สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงโดยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

POSITION CONTROL OF DC MOTOR BY USING TWO-DEGREE-OF-FREEDOM CONTROLLER

โดย

จารุนันต์ ปัญญาสันติสุข

จุฑามาศ วงศ์ธัชชัย

วพ.
ศ3211
2548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62536
วัน,เดือน,ปี 19 ส.ค. 2549

b 11625931
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงโดยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ**

Position Control of DC Motor by using Two-Degree-of-Freedom Controller

ผู้จัดทำ **นางสาวจารุนันต์ ปัญญาสันติสุข 45010109**

นางสาวจุฑามาศ วงศ์ธัชชัย 45010136

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์คอน อิศรากร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงโดยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

Position Control of DC Motor by using Two-Degree-of-Freedom Controller

โดย

นางสาวจารุนันต์ ปัญญาสันติสุข 45010109

นางสาวจุฑามาศ วงศ์ธัชชัย 45010136

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ดอน อิศรากร

อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง

บทคัดย่อ

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์กระแสตรงในเครื่องจักรนั้น มีการนำตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) มาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในขณะที่ตัวควบคุมชนิดอื่นเช่นตัวควบคุมแบบไอพีดี (IPD Controller) นั้นถูกนำมาใช้บ้างในบางระบบ แต่ตัวควบคุมเหล่านี้ไม่สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ ให้มีความสามารถในการตอบสนองสัญญาณอ้างอิงที่รวดเร็วและการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีได้อิสระจากกัน ซึ่งเรียกว่าตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระ ในงานวิจัยนี้จึงขอนำเสนอตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ ซึ่งสามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ให้ระบบมีคุณสมบัติทั้งสองอย่างที่ต้องการได้อย่างเหมาะสมต่อการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง ในส่วนของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสองขั้นความอิสระนั้นจะใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ จากผลการจำลองและการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุมที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงโดยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

Position Control of DC Motor by using Two-Degree-of-Freedom Controller

โดย

นางสาวจารุนันต์ ปัญญาสันติสุข 45010109

นางสาวจุฑามาศ วงศ์ธัชชัย 45010136

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ดอน อิศรากร

อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง

ABSTRACT

To control the position of DC Motor, the PID controller has been widely used, while other types such as the I-PD controller have been applied in some applications. However, these controllers, which are called one-degree-of-freedom controllers, could not be tuned to meet both tracking and regulation characteristics. Hence, this project presents position control of dc motor by using two-degree-of freedom controller which compromises both tracking and disturbance rejection performance. The parameter of two-degree-of freedom controller can be designed by the Coefficient Diagram Method, which is an efficient and simple method to design the parameters. The effectiveness of the proposed controller is demonstrated by the several simulations and experiments.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ดอน อิศรากร เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางในการแก้ปัญหา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนการฝึกฝนให้คณะผู้จัดทำมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ความเอาใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้คณะผู้จัดทำทำงานอย่างมีระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น และความช่วยเหลืออื่นๆ แก่คณะผู้จัดทำ และยังขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ถาวร เบญจนราสุทธิ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติแก่คณะผู้จัดทำเสมอมา ทำให้ผู้จัดทำเข้าใจปัญหานั้นๆ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่คณะผู้จัดทำจนสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียนได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจแก่คณะผู้จัดทำด้วยดีเสมอมา จนสามารถนำสิ่งต่างๆที่ได้รับมานั้นจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

จารุนันต์ ปัญญาสันติสุข

จุฑามาศ วงศ์รัชชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VI

สารบัญตาราง.....IX

คำย่อและสัญลักษณ์.....X

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์.....1

1.2 ขอบเขตในการทำปริญญานิพนธ์.....3

1.3 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์และขอบเขตของการศึกษา.....4

บทที่ 2 มอเตอร์กระแสตรง.....5

2.1 สมการพลวัตของมอเตอร์กระแสตรง.....5

2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง.....6

2.3 ผลการทดลองระบบวงเปิด.....8

บทที่ 3 ตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระ และแบบสองขั้นความอิสระ.....9

3.1 ตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระ.....9

3.2 ตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ.....18

บทที่ 4 วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....19

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ CDM.....19

4.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน.....20

4.3 พหุนามคุณลักษณะ.....21

4.4 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM.....22

4.5 รูปแบบมาตรฐานของ CDM.....23

4.6 เงื่อนไขการเลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพ.....25

4.7 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ
โดยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ 28
5.1 โครงสร้างระบบควบคุม 28
5.2 วิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ 31
5.3 การออกแบบระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ
สำหรับการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง 31
บทที่ 6 ผลการจำลองและผลการทดลอง 35
6.1 ผลการจำลอง 35
6.1.1 ผลตอบสนองเมื่อแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ 35
6.1.2 ผลตอบสนองเมื่อแปรผันค่าฐานนิ่งแฟกเตอร์ 39
6.2 ผลการทดลอง 41
6.2.1 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง 41
6.2.2 การกำจัดสัญญาณรบกวนคงที่ 43
บทที่ 7 บทสรุป 44

ภาคผนวก ก ผลกระทบของฐานนิ่งแฟกเตอร์ α 45
ภาคผนวก ข โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการทดลอง 49
ภาคผนวก ค ข้อมูลของมอเตอร์กระแสตรง 56

เอกสารอ้างอิง 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 ระบบควบคุมแบบพีไอดี....1

1.2 ระบบควบคุมแบบไอพีดี....2

1.3 ระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ....2

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรง....5

2.2 ผลตอบสนองต่อกระแสอินพุตควบคุมคงที่....7

2.3 ผลตอบสนองแบบวงเปิด....8

3.1 ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรงแบบพีไอดี....9

3.2 ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรงแบบไอพีดี....10

3.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบพีไอดี....12

3.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบไอพีดี....12

3.5 การกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบพีไอดี....13

3.6 การกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบไอพีดี....13

3.7(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบพีไอดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดค่าพุ่งเกิน....15

3.7(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบพีไอดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดค่าพุ่งเกิน....15

3.8(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบพีไอดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวน....16

3.8(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบพีไอดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวน....16

3.9(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อปรับระบบควบคุมแบบไอพีดีเพื่อลดช่วงเวลาไต่ขึ้นและช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวน....17

3.9(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบไอพีดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดช่วงเวลาไต่ขึ้นและช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวน....17

3.10 ระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ....18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.1 โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO....20

4.2 ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่างๆ....24

4.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์....26

4.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ 26

5.1 โครงสร้างระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ....28

5.2 ระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระในรูปแบบของ CDM....29

5.3 โครงสร้างที่ปรับปรุงจากรูปที่ 5.2....29

5.4 ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรงแบบสองขั้นความอิสระ....32

6.1(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อมีการแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_2 36

6.1(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวนเมื่อมีการแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_2 36

6.2(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อมีการแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 37

6.2(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวนเมื่อมีการแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 37

6.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อมีสัญญาณรบกวน ณ เวลา 3 วินาที
ที่ค่าดรรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 5$ และ $\gamma_2 = 4$ 38

6.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อทำการแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α 39

6.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง
เมื่อทำการแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α 40

6.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง....42

6.7 สัญญาณควบคุม....42

6.8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อมีสัญญาณรบกวน ณ เวลา 3 วินาที....43

6.9 สัญญาณควบคุม....43

ก.1 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 2.5$, $\gamma_2 = 2$ และ τ=0.4 45

ก.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 2.5$, $\gamma_2 = 2$ และ τ=4 46

ก.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 5$, $\gamma_2 = 4$ และ τ=0.4 46

ก.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 5$, $\gamma_2 = 4$ และ τ=4 47

ก.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 7.5$, $\gamma_2 = 6$ และ τ=4 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ค.1 มอเตอร์กระแสตรง.....56

ค.2 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรง.....56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

6.1 การแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_2 36

6.2 การแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 37

6.3 ผลการทดลองการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบ.....41

ค.1 ข้อมูลของมอเตอร์กระแสตรง.....56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

a_i หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

$A_c(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุม

$A_p(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของกระบวนการ

$A_p^*(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของกระบวนการที่รวมส่วนป้อนกลับ

b_i หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวเศษพหุนาม

B หมายถึง สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์และโหลด

$B_a(s)$ หมายถึง พรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม

$B_c(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุม

$B_{fb}(s)$ หมายถึง สมการพหุนามแบบป้อนกลับ

$B_{ff}(s)$ หมายถึง สมการพหุนามแบบป้อนไปหน้า

$B_p(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของกระบวนการ

$B_p^*(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของกระบวนการที่รวมส่วนป้อนกลับ

B_n หมายถึง สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและโหลด

$C(s)$ หมายถึง เอาต์พุต

$D(s)$ หมายถึง สัญญาณรบกวน

$G_c(s)$ หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม

$G_p(s)$ หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ

I_{in} หมายถึง กระแสอินพุต

J หมายถึง โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และโหลด

K_d หมายถึง อัตราขยายเดริเวทีฟ

K_{df} หมายถึง อัตราขยายเดริเวทีฟของส่วนป้อนกลับ

K_{dr} หมายถึง อัตราขยายเดริเวทีฟของส่วนป้อนไปหน้า

K_f หมายถึง ค่าคงที่แรงบิด

K_{fn} หมายถึง ค่าคงที่แรงบิดที่ใช้ในการทดลอง

K_i หมายถึง อัตราขยายอินทิกรัล

K_p หมายถึง อัตราขยายสัดส่วน

K_{pf} หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของส่วนป้อนกลับ

K_{pr} หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของส่วนป้อนไปหน้า

$P(s)$ หมายถึง พหุนามคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

P_o หมายถึง เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน

$R(s)$ หมายถึง อินพุต

t หมายถึง เวลา

t_r หมายถึง ช่วงเวลาไต่ขึ้น

t_s หมายถึง ช่วงเวลาเข้าที่

T หมายถึง แรงบิดของมอเตอร์

$U(s)$ หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม

θ หมายถึง ระยะขจัดเชิงมุมของแกนมอเตอร์

θ_{ss} หมายถึง ระยะขจัดเชิงมุมของแกนมอเตอร์ที่สภาวะอยู่ตัว

τ หมายถึง ค่าคงตัวเวลาสมมูล

γ_i หมายถึง ค่าดรรชนีเสถียรภาพ

γ_i^* หมายถึง ค่าจำกัดเสถียรภาพ

α หมายถึง ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์

σ หมายถึง จำนวนจริง

ω หมายถึง จำนวนจินตภาพ

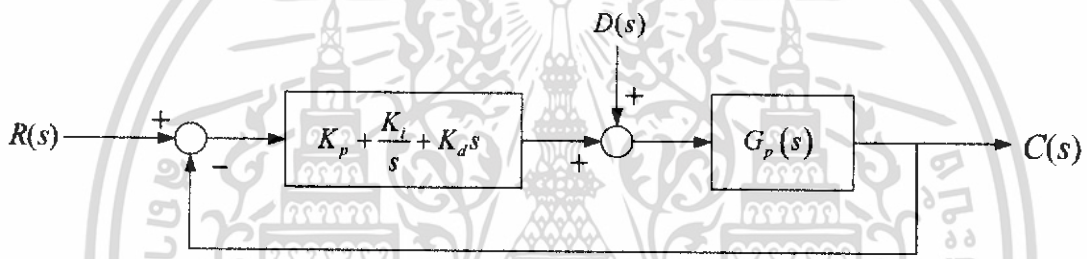
ζ หมายถึง ค่าอัตราการหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

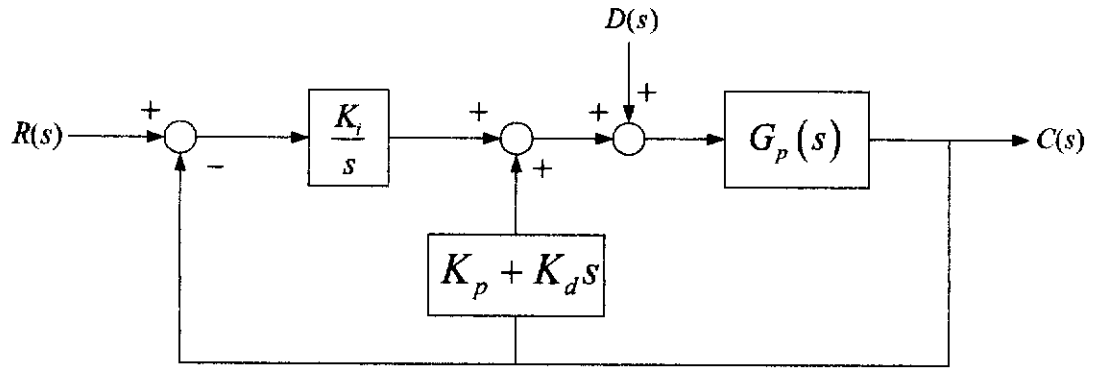
ปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงเป็นมอเตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังจะเห็นได้จากเครื่องจักรหลายๆ ชนิดอาทิเช่น เครื่องจักร CNC และ อื่นๆ ซึ่งมีมอเตอร์ประเภทนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญ โดยในการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงนั้นมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือการตอบสนองสัญญาณอ้างอิงที่รวดเร็วและการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดี การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไปนั้นมีการนำตัวควบคุมหลายชนิดมาใช้เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นต้น



รูปที่ 1.1 ระบบควบคุมแบบพีไอดี

ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ดังรูปที่ 1.1 มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ เมื่อทำการทดลองพบว่าขณะที่ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มความสามารถด้านการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงหรือความสามารถในกำจัดสัญญาณรบกวนอย่างใดอย่างหนึ่งแล้วจะส่งผลกระทบต่อความสามารถอีกด้านหนึ่ง โดยทั่วไปแล้ววิศวกรระบบควบคุมจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีให้มีความสามารถในการติดตามสัญญาณอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว แต่ก็ไม่สามารถทำให้การกำจัดสัญญาณรบกวนดีหรือช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวนน้อยได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตัวควบคุมอีกชนิดขึ้นให้มีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 1.2 โดยเรียกว่าตัวควบคุมแบบไอพีดี (I-PD Controller)

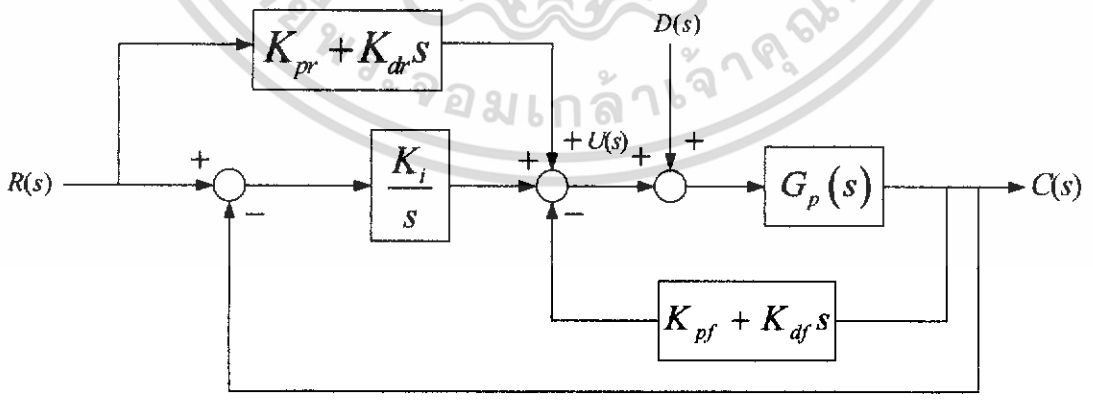
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ระบบควบคุมแบบไอพีดี

การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของระบบไอพีดีด้านใดด้านหนึ่ง จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอีกด้านหนึ่งเช่นเดียวกับระบบควบคุมแบบพีไอดี เมื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แล้วระบบจะมีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีแต่ผลตอบสนองของระบบยังมีช่วงเวลาไต่ขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่มาก จะเห็นว่าระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบไอพีดีที่ปรับแต่งพารามิเตอร์แล้ว สามารถเพิ่มคุณสมบัติของระบบได้เพียงด้านเดียวระบบควบคุมเหล่านี้จะเรียกว่า "ระบบควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระ" (one-degree-of-freedom controller)

ดังนั้นเพื่อให้ระบบควบคุมสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณสมบัติทั้งสองให้อิสระต่อกันและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอีกด้านหนึ่ง จึงมีการปรับปรุงระบบควบคุมจากหนึ่งขั้นความอิสระมาเป็น "ตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ" (two-degree-of-freedom controller) ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระนี้สามารถทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้มีความสามารถในการตอบสนองสัญญาณอ้างอิงที่เร็ว และการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีได้ ระบบควบคุมชนิดนี้ได้ปรับปรุงมาจากระบบควบคุมแบบไอพีดีโดยเพิ่มส่วนควบคุมแบบป้อนไปหน้า (feedforward controller) เข้ามาจึงทำให้มีความ สามารถในการตอบสนองสัญญาณอ้างอิงดีขึ้น

