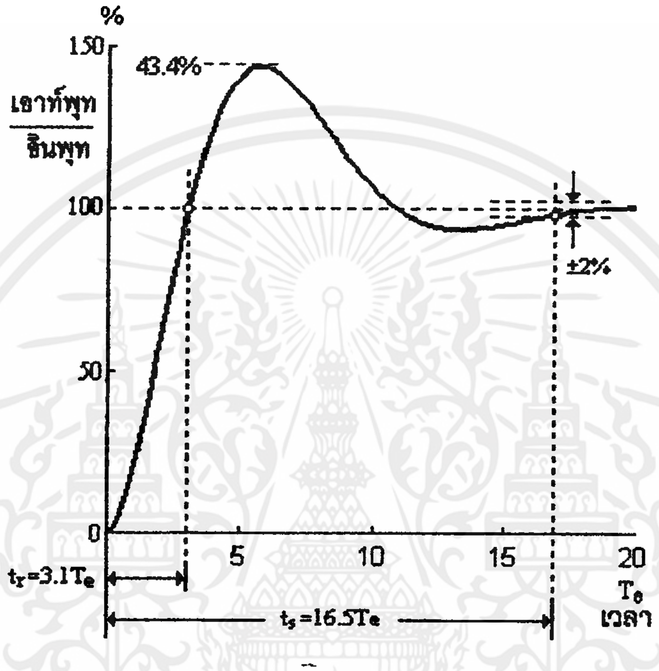
ถ้าระบบที่ต้องการควบคุมในภาพที่ 3.7 มีค่าพารามิเตอร์ได้แก่ T_o=100ms , T_e=20ms , A_s=1 ดังนั้นจากสมการ (3-19) และ (3-20) จะได้ค่า T_i=80ms และ A_r=2.5 หรือประมาณ 8dB เมื่อพิจารณาลักษณะของอัตราขยายของระบบเปิดในเชิงความถี่จะมีลักษณะดังภาพที่ 3.8 โดยลักษณะของอัตราขยายในเชิงความถี่ของตัวอินทิเกรเตอร์ T_o แสดงได้โดยกราฟเส้นที่ 1 ผลรวมของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง T_e แสดงได้โดยกราฟเส้นที่ 2 ตัวควบคุมแบบ PI แสดงได้โดยกราฟเส้นที่ 3 และของระบบเปิดทั้งหมดแสดงได้โดยกราฟเส้นที่ 4



ภาพที่ 3.8 แสดงลักษณะอัตราขยายของระบบเปิดในเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิมเมตริคอลออปติมัมอยู่บนพื้นฐานของการควบคุมโมดูลัสของระบบให้เหมาะสม ถ้าพิจารณารูปร่างอัตราขยายของระบบเปิดในเชิงความถี่ในภาพที่ 3.8 ค่าอัตราขยายเป็น 1 ที่ความถี่ $1/2T_e$ รูปร่างของอัตราขยายที่ความถี่ใดๆ ที่น้อยกว่า $1/2T_e$ จะสมมาตรกับรูปร่างของอัตราขยายที่ความถี่ใดๆ ที่มากกว่า $1/2T_e$ ซึ่งเป็นลักษณะของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม โดยมีลักษณะการตอบสนองของระบบปิดต่อสเตปอินพุทเป็นดังภาพที่ 3.9

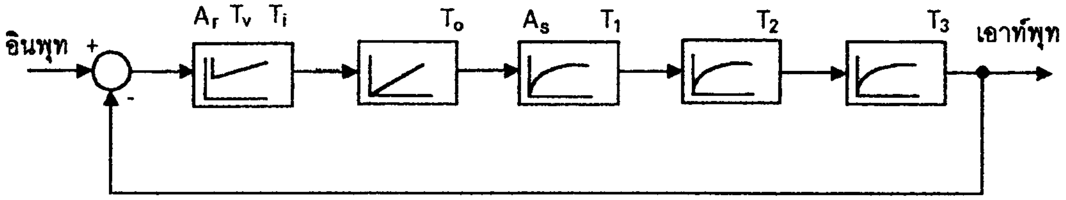


ภาพที่ 3.9 แสดงการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบที่ใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม

จากภาพที่ 3.9 การตอบสนองต่อสเตปอินพุทจะมีโอเวอร์ชูท 43.4% และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ $16.5T_e$

ในกรณีที่ค่าคงที่ทางเวลา T_1 มีค่ามากกว่าผลรวมของ T_2 และ T_3 สามารถใช้ตัวควบคุมแบบ PID ได้ดังภาพที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 แสดงระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ออกแบบโดยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบเปิดในภาพที่ 3.10 เป็นตามสมการที่ (3-22) ดังนี้

$$F_w(s) = \frac{A_r(1+sT_i)(1+sT_v)}{sT_i} \cdot \frac{1}{sT_o} \cdot \frac{A_s}{1+sT_1} \cdot \frac{1}{1+sT_e} \qquad (3\text{-}22)$$

โดยที่ A_r คือค่าอัตราขยายสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PID

T_i คือค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PID

T_v คือค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณของตัวควบคุมแบบ PID

$T_e = T_2+T_3$

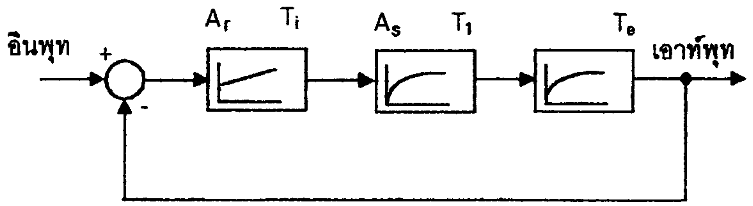
ตัวควบคุมแบบ PID ในภาพที่ 3.10 ใช้วิธีการชดเชยตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีขนาดใหญ่ที่สุดโดยให้ค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณ T_v มีค่าเท่ากับ T_1 ดังนั้น ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบในภาพที่ 3.10 เหมือนกับสมการที่ (3-18) จึงใช้สมการที่ (3-19) และ (3-20) เพื่อหาคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณ T_i และค่าของ A_r ได้ จึงมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นโดยรวมดังสมการที่ (3-21) และมีลักษณะการตอบสนองต่อสเตปอินพุทดังภาพที่ 3.9

3.4 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่มีตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดใหญ่

ระบบที่ไม่ได้ประกอบด้วยตัวอินทิเกรเตอร์ แต่มีตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ทางเวลาขนาดใหญ่กว่าตัวอื่นๆ มาก ควรใช้การออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม โดยพิจารณาค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่ใหญ่ที่สุดเป็นเสมือนตัวอินทิเกรเตอร์[1,3]

ตัวอย่างระบบที่ประกอบไปด้วย ตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ทางเวลา T_1 มากกว่า T_e ซึ่งเป็นผลรวมของค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่เหลือ สามารถใช้ตัวควบคุมแบบ PI ได้ ดังภาพที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 แสดงระบบที่มีตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดใหญ่

การตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1 กับ $4T_e$ ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากหรือค่า T_1 มีค่ามากกว่า 4 เท่าของ T_e มากๆ จะมีการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับในภาพที่ 3.9 แต่ถ้าค่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียง 1 ค่าไรซ์ไทม์จะเพิ่มขึ้นและโอเวอร์ชูทจะลดลง จนใกล้เคียงกับระบบที่ออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม ดังนั้นถ้าค่า T_1 มีค่าไม่มากกว่า 4 เท่าของ T_e ควรใช้การออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม[3]

เนื่องจากระบบประกอบไปด้วยเพียงตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง การตอบสนองต่อสเตปอินพุทจึงมีค่าไรซ์ไทม์และโอเวอร์ชูทที่แตกต่างไปจากระบบที่มีตัวอินทิเกรเตอร์ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากสมการที่ (3-19) และ (3-20) จึงต้องคูณกับค่าแก้ไข k_1 และ k_2 เพื่อให้การตอบสนองของระบบเหมือนกับภาพที่ 3.9 แสดงดังสมการที่ (3-23) และ (3-24)

$$T_i = 4T_e k_2 \qquad (3\text{-}23)$$

$$A_r = \frac{T_1}{2A_s T_e} k_1 \qquad (3\text{-}24)$$

เมื่อ $k_1 = 1 + \frac{T_e^2}{T_1^2}$ และ $k_2 = \frac{k_1}{(1+T_e/T_1)^3}$

ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นทั้งหมดดังสมการ (3-25)

$$F_w(s) = \frac{1+s4T_e k_2}{1+s4T_e k_3+s^2 8T_e^2 k_3^2+s^3 8T_e^3 k_3^3} \qquad (3\text{-}25)$$

เมื่อ $k_3 = \frac{1}{1+(T_e/T_1)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การแก้ไขโอเวอร์ชูทจากการออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคออปติมัม

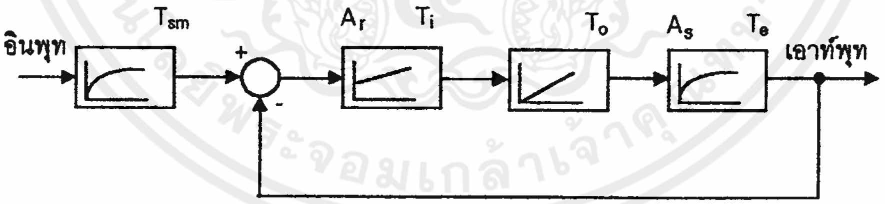
การตอบสนองของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคออปติมัมต่อสเตปอินพุท มีค่าโอเวอร์ชูทสูงถึง 43.4% ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม ซึ่งมีโอเวอร์ชูทเพียง 4.3% เท่านั้น ถ้าพิจารณาจากทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบที่ออกแบบด้วยวิธีทั้งสองแบบตามสมการที่ (3-12) และ (3-21) จะพบว่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นที่ออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัมจะไม่มีเทอม $1+s4T_e$ ที่ตัวตั้งซึ่งทำให้เกิดโอเวอร์ชูทสูง ดังนั้นถ้าสามารถกำจัดเทอมดังกล่าวออกไปได้โอเวอร์ชูทจะลดลง

วิธีกำจัดเทอมดังกล่าวออกไปวิธีหนึ่งได้แก่ เพิ่มตัวหน่วงเวลาที่มีค่าคงที่ทางเวลา T_{sm} เท่ากับ $4T_e$ หรือเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุม (T_i) ตัวหน่วงเวลาดังกล่าวเรียกว่าตัวสมูทติ้ง ก็จะช่วยให้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นโดยรวมทั้งหมดไม่มีเทอม $1+s4T_e$ เป็นตัวตั้ง ดังสมการที่ (3-26)

$$F_w(s) = \frac{1}{1+s4T_e} \cdot \frac{1+s4T_e}{1+s4T_e+s^2 8T_e^2+s^3 8T_e^3}$$

$$F_w(s) = \frac{1}{1+s4T_e+s^2 8T_e^2+s^3 8T_e^3} \qquad (3\text{-}26)$$

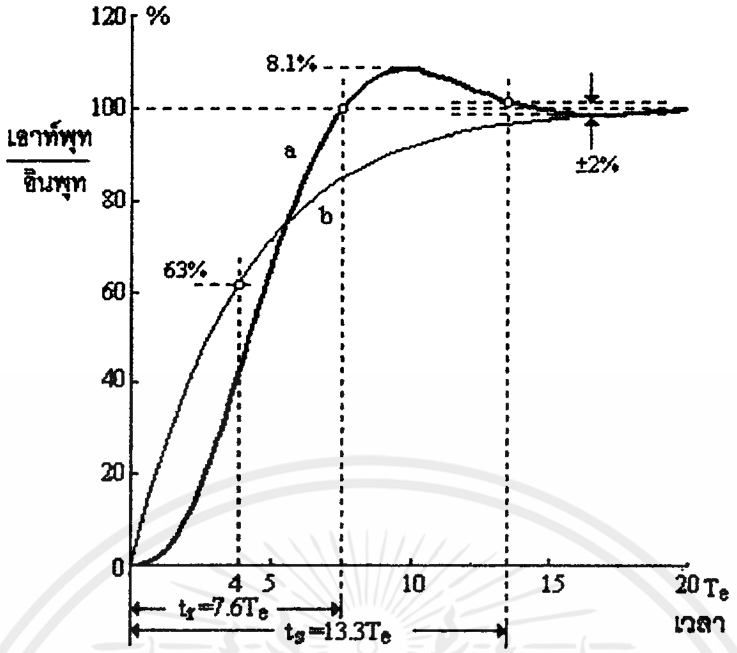
การเพิ่มตัวสมูทติ้งที่มีค่าคงที่ทางเวลา T_{sm} เข้าไปแสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แสดงการเพิ่มตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูทต่อสเตปอินพุท

ลักษณะการตอบสนองของระบบต่อสเตปอินพุท แสดงดังภาพที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



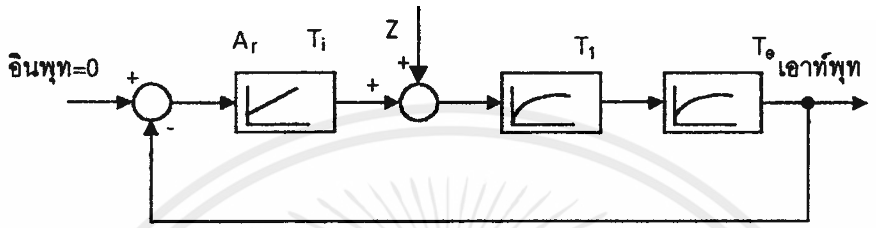
ภาพที่ 3.13 แสดงการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบที่ใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม และเพิ่มตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูท

การตอบสนองต่อสเตปอินพุทมีโอเวอร์ชูท 8.1% และมีค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 13.3 T_e แสดงได้โดยกราฟเส้น a ในภาพที่ 3.13 สามารถประมาณให้เป็นการตอบสนองแบบตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งได้ โดยพิจารณาเฉพาะสัมประสิทธิ์ของ s กำลังหนึ่งในสมการ (3-26) จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ทางเวลาเท่ากับ $4T_e$ แสดงได้โดยกราฟเส้น b ในภาพที่ 3.13 ส่วนในกรณีของระบบที่มีตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดใหญ่มากๆ และใช้ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัมนั้น สามารถใช้ค่า T_{sm} เท่ากับค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุม (T_i) ที่ออกแบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตอบสนองของระบบต่อสิ่งรบกวนภายนอก

ระบบที่ออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีโมดูลัสหรือซิมเมตริคอลออปติมัม จะมีการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกของระบบ (disturbances) ในลักษณะที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติของระบบ พิจารณาตัวอย่างของระบบควบคุมในภาพที่ 3.14 โดยไม่มีการป้อนคำสั่งให้กับระบบหรืออินพุทเป็น 0

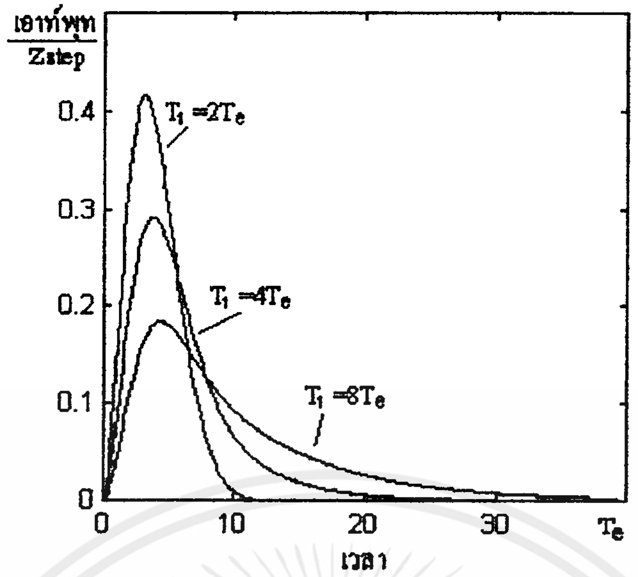


ภาพที่ 3.14 แสดงระบบที่ให้อินพุทเป็น 0 เพื่อพิจารณาผลตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอก (Z)

ตัวอย่างระบบดังภาพที่ 3.14 ประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบ PI และองค์ประกอบของระบบที่มีค่าคงที่ทางเวลาที่มากที่สุดเป็น T_1 และผลรวมของค่าคงที่ทางเวลาขนาดเล็กเป็น T_e โดยให้ผลจากสิ่งรบกวนภายนอกแทนด้วย Z การออกแบบตัวควบคุมของระบบนี้ทำได้ 2 วิธีได้แก่วิธีโมดูลัสและซิมเมตริคอลออปติมัม โดยแต่ละวิธีจะพิจารณาในกรณีที่ค่าคงที่ทางเวลา T_1 มีค่าเท่ากับ $2T_e$, $4T_e$ และ $8T_e$

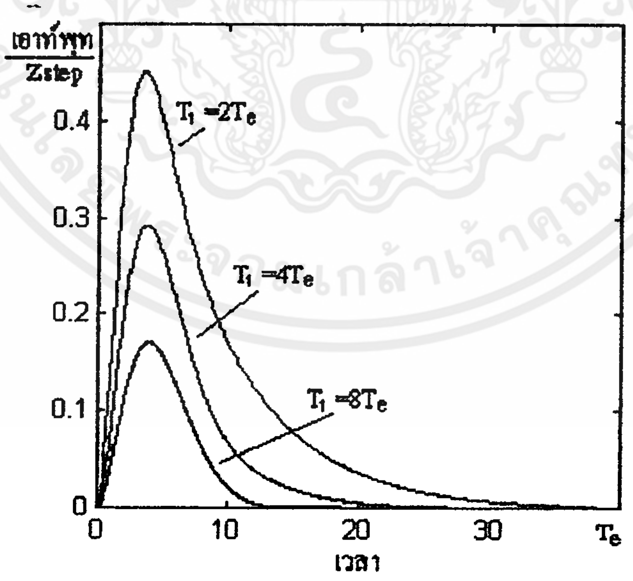
การออกแบบตัวควบคุมของระบบดังกล่าวด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัมจะได้การตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกอย่างทันทีทันใด (step disturbances, Z_{step}) ดังภาพที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.15 แสดงการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกอย่างทันทีทันใดของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีโมดูลัสออปติมัม

ส่วนการออกแบบตัวควบคุมของระบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัมจะได้การตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกอย่างทันทีทันใดดังภาพที่ 3.16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

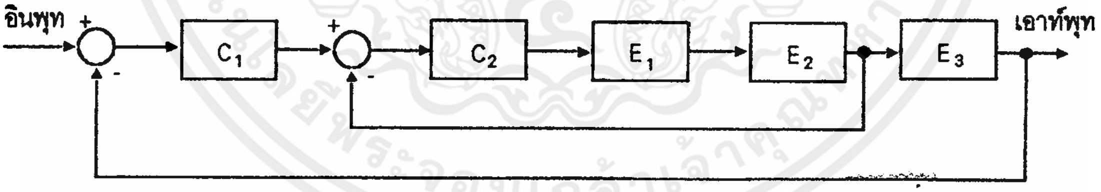
ภาพที่ 3.16 แสดงการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกอย่างทันทีทันใดของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีซิมเมตริคอลออปติมัม

จากการตอบสนองของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัมพบว่าถ้าค่าคงที่ทางเวลา T_1 มีค่ามากกว่า $4T_e$ มากยิ่งขึ้นระบบจะมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวยาวนานมากขึ้นแต่โอเวอร์ชูทน้อย ส่วนระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัมพบว่าถ้าค่าคงที่ทางเวลา T_1 มีค่าน้อยกว่า $4T_e$ น้อยยิ่งขึ้นระบบจะมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวยาวนานมากขึ้นและมีโอเวอร์ชูทสูง ดังนั้นเพื่อการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอกที่เหมาะสมของระบบ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัมควรใช้เมื่อค่าคงที่ทางเวลา T_1 มีค่าไม่เกิน $4T_e$ และการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัมควรใช้เมื่อค่าคงที่ทางเวลา T_1 มีค่าเกิน $4T_e$

3.7 การแบ่งระบบออกเป็นส่วนย่อย

ระบบที่มีองค์ประกอบหลายส่วน สามารถใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียวควบคุมทั้งหมดได้ โดยพิจารณาการใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ ได้แก่ I , PI และ PID ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของระบบ แต่ถ้าองค์ประกอบของระบบมีมากขึ้น การใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียวไม่สามารถทำให้ระบบตอบสนองต่อสเตปอินพุทได้รวดเร็วกว่าที่ควรจะเป็น การตอบสนองต่อสเตปโหลดช้าลงและมีแนวโน้มที่จะให้โอเวอร์ชูทต่อสเตปโหลดสูงขึ้น[1,3]

ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมมากกว่าหนึ่งตัว เพื่อควบคุมในแต่ละส่วนของระบบนั้นสามารถลดผลกระทบจากภายนอกที่เกิดจากส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบตอบสนองต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลดได้ช้าลง พิจารณาระบบที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ E_1 , E_2 , E_3 และใช้ตัวควบคุม C_1 และ C_2 ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 แสดงระบบที่ใช้ตัวควบคุม 2 ตัว

ระบบในภาพที่ 3.17 ใช้ตัวควบคุม C_2 ควบคุมองค์ประกอบ E_1 และ E_2 เป็นลักษณะของการควบคุมแบบปิดเป็นลูปที่ 1 สามารถพิจารณาเป็นส่วนประกอบย่อยของตัวควบคุม C_1 และองค์ประกอบ E_3 เป็นลูปที่ 2 ที่อยู่นอกสุด อยู่ในลักษณะลูปควบคุมที่ซ้อนกันอยู่สองลูป

การพิจารณาลูปภายในเป็นส่วนประกอบย่อยของลูปภายนอกใช้การพิจารณาตามแบบของวิธีการออกแบบตัวควบคุม โดยพิจารณาได้จากทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นโดยรวมหลังจากที่ออกแบบตัวควบคุมแล้ว มีค่าคงที่ทางเวลาประมาณเท่ากับสัมประสิทธิ์กำลัง 1 ของ s ตามสมการที่ (3-12) ,

(3-21) และ (3-25) สำหรับระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม และด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัมที่ใช้ตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูท สรุปได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

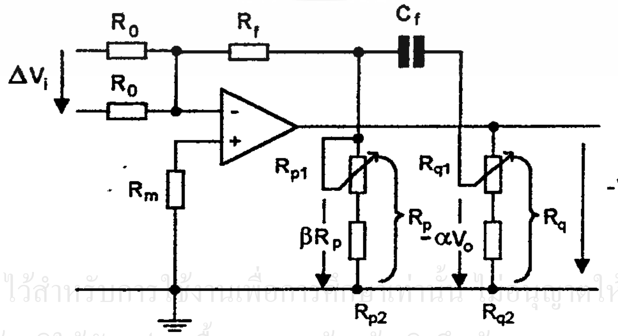
ตารางที่ 3.1 สรุปค่าคงที่ทางเวลาของการประมาณลูปควบคุมให้เป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง

วิธีการออกแบบ	ค่าคงที่ทางเวลาในการประมาณค่าเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง
โมดูลัสออปติมัม	$2T_e$
ซิมเมตริคอลออปติมัม	$4T_e$
ซิมเมตริคอลออปติมัม (ระบบที่มีตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดใหญ่)	$4T_ek_3$ (จากสมการที่ (3-25))

การประมาณลูปภายในเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งสำหรับลูปภายนอก ทำให้การออกแบบตัวควบคุมของลูปภายนอกทำได้สะดวกขึ้น โดยใช้ค่าคงที่ทางเวลาที่ได้จากการประมาณตามตาราง เพื่อออกแบบตัวควบคุมในลูปภายนอก

3.8 วงจรของตัวควบคุม

การสังเคราะห์วงจรของตัวควบคุมแบบ PI และ PID ใช้วงจรรวมออปแอมเป็นส่วนประกอบหลัก วงจรของตัวควบคุมแบบ PI แบบปรับค่าอัตราขยายสัญญาณ A_r และค่าคงที่ในการอินทิเกรตสัญญาณ T_i โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้มีลักษณะดังภาพที่ 3.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.18 แสดงการสังเคราะห์ตัวควบคุม PI โดยใช้ออปแอม[3,5]

โดยที่ค่า A_r และ T_i ที่ปรับค่าได้ มีความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ต่างๆ ดังสมการ (3-27) และ (3-28) ตามลำดับ

$$A_r = \frac{R_f}{R_0} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot K_\alpha \tag{3-27}$$

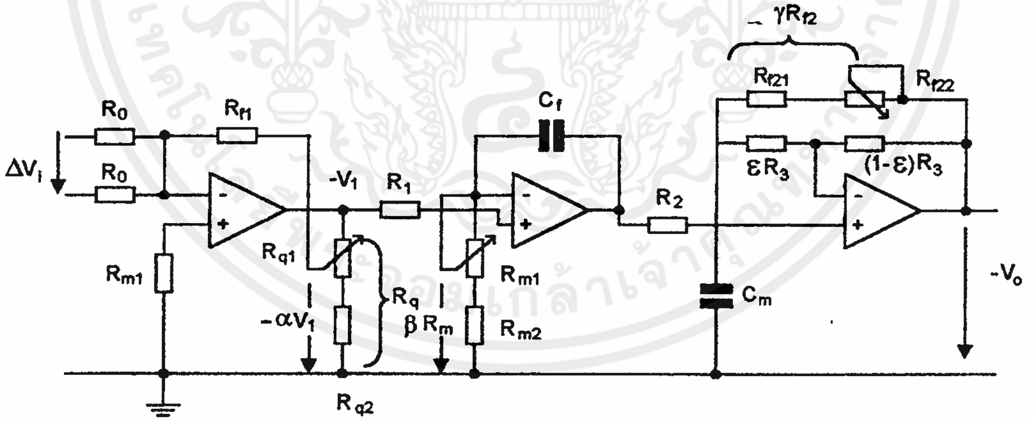
$$T_i = \frac{R_f \beta R_p}{R_f + \beta R_p} C_f K_\alpha \tag{3-28}$$

โดยที่

$$K_\alpha = 1 + (\alpha - \alpha^2)\frac{R_q}{R_f} \tag{3-29}$$

โดยถ้าส่วนตัวต้านทานคงที่ของ R_p มีค่า 0.1 เท่าของ R_f และค่า R_p ทั้งหมดมีค่า 10 เท่าของ R_f และค่าอัตราส่วนของ R_q/R_f น้อยกว่า 1 มากๆ สามารถปรับค่า A_r และ T_i ได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ R_q และ R_p ตามลำดับได้อิสระจากกัน และในการคำนวนค่าต่างๆ ใช้ค่าช่วงการปรับที่ครึ่งหนึ่งของช่วงการปรับทั้งหมดหรือที่ α และ β มีค่าเป็น 0.5

วงจรตัวควบคุมแบบ PID แบบปรับค่าอัตราขยายสัญญาณ A_r ค่าคงที่ในการอินทิเกรตสัญญาณ T_i และค่าคงที่ในการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณ T_v โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 แสดงการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID โดยใช้ออปแอม[3]

โดยที่ค่า A_r , T_i และ T_v สามารถปรับค่าได้ โดยมีความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ต่างๆ ดังสมการ (3-30) , (3-31) และ (3-32) ตามลำดับ

$$A_r = \frac{R_{f1}}{R_0} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot K_\alpha \quad (3\text{-}30)$$

$$T_i = \beta R_m C_f \quad (3\text{-}31)$$

$$T_v = \frac{\gamma R_{f2} R_3}{\gamma R_{f2} + R_3} C_m \quad (3\text{-}32)$$

โดยที่

$$K_\alpha = 1 + (\alpha - \alpha^2) \frac{R_q}{R_{f1}} \quad (3\text{-}33)$$

วงจรที่สังเคราะห์ได้นั้นมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นดังนี้

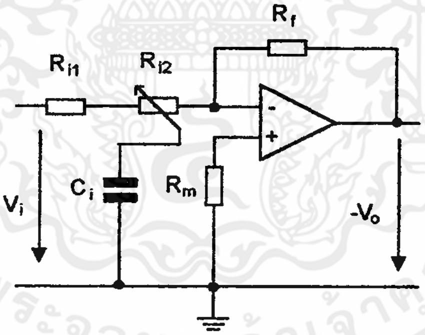
$$F_r(s) = \frac{-V_o(s)}{\Delta V_i(s)} = A_r \frac{(1+sT_i)(1+sT_v)}{sT_i.(1+sT_d)} \quad (3\text{-}34)$$

โดยที่

$$T_d = \varepsilon T_v \quad (3\text{-}35)$$

ค่าคงที่ทางเวลา T_d ควรมีค่าน้อยกว่า 0.05 เท่าของ T_v หรือค่า ε ต้องมีค่าต่ำกว่า 0.05 เพื่อป้องกันการออสซิลเลตของวงจร PID นี้

ถ้าการออกแบบตัวควบคุมใช้วิธีซิมเมตริคอลออปติมัม จะต้องใช้ตัวสมูทติ้งเพิ่มเข้าไปทางอินพุทของระบบ วงจรสมูทติ้งแสดงดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 แสดงวงจรสมูทติ้ง[1,11]

วงจรสมูทติ้งในภาพที่ 3.20 มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นดังนี้

$$F_r(s) = \frac{-V_o(s)}{V_i} = A_r \frac{1}{1+sT_{sm}} \quad (3\text{-}37)$$

โดยที่

$$A_r = \frac{R_f}{R_{i1} + R_{i2}} \quad (3\text{-}38)$$

$$T_{sm} = \frac{R_{i1} R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}} C_i \quad (3\text{-}39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 ระบบของดีซีมอเตอร์

การจ่ายพลังงานให้กับดีซีมอเตอร์โดยอาศัยวงจรขับดีซีมอเตอร์หรือไดร์ฟเวอร์ ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณควบคุมให้เหมาะสมกับดีซีมอเตอร์ที่มีค่าอัตราขยายสัญญาณ A_a และการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของไดร์ฟเวอร์นั้น มีลักษณะเหมือนกับตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง ที่มีค่าคงที่ทางเวลา T_a จากสมการ (2-7) การจ่ายโวลท์เตจให้กับส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$V_a(s) - K_E\,\omega(s) = (sL_a + R)I_a(s) \qquad (3\text{-}40)$$

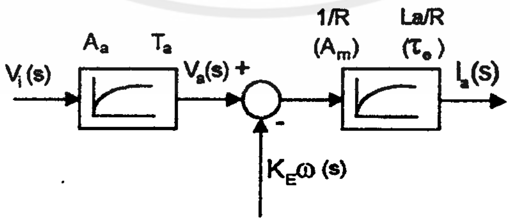
ถ้าให้ $V_i(s)$ เป็นสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับไดร์ฟเวอร์เพื่อขยายสัญญาณให้ได้ $V_a(s)$ เพื่อป้อนให้กับส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_i(s)$ และ $V_a(s)$ ดังนี้

$$V_a(s) = \frac{A_a}{(1+sT_a)} V_i(s) \qquad (3\text{-}41)$$

แทนสมการ (2-41) ลงในสมการ (2-40)

$$\frac{A_a}{(1+sT_a)} V_i(s) - K_E\,\omega(s) = (sL_a + R)I_a(s) \qquad (3\text{-}42)$$

จากสมการ (3-42) สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ที่แสดงลักษณะของการตอบสนองต่อสเตปอินพุทในเชิงเวลาของไดร์ฟเวอร์และส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์ไว้ภายในบล็อกของแต่ละส่วน โดยแสดงค่าอัตราขยายและค่าคงที่ทางเวลาไว้ด้านบนแต่ละบล็อกดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการจ่ายโวลท์เตจให้กับส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับความเร็วรอบของดีซีมอเตอร์โดยอาศัยทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ โดยอาศัยสมการที่ (2-23) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ $\omega(s)$ และสัญญาณเอาท์พุท $V_g(s)$ ดังนี้

$$\frac{V_g(s)}{\omega(s)} = K_{Tg} \Rightarrow V_g(s) = K_{Tg}\,\omega(s) \qquad (3\text{-}43)$$

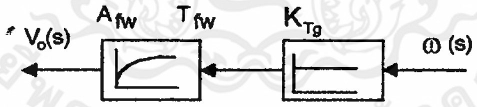
$V_g(s)$ ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบ $\omega(s)$ นั้นในทางปฏิบัติแล้วจะมีสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงปะปนอยู่ด้วย ดังนั้นจึงใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีการตอบสนองต่อสเตปอินพุทในลักษณะของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ทางเวลา T_{fw} และมีค่าอัตราขยายสัญญาณ A_{fw} เพื่อให้เหมาะสมกับการตรวจจับสัญญาณโดยตัวควบคุมต่อไป ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_g(s)$ และสัญญาณที่นำไปใช้งาน $V_o(s)$ ดังนี้

$$V_o(s) = \frac{A_{fw}}{(1 + sT_{fw})} V_g(s) \qquad (3\text{-}44)$$

แทนสมการ (3-43) ลงในสมการ (3-44)

$$V_o(s) = \frac{A_{fw}}{(1 + sT_{fw})} K_{Tg}\,\omega(s) \qquad (3\text{-}45)$$

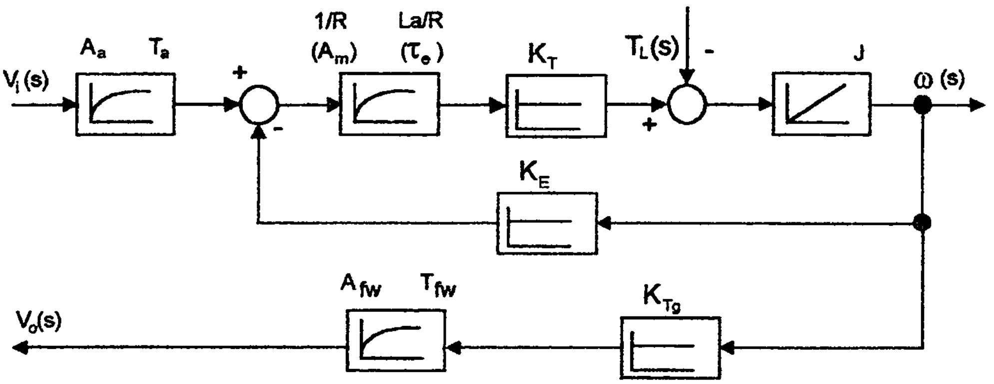
จากสมการ (3-45) สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ที่แสดงลักษณะของการตอบสนองต่อสเตปอินพุทในเชิงเวลาของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ ไว้ภายในบล็อกของแต่ละส่วน โดยแสดงค่าอัตราขยายและค่าคงที่ทางเวลาไว้ด้านบนของแต่ละบล็อกดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและสัญญาณที่นำไปใช้งาน

จากภาพที่ 2.5 , 3.20 และ 3.21 จะได้บล็อกไดอะแกรมที่แสดงระบบของดีซีมอเตอร์ดังภาพที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



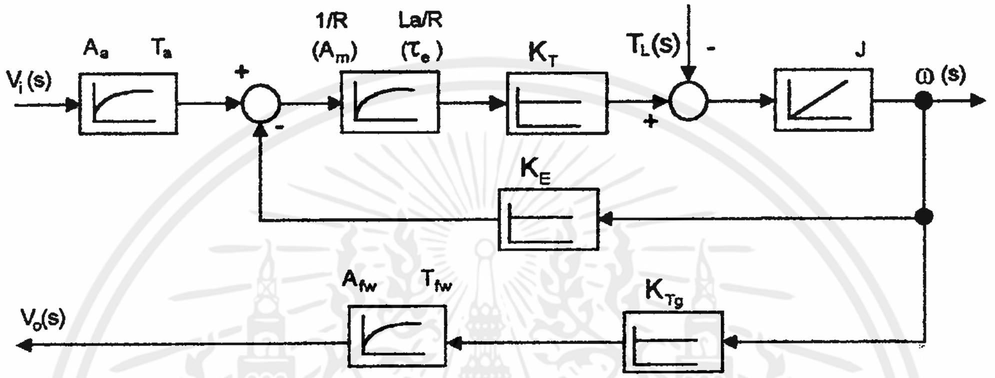
ภาพที่ 3.23 แสดงระบบของดีซีมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบหลายลูป

ระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ประกอบด้วยตัวควบคุมและระบบของดีซีมอเตอร์ ซึ่งระบบของดีซีมอเตอร์ประกอบไปด้วยวงจรขับดีซีมอเตอร์หรือไดร์ฟเวอร์เพื่อจ่ายกระแสให้กับดีซีมอเตอร์[14], ดีซีมอเตอร์, ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์, ฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่าน[15] ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงระบบของดีซีมอเตอร์

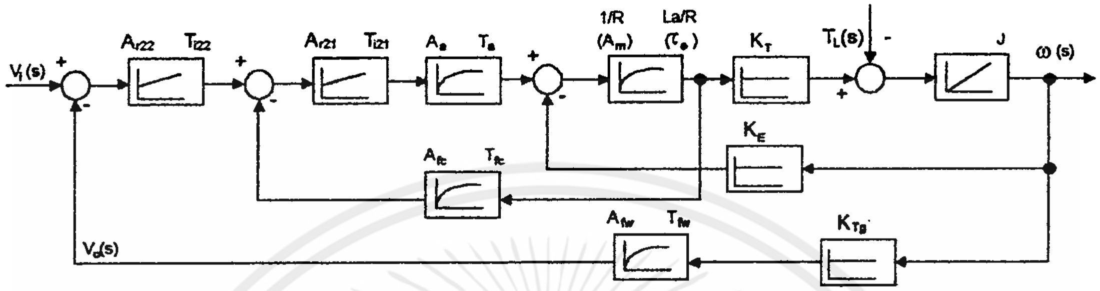
ระบบดีซีมอเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้[16]

A_a	คือค่าอัตราขยายสัญญาณของไดร์ฟเวอร์	=	4.6	
T_a	คือค่าคงที่ทางเวลาของไดร์ฟเวอร์	=	30×10^{-3}	s
R	คือค่าความต้านทานอาร์มาเจอร์ของดีซีมอเตอร์	=	3.1	Ω
L_a	คือค่าความเหนี่ยวนำอาร์มาเจอร์ของดีซีมอเตอร์	=	4.7×10^{-3}	H
A_m	คือค่าอัตราขยายสัญญาณของส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์	=	1/R = 0.32258	
τ_e	คือค่าคงที่ทางเวลาทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์	=	La/R = 1.516×10^{-3}	s
K_T	คือค่าคงที่แรงบิดของดีซีมอเตอร์	=	0.22	Nm/A
J	คือค่าโมเมนท์ของแรงเฉื่อยของดีซีมอเตอร์	=	3.21×10^{-4}	Kg-m^2
K_E	คือค่าคงที่แรงดันย้อนกลับของดีซีมอเตอร์	=	0.22	V/rad-s^{-1}
K_{Tg}	คือค่าอัตราขยายสัญญาณของทาโคเจนเนอร์เรเตอร์	=	6.686×10^{-2}	V/rad-s^{-1}
A_{fw}	คือค่าอัตราขยายสัญญาณของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่าน	=	0.5	
T_{fw}	คือค่าคงที่ทางเวลาของฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่าน	=	3.3×10^{-3}	s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบสองลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI

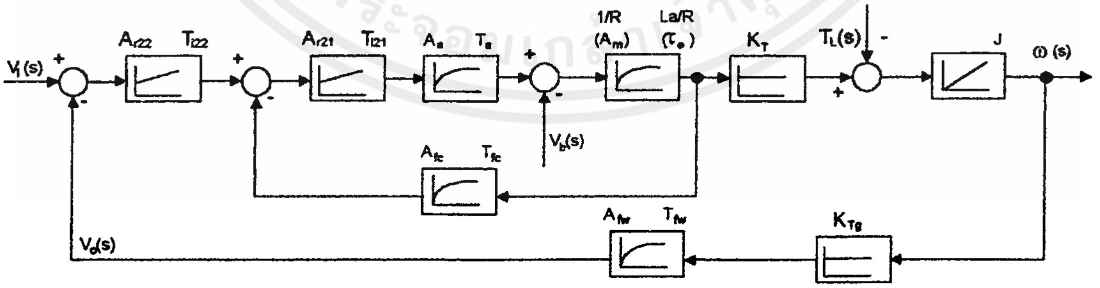
การออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบความเร็ว โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ควบคุมความเร็วและใช้ตัวควบคุมแบบ PI ควบคุมกระแส อยู่ในลักษณะการควบคุมสองลูปซ้อนกัน แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสองลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI

ภายในลูปควบคุมกระแสมีการป้อนกลับกระแสที่ไหลผ่านดีซีมอเตอร์มายังตัวควบคุมแบบ PI โดยผ่านฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าอัตราขยายสัญญาณ A_{fc} เท่ากับ 1 และค่าคงที่ทางเวลา T_{fc} เท่ากับ $3.3x10^{-4}$ วินาที

