

การออกแบบระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมแบบคงทน
เอชอินฟินิตี้กำหนดโครงสร้างได้บนพื้นฐานของเทคนิคฟัซซีสำหรับ
มอเตอร์กระแสตรง

NONLINEAR CONTROL WITH FIXED-STRUCTURE H_∞ CONTROLLERS
BASED ON FUZZY TECHNIQUE FOR DC MOTOR



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **133794**
วัน,เดือน,ปี **30 ต.ค. 2557**

b. **12644481**
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบและข้อมูล
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NONLINEAR CONTROL WITH FIXED-STRUCTURE H_∞
CONTROLLERS BASED ON FUZZY TECHNIQUE FOR DC MOTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING PROGRAM IN INFORMATION AND SYSTEM ENGINEERING
COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-DS-M-001-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมแบบคงทนเอชอินฟินิตี้กำหนดโครงสร้างได้บนพื้นฐานของเทคนิคฟัซซีสำหรับมอเตอร์กระแสตรง

Thesis Title NONLINEAR CONTROL WITH FIXED-STRUCTURE H_∞ CONTROLLERS BASED ON FUZZY TECHNIQUE FOR DC MOTOR

นักศึกษา นายณัฐชนน จิตต์สง่า

รหัสประจำตัว 56609006

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมระบบและข้อมูล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-DS-M-001-03

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|-----------------------------|-----------------|--|
| รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะเขต | สุรักษา |  |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถวิดา | มณีวรรณ | |
| ดร.ชัยวัฒน์ | หนูทอง | |
| ดร.อนรรฆพล | แสนทน | |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมยศ | เกียรติวนิชวิไล | |

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 พฤษภาคม 2557 เวลา 17.00 - 19.00 น.

สถานที่สอบ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง)

คณบดี วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมแบบ
คงทนเอชอินฟินิตีกำหนดโครงสร้างได้บนพื้นฐานของเทคนิคพีชซี
สำหรับมอเตอร์กระแสตรง

นักศึกษา

นายณัฐชนน จิตต์สง่า

รหัสประจำตัว

56609006

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมระบบและข้อมูล

พ.ศ.

2557

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอวิธีการออกแบบใหม่ที่เรียกว่า ชุดควบคุมพีชซีแบบจัดตารางอัตรา
การขยายคงทนสององศาอิสระในโครงสร้างบังคับโดยใช้วิธีเชิงฟังก์ชันระบบบนระบบมอเตอร์กระแสตรง
ในการควบคุมความเร็วของระบบ เทคนิคที่นำเสนอขึ้นอยู่กับแนวความคิดของการจัดสรรฐานวงรอบ
คงทนสององศาอิสระ ซึ่งใช้แบบจำลองอ้างอิงเพื่อออกแบบให้ได้ชุดควบคุมที่มีสมรรถนะตามต้องการ
เมื่อพิจารณาขอบเขตทางเวลา ชุดควบคุมพีชซีแบบจัดตารางอัตราการขยายนำไปใช้ในการ
กำหนดโครงสร้างของชุดควบคุม ส่วนวิธีเชิงฟังก์ชันนั้น นำไปใช้ในการแก้ปัญหาการควบคุมเพื่อใช้
ในการหาอินฟินิตีโนรมเฉลี่ยของสถานะที่ทำให้การรบกวนมีค่าน้อยที่สุด ชุดควบคุมที่นำเสนอนี้ได้ถูก
พิสูจน์ให้เห็นถึงสมรรถนะในการทดลองจริงบนการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งผลการ
ทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมที่นำเสนอมีสมรรถนะคงทนที่ดีกว่า และสามารถนำไปใช้ในการใช้
งานที่มีย่านการทำงานกว้างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------|---|
| Thesis | Nonlinear Control with Fixed-Structure H_∞ Controllers based on Fuzzy Technique for DC motor |
| Student | Mr. Natchanon Chitsanga |
| Student ID. | 56609006 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Information and System Engineering |
| Year | 2014 |
| Thesis Advisor | Asst.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai |

Abstract

This thesis proposes a new design method called “Fuzzy Gain Scheduling using Fixed-Structure Robust 2DOF Control and Genetic algorithms” for DC Motor Speed Control System. The proposed technique is based on the concept of 2DOF robust loop shaping which time domain specifications can be included in the controller design by using the reference model. Fuzzy Gain Scheduling PID control is adopted as the structure specified controller in our design. Genetic Algorithm (GA) is used to solve the control problem such that the average infinity norm from disturbance to states is minimized. Implementation on a DC Motor speed control is adopted to investigate the effectiveness of the proposed controller. As seen in the results, the proposed controller performs a better robust performance and can be adopted in wide operating range applications.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการออกแบบระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมแบบคงทน เอชอินฟินิตี้กำหนดโครงสร้างได้บนพื้นฐานของเทคนิคพีชชีสำหรับมอเตอร์กระแสตรง สามารถประสบความสำเร็จได้ด้วยดีนั้น เกิดจากการทำงานด้วยความวิริยะอุตสาหะและได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ดังกล่าวดังมีรายนามดังต่อไปนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นและติดตามดูแลเอาใจใส่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ที่มีประโยชน์ตลอดจนให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้ นายศรธา ยรรยง ผู้ให้คำแนะนำด้านเทคนิคในการทำการทดลองจริง ดร.ปิยะพงษ์ โอสารทิตาชาต ผู้ให้คำแนะนำในการทำแบบจำลองตลอดจนรูปแบบการเขียนวิทยานิพนธ์ นางสาวสุภารัตน์ พุ่มย้อย ผู้ให้ความสะดวกในการยืมอุปกรณ์การทดลอง บริษัท แคลคคอมพ์ อีเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) และ กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดจนค่าศึกษาเล่าเรียนจนจบหลักสูตร

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้อุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอนตลอดจนส่งเสริม ทางด้านการศึกษาจนสามารถสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทในครั้งนี้

ณัฐชนน จิตต์สง่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VII |
| สารบัญรูป | IX |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการทำวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย | 6 |
| 1.3 ความสำคัญของการวิจัย | 6 |
| 1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย | 7 |
| 1.5 คำถามในการวิจัยและสมมติฐาน | 7 |
| 1.6 ขอบเขตของการวิจัย | 8 |
| 1.7 แผนงานวิจัย | 8 |
| 1.8 ตารางแสดงแผนงานวิจัย | 9 |
| 1.9 ผลงานในแต่ละช่วงเวลา (milestone) | 9 |
| 1.10 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์นี้ | 10 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 11 |
| 2.1 การทบทวนวรรณกรรม | 11 |
| 2.2 มอเตอร์กระแสตรงชนิด PMDC | 12 |
| 2.3 ทฤษฎี Fuzzy Logic and Fuzzy System | 15 |
| 2.4 วิธีการปรับค่าด้วยความผิดพลาดกำลังสองผลรวม (ISE tuning method) | 21 |
| 2.5 การใช้ฟัซซีในการออกแบบชุดควบคุม (Fuzzy Control) | 22 |
| 2.6 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (System Identification) | 26 |
| 2.7 ระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control) | 29 |
| 2.8 ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยเทคนิคเชิงพันธุกรรม | 36 |
| 2.9 ควบคุมแบบคงทนสององศาอิสระ | 37 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| บทที่ 3 การควบคุมคอนโทรลเลอร์อินพุตสององศาอิสระสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้วิธีเชิง พันธุกรรมแบบโครงสร้างค้ำที่จุดดำเนินการ | 41 |
| 3.1 บทนำ..... | 41 |
| 3.2 การทดลองเรื่อง การควบคุมคอนโทรลเลอร์อินพุตสององศาอิสระสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ วิธีเชิงพันธุกรรม..... | 41 |
| บทที่ 4 วิธีการควบคุมคอนโทรลเลอร์อินพุตสององศาอิสระโดยใช้เทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่า เหมาะสมที่จุดดำเนินการในโครงสร้างค้ำค้ำบนระบบมอเตอร์กระแสตรง | 54 |
| 4.1 บทนำ..... | 54 |
| 4.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (System Identification) บนระบบ มอเตอร์กระแสตรงแบบความผิดพลาดของเอาต์พุต (Output Error Identification) และ ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ | 54 |
| 4.3 การออกแบบชุดควบคุมฟัซซีแบบค้ำค้ำด้วยเทคนิคการจัดสรรฐานวงรอบอินพุตสอง องศาอิสระ (H_∞ Loop Shaping 2 DOF) ที่กำหนดโครงสร้างค้ำค้ำด้วยขั้นตอนหาค่าความ เหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรม | 59 |
| 4.4 การสังเคราะห์ชุดควบคุมแบบที่นำเสนอและการควบคุมแบบพีไอดี (PID controller optimized by GA) ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ | 61 |
| 4.5 การจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริง..... | 65 |
| 4.6 สรุปผล..... | 71 |
| บทที่ 5 วิธีการควบคุมคอนโทรลเลอร์อินพุตสององศาอิสระโดยใช้เทคนิคชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตาราง อัตราการขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวมในโครงสร้างค้ำค้ำบน ระบบมอเตอร์กระแสตรง..... | 73 |
| 5.1 บทนำ..... | 73 |
| 5.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (System Identification) บนระบบ มอเตอร์กระแสตรงแบบฟัซซี (Fuzzy Model) และทดสอบความถูกต้องของแบบ จำลองที่ได้ | 73 |
| 5.3 การออกแบบชุดควบคุมฟัซซีแบบค้ำค้ำด้วยเทคนิคการจัดสรรฐานวงรอบอินพุต สององศาอิสระ (H_∞ Loop Shaping 2 DOF) ที่กำหนดโครงสร้างค้ำค้ำด้วยขั้นตอนหาค่า ความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรม | 79 |
| 5.4 การสังเคราะห์ชุดควบคุมแบบที่นำเสนอและชุดควบคุมค้ำค้ำจัดสรรฐานวงรอบ อินพุต (Conventional H_∞ Loop Shaping) ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ | 84 |
| 5.5 การจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริง..... | 90 |
| 5.6 สรุปผล..... | 95 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 6 สรุปผล..... | 97 |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง | 97 |
| 6.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข..... | 98 |
| 6.3 ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัย..... | 98 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 99 |
| ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 102 |
| ประวัติผู้เขียน | 109 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 แสดงแผนงานวิจัย | 9 |
| 1.2 ผลงานในแต่ละช่วงเวลา (milestone)..... | 9 |
| 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบความผิดพลาดเอาท์พุท | 47 |
| 3.2 ค่าทางพลศาสตร์ของผลตอบสนองขั้นบันไดของแบบจำลอง..... | 48 |
| 3.3 ค่าพลศาสตร์ของแบบจำลองอ้างอิง | 50 |
| 3.4 ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของการทดลองที่นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมคงทนเอชอินฟินิตี้สององศา อิสระแบบธรรมดา..... | 51 |
| 4.1 แบบจำลองระบบด้วยวิธีความผิดพลาดเอาท์พุทของระบบมอเตอร์กระแสตรง | 57 |
| 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมและขอบเขต ของการควบคุม | 62 |
| 4.3 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่ ออกแบบชุดควบคุมที่จุดดำเนินการ..... | 65 |
| 4.4 ผลการตอบสนองของระบบที่ออกแบบชุดควบคุมและระบบหลังเปลี่ยนแบบจำลองของชุด ควบคุมที่นำเสนอและชุดควบคุมพีไอดี | 67 |
| 4.5 ผลการตอบสนองจริงของระบบที่ออกแบบชุดควบคุมและระบบหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์ของชุด ควบคุมที่นำเสนอและชุดควบคุมพีไอดี | 71 |
| 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองพีซีซีทา คาง-ซีเงะโนะของระบบมอเตอร์กระแสตรง..... | 77 |
| 5.2 ระบบในแต่ละความเร็วรอบต่างๆ (Local Models)..... | 85 |
| 5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมและขอบเขต ของชุดควบคุม..... | 86 |
| 5.4 ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมที่เหมาะสมในแต่ละตำแหน่งของระบบ (Local Linear Model)..... | 86 |
| 5.5 ชุดควบคุมที่เหมาะสมในแต่ละตำแหน่งของระบบ (Local Linear Model)..... | 87 |
| 5.6 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมคงทนแบบจัดสรรฐาน วงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่พิกัด..... | 90 |
| 5.7 ผลการตอบสนองแบบขั้นบันไดของชุดควบคุมแบบพีซีซีที่นำเสนอและชุดควบคุมพีซีซีแบบจัด ตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม | 91 |
| 5.8 ผลการตอบสนองของระบบที่ออกแบบชุดควบคุม และระบบหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์ของชุด ควบคุมแบบพีซีซีที่นำเสนอและชุดควบคุมพีซีซีแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธี ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม..... | 95 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 กราฟสถิติการซื้อขายของอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ของโลก | 1 |
| 1.2 กราฟสถิติการนำหุ่นยนต์ไปใช้ในการผลิตและบริการ..... | 2 |
| 1.3 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุม..... | 7 |
| 2.1 การเปรียบเทียบการตัดสินใจระหว่างแบบฟัซซี่และตรรกะแบบคลุมเครือ | 15 |
| 2.2 แสดงถึงหลักการของการตัดสินใจแบบคลุมเครือในการให้เงินพิเศษ..... | 16 |
| 2.3 ระบบตรรกะแบบคลุมเครือ | 16 |
| 2.4 กระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือในกรณีปกติและกรณีการให้เงินพิเศษแก่ร้านอาหาร | 17 |
| 2.5 Membership function ของฤดูกาลกับ 12 เดือน..... | 18 |
| 2.6 กฎของและ (and) หรือ (or) และไม่ (not)..... | 19 |
| 2.7 แสดงถึงกระบวนการในการหาค่าขาออกของกระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือ..... | 19 |
| 2.8 กระบวนการหาตรรกะแบบคลุมเครือของการกาเงินพิเศษจากร้านอาหาร | 20 |
| 2.9 แสดงการทำการกำจัดความคลุมเครือ (Defuzzify) ด้วยการหาจุดศูนย์ถ่วง | 21 |
| 2.10 ภาพฟังก์ชันสมาชิกที่เป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม..... | 22 |
| 2.11 ภาพระบบฟัซซี่แบบสมบรูณ์..... | 23 |
| 2.12 ภาพระบบฟัซซี่แบบทาคาจิ-ซิงะโนะ..... | 24 |
| 2.13 ภาพระบบฟัซซี่ที่ประกอบไปด้วยตัวทำให้คลุมเครือและตัวกำจัดความคลุมเครือ..... | 24 |
| 2.14 ภาพของหลักการออกแบบชุดควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Control)..... | 25 |
| 2.15 ภาพอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี่ | 25 |
| 2.16 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE..... | 27 |
| 2.17 การรบกวนรูปแบบต่าง ๆ | 30 |
| 2.18 ความไม่แน่นอนของตัวประกอบเฉพาะร่วม | 31 |
| 2.19 โครงสร้าง $M - \Delta$ การวิเคราะห์สมรรถนะความคงทน..... | 31 |
| 2.20 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับทั่วไป..... | 32 |
| 2.21 แสดงแผนภาพโพลเดของระบบก่อนและหลังจัดสัญญาณวงรอบ | 35 |
| 2.22 แสดงภาพการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้..... | 35 |
| 2.23 แสดงแผนผังการทำงานของการทำงานแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม | 36 |
| 2.24 (ก) แบบที่ผสมข้ามพันธุ (ข) แบบที่ถอดแบบจากต้นแบบ และ (ค) แบบกลายพันธุ | 37 |
| 2.25 แสดงความไม่แน่นอนของระบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor)..... | 38 |
| 2.26 การควบคุมแบบสององศาอิสระทั่วไป..... | 40 |
| 3.1 ระบบที่จะทดสอบสมรรถนะจริง..... | 42 |
| 3.2 มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง | 42 |
| 3.3 ตัวตรวจจับความเร็ว(Encoder | 43 |
| 3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์มรุ่น ARM Cortex-M4 | 43 |
| 3.5 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบเอชบริดจ์ (H-bridge)..... | 44 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.6 ระบบมอเตอร์กระแสตรงแกนเดี่ยว..... | 44 |
| 3.7 แผนภาพของระบบมอเตอร์กระแสตรง..... | 44 |
| 3.8 โปรแกรมหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (System Identification Tool box)..... | 45 |
| 3.9 สัญญาณขาออกของระบบ..... | 46 |
| 3.10 สัญญาณขาเข้าสองตัวสี่เหลี่ยม..... | 46 |
| 3.11 แสดงผลตอบสนองแบบขั้นบันไดเพื่อทดสอบระบบที่จำลองของตัวสี่เหลี่ยม 50-70%..... | 47 |
| 3.12 แสดงผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระบบจริงที่ตัวสี่เหลี่ยม 50%..... | 48 |
| 3.13 แผนภาพโพลแสดงถึงขอบเขตอัตราขยาย ขอบเขตเฟส และแบนด์วิธของระบบ..... | 48 |
| 3.14 กราฟโพลและซีโพลของแบบจำลอง..... | 49 |
| 3.15 ผลตอบสนองขั้นบันไดของ T_{ref} ที่ 1/4 เวลาเข้าสู่เสถียรภาพ..... | 50 |
| 3.16 การลู่เข้าของค่าตอบของเทคนิคที่นำเสนอ..... | 51 |
| 3.17 ผลตอบสนองขั้นบันไดเพื่อทดสอบความคงทนของระบบ..... | 52 |
| 3.18 ผลตอบสนองแบบขั้นบันไดของการทดลองมาเปรียบเทียบกัน..... | 52 |
| 3.19 แผนภาพโพลของการทดลองมาเปรียบเทียบกัน..... | 53 |
| 4.1 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองความผิดพลาดเอาต์พุต..... | 55 |
| 4.2 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการขับมอเตอร์ที่ตัวสี่เหลี่ยม 50%-60% หรือ ที่ 12-14.4 V..... | 55 |
| 4.3 สัญญาณเอาต์พุตเป็นความเร็วรอบมอเตอร์ที่วัดได้ในช่วงตัวสี่เหลี่ยม 50%-60%..... | 56 |
| 4.4 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงตัวสี่เหลี่ยม 50%-60%..... | 56 |
| 4.5 สัญญาณเอาต์พุตที่ใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงตัวสี่เหลี่ยม 50%-60%..... | 57 |
| 4.6 ผลการจำลองระบบแบบความผิดพลาดเอาต์พุตในช่วงตัวสี่เหลี่ยม 50%-60%..... | 58 |
| 4.7 ผลการจำลองระบบแบบความผิดพลาดเอาต์พุตในช่วงตัวสี่เหลี่ยม 90%-100%..... | 58 |
| 4.8 แสดงความไม่แน่นอนของระบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor)..... | 59 |
| 4.9 การควบคุมแบบสององศาอิสระทั่วไป..... | 60 |
| 4.10 การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป..... | 61 |
| 4.11 ส่วนเมื่อเสถียรภาพของการควบคุมที่นำเสนอ..... | 63 |
| 4.12 ส่วนเมื่อเสถียรภาพของการควบคุมแบบพีไอดี..... | 63 |
| 4.13 แผนภาพโพลของการควบคุมพีไอดีที่ออกแบบการควบคุมที่จุดดำเนินการ..... | 64 |
| 4.14 แผนภาพโพลของการควบคุมที่นำเสนอ..... | 64 |
| 4.15 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับ การควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่ ออกแบบชุดควบคุมที่จุดดำเนินการ..... | 65 |
| 4.16 ผลตอบสนองขั้นบันไดของการควบคุมที่นำเสนอเมื่อแบบจำลองเปลี่ยนไป..... | 66 |
| 4.17 ผลตอบสนองขั้นบันไดของการควบคุมพีไอดีเมื่อแบบจำลองเปลี่ยนไป..... | 66 |
| 4.18 ระบบที่จะทดสอบสมรรถนะจริง..... | 67 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.19 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของระบบที่ออกแบบการควบคุม (Nominal Plant) (ก) ชุดควบคุมที่นำเสนอ และ (ข) ชุดควบคุมพีไอดี..... | 68 |
| 4.20 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ(กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 8 กิโลกรัม) (ก) ชุดควบคุมที่นำเสนอ และ (ข) ชุดควบคุมพีไอดี..... | 69 |
| 4.21 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ(กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 10 กิโลกรัม) (ก) ชุดควบคุมที่นำเสนอ และ (ข) ชุดควบคุมพีไอดี..... | 70 |
| 5.1 ฟังก์ชันสมาชิกที่เป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม..... | 75 |
| 5.2 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการขับมอเตอร์ที่ความเร็ว 50%-100% หรือ ที่ 12-24 V..... | 75 |
| 5.3 สัญญาณเอาต์พุตเป็นความเร็วรอบมอเตอร์ที่วัดได้..... | 76 |
| 5.4 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 76 |
| 5.5 สัญญาณเอาต์พุตที่ใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 77 |
| 5.6 ผลการจำลองระบบแบบฟัซซีทาคางิ-ซึเงะโนะ(TS fuzzy identification) ได้รับความถูกต้อง ที่ 99.99..... | 78 |
| 5.7 ผลการจำลองระบบแบบความผิดพลาดเอาต์พุต (output error) ได้รับความถูกต้องที่ 38.79%..... | 79 |
| 5.8 แสดงแผนผังการทำงานของการออกแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม..... | 80 |
| 5.9 แสดงความไม่แน่นอนของระบบแบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor)..... | 81 |
| 5.10 การควบคุมแบบสององศาอิสระทั่วไป..... | 82 |
| 5.11 ส่วนเพื่อเสถียรภาพของในแต่ละตำแหน่ง (local model) ของระบบ..... | 87 |
| 5.12 แผนภาพโพลเดของชุดควบคุมเชิงเส้นที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่พิกัด..... | 88 |
| 5.13 แผนภาพโพลเดของชุดควบคุมฟัซซีแบบคงทนที่นำเสนอ..... | 89 |
| 5.14 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมคงทนแบบจัด สัมฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่พิกัด..... | 89 |
| 5.15 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของชุดควบคุมแบบฟัซซีที่นำเสนอและชุดควบคุมฟัซซีแบบ จัดตารางอัตราการขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม..... | 91 |
| 5.16 ระบบที่จะทดสอบสมรรถนะจริง..... | 92 |
| 5.17 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของระบบที่ออกแบบชุดควบคุม (Nominal Plant) (ก) ชุดควบคุมแบบฟัซซีที่นำเสนอ และ (ข) ชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตาราง อัตราการขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม..... | 92 |
| 5.18 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ(กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 10 กิโลกรัม) (ก) ชุดควบคุมฟัซซีที่ นำเสนอและ (ข) ชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราการขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความ คลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม..... | 93 |
| 5.19 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ(กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 15 กิโลกรัม)(ก) ชุดควบคุมฟัซซี ที่นำเสนอและ (ข) ชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราการขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความ คลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม..... | 94 |