ปริญญานิพนธ์นี้ขอนำเสนอหลักการของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ และวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM) ตลอดจนถึงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระแบบต่างๆ และอธิบายถึงคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

1.2 ขอบเขตในการทำปริญญานิพนธ์

ในการศึกษาการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้น จะต้องศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการหาสมการพลวัตของมอเตอร์กระแสตรง โดยประมาณให้เป็นแบบเชิงเส้นและค่าพารามิเตอร์หาได้จากการทดลองจริง
2. ศึกษาตัวควบคุมแบบต่างๆ ไปจนถึงตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระเนื่องจากตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระสามารถปรับให้ระบบมีความสามารถทั้งทางด้านความเร็วในการตอบสนองและด้านการกำจัดสัญญาณรบกวน
3. ศึกษาและทำความเข้าใจนิยามและความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับวิธี CDM ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เพื่อควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพและมีสมรรถนะตามที่ต้องการ
4. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งจะช่วยในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เช่น โปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) เป็นต้น รวมถึงการสร้างตัวควบคุมจากโปรแกรมภาษาซี (C Language) เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของระบบจริงในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์และขอบเขตของการศึกษา

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 7 บท โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 วัตถุประสงค์และขอบเขตในการทำปริญญานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของงานวิจัยแต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายการหาสมการพลวัตของมอเตอร์กระแสตรง และส่วนที่สองอธิบายการหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงจากการทดสอบแบบวงเปิด

บทที่ 3 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระแบบต่างๆ และอธิบายคุณสมบัติของระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

บทที่ 4 อธิบายทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM ซึ่งประกอบด้วยบล็อกไดอะแกรมมาตรฐานของวิธี CDM โครงสร้างของระบบควบคุม ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับวิธี CDM

บทที่ 5 อธิบายวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระด้วยวิธี CDM และ

บทที่ 6 จำลองเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรพารามิเตอร์ต่าง ๆจากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและทำการทดลองกับระบบจริง

บทที่ 7 บทสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
มอเตอร์กระแสตรง

ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงจำเป็นจะต้องหาแบบจำลองพลวัตที่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากได้เลือกใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ในการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายการหาสมการพลวัตแบบเชิงเส้น รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง

2.1 สมการพลวัตของมอเตอร์กระแสตรง

ในรูปที่ 2.1 มอเตอร์กระแสตรงรุ่น SS40E2-E จากบริษัท Sawamura Denki Kogyo ขับเคลื่อนด้วยแรงดันสูงสุดขนาด 24 โวลต์ โดยมีแรงบิด T ที่เกิดขึ้นแปรผันตามขนาดกระแส I_{in} ที่ป้อนเข้าและเขียนสมการได้ดังนี้

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรง

$$T = k_f I_{in} \tag{2.1}$$

เมื่อ k_f คือค่าคงที่แรงบิด $\left(N-m/A\right)$
จากกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์กระแสตรงคือ

$$J\ddot{\theta} = T - B\dot{\theta} \tag{2.2}$$

เมื่อ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และโหลด $\left(kg-m^2\right)$

B คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์และโหลด $\left(N-m/rad/\sec\right)$

θ คือ ระยะขจัดเชิงมุมของแกนมอเตอร์ (Radian)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนค่า T จากสมการที่ (2.1) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ว่า

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = k_f I_{in} \tag{2.3}$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (2.3) และให้ค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$[Js^2 + Bs]\theta(s) = k_f I_{in}(s) \tag{2.4}$$

ดังนั้น ฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงปิดของมอเตอร์กระแสตรง คือ

$$G_p(s) = \frac{\theta(s)}{I_{in}(s)} = \frac{k_{fn}}{s(s+B_n)} \tag{2.5}$$

เมื่อ $k_{fn} = \frac{k_f}{J}$ และ $B_n = \frac{B}{J}$

แบบจำลองนี้เป็นระบบอันดับสองแบบที่หนึ่ง(Second order, Type I)

2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง

เมื่อป้อนกระแสอินพุทควบคุม I_{in} เข้าสู่ระบบในรูปที่ 2.1 จะได้ตำแหน่งเอาท์พุทของระบบดังนี้

$$\theta(s) = \frac{k_{fn}}{s(s+B_n)} \frac{I_c}{s} \tag{2.6}$$

เมื่อ I_c คือขนาดกระแสอินพุทควบคุมคงที่

ทำการแยกเศษส่วนย่อย $\theta(s)$ ได้

$$\theta(s) = \frac{k_{fn} I_c}{B_n}\left[\frac{1}{s^2} - T\frac{1}{s} + \frac{T^2}{Ts+1}\right] \tag{2.7}$$

โดยที่

$$T = \frac{1}{B_n} \tag{2.8}$$

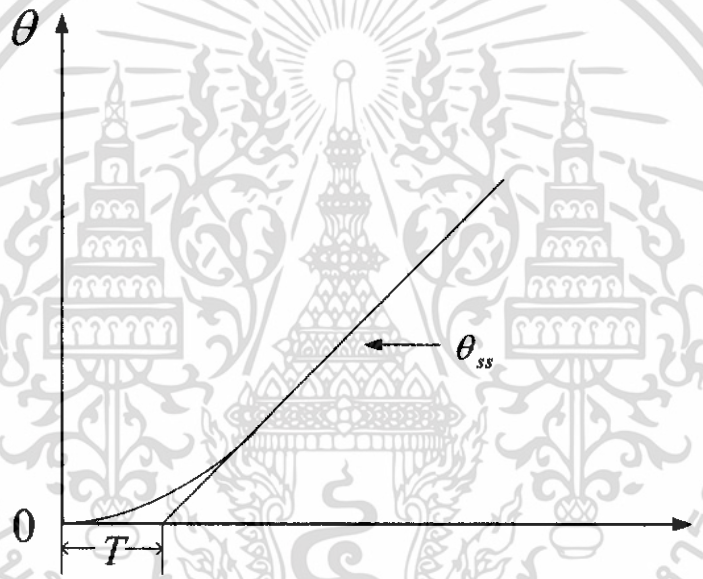
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแปลงลาปลาซผกผันสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$\theta(t) = \frac{k_{fn} I_c}{B_n}\left[t - T + Te^{-t/T}\right] \quad \text{โดยที่} \quad t \geq 0 \tag{2.9}$$

ในรูปที่ 2.2 เป็นกราฟผลตอบสนองของสมการที่ (2.9) ต่อกระแสควบคุมคงที่ I_c และขณะที่ t เข้าสู่อนันต์ สามารถเขียนสมการผลตอบสนองในสภาวะคงที่ θ_{ss} ได้ดังนี้

$$\theta_{ss} = \frac{k_{fn} I_c}{B_n}(t - T) \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองต่อกระแสอินพุทควบคุมคงที่

จากสมการที่ (2.10) และรูปที่ 2.2 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ด้วยขั้นตอนดังนี้

(1) ลากเส้นตรง θ_{ss} ไปยังแกน $\theta = 0$ และตัดกับแกนเวลาที่ $t = T$ สามารถหาค่า T ได้ก่อน

(2) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย J เป็นค่าออกแบบของมอเตอร์กระแสตรงที่ศึกษาจึงทราบได้จากคู่มือและจากสมการที่ (2.8) จะหาค่า B_n ได้

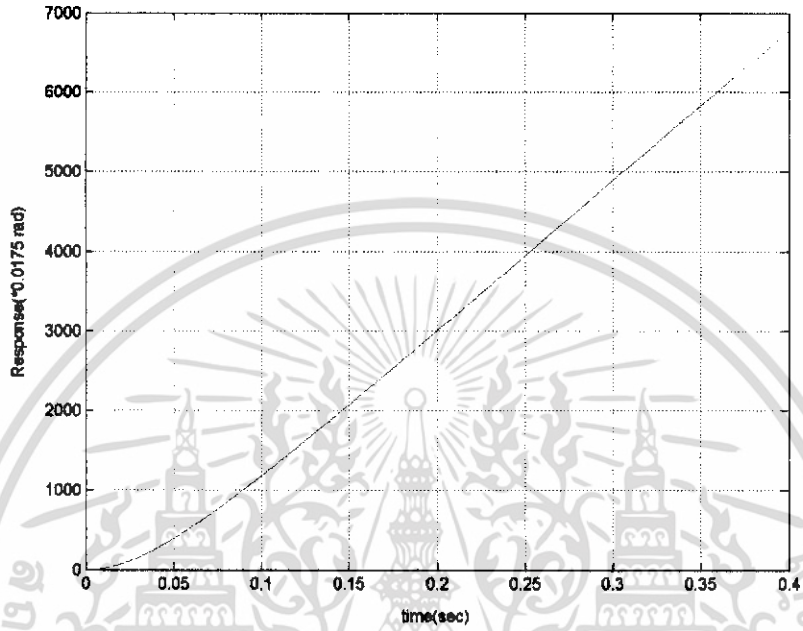
(3) จากค่าความชันของผลตอบสนองที่สภาวะคงที่ θ_{ss} คือ $\frac{k_{fn} I_c}{B_n}$ หาค่า k_{fn} ได้

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชั่นถ่ายโอนของมอเตอร์กระแสตรงจึงสามารถหาได้จากผลการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลการทดลองระบบวงเปิด

ป้อนแรงดันขนาด +24 V และกระแสอินพุทควบคุมขนาด 7.5 แอมแปร์จากคอมพิวเตอร์ให้แก่มอเตอร์กระแสตรง ได้ผลตอบสนองแบบวงเปิดของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองแบบวงเปิด

จากกราฟผลตอบสนองแบบวงเปิด ความชันของผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวคือ 326.30 เส้นตรงของผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวลากมาตัดกับแกนเวลาที่ 0.039 วินาทีจึงหาสมการพลวัตได้ดังนี้

$$G_p(s) = \frac{1115.554}{s(s+25.641)} \tag{2.11}$$

เมื่อสัญญาณอ้างอิงคือกระแสอินพุทควบคุมคงที่ I_{in} และเอาท์พุทเป็นตำแหน่งของมอเตอร์ $\theta(s)$

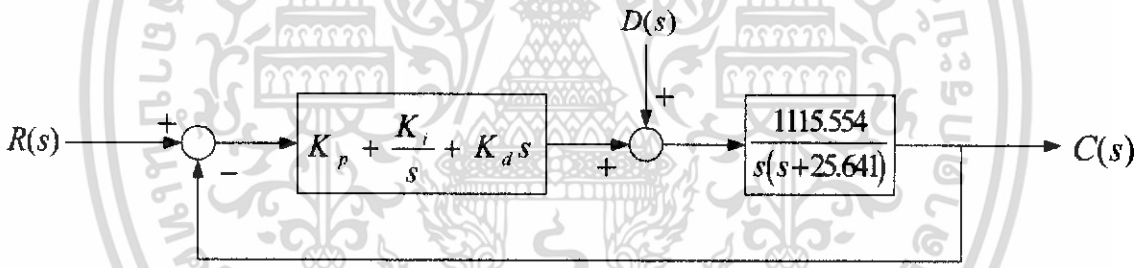
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระและ ตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์นั้น ความสามารถในการตอบสนองสัญญาณอ้างอิงที่เร็วโดยปราศจากค่าพุ่งเกินและความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสม ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและฟังก์ชั่นถ่ายโอนรวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติที่สำคัญของระบบควบคุมแบบต่าง ๆ

3.1 ตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระ

ตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระที่นิยมใช้ในการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรง อย่าง เช่นตัวควบคุมแบบพีไอดีมีโครงสร้างระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2)



รูปที่ 3.1 ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรงแบบพีไอดี

<สัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณอ้างอิง>

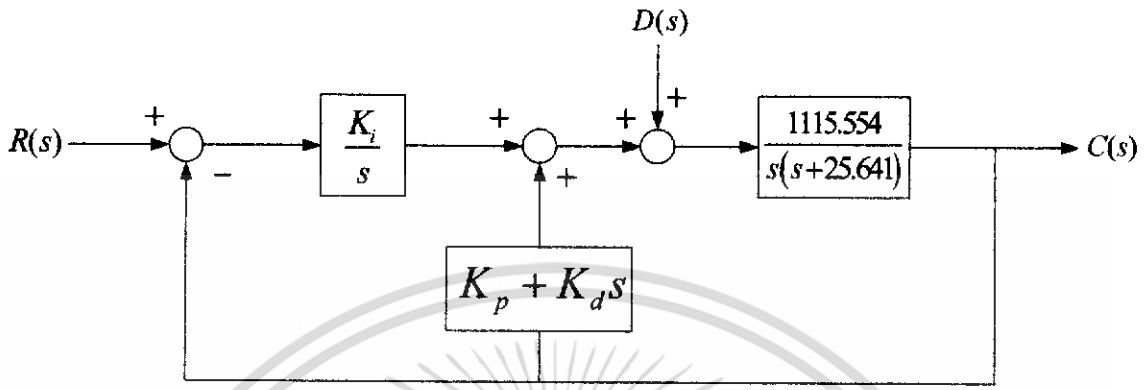
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1115.554\left(K_d s^2 + K_p s + K_i\right)}{s^3 + \left(25.641 + 1115.554K_d\right)s^2 + 1115.554K_p s + 1115.554K_i} \qquad (3.1)$$

<สัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณรบกวน>

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{1115.554s}{s^3 + \left(25.641 + 1115.554K_d\right)s^2 + 1115.554K_p s + 1115.554K_i} \qquad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระอีกแบบหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาคือตัวควบคุมแบบไอพีดี มีโครงสร้างระบบควบคุมดังรูปที่ 3.2 และฟังก์ชั่นถ่ายโอนต่างๆ ดังสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4)



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรงแบบไอพีดี

<สัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณอ้างอิง>

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1115.554K_i}{s^3 + (25.641 + 1115.554K_d)s^2 + 1115.554K_p s + 1115.554K_i} \tag{3.3}$$

<สัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณรบกวน>

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{1115.554s}{s^3 + (25.641 + 1115.554K_d)s^2 + 1115.554K_p s + 1115.554K_i} \tag{3.4}$$

คุณสมบัติของระบบควบคุมทั้งสองแบบแตกต่างกันเล็กน้อยจึงทำการจำลองเปรียบเทียบคุณสมบัติทั้งด้านการติดตามสัญญาณอ้างอิงและการกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระ เมื่อให้มีค่าพารามิเตอร์เท่ากันและเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของระบบควบคุมแล้ว

จากสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.3) ฟังก์ชั่นถ่ายโอนสัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบไอพีดี จะเห็นว่าระบบควบคุมทั้งสองแบบมีสมการคุณลักษณะเหมือนกันคือ

$$P(s) = s^3 + (25.641 + 1115.554K_d)s^2 + 1115.554K_p s + 1115.554K_i \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อการเปรียบเทียบกำหนดให้ช่วงเวลาเข้าที่ t_s ที่ 1 วินาทีและเพื่อให้ระบบไม่มีค่าพุ่งเกินกำหนดให้ค่าอัตราการหน่วง ζ มีค่าเท่ากับ 1 จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.6)

$$\text{จาก} \qquad t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \tag{3.6}$$

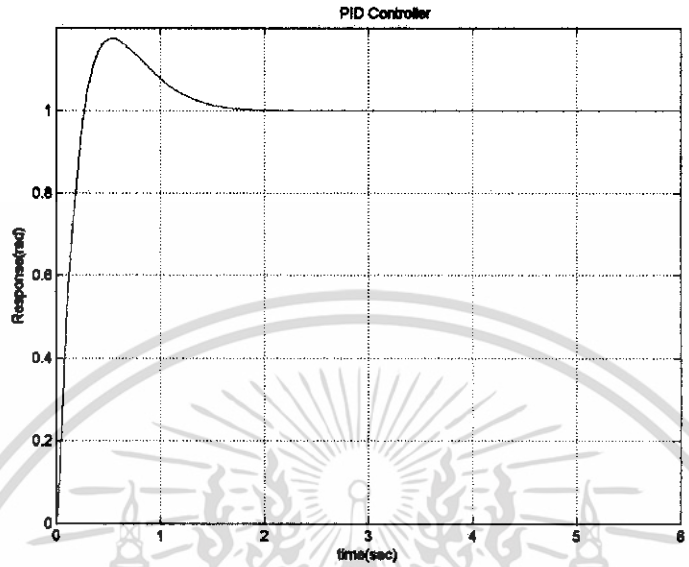
$$\text{จึงได้} \qquad \omega_n = 4 \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้ว่าระบบมีโพลเด่น s วงปิดสองตัวอยู่ที่ -4 จึงเลือกโพลอีกตัวให้มีค่าเป็น 10 เท่าของโพลเด่น s คือที่ - 40 และสามารถเขียนสมการคุณลักษณะได้คือ