ในการป้อนกลับกระแสนั้นมีการคาบเกี่ยวของโวลท์เตจย้อนกลับของดีซีมอเตอร์ด้วย ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อดีซีมอเตอร์หมุน ถ้าพิจารณาการควบคุมกระแสเมื่อกระแสมีค่าสูงสุดซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อดีซีมอเตอร์หยุดหมุน ดังนั้นค่าโวลท์เตจย้อนกลับสามารถพิจารณาให้เป็นเพียงการรบกวนจากภายนอกได้[1,5,7] แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แสดงการพิจารณาโวลท์เตจย้อนกลับให้เป็นการรบกวนจากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นลูปควบคุมกระแสจึงประกอบไปด้วย ตัวควบคุมแบบ PI, ไดร์ฟเวอร์, ส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์ และฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่าน โดยที่ค่าคงที่ทางเวลา T_a มีค่ามากที่สุด และ

ค่าคงที่ทางเวลารวมขนาดเล็กที่เหลือ T_e มีค่าดังนี้

$$T_e = \tau_e + T_{fc} = 1.816\text{x}10^{-3} \qquad \text{s}$$

และค่าอัตราขยายสัญญาณโดยรวมของระบบควบคุมกระแส A_s มีค่าดังนี้

$$A_s = A_a . A_m . A_{fc} = 1.484$$

ค่าของ T_a มีค่ามากกว่า T_e เกินกว่า 4 เท่าดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI เพื่อควบคุมในลูปควบคุมกระแสจะใช้การออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม ซึ่งต้องอาศัยค่าแก้ไข k_1 และ k_2 สามารถคำนวนได้ดังนี้

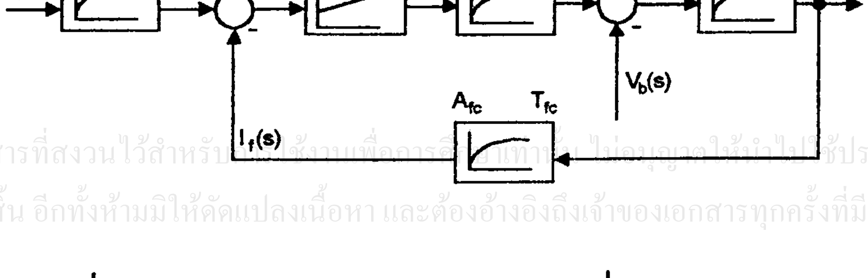
$$k_1 = 1 + \frac{T_e^2}{T_a^2} = 1.0037 \quad , \quad k_2 = \frac{k_1}{(1+T_e/T_a)^3} = 0.8415$$

ดังนั้นจากสมการ (3-23) และ (3-24) สามารถคำนวนหาค่า T_{i21} และ A_{r21} ของตัวควบคุมแบบ PI ได้ดังนี้

$$T_{i21} = 4T_e k_2 = 6.113\text{x}10^{-3} \qquad \text{s}$$

$$A_{r21} = \frac{T_a}{2A_s T_e} k_1 = 5.587$$

การออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัมจะเกิดโอเวอร์ชูทเมื่อตอบสนองต่อสเตปอินพุทสูง จึงต้องใช้ตัวสมูทติ้งประกอบเข้าทางด้านอินพุท โดยใช้ค่า T_{sm21} เท่ากับ T_{i21} แสดงลูปควบคุมกระแสได้ดังภาพที่ 4.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเพื่อใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.4 แสดงลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสองลูป

วงจรของตัวควบคุมในลูปควบคุมกระแสแบบ PI ได้จากภาพที่ 3.17 โดยกำหนดให้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ มีค่าต่างๆ ได้แก่ $R_f = 10K\Omega$, R_q ส่วนปรับค่าได้หรือ $R_{q1} = 1K\Omega$, R_q ส่วนคงที่หรือ $R_{q2} = 100\ \Omega$ และให้ค่า $\alpha = 0.5$ ดังนั้นจากสมการ (3-29) จะได้ค่า K_α ดังนี้

$$K_\alpha = 1 + (0.5 - 0.5^2) \cdot \frac{1x10^3}{10x10^3} = 1.025$$

จากค่า A_{r21} จะได้ค่า R_0 จากสมการ (3-27) ดังนี้

$$R_0 = \frac{R_f}{A_{r21}} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot K_\alpha = 3.669K\Omega$$

เลือกใช้ $R_0 = 3.6K\Omega$ และค่า R_q สามารถปรับได้ตั้งแต่ 100Ω จนถึง $1.1K\Omega$ หรือค่า α สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-27) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า A_{r21} ได้ระหว่าง 28.5 และ 3.2

ส่วนค่า C_f ในวงจรใช้สมการ (3-28) โดยให้ $\beta=0.5$, R_p ส่วนปรับค่าได้หรือ $R_{p1} = 100\ K\Omega$, R_p ส่วนคงที่หรือ $R_{p2} = 1K\Omega$ ดังนั้นจะได้ค่า C_f ดังนี้

$$C_f = T_{i21} \cdot \frac{R_f + (\beta R_p)}{R_f \beta R_p} \frac{1}{K_\alpha} = 0.714\mu F$$

เลือกใช้ $C_f = 0.68\mu F$ และค่า R_p สามารถปรับได้ตั้งแต่ $1K\Omega$ จนถึง $101K\Omega$ หรือค่า β สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-28) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า T_{i21} ได้ระหว่าง $3.5x10^{-3}$ จนถึง $6.28x10^{-3}$ วินาที

วงจรสมูทติ้งจากภาพที่ 3.19 สามารถคำนวณหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยอาศัยสมการ (3-38) เพื่อกำหนดค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจรสมูทติ้ง A_r โดยให้เท่ากับ 1 ดังนี้

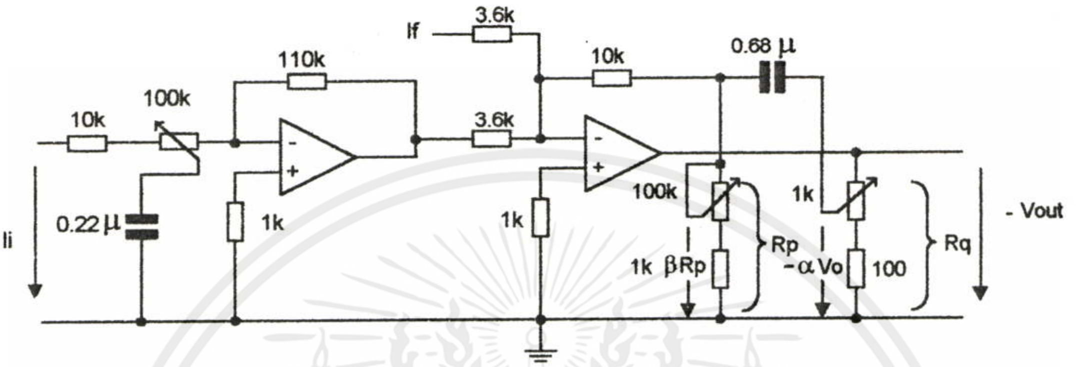
$$A_r = \frac{R_f}{R_{i1} + R_{i2}} = 1$$

จะได้ค่า R_f เท่ากับ $R_{i1}+R_{i2}$ ถ้าให้ R_{i1} เท่ากับ $10K\Omega$ และ Ri2 เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้เท่ากับ $100K\Omega$ ดังนั้นจะได้ R_f เท่ากับ $110K\Omega$ โดยที่ค่า R_{i2} ปรับไว้ที่จุดกึ่งกลางคือ $50\ K\Omega$ ดังนั้นค่า R_{i1} มีค่าเท่ากับ $60K\Omega$ เพื่อใช้คำนวณหาค่า C_i ต่อไป

ส่วนค่า C_i ได้จากสมการ (3-39) โดยใช้ค่า $R_{i1}=60K\Omega$ และ $R_{i2}=50K\Omega$ ดังนี้

$$C_i = T_{sm21}\frac{R_{i1}+R_{i2}}{R_{i1}.R_{i2}} = 0.224\mu F$$

เลือกใช้ค่า C_i เท่ากับ 0.22 μF แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสองลูป ดังภาพที่ 4.5



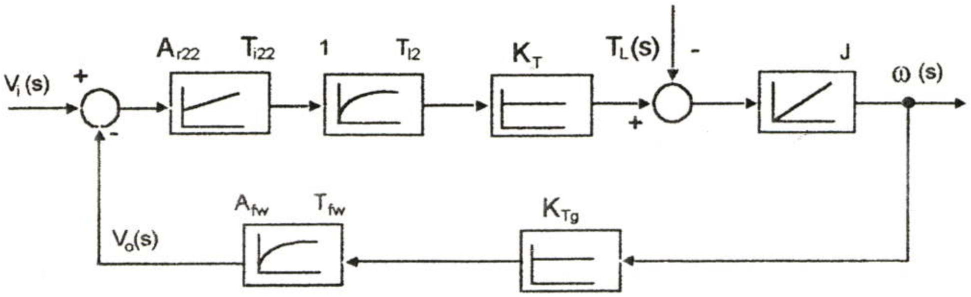
ภาพที่ 4.5 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสองลูป

ลูปควบคุมกระแสสามารถประมาณให้เป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งได้ โดยอาศัยค่าจากตารางที่ 3.1 โดยมีค่าเท่ากับ $4T_e.k_3$ เมื่อ $k_3 = \frac{1}{(1+T_e/T_a)} = 0.943$ ดังนั้นจะได้ค่าคงที่ทางเวลา T_{I2} เมื่อประมาณลูปควบคุมกระแสเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งดังนี้

$$T_{I2} = 4x1.816x10^{-3}xk_3 = 6.85x10^{-3} \quad s$$

จากภาพที่ 4.4 ตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่ได้มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $I_f(s)$ และ $I_i(s)$ แต่ในการใช้งานกับลูปควบคุมความเร็วที่เป็นลูปนอกจะต้องใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง $I_o(s)$ และ $I_i(s)$ จะต้องพิจารณาฟิลเตอร์ให้อยู่ในส่วนของการป้อนกลับ แต่ค่าอัตรขยายสัญญาณ A_{fc} เป็น 1 และค่าคงที่ทางเวลา T_{fc} มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า T_{I2} ที่ได้ ดังนั้นจึงใช้ค่า T_{I2} เป็นค่าคงที่ทางเวลาจากการประมาณเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง และมีค่าอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1 สำหรับลูปควบคุมกระแส ดังนั้นจะได้ลูปควบคุมความเร็วดังภาพที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดงลูปควบคุมความเร็วที่มีลูปควบคุมกระแสที่ประมาณเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งอยู่ภายใน

ระบบควบคุมความเร็วในภาพที่ 4.6 มีตัวอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI จึงใช้การออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม โดยที่ผลรวมของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดเล็ก T_e มีค่าดังนี้

$$T_e = T_{I2}+T_{fw} = 10.15x10^{-3} \qquad s$$

และค่าอัตราขยายสัญญาณโดยรวมของระบบ A_s มีค่าดังนี้

$$A_s = K_T.K_{Tg}.A_{fw} = 7.49x10^{-4}$$

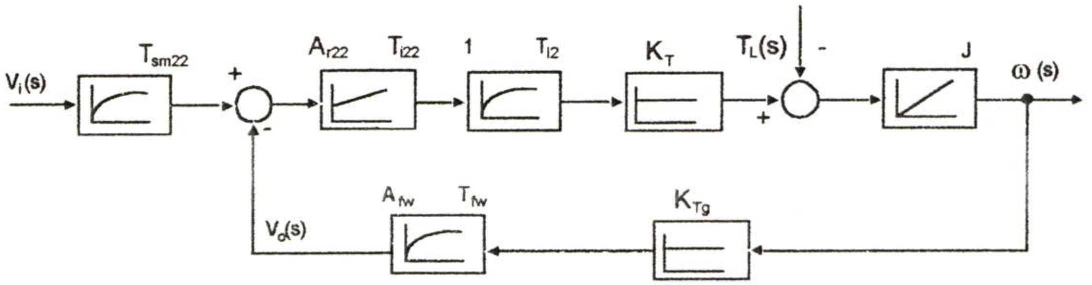
จากสมการ (3-19) และ (3-20) สามารถหาค่า T_{i22} และ A_{r22} ของตัวควบคุมแบบ PI ได้ดังนี้

$$T_{i22} = 4T_e = 40.6x10^{-3} \qquad s$$

$$A_{r22} = \frac{J}{2A_sT_e} = 2.11$$

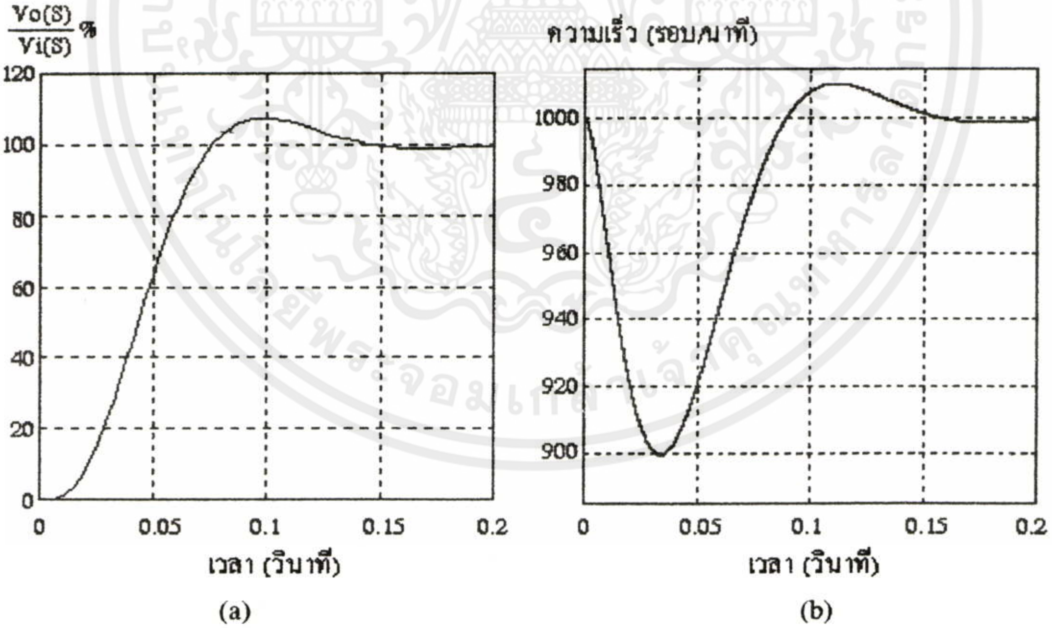
ระบบออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม ดังนั้นต้องเพิ่มตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูทจากสมการ (3-26) จะได้ค่าคงที่ทางเวลา T_{sm22} ของวงจรสมูทติ้งเท่ากับ T_{i22} ดังนั้นจะได้ระบบควบคุมความเร็วทั้งหมดดังภาพที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสองลูปที่มีตัวสมูทติ้ง

จำลองระบบควบคุมทั้งหมดที่ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาจากการตอบสนองต่อสเตปอินพุท และสเตปโหลด โดยทดสอบสเตปโหลดเมื่อให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ให้ค่าสเตปโหลดที่ 0.37 Nm ซึ่งเป็นค่าแรงบิดสูงสุดของโหลดที่ใช้และไม่เกินแรงบิดสูงสุดของดีซีมอเตอร์ โดยให้เป็นสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด ซึ่งแรงบิดที่มากเกินกว่าแรงบิดสูงสุดของดีซีมอเตอร์อาจทำให้ดีซีมอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยแสดงผลที่ได้ดังภาพที่ 4.8 a และ b ตามลำดับ



ภาพที่ 4.8 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมแบบสองลูปต่อสเตปอินพุท (a) และสเตปโหลด (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในกรณีการตอบสนองต่อสเตปอินพุท ระบบใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 135 มิลลิวินาที และมีโอเวอร์ชูทประมาณ 8.1% ส่วนในกรณีการตอบสนองต่อสเตปโหลดใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 140 มิลลิวินาที มีความเร็วเบี่ยงเบนสูงสุดหรือโอเวอร์ชูทประมาณ 100 รอบ/นาที

วงจรของตัวควบคุมแบบ PI ได้จากภาพที่ 3.17 โดยกำหนดให้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ $R_f = 10K\Omega$, R_q ส่วนปรับค่าได้หรือ $R_{q1} = 1K\Omega$, R_q ส่วนคงที่หรือ $R_{q2} = 100\ \Omega$ และให้ค่า $\alpha = 0.5$ ดังนั้นจากสมการ (3-29) จะได้ค่า K_α ดังนี้

$$K_\alpha = 1 + (0.5 - 0.5^2) \cdot \frac{1x10^3}{10x10^3} = 1.025$$

จากค่า A_{r22} จะได้ค่า R_0 จากสมการ (3-27) ดังนี้

$$R_0 = \frac{R_f}{A_{r22}} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot K_\alpha = 9.716K\Omega$$

เลือกใช้ $R_0 = 10K\Omega$ และค่า R_q สามารถปรับได้ตั้งแต่ 100Ω จนถึง $1.1K\Omega$ หรือค่า α สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-27) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า A_{r22} ได้ระหว่าง 10.4 และ 1.1

ส่วนค่า C_f ในวงจรใช้สมการ (3-28) โดยให้ $\beta=0.5$, R_p ส่วนปรับค่าได้หรือ $R_{p1} = 100\ K\Omega$, R_p ส่วนคงที่หรือ $R_{p2} = 1K\Omega$ ดังนั้นจะได้ค่า C_f ดังนี้

$$C_f = T_{i22} \cdot \frac{R_f + (\beta R_p)}{R_f \beta R_p} \cdot \frac{1}{K_\alpha} = 4.745\mu F$$

เลือกใช้ $C_f = 4.7\mu F$ และค่า R_p สามารถปรับได้ตั้งแต่ $1K\Omega$ จนถึง $101K\Omega$ หรือค่า β สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-28) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า T_{i22} ได้ระหว่าง $24.2x10^{-3}$ จนถึง $43.4x10^{-3}$ วินาที

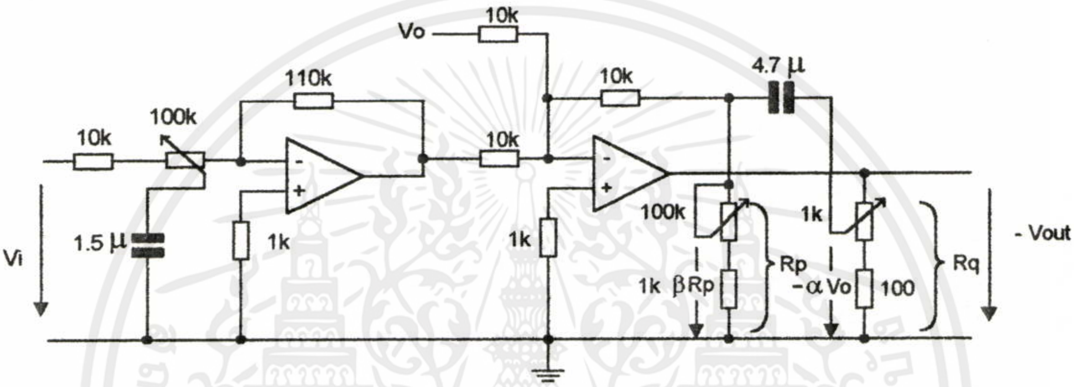
วงจรสมูทติ้งจากภาพที่ 3.19 สามารถคำนวนหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยอาศัยสมการ (3-38) เพื่อกำหนดค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจรสมูทติ้ง A_r โดยให้เท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้ค่า R_f เท่ากับ $R_{i1}+R_{i2}$ ถ้าให้ R_{i1} เท่ากับ $10K\Omega$ และ R_{i2} เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้เท่ากับ $100K\Omega$ ดังนั้นจะได้ R_f เท่ากับ $110K\Omega$ โดยที่ค่า R_{i2} ปรับไว้ที่จุดกึ่งกลางคือ $50K\Omega$ ดังนั้นค่า R_{i1} มีค่าเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