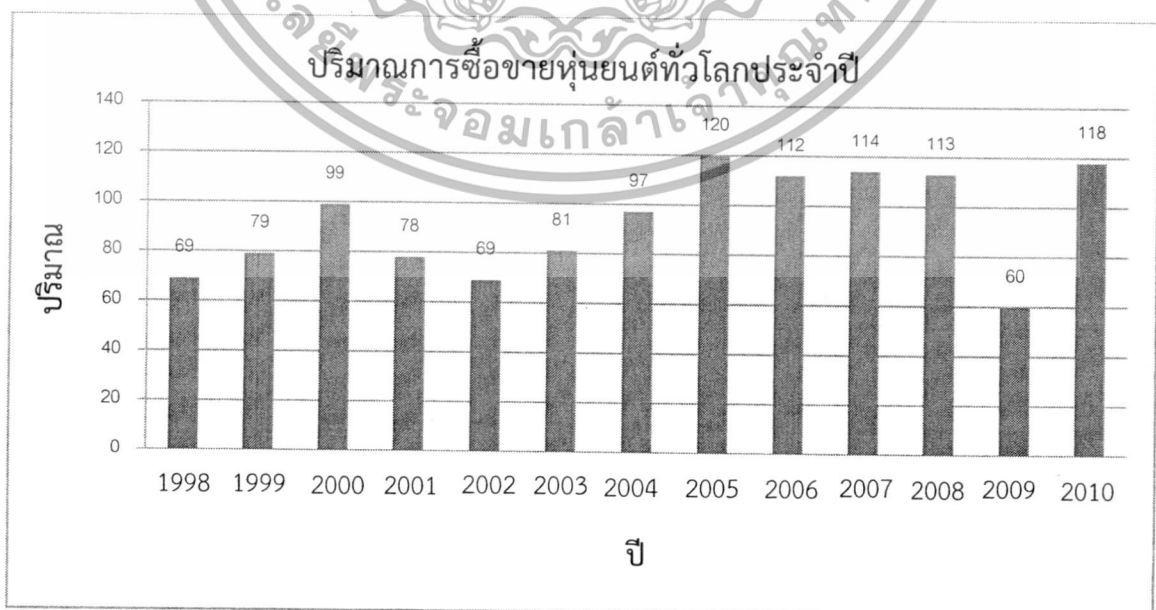
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการทำวิจัย

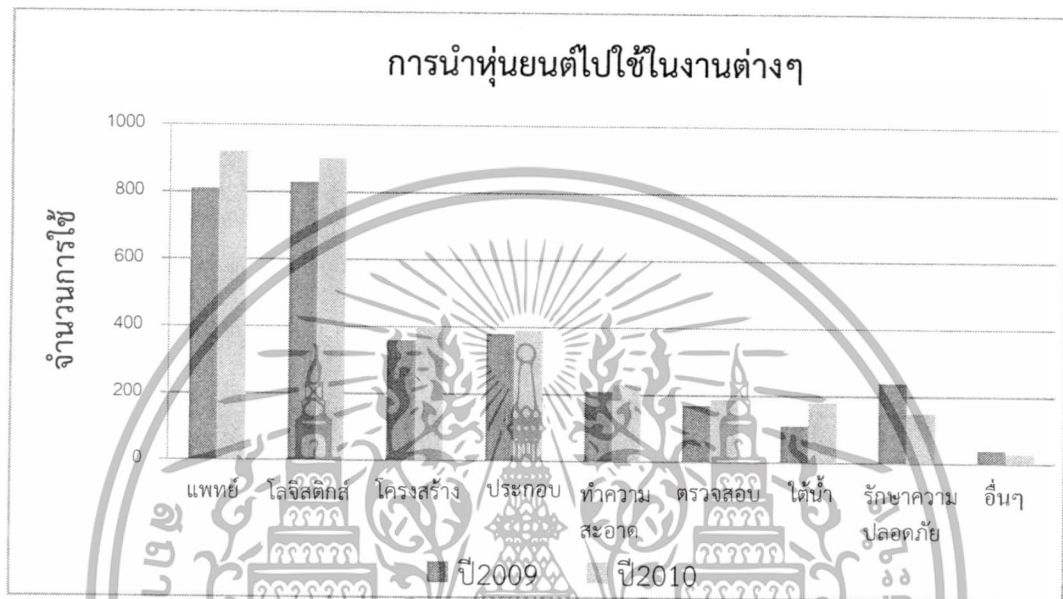
อุตสาหกรรมในปัจจุบันมีความต้องการทางด้านแรงงานมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของสินค้าและบริการของมนุษย์ เมื่อความต้องการทางด้านแรงงานมากขึ้นทำให้ต้นทุนทางด้านแรงงานเพิ่มขึ้น อีกทั้งแรงงานโดยปกติจะมีงานหลายชนิดที่มนุษย์ไม่ประสงค์จะทำหรืออาจทำได้ไม่ดี อาทิเช่น งานที่มีอันตราย งานที่อาจก่อให้เกิดความรู้สึกต้อยเกียรติ งานที่ต้องการความเร็วในการทำงานสูงมากกว่ามนุษย์จะทำได้ เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นหุ่นยนต์จึงมีบทบาทสำคัญในการเข้ามาแทนที่แรงงานมนุษย์ในบางตำแหน่งงานในอุตสาหกรรม โดยปกติหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมมักถูกใช้ในงานที่ทำหน้าที่ซ้ำไปซ้ำมา งานที่มีชิ้นงานเล็กจนมนุษย์ทำไม่ได้หรือทำได้ลำบาก งานที่ใช้ความละเอียดสูงและความคงที่สูง เช่น งานตัด งานเชื่อม งานตกแต่งที่มีแบบมาให้ เป็นต้น งานที่หุ่นยนต์ทำได้ดีนั้นคืองานที่ต้องการตำแหน่งที่รวดเร็วและแม่นยำเพื่อจะได้ผลิตชิ้นงานได้ตรงตามแบบและจำนวนการผลิตต่อชั่วโมงที่มากขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงนั้นกระบวนการผลิตยังเกิดความผิดพลาดทางตำแหน่งแบบสุ่มซึ่งเกิดในบางครั้ง และจะเกิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการผลิตโดยการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์

ปัญหาอุปสรรคหนึ่งของการใช้งานหุ่นยนต์ คือ เรื่องราคา โดยปกติราคาในท้องตลาดของหุ่นยนต์ขนาดเล็กที่ยกน้ำหนักได้ (payload) ประมาณ 2 กิโลกรัมอยู่ที่ประมาณ 1,500,000-6,000,000 บาท จากสถิติจากรัฐบาลญี่ปุ่นได้ประกาศออกมาในเรื่องการส่งออกพบว่าได้ขายหุ่นยนต์ไปเป็นมูลค่า \$5.2 พันล้านในปี 2006 และ \$26 พันล้านในปี 2010 และคาดการณ์ว่าจะมีมูลค่าการส่งออกสูงขึ้นไปเป็น \$70 พันล้านในปี 2025



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวิศวกรรมเครื่องกลใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 1.1 กราฟสถิติการซื้อขายของอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ของโลก [34]
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าอุตสาหกรรมหุ่นยนต์มีการเจริญเติบโตที่สูงขึ้นมาก จากสถิติในปี 2010 อัตราการขยายหุ่นยนต์ในเอเชียเพิ่มขึ้น 132 % โดยเฉพาะในประเทศจีน ญี่ปุ่น และเกาหลีใต้ คู่แข่งสำคัญของเอเชียคือสหรัฐอเมริกาที่มียอดขายเพิ่มขึ้นถึง 111% และมีประเทศที่น่าจับตามอง คือ บราซิล ที่มียอดขายสูงขึ้น 29% ส่วนของทวีปยุโรปยังมีการซื้อขายที่คงที่ไม่โดดเด่น คือ 73% โดยมีประเทศแกนนำคือ ประเทศเยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลี รัสเซีย และสเปน



รูปที่ 1.2 กราฟสถิติการนำหุ่นยนต์ไปใช้ในการผลิตและบริการ [34]

จากกราฟในรูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์มีส่วนสำคัญมากขึ้นทั้งในภาคผลิตและภาคบริการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการแพทย์และเกษตรกรรม เพราะต้องการความเที่ยงตรงและแม่นยำในกระบวนการผลิตและรักษา เพราะฉะนั้นในอนาคตการแข่งขันทางอุตสาหกรรมหุ่นยนต์จะต้องเพิ่มขึ้นจากเดิมโดยไม่ต้องสงสัย ดังนั้นจะหาอะไรที่จะทำให้อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ในประเทศไทยได้มีการพัฒนาจนสามารถแข่งขันในเวทีโลกได้จึงเป็นปัญหาหนึ่งที่นักวิจัยให้ความสนใจ

การพัฒนาหุ่นยนต์จะต้องอาศัยศาสตร์หลายด้าน อาทิเช่น ระบบควบคุมระดับบน ระบบควบคุมระดับล่าง ระบบสื่อสาร ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ การวัดและการแสดงผล ฯลฯ ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาและพัฒนาาระบบควบคุมระดับล่างโดยพัฒนาเป็นต้นแบบมอเตอร์กระแสตรงหนึ่งแกนสำหรับใช้ในหุ่นยนต์โดยจะสร้างให้มีสมรรถนะเทียบเท่ากับหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรม เพื่อให้เกิดต้นแบบที่ใช้ได้จริงที่มีสมรรถนะสูงและลดต้นทุนในการผลิตหุ่นยนต์ลง

การเพิ่มสมรรถนะสูงและลดต้นทุนสามารถทำได้หลายอย่างในระบบหุ่นยนต์ แต่งานวิจัยนี้ศึกษาในเรื่องระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงในแกนเดียวโดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร (PMDM) ผ่านการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง (linear motion) ด้วยลีดสกรู (lead screw) จากนั้นควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์เอ็ม ซีพียูขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยเอช-บริดจ์ (H-BRIDGE DRIVER DC MOTOR) ซึ่งเทคนิคการควบคุมด้วยระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่ามีประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอชอินฟินิตีสององศาอิสระใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการหาตัวแปรในการควบคุมในแต่ละย่านความเร็ว แล้วหาชุดควบคุมรวมด้วยฟัซซีอีกที โดยจะมาเปรียบเทียบกับ การควบคุมคงทนเอชอินฟินิตีสององศาอิสระวิธีการหาค่าเหมาะสมของพารามิเตอร์ด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมที่จุดดำเนินการอันซึ่งอยู่บนระบบปิด (off-line) ซึ่งการวิเคราะห์ระบบควบคุมผ่านการหาแบบจำลองระบบ (system identification) ด้วยวิธีฟัซซีและวิธีความผิดพลาดเอชเอฟ