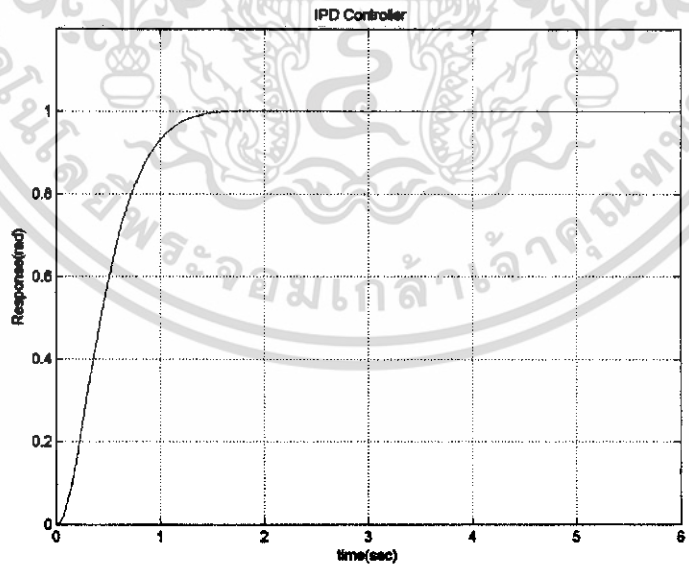
$$\begin{aligned} P(s) &= (s+40)(s^2+8s+16) \\ &= s^3+48s^2+316s+640 \end{aligned} \tag{3.8}$$

เมื่อนำสมการที่ (3.5) เท่ากับสมการที่ (3.8) จะได้ค่าพารามิเตอร์ K_p, K_d และ K_i มีค่าเท่ากับ 0.28, 0.02 และ 0.5749 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์แทนลงในฟังก์ชั่นถ่ายโอนสัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณอ้างอิง สมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.3) เพื่อจำลองในโปรแกรม Simulink ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์แทนลงในฟังก์ชั่นถ่ายโอนสัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณรบกวนสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.4) เพื่อดูการกำจัดสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

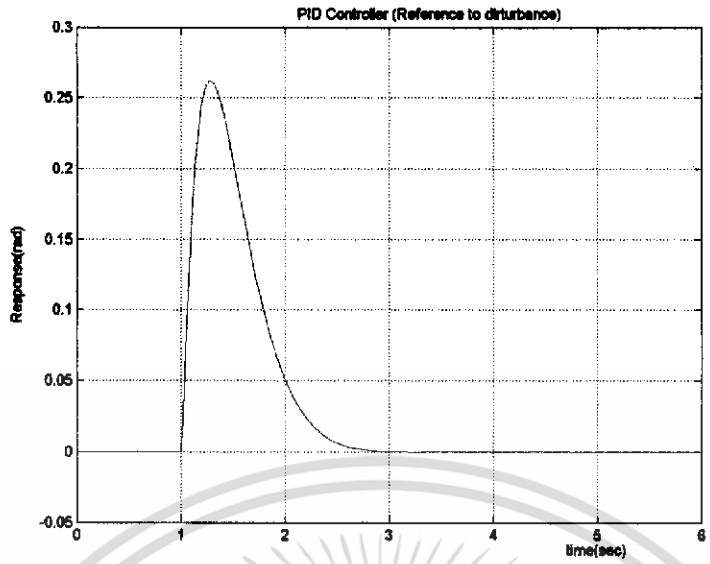


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบพีไอดี

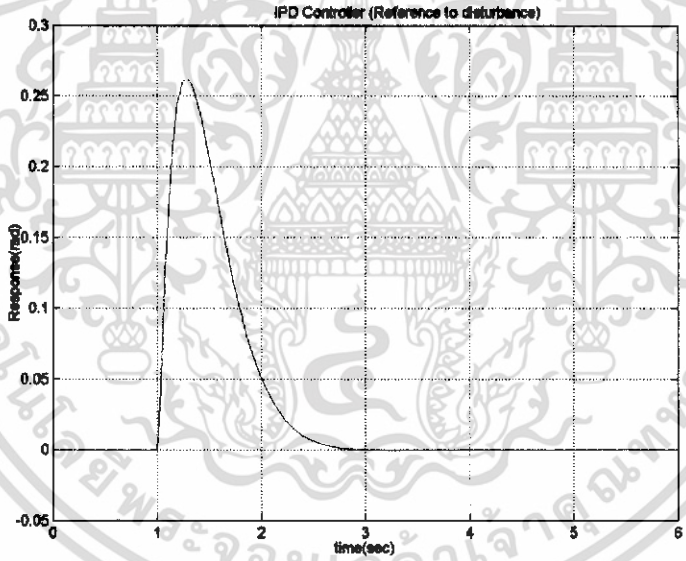


รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบไอพีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 3.6 การกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมแบบไอพีดี

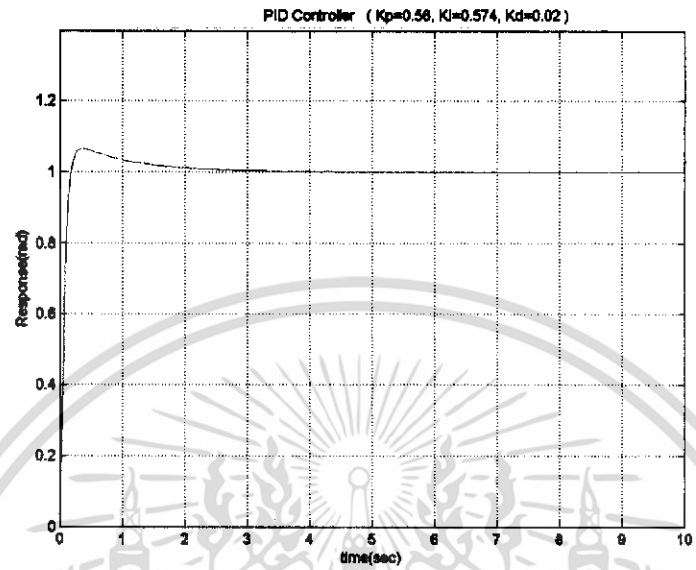
จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 ระบบควบคุมแบบพีไอดีมีช่วงเวลาไต่ขึ้น (rise time) 0.2 วินาที และค่าพุ่งเกิน 17.8% ในขณะที่ระบบควบคุมแบบไอพีดีมีช่วงเวลาไต่ขึ้น 0.5 วินาทีและไม่มีค่าพุ่งเกิน จากรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบควบคุมทั้งสองชนิดนั้นใช้เวลาในการกำจัดสัญญาณรบกวนเท่ากันที่เวลาประมาณ 1.7 วินาที จะเห็นว่าระบบควบคุมทั้งสองชนิดมีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนเท่ากัน แต่ผลตอบสนองต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

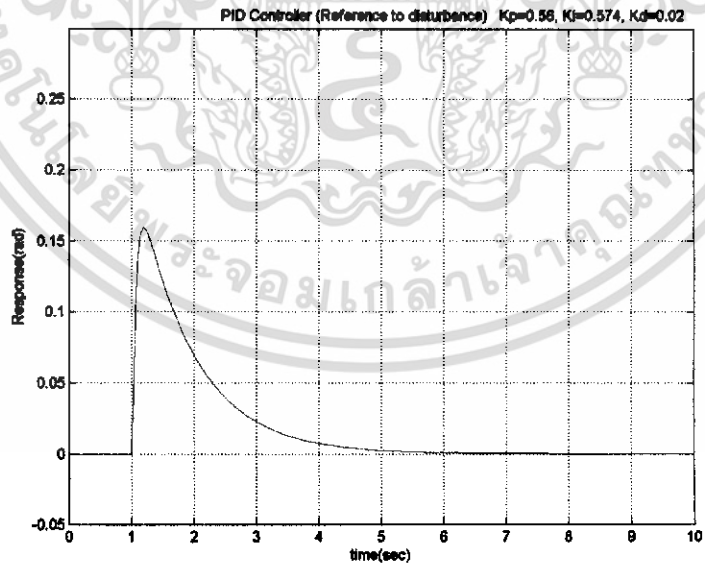
สัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบพีไอดีมีช่วงเวลาไต่ขึ้นน้อยแต่มีค่าพุ่งเกิน โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบไอพีดีไม่มีค่าพุ่งเกินแต่ยังมีช่วงไต่ขึ้นมาก ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยการจำลองผลปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของระบบควบคุมทั้งสองชนิดให้ดีขึ้น

ในขั้นแรกปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดีเพื่อลดค่าพุ่งเกิน จะเห็นว่าช่วงเวลาในการกำจัดสัญญาณรบกวนและช่วงเวลาเข้าที่จะมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7 และเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดค่าพุ่งเกินผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งค่าพุ่งเกินเป็นค่าที่ไม่สามารถยอมรับได้ในการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรง จากนั้นปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบไอพีดีเพื่อลดช่วงเวลาไต่ขึ้น การปรับจะส่งผลให้การกำจัดสัญญาณรบกวนจะเปลี่ยนแปลงและเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ให้ช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวนเร็วขึ้นผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



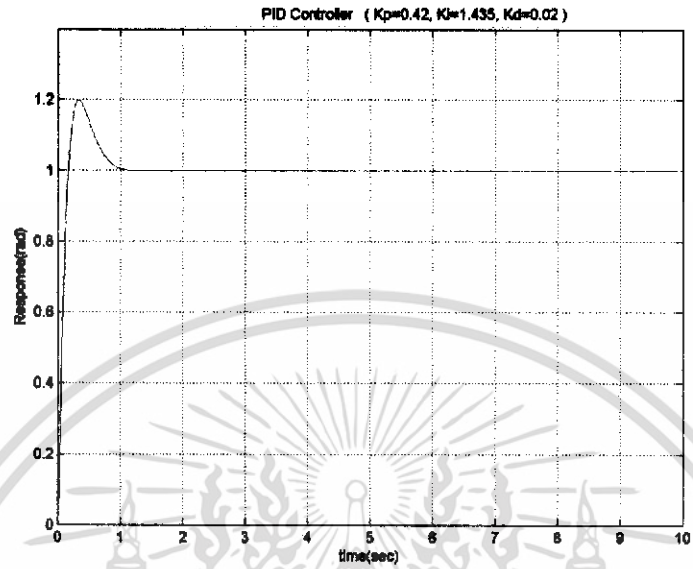
(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง



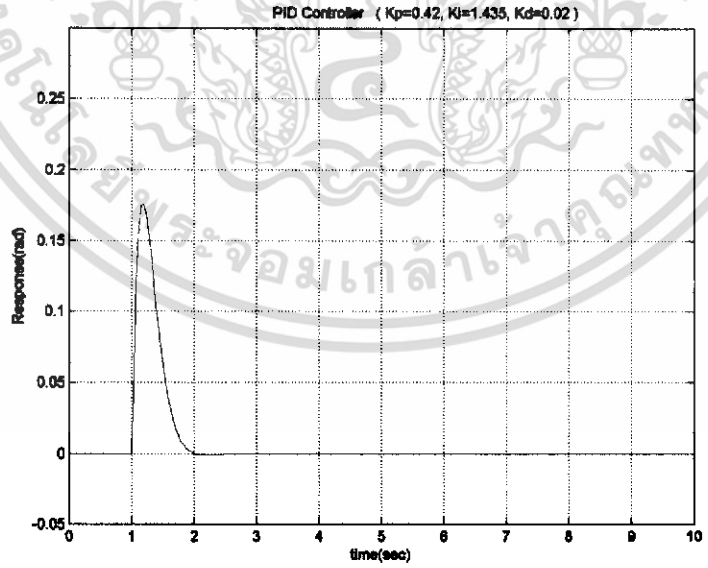
(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวน

รูปที่ 3.7 ระบบควบคุมแบบพีไอดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดค่าพุ่งเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



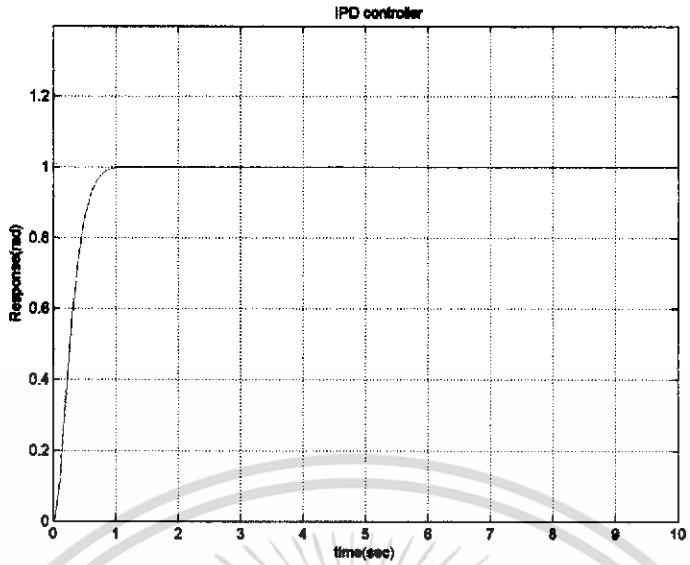
(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง



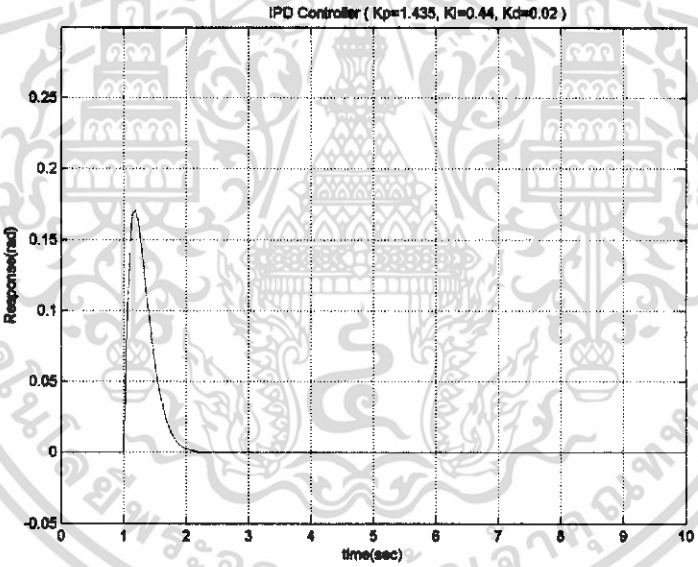
(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวน

รูปที่ 3.8 ระบบควบคุมแบบพีไอดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง



(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวน

รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมแบบไอพีดีเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อลดช่วงเวลาไต่ขึ้นและลดช่วงเวลาการกำจัดสัญญาณรบกวน

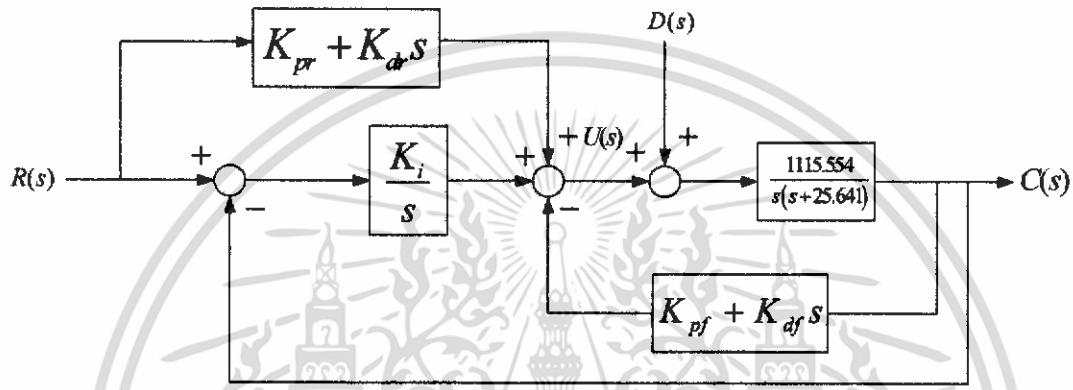
จากการจำลองที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มความสามารถด้านใดด้านหนึ่งของระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบไอพีดีแล้ว จะส่งผลกระทบกับคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งเสมอ จึงเรียกระบบควบคุมทั้งสองชนิดนี้ว่า ตัวควบคุมแบบหนึ่งขั้นความอิสระ (one-degree-of-freedom controller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

62536

3.2 ตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

ตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระได้รับการพัฒนาโดยการเพิ่มส่วนป้อนไปหน้า (feedforward controller)ให้กับตัวควบคุมแบบไอพีดีดังรูปที่ 3.10 เพื่อให้ระบบควบคุมสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ให้มีผลตอบสนองรวดเร็วและการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอีกด้านหนึ่งนั้น เนื่องจากตัวควบคุมแบบไอพีดีนั้นมีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีและส่วนป้อนไปหน้าจะส่งผลต่อความสามารถในการติดตามสัญญาณอ้างอิงเร็วขึ้น ทำให้สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้ระบบมีคุณสมบัติที่ต้องการได้



รูปที่ 3.10 ระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

<สัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณอ้างอิง>

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{1115.554\left(K_{dr}s^2+K_{pr}s+K_i\right)}{s^3+\left(25.641+1115.554K_{df}\right)s^2+1115.554K_{pf}s+1115.554K_i} \tag{3.9}$$