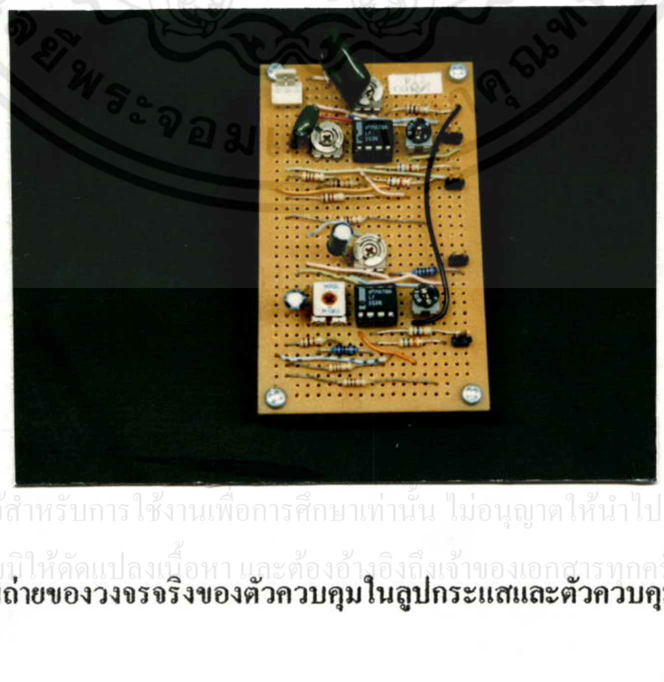
กับ 60KΩ เพื่อใช้คำนวนหาค่า C_i จากสมการ (3-39) โดยใช้ค่า R_{i1}=60KΩ และ R_{i2}=50KΩ ดังนี้

$$C_i = T_{sm22}\frac{R_{i1}+R_{i2}}{R_{i1}.R_{i2}} = 1.489\mu F$$

เลือกใช้ค่า C_i เท่ากับ 1.5 μF แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสองลูปดังภาพที่ 4.9 และภาพถ่ายของวงจรจริงที่ประกอบไปด้วยตัวควบคุมลูปกระแสและตัวควบคุมลูปความเร็ว ในแผงวงจรเดียวกันดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.9 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสองลูป

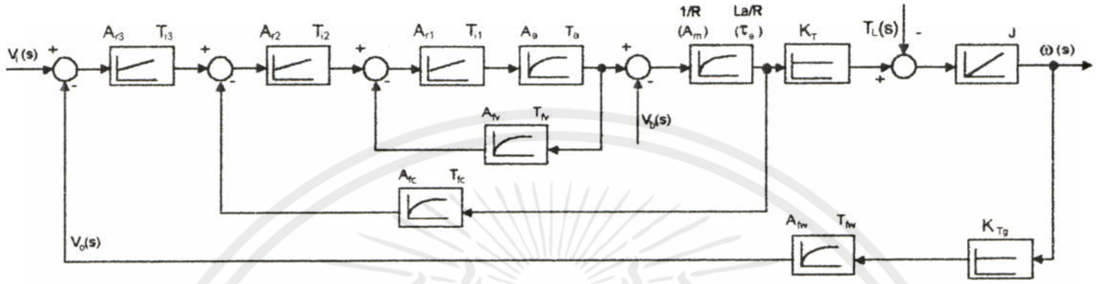


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายของวงจรจริงของตัวควบคุมในลูปกระแสและตัวควบคุมในลูปความเร็วในแผงวงจรเดียวกัน

4.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI

ระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปประกอบไปด้วย ลูปควบคุมความเร็วที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายใน โดยลูปควบคุมกระแสนั้นใช้ตัวควบคุมแบบ PI และมีลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายใน โดยที่ลูปควบคุมโวลท์เตจนั้นใช้ตัวควบคุมแบบ PI เช่นกัน แสดงได้ภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI

ลูปควบคุมโวลท์เตจประกอบด้วยตัวควบคุมแบบ PI, ไดร์ฟเวอร์ และฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าอัตราขยายสัญญาณ A_{fv} เท่ากับ 0.1 และค่าคงที่ทางเวลา T_{fv} เท่ากับ $5.6\text{x}10^{-4}$ วินาที ในลูปนี้ค่าคงที่ทางเวลา T_a มีค่ามากที่สุดและมีค่ามากกว่า 4 เท่าของค่าคงที่ทางเวลา T_{fv} ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI ใช้วิธีซิมเมตริคอลออปติมัม ในลูปนี้ระบบประกอบไปด้วยเพียงตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง ดังนั้นในการคำนวนหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ต้องใช้ค่าแก้ไข k_1 และ k_2 ดังนี้

$$k_1 = 1+\frac{T_{fv}^2}{T_a^2} = 1.0003 \quad , \quad k_2 = \frac{k_1}{(1+T_{fv}/T_a)^3} = 0.9463$$

ค่าอัตราขยายรวมของลูป A_s มีค่าดังนี้

$$A_s = A_a.A_{fv} = 0.46$$

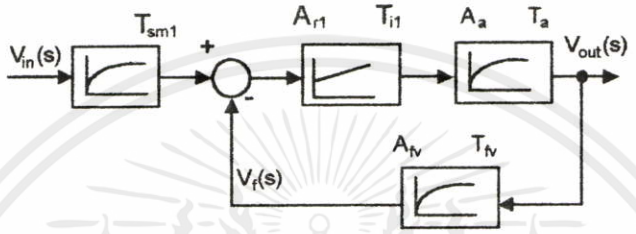
ดังนั้นจากสมการ (3-23) และ (3-24) สามารถคำนวนหาค่า T_{i1} และ A_{r1} ของตัวควบคุมแบบ PI ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{i1} = 4T_{fv} \cdot k_2 = 2.12\text{x}10^{-3} \qquad \text{s}$$

$$A_{r1} = \frac{T_a}{2A_sT_{fv}} \cdot k_1 = 58.247$$

การออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัมจะเกิดโอเวอร์ชูทเมื่อตอบสนองต่อสเตปอินพุทสูง จึงต้องใช้ตัวสมูทติ้งประกอบเข้าทางด้านอินพุท โดยใช้ค่า T_{sm1} เท่ากับ T_{i1} จะได้ลูปควบคุมโวลท์เตจดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แสดงลูปควบคุมโวลท์เตจ

วงจรของตัวควบคุมในลูปควบคุมกระแสแบบ PI ได้จากภาพที่ 3.17 โดยกำหนดให้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ มีค่าต่างๆ ได้แก่ R_f = 10KΩ , R_q ส่วนปรับค่าได้หรือ R_{q1} = 1KΩ , R_q ส่วนคงที่หรือ R_{q2} = 100 Ω และให้ค่า $\alpha = 0.5$ ดังนั้นจากสมการ (3-29) จะได้ค่า K_α ดังนี้

$$K_\alpha = 1 + (0.5 - 0.5^2) \cdot \frac{1\text{x}10^3}{10\text{x}10^3} = 1.025$$

จากค่า A_{r1} จะได้ค่า R_0 จากสมการ (3-27) ดังนี้

$$R_0 = \frac{R_f}{A_{r1}} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot K_\alpha = 351.95\Omega$$

เลือกใช้ R_0 = 360Ω และค่า R_q สามารถปรับได้ตั้งแต่ 100Ω จนถึง 1.1KΩ หรือค่า α สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-27) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า A_{r1} ได้ระหว่าง 284.7 และ 31.6

ส่วนค่า C_f ในวงจรใช้สมการ (3-28) โดยให้ β=0.5 , R_p ส่วนปรับค่าได้หรือ R_{p1} = 100 KΩ , R_p ส่วนคงที่หรือ R_{p2} = 1KΩ ดังนั้นจะได้ค่า C_f ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

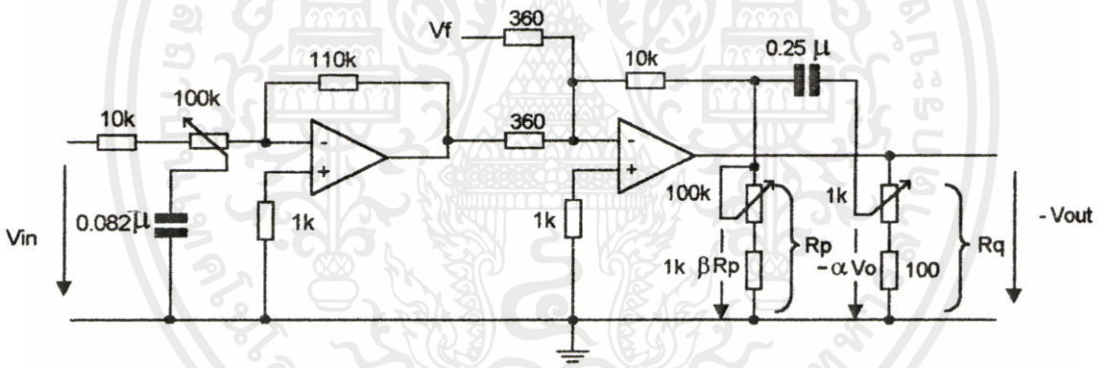
$$C_f = T_{i1} \cdot \frac{R_f + (\beta R_p)}{R_f \beta R_p} \cdot \frac{1}{K_\alpha} = 0.248\mu\text{F}$$

เลือกใช้ $C_f = 0.25\mu F$ และค่า R_p สามารถปรับได้ตั้งแต่ 1KΩ จนถึง 101KΩ หรือค่า β สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-28) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า T_{i1} ได้ระหว่าง $1.29x10^{-3}$ จนถึง $2.31x10^{-3}$ วินาที

วงจรสมูทติ้งจากภาพที่ 3.19 สามารถคำนวนหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยอาศัยสมการ (3-38) เพื่อกำหนดค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจรสมูทติ้ง A_r โดยให้เท่ากับ 1 เมื่อให้ค่า R_f เท่ากับ $R_{i1}+R_{i2}$ ถ้าให้ R_{i1} เท่ากับ 10KΩ และ R_{i2} เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้เท่ากับ 100KΩ ดังนั้นจะได้ R_f เท่ากับ 110KΩ โดยที่ค่า R_{i2} ปรับไว้ที่จุดกึ่งกลางคือ 50KΩ ดังนั้นค่า R_{i1} มีค่าเท่ากับ 60 KΩ เพื่อใช้คำนวนหาค่า C_i จากสมการ (3-39) โดยใช้ค่า R_{i1}=60KΩ และ R_{i2}=50KΩ ดังนี้

$$C_i = T_{sm1} \cdot \frac{R_{i1}+R_{i2}}{R_{i1}.R_{i2}} = 0.077\mu F$$

เลือกใช้ค่า C_i เท่ากับ 0.082 μF แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมโวลท์เตจของระบบควบคุมแบบสามลูป ดังภาพที่ 4.13



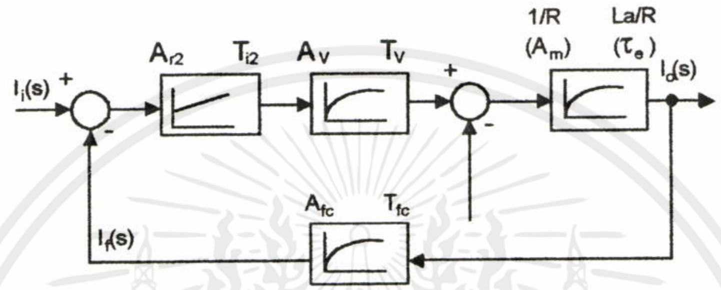
ภาพที่ 4.13 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมโวลท์เตจของระบบควบคุมแบบสามลูป

ลูปควบคุมโวลท์เตจสามารถประมาณให้เป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งได้ โดยอาศัยค่าจากตารางที่ 3.1 โดยมีค่าเท่ากับ $4T_{fv}.k_3$ เมื่อ $k_3 = \frac{1}{(1+T_{fv}/T_a)} = 0.982$ ดังนั้นจะได้ค่าคงที่ทางเวลา T_V เมื่อประมาณลูปควบคุมกระแสเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_V = 4x5.6x10^{-4} xk_3 = 2.2x10^{-3} \quad s$$

จากภาพที่ 4.12 เป็นการประมาณที่อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{in}(s)$ และ $V_f(s)$ แต่ในการใช้งานในลูปถัดไปจะต้องใช้งานการประมาณให้อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{in}(s)$ และ $V_{out}(s)$ โดยการประมาณกลับจากค่าอัตราขยายของฟิลเตอร์คือ 0.1 ซึ่งจะได้ค่าอัตราขยาย A_V ของลูปควบคุมโวลท์เตจมีค่าประมาณ 10 โดยที่ค่าคงที่ทางเวลาของฟิลเตอร์ถือว่าน้อยมาก ดังนั้นค่าคงที่ทางเวลาของลูปควบคุมโวลท์เตจมีค่าเท่ากับ T_V โดยแสดงลูปควบคุมกระแสที่มีลูปควบคุมโวลท์เตจที่ได้จากการประมาณเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งได้ดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 แสดงลูปควบคุมกระแสที่มีลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายใน

ดังนั้นลูปควบคุมกระแสจึงประกอบไปด้วย ตัวควบคุมแบบ PI, ลูปควบคุมโวลท์เตจ, ส่วนทางไฟฟ้าของดีซีมอเตอร์ และฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่าน โดยที่ค่าคงที่ทางเวลา T_V มีค่ามากที่สุด และค่าคงที่ทางเวลารวมขนาดเล็กที่เหลือ T_e มีค่าดังนี้

$$T_e=\tau_e+T_{fc}=1.816\text{x}10^{-3} \quad \text{s}$$

และค่าอัตราขยายสัญญาณโดยรวมของระบบควบคุมกระแส A_s มีค่าดังนี้

$$A_s=A_V.A_m.A_{fc}=1.6$$

ค่าของ T_V มีค่ามากกว่า T_s ไม่เกิน 4 เท่าดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI เพื่อควบคุมในลูปควบคุมกระแสจะใช้การออกแบบด้วยวิธีโมดูลัสออปติมัม ซึ่งให้ค่า T_{i2} เท่ากับ T_V เพื่อชดเชยตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดใหญ่ และหาค่า A_{r2} จากสมการ (3-15) ตามลำดับดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{i2} = T_V = 2.2\text{x}10^{-3} \quad \text{s}$$

$$A_{r2} = \frac{T_V}{2A_sT_s} = 0.38$$

วงจรของตัวควบคุมแบบ PI ได้จากภาพที่ 3.17 โดยกำหนดให้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ มีค่า ได้แก่ $R_f = 10K\Omega$, R_q ส่วนปรับค่าได้หรือ $R_{q1} = 1K\Omega$, R_q ส่วนคงที่หรือ $R_{q2} = 100\ \Omega$ และให้ค่า $\alpha = 0.5$ ดังนั้นจากสมการ (3-29) จะได้ค่า K_α ดังนี้

$$K_\alpha = 1 + (0.5 - 0.5^2) \cdot \frac{1x10^3}{10x10^3} = 1.025$$

จากค่า A_{r2} จะได้ค่า R_0 จากสมการ (3-27) ดังนี้

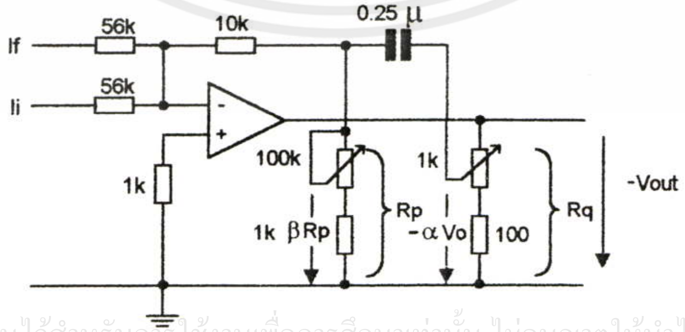
$$R_0 = \frac{R_f}{A_{r2}} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot K_\alpha = 53.95K\Omega$$

เลือกใช้ $R_0 = 56K\Omega$ และค่า R_q สามารถปรับได้ตั้งแต่ 100Ω จนถึง $1.1K\Omega$ หรือค่า α สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-27) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า A_{r2} ได้ระหว่าง 1.83 และ 0.2

ส่วนค่า C_f ในวงจรใช้สมการ (3-28) โดยให้ β=0.5 , R_p ส่วนปรับค่าได้หรือ R_{p1} = 100 $K\Omega$, R_p ส่วนคงที่หรือ $R_{p2} = 1K\Omega$ ดังนั้นจะได้ค่า C_f ดังนี้

$$C_f = T_{i2} \cdot \frac{R_f + (\beta R_p)}{R_f \beta R_p} \cdot \frac{1}{K_\alpha} = 0.257\mu F$$

เลือกใช้ $C_f = 0.25\mu F$ และค่า R_p สามารถปรับได้ตั้งแต่ $1K\Omega$ จนถึง $101K\Omega$ หรือค่า β สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-28) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า T_{i2} ได้ระหว่าง $1.29x10^{-3}$ จนถึง $2.31x10^{-3}$ วินาที แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI สำหรับลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสามลูป ดังภาพที่ 4.15



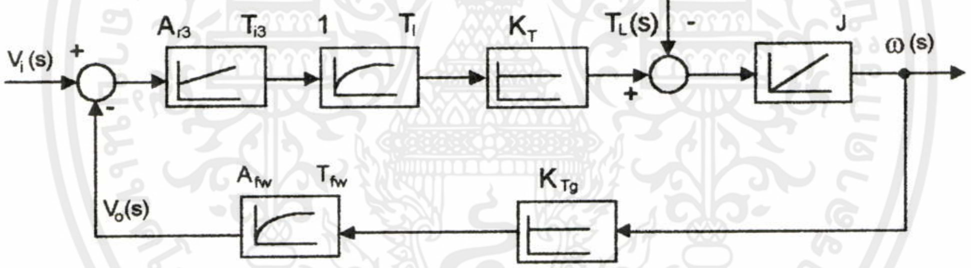
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.15 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI สำหรับลูปควบคุมกระแสของระบบควบคุมแบบสามลูป

ลูปควบคุมกระแสสามารถประมาณให้เป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งได้ โดยอาศัยค่าจากตารางที่ 3.1 โดยมีค่าเท่ากับ $2T_e$ ดังนั้นจะได้ค่าคงที่ทางเวลา T_I เมื่อประมาณลูปควบคุมกระแสเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งดังนี้

$$T_I = 2x1.816x10^{-3} = 3.632x10^{-3} \quad s$$

จากภาพที่ 4.14 ตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่ได้มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $I_f(s)$ และ $I_i(s)$ แต่ในการใช้งานกับลูปควบคุมความเร็วที่เป็นลูปนอกจะต้องใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง $I_o(s)$ และ $I_i(s)$ จะต้องพิจารณาฟิลเตอร์ให้อยู่ในส่วนของการป้อนกลับ แต่ค่าอัตรขยายสัญญาณ A_{fc} เป็น 1 และค่าคงที่ทางเวลา T_{fc} มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า T_I ที่ได้ ดังนั้นจึงใช้ค่า T_I เป็นค่าคงที่ทางเวลาจากการประมาณเป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่ง และมีค่าอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1 สำหรับลูปควบคุมกระแส ดังนั้นจะได้ลูปควบคุมความเร็วดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 แสดงระบบควบคุมความเร็วที่มีลูปควบคุมกระแสและโวลท์เตจอยู่ภายใน

ระบบควบคุมความเร็วในภาพที่ 4.16 มีตัวอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI จึงใช้การออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม โดยที่ผลรวยของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งขนาดเล็ก T_e มีค่าดังนี้

$$T_e = T_I + T_{fw} = 6.932x10^{-3} \quad s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

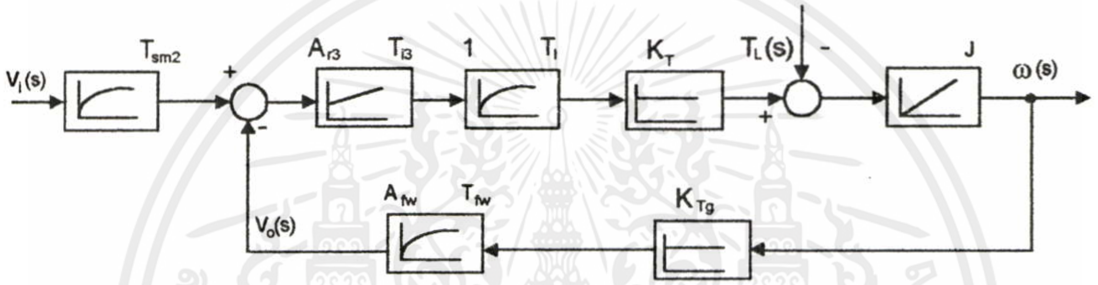
และค่าอัตราขยายสัญญาณโดยรวมของระบบ A_s มีค่าดังนี้

$$A_s = K_T.K_{Tg}.A_{fw} = 7.49x10^{-4}$$

จากสมการ (3-19) และ (3-20) สามารถหาค่า T_{i3} และ A_{r3} ของตัวควบคุมแบบ PI ได้ดังนี้

$$T_{i3} = 4T_s = 27.73 \times 10^{-3} \qquad s$$
$$A_{r3} = \frac{J}{2A_sT_s} = 3.091$$