ระบบมอเตอร์กระแสตรงถูกใช้กับงานอุตสาหกรรมต่างๆ จำนวนมากอาทิเช่น การนำระบบมอเตอร์กระแสตรงมาใช้ในกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติที่มีการส่งต่อชิ้นส่วนที่ผลิตต่างๆ ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ การนำระบบมอเตอร์กระแสตรงมาสร้างเป็นหุ่นยนต์ (Robot) สำหรับหยิบจับชิ้นงานต่างๆ ในสายการผลิต เป็นต้น เพื่อให้การทำงานของระบบมอเตอร์กระแสตรงมีประสิทธิภาพ จะต้องออกแบบให้ระบบมอเตอร์กระแสตรงสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และด้วยความเร็วตามที่ต้องการเพื่อให้ระบบทำงานได้รวดเร็ว ซึ่งการออกแบบระบบมอเตอร์กระแสตรงที่สามารถควบคุมความเร็วได้จะต้องพิจารณาในสองส่วนหลักต่อไปนี้ คือ [2]

1.1.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) หรือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Transfer Function) โดยจำลองระบบมอเตอร์กระแสตรงให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ โดยปกติแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์กระแสตรงจะมีเอาต์พุตคือความเร็วของมอเตอร์เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์กระแสตรงใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบอาจจะใช้วิธีการบ่อนสัญญาณเข้าทางอินพุตของระบบ แล้วนำข้อมูลระหว่างอินพุตและเอาต์พุตมาหาแบบจำลองได้

1.1.2 ชุดควบคุม (Controller) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชุดควบคุมในระบบมอเตอร์กระแสตรงนี้ได้มีผู้วิจัยออกแบบชุดควบคุมแบบต่างๆ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองและสมรรถนะตามต้องการ รวมถึงมีการออกแบบชุดควบคุมคงทน (Robust Control) ที่สามารถรับรองว่าระบบยังจะมีเสถียรภาพอยู่แม้ว่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดตัวก่อกวนขึ้น นอกจากนี้ยังมีการออกแบบชุดควบคุมอื่นๆ อีก อาทิเช่น ชุดควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ชุดควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Control) เป็นต้น

ปัจจุบันสำหรับชุดควบคุมคงทนในหลายระบบรวมทั้งระบบมอเตอร์กระแสตรงยังไม่สามารถนำมาใช้ได้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากโครงสร้าง (Structure) และลำดับ (Order) ของชุดควบคุมคงทน มักมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและลำดับสูงซึ่งยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบมอเตอร์กระแสตรงจริง ในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนิยมใช้ชุดควบคุมแบบโครงสร้างง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างการออกแบบชุดควบคุมคงทนทางทฤษฎีกับการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้ต้องการแก้ปัญหาเพื่อให้ชุดควบคุมมีความคงทนและสามารถนำไปใช้งานจริงกับระบบมอเตอร์กระแสตรงทั่วไปได้ โดยได้นำเสนอ ชุดควบคุมคงทนแบบกำหนดโครงสร้างได้ ที่สามารถกำหนดโครงสร้างตามที่คุณใช้งานต้องการ เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง

การออกแบบชุดควบคุมสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรงที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะและความคงทนดีนั้นทำได้ยาก เนื่องมาจากพลวัตของระบบมอเตอร์กระแสตรงนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly Nonlinear) เนื่องมาจากคุณลักษณะทางกายภาพภายในระบบที่มีความไม่แน่นอนสูง อาทิเช่น น้ำหนักของวัตถุหรือโหลด (Load) ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของลีดสกรู ความฝืดหรือแรงเสียดทานในระบบ เป็นต้น จากปัจจัยดังกล่าวทำให้การออกแบบระบบที่มีสมรรถนะสูงทำได้ยาก ที่ผ่านมามีผู้วิจัยจำนวนมากนำเสนอชุดควบคุมสำหรับระบบนี้ อาทิเช่น

ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) [2] ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI) แบบมีลูปอนาลอก (Analog Loop) [2] ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้ (Self-tuning Control) [2] เป็นต้น โดยที่การออกแบบชุดควบคุมที่กล่าวมาข้างต้นจะออกแบบให้มีสมรรถนะที่ดีโดยไม่คำนึงถึงพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง (Parameter Change) ในการออกแบบ อย่างไรก็ตามการออกแบบชุดควบคุมดังกล่าวไม่สามารถรับประกันความคงทนของระบบ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบได้ จึงมีผู้เสนอการออกแบบชุดควบคุมคงทนสำหรับระบบต่าง ๆ [2] ที่รับประกันความคงทนได้หลายแบบ อาทิเช่นชุดควบคุมเอชอินฟินิตีพร้อมระบบป้อนกลับมิลเนอร์ (H_∞ Control with Mirror Feedback) ชุดควบคุมเอชอินฟินิตีแบบสุ่มตัวอย่าง (Sampled-data H_∞ Control) ที่มีข้อดีกว่าชุดควบคุมเอชอินฟินิตี (H_∞ Control) แบบต่อเนื่อง [2] ซึ่งชุดควบคุมเหล่านี้นอกจากจะควบคุมให้ระบบทำงานได้ตามสมรรถนะที่ออกแบบแล้ว ระบบยังทำงานได้แม้จะถูกรบกวนจากตัวรบกวนภายนอก (Disturbances) หรือพารามิเตอร์ภายในระบบเปลี่ยนแปลงก็ตาม โดยคุณสมบัติของชุดควบคุมคงทนนี้จึงเหมาะกับการใช้งานอุตสาหกรรมหรืองานทั่วไปที่ต้องการระบบที่มีเสถียรภาพสูง แม้พารามิเตอร์ของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลง

โดยทั่วไปโครงสร้างของชุดควบคุมคงทนมักจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและลำดับที่สูง ทำให้ยากต่อการนำไปใช้จริงในงานอุตสาหกรรม ชุดควบคุมในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มักจะมีโครงสร้างแบบง่ายไม่ซับซ้อนและลำดับต่ำ อาทิเช่น ชุดควบคุมแบบพีไอดี (PID) ชุดควบคุมแบบชดเชยก่อนหลัง (Lead-Lag) เป็นต้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีผู้ออกแบบชุดควบคุมคงทนที่สามารถกำหนดโครงสร้างได้ อาทิเช่น การใช้ขั้นตอนอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (LMI) [3] ในการสังเคราะห์ชุดควบคุมคงทนแบบกำหนดโครงสร้างได้ ใน [4] ได้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ช่วยในการแก้ปัญหาในการสังเคราะห์ชุดควบคุมคงทนเอชอินฟินิตี (H_∞ Optimal Control) ที่กำหนดโครงสร้างได้ [5-6] นำเสนอชุดควบคุมคงทนจัดสัมมูลฐานวงรอบเอชอินฟินิตี (H_∞ Loop Shaping Control) ที่มีการกำหนดโครงสร้างของชุดควบคุมได้ โดยที่การออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัมมูลฐานวงรอบเอชอินฟินิตีจะต้องการการออกแบบเพียงฟังก์ชันชดเชยน้ำหนัก (Weighting Function) สองตัวเท่านั้น ซึ่งการออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักแบบขั้นตอนนี้จะง่ายกว่าการออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักของชุดควบคุมคงทนเอชอินฟินิตีที่ยากในการออกแบบและไม่สามารถพิจารณาได้อย่างชัดเจนใน [7] ยังออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัมมูลฐานวงรอบเอชอินฟินิตีแบบคงตัว (Static H_∞ Loop Shaping) โดยที่ชุดควบคุมที่ได้จะมีโครงสร้างเหมือนกับฟังก์ชันชดเชยน้ำหนัก และใน [8] มีการนำเสนอชุดควบคุมคงทนจัดสัมมูลฐานวงรอบเอชอินฟินิตีที่สังเคราะห์ชุดควบคุมด้วยขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

สำหรับการออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัมมูลฐานวงรอบเอชอินฟินิตีนั้น ขั้นตอนการออกแบบชุดควบคุมนี้จะต้องการฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักก่อน (Pre-Compensator) และหลัง (Post-Compensator) และการออกแบบดังกล่าวสามารถอาศัยพื้นฐานการจัดสัมมูลฐานวงรอบแบบเดิม (Classical Loop Shaping) เพื่อให้ระบบที่จัดสัมมูลฐานแล้วมีคุณลักษณะสัมมูลฐานแบบวงเปิดตามต้องการ (Desired Open Loop Shape) ซึ่งเทคนิคการจัดสัมมูลฐานแบบเดิมนั้นจะเข้าใจได้ง่าย จากนั้นจึงสังเคราะห์ชุดควบคุมคงทนขึ้นมา แต่การออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักสำหรับชุดควบคุมคงทนจัดสัมมูลฐานวงรอบเอชอินฟินิตีโดยทั่วไปก็ยังนิยมออกแบบโดยอาศัยการลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนได้ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักตามที่ต้องการ ทำให้เสียเวลาในการออกแบบ ดังนั้นใน [9] นำเสนอการออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักอัตโนมัติด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ทำให้สามารถหา

ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักได้ง่ายขึ้น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นขั้นตอนที่ง่ายต่อการนำมาใช้งานและมีความสามารถสูงในการแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอการออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบกำหนดโครงสร้างได้ โดยได้รวมการออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักเข้ากับการสังเคราะห์ชุดควบคุมในขั้นตอนที่นำเสนอ วิธีที่นำเสนออาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการหาฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมคงทนที่เหมาะสมได้ โดยใช้ดัชนีชี้วัดความคงทนและสมรรถนะเพียงตัวเดียว คือ ส่วนเผื่อเสถียรภาพ (Stability Margin) ดังนั้นจุดมุ่งหมาย (Objective Function) ในการออกแบบใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาชุดควบคุมและฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักที่ทำให้ระบบมีส่วนเผื่อเสถียรภาพสูงที่สุด และนำชุดควบคุมที่ได้ไปทดสอบกับระบบมอเตอร์กระแสตรงทั้งในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะการทำงานแบบมีตัวรบกวนต่างๆ รวมถึงพารามิเตอร์ระบบที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อทดสอบสมรรถนะและความคงทนของชุดควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

ในการออกแบบชุดควบคุมคงทนโดยทั่วไป จะทำการออกแบบชุดควบคุมสำหรับระบบแบบเชิงเส้น (Linear Model) โดยวิเคราะห์จากจุดทำงานเพียงจุดเดียวเท่านั้น ในระบบมอเตอร์กระแสตรงการออกแบบชุดควบคุมใช้ระบบที่วิเคราะห์ที่ความเร็วปกติ ซึ่งถ้านำชุดควบคุมไปใช้กับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง อาทิเช่น ระบบมอเตอร์กระแสตรงที่มีความผิด ระบบมอเตอร์กระแสตรงที่เคลื่อนในระยะทางที่ยาว และความเร็วที่เปลี่ยนไปเป็นต้น ชุดควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถรักษาสมรรถนะในการตอบสนองของระบบให้ดีตลอดช่วงการทำงานของระบบได้และในที่สุดจะไม่สามารถรับประกันความคงทนที่จุดทำงานอื่น ๆ ของระบบได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้มีผู้นำเสนอชุดควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Controller) อาทิเช่น การออกแบบชุดควบคุมที่ป้อนกลับเป็นเชิงเส้น (Feedback Linearization) ชุดควบคุมเชิงเส้นแบบบล็อก-โอเรียนเต็ด (Block-oriented Linearization) และชุดควบคุมที่ใช้สเตจป้อนกลับแบบเชิงสถิตย์ที่เป็นเชิงเส้น (Static State Feedback Linearization) เป็นต้น แต่ชุดควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวมักยุ่งยากและใช้เวลานานในการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ [2] ซึ่งต้องใช้การทดลองจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากจึงมีผู้นำเสนอชุดควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบลดรูป (H_∞ Model Reduction) [10] และชุดควบคุมเอลทู-เอลอินฟินิตี้แบบลดรูป (l_2 - l_∞ Model Reduction) [11] สำหรับระบบที่สามารถสวิตช์ (Switched System) สามารถกำหนดขอบเขตของความไม่แน่นอน (Boundary Uncertainty) ของระบบเพื่อให้สามารถรับประกันว่าชุดควบคุมมีความคงทนแม้ว่างานการทำงานจะกว้างมากก็ตาม นอกจากนี้ได้มีขั้นตอนชุดควบคุมฟัซซี (Fuzzy Control) และนิวโรฟัซซี (Neuro Fuzzy Control) [2] สำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งขั้นตอนฟัซซีนีจะอยู่บนพื้นฐานแนวคิดแบบตรรกะคลุมเครือของมนุษย์และจะง่ายต่อการออกแบบ เนื่องจากสามารถรวมเอาแนวคิดของมนุษย์เข้าไปในการออกแบบได้

การออกแบบชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราขยาย (Fuzzy Gain Scheduling) สำหรับระบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเพิ่มย่านจุดทำงานของระบบที่ถูกควบคุมให้กว้างขึ้น [12] โดยพิจารณาระบบให้เป็นแบบโมเดลฟัซซี (Fuzzy Modeling) แล้วทำการออกแบบชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราขยายที่มีการออกแบบชุดควบคุมแต่ละตัวสำหรับระบบ (Local Linear Models) แล้วใช้ฟัซซีมารวมเซตของชุดควบคุมเหล่านี้ไว้ด้วยกัน แต่ชุดควบคุมแบบนี้ยังยากต่อการนำมาใช้งาน เนื่องจากเป็นการออกแบบชุดควบคุมแบบป้อนกลับปริภูมิสถานะ (State Feedback) ที่จำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์ตรวจสอบสถานะ (State) แต่ละตัวของระบบเพื่อป้อนย้อนกลับมาควบคุมระบบ และใน [13] ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอการออกแบบชุดควบคุมคงทนเอชอินฟินิตีร่วมกับฟัซซีแบบป้อนกลับ (H_∞ Fuzzy Output Feedback) กับระบบที่เป็นแบบฟัซซี (Fuzzy Linear Model) แล้วใช้ขั้นตอนอสมการเมทริกซ์สองเชิงเส้น(BMI)มาแก้ปัญหาชุดควบคุมที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบชุดควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรงที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง โดยขั้นตอนในการออกแบบชุดควบคุมจะพิจารณาระบบมอเตอร์กระแสตรงให้เป็นแบบจำลองฟัซซีทาคากิ-ซึเงโนะ (Takagi-Sugano Fuzzy Model : TS Fuzzy Model) [14,15] และใช้การออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตีแบบกำหนดโครงสร้างได้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมของระบบในแต่ละช่วงความเร็ว (Local Model) สำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรง วิธีที่นำเสนอใช้ส่วนเพื่อเสถียรภาพเฉลี่ยเพื่อสามารถรับประกันส่วนเพื่อเสถียรภาพของทั้งระบบ นอกจากนี้วิธีที่นำเสนอ จะออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมของระบบในแต่ละช่วงความเร็วไปพร้อมกันจึงสะดวกต่อการออกแบบ แต่ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะมีความเหมาะสมจะมีความซับซ้อนและมีความยุ่งยากมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการสำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยชุดควบคุมแต่ละตัวนี้จะถูกนำมารวมกันเป็นชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราขยาย (Fuzzy Gain Scheduled Control) ในงานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดลองโดยเปรียบเทียบให้เห็นถึงสมรรถนะของชุดควบคุมแบบการจัดตารางด้วยฟัซซีที่มีการตอบสนองที่ดีกว่าชุดควบคุมคงทนแบบกำหนดโครงสร้างได้เพียงตัวเดียวและชุดควบคุมแบบฟัซซีทั่วไป

กล่าวโดยสรุปงานวิจัยนี้มีการพัฒนาจากงานวิจัยเดิมในระบบมอเตอร์กระแสตรงดังนี้

- 1.วิธีที่นำเสนอสามารถออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักไปพร้อมกับการออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตีสององศาอิสระแบบกำหนดโครงสร้างได้
- 2.วิธีที่นำเสนอสามารถออกแบบชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราขยายบนระบบแบบฟัซซีได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบมอเตอร์กระแสตรงที่ทำงานได้เทียบเท่ากับระบบมอเตอร์กระแสตรงในแขนกลอุตสาหกรรม

1.2.2 เพื่อให้เกิดโอกาสในความร่วมมือการทำวิจัยระหว่างมหาวิทยาลัยและภาคอุตสาหกรรม

1.2.3 เพื่อสร้างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาในอุตสาหกรรม

1.2.4 เพื่อให้นำเทคนิคในการควบคุมทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมจริง ซึ่งในที่นี้ คือ การควบคุมระบบคงทนเอชอินฟินิตีสององศาอิสระ ด้วยการใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