<สัญญาณเอาท์พุตต่อสัญญาณรบกวน>

$$\frac{D(s)}{R(s)}=\frac{1115.554s}{s^3+\left(25.641+1115.554K_{df}\right)s^2+1115.554K_{pf}s+1115.554K_i} \tag{3.10}$$

จากสมการที่ (3.9) และสมการที่ (3.10) จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ K_{df}, K_{pf} และ K_i ส่งผลต่อการกำจัดสัญญาณรบกวน ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ K_{dr} และ K_{pr} ส่งผลต่อการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงดังนั้นจึงสามารถปรับคุณสมบัติแต่ละด้านได้โดยไม่กระทบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

ปัญหาทั่วไปในการออกแบบระบบควบคุมคือการเลือกใช้ตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบควบคุมเพื่อให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพและสมรรถนะตามต้องการ ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 3 ทฤษฎีหลักๆ คือ ทฤษฎีการควบคุมตามแบบดั้งเดิม (classical control theory) ทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ (modern control theory) และทฤษฎีควบคุมโดยอาศัยพหุนาม (polynomial) หรือ บางครั้งเรียกว่าทฤษฎีพีชคณิต ตัวอย่างวิธีการควบคุมตามแบบดั้งเดิม เช่น วิธีการตอบสนองทางความถี่ (frequency response method) และวิธีทางเดินของราก (root-locus method) ซึ่งจะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นเครื่องมือที่ง่ายในการออกแบบระบบควบคุม แต่จะเกิดค่าผิดพลาดขึ้นเมื่อโพลและซีโรของระบบเกิดการหัก ล้างกัน ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถควบคุม(uncontrollable)และไม่สามารถสังเกต (unobservable) พฤติการณ์ของระบบได้สำหรับตัวอย่างทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ เช่น วิธีการวางโพล (pole-placement) และวิธีการควบคุมเหมาะที่สุด (optimal control) ซึ่งจะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของปริภูมิสเตต (state-space) รูปแบบปริภูมิสเตตนี้ จะมีความแม่นยำและเหมาะสมในการคำนวณด้วยเครื่องคำนวณ วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์หรือ CDM เป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบพีชคณิต ซึ่งระบบจะถูกแทนด้วยพหุนาม โดยพิจารณาตัวเศษและตัวส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนแยกออกจากกัน ดังนั้น จะได้ผลตอบสนองที่ดีกว่าเมื่อโพลและซีโรเกิดการหักล้างกัน

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวิธี CDM

ศาสตราจารย์ชุนจิ มานาเบะ (Shunji Manabe) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ด้วยการใช้แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram) เป็นเครื่องมือเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบควบคุม การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM จะใช้หลักการทางพีชคณิตโดยที่

(1) ระบบจะถูกแทนด้วยสมการพหุนาม

(2) สามารถออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะและตัวควบคุมได้พร้อมกัน

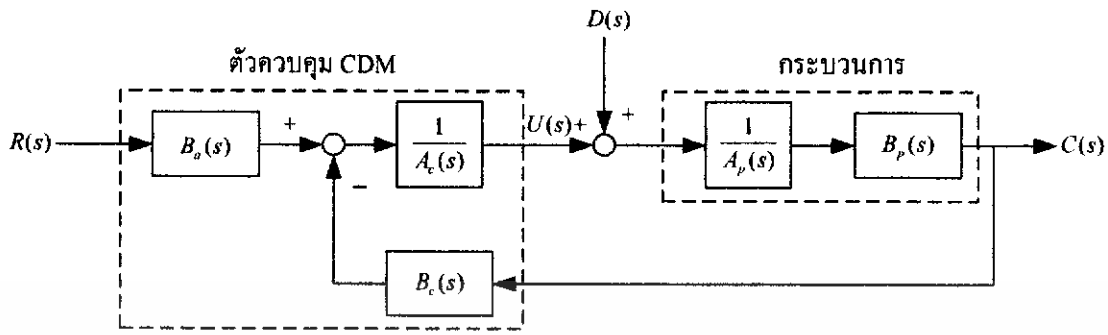
(3) มีการนำแผนผังค่าสัมประสิทธิ์มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

(4) ทฤษฎีเสถียรภาพของ CDM จะอยู่บนเงื่อนไขความพอเพียงของลีพาทอฟ (Lipatov's sufficient condition for stability)

(5) ครรชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM จะถูกดัดแปลงมาจากรูปแบบมาตรฐานของ Kessler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน



รูปที่ 4.1 โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO

โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO (Single-Input-Single-Output) แสดงได้ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมและกระบวนการ โดยที่ $A_p(s)$ และ $B_p(s)$ คือพหุนามของกระบวนการและมีรูปแบบแสดงในสมการที่ (4.1) และ (4.2) ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \ldots + p_0 \tag{4.1}$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \ldots + q_0 \tag{4.2}$$

และ $A_c(s)$, $B_c(s)$ และ $B_a(s)$ ซึ่งก็คือพหุนามของตัวควบคุม CDM จะมีรูปแบบดังนี้

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \ldots + l_0 \tag{4.3}$$

$$B_c(s) = k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \ldots + k_0 \tag{4.4}$$

$$B_a(s) = p_\lambda s^\lambda + p_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \ldots + p_0 \tag{4.5}$$

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ สำหรับ $B_a(s)$ นั้นเป็นพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady--state error) ถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับ k_0 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) แต่ช่วงเวลาไต่ขึ้น (rise time) จะมาก และถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับตัวเศษของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $B_c(s)$ จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน และช่วงเวลาไต่ขึ้นจะน้อยลง เนื่องจากระบบควบคุมนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม 2 ตัว ดังนั้น จึงถูกเรียกว่าระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ (two-degree-of-freedom: 2DOF) โดยโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ 2DOF นั้น เมื่อนำมาใช้ในการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการต่างๆ จะทำให้ระบบควบคุมสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงที่กำหนดและสามารถกำจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบได้

4.3 พหุนามคุณลักษณะ

พหุนามคุณลักษณะจากโครงสร้างของ CDM มาตรฐานดังรูปที่ 4.1 โดยไม่มีพรีฟิลเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0 \\ &= \sum_{i=0}^{n} a_i s^i \end{aligned} \tag{4.6}$$

โดยที่ $a_0, a_1, \ldots, a_n$ คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่รู้ค่าและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ยังไม่รู้ค่าและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนี้จะถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM จะเป็นการออกแบบจากระบบควบคุมทั้งระบบ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะประกอบด้วยค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบ และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพหุนามคุณลักษณะ ส่วนค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* จะเป็นตัวบอกความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i โดยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* แสดงได้ดังสมการที่ (4.7) (4.8) และ (4.9) ตามลำดับดังนี้

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}} \tag{4.7}$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{4.8}$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}; \gamma_0, \gamma_n = \infty \tag{4.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $i=1,...,n-1$ จากความสัมพันธ์ของค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ในสมการที่ (4.7) และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ในสมการที่ (4.8) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_i แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$a_i = a_0\tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1}\cdots\gamma_2^{i-2}\gamma_1^{i-1}}$$

$$= a_0\tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\left(\gamma_{i-j}\right)^j} \tag{4.10}$$

เมื่อแทนค่าแต่ละตัวของสัมประสิทธิ์ a_i ลงในสมการที่ (4.6) จะได้พหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ที่แสดงอยู่ในเทอมของ a_0, τ และ γ_i ดังนี้

$$P(s) = a_0\left[\left\{\sum_{i=2}^{n}\left(\prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{\gamma_{i-j}^j}\right)(\tau s)^i\right\} + \tau s + 1\right] \tag{4.11}$$

ซึ่งสมการ $P(s)$ นี้จะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ต่อไป

4.4 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบที่ถูกออกแบบโดยวิธี CDM นั้น จะใช้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลีพาทอฟ โดยลีพาทอฟกล่าวว่าวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบต่างๆ เช่น วิธีของเราท์-เฮอร์วิทซ์ (Routh-Hurwitz) นั้น เหมาะสมสำหรับนำมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบอันดับ 3 หรืออันดับ 4 แต่ไม่เพียงพอต่อการนำมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบอันดับสูงๆ ลีพาทอฟได้เสนอว่า ระบบอันดับที่ n ที่มีจำนวนพารามิเตอร์ n ตัว ขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง (exact stability region) สามารถอนุมานให้อยู่ในรูปเชิงซ้อนที่มี n มิติ แต่ขอบเขตเสถียรภาพที่พอเพียง (sufficient stability region) จะเป็นส่วนย่อยของขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง ดังนั้นระบบใดๆ อาจมีเสถียรภาพแม้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงจะไม่เป็นที่น่าพอใจก็ตาม ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่า เงื่อนไขเสถียรภาพของลีพาทอฟเป็นเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับความพอเพียง

จากวิธีตรวจสอบเสถียรภาพของเราท์-เฮอร์วิทซ์ เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบอันดับ 3 แสดงดังนี้

$$a_2a_1 > a_3a_0 \tag{4.12}$$

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในเทอมของดรรชนีเสถียรภาพคือ

$$\gamma_2\gamma_1 > 1 \tag{4.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบอันดับ 4 แสดงดังนี้

$$a_2 > (a_1/a_3)a_4 + (a_3/a_1)a_0 \tag{4.14}$$

$$\gamma_2\gamma_3 > 1 \tag{4.15}$$

จากสมการที่ (4.9),(4.13) และ (4.15) สามารถสรุปเงื่อนไขเสถียรภาพสำหรับระบบอันดับ 3 และ 4 ได้ดังนี้

$$\gamma_i > \gamma_i^* \text{ สำหรับทุกๆค่าของ } i = 2 \sim n-2 \tag{4.16}$$

สำหรับระบบอันดับ 5 และอันดับที่สูงขึ้นไป ลีพาทอฟได้เสนอเงื่อนไขพอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพและความไม่มีเสถียรภาพของระบบไว้หลายรูปแบบ โดยทฤษฎีที่เหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM แสดงดังต่อไปนี้

เงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของระบบคือ

$$a_i > 1.12\left[\frac{a_{i-1}}{a_{i+1}}a_{i+2} + \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}}a_{i-2}\right] \tag{4.17}$$

$$\gamma_i > 1.12\gamma_i^* \text{ สำหรับทุกๆ ค่าของ } i = 2 \sim n-2 \tag{4.18}$$

และเงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพของระบบคือ

$$a_{i+1}a_i \le a_{i+2}a_{i-1} \tag{4.19}$$

$$\gamma_{i+1}\gamma_i \le 1, \text{ สำหรับบางค่าของ } i = 1 \sim n-2 \tag{4.20}$$

4.5 รูปแบบมาตรฐานของ CDM

Kessler ได้กำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ทุกๆค่ามีค่าเท่ากับ 2 เพื่อลดการออสซิลเลทและค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยรูปแบบ ITAE (Integral Time Absolute Error) ต่อมา Manabe พบว่าการกำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าเท่ากับ 2.5 จะทำให้ผลตอบสนองชั่วครู่ดีขึ้น กล่าวคือผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและมีช่วงเวลาขึ้นลดลง ดังนั้นค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i มาตรฐานของ CDM คือ

$$\gamma_{n-1} = \ldots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \tag{4.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาเข้าที่ (settling time: t_s) ดังนี้

$$t_s = 2.5\tau \sim 3\tau \tag{4.22}$$

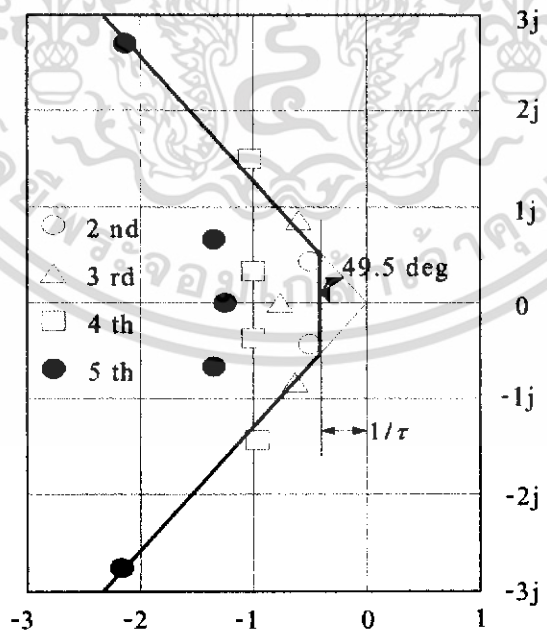
จากสมการที่ (4.11) จะเห็นว่าพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ จะประกอบด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ดังนั้น รูปร่างของผลตอบสนองของระบบจะถูกกำหนดด้วยค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i และความเร็วของผลตอบสนองจะถูกกำหนดด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งคุณสมบัติของรูปแบบมาตรฐานของ CDM สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) สำหรับระบบแบบชนิด 1 (type 1) จะไม่มีค่าพุ่งเกินและระบบแบบชนิด 2(type 2) จะมีค่าพุ่งเกินประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

(2) การกำหนดช่วงเวลาขึ้นของผลตอบสนองของระบบสามารถออกแบบได้จากการกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

(3) รูปร่างของผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM จะไม่ขึ้นอยู่กับอันดับของระบบ แต่จะขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

(4) ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่ำจะเรียงกันเป็นเส้นตรง และตำแหน่งโพลของระบบอันดับสูงจะอยู่ภายใน 49.5 ดีกรี จากแกนจริงด้านลบ (negative real axis) โดยมีอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ζ มากกว่า 0.65 แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 เงื่อนไขการเลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพ

โดยทั่วไปแล้วการเลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพมาตรฐานจะเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองตามต้องการ อย่างไรก็ตามค่าดรรชนีเสถียรภาพนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามต้องการ แต่ในการปรับเปลี่ยนจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \tag{4.23}$$

ในกรณีที่เลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ให้มีค่ามากก็เพื่อให้ระบบควบคุมมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ และจากเงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลีพาทอฟกล่าวว่า ระบบจะมีเสถียรภาพถ้าดรรชนีเสถียรภาพทุกตัวมีค่ามากกว่า 1.5 ซึ่งได้ทำการพิสูจน์ไว้ในงานวิจัยของลีพาทอฟ และถ้าดรรชนีเสถียรภาพมีค่ามากกว่า 4 ทุกตัวจะทำให้รากของระบบเป็นจำนวนจริงลบทั้งหมด ดังนั้นโดยปกติจะเลือกค่า γ_i อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 4

4.7 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งจะเป็นตัวบอกเสถียรภาพ เวลาของผลตอบสนองและความคงทนของระบบ ในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะแสดงเป็นกราฟล็อกการิทึม โดยแกนตั้งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ a_i ค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ส่วนแกนนอนแสดงอันดับ i ของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัว ซึ่งความโค้งของเส้นกราฟจะบอกความมีเสถียรภาพ และความลาดเอียงของเส้นโค้งจะบอกความเร็วของผลตอบสนอง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นโค้งเนื่องจากพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงจะเป็นตัวบอกความคงทนของระบบ

ในการพล็อตแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้น จะขอยกตัวอย่างเพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้นดังต่อไปนี้ ถ้ากำหนดให้พหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดคือ

$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 0.2 \tag{4.24}$$

แล้ว จะเขียนสัมประสิทธิ์ a_i ของพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ได้ดังนี้

$$a_i = \begin{bmatrix} 0.25 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0.2 \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