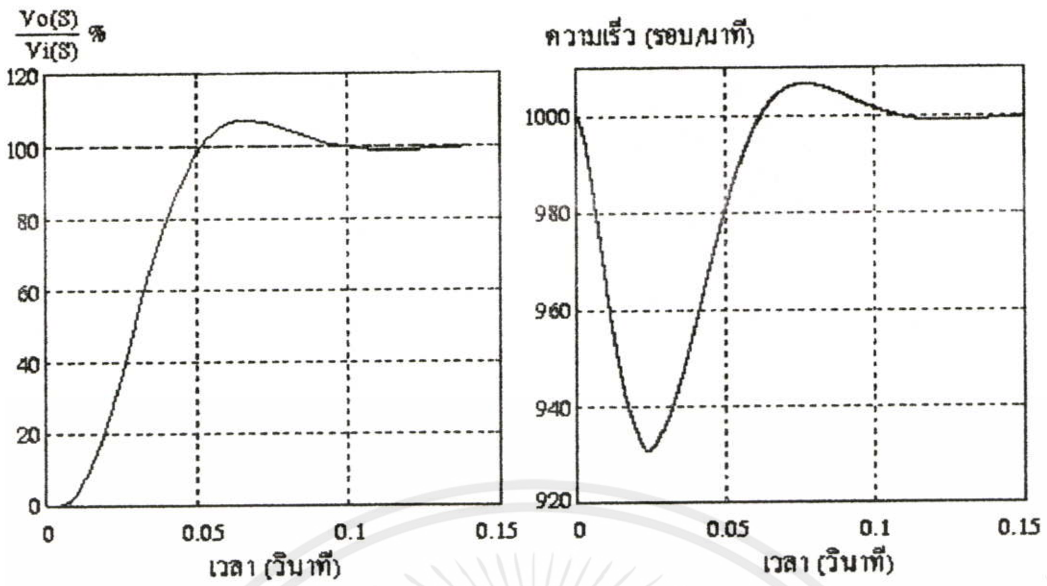
ระบบออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม ดังนั้นต้องเพิ่มตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูท จากสมการ (3-26) จะได้ค่าคงที่ทางเวลา T_{sm2} ของวงจรสมูทติ้งเท่ากับ T_{i3} ดังนั้นจะได้ระบบควบคุมความเร็วทั้งหมดดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปที่มีวงจรสมูทติ้ง

จำลองระบบควบคุมทั้งหมดที่ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาจากการตอบสนองต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลด 100% ของพิกัดโหลด แสดงดังภาพที่ 4.18 a และ b ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

ภาพที่ 4.18 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมแบบสามลูปต่อสเตปอินพุท (a) และสเตปโหลด (b)

จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในกรณีการตอบสนองต่อสเตปอินพุท ระบบใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 92 มิลลิวินาที และมีโอเวอร์ชูทประมาณ 8.1% ส่วนในกรณีการตอบสนองต่อสเตปโหลดใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 95 มิลลิวินาที มีโอเวอร์ชูทประมาณ 70 รอบ/นาที

วงจรของตัวควบคุมแบบ PI ได้จากภาพที่ 3.17 โดยกำหนดให้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ R_f = 10KΩ , R_q ส่วนปรับค่าได้หรือ R_{q1} = 1KΩ , R_q ส่วนคงที่หรือ R_{q2} = 100 Ω และให้ค่า α = 0.5 ดังนั้นจากสมการ (3-29) จะได้ค่า K_α ดังนี้

$$K_\alpha = 1 + (0.5 - 0.5^2)\cdot\frac{1\text{x}10^3}{10\text{x}10^3} = 1.025$$

จากค่า A_{r3} จะได้ค่า R_0 จากสมการ (3-27) ดังนี้

$$R_0 = \frac{R_f}{A_{r3}}\cdot\frac{1}{\alpha}\cdot K_\alpha = 6.632\text{K}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ R_0 = 6.8KΩ และค่า R_q สามารถปรับได้ตั้งแต่ 100Ω จนถึง 1.1KΩ หรือค่า α สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-27) จะได้ตัวควบคุม

แบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า A_{r3} ได้ระหว่าง 15.1 และ 1.7

ส่วนค่า C_f ในวงจรใช้สมการ (3-28) โดยให้ $\beta=0.5$, R_p ส่วนปรับค่าได้หรือ R_{p1} = 100 KΩ , R_p ส่วนคงที่หรือ R_{p2} = 1KΩ ดังนั้นจะได้ค่า C_f ดังนี้

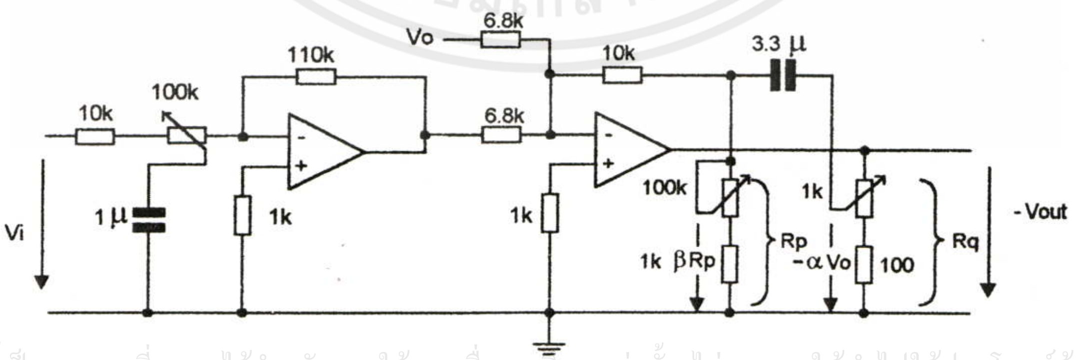
$$C_f = T_{i3} \cdot \frac{R_f + (\beta R_p)}{R_f \beta R_p} \cdot \frac{1}{K_\alpha} = 3.24\mu F$$

เลือกใช้ C_f = 3.3μF และค่า R_p สามารถปรับได้ตั้งแต่ 1KΩ จนถึง 101KΩ หรือค่า β สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-28) จะได้ตัวควบคุมแบบ PI ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า T_{i3} ได้ระหว่าง $17\text{x}10^{-3}$ จนถึง $30.5\text{x}10^{-3}$ วินาที

วงจรสมูทติ้งจากภาพที่ 3.19 สามารถคำนวนหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยอาศัยสมการ (3-38) เพื่อกำหนดค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจรสมูทติ้ง A_r โดยให้เท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้ค่า R_f เท่ากับ $R_{i1}+R_{i2}$ ถ้าให้ R_{i1} เท่ากับ 10KΩ และ R_{i2} เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้เท่ากับ 100KΩ ดังนั้นจะได้ R_f เท่ากับ 110KΩ โดยที่ค่า R_{i2} ปรับไว้ที่จุดกึ่งกลางคือ 50KΩ ดังนั้นค่า R_{i1} มีค่าเท่ากับ 60KΩ เพื่อใช้คำนวนหาค่า C_i จากสมการ (3-39) โดยใช้ค่า R_{i1}=60KΩ และ R_{i2}=50KΩ ดังนี้

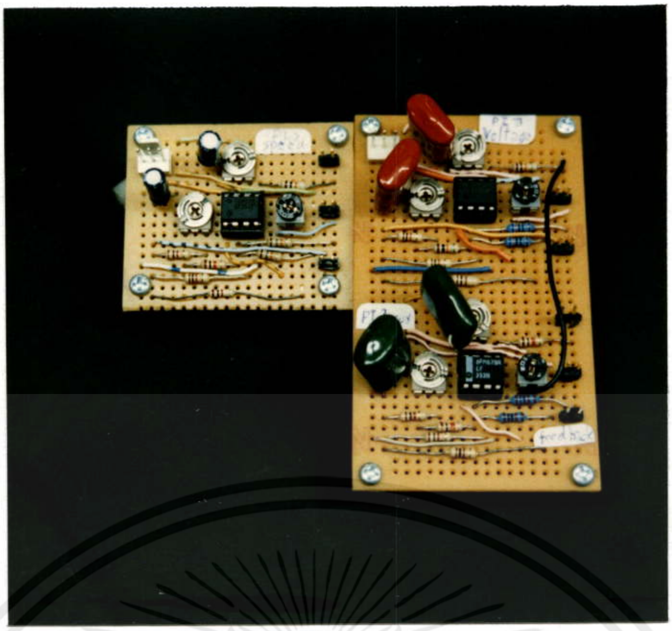
$$C_i = T_{sm2} \cdot \frac{R_{i1} + R_{i2}}{R_{i1} \cdot R_{i2}} = 1.02\mu F$$

เลือกใช้ค่า C_i เท่ากับ 1 μF แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสามลูปดังภาพที่ 4.19 และภาพถ่ายของวงจรจริงที่ประกอบไปด้วยตัวควบคุมลูปโวลท์เตจ, ลูปกระแสและลูปความเร็ว ดังภาพที่ 4.20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.19 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PI ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสามลูป

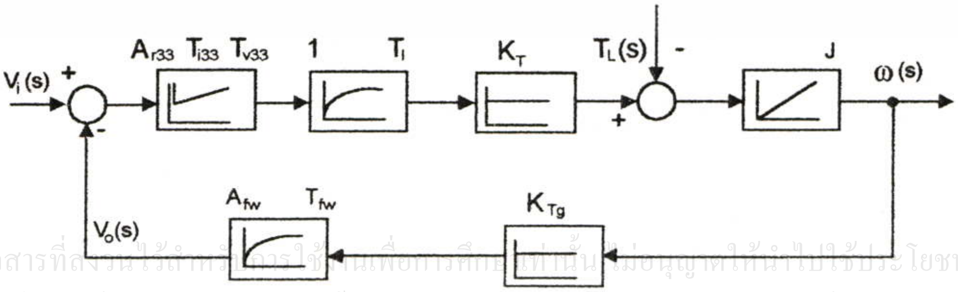


ภาพที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายของวงจรจริงของตัวควบคุมในลูปโวลท์เตจ, ลูปกระแสและลูปความเร็ว

4.3 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปความเร็ว

ระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสามลูป ประกอบไปด้วยลูปควบคุมโวลท์เตจและลูปควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งอยู่ในลักษณะเดียวกันกับระบบที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2 ซึ่งการประมาณลูปควบคุมกระแสที่มีลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในนั้นจะเหมือนกัน เพียงแต่ตัวควบคุมของลูปนอกสุดซึ่งเป็นลูปควบคุมความเร็วนั้นจะใช้ตัวควบคุมแบบ PID ดังนั้นระบบจึงเหมือนกับภาพที่ 4.8 แต่ตัวควบคุมในลูปควบคุมความเร็วจะใช้ตัวควบคุมแบบ PID แทน

การประมาณลูปควบคุมให้เป็นตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งของลูปควบคุมกระแสที่มีลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในตามหัวข้อ 4.2 นั้น สามารถนำมาใช้กับระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ได้ดังภาพที่ 4.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.21 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปควบคุมความเร็ว

ระบบในภาพที่ 4.21 มีตัวอินทิเกรเตอร์เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ใช้วิธีซิมเมตริคอลออปติมัม โดยให้ค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนชิเอทสัญญาณ T_{v33} มีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางเวลาของตัวหน่วงเวลาอันดับหนึ่งที่มีค่ามากที่สุดคือ T_I และหาค่า T_{i33} และ A_{r33} จากสมการ (3-19) และ (3-20) ตามลำดับ ดังนี้

$$T_{i33} = 4T_{fw} = 13.2\text{x}10^{-3} \qquad \text{s}$$

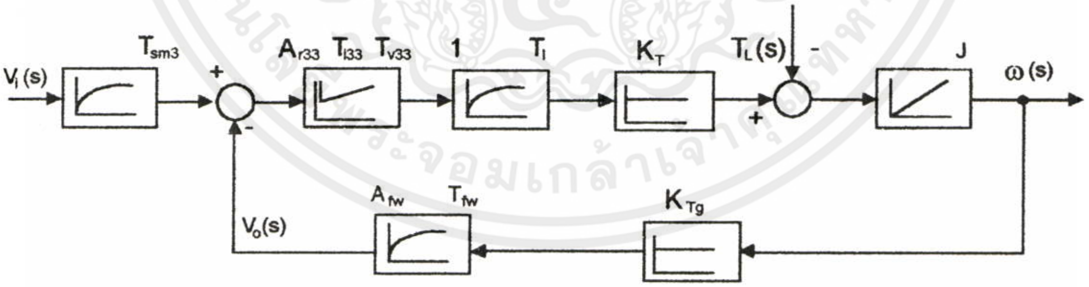
และค่าอัตราขยายสัญญาณโดยรวมของระบบ A_s มีค่าดังนี้

$$A_s = K_T.K_{Tg}.A_{fw} = 7.49\text{x}10^{-4}$$

ดังนั้นค่า A_{r33} มีค่าดังนี้

$$A_{r33} = \frac{J}{2A_sT_{fw}} = 6.49$$

ระบบออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริคอลออปติมัม ดังนั้นต้องเพิ่มตัวสมูทติ้งเพื่อลดโอเวอร์ชูท จากสมการ (3-26) จะได้ค่าคงที่ทางเวลา T_{sm3} ของวงจรสมูทติ้งเท่ากับ T_{i33} ดังนั้นจะได้ระบบควบคุมความเร็วทั้งหมดดังภาพที่ 4.22

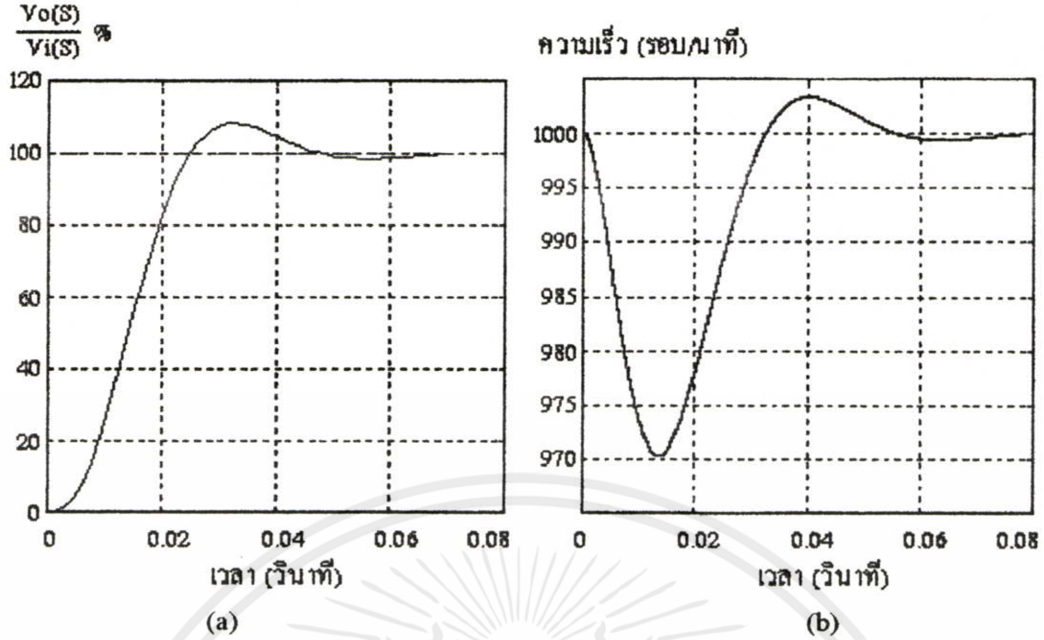


ภาพที่ 4.22 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบสามลูปที่มีตัวสมูทติ้งโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปควบคุมความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จำลองระบบควบคุมทั้งหมดที่ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาจากการตอบสนองต่อสเตปอินพุท และสเตปโหลด 100% ของพิกัดโหลด แสดงดังภาพที่ 4.23 a และ b ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รวมทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมแบบสามลูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ลูปควบคุมความเร็วต่อสเตปอินพุท (a) และสเตปโหลด (b)

จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในกรณีการตอบสนองต่อสเตปอินพุท ระบบใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 44 มิลลิวินาที และมีโอเวอร์ชูทประมาณ 8.1% ส่วนในกรณีการตอบสนองต่อสเตปโหลดใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 48 มิลลิวินาที มีโอเวอร์ชูทประมาณ 30 รอบ/นาที

วงจรของตัวควบคุมแบบ PID ได้จากภาพที่ 3.18 โดยกำหนดให้อุปกรณ์ต่างๆ มีค่าได้แก่ R_{f1} = 10KΩ , R_q ส่วนปรับค่าได้หรือ R_{q1} = 1KΩ , R_q ส่วนคงที่หรือ R_{q2} = 100 Ω และให้ค่า α = 0.5 ดังนั้นจากสมการ (3-29) จะได้ค่า K_α ดังนี้

$$K_\alpha = 1 + (0.5 - 0.5^2)\cdot\frac{1x10^3}{10x10^3} = 1.025$$

จากค่า A_{r33} จะได้ค่า R_0 จากสมการ (3-30) ดังนี้

$$R_0 = \frac{R_{f1}}{A_{r33}}\cdot\frac{1}{\alpha}\cdot K_\alpha = 3.159K\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลือกใช้ R_0 = 3KΩ และค่า R_q สามารถปรับได้ตั้งแต่ 100Ω จนถึง 1.1KΩ หรือค่า α สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-27) จะได้ตัวควบคุม

แบบ PID ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า A_{r33} ได้ระหว่าง 34.2 และ 3.8

คำนวนหาค่า C_f ได้จากสมการ (3-31) โดยให้ $\beta = 0.5$ และ R_m ส่วนปรับค่าได้หรือ $R_{m1} = 100K\Omega$ และ R_m ส่วนคงที่หรือ $R_{m2} = 1K\Omega$ ดังนั้น

$$C_f = \frac{T_{i33}}{\beta R_m} = 0.26\mu F$$

เลือกใช้ $C_f = 0.22\ \mu F$ และค่า R_m สามารถปรับได้ตั้งแต่ $1K\Omega$ จนถึง $101K\Omega$ หรือค่า β สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-35) จะได้ตัวควบคุมแบบ PID ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า T_{i33} ได้ระหว่าง $2.22x10^{-3}$ จนถึง $19.9x10^{-3}$ วินาที

หาความสัมพันธ์ระหว่าง T_d และ T_{v33} จากสมการ (3-36) โดยให้ $\varepsilon = 0.01$ ถ้ากำหนดให้ $R_3 = 101K\Omega$ ดังนั้น $\varepsilon R_3 = 1K\Omega$ และ $(1-\varepsilon)R_3 = 100K\Omega$

หาค่า C_m จากสมการ (3-32) โดยให้ R_{f2} ส่วนคงที่หรือ $R_{f21} = 1K\Omega$ และ R_{f2} ส่วนปรับค่าได้หรือ $R_{f22} = 10K\Omega$, $\gamma = 0.5$, $R_3=101K\Omega$ ดังนั้นจะได้ค่า C_m ดังนี้

$$C_m = T_{v33} \cdot \frac{(\gamma R_{f2})+R_3}{\gamma R_{f2} R_3} = 0.696\mu F$$

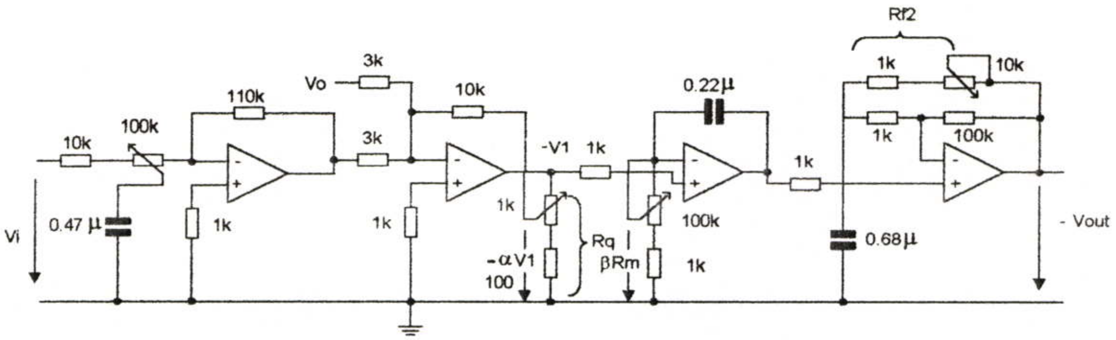
เลือกใช้ $C_m = 0.68\ \mu F$ และค่า R_{f2} สามารถปรับได้ตั้งแต่ $1K\Omega$ จนถึง $10K\Omega$ หรือค่า γ สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ประมาณ 0.1 จนถึง 0.9 โดยใช้สมการ (3-32) จะได้ตัวควบคุมแบบ PID ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า T_{v33} ได้ระหว่าง $0.74x10^{-3}$ จนถึง $6.13x10^{-3}$ วินาที