1.3.1 นักศึกษา และนักวิจัย สามารถเข้าใจปัญหาเชิงอุตสาหกรรมว่าเป็นอย่างไรเพื่อที่จะได้พัฒนาความรู้ทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติเพื่อให้สอดคล้องกับอุตสาหกรรมที่กำลังเติบโตในภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า อีกทั้งยังเป็นการสร้างนักคิด นักวิจัย นักพัฒนารุ่นใหม่เพื่อต่อยอดองค์ความรู้ที่มีแต่เดิมให้พัฒนาจนสามารถไปแข่งขันในอุตสาหกรรมของโลกได้

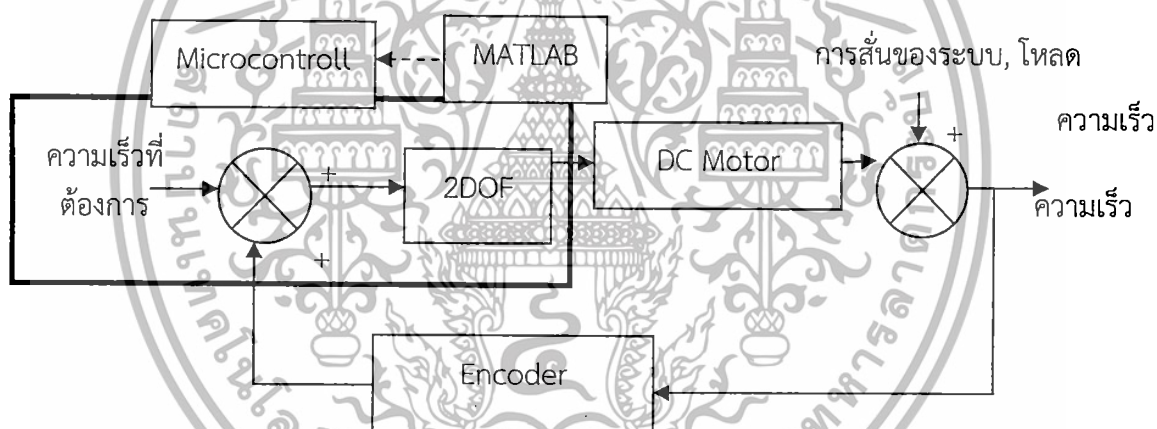
1.3.2 โรงงานอุตสาหกรรม จะได้สิ่งประดิษฐ์ใหม่ที่สามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว จนสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้ เพื่อที่จะได้ลดต้นทุนการผลิตได้มากขึ้นและเพิ่มกำไรมากขึ้น จนเป็นผู้นำในการผลิตหุ่นยนต์ในอนาคต

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

1.4.1 พัฒนาต้นแบบทางฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมและชุดขับเคลื่อนซึ่งอาศัยความรู้ทางเทคนิคของการออกแบบระบบมอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไป

1.4.2 สร้างต้นแบบตัวควบคุมแบบคงทน ไม่เป็นเชิงเส้น โดยหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบใหม่ที่ทำให้ระบบปรับตัวไวขึ้นและครอบคลุมย่านการทำงานมากขึ้น โดยระบบจะเป็นไปตามไดอะแกรมดังรูปที่ 1.3

1.4.3 ทดลองและเปรียบเทียบกับเทคนิคเชิงเส้นและระบบมอเตอร์กระแสตรงในหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในแง่ ความเร็วรอบ ความเร่ง ความแม่นยำ



รูปที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุม

1.5 คำถามในการวิจัยและสมมติฐาน

ความต้องการระบบควบคุมความเร็วที่มีสมรรถนะสูงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะทำให้ระบบควบคุมสามารถทำงานได้แม้ว่าจะมีปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เปลี่ยนไปเช่น มีโหลดทางกลเปลี่ยน เป็นต้น นอกจากนี้ การควบคุมแบบเชิงเส้นโดยทั่วไปจะทำให้ระบบที่ถูกควบคุมทำงานได้ดีในย่านการทำงานช่วงแคบ ๆ ในกรณีย่านการทำงานเปลี่ยนแปลงไปมากระบบนี้มักแสดงสมรรถนะไม่ดีเพียงพอ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว นอกจากการออกแบบระบบมอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไปแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังเลือกที่จะนำการควบคุมคงทนสององศาอิสระแบบฟิชชีมาใช้เพื่อให้ย่านการทำงานเป็นไปได้มากขึ้น โดยประยุกต์กับงานทางหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมทิศทาง ควบคุมความเร็ว สิ่งสำคัญ คือ การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงในระบบแกนกลและระบบส่งของวัตถุคือ การรู้รูปแบบตัวแปรต่าง ๆ ที่จะใช้ควบคุมรวมทั้งสัญญาณรบกวนและตัวก่อกวนที่สามารถทำให้ระบบเสียหายได้ โดยปกติในการควบคุมจะคิดระบบว่าเป็นเชิงเส้นเพื่อใช้ในการออกแบบและควบคุมซึ่งจะมีสมรรถนะได้ดีกับโหลดหรือจุดทำงานย่านหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมเป็นไปได้น้อยมากที่จะสามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวให้คงที่ในย่านที่ออกแบบ โดยเฉพาะเมื่อโหลดไม่คงที่ทำให้พฤติกรรมของมอเตอร์กระแสตรงเปลี่ยนแปลง โดยจะเป็นแบบไม่เชิงเส้นมากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบแบบไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นธรรมชาติจริงของตัวมอเตอร์กระแสตรงเหล่านี้ แม้จะวิเคราะห์เพื่อใช้ในการควบคุมยากกว่าเชิงเส้นแต่สามารถได้สมรรถนะที่สูงกว่ามากกว่าระบบเชิงเส้นสามารถลดความผิดพลาดของความเร็วมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มสมรรถนะในการทำงานได้ในอนาคต ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เทคนิคพีชซี ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะนำมาแก้ไขได้ โดยจะปรับปรุงรูปแบบให้เป็นเทคนิคใหม่ เช่น ออกแบบโดยคำนึงถึงความคงทนและค่าเชิงสมรรถนะในทางไดนามิกส์ เพื่อให้เกิดต้นแบบจริงที่ทำงานได้ดีแม้สภาวะเปลี่ยนไปเป็นต้น

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาเทคนิคใหม่โดยประยุกต์ใช้พีชซีในการควบคุม จะพิจารณาจากความคงทนของระบบโดยอาศัยทฤษฎีทางระบบควบคุมไดนามิกส์มาหาความคงทนระบบและใช้ในการปรับพารามิเตอร์ แนวคิดทางระบบควบคุมที่จะนำมาใช้สร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ แบบ การผสมความอ่อนไหว (mixed sensitivity approach) กับแบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factorization) ใน [16]

ด้วยการรวมแนวคิดของสองเทคนิคนี้เข้าด้วยกันจะเกิดเทคนิคใหม่ขึ้นและใช้งานได้จริงในระบบมอเตอร์กระแสตรงอุตสาหกรรมนั้น คือ เทคนิคการควบคุมด้วยระบบคงทนเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระใช้พีชซีในการหาตัวแปรในการควบคุม

1.7 แผนงานวิจัย

1. ออกแบบสร้างระบบและอุปกรณ์ในการควบคุมแบบเซอร์โว
2. ออกแบบส่วนโปรแกรมในการควบคุมแบบพีชซี
3. ทดสอบจริงและเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์มาตรฐานในห้องปฏิบัติการ
4. แก้ไขระบบและดำเนินการทดสอบซ้ำ หาความซ้ำที่ทางสถิติ

1.8 ตารางแสดงแผนงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนงานวิจัย

| แผนการดำเนินงาน | ผู้รับผิดชอบ | เดือนที่ | | | | | | | |
|--|--------------|----------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1-3 | 4-6 | 7-9 | 10-12 | 13-15 | 16-18 | 19-21 | 22-24 |
| 1. ทบทวนทฤษฎีและออกแบบตัวตรวจจับ การติดตั้งและระบบทางกล | ณัฐชนน | ↔ | | | | | | | |
| 2. สร้างชุดป้องกันกลับสัญญาณและบอร์ดควบคุมฝั่งตัวสำหรับควบคุมการหมุนของมอเตอร์และสื่อสารกับระบบควบคุมระบบสื่อสาร | ณัฐชนน | | ↔ | | | | | | |
| 3. หาแบบจำลองระบบทางพลศาสตร์และออกแบบตัวควบคุม | ณัฐชนน | | | | ↔ | | | | |
| 4. ทดสอบความซ้ำที่ของผลการตรวจจับ ความเร็วของระบบโดยทำตามข้อกำหนดของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่นำมาเปรียบเทียบ | ณัฐชนน | | | | | | ↔ | | |
| 5. เขียนบทความวิชาการและวิทยานิพนธ์ | ณัฐชนน | | | | | | | ↔ | |

1.9 ผลงานในแต่ละช่วงเวลา (milestone)

ตารางที่ 1.2 ผลงานในแต่ละช่วงเวลา (milestone)

| ปีที่ | เดือนที่ | ผลงานที่คาดว่าจะสำเร็จ |
|-------|----------|--|
| 1 | 1-3 | |
| | 4-6 | สร้างชุดควบคุมระดับล่างได้สมบูรณ์ |
| | 7-12 | |
| 2 | 13-15 | สร้างชุดควบคุมระดับล่างและบนได้สมบูรณ์ |
| | 16-18 | ทดสอบ |
| | 19-21 | บทความวิชาการ 1 บทความ |
| | 22-24 | เขียนบทความและวิทยานิพนธ์ |
| | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.10 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์นี้

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย บทที่ 2 จะอธิบายลักษณะทางพลวัตและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์กระแสตรงที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Model) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบฟัซซี การออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบธรรมดา (Conventional H_∞ Loop Shaping) ชุดควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Control) และการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการหาค่าความเหมาะสม โดยอธิบายทั้งขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบธรรมดาสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรงและชุดควบคุมคงทนที่กำหนดโครงสร้างได้ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ บทนี้จะพิจารณาการออกแบบชุดควบคุมคงทนแบบกำหนดโครงสร้างได้ตัวเดียว (Single Fixed-structure Robust Loop Shaping) บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบชุดควบคุมคงทนสององศาอิสระแบบกำหนดโครงสร้างได้ที่จุดดำเนินการด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดีแบบกำหนดโครงสร้างได้ที่จุดดำเนินการด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมในบทที่ 5 แสดงการออกแบบชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม (Fuzzy Gain Scheduled Controller Tuned by ISE Method) โดยได้เปรียบเทียบการทำงานกับชุดควบคุมคงทนแบบกำหนดโครงสร้างได้เพียงตัวเดียวสุดท้ายสรุปผลที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอทั้งหมดจะแสดงในบทที่ 6

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

จากการค้นคว้าการควบคุมสององศาอิสระมาผสมกับการคุมแบบคงทน เริ่มมีบทความลงใน ปี 1995 โดย Lin และคณะ[17] ได้ทำการทดลองในการควบคุมการขับเคลื่อนแบบเซอร์โวในมอเตอร์ เหนียวนำ โดยผ่านทาง การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เป็นการควบคุมแบบการกำหนดทิศทาง สนามแม่เหล็กโดยอ้อม (indirect field oriented) จะใช้การควบคุมแบบคงทนเพื่อให้การเลือกเวลา วิฤต (dead time) มีความมั่นคงในระบบ และใช้ความคงทนลดผลของการสั่น เพื่อประสิทธิภาพที่ดี ของระบบ ผลการทดสอบพบว่า การควบคุมระบบคงทนสององศาอิสระทำให้คงทนต่อสัญญาณ รบกวนในช่วงเวลาวิฤต (dead time) เมื่อมาเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้การควบคุมแบบสององศา อิสระอย่างเดียว และผลตอบสนองทางพลศาสตร์ดีกว่าด้วย

ในปี 2001 Hwu และ Liaw [18] ได้ทำการทดลองการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ความ ผิดแม่เหล็กที่สับเปลี่ยน (switch reluctance) โดยใช้ระบบคงทนสององศาอิสระและได้ประมาณค่า ทางพลศาสตร์จากระบบที่ศึกษา พบว่าการประมาณค่าทางพลศาสตร์ทำได้ยากแต่ทำได้ และเพิ่ม ความยากโดยการคิดผลของความต้านทานและตัวเก็บประจุซึ่งเป็นตัวหน่วงระบบพบว่าการประมาณ ยังทำได้โดยการควบคุมแบบชนิดนี้ นี่เป็นครั้งแรกที่ใช้การควบคุมคงทนเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ

ในปี 2002 โดย Lee และ Schmidt [19] ได้ใช้การควบคุมคงทนสององศาอิสระในการ สร้างรูปแบบของการควบคุมความไม่แน่นอนและการรบกวนจากภายนอก เป็นครั้งแรกที่ใช้ในการ ควบคุมระบบที่มีความอ่อนไหวสูงมารวมกัน เรียกว่า seeker scan loop system วิธีการที่นำเสนอ นั้นออกแบบบนแกนของความถี่ ยังไม่คำนึงถึงแกนทางเวลา บทความนี้เป็นการพิสูจน์ว่าการควบคุม หนึ่งองศาอิสระมีประสิทธิภาพที่แย่กว่าการควบคุมสององศาอิสระ

ในปี 2003 Knittel และคณะ [20] ได้ใช้การควบคุมคงทนเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระใน การควบคุมความเร็วและความเร็วในระบบการเพิ่มภาระแรงบิดนั้นคือการหมุนม้วนกระดาษเป็น ระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุตคือมีมอเตอร์สามตัวและมีสองโพลส โดยการควบคุมคงทนในการลด ผลของการรบกวนต่างที่เกิดขึ้น ผลการทดลองพบว่า การควบคุมด้วยวิธีนี้ให้ประสิทธิภาพที่ดี มั่นคงไม่ สั่น และดีกว่าระบบที่ควบคุมด้วยหนึ่งองศาอิสระ

ในปี 2004 Itoh และคณะ [21] ได้เริ่มนำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในงาน ควบคุมคงทนสององศาอิสระเป็นครั้งแรก โดยออกแบบภายใต้การสังเคราะห์แบบมิว (the μ -Synthesis) จะใช้ วิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อลดผล ของการสั่นจากการสั่นพ้อง เพื่อคงทนต่อความไม่แน่นอนในระบบและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

ในปี 2008 Patra และคณะ [22] ออกแบบตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ใน แบบป้อนเอาต์พุตคงที่โดยผลลัพธ์อยู่ในรูปแบบการสังเคราะห์เอชอินฟินิตี้สี่บล็อก โดยคำนวณจากค่า ส่วนเพื่อเสถียรภาพและเปรียบเทียบกับเทคนิคควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้เต็มอันดับ และเทคนิคควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ที่ถูกลดอันดับลง ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าระบบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอมีการผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลาที่ดีกว่าการควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบโดยที่ค่าส่วนเพื่อเสถียรภาพสูงและมีอันดับของตัวควบคุมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้

ในปี 2012 Peng และคณะ [23] ได้มีการมองการควบคุมแบบการมอย้อนกลับความคงทนแยกสองแกนอิสระในระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุตและรวมผลของความไม่แน่นอน (Inversion-based robust feedforward–feedback two-degree-of-freedom control approach for multi-input multi-output systems with uncertainty) ผลการทดลองพบว่า การควบคุมที่ถูกระบุดีกว่าการควบคุมคงทนเอชอินฟินิตี้แบบย้อนโดยรวมผลของความอ่อนไหวของระบบ และการควบคุมที่นำเสนอดีกว่าการควบคุมคงทนแยกสองแกนอิสระในระบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต

ในปี 2013 Harnfors และ คณะ [24] ได้การทดลองในมอเตอร์เหนี่ยวนำมาควบคุมการขับเคลื่อนแบบการควบคุมทิศทางสนามแม่เหล็ก (field oriented control) ด้วยวิธีคงทนสองแกนแยกอิสระ เป็นการยืนยันว่าการควบคุมแบบนี้จะล้ำสมัยหรือเป็นการควบคุมในยุคเก่าแต่ก็ยังคงประสิทธิภาพในการควบคุมระบบเพราะการควบคุมสามารถลดผลของพลศาสตร์ไร้รูปแบบและความไม่แน่นอนของภาระแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปมา อีกทั้งบทความนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบแยกอิสระแกนเดียวมีประสิทธิภาพแก่กว่าการควบคุมแบบอิสระสองแกนและเมื่อเพิ่มโมเมนต์แรงเฉื่อยของโหลดทำให้ระบบมีความเสถียรภาพมากขึ้น

2.2 มอเตอร์กระแสตรงชนิด PMDC

2.2.1 การสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น (State-Space modeling of linear system) [25]

การสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้น (State-Space modeling of linear system) สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First – order differential) ดังนี้

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + \dots + b_{1m}u_m \quad (2.1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 + \dots + b_{2m}u_m \quad (2.2)$$

:

$$\frac{dx_n}{dt} = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + b_{n2}u_2 + \dots + b_{nm}u_m \quad (2.3)$$

หากจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n คือ จำนวนตัวแปรสถานะ และ m คือ จำนวนอินพุตของระบบเวกเตอร์สถานะได้แก่

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ โดย } U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \text{ เป็นเวกเตอร์อินพุต}$$

จากสมการ (2.4) ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ของสมการสถานะ (State Equation)

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2.5)$$

$$\text{โดยที่ } A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \text{ และ } B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix}$$

ในระบบทั่วไปเอาต์พุตของระบบสามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับสเตรตและอินพุตได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{o1} & c_{o2} & \dots & c_{on} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{o1} & d_{o2} & \dots & d_{om} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

เมื่อ o คือ จำนวนเอาต์พุต สมการเอาต์พุตสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$Y = CX + DU \quad \text{เมื่อ } Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_o \end{bmatrix}$$

สมการปริภูมิสถานะซึ่งเป็นสมการที่สามารถใช้เป็นแบบจำลองของระบบได้ สามารถเขียนในรูปแบบต่อไปนี้

$$\text{สมการสถานะ (State equation)} \quad \dot{X} = AX + BU \quad (2.7)$$

$$\text{สมการเอาต์พุต (Output equation)} \quad Y = CX + DU \quad (2.8)$$

โดย A คือ เมทริกซ์ของระบบ (System matrix)

B คือ เมทริกซ์ควบคุม (Control matrix)

C คือ เมทริกซ์เอาต์พุต (Output matrix)

D คือ เมทริกซ์ป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward matrix)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X คือ ตัวแปรสถานะ (State Variable)

Y คือ ตัวแปรเอาต์พุต (Output Variable)

2.2.2 แบบจำลองพลศาสตร์เส้นตรงของมอเตอร์กระแสตรง

กระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงและความเร็วเชิงมุมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) [25]

$$\frac{d}{dt} i_a = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{k_v}{L_a} \omega_a + \frac{V_a}{L_a} \quad (2.9)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_a = -\frac{k_t}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega_a + \frac{T_L}{J} \quad (2.10)$$

สมการข้างต้นสามารถอธิบายระบบมอเตอร์กระแสตรงและเมื่อนำไปเข้าสู่สมการปริภูมิสถานะได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_v}{L_a} \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

จากสมการปริภูมิสถานะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของความเร็วเชิงมุมเป็นเอาต์พุตกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบมอเตอร์กระแสตรงเป็นอินพุตดังสมการที่ (2.13)

$$\frac{\omega_a}{V_a} = \frac{k_t/L_a J}{s^2 + \left(\frac{R_a J + L_a B}{L_a J}\right)s + \left(\frac{R_a B + k_t k_v}{L_a J}\right)} \quad (2.13)$$

- โดยที่
- ω_a คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
 - V_a คือ แรงดันอินพุต(volt)
 - R_a คือ ความต้านทานของมอเตอร์กระแสตรง (ohm)
 - L_a คือ ความเหนี่ยวนำของมอเตอร์กระแสตรง (H)
 - J คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของโหลดและมอเตอร์ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
 - B คือ สัมประสิทธิ์ของวิสกอสฟริกชัน ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)
 - k_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิดของมอเตอร์รวม
 - k_v คือ ค่าคงที่ความเร็ว
 - i_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
 - T_L คือ แรงบิดของโหลด(N.m)

จากฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการปริภูมิสถานะข้างต้นโดยมีโพลเท่ากับ 2 ซี่โพลเท่ากับศูนย์ โดยระบบข้างต้นหากมีการเปลี่ยนแปลงโพลจะทำให้ค่าสมรรถนะทางพลศาสตร์เปลี่ยนไป ไม่ว่าจะถี่แค่ไหน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่มีค่าคงที่อาจไม่เหมาะสมกับการควบคุมที่มีย่านการเปลี่ยนโหลดแสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่จะศึกษา ดังนั้นในการหาแบบจำลองเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์และสังเคราะห์ความคงทนนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะได้แบบจำลองที่แม่นยำถ้าใช้ทฤษฎีการหาแบบจำลองแบบเชิงเส้น เช่น การหาแบบจำลองด้วยความผิดพลาดเอาท์พุต (Output Error identification) เป็นต้น เมื่อระบบไม่เป็นเชิงเส้นจึงจำเป็นต้องใช้อย่างยิ่งที่จะใช้การหาแบบจำลองด้วยพีชซึ่งซึ่งเป็นเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีในการหาแบบจำลองจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.3 ทฤษฎี Fuzzy Logic and Fuzzy System[31]

2.3.1 ความหมาย

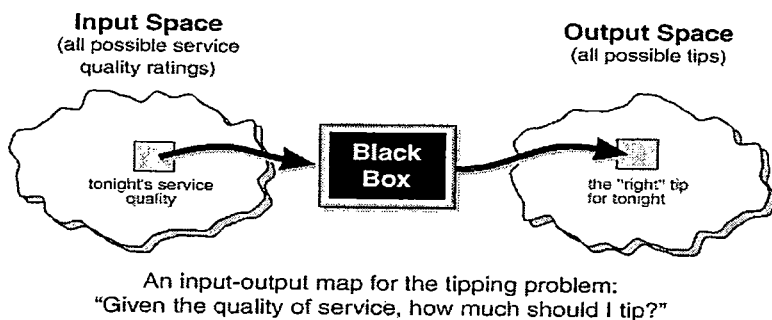
การตัดสินใจแบบตรรกะคลุมเครือ คือ กระบวนการการควบคุมโดยใช้การตัดสินใจแบบคลุมเครือ ซึ่งการตัดสินใจนั้นอยู่บนพื้นฐานของประสบการณ์และกฎของความเป็นจริงในธรรมชาติ ยกตัวอย่างได้จากรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบการตัดสินใจระหว่างแบบฟัซซี่และตรรกะแบบคลุมเครือ [31]

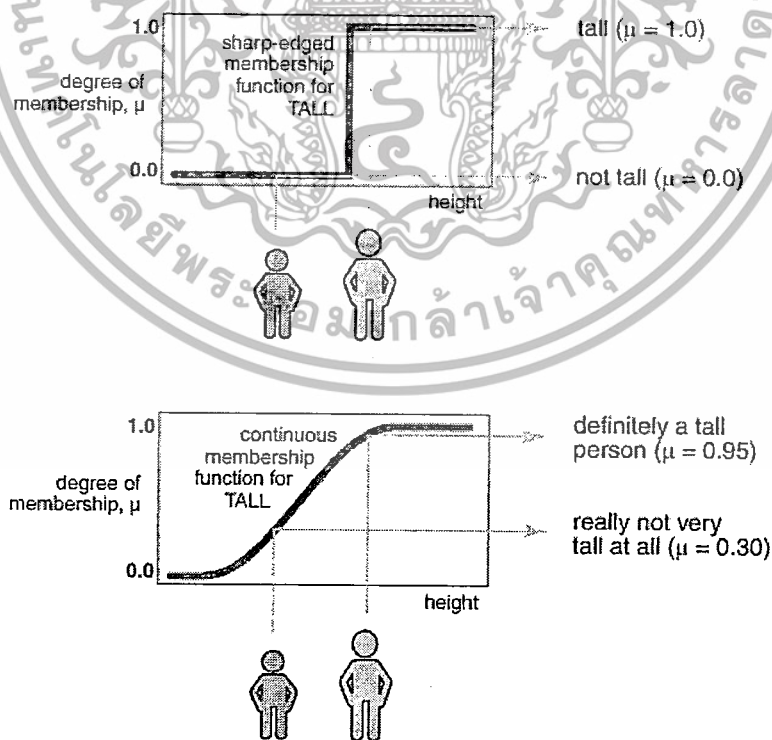
จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเตือนของหล่นใส่หัวซึ่งปกติมนุษย์จะเตือนด้วยปริมาณเชิงคุณภาพมากกว่าเชิงตัวเลข ในทำนองเดียวกันการตัดสินใจแบบคลุมเครือก็จะใช้ความรู้สึกที่เป็นไปได้ในการตัดสินใจว่าจะอะไรควรทำและไม่ควรทำโดยมีปัจจัยหลาย ๆ กรณีที่เกี่ยวข้องได้นำมาคิดเพื่อร่วมในการตัดสินใจด้วยนั้น คือ กฎ ซึ่งจะมีตัวอย่างที่นิยมใช้กันเพื่อแสดงให้เห็นถึงการใช้ตรรกะแบบคลุมเครือในการตัดสินใจปัญหา นั่นคือการให้เงินพิเศษ (tip) แก่ร้านอาหารนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงถึงหลักการของการตัดสินใจแบบคลุมเครือในการให้เงินพิเศษ [31]

จากรูปแสดงให้เห็นว่าในการตัดสินใจแบบนี้เพียงรู้คุณภาพของค่าป้อนเข้าของปัญหาทั้งหมดและผลลัพธ์ของปัญหาที่ใช้ในการตัดสินใจเพียงเท่านี้ ก็สามารถแก้ปัญหาโดยใช้ตรรกะแบบคลุมเครือได้แล้ว ซึ่งคุณภาพของค่าป้อนเข้าสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ในตัวอย่างการให้เงินพิเศษแก่ร้านอาหารก็จะมีปัจจัย 2 อย่าง คือ ความอร่อยของอาหาร และการบริการ สิ่งนี้คือค่าป้อนเข้าของระบบ โดยเมื่อวิเคราะห์ตามความเป็นจริงของสังคมมนุษย์ส่วนใหญ่พบว่า ความอร่อยของอาหารสามารถแบ่งปริมาณเชิงคุณภาพได้อย่างน้อยสองอย่างซึ่งสามารถแบ่งได้มากกว่านั้น นั่นคือ อาหารอร่อย และอาหารไม่อร่อย ในทำนองเดียวกัน การบริการนั้นสามารถแบ่งปริมาณเชิงคุณภาพได้อย่างน้อยสองอย่างซึ่งสามารถแบ่งได้มากกว่านั้น นั่นคือ บริการดี และบริการไม่ดี ซึ่งคุณภาพอาหารและบริการนั้นจะรู้ได้อย่างไรว่าอร่อยและบริการดีมากแค่ไหน นั่นคือความคลุมเครือที่เกิดขึ้น ซึ่งอธิบายได้ดังภาพข้างล่างนี้



รูปที่ 2.3 ระบบตรรกะแบบคลุมเครือ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปอธิบายระบบตรรกะแบบคลุมเครือด้วยความสูง เพราะความสูงก็เป็นปัญหาของความคลุมเครือชนิดหนึ่งว่าจะรู้ได้อย่างไรว่ามนุษย์มีความสูงเท่าไรในเชิงปริมาณถึงเรียกว่าสูงในเชิงคุณภาพและจะรู้ได้อย่างไรว่ามนุษย์มีความสูงเท่าไรในเชิงปริมาณถึงเรียกว่าเตี้ยในเชิงคุณภาพ แต่ละสังคมก็มีความคิดไม่เหมือนกันทำให้เกิดกราฟสมาชิก (Membership) ดังรูปข้างบนขึ้น

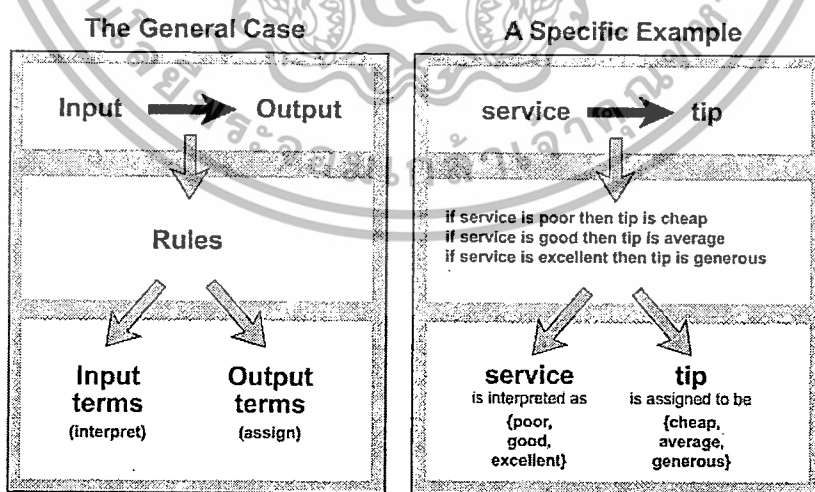
2.3.2 ความได้เปรียบของการใช้ตรรกะแบบคลุมเครือ

1. เข้าใจง่ายไม่ซับซ้อนเพราะไม่มีคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์หนัก
2. วิธีนี้ยืดหยุ่นสามารถใช้แก้ปัญหาในการตัดสินใจได้หลายด้านทั้งด้านวิศวกรรม ด้านธุรกิจ เป็นต้น
3. ใช้ในการตัดสินใจกับปัญหาที่คลุมเครือ ตัดสินใจยากได้ง่ายขึ้นโดยใช้หลักของเหตุผล
4. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาและวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี
5. สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายก็ต่อเมื่อผู้ใช้เครื่องมือนี้ในการแก้ปัญหาจะต้องมีประสบการณ์ที่สูงและเข้าใจระบบที่จะแก้ปัญหาได้ดี
6. วิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบอื่นได้
7. ตรรกะแบบคลุมเครือเป็นภาษาที่เข้าใจง่าย

2.3.3 กระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือ

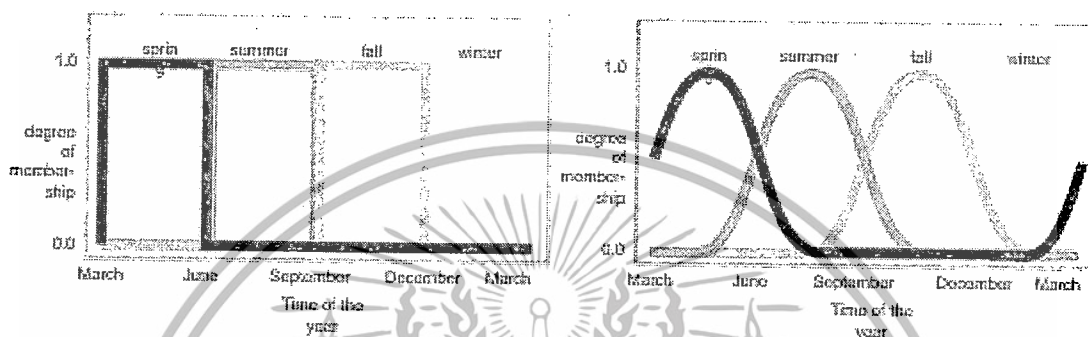
ในการคิดวิเคราะห์แบบตรรกะแบบคลุมเครือจะมีกระบวนการอยู่ 3 อย่าง คือ

1. การนำความจริงมาเข้าสู่ระบบตรรกะแบบคลุมเครือ (Fuzzification) คือ หาฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ของค่าป้อนเข้า
2. การหากฎของตรรกะแบบคลุมเครือ (Inference)
3. การหาค่าที่ออกมาจากตรรกะแบบคลุมเครือ (De-fuzzification) ต้องมีฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ของค่าที่ออกมาจากกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือในกรณีปกติและกรณีการให้เงินพิเศษแก่ร้านอาหาร [31]

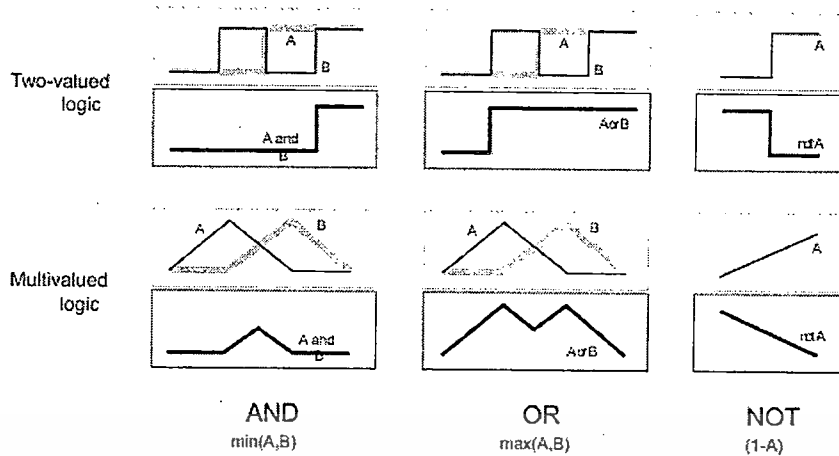
จากรูปทำให้สามารถเห็นภาพรวมของกระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือ ดังนั้นในการทำตรรกะแบบคลุมเครือเริ่มแรกต้องหาฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ของค่าป้อนเข้าและค่าออกจากกระบวนการเสียก่อน ซึ่งฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) จะสามารถแสดงได้ในรูปแบบของกราฟที่นิยามถึง ความสำคัญ ความถี่ หรือน้ำหนักว่ามากน้อยแค่ไหนของปริมาณเชิงคุณภาพโดยให้เป็นระดับ 0 ถึง 1 ซึ่งการกำหนดของระดับขึ้นอยู่กับตัวผู้ใช้วิธีคิดแบบนี้ว่ามันเป็นจริงตามธรรมชาติหรือไม่ หรือถูกหลักตามความเชื่อและทฤษฎีอื่นที่คนอื่นยอมรับหรือไม่ ดังแสดงได้จากภาพของฤดูกาลในด้านล่างนี้