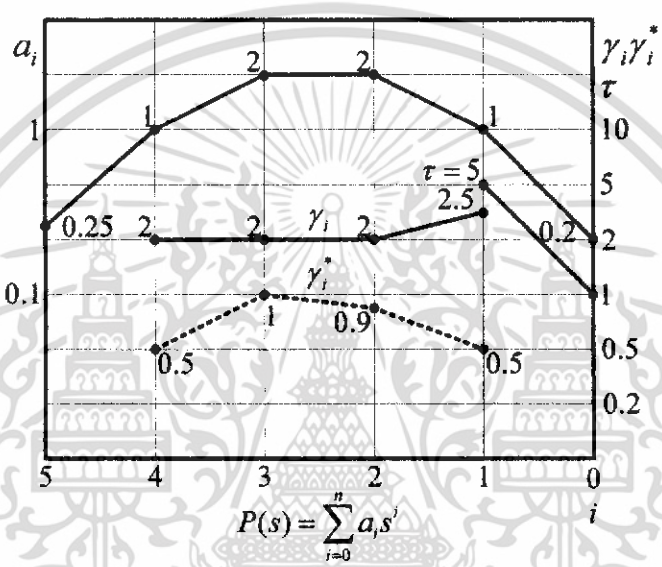
สำหรับค่าพารามิเตอร์ของ CDM แสดงได้ดังนี้

$$\gamma_i = [2\ 2\ 2\ 2.5] \tag{4.26}$$

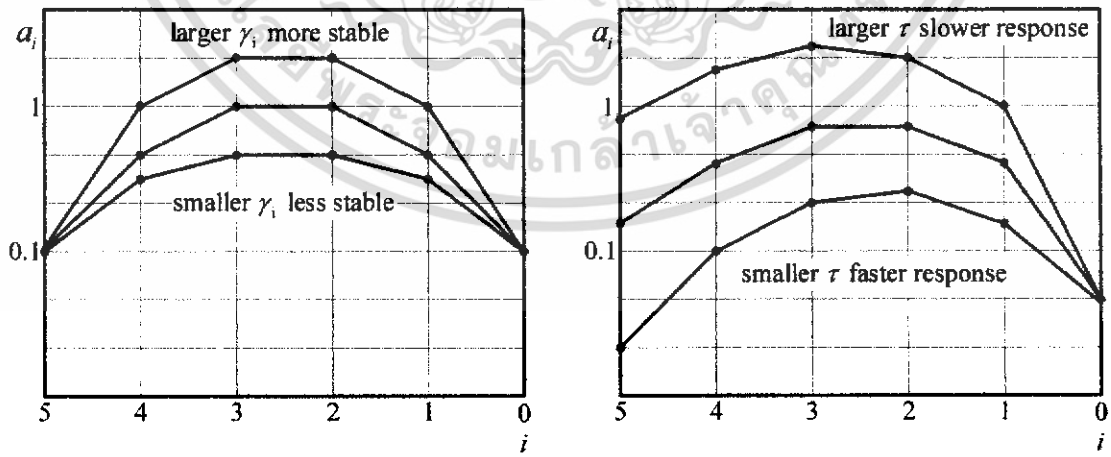
$$\tau = 5 \tag{4.27}$$

$$\gamma_i^* = [0.5\ 1\ 0.9\ 0.5] \tag{4.28}$$

ดังนั้น แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a_i ค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์



(ก) เสถียรภาพของระบบ **(ข)** ผลตอบสนองของระบบ

รูปที่ 4.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

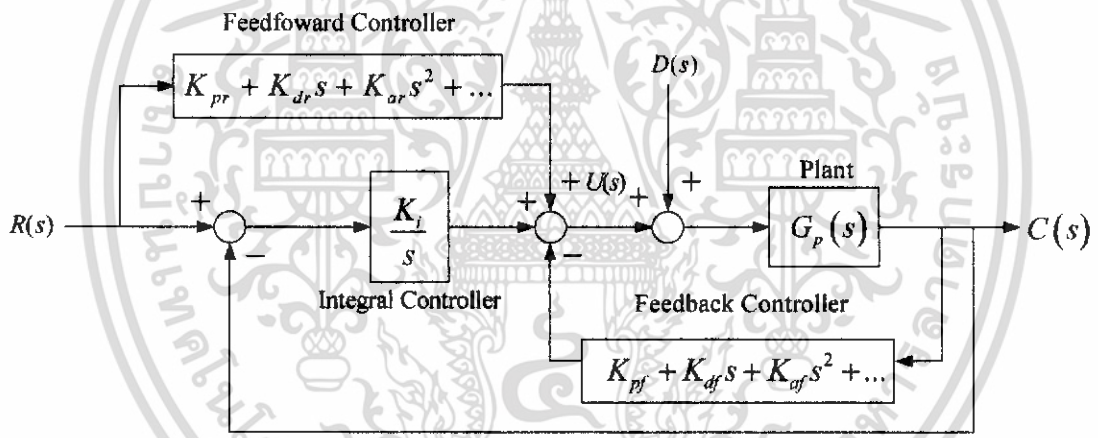
จากรูปที่ 4.4(ก) แสดงให้เห็นว่าถ้าเส้นโค้งของสัมประสิทธิ์ a_i มีความโค้งมากจะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยจะสอดคล้องกับค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ที่มีค่ามาก ในทางกลับกันถ้าเส้นโค้ง a_i มีความโค้งน้อยจะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพน้อยลง โดยสอดคล้องกับค่า γ_i ที่มีค่าน้อย และจากรูปที่ 4.4(ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปลายเส้นโค้ง a_i เบ้ลงไปทางซ้ายมากขึ้นค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีค่าน้อยลงและผลตอบสนองจะเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระโดยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระโดยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ การออกแบบค่าพารามิเตอร์นั้นพิจารณาจากความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนและความเร็วในการตอบสนองของระบบที่เราต้องการควบคุม โดยมีค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* เป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบ ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และจูนนิ่งแฟกเตอร์ (Tuning factor) α เป็นตัวกำหนดความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และ จูนนิ่งแฟกเตอร์ α หาได้จากระบบถ่ายโอนวงปิด และค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้

5.1 โครงสร้างระบบควบคุม

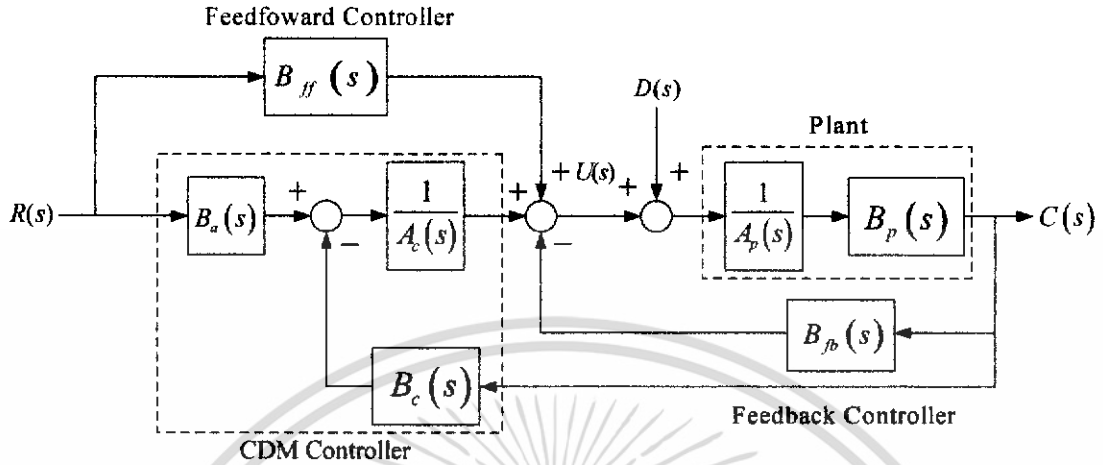


รูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

ในรูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วย พลานต์ ตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า(feedforward controller) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback controller) และตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ให้ได้ค่าที่เหมาะสม จึงต้องจัดตัวควบคุมให้อยู่ในรูปของวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย บล็อกไดอะแกรมมาตรฐานของระบบ SISO รวมกับตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าและตัวควบคุมแบบป้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 5.2 ตัวควบคุมและ พลานต์สามารถแสดงให้อยู่ในรูปสมการพหุนาม โดยที่ $A_p(s)$ และ $B_p(s)$ เป็นสมการพหุนามของพลานต์ $G_p(s), A_c(s), B_c(s)$ และ $B_a(s)$ เป็นสมการพหุนามของตัวควบคุม CDM มาตรฐาน

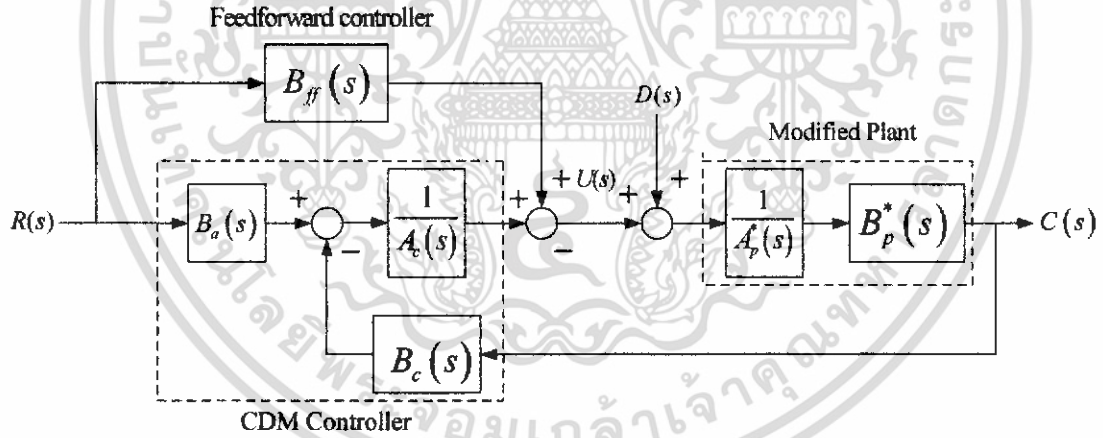
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$B_{ff}(s)$ เป็นสมการพหุนามของตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า $B_{fb}(s)$ เป็นสมการพหุนามแบบป้อนกลับ และ $D(s)$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ



รูปที่ 5.2 ระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระในรูปแบบของ CDM

สมการพหุนามของพลานต์ที่รวม $B_{fb}(s)$ เข้าไว้ด้วยคือ $A_p^*(s)$ และ $B_p^*(s)$ ซึ่งจะเรียกว่าพลานต์ที่ได้รับการปรับปรุง (modified plant) แล้วดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 โครงสร้างที่ปรับปรุงจากรูปที่ 5.2

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.3 จะหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงปิดของเอาท์พุทต่ออินพุทสัญญาณอ้างอิงได้ดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{B_p^*(s)B_a(s) + B_{ff}(s)A_c(s)}{A_c(s)A_p^*(s) + B_c(s)B_p^*(s)} \tag{5.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงปิดของเอาท์พุทต่อสัญญาณรบกวนได้ว่า

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{B_p^*(s)A_c(s)}{A_c(s)A_p^*(s)+B_c(s)B_p^*(s)} \tag{5.2}$$

จากฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ (5.1) และ (5.2) จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า $B_{ff}(s)$ มีอิทธิพลต่อฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงปิดจาก $R(s)$ ถึง $C(s)$ และสามารถใช้ปรับเพิ่มความเร็วของผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบ ขณะที่ตัวควบคุมไม่ส่งผลต่อฟังก์ชั่นถ่ายโอนจาก $D(s)$ ถึง $C(s)$ เพื่อจัดรูปฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงปิดของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระให้อยู่ในเทอมของ γ_i, τ และ α ฟังชั่นถ่ายโอนวงปิดจากสมการที่ (5.1) จะเขียนได้เป็น

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{B(s)}{A(s)}$$

$$= \frac{b_m s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \ldots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n+1}s^{n+1} + \ldots + a_1 s + a_0} \tag{5.3}$$

โดยที่ $m \le n$ และ a, b เป็นค่าคงที่ ส่วนของพหุนาม $A(s)$ คือสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้จาก

$$A(s) = a_0\left[\left\{\sum_{i=2}^{n}\left(\prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{\gamma_{i-j}^{j}}\right)(\tau s)^i\right\} + \tau s + 1\right] \tag{5.4}$$

สมการนี้เหมือนกับสมการที่ (4.11)

โดยทั่วไป CDM จะใช้สำหรับออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ก็สามารถนำมาหาพหุนามตัวเศษ $B(s)$ ได้เช่นกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของพหุนาม $B(s)$ จึงเขียนได้ว่า

$$b_i = b_0(\alpha\tau)^i \frac{1}{\gamma_{i-1}\cdots\gamma_2^{i-2}\gamma_1^{i-1}}$$

$$= b_0(\alpha\tau)^i \prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \tag{5.5}$$

เมื่อ α คือค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ (Tuning factor) ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จึงสามารถปรับความเร็วในการตอบสนองได้ โดยกำหนดให้ค่าของ จูนนิ่งแฟกเตอร์ α มีค่าเป็น $0 < \alpha \le 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ b_i แต่ละตัวลงไปในพหุนามตัวเศษ $B(s)$ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ γ_i, τ และ α ดังนี้

$$B(s) = b_0\left[\left\{\sum_{i=2}^{m}\left(\prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{\gamma_{i-j}^{j}}\right)(\alpha\tau s)^i\right\} + \alpha\tau s + 1\right] \tag{5.6}$$

จากสมการที่ (5.6) จึงสามารถหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระในรูปของ γ_i, τ และ α ได้ดังสมการ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0\left[\left\{\sum_{i=2}^{m}\left(\prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{\gamma_{i-j}^{j}}\right)(\alpha\tau s)^i\right\} + \alpha\tau s + 1\right]}{a_0\left[\left\{\sum_{i=2}^{n}\left(\prod_{j=1}^{i-1}\frac{1}{\gamma_{i-j}^{j}}\right)(\tau s)^i\right\} + \tau s + 1\right]} \tag{5.7}$$

สมการนี้เป็นรูปแบบทั่วไปสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

5.2 วิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระสามารถออกแบบได้โดยวิธีการดังนี้

(1) หาฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงปิดในสมการที่ (5.1) ได้จากสมการพหุนามของพลานต์ที่ปรับปรุงแล้ว ตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และพรีฟิลเตอร์

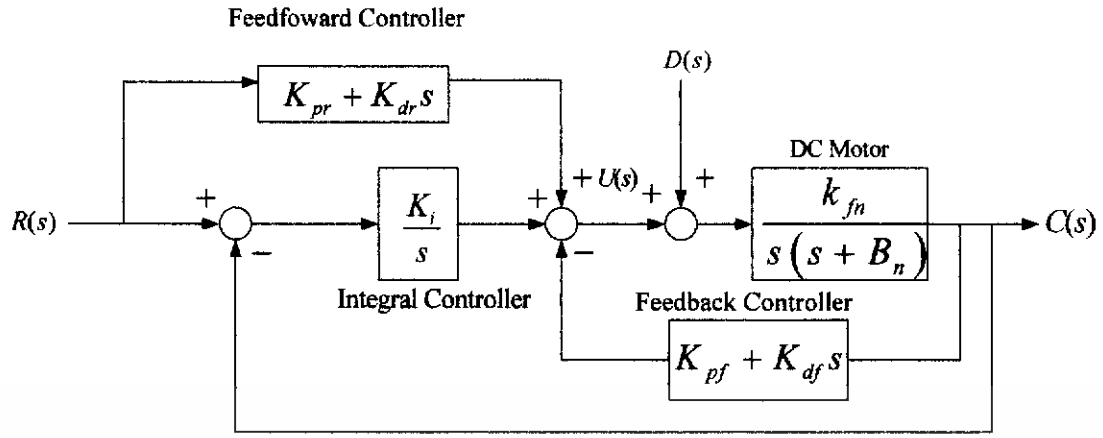
(2) กำหนดค่าช่วงเวลาเข้าที่ t_s เพื่อหาค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จากสมการที่ (4.26) และกำหนดค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i และจูนนิ่งแฟกเตอร์ α จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ในฟังก์ชั่นถ่ายโอนวงปิด

(3) ให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนในสมการที่ (5.1) เท่ากับฟังก์ชั่นถ่ายโอนในสมการที่ (5.7) จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระได้

5.3 การออกแบบระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระสำหรับการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง

จากที่ทำการหาสมการพลวัตของมอเตอร์กระแสตรงที่ประมาณได้เป็นระบบอันดับสอง โครงสร้างของตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าและแบบป้อนกลับในรูปที่ 5.1 มาเป็นการควบคุมแบบพีดีดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยที่ K_{df} และ K_{pf} เป็นอัตราขยายเดริเวทีฟและอัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ K_{dr} และ K_{pr} เป็นอัตราขยายเดริเวทีฟและอัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าตามลำดับและ K_i เป็นอัตราขยายอินทิกรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรงแบบสองขั้นความอิสระ

ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า ตัวควบคุมแบบป้อนกลับและตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ต้องหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนจากพลานต์ที่ได้รับการปรับปรุง

$$G_p^*(s) = \frac{B_p^*(s)}{A_p^*(s)} = \frac{B_p(s)}{A_p + (K_{pf} + K_{df}s)B_p(s)} \tag{5.8}$$

ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

$$G_c(s) = \frac{B_c(s)}{A_c(s)} = \frac{K_i}{s} \tag{5.9}$$

ตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า

$$B_{ff}(s) = K_{dr}(s) + K_{pr} \tag{5.10}$$

และพรีฟิลเตอร์

$$B_a(s) = K_i \tag{5.11}$$

เมื่อ $B_p(s) = k_{fn}$ และ $A_p(s) = s^2 + B_n s$ ดังนั้นฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบของมอเตอร์กระแสตรงที่ควบคุมตำแหน่งโดยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระคือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_{dr}s^2 + K_{pr}s + K_i}{\left(1/k_{fn}\right)s^3 + \left(K_{df} + B_n/k_{fn}\right)s^2 + K_{pf}s + K_i} \tag{5.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการที่ (5.13) เป็นฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระที่อยู่ในรูปของ γ_i, τ และ α

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0\left(\frac{(\alpha\tau)^2}{\gamma_1}s^2 + (\alpha\tau)s + 1\right)}{a_0\left(\frac{\tau^3}{\gamma_1^2\gamma_2}s^3 + \frac{\tau^2}{\gamma_1}s^2 + \tau s + 1\right)} \tag{5.13}$$