วงจรสมูทติ้งจากภาพที่ 3.17 สามารถคำนวนหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยอาศัยสมการ (3-38) เพื่อกำหนดค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจรสมูทติ้ง A_r โดยให้เท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้ค่า R_f เท่ากับ $R_{i1}+R_{i2}$ ถ้าให้ R_{i1} เท่ากับ $10K\Omega$ และ R_{i2} เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้เท่ากับ $100K\Omega$ ดังนั้นจะได้ R_f เท่ากับ $110K\Omega$ โดยที่ค่า R_{i2} ปรับไว้ที่จุดกึ่งกลางคือ $50K\Omega$ ดังนั้นค่า R_{i1} มีค่าเท่ากับ $60K\Omega$ เพื่อใช้คำนวนหาค่า C_i จากสมการ (3-39) โดยใช้ค่า $R_{i1}=60K\Omega$ และ $R_{i2}=50K\Omega$ ดังนี้

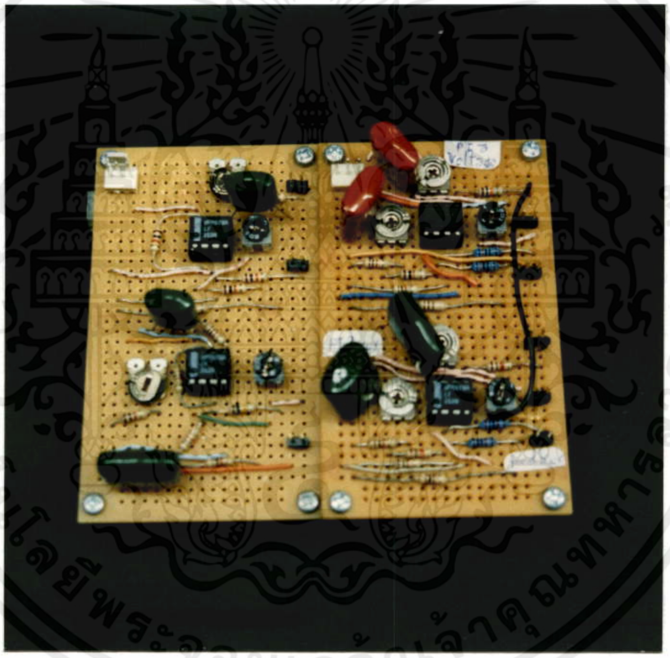
$$C_i = T_{sm3} \cdot \frac{R_{i1}+R_{i2}}{R_{i1} \cdot R_{i2}} = 0.48\mu F$$

เลือกใช้ค่า C_i เท่ากับ $0.47\ \mu F$ แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PID ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสามลูปดังภาพที่ 4.24 และภาพถ่ายของวงจรจริงที่ประกอบไปด้วยตัวควบคุมลูปโวลท์เตจ, ลูปกระแสและลูปความเร็ว ดังภาพที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หรือห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 แสดงวงจรของตัวควบคุมแบบ PID ที่มีวงจรสมูทติ้งสำหรับลูปควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบสามลูป



ภาพที่ 4.25 แสดงภาพถ่ายของวงจรจริงของตัวควบคุมในลูปโวลท์เตจ, ลูปกระแสและลูปความเร็ว โดยตัวควบคุมในลูปความเร็วเป็นแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุปผลการออกแบบระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบ่งออกเป็น 3 ระบบได้แก่

ระบบที่ 1 ควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสองลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งสองลูป

ระบบที่ 2 ควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสามลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งสามลูป

ระบบที่ 3 ควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสามลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจ ส่วนลูปควบคุมความเร็วใช้ตัวควบคุมแบบ PID

ผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของทั้ง 3 ระบบได้แก่ โอเวอร์ชูทและเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปอินพุทและต่อสเตปโหลด แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

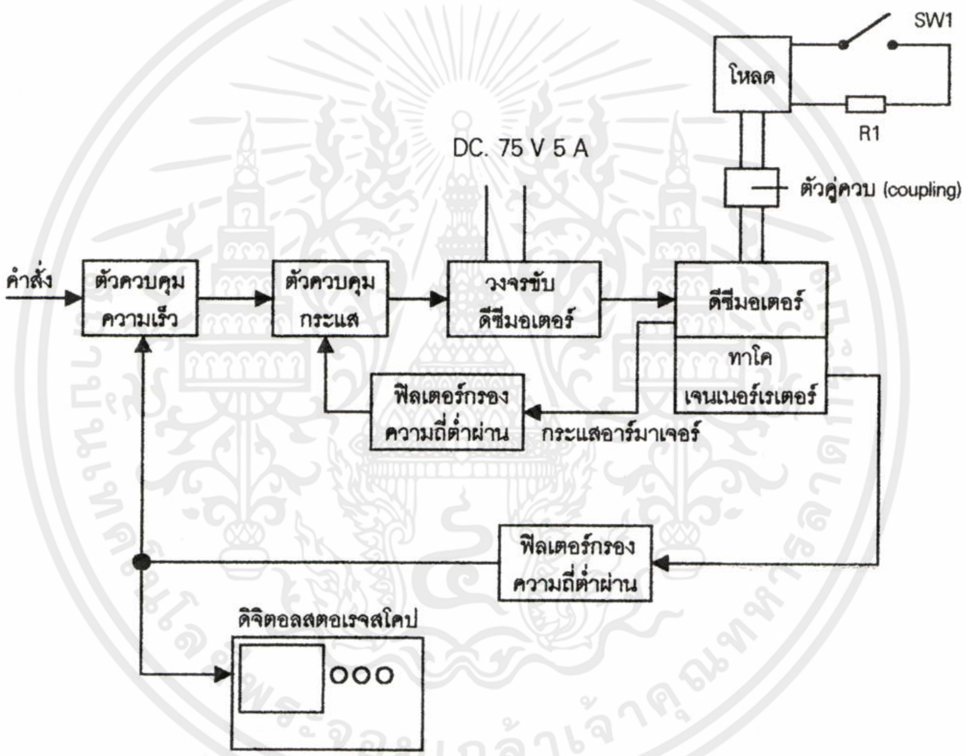
ระบบที่	โอเวอร์ชูทต่อสเตปอินพุท (%)	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปอินพุท (msec)	โอเวอร์ชูทต่อสเตปโหลด (รอบ/นาที)	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปโหลด (mesc)
1	8.1	135	100	140
2	8.1	92	70	95
3	8.1	44	30	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์

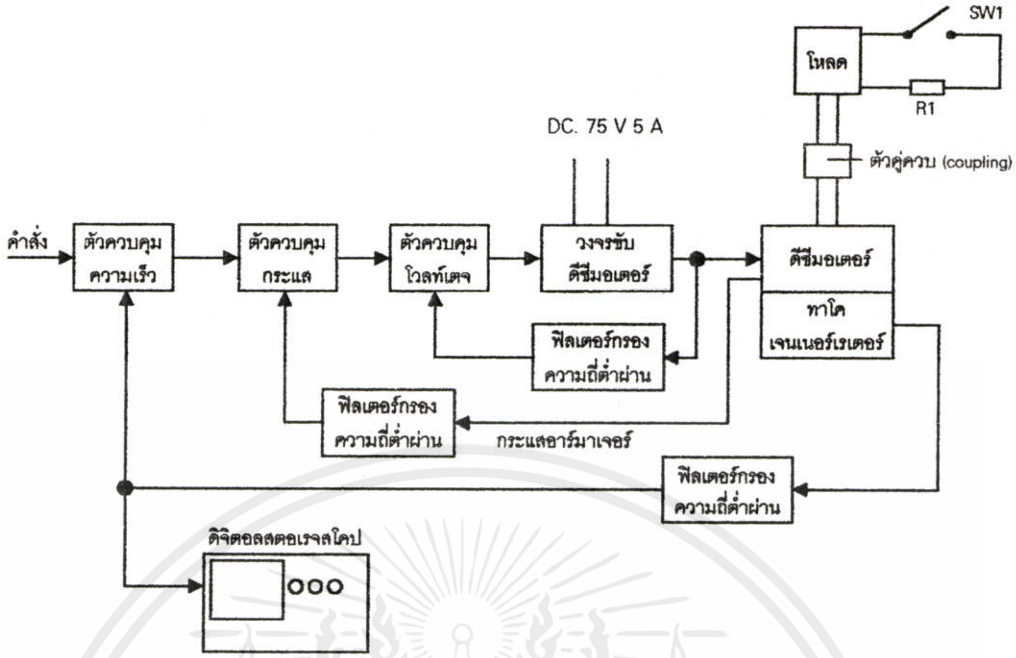
ระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์โดยทั่วไปเป็นแบบ 2 ลูปประกอบไปด้วยลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจ ส่วนระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์ที่นำเสนอได้เพิ่มลูปควบคุมโวลท์เตจเข้าไปเป็นการควบคุมแบบ 3 ลูป ระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบ 2 ลูปมีลักษณะของการเชื่อมต่อระบบดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 ลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบ 2 ลูป

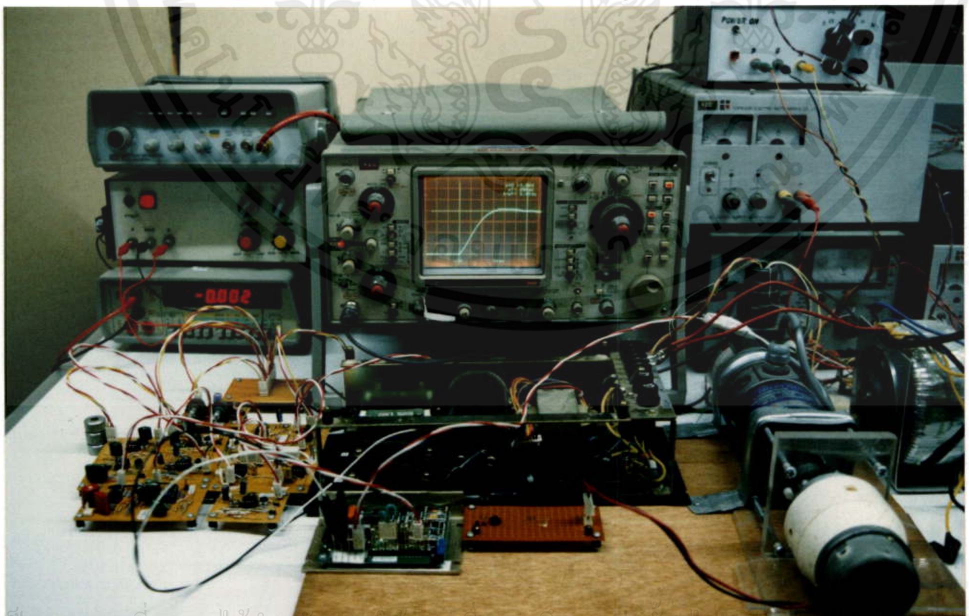
ส่วนระบบควบคุมความเร็วแบบ 3 ลูป จะเพิ่มลูปควบคุมโวลท์เตจเข้าไป โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อระบบดังภาพที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.2 ลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบ 3 ลูป

ระบบที่ใช้ในการทดลองจริงมีลักษณะดังภาพที่ 5.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำ... ะโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5.3 ภาพถ่ายระบบที่ใช้ในการทดลอง

5.1 การทดลองในด้านการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วต่อสเตปอินพุท

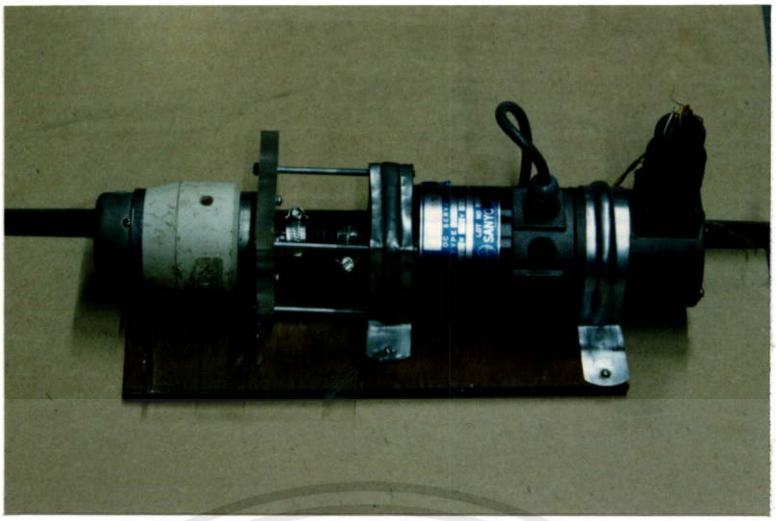
การทดลองในด้านการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วต่อสเตปอินพุท กระทำโดยป้อนคำสั่งแบบทันทีทันใดให้กับระบบควบคุมความเร็ว ให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบที่ต้องการ โดยเปิดสวิทช์ SW1 ไว้เพื่อให้อยู่ในสภาวะที่ไม่มีผลจากโหลดที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในโหลด ความเร็วรอบของดีซีมอเตอร์จะตรวจจับได้จากสัญญาณจากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์ โดยทาโคเจนเนอร์เรเตอร์นี้เป็นชุดประกอบมากับดีซีมอเตอร์ที่ใช้งาน ให้สัญญาณระดับความเร็วเป็นระดับโวลท์เตจต่อความเร็วรอบเท่ากับ 7 โวลท์ต่อหนึ่งพันรอบต่อนาที สัญญาณระดับความเร็วที่ได้มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์และดีซีมอเตอร์ จึงใช้ฟิลเตอร์กรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าว และลดทอนสัญญาณระดับความเร็วลงครึ่งหนึ่งเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมกับตัวควบคุมความเร็ว โดยแสดงสัญญาณการตอบสนองต่อสเตปอินพุทด้วยดิจิตอลสตอเรจสโคป

5.2 การทดลองในด้านการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วต่อสเตปโหลด

ส่วนการทดลองในด้านการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วต่อสเตปโหลด เมื่อแกนของดีซีมอเตอร์หมุนจะฉุดให้แกนของโหลดหมุนตามโดยผ่านทางตัวคู่ควบ โดยโหลดที่ใช้เป็นดีซีมอเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ต่อปลายอาร์มาเจอร์อยู่กับสวิทช์ SW1 และค่าความต้านทาน R1 ดังภาพที่ 5.1 และ 5.2 โดยเปิดวงจรที่ SW1 และป้อนคำสั่งให้กับระบบควบคุมความเร็วให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็วที่ต้องการ จากนั้นปิดวงจรที่ SW1 ซึ่งจะเป็นลักษณะของสเตปโหลดที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลครบวงรอบภายในอาร์มาเจอร์ของโหลดทำให้เกิดแรงต้านการหมุนของดีซีมอเตอร์

ถ้าความเร็วรอบของดีซีมอเตอร์คงที่ การเปลี่ยนแปลงค่า R1 จะเป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลในอาร์มาเจอร์ของโหลด ถ้า R1 มีค่าเป็น 0 โอห์มจะมีกระแสไหลมากที่สุด และมีแรงต้านการหมุนของดีซีมอเตอร์สูงสุดด้วย โดยให้พิกัดโหลดในระดับนี้เป็น 100% ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า R1 จึงสามารถเปลี่ยนแปลงเปอร์เซนต์ของพิกัดโหลดได้ คำนวนเปรียบเทียบจากค่ากระแสที่ไหลผ่าน R1 ในขณะนั้นกับค่ากระแสที่ไหลสูงสุด โดยแสดงสัญญาณการตอบสนองต่อสเตปโหลดด้วยดิจิตอลสตอเรจสโคป ลักษณะการต่อตัวคู่ควบโหลดเข้ากับดีซีมอเตอร์แสดงดังภาพที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.4 แสดงดีซีมอเตอร์และโหลดที่ต่อตัวคู่ควบเข้าด้วยกัน

5.3 รูปแบบการทดลองระบบควบคุมความเร็ว

ระบบที่ออกแบบแบ่งออกเป็น 3 ระบบได้แก่

ระบบที่ 1 เป็นระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสองลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งสองลูป

ระบบที่ 2 เป็นระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสามลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งสามลูป

ระบบที่ 3 เป็นระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสามลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจ ส่วนลูปควบคุมความเร็วใช้ตัวควบคุมแบบ PID

โดยแต่ละระบบทำการทดลองในสภาวะต่างๆ 6 กรณี เพื่อตรวจวัดค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวและโอเวอร์ชูทต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลด ดังนี้

1. ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หยุดนิ่ง ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที

2. ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1500 รอบต่อนาที

3. ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที และกลับมายังที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที

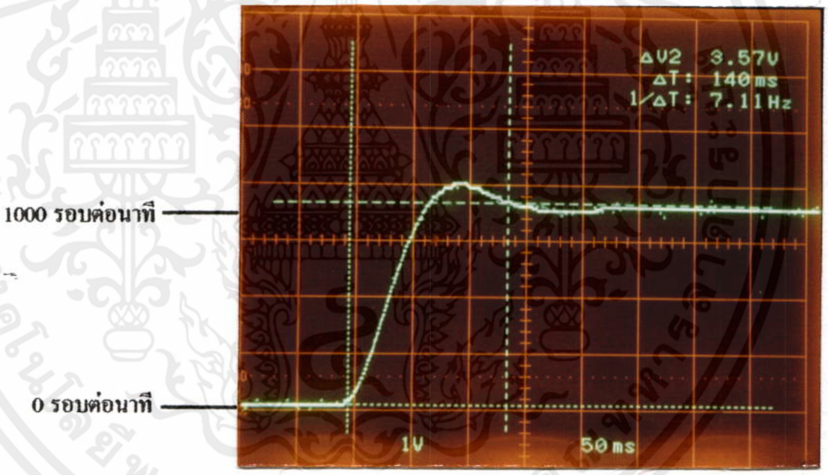
4. ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด

5. ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 75% ของพิกัดโหลด

6. ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 25% ของพิกัดโหลด

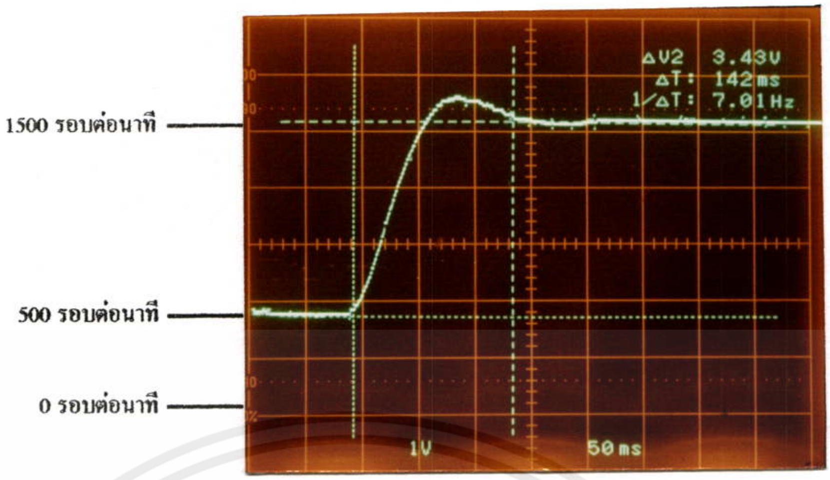
5.4 ผลการทดลองของระบบที่ 1

ผลการทดลองของระบบที่ 1 เป็นระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสองลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งสองลูป ทั้ง 7 กรณี แสดงดังภาพที่ 5.5 ถึงภาพที่ 5.10