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของฤดูกาลกับ 12 เดือน [31]

จากภาพแสดงให้เห็นถึงในหนึ่งปีมีสี่ฤดูซึ่งเป็นกรอบความคิดของธรรมชาติในซีกโลกเหนือ ซึ่งจะไม่เป็นจริงในประเทศไทย หรือ ประเทศที่อยู่แถบซีกโลกใต้อย่างออสเตรเลีย และฤดูทั้งสี่ คือ ใโป้ไม่ผลิ ร้อน ใโป้ไม่ร่วง และ หนาว ซึ่งจะแปรผันไปทุก ๆ สามเดือน เริ่มตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงมีนาคม อีกปีถัดไป จากรูปที่ 2.5 ทางซ้ายมือและขวามือแสดงให้เห็นว่าฤดูกาลไม่ได้แน่นอนเหมือนกราฟขั้น (step function) คือ พอวันที่ 1 ของเดือนมิถุนายน เวลา 0.01 นาฬิกา ก็จะเปลี่ยนเป็นฤดูร้อนทันที แต่ในความเป็นจริงแล้วจะมีผลของค่าคงที่ธรรมชาติ (ค่า) ฤดูกาลค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นกราฟเกาส์เซียน (Gaussian) ดังรูปทางซ้ายมือ ทำให้สามารถหาฟังก์ชันสมาชิกของความเป็นไปของฤดูในหนึ่งปีได้ดังที่กล่าวมาข้างต้น

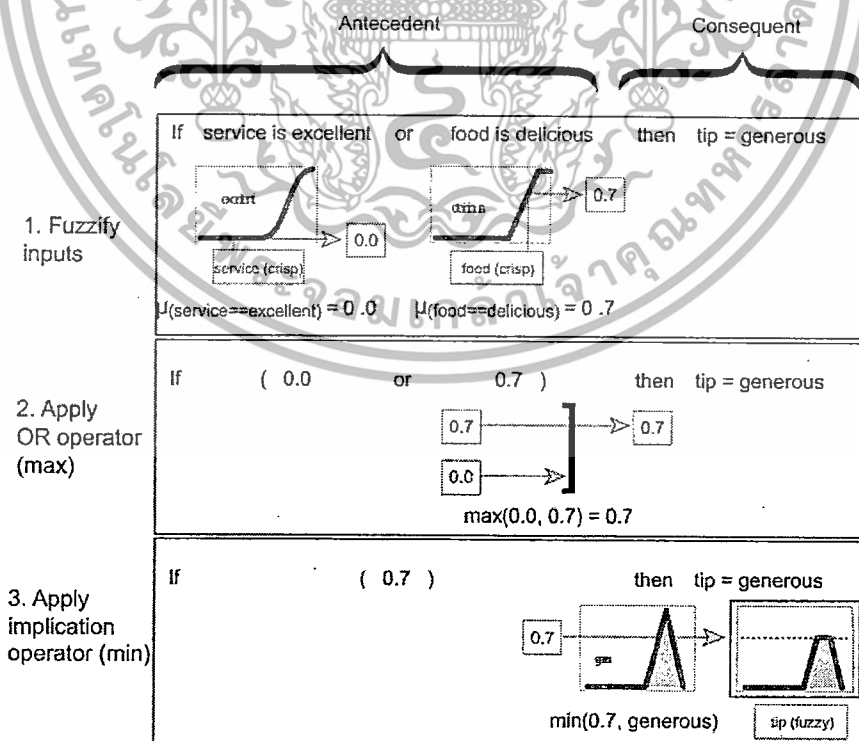
หลังจากสามารถหาฟังก์ชันสมาชิกได้แล้วต่อไปจะเป็นการสร้างกฎในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันสมาชิกของค่าป้อนเข้า และฟังก์ชันสมาชิกของขาที่ออกมาว่าต้องมีความสัมพันธ์กันอย่างไรด้วยกฎของและ (and) หรือ (or) และไม่ (not) ซึ่งอธิบายได้ตามรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.6 กฎของและ(and) หรือ(or) และไม่(not) [31]

เมื่อเข้าใจกฎข้างต้นแล้วก็เข้าสู่กระบวนการสร้างเหตุผลโดยการสร้างกฎถ้า...แล้ว... (if-then) ซึ่งโครงนี้สามารถเพิ่มได้ด้วยกฎตามรูปที่ 2.6 โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิก ของค่าป้อนเข้าและฟังก์ชันสมาชิก ค่าที่ออกมาสร้างกฎเช่นในตัวอย่างการให้เงินพิเศษในร้านอาหารสามารถให้กฎได้ว่าถ้าอาหารอร่อยและบริการดีแล้วให้เงินพิเศษมากที่สุด หรือ ถ้าอาหารอร่อยปานกลางแล้วให้เงินพิเศษปานกลาง เป็นต้น

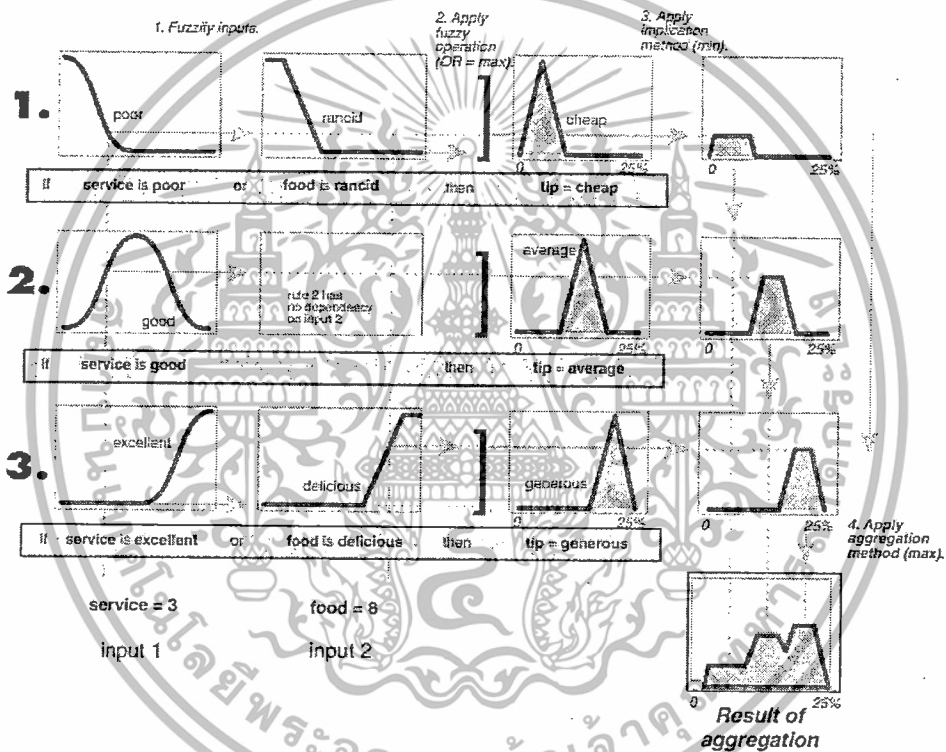
เมื่อตั้งกฎได้แล้วก็สามารถหาค่าที่ออกมาจากฟังก์ชันสมาชิก ของค่าขาออกโดยได้จากกฎที่ตั้งดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงถึงกระบวนการในการหาค่าขาออกของกระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือ [31]

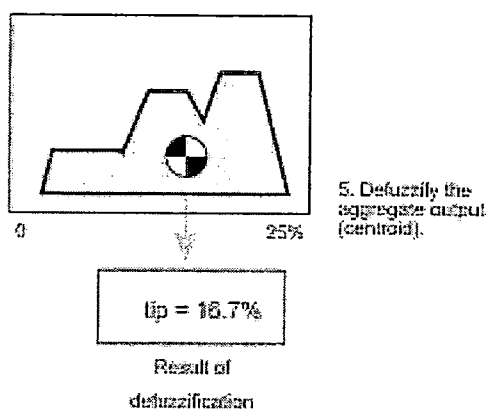
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปสามารถอธิบายได้ว่าถ้าให้คะแนนการบริการเท่ากับ 3 จาก 10 และความอร่อยเท่ากับ 8 จาก 10 เมื่อไปสัมพันธ์กับกฎที่ว่าถ้าบริการเยี่ยมหรืออาหารอร่อยแล้วได้เงินพิเศษมาก โดยใช้กฎหรือมาเลือกค่าสูงสุด จากนั้นใช้ฟังก์ชันสมาชิก ของระดับการบริการเยี่ยมเพราะตั้งกฎที่บริการเยี่ยม ช่างต้นให้คะแนนการบริการเท่ากับ 3 นำไปตัดในกราฟจะได้เท่ากับ 0 ออกมา ในทำนองเดียวกันความอร่อยของอาหารก็คิดแบบเดียวกันได้เท่ากับ 0.7 นำมาหรือเลือกค่าสูงสุดได้ค่า 0.7 ออกมาเช่นกันนำค่าที่ได้ไปตัดกับฟังก์ชันสมาชิก ของค่าที่ออกมาในส่วนของฟังก์ชันสมาชิก ที่ให้เงินพิเศษมากเพื่อหาค่าเงินพิเศษออกมาตามรูปทำอย่างนี้ทุกกฎแล้วนำ ฟังก์ชันสมาชิก มารวมกัน (union) จะได้กราฟของฟังก์ชันสมาชิก ของเงินพิเศษที่ผ่านกระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือออกมา เพื่อไปทำการรวมกลุ่ม (Aggregation) เพื่อหาค่าเงินที่ควรได้ต่อไปดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.8 กระบวนการหาตรรกะแบบคลุมเครือของการกาเงินพิเศษจากร้านอาหาร [31]

การทำกรรวมกลุ่ม (Aggregation) มีหลายแบบเพื่อหาค่าที่ได้จริงจากกระบวนการตรรกะแบบคลุมเครือ ค่าที่ได้เป็นค่าของคำตอบของปัญหาซึ่งวิธีที่นิยมใช้กัน คือ การหาจุดศูนย์กลาง (centroid) ซึ่งสามารถเรียกรวมการนี้ได้ว่า การกำจัดความคลุมเครือ (Defuzzify) ซึ่งอธิบายได้ดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.9 แสดงการหาการกำจัดความคลุมเครือ(Defuzzify)ด้วยการหาจุดศูนย์กลาง [31]

จากการหาการกำจัดความคลุมเครือ (Defuzzify) สามารถมีวิธีได้ 7 แบบในการหาซึ่งขึ้นกับรูปที่ได้จากกระบวนการข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดมีดังนี้

1. ข้อกำหนดสมาชิกสูงสุด (Max-membership principle)
2. วิธีจุดศูนย์กลาง (Centroid method)
3. วิธีเฉลี่ยน้ำหนัก (Weighted average method)
4. สมาชิกสูงสุดเฉลี่ย (Mean-max membership)
5. ผลรวมจุดศูนย์กลาง (Centre of sums)
6. จุดศูนย์กลางของพื้นที่ใหญ่สุด (Centre of largest area)
7. ค่าสูงสุดอันดับแรกหรือค่าสูงสุดอันดับสุดท้าย (First of maxima or last of maxima)

2.4 วิธีการปรับค่าด้วยความผิดพลาดกำลังสองผลรวม (ISE tuning method) [30]

มีหลายเทคนิคในการออกแบบการควบคุมพีไอดี และมีหลายวิธีที่เป็นพื้นฐานในค่าเหมาะสมในการหาค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมพีไอดี ไอเอสไอเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ปรับปรุงแบบจำลองทั่วไปให้มีผลตอบสนองได้ตามต้องการ ซึ่งผลตอบสนองนั้น คือ ฟังก์ชันอ้างอิง (T_{ref}) นั้นเอง โดยสามารถอธิบายหลักการได้ตามสมการที่ (2.14)

$$J_1 = \int_0^{\infty} (y_{sp}(t) - y(t))^2 dt \quad (2.14)$$

โดย $y_{sp}(t)$ และ $y(t)$ จุดที่ต้องการเอาที่หลุดจากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าหลักการของการปรับไอเอสไอบ่อยครั้ง ผลตอบสนองมีการแกว่งหรือผลตอบสนองไม่เสถียรภาพ เนื่องจากค่าของความผิดพลาดเริ่มต้นที่มีค่ามาก ทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยลงได้ยากในการควบคุมป้อนกลับ ดังนั้นสมการที่ (2.14) สามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นดังสมการที่ (2.15)

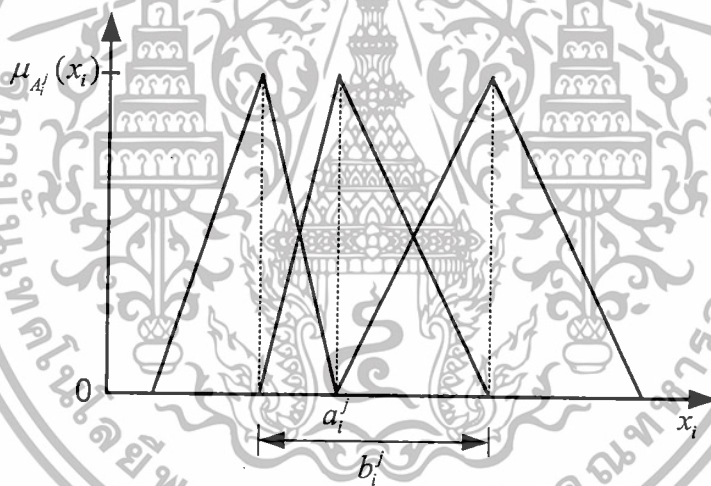
$$J_2 = \int_0^{\infty} (y_a(t) - y(t))^2 dt \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $y_d(t)$ เอาท์พุทที่ต้องการซึ่งได้รับการควบคุมป้อนกลับที่น่าเชื่อถืออย่างแท้จริง จากสมการที่ (2.15) แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการกำหนดฟังก์ชันเอาท์พุทที่ต้องการหรือฟังก์ชันอ้างอิงที่ต้องการซึ่งต้องเหมาะสมและเป็นไปได้ในการทดลองจริง เพราะไม่เช่นนั้น ผลตอบสนองที่ได้อาจจะไม่ได้ตามที่กำหนดไว้ในฟังก์ชันอ้างอิง

2.5 การใช้ฟuzzy ในการออกแบบชุดควบคุม (Fuzzy Control) [2]

ในการออกแบบระบบควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนตัวเองอัตโนมัติได้มีการนำฟuzzy มาเป็นส่วนร่วมในการออกแบบชุดควบคุมที่เป็นชุดควบคุมแบบฟuzzy (Fuzzy Control) หรือแม้กระทั่งการพิจารณาแบบจำลองระบบที่เป็นแบบฟuzzy (Fuzzy Modeling) โดยที่พื้นฐานของฟuzzy จะประกอบไปด้วยฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function) ซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม (Triangle Function) ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Function) หรือฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell Shape Function) เป็นต้น จากข้างล่างนี้จะแสดงภาพฟังก์ชันสมาชิกที่เป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 ภาพฟังก์ชันสมาชิกที่เป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม [14]

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = 1 - \frac{2|x_i - a_i^j|}{b_i^j}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, M \quad (2.16)$$

เมื่อ x_i คือ อินพุทของฟuzzy a_i^j คือจุดศูนย์กลางของสามเหลี่ยม (Center of Triangle) b_i^j คือความกว้างของฐานของสามเหลี่ยม (Width of Triangle) และ M คือจำนวนของกฎของฟuzzy (Number of Fuzzy Rule)

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟuzzy (Fuzzy Identification) เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการพิจารณาระบบคล้ายกับหลักการพื้นฐานของฟuzzy โดยที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบฟัซซีแบบสมบูรณ์ (Pure Fuzzy Logic System) เป็นระบบโดยจะใช้กฎของฟัซซี (IF-THEN) มาเป็นตัวจัดเทียบ (Mapping) จากเซตของอินพุตที่อยู่ในขอบเขต $U \subset R^n$ ไปยังเซตของเอาต์พุตที่อยู่ในขอบเขต $V \subset R$ ซึ่งจะมีการใช้กฎของฟัซซีดังนี้

$$R^{(l)} : \text{IF } x_i \text{ is } F_i^l \text{ and ... and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l \quad (2.17)$$