ควรให้ b_0 มีค่าเท่ากับ a_0 เพื่อให้อัตราขยายดีซี(DC gain)เป็นหนึ่ง และในการกำหนดค่า γ_i, τ และ α ควรเลือกค่าให้เหมาะสมกับสมรรถนะของระบบที่ต้องการ แล้วนำไปแทนในสมการที่ (5.13) จากหลักการของ CDM กล่าวไว้ว่าความเร็วในการตอบสนองและเสถียรภาพของระบบสามารถกำหนดได้จากค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ตามลำดับ ในทางปฏิบัติเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i เพิ่มขึ้น เสถียรภาพของระบบจะแปรผันตามค่าพารามิเตอร์ แต่ในขณะเดียวกันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ส่งผลต่อรูปร่างของการตอบสนอง โดยเฉพาะการลดความเร็วของการตอบสนอง จึงมีจูนนิ่งแฟกเตอร์ α เข้ามาเป็นตัวปรับเพิ่มความเร็วในการตอบสนอง

เมื่อให้สมการที่ (5.12) เท่ากับสมการที่ (5.13) จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระได้ จากนั้นนำวิธีการที่กล่าวมาในข้างต้นมาใช้กับมอเตอร์กระแสตรงที่มีฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังสมการที่ (2.11) ซึ่งได้จากการทดลองในบทที่ 2

$$G_p(s) = \frac{1115.554}{s(s + 25.641)} \tag{2.11}$$

เมื่อนำระบบวงเปิดสมการที่ (2.11) รวมเข้ากับตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระดังโครงสร้างในบทที่ 3 รูปที่ 3.10 นั้นจะได้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงโดยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระดังสมการที่ (3.11)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1115.554\left(K_{dr}s^2 + K_{pr}s + K_i\right)}{s^3 + \left(25.641 + 1115.554K_{df}\right)s^2 + 1115.554K_{pf}s + 1115.554K_i} \tag{3.11}$$

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จึงต้องปรับสมการที่ (3.11) ให้สอดคล้องกับรูปแบบทั่วไปของ CDM โดยปรับให้สมการ (3.11) อยู่ในรูปของสมการที่ (5.12) จะได้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบของมอเตอร์กระแสตรงที่ควบคุมตำแหน่งโดยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระดังสมการที่ (5.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_{dr}s^2 + K_{pr}s + K_i}{0.000896s^3 + \left(0.022985 + K_{df}\right)s^2 + K_{pf}s + K_i} \tag{5.14}$$

จากนั้นจึงออกแบบรูปแบบทั่วไปของ CDM ในสมการที่ (5.13) โดยเลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1, γ_2 ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าขูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่เหมาะสมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ $K_{df}, K_{pf}, K_i, K_{pr}$ และ K_{dr} ซึ่งขั้นตอนในการเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระจะหาได้โดยการจำลองและการทดลองดังจะแสดงในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ผลการจำลองและผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งสมรรถนะที่สำคัญคือความสามารถในการติดตามสัญญาณอ้างอิงและการกำจัดสัญญาณรบกวน โดยในขั้นแรกนั้นเป็นการจำลองผลตอบสนองในโปรแกรม MATLAB เพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จากนั้นจึงนำค่าเหล่านี้ไปทดลองกับระบบจริง เพื่อทดสอบความสามารถของระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

6.1 ผลการจำลอง

เพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ การเลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และ ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ (Tuning factor) α ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญเนื่องจากค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบ ในการจำลองต่อไปนี้เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติการติดตามสัญญาณอ้างอิงและการกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบที่ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ต่าง ๆ กันโดยผู้ออกแบบระบบเป็นผู้เลือกค่าช่วงเวลาเข้าที่เพื่อกำหนดค่าคงที่เวลาสมมูล τ

ในขั้นแรกทำการจำลองผลตอบสนองเพื่อเลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i โดยไม่พิจารณาส่วนป้อนไปหน้า ให้ได้ผลตอบสนองชั่วครู่และการกำจัดสัญญาณรบกวนเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นจึงปรับค่าพารามิเตอร์ที่ส่วนป้อนไปหน้าเพื่อลดช่วงเวลาไต่ขึ้นโดยการเลือกค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α

6.1.1 ผลตอบสนองเมื่อแปรผันค่าครรชนีเสถียรภาพ

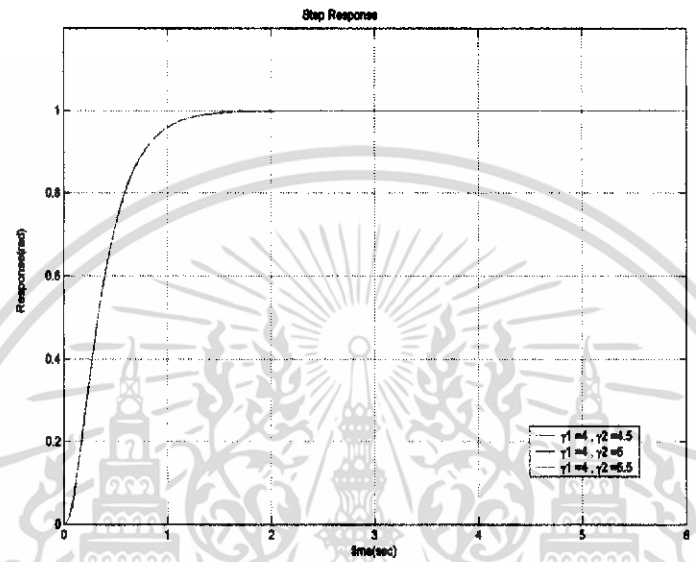
การแปรผันค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i โดยไม่พิจารณาส่วนป้อนไปหน้า $(\alpha = 0)$ เป็นการศึกษาผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงและความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน ในการจำลองผู้ออกแบบเลือกค่าช่วงเวลาเข้าที่ t_s เท่ากับ 1 วินาที ซึ่งให้ค่าคงที่เวลาสมมูล τ มีค่าเท่ากับ 0.4

เมื่อให้ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_1 คงที่ และแปรผันค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_2 ค่าพารามิเตอร์ K_{df}, K_{pf} และ K_i มีค่าต่างๆ กันดังตารางที่ 6.1 รวมทั้งให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 6.1(ก) และรูปที่ 6.1(ข) ตามลำดับ จากนั้นให้ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_2 คงที่และแปรผันค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_1 ซึ่งให้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 6.2 และให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 6.2(ก) และรูปที่ 6.2(ข) ตามลำดับ

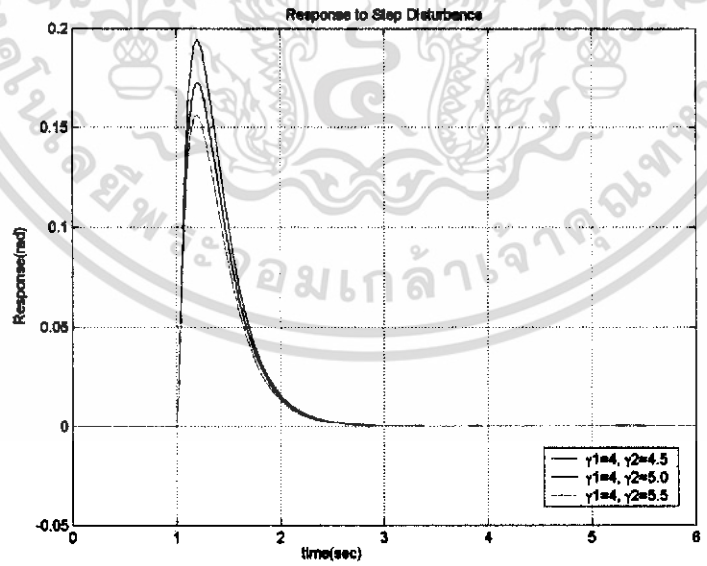
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 การแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_2

ระบบ	α	τ	γ_1	γ_2	K_{df}	K_{pf}	K_i
1	0	0.4	4.0	4.5	0.01735	0.40339	1.00847
2	0	0.4	4.0	5.0	0.02184	0.44821	1.12052
3	0	0.4	4.0	5.5	0.02632	0.49303	1.23257



(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง



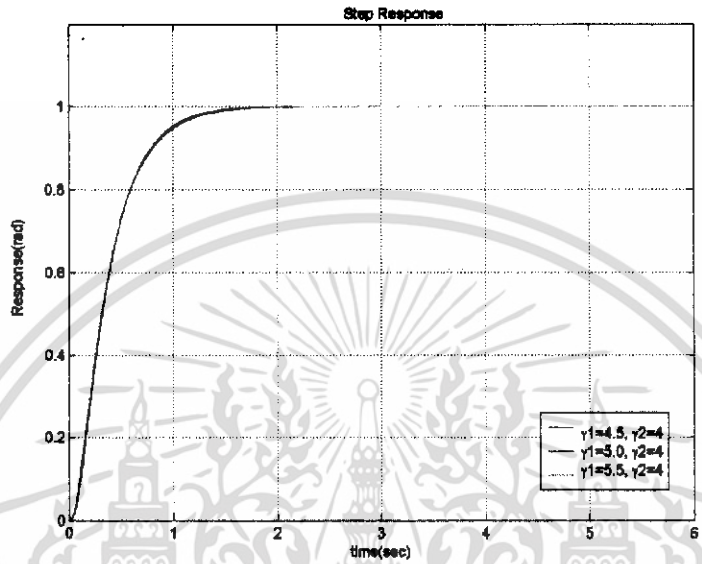
(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวน

รูปที่ 6.1 ผลตอบสนองเมื่อแปรผันค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_2

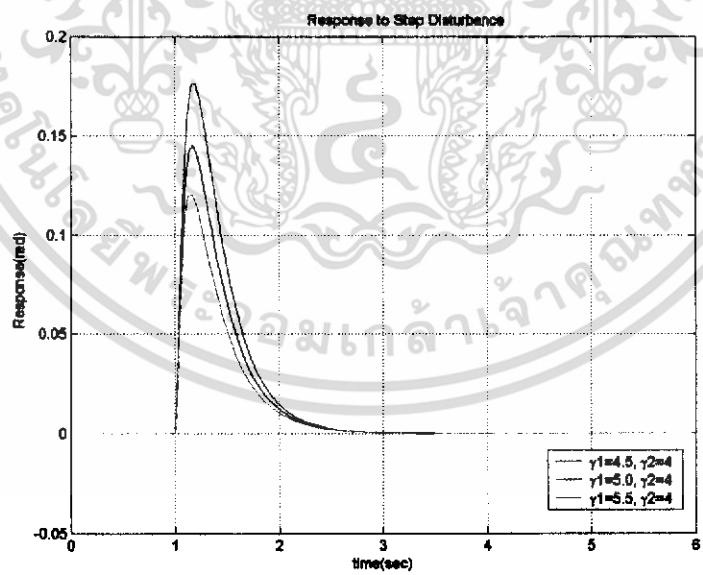
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 การแปรผันค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_1

ระบบ	α	τ	γ_1	γ_2	K_{df}	K_{pf}	K_i
4	0	0.4	4.5	4.0	0.01735	0.45381	1.13453
5	0	0.4	5.0	4.0	0.02183	0.56026	1.40065
6	0	0.4	5.5	4.0	0.02631	0.67791	1.69479



(ก) ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง



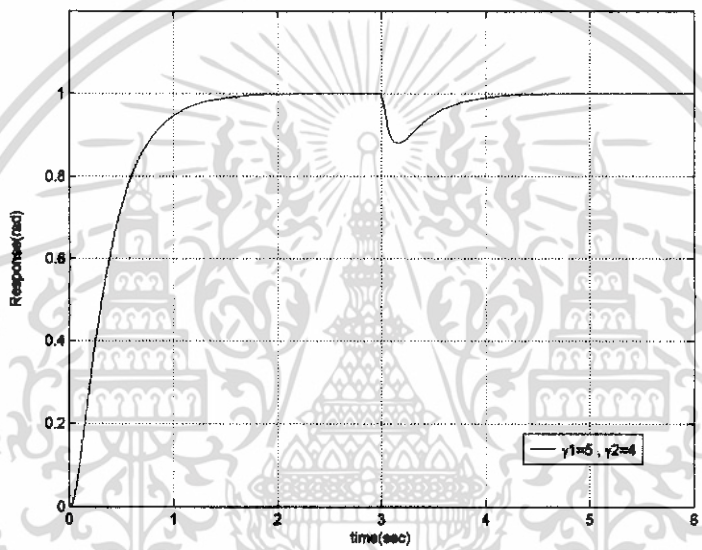
(ข) การกำจัดสัญญาณรบกวน

รูปที่ 6.2 ผลตอบสนองเมื่อแปรผันค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 6.1 และ 6.2 จะเห็นว่าเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพมากขึ้นผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ แต่ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนดีขึ้น โดยที่การแปรผันค่า γ_1 มีผลต่อคุณสมบัติของระบบมากกว่าการแปรผันค่า γ_2 เนื่องจากในสภาวะจริงอาจมีการสัญญาณรบกวนมากจึงควรเลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพที่มีค่าสูง ผู้ออกแบบจึงเลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เท่ากับ 5 และค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_2 เท่ากับ 4 ซึ่งให้ค่าพารามิเตอร์ K_{df} มีค่าเท่ากับ 0.02183 K_{pf} เท่ากับ 0.56026 และ K_i เท่ากับ 1.40065

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจำลองทดสอบความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบขณะที่ระบบอยู่ที่จุดอ้างอิงได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 6.3

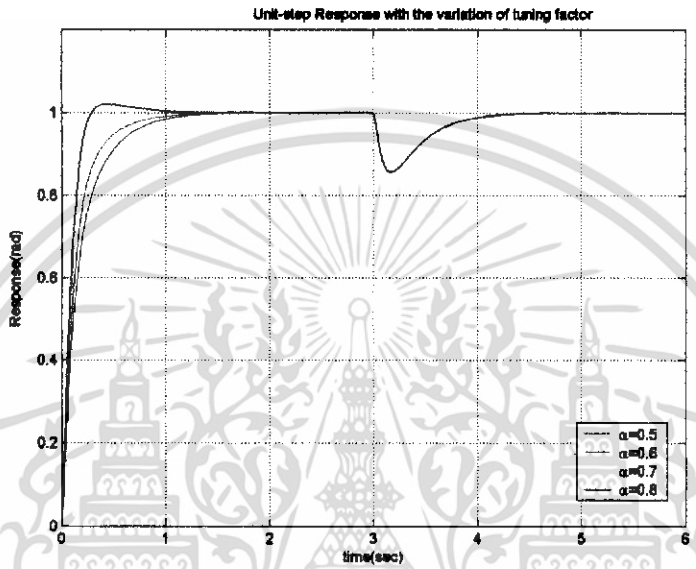


รูปที่ 6.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อมีสัญญาณรบกวน ณ เวลา 3 วินาที ที่ค่าดรรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 5$ และ $\gamma_2 = 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 ผลตอบสนองเมื่อแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์

ในหัวข้อที่ผ่านมาระบบมีผลตอบสนองชั่วครู่และการกำจัดสัญญาณรบกวนเป็นที่น่าพอใจโดยไม่มีการพิจารณาส่วนป้อนไปหน้า $(\alpha = 0)$ ซึ่งระบบยังมีช่วงเวลาไต่ขึ้นมาก จึงทำการจำลองลดช่วงเวลาไต่ขึ้นโดยแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ได้รูปผลตอบสนองเมื่อใส่ส่วนป้อนไปหน้าให้กับระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 6.4 จึงสามารถเลือกค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่เหมาะสมได้

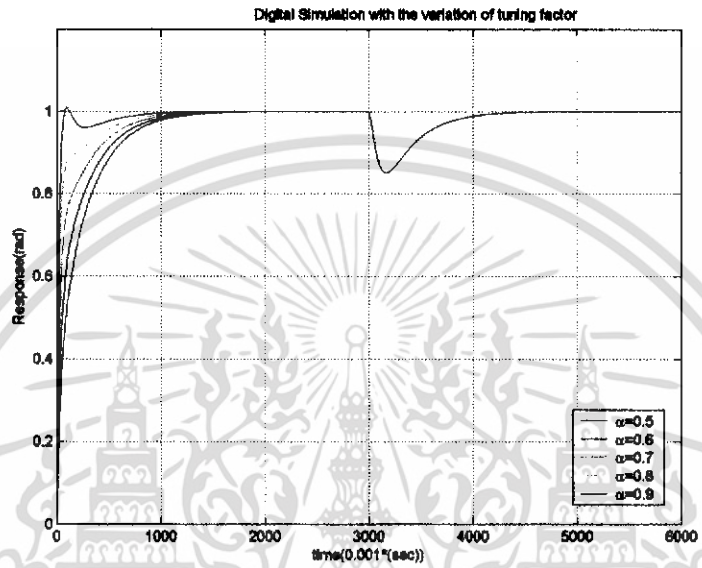


รูปที่ 6.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อทำการแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α