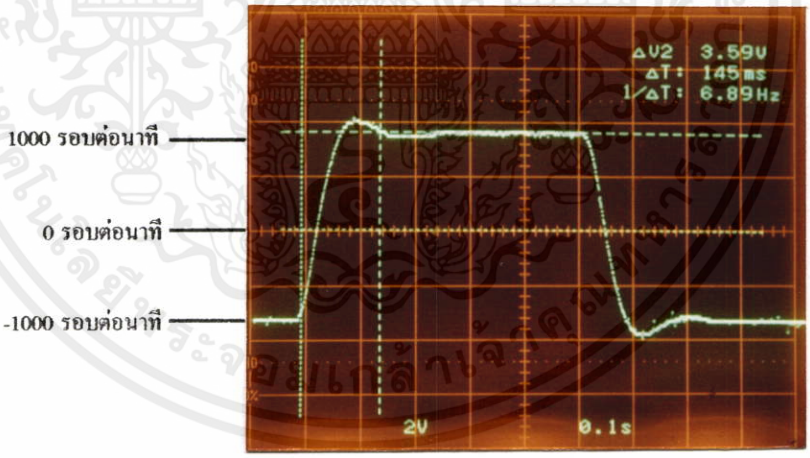


ภาพที่ 5.5 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 1 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หยุดนิ่ง ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 140 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 50msec/div แกน y 1V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

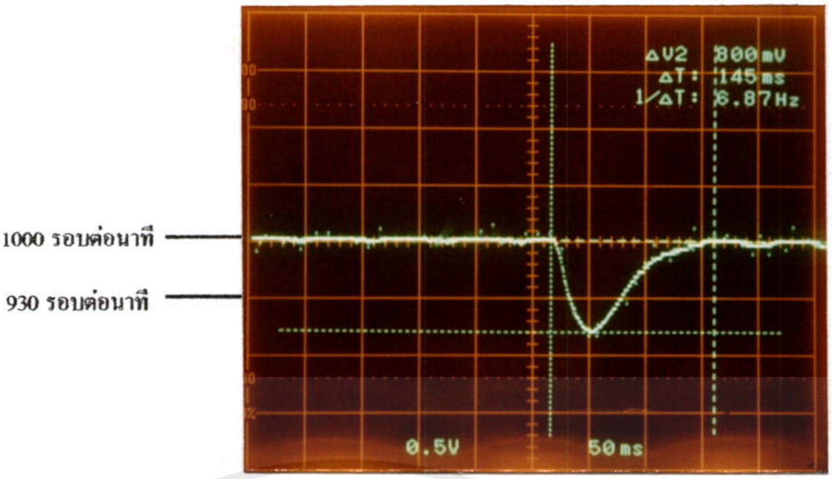


ภาพที่ 5.6 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 2 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1500 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 142 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 50msec/div แกน y 1V/div)

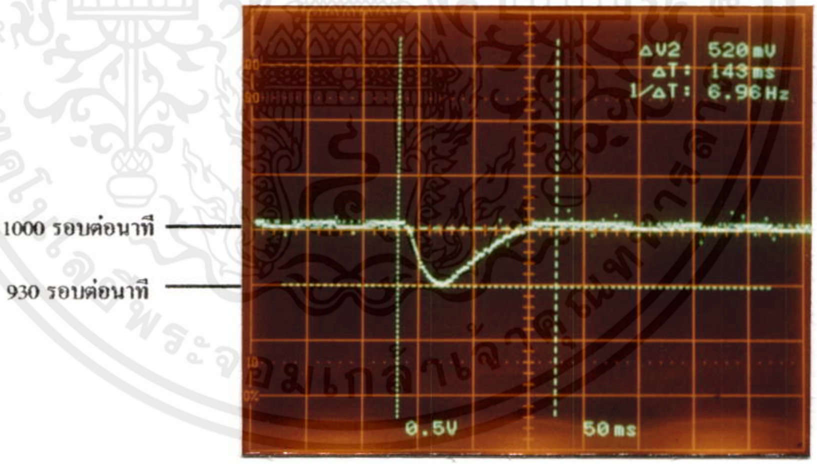


ภาพที่ 5.7 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 3 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที และกลับมายังที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 145 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 100msec/div แกน y 2V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

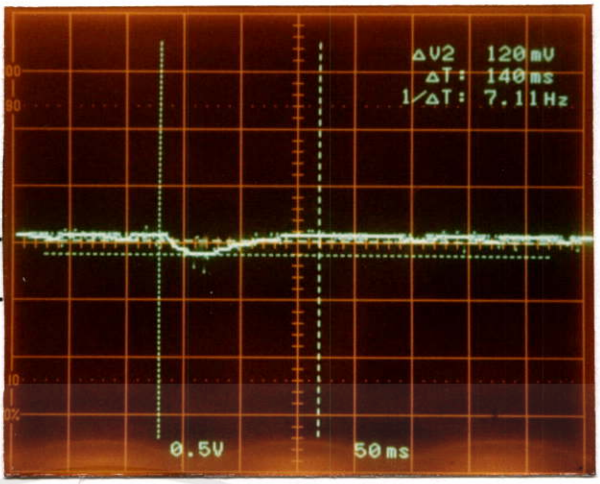


ภาพที่ 5.8 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 4 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 145 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 114 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5 V/div)



ภาพที่ 5.9 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 5 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 75% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 143 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 74 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

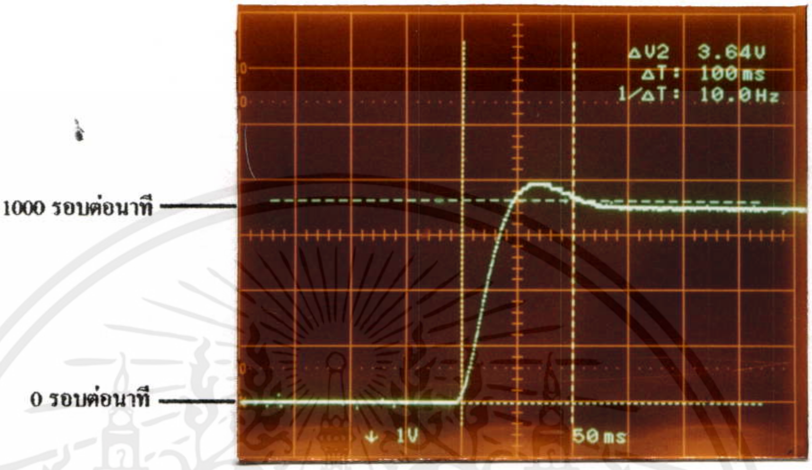


ภาพที่ 5.10 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 1 ต่อกรณีที่ 6 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 25% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 140 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 17 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

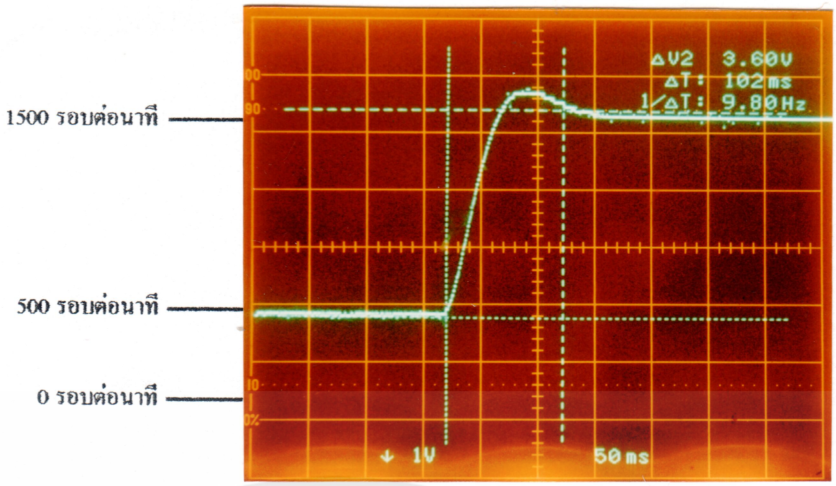
5.5 ผลการทดลองของระบบที่ 2

ผลการทดลองของระบบที่ 2 เป็นระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสามลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งสามลูป ทั้ง 7 กรณีแสดงดังภาพที่ 5.11 ถึงภาพที่ 5.16

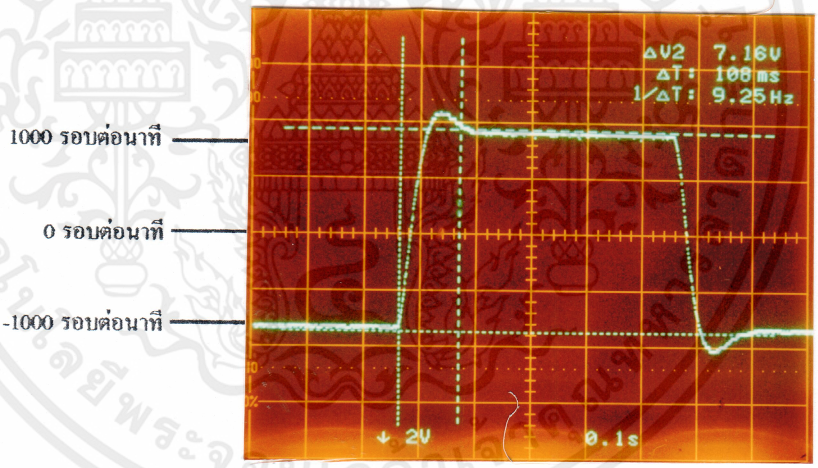


ภาพที่ 5.11 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 1 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หยุดนิ่ง ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 100 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 50msec/div แกน y 1V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

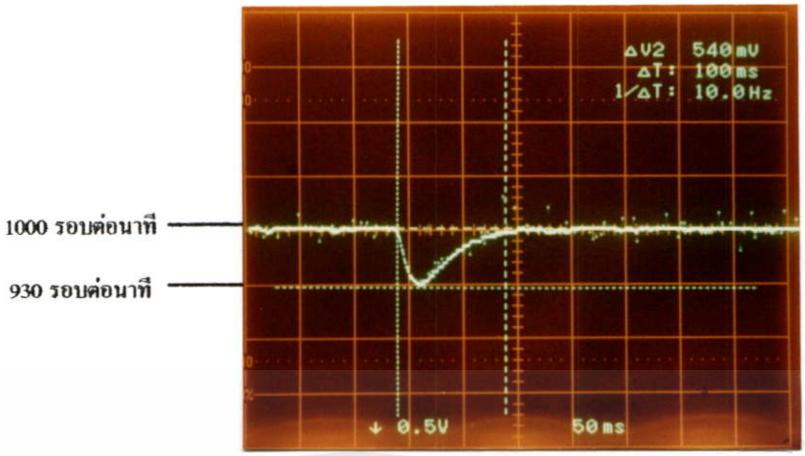


ภาพที่ 5.12 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 2 ได้แก่ ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1500 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 102 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 50msec/div แกน y 1V/div)

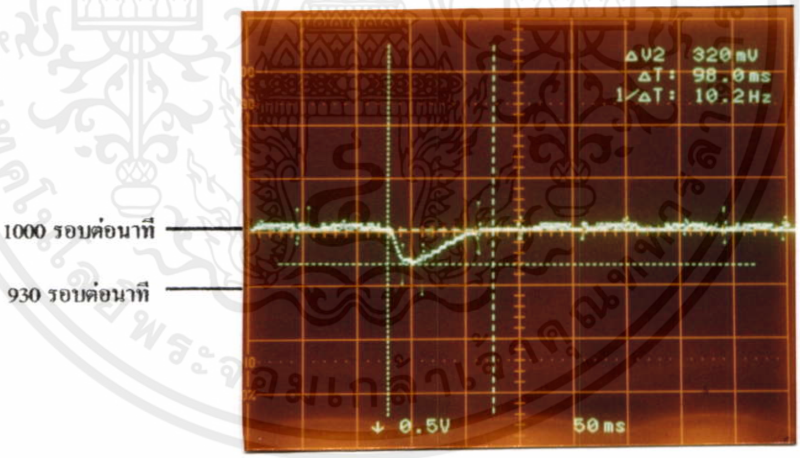


ภาพที่ 5.13 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 3 ได้แก่ ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที และกลับมายังที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 108 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 100msec/div แกน y 2V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.14 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 4 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 100 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 77 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5 V/div)

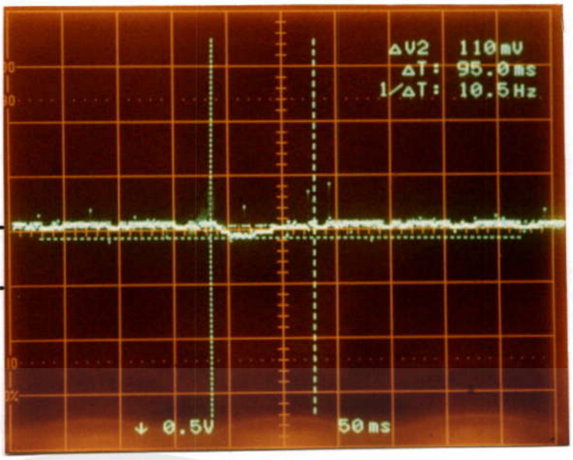


ภาพที่ 5.15 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 5 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 75% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 98 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 45 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1000 รอบต่อนาที

930 รอบต่อนาที

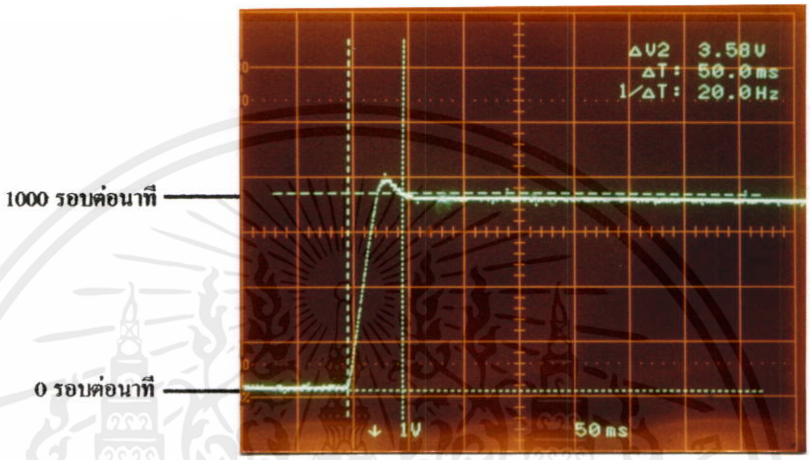


ภาพที่ 5.16 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 2 ต่อกรณีที่ 6 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 25% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 95 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 15 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ผลการทดลองของระบบที่ 3

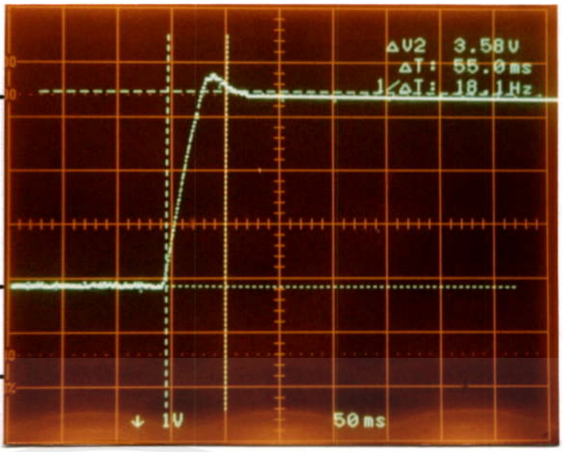
ผลการทดลองของระบบที่ 3 เป็นระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์แบบสามลูป โดยมีลูปควบคุมกระแสอยู่ภายในลูปควบคุมความเร็ว และลูปควบคุมโวลท์เตจอยู่ภายในลูปควบคุมกระแส โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจ ส่วนลูปควบคุมความเร็วใช้ตัวควบคุมแบบ PID ทั้ง 7 กรณีแสดงดังภาพที่ 5.17 ถึงภาพที่ 5.22



ภาพที่ 5.17 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 1 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หยุดนิ่ง ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 50 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 50msec/div แกน y 1V/div)

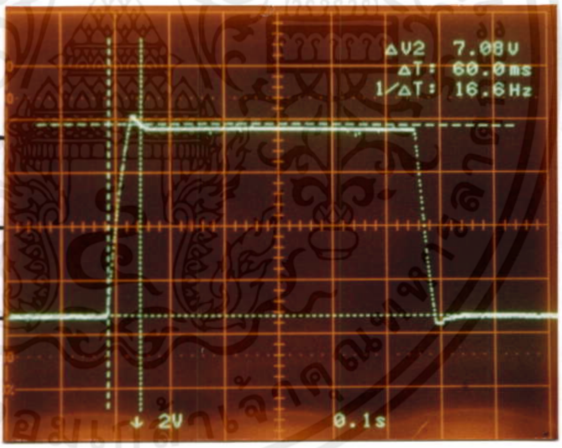
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1500 รอบต่อนาที
500 รอบต่อนาที
0 รอบต่อนาที



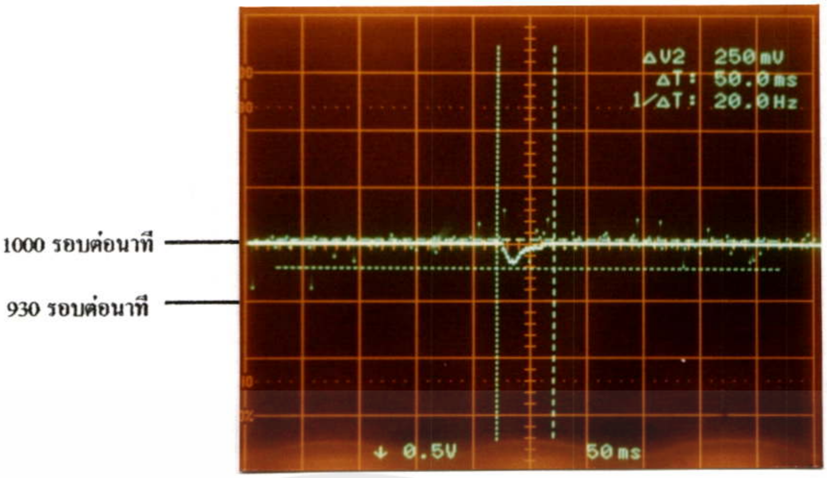
ภาพที่ 5.18 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 2 ได้แก่ ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1500 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 55 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 50msec/div แกน y 1V/div)

1000 รอบต่อนาที
0 รอบต่อนาที
-1000 รอบต่อนาที

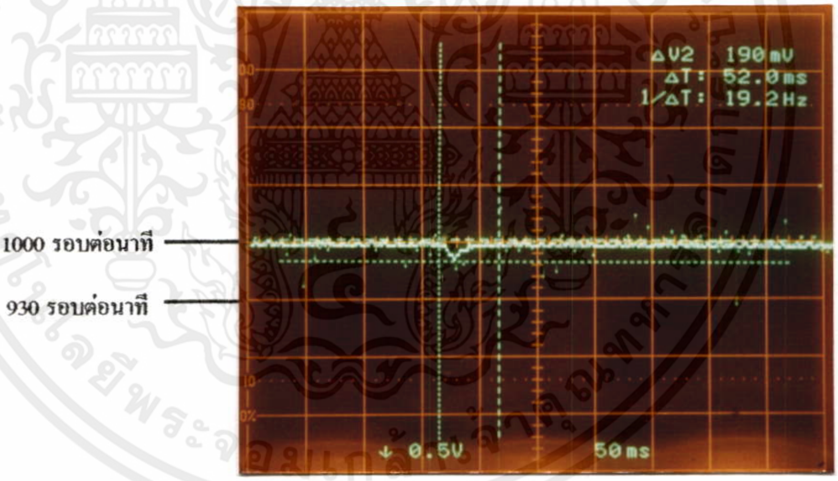


ภาพที่ 5.19 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 3 ได้แก่ ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปอินพุทให้ดีซีมอเตอร์หมุนที่ 1000 รอบต่อนาที และกลับมายังที่ความเร็ว -1000 รอบต่อนาที ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 60 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10% (แกน x 100msec/div แกน y 2V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

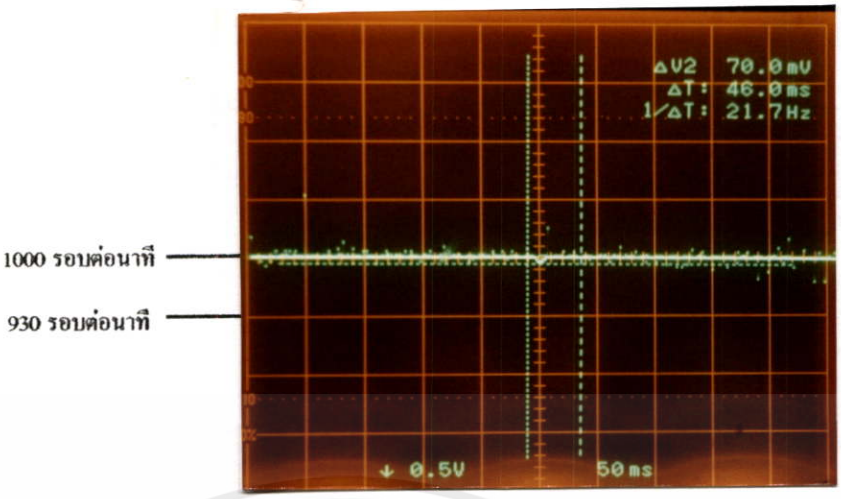


ภาพที่ 5.20 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 4 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 100% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 50 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 35 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5V/div)