เมื่อ F_i^l และ G^l คือ เซตของอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี โดยที่ $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$, $y \in V$ และ $l=1, 2, \dots, M$ จากสมการ (2.17) ก็จะทำให้พบว่าการจัดเทียบเซตของฟัซซีจาก $F_1^l \times \dots \times F_n^l \rightarrow G^l$ แต่ระบบฟัซซีชนิดนี้จะไม่สามารถนำมาใช้งานในเชิงวิศวกรรมได้ เนื่องจากเซตของอินพุตและเอาต์พุตไม่ใช่ค่าคงที่ใด ๆ (Real-valued Variables) ดังนั้น ทาคากิ-ซีเงะโนะ (Takagi-Sugeno) จึงได้เสนอระบบของฟัซซีที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นค่าคงที่



2. ระบบฟัซซีแบบทาคากิ-ซีเงะโนะ (Takagi-Sugeno Fuzzy System) คือระบบที่มีการกำหนดเงื่อนไข IF-THEN ของฟัซซีให้มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$L^{(l)} : \text{IF } x_i \text{ is } F_i^l \text{ and ... and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + \dots + c_n^l x_n \quad (2.18)$$

เมื่อ F_i^l คือเซตของกฎฟัซซี c_i คือค่าคงที่ใด ๆ $l=1, 2, \dots, M$ และ y^l คือเอาต์พุตของระบบ เมื่อกำหนดค่าคงที่ใด ๆ ของอินพุต $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ แล้วจะสามารถพิจารณาเอาต์พุตของระบบฟัซซีแบบทาคากิ-ซีเงะโนะได้ดังนี้

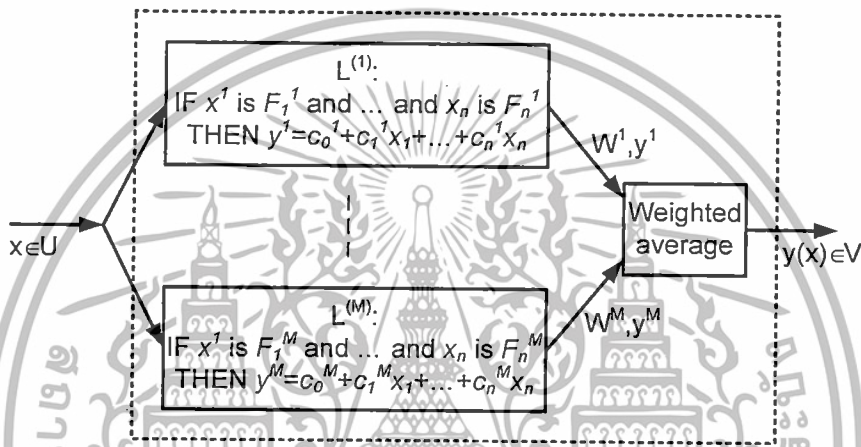
$$y(\underline{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M w^l y^l}{\sum_{l=1}^M w^l} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ w' คือ ค่าน้ำหนัก (Weight) ของระบบที่สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

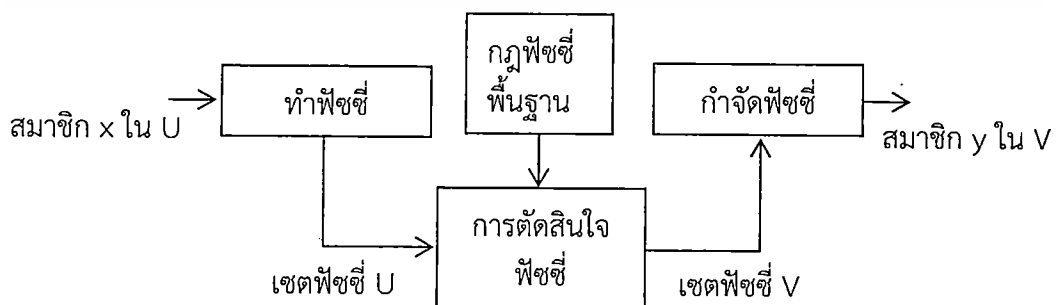
$$w' = \prod_{i=1}^n \mu_{F_i'}(x_i) \tag{2.20}$$

จากการพิจารณาระบบฟัซซีแบบทาคาจิ-ซีเงะโนะ จะพบว่าระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท (2.18) ก็จะเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ c'_i เพื่อเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบในแต่ละช่วง โดยเมื่อมีการป้อนอินพุต (\underline{x}) เข้าไปในระบบฟัซซีแบบทาคาจิ-ซีเงะโนะ ก็จะสามารถประมาณเอาต์พุต ($y(\underline{x})$) ของระบบออกมาได้



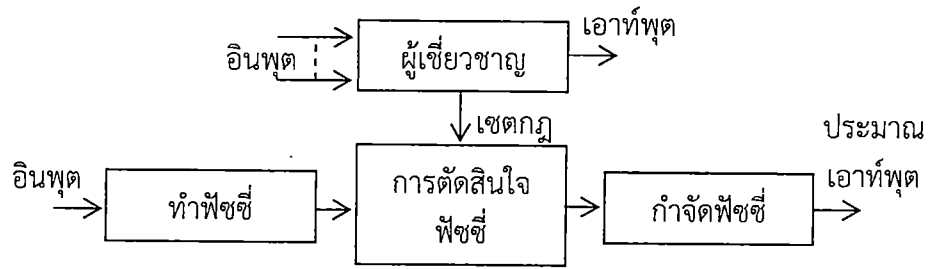
รูปที่ 2.12 ภาพระบบฟัซซีแบบทาคาจิ-ซีเงะโนะ [15]

3. ระบบฟัซซีที่ประกอบไปด้วยตัวทำให้คลุมเครือและตัวกำจัดความคลุมเครือ (Fuzzy Logic Systems with Fuzzifier and Defuzzifier) คือ ระบบฟัซซีที่มีการพัฒนามาจากระบบฟัซซีแบบสมบูรณ์ที่ไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงวิศวกรรมได้อันเนื่องมาจากอินพุตและเอาต์พุตของระบบไม่ใช่ค่าคงที่ใด ๆ (Real-valued Variables) จะพบว่าในระบบนี้จะมีตัวทำให้คลุมเครือ (Fuzzifier) ที่เป็นตัวจัดเทียบจากค่า U ให้เป็นเซตของ U (Fuzzy Sets in U) และมีตัวกำจัดความคลุมเครือ (Defuzzifier) ที่จัดเทียบจากเซตของเอาต์พุต V (Fuzzy Sets in V) ให้เป็นค่า V



รูปที่ 2.13 ภาพระบบฟัซซีที่ประกอบไปด้วยตัวทำให้คลุมเครือและตัวกำจัดความคลุมเครือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่บริษัทที่เรากำลังศึกษาอยู่ เราขอสงวนสิทธิ์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

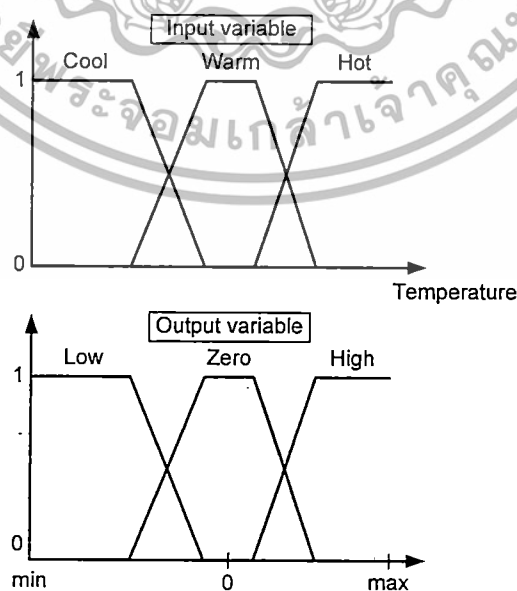


รูปที่ 2.14 ภาพของหลักการออกแบบชุดควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Control)

การออกแบบชุดควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Control) เป็นการออกแบบชุดควบคุมแบบชาญฉลาด (Intelligent Control) ที่สามารถปรับตัวเองให้สามารถควบคุมระบบได้อย่างเหมาะสม ซึ่งพื้นฐานของการออกแบบได้มาจากองค์ความรู้ของมนุษย์ที่ถูกนำมาแปลงให้เป็นกฎของฟัซซี่ (Rule Sets) ซึ่งเป็นตัวอย่างการควบคุมความเย็นให้มีอุณหภูมิตามที่ต้องการ ก่อนอื่นจะต้องมีการตรวจวัดค่าอุณหภูมิในช่วงเวลานั้นขึ้นมาก่อน โดยต้องอ่านค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (Thermometer) แล้วก็ทำการปรับการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งมีเงื่อนไขในการปรับอุณหภูมิดังนี้

- IF temperature = Cool THEN output = LOW.
- IF temperature = Warm THEN output = ZERO.
- IF temperature = Hot THEN output = HIGH.

เมื่อมีการตรวจวัดอุณหภูมิก็จะพบว่ามีอุณหภูมิอยู่ 3 ลักษณะ คือ อุณหภูมิเย็น (Cool) อุณหภูมิอุ่น (Warm) และร้อน (Hot) ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนการทำงานของเครื่องปรับอากาศดังนี้ คือ ลดความเย็นลง (LOW) ให้ทำงานไปตามปกติ (ZERO) และเพิ่มความเย็นขึ้น (HIGH)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.15 ภาพอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี่[31] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (System Identification) [2]

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (System Identification) มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการ ออกแบบชุดควบคุมของระบบต่าง ๆ เนื่องจากการจำลองการทำงานของระบบให้อยู่ในรูปของ ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงสามารถออกแบบและจำลองการทำงานของชุดควบคุมบน คอมพิวเตอร์ได้ โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีหลักการหาแบบจำลองได้ 3 วิธีหลัก คือแบบที่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ (White-box) แบบที่รู้โครงสร้างของระบบ แต่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ (Gray-box) และแบบที่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ (Black-box) โดยที่การแบบจำลองทั้ง 3 แบบนี้จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังนี้

- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ (White-box)ที่มีการหาแบบจำลองของระบบโดยหาสมการความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) จากอินพุตไปยังเอาต์พุตของระบบ จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเข้าไปในสมการ จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่รู้โครงสร้างของระบบแต่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ (Gray-box)ที่มีการหาแบบจำลองของระบบคล้ายกับแบบที่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ แต่การแบบจำลองแบบนี้จะไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แท้จริงของระบบ ดังนั้นจึงต้องมีการ ประมาณค่าพารามิเตอร์ขึ้นมาโดยใช้ขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมภายใต้สมการความสัมพันธ์ของ ฟังก์ชันถ่ายโอนจากอินพุตไปยังเอาต์พุตของระบบที่ทราบอยู่แล้ว และมีการวัดค่าความคลาดเคลื่อน ระหว่างแบบจำลองกับระบบจริง เพื่อทดสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์

- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ (Black-box) จะต่างจากการหาแบบจำลองทั้ง 2 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้น คือ จะไม่ทราบทั้งโครงสร้าง ของฟังก์ชันถ่ายโอนและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนั้น จึงต้องมีการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่เปลี่ยนโครงสร้างของฟังก์ชันถ่ายโอนและพารามิเตอร์ของระบบไปจนกระทั่งได้คลาดเคลื่อนระหว่าง แบบจำลองกับระบบจริงที่แตกต่างน้อยที่สุด

จากการหาแบบจำลองของระบบชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังสามารถจำแนกการ หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยพิจารณาจากโครงสร้างของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ด้วย ซึ่งมีการพิจารณาแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear Model) และแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มี แบบจำลองหลายตัวรวมกันอยู่โดยใช้ฟัซซี (Fuzzy Model)

เทคนิคการหาพารามิเตอร์ระบบ เป็นการหาพารามิเตอร์ทางแบบจำลองพลวัตของระบบ โดยอาศัยข้อมูลที่วัดได้จากระบบใดระบบหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการ ศึกษา นั้น ๆ โดยในการหารูปแบบของระบบพลวัตจะมีวิธีประมาณการหรือแบบจำลองหลายแบบ ซึ่งรูปแบบในประมาณการแต่ละแบบจะเหมาะกับการหาพารามิเตอร์ของระบบที่แตกต่างกัน เช่น สำหรับโครงสร้างของระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear structure) จะใช้รูปแบบ ARX (Auto Regressive with external input) รูปแบบ OE (Output Error) หรือรูปแบบ ARMAX (Auto Regressive Moving Average with external input) ในการหาแบบจำลองออกมา แต่สำหรับโครงสร้างของ ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear structure) จะใช้รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial

เอกลารันเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

neural network) หรือใช้แบบจำลองแบบคลุมเครือ (Fuzzy model) ในการหาแบบจำลองของระบบออกมาแทน

2.6.1 การประมาณการโดยใช้รูปแบบ OE (Output Error)[27]

แบบจำลองนี้อาศัยการประมาณค่าความผิดพลาดในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบซึ่งรูปแบบโครงสร้างของการประมาณการแบบ OE จะเป็นดังนี้

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - nk) + e(t) \quad (2.21)$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \quad (2.22)$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf} \quad (2.23)$$

ค่า q คือ ตัวคูณเปลี่ยนเวลาย้อนหลัง ยกตัวอย่างเช่น $q^{-1}u(t) = u(t-1)$ เป็นต้น

โดยที่ $y(t)$ คือ ค่าเอาต์พุต ณ เวลา t

$u(t)$ คือ ค่าอินพุต ณ เวลา t

n_b คือ จำนวนขั้วโพลของระบบบวกหนึ่ง

n_f คือ จำนวนโพลของระบบ

n_k คือ จำนวนการล่าช้าข้อมูล ก่อนที่อินพุตจะมีผลต่อเอาต์พุตของระบบ

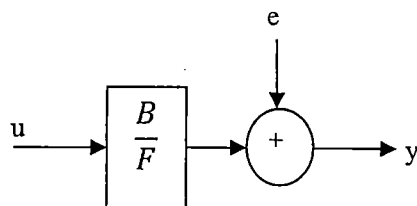
$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด

b_1, \dots, b_{n_b} และ f_1, \dots, f_{n_f} คือ ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เราต้องการทราบ

จากสมการที่ (2.21) จะเห็นว่าสมการอยู่ในรูปของสมการไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete Time) จึงต้องแปลงให้อยู่ในรูปสมการต่อเนื่องของเวลา (Continuous Time) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{B(s)}{F(s)} = \frac{b_{n_b}s^{(n_b-1)} + b_{n_b-1}s^{(n_b-2)} + \dots + b_1}{s^{n_f} + f_{n_f}s^{(n_f-1)} + \dots + f_1} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) เขียนในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปวิธีการใช้ เมื่อใส่ข้อมูลค่าอินพุต และเอาต์พุต จากระบบที่วัดได้ พร้อมกับจำนวนของโพลและจำนวนซีโรบวกหนึ่งของระบบ ซึ่งในการใส่ค่า n_f (จำนวนโพล) n_b (จำนวนซีโร+1) และ n_k (จำนวนการสุ่มข้อมูล) นั้นก็จะอาศัยการสุ่มค่าตามแบบของโมเดลกล่องดำ (Black box model) คือไม่รู้ค่าจำนวนของโพลและซีโรของระบบมาก่อน ใช้การสุ่มค่าต่างๆจนกว่าจะได้คำตอบที่ถูกต้องออกมานั่นเอง ซึ่งคำตอบที่ออกมานั้นคือค่าพารามิเตอร์ f_1, f_2, \dots, f_{n_f} และ b_1, b_2, \dots, b_{n_b} ของสมการของระบบที่ต้องการ

2.6.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบฟัซซี (Fuzzy Model) [2]

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear Model) ที่มีโครงสร้างของแบบจำลองเพียงตัวเดียวสามารถจำลองการทำงานของระบบได้ดีก็ต่อเมื่อมีช่วงการทำงานที่ไม่กว้างมาก แต่ถ้างานที่มีช่วงของการทำงานก็กว้างมาก ๆ จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้น จะไม่สามารถจำลองการทำงานของระบบได้ใกล้เคียงกับระบบจริงเท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้มีการเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซี [26] ที่จำลองการทำงานของระบบได้ใกล้เคียงระบบจริงได้มากขึ้น เพราะจะมีการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆภายในฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมี เวกเตอร์ของเอาต์พุตของระบบ (Scheduling Vector) ที่ทำให้สามารถเลือกแบบจำลองในช่วงต่างๆของระบบแบบฟัซซีมาใช้งานได้ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซีจะหาได้โดยพิจารณาคู่ลำดับอินพุต-เอาต์พุต $([u(t), y(t)])$ เช่นเดียวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้น จากนั้นก็มีการพิจารณาเมตริกซ์ของเอาต์พุตและอินพุตของฟัซซีดังนี้

$$z = \begin{bmatrix} z^1 \\ z^2 \\ \vdots \\ z^N \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^N \end{bmatrix}, \quad \beta_{i_1, \dots, i_n} = \begin{bmatrix} \beta_{i_1, \dots, i_n}^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_{i_1, \dots, i_n}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \beta_{i_1, \dots, i_n}^N \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