เป็นที่ทราบกันดีว่าความเร็วในการตอบสนองสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มซีโร่ให้กับระบบโดยการเพิ่มส่วนป้อนไปหน้า ซึ่งสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของส่วนป้อนไปหน้าที่เพิ่มเข้าในระบบสองขั้นความอิสระได้โดยการแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α และตามปกติแล้วค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ที่มากขึ้นจะทำให้การตอบสนองของระบบเร็วขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามการตอบสนองที่รวดเร็วจะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่เหมาะสมควรเป็นค่าที่ทำให้ระบบมีการตอบสนองที่รวดเร็วโดยไม่มีค่าพุ่งเกิน และค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α นี้จะส่งผลต่อความเร็วในการตอบสนองเท่านั้นแต่จะไม่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน ในการศึกษาเปรียบเทียบจึงทดสอบผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองระบบในช่วงเวลาต่อเนื่อง ดังรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่ทำให้ระบบมีการตอบสนองเร็วที่สุดโดยไม่มีค่าพุ่งเกินคือ 0.7 และจากการจำลองระบบในช่วง เวลาไม่ต่อเนื่องเพื่อให้เหมือนกับการทดลองระบบจริงได้ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่ทำให้ระบบมีการตอบสนองเร็วที่สุดโดยไม่มีค่าพุ่งเกินคือ 0.7 เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 6.5 และมีค่า K_{pr} เท่ากับ 0.39228 และค่า K_{dr} เท่ากับ 0.021968



รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง เมื่อทำการแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ผลการทดลอง

ในการทดลองกับระบบจริงโดยควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ เพื่อทดสอบความสามารถของระบบ ซึ่งมีค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เท่ากับ 5 ค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_2 เท่ากับ 4 และค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α เท่ากับ 0.7 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ $K_{df}, K_{pf}, K_{pr}, K_{dr}$ และ K_i ได้เท่ากับ 0.02183, 0.56026, 0.39228, 0.021968 และ 1.40065 ตามลำดับ โดยระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระนี้ดำเนินการโดยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลซึ่งโปรแกรมโดยใช้ภาษาซี และมีค่าช่วงเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) 0.001 วินาที

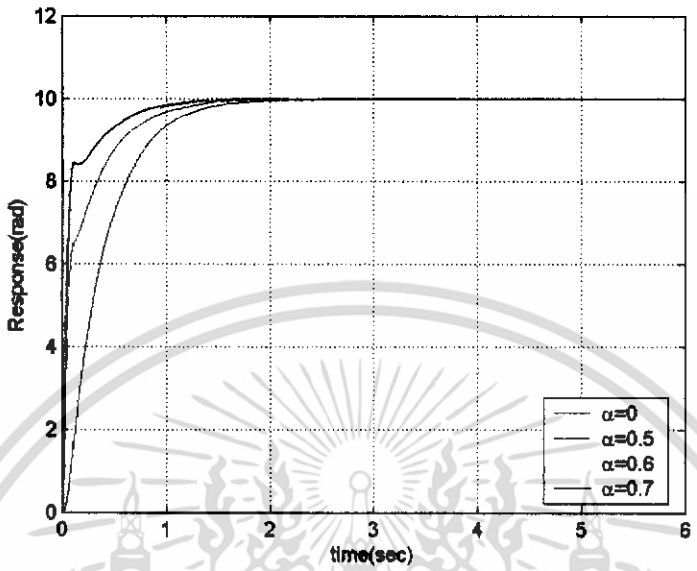
6.2.1 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง

จากรูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าระบบที่ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α เท่ากับ 0.7 มีผลตอบสนองไม่เรียบ เมื่อการทดลองกับระบบจริงจึงเลือกค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α เท่ากับ 0.6 ซึ่งให้ผลตอบสนองค่อนข้างดีและมีเวลาไต่ขึ้นน้อย รวมทั้งการเปลี่ยนค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ยังไม่ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนอีกด้วย รายละเอียดของผลตอบสนองดังแสดงในตารางที่ 6.3 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อ α มีค่าเป็นศูนย์หรือขณะที่ระบบเป็นระบบควบคุมแบบไอพีดี มีเวลาไต่ขึ้นมากกว่าเมื่อระบบมีส่วนป้อนไปหน้าหรือขณะที่ระบบเป็นระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ

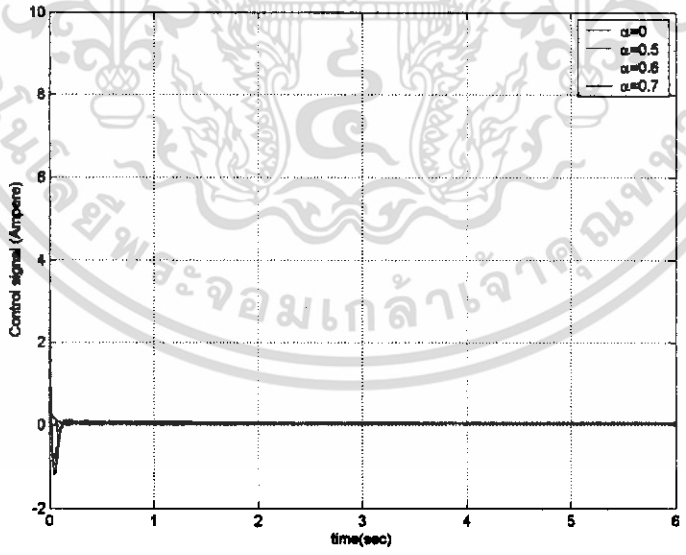
ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบ

α	t_r(sec)	P_o(%)	t_s(sec)
0	0.764	0	1.441
0.5	0.573	0	1.235
0.6	0.426	0	1.103
0.7	0.294	0	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง

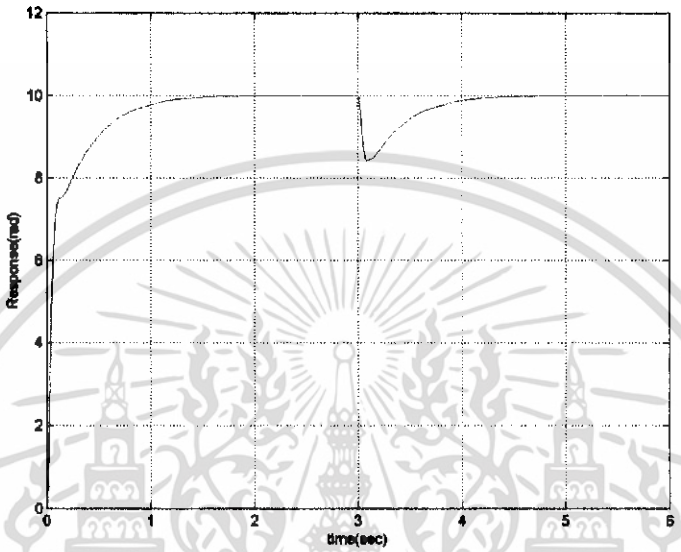


รูปที่ 6.7 สัญญาณควบคุม

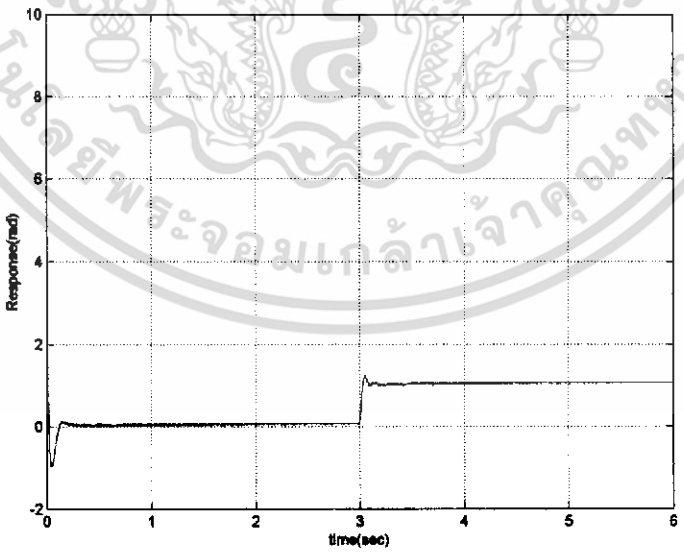
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 การกำจัดสัญญาณรบกวนคงที่

ขณะที่มอเตอร์คงตำแหน่งอยู่ที่ 10 เรเดียน ณ 3 วินาที ป้อนสัญญาณรบกวนให้กับระบบ ดังแสดงในรูปที่ 6.8 และสัญญาณควบคุมในรูปที่ 6.9 จะเห็นว่าผลตอบสนองมีลักษณะใกล้เคียงกับผลตอบสนองจากการจำลอง



รูปที่ 6.8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อมีสัญญาณรบกวน ณ เวลา 3 วินาที



รูปที่ 6.9 สัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
บทสรุป

ในงานปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการประยุกต์ตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ตัวควบคุมแบบสองขั้นความอิสระได้รับการพัฒนาจากตัวควบคุมแบบไอพีดีโดยเพิ่มส่วนป้อนไปหน้าเข้าไป เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถปรับคุณสมบัติได้ทั้งการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงที่รวดเร็วและการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดี

เนื่องจากเลือกใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ในการออกแบบพารามิเตอร์ จึงต้องทราบสมการพลวัตแบบเชิงเส้นของมอเตอร์กระแสตรงโดยหาได้จากการทดลองระบบวงเปิด ซึ่งผลตอบสนองจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงได้ จากนั้นจึงปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมโดยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ โดยการเลือกค่าตรรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าจูนนิ่งแฟคเตอร์ α ที่เหมาะสม การปรับความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนนั้นทำได้จากการเลือกค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 และ γ_2 ซึ่งค่าดรรชนีเสถียรภาพที่มากขึ้นส่งผลให้การกำจัดสัญญาณรบกวนดีขึ้นแต่จะส่งผลให้ช่วงเวลาเข้าที่ช้าลงด้วย ในขณะที่การปรับความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงทำได้จากการกำหนดช่วงเวลาเข้าที่ t_s เพื่อหาค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และการเลือกค่าจูนนิ่งแฟคเตอร์ α ที่เหมาะสมโดยค่าจูนนิ่งแฟคเตอร์ α ที่มากขึ้นให้ผลตอบสนองที่เร็วขึ้นแต่ผลตอบสนองที่เร็วมากทำให้เกิดค่าพุ่งเกิน(overshoot) ได้ ซึ่งค่าจูนนิ่งแฟคเตอร์ α นี้จะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ในส่วนป้อนไปหน้าเพียงส่วนเดียวจึงทำให้สามารถปรับคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงอย่างอิสระจากการปรับความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน

จากผลการจำลองและจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดี แต่ผลจากการทดลองและผลจากการจำลองอาจต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากระบบจริงเป็นแบบไม่เชิงเส้นในขณะที่ระบบในการจำลองเป็นแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการจำลองมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Don Isarakorn.**"Position Control of Ultrasonic Linear Motor Using PDFF Controller Designed by CDM."** Master of Control Engineering Thesis of School of Graduate Studies, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.2003.

[2] Don Isarakorn., Natapong Sukrasariwattanagul., Taworn Benjanarasuth., Jongkol Ngamwiwit, Noriyuki Komine. "Two-Degree-of-Freedom Controller Designed by CDM." ICCAS 2004

[3] Dal Y. Ohm. "PID and PDFF Compensators for Motion Control" , Drivetech, Inc., Blackburg, Virginia

[4] Katsuhiko Ogata.**Modern Control Engineering**.4th ED. New Jersey : Prentice-Hall,Inc.2002.

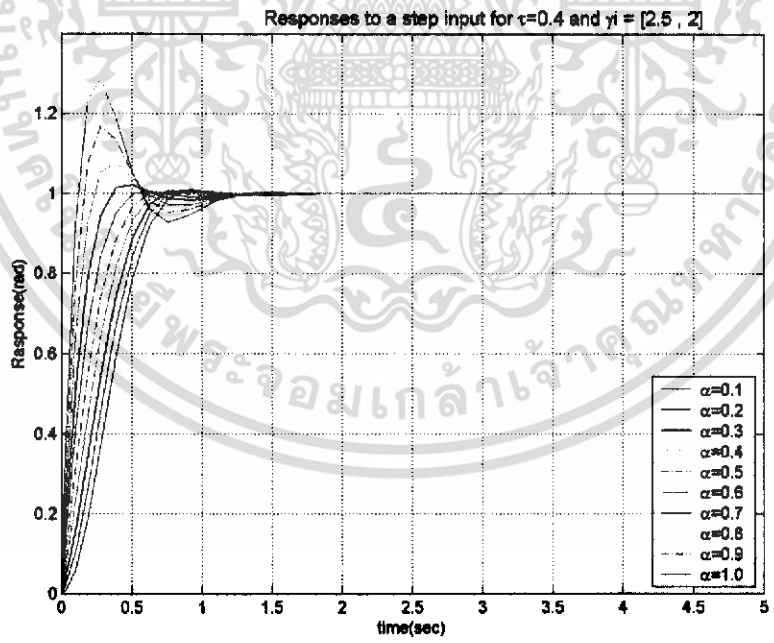
[5] Shunji Manabe. "Importance of Coefficient Diagram in Polynomial Method" **The 42nd IEEE Conference on Decision and Control**. Maui, Hawaii USA.2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลกระทบของค่าจูนนิ่งแฟคเตอร์ α

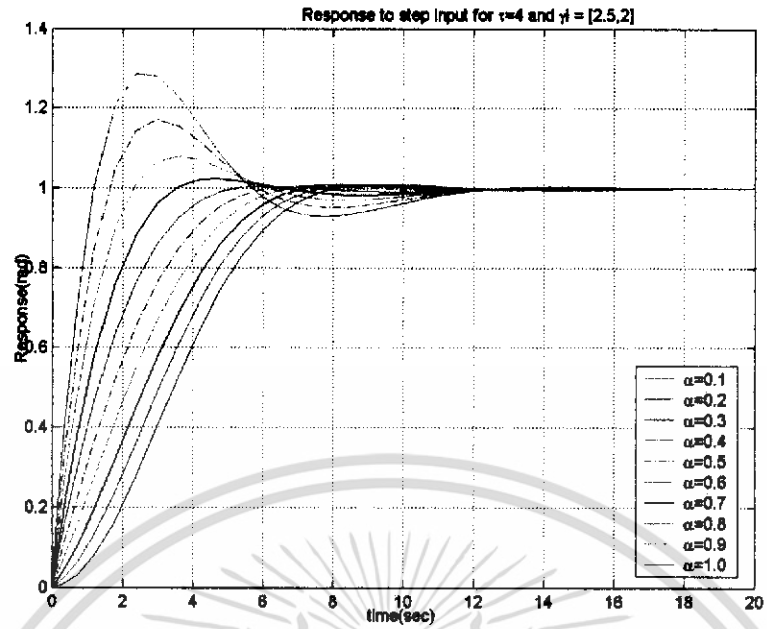
ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความเร็วในการตอบสนองซึ่งค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่มากขึ้นส่งผลให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลตอบสนองที่รวดเร็วอาจก่อให้เกิดค่าพุ่งเกินได้ ดังนั้นการศึกษาถึงผลกระทบของค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ต่อความเร็วในการตอบสนองจึงมีความสำคัญ เพื่อการเลือกค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่เหมาะสมที่ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วโดยปราศจากค่าพุ่งเกิน ซึ่งศึกษาได้จากการจำลองผล

ในการจำลองผลกระทบของค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ต่อความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมแบบสองขั้นความอิสระ โดยแปรผันค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ในขณะที่ค่าดรรชนีเสถียรภาพเท่ากับค่าดรรชนีเสถียรภาพมาตรฐานและค่าดรรชนีเสถียรภาพที่มากขึ้น แสดงในรูปที่ ก.1 ถึง ก.4 โดยผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพเท่ากับค่าดรรชนีเสถียรภาพมาตรฐาน ($\gamma_1 = 2.5$ และ $\gamma_2 = 2$) และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าเป็น 0.4 แสดงในรูปที่ ก.1 และเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าเป็น 4 แสดงในรูปที่ ก.2



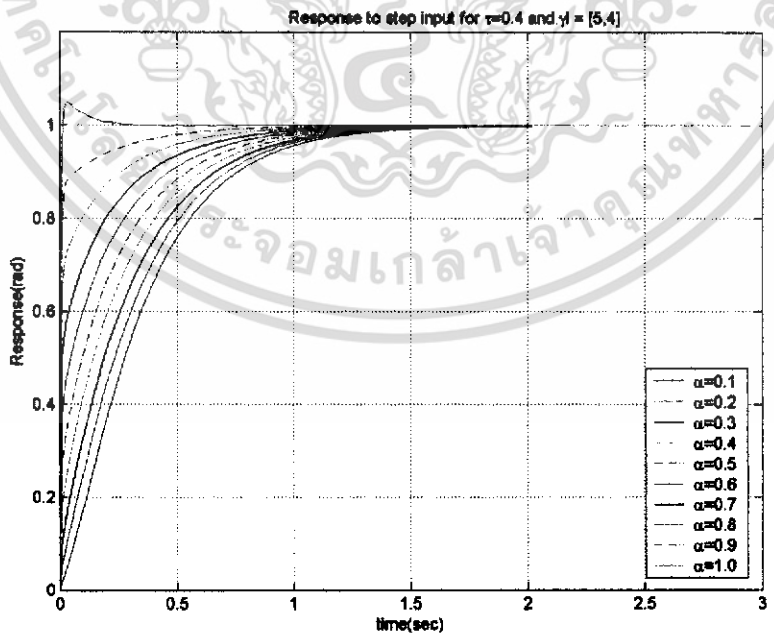
รูปที่ ก.1 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2$ และ $\tau = 0.4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