ภาพที่ 5.21 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 5 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 75% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 52 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 27 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.22 แสดงการตอบสนองของระบบที่ 3 ต่อกรณีที่ 6 ได้แก่ที่สภาวะของดีซีมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ป้อนสเตปโหลดขนาด 25% ของพิกัดโหลด ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 46 msec โอเวอร์ชูทประมาณ 10 รอบต่อนาที (แกน x 50msec/div แกน y 0.5V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วดีซีมอเตอร์

ผลการทดสอบระบบพบว่าระบบ 3 ลูปที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทั้งหมดมีการตอบสนองต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลดได้ดีกว่าระบบ 2 ลูป โดยพิจารณาจากการตอบสนองต่อสเตปอินพุทในกรณีที่ 1 และต่อสเตปโหลดในกรณีที่ 5 จากตารางที่ 5.1

การเพิ่มลูปควบคุมโวลท์เตจเข้าไปช่วยลดเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบต่อสเตปอินพุทได้ 40 msec หรือ 28.8% และต่อสเตปโหลดได้ 45 msec หรือ 31% ส่วนโอเวอร์ชูทต่อสเตปโหลดของระบบ 3 ลูปน้อยกว่าระบบ 2 ลูป 37 รอบต่อนาทีหรือ 32.5%

ถ้าลูปควบคุมความเร็วของระบบ 3 ลูปใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยมีลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมโวลท์เตจที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI เช่นเดิม ก็จะทำให้ระบบมีเวลาในการตอบสนองต่อสเตปอินพุทได้เร็วกว่าระบบ 2 ลูป 90 msec หรือ 64.3% ต่อสเตปโหลดได้รวดเร็วขึ้น 95 msec หรือ 65.5% และมีโอเวอร์ชูทต่อสเตปโหลดลดลง 79 รอบต่อนาทีหรือ 69.3% ด้วยผลที่ได้จากการทดสอบระบบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบทั้ง 3 ระบบ โดยอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 5.1 แสดงได้ดังตารางที่ 6.1 แสดงผลการเปรียบเทียบของการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบทั้งสาม ส่วนตารางที่ 6.2 แสดงผลการเปรียบเทียบของการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสาม

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสเตปอินพุทของระบบจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการทดสอบระบบจริง

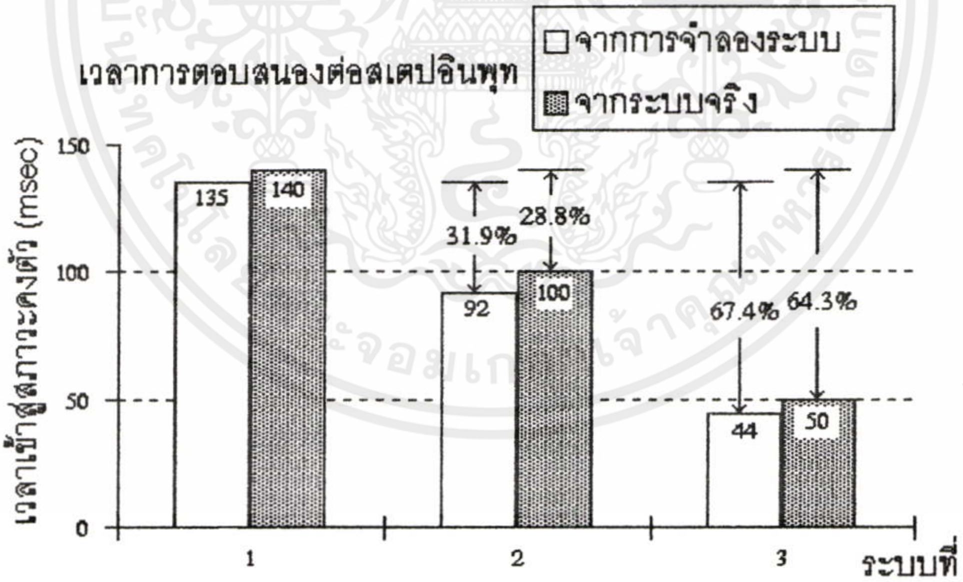
ระบบที่	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปอินพุท จากการจำลองระบบเร็วขึ้น (%)	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปอินพุท จากการทดลองเร็วขึ้น (%)
1	-	-
2	31.9	28.8
3	67.4	64.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการทดสอบระบบจริง

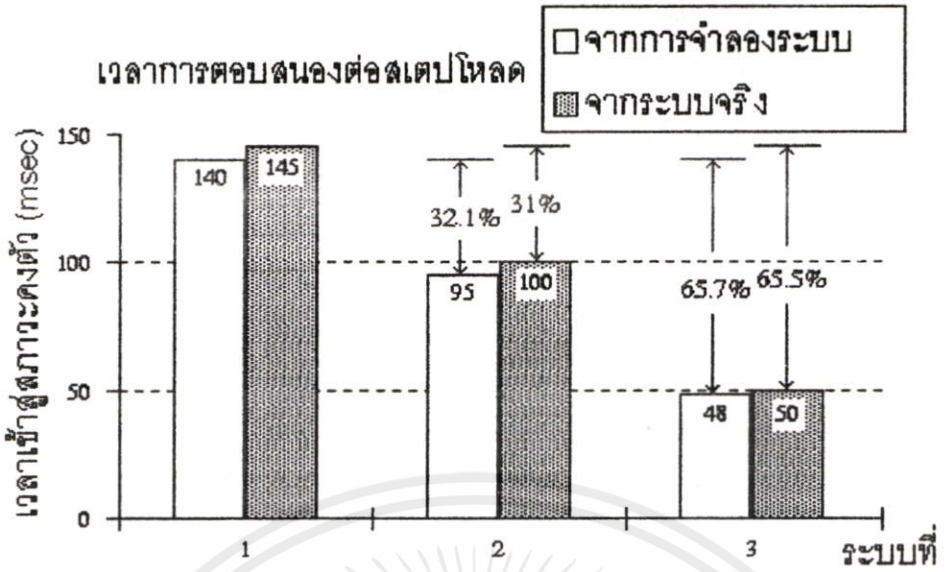
ระบบที่	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปโหลดจากการจำลองระบบดีขึ้น (%)	โอเวอร์ชูทต่อสเตปโหลดจากการจำลองระบบลดลง (%)	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปโหลดจากการทดลองดีขึ้น (%)	โอเวอร์ชูทต่อสเตปโหลดจากการทดลองลดลง (%)
1	-	-	-	-
2	32.1	30	31	32.5
3	65.7	70	65.5	69.3

แสดงผังการเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปอินพุทและต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสามจากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์และจากระบบจริงดังภาพที่ 6.1 และภาพที่ 6.2 ตามลำดับ



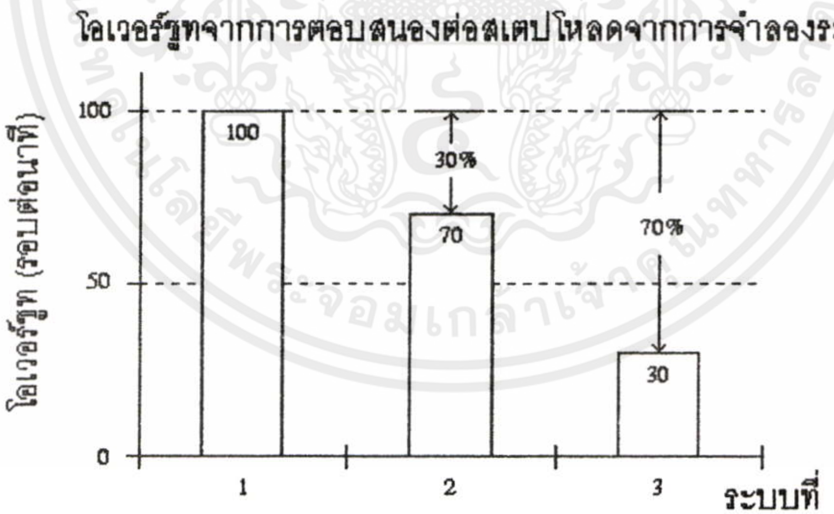
ภาพที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปอินพุทของระบบทั้งสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



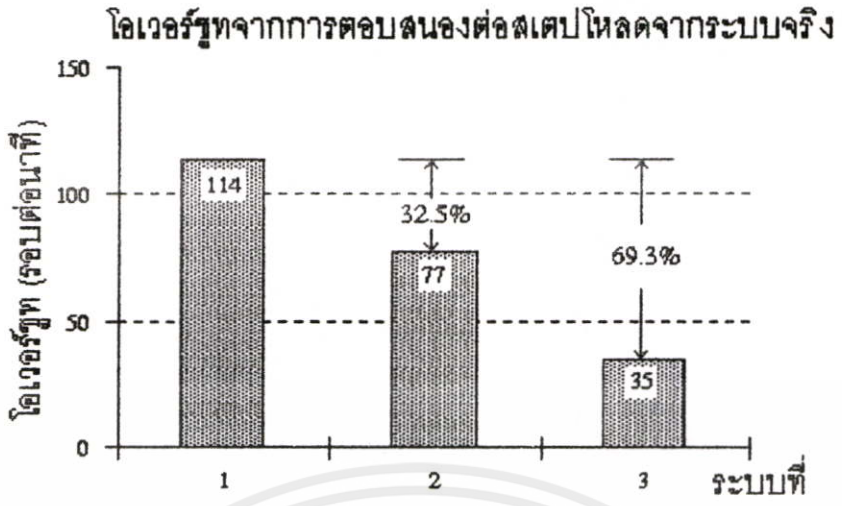
ภาพที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสาม

แสดงผังการเปรียบเทียบโอเวอร์ชูทจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสาม จากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์และจากระบบจริงแสดงได้ดังภาพที่ 6.3 และภาพที่ 6.4



ภาพที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบโอเวอร์ชูทจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสามจากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบโอเวอร์ชูทจากการตอบสนองต่อสเตปโหลดของระบบทั้งสามจากระบบจริง

ผลจากการทดลอง ยังมีข้อผิดพลาดไปจากการจำลองระบบอยู่บ้าง แต่ผลที่ได้จากการเพิ่มลูปควบคุมโวลท์เตจเข้าไป ยังให้ผลในด้านของค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบต่อสเตปอินพุทและสเตปโหลดรวมถึงโอเวอร์ชูทของระบบต่อสเตปโหลดน้อยลงกว่าแบบ 2 ลูป ซึ่งค่าผิดพลาดของระบบจริงที่เบี่ยงเบนไปจากการระบบที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มาจากค่าผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์ตัวควบคุมแทนค่าที่คำนวนได้ และจากคุณสมบัติของดีซีมอเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าที่ระบุไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

จากผลที่ได้สามารถนำลูปควบคุมโวลท์เตจไปใช้งานกับระบบอื่นๆ ได้แก่ระบบควบคุมระยะทาง ระบบการขนส่งที่ใช้ล้อเลื่อน หรือระบบที่ต้องใช้การควบคุมดีซีมอเตอร์ให้มีผลตอบสนองเร็วที่สุดและลดผลจากการรบกวนของสิ่งแวดล้อมภายนอกให้ต่ำลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] A. Buxbaum , K. Schierau and A. Straughen. Design of Control Systems for DC Drives. Berlin :Springer-Verlag, 1990

[2] Electro-craft corp. USA. DC motor speed controls servo systems. New York : Pergamon Press, 1977

[3] Friedrich Frohr and Fritz Orttenburger. Introduction to Electronic Control Engineering. New Delhi : Wiley eastern limited, 1992

[4] T. Krishnan and B. Ramaswami. "Speed control of D.C. motor using thyristor dual converter." IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation IECI-23 No.4 (November 1976) : 391-399

[5] นนทวัฒน์ จุลเดชะ, "ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกด้วยสตาติกคอนเวอร์เตอร์", วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2528

[6] โยธิน เปรมปราณีรัชต์. วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์. กรุงเทพฯ : สจล., 2526

[7] วรศักดิ์ จิตรภักดี, "ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทำงานสี่ควอแดรนท์ด้วยพีดับบลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์", วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สจล., 2531

[8] Katsuhiko Ogata. Modern control engineering. Toronto : Prentice hall, 1990

[9] T.Kenjo and S.Nagamori. Permanent-Magnet and Brushless DC Motor. Oxford : Clarendon press, 1985

[10] National Semiconductor. National Operational Amplifiers Databook. California : National Semiconductor, 1995

[11] Sergio Franco. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. Sanfrancisco : McGraw Hill, 1988

[12] Katsuhiko Ogata. Designing Linear Control System with MATLAB. New Jersey : Prentice Hall, 1994

[13] Naomi Ehrich Leonard and William S.Levine. Using Matlab to Analyze and Design Control Systems. California : Benjamin/Cummings, 1995

[14] Copley Control Corp., Westwood, "DC Brush Servo Amplifiers model 4122"

เอกสาร ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากร ... ที่มีการนำไปใช้

[15] John L.Hilburn and David E.Johnson. Manual of Active Filter Design. New York : McGraw-Hill, 1973

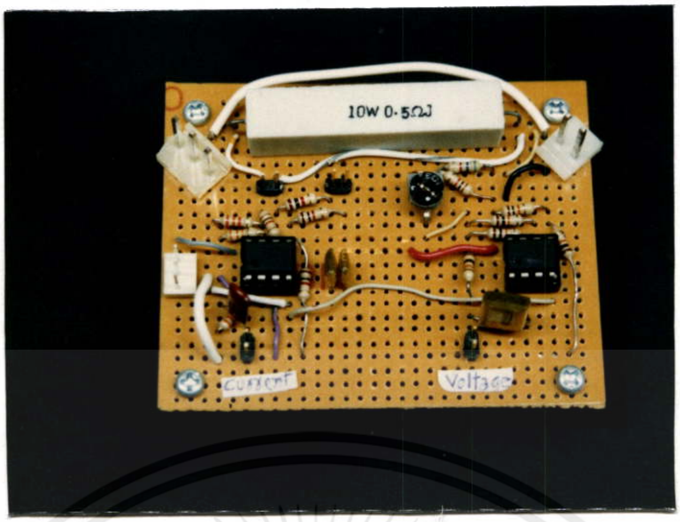
[16] Sanyo Denki co.,Ltd., Japan., "Manual of DC Servo Motor (U178T)"

[17] Gerald E.Williams. Practical Transistor Circuit Design and Analysis. New Delhi : McGraw-Hill : 1973

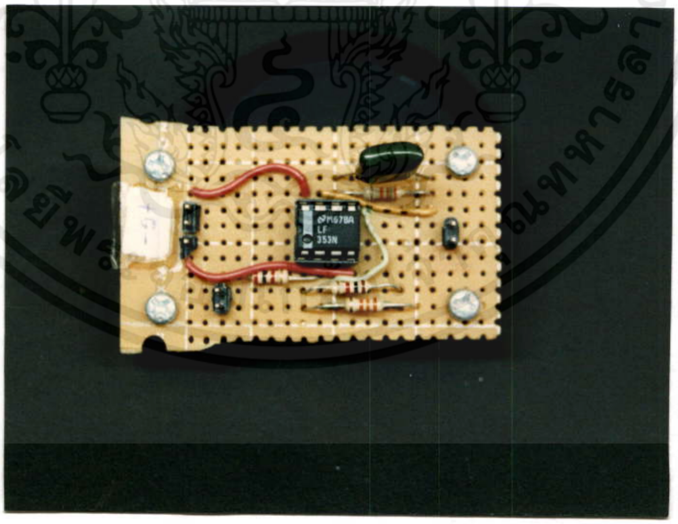
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

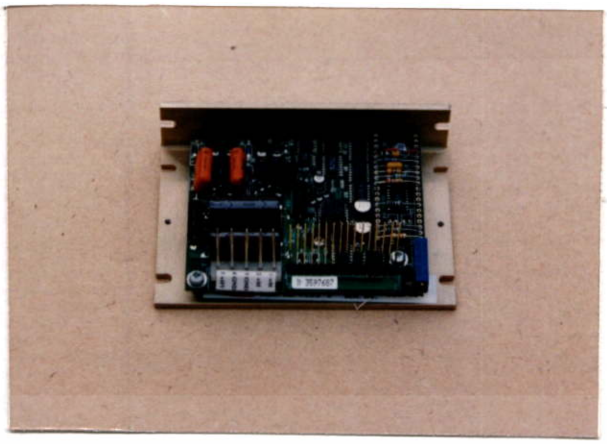


ภาพที่ 7.1 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านของส่วนป้อนกลับโวลท์เตจและกระแส

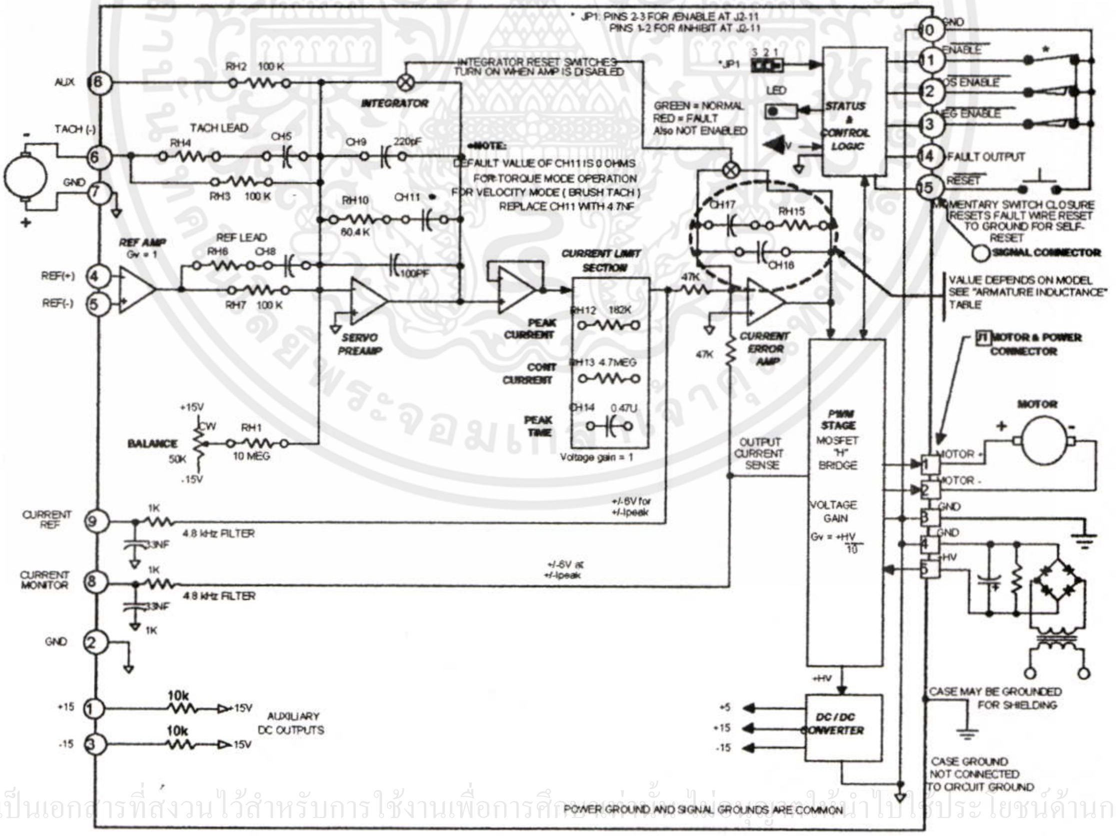


ภาพที่ 7.2 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านของส่วนป้อนกลับความเร็วจากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7.3 แสดงตัวขับดีซีมอเตอร์หรือไดร์ฟเวอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 7.4 แสดงบล๊อกไดอะแกรมภายในของวงจรขับดีซีมอเตอร์[14]

ประวัติผู้เขียน

นายกีรติ พิจูรพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2514 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 เป็นผู้ช่วยอาจารย์พิเศษระหว่างปีการศึกษา 2536-2540 ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้