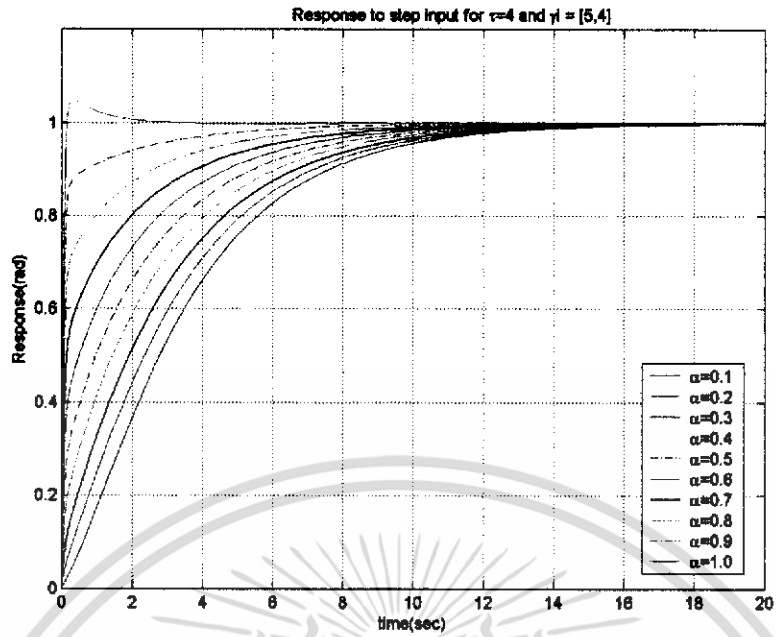
รูปที่ ก.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2$ และ $\tau = 4$

ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพมีค่ามากขึ้น($\gamma_1 = 5$ และ $\gamma_2 = 4$) และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าเป็น 0.4 แสดงในรูปที่ ก.3 และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าเป็น 4 แสดงในรูปที่ ก.4 เมื่อให้ $\gamma_1 = 7.5$ และ $\gamma_2 = 6$ ที่ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าเป็น 4 มีผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ ก.5

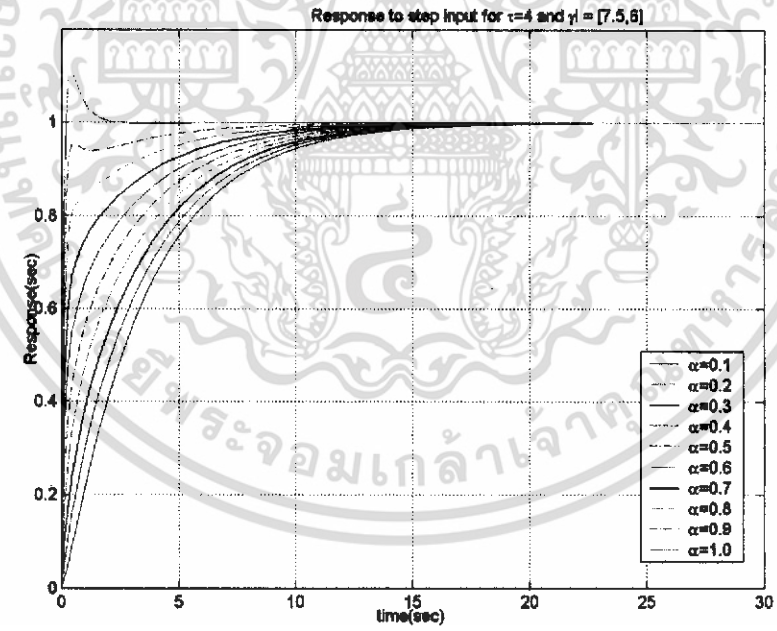


รูปที่ ก.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 5$, $\gamma_2 = 4$ และ $\tau = 0.4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 5$, $\gamma_2 = 4$ และ $\tau = 4$



รูปที่ ก.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $\gamma_1 = 7.5$, $\gamma_2 = 6$ และ $\tau = 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.1 และ ก.2 จะเห็นว่าผลตอบสนองที่รวดเร็วที่สุดโดยปราศจากค่าพุ่งเกินอยู่ที่ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α มีค่าเท่ากับ 0.6 แม้ว่าค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม เมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพมากขึ้น ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.8 ถึง 0.9 ดังแสดงในรูปที่ ก.3 ถึงรูปที่ ก.5 และที่ค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α สูง ๆ อาจให้ผลตอบสนองที่ไม่เรียบได้ ดังนั้นค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ควรมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.6 ถึง 0.8

ในการออกแบบจริง ค่าดรรชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมคือค่าดรรชนีเสถียรภาพมาตรฐาน ดังนั้นในขั้นแรกค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α ที่เลือกใช้ควรมีค่าเท่ากับ 0.6 แต่ผู้ออกแบบสามารถเลือกค่าจูนนิ่งแฟกเตอร์ α สูงกว่านี้ได้หากค่าดรรชนีเสถียรภาพมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการทดลอง

```
#include     <stdio.h>    // for enoder
#include     <bios.h>     // for enoder
#include     <conio.h>    // for enoder

#include     <stdlib.h>   // for D to A
#include     <string.h>   // for D to A
#include     <time.h>     // for D to A
#include     <dos.h>      // for D to A
#include     <process.h>  // for D to A
#include     <math.h>     // for D to A

#include     "DA.H"       // for D to A
#include     "GETBAR.H"   // for enoder

void interrupt (*oldIrq3)(void);
void interrupt countToggle(void);

#define drive_port 0x378              //  Number of drive port
#define file_out "c:\\data.m"         //  open file (name is final.m)

#define      cls(l);          { short i; for(i=l; i<25; i++) lineclr(i); }     // for D to A
#define      Locate(x,y)      printf("\x1b[%d;%dH", (y)+1, (x)+1)              // for D to A
#define      lineclr(l)       printf("\x1b[s\x1b[%d;1H\x1b[0K\x1b[u", l+1)
                                                                              // for D to A
#define      range            DA_10V                                          // for D to A

#define IRQ3  0x0B   /* IRQ3 address */

PCI_CONFIG PciData;                   // for enoder

DASMPLCHREQ SmplChReq[2];    // for D to A
DABOARDSPEC BoardSpec;       // for D to A
HANDLE      OpenBoard(void); // for D to A
void INITIAL_DTOA(void);     // for D to A
void CLOSE_DTOA(void);       // for D to A


    int   hexout = 2047;
    float  volt = 0.0;
    WORD  DaData[1];
    int swith = 1;
    int key = 0;
    long count = 0;
    float time_r = 0.0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    HANDLE hDevice;

    //float f_hat = 0.0;
    //float fs2 = 0.13 ;
    //float fc2 = 0.097 ;
    //float fs1 = 0.19 ;
    //float fc1 = 0.136 ;

    float f_hat = 0.0;
    float fs2 = 0.19 ;
    float fc2 = 0.13 ;
    float fs1 = 0.19 ;
    float fc1 = 0.13 ;

// parameter of encoder ----------------------------------------------------
    int adr0,adr1,bus_info = 0.0;
    int lByte = 0.0;
    int mByte = 0.0;
    int hByte = 0.0;

    long dwCounter2 = 0.0;

    int direction_1 = 0.0;
    int direction_2 = 0.0;

// parameter of controler --------------------------------------------------
    float distane = 0.00;
    float step_time = 0.001;
    float setpoint = 0.00;
    float eer = 0.00;
    float eer_old = 0.00;
    float x = 0.00;
    float x_old = 0.00;
    float x_dot = 0.00;
    float th_1_old = 0.00;
    float th_2_old = 0.00;
    float th_1 = 0.00;
    float th_2 = 0.00;
    float th_1_dot = 0.00;
    float th_2_dot = 0.00;
    float ui_old = 0.00;
    float ui = 0.00;
    float u = 0.00;

    float th_1_dot_old = 0.00;
    int nnn = 0.0;

    int nn = 0.0;
    float kk = 0.38;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    float kpr = 0.42;
    float kdr = 0.042;
    float ki = 1.401;
    float kdf = 0.022;
    float kpf = 0.56;

    float r1 = 0.0;

    float r = 3.141;

    float c1 = 0.0;
    float c = 0.0;
    float e1 = 0.0;
    float e = 0.0;
    float it1 = 0.0;
    float it = 0.0;

    float r_dot = 0.0;
    float c_dot = 0.0;

    float c2 = 0.0;
    float r2 = 0.0;
    float u2 = 0.0;
    float u1 = 0.0;


//---------------------------------------------------------------------------
// Function     void  main()
//---------------------------------------------------------------------------

int main(void){

//  open file ------------------------------------------------------------
    FILE *data_fout;
    clrscr();
    data_fout = fopen(file_out,"wt+");
    fprintf(data_fout,"sm = [\n");
// ---------------------------------------------------------------------------
// Initial value of Digital to Analog PCI Card (PCI-3345A)----------------------
                INITIAL_DTOA();
                hDevice = OpenBoard();
        DaGetDeviceInfo(hDevice, &BoardSpec);
                SmplChReq[0].ulChNo = 1;
                SmplChReq[0].ulRange = range;
//---------------------------------------------------------------------------

// Initial Encoder PCI Card (PCI-6201E)-----------------------------------------
                PciGetConfigRegEx(1, 0x1147, 6201, 0x1147, 0x0011,&bus_info,
&PciData);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        adr0=PciData.BaseAddresses[0]&0xfffc;
        adr1=PciData.BaseAddresses[1]&0xfffc;
    outp(adr0+0x08,0x06);   // time of encoder 1
    outp(adr0+0x09,0x06);   // time of encoder 2
    outp(adr0+0x0A,0x06);    // time of encoder 3
    outp(adr0+0x0d,0x01);   // reset counter
//-------------------------------------------------------------------------

// -------------------------------------------------------------------------
// ------------------------- START PROGRAM ---------------------------------
// -------------------------------------------------------------------------


 while( !kbhit())
  {

// in data of encoder_2 (th_1) ---------------------------------------------
                outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x01);
    mByte=inp(adr0+0x01);
    hByte=inp(adr0+0x01);
    dwCounter2= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
//--------------------------------------------------------------------------
// Modofly data of encoder_2 (th_1) ----------------------------------------

                th_1 = dwCounter2*0.09 ;  // 1 puls is 0.09 degre

//--------------------------------------------------------------------------
 printf(" angle : %06lX ", dwCounter2);
 printf(" th_1 : %3.4lf \n", th_1*0.0175);


 }

 c1 = th_1*0.0175;

 oldIrq3 = getvect(IRQ3);    /* save the old interrupt vector */
 setvect(IRQ3, countToggle); /* install the new interrupt handler */
 outportb(0x21, ( inportb(0x21) & 0xF7 ) ); /* Unmask (Enable) IRQ3 */
 label:
 while( key == 1 )
        {

// Modofly data of encoder_2 (th_1) ----------------------------------------


        th_1 = dwCounter2*0.09 ;  // 1 puls is 0.09 degree
        c = th_1*0.0175;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//-------------------------------------------------------------------------
// Controler ------------------------------------------------------------
//-------------------------------------------------------------------------

                e = r - c;
    r_dot = (r - r1)/step_time;
    c_dot = (c - c1)/step_time;
    it = it1 + (e1+e)*step_time*(0.5);

    u = (kdr*r_dot)+(r*kpr)+(ki*it)-(kdf*c_dot)-(c*kpf);

//    volt = u + nnn;

                volt = u;

    r1 = r;
    c1 = c;
    e1 = e;
   it1 = it;
//-------------------------------------------------------------------------

// modifly volt output ---------------------------------------------------

    if (volt > 10)
        volt = 10;
    if (volt < -10)
        volt = -10;

// out data (volt) -------------------------------------------------------

    hexout=((volt+10)/20)*4095;
            DaData[0] = hexout;
    DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
//-------------------------------------------------------------------------


// keep data (time_r , distane , th_1 , th_2) in H/D ---------------------
    fprintf(data_fout,"%4.4f %4.4f %4.4f %4.4f \n",time_r,c_dot,volt,c);
    time_r = time_r + step_time ;

    if (time_r > 3)
        nnn = 0.5+0.072;

//-------------------------------------------------------------------------
// set key off ----------------------------------------------------------
   key = 0;
   count = 0;
//-------------------------------------------------------------------------
        }
//-------------------------------------------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  if ( count <= 0xffffff)
  {
        count = count + 1;
        goto label;
  }
  else
  {
   setvect(IRQ3, oldIrq3);
   outportb(0x21, (inportb(0x21) | 0x08) );          // disable IRQ3

   fprintf(data_fout,"];\n");                        // end of file with "]"

   outp(drive_port,0);
        DaClose(hDevice);
   CLOSE_DTOA();
  }

//---------------------------------------------------------------------

  return(0);
}


//---------------------------------------------------------------------
// this ISR should execute each time IRQ3 goes high ------------------------
//---------------------------------------------------------------------
void interrupt countToggle(void)
{
  disable();

// in data of encoder_2 (th_1) ---------------------------------------------
                outp(adr0+0x0c,0xAA);
     lByte=inp(adr0+0x01);
     mByte=inp(adr0+0x01);
     hByte=inp(adr0+0x01);
     dwCounter2= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
//---------------------------------------------------------------------

        key = 1;

  outportb(0x20, 0x20);       // send EOI signal
  enable();
}
//---------------------------------------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

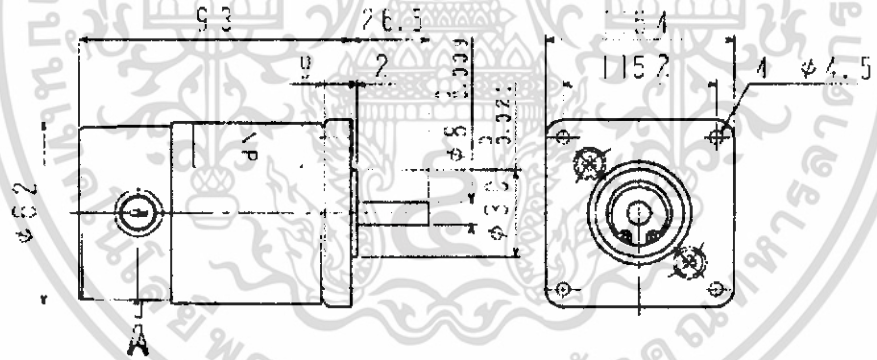
```
//------------------------------------------------------------------------ //
// Function      for D to A                                                //
//------------------------------------------------------------------------ //
                                                                          //
HANDLE OpenBoard(void)                                                    //
        {                                                                 //
        HANDLE                  hDevice;                                  //
        hDevice = DaOpen(3345, 0x0001, 0);                                //
        return hDevice;                                                   //
        }                                                                 //
//------------------------------------------------------------------------ //
void CLOSE_DTOA(void)                                                     //
        {                                                                 //
        char *pString;                                                    //
        pString = "/R";                                                   //
        spawnl(P_WAIT,"dadrvi.exe",pString,NULL);                         //
        }                                                                 //
//------------------------------------------------------------------------ //
void INITIAL_DTOA(void)                                                   //
        {                                                                 //
        char *pString;                                                    //
        pString = "/B=1";                                                 //
        spawnl(P_WAIT,"dadrvi.exe",pString,NULL);                         //
        }                                                                 //
//------------------------------------------------------------------------ //
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ข้อมูลของมอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในทำวิจัยเป็นมอเตอร์กระแสตรงรุ่น SS40E2-E จากบริษัท Sawamura Denki Kogyo ดังรูปที่ ค.1 โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ ค.2 และมีข้อมูลของมอเตอร์กระแสตรงดังตาราง ค.1

รูปที่ ค.1 มอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ ค.2 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรง

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลของตารางข้อมูล

Continuous rating				No load		Armature R	R inertia GD² kg·cm² (kgf·cm²)	(tm) ms	(Ke) V/k'pm	(Kt) N·m/A	Brush L mm
Voltage DC-V	Current A	Speed rpm	Torque N·m (kgf·cm)	Current A	Speed rpm						
12	3.2	2500	0.078 (0.8)	0.5	3200	1.1	0.4 (1.6)	30	3.75	0.036	10
24	1.5	2500	0.078 (0.8)	0.2	3200	4.3	0.4 (1.6)	30	7.5	0.072	
100	0.35	2500	0.078 (0.8)	0.05	3200	70	0.4 (1.6)	30	31.3	0.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้