เมื่อ z คือ เวกเตอร์อินพุตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซี

y คือ เอาต์พุตของระบบ

β คือ เมตริกซ์ของความสัมพันธ์ของเอาต์พุตและอินพุตของแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ในแต่ละช่วง (Local Model) โดยที่ $\beta_{i_1, \dots, i_n}^j = \prod_{j=1}^n A_{j, i_j}(z_j)$

n คือ จำนวนเซตของข้อมูลอินพุต-เอาต์พุต

จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพีชซีซีจะต้องมีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อประมาณค่าเอาต์พุตของแบบจำลองกับเอาต์พุตของระบบจริงในแต่ละช่วงให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยใช้เงื่อนไขดังสมการดังนี้

$$\min_{\theta'} \left\{ \frac{1}{2} (\theta')^T H \theta' + c^T \theta' \right\} \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$\theta' = [(z')^T z']^{-1} (z')^T y,$$

$$z' = [\beta_{1,\dots,1,1} z_e, \beta_{1,\dots,1,2} z_e, \dots, \beta_{M_1,\dots,M_n} z_e],$$

$$H = 2(z')^T z',$$

$$c = -2(z')^T y$$

$$z_e = [z \quad 1]$$

จากทฤษฎีของการออกแบบชุดควบคุมและการหาแบบจำลองของระบบในบทนี้สามารถนำขั้นตอนการออกแบบชุดควบคุมคงทนร่วมกับขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาออกแบบชุดควบคุมคงทนแบบกำหนดโครงสร้างของชุดควบคุมได้ นอกจากนั้นยังได้นำไปใช้กับระบบที่มีหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต (MIMO) ที่ยากต่อการออกแบบชุดควบคุมที่มีความคงทนและสมรรถนะที่ดี

2.7 ระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control)[1]

ระบบควบคุมแบบคงทน [28] หมายถึงระบบที่มีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือทำงานอย่างมีประสิทธิภาพถึงแม้จะเกิดการรบกวนต่อภายนอกหรือภายในระบบแล้วยังคงมีความคงทนในการทำงานต่อเนื่องไปได้ การวิเคราะห์ระบบแบ่งเป็น 2 แบบคือ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) G_0
2. ระบบจริง (Real Process) G_Δ หรือ $G_\Delta = G_0 + \Delta G$

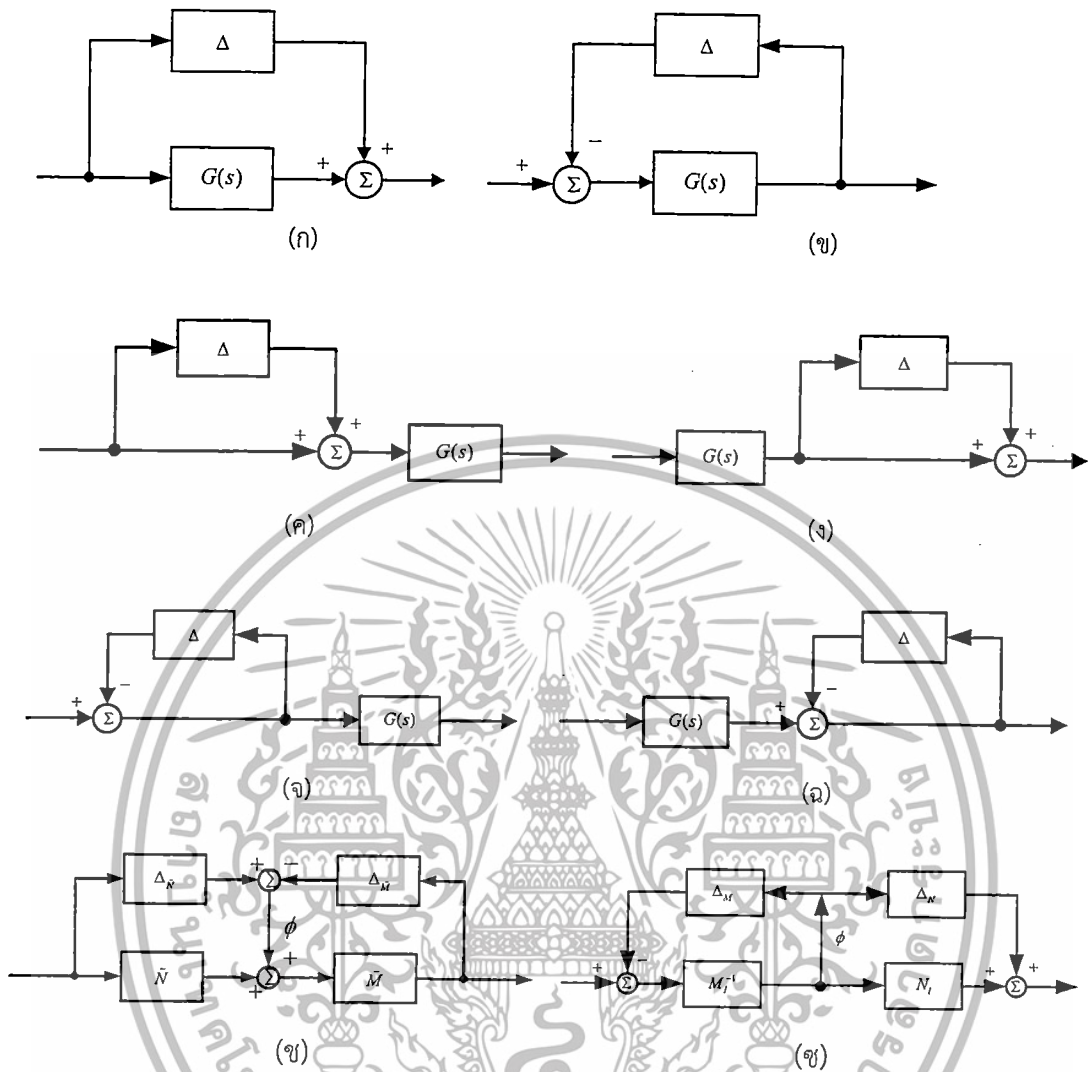
โดย Δ หมายถึงความไม่แน่นอนซึ่งต้องการให้ระบบที่จำลองขึ้นทางคณิตศาสตร์ใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด ในการออกแบบระบบจำเป็นต้องมีความคงทนต่อความไม่แน่นอนที่สามารถเกิดขึ้นได้ทุกขณะและอาจเกิดความไม่แน่นอนขึ้นภายนอกและภายในระบบ สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนจากภายนอกระบบเช่นสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์ (Sensor Noise) และความไม่แน่นอนจากภายในระบบเช่นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบในการออกแบบการควบคุมจะมีข้อกำหนดต่าง ๆ ไว้เช่น

- การปรับตั้งการคำนวณหาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบจำลอง
- กำหนดการทำงานในขณะที่ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อตรวจสอบความคงทน
- กำหนดสมรรถนะของระบบเพื่อตรวจสอบความคงทน

การรบกวนทางพลวัต (Dynamic perturbations) [29] ส่วนมากเกิดจากค่าพารามิเตอร์ภายในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ในการจำลองการรบกวนที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้เช่นความไม่แน่นอนอาจเกิดขึ้นได้และไม่สามารถกำหนดโครงสร้างได้ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์ Δ , $G_p(s)$ หมายถึงระบบที่มีการก่อกวนทางพลวัตและ $G(s)$ หมายถึงระบบปกติ การรบกวนรูปแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โทร. 02-214-9434 หรือ 02-214-9435

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

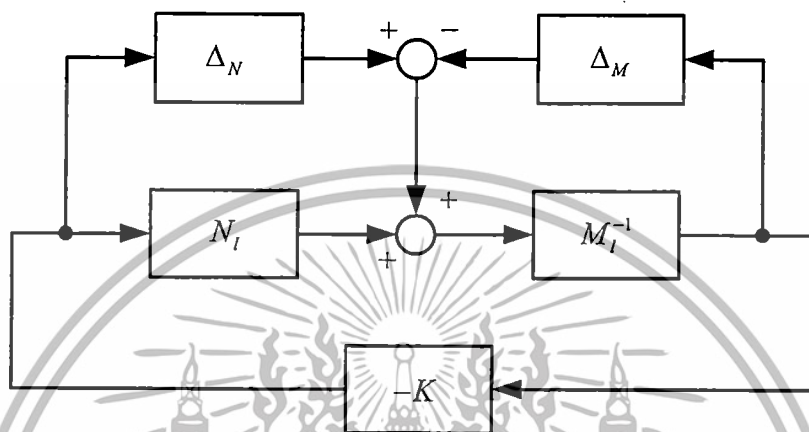


รูปที่ 2.17 การรบกวนรูปแบบต่าง ๆ [1]

- (ก) การรบกวนด้านเอาต์พุตของระบบ, $G_p(s) = G(s) + \Delta$
- (ข) การรบกวนด้านอินพุตของระบบ, $(G_p(s))^{-1} = (G(s))^{-1} + \Delta$
- (ค) การรบกวนเชิงผลคูณด้านอินพุตของระบบ, $G_p(s) = G(s)[I + \Delta]$
- (ง) การรบกวนเชิงผลคูณด้านเอาต์พุตของระบบ, $G_p(s) = [I + \Delta]G(s)$
- (จ) การรบกวนเชิงผลคูณด้านอินพุตผกผัน, $(G_p(s))^{-1} = [I + \Delta](G(s))^{-1}$
- (ฉ) การรบกวนเชิงผลคูณด้านเอาต์พุตผกผัน, $(G_p(s))^{-1} = (G(s))^{-1}[I + \Delta]$
- (ช) การรบกวนตัวประกอบเฉพาะร่วมทางซ้าย, $G_p(s) = (\tilde{M} + \Delta_{\tilde{M}})^{-1}(\tilde{N} + \Delta_{\tilde{N}})$
- (ฌ) การรบกวนตัวประกอบเฉพาะร่วมทางขวา, $G_p(s) = (N + \Delta_N)(M + \Delta_M)^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไม่แน่นอนถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ต่อไปนี้คือ (\tilde{M}, \tilde{N}) หมายถึง ตัวประกอบเฉพาะร่วมทางซ้าย (M, N) หมายถึงตัวประกอบเฉพาะร่วมทางขวา $G(s)$ หมายถึง ระบบปกติและ $(\Delta_{\tilde{M}}, \Delta_{\tilde{N}}), (\Delta_M, \Delta_N)$ โดยสัญลักษณ์ Δ หมายถึงการรบกวนบนตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor) หรือการรบกวนต่อระบบสำหรับใช้เป็นขอบเขตนอร์ม $\sigma[\Delta(j\omega)] \leq \delta(j\omega)$ โดย ω หมายถึง ความถี่ δ หมายถึง ฟังก์ชันสเกลาร์และ $\sigma[\cdot]$ หมายถึง ค่าเอกฐาน (Singular Value)

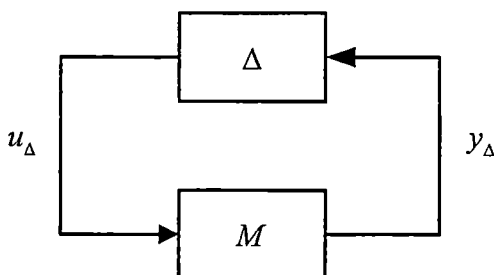


รูปที่ 2.18 ความไม่แน่นอนของตัวประกอบเฉพาะร่วม [2]

ขอบเขตสมรรถนะความคงทนของเอชอินฟินิตี้นอร์ม ($RS \Leftrightarrow \|M\|_\infty < 1$) เมื่อขอบเขต นอร์มรวมกับความไม่แน่นอนทำให้ได้ส่วนของสมรรถนะความคงทนใน $\|M\|_\infty$ ความไม่แน่นอนจะได้

$$G_p = (M_i + \Delta_M)^{-1} (N_i + \Delta_N), \quad \|[\Delta_N \ \Delta_M]\|_\infty \leq \varepsilon \tag{2.27}$$

โดย $G = M_i^{-1} N_i$ หมายถึงตัวประกอบเฉพาะร่วมทางด้านซ้ายสำหรับระบบปกติและใช้ กับงานวิจัยของ McFarlane และ Glover [16] การแยกตัวประกอบเฉพาะร่วมออกจากระบบและ ความต้องการการควบคุมให้มีสมรรถนะความคงทนเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรมที่เหมาะสมกับ โครงสร้างของ $M - \Delta$



รูปที่ 2.19 โครงสร้าง $M - \Delta$ การวิเคราะห์สมรรถนะความคงทน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

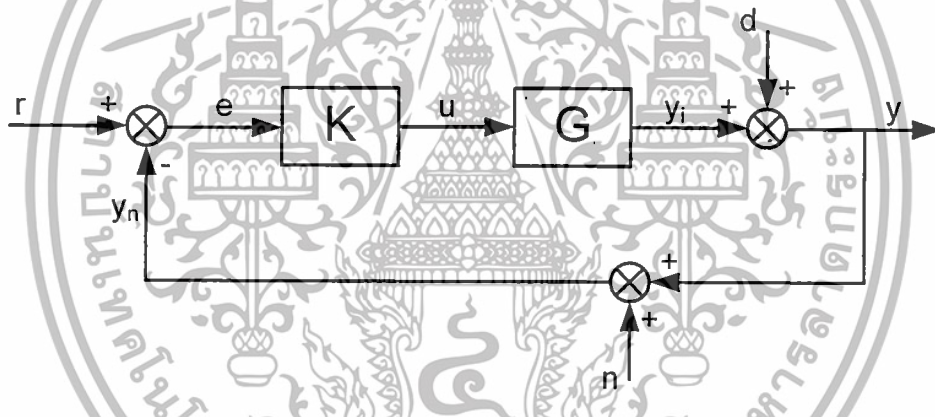
$$\Delta = [\Delta_N \ \Delta_M]; \quad M = - \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I + GK)^{-1} M_i^{-1} \quad (2.28)$$

ความสัมพันธ์ในการกำหนดสมรรถนะความคงทนคือ

$$RS \forall \|\Delta_N \ \Delta_M\|_\infty \leq \varepsilon \Leftrightarrow \|M\|_\infty < 1/\varepsilon \quad (2.29)$$

2.7.1 ทฤษฎีการจัดสัณฐานวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้[2]

การจัดสัณฐานวงรอบแบบเดิม (Classical Loop Shaping) จะเริ่มจากการพิจารณาระบบทั่วไปที่มีการป้อนกลับ ซึ่งระบบ (G) แบบป้อนกลับนี้จะมีชุดควบคุม (K) สัญญาณอ้างอิง (r) เอาต์พุตของระบบ (y_i) ตัวรบกวน (d) เอาต์พุตของระบบที่รวมตัวรบกวนเข้าไปด้วย (y) สัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับสัญญาณ (n) ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสิ่งที่ต้องการให้ระบบตอบสนองกับเอาต์พุตของระบบ (e) เอาต์พุตของระบบที่รวมตัวรบกวนและสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับสัญญาณ (y_n) และอินพุตของระบบ (u) ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับทั่วไป [2]

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.20 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$y = y_i + d \quad (2.30)$$

เมื่อ $y_i = eKG$ และพิจารณาหาความคลาดเคลื่อนจะได้ $e = r - y - n$ เมื่อนำกลับไปแทนค่าในสมการที่ (2.30) จะได้

$$y = KG(r - y - n) + d \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$y = \frac{KGr}{1+KG} - \frac{KGn}{1+KG} + \frac{d}{1+KG} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.32) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของเอาต์พุตของระบบ (y) และสัญญาณอ้างอิง (r) เพื่อหาสมรรถนะของระบบ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{y}{r} = \frac{KG}{1+KG} - \frac{KGn}{r(1+KG)} + \frac{d}{r} \frac{1}{1+KG} \quad (2.33)$$

ในการออกแบบชุดควบคุมจะต้องการหาชุดควบคุม K ที่ทำให้

$$\frac{y}{r} = 1 \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) พบว่าหากต้องการให้การควบคุมที่ดีที่ทำให้ $y \approx r$ จะต้องออกแบบให้เทอมที่ 1 ($\frac{KG}{1+KG}$) ของสมการที่ (2.33) ควรค่าเท่ากับ 1 และในเทอม $\frac{KGn}{r(1+KG)}$ และ $\frac{1}{1+KG}$ ควรเท่ากับ 0 อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากสมการแล้วจะทำให้ได้ตามอุดมคติข้างต้นในสมการที่ (2.34) เป็นไปไม่ได้ เนื่องจากถ้ากำหนดอัตราการขยายของชุดควบคุม (K) ให้มีค่าสูงมากๆ ทำให้เทอมที่ 1 ($\frac{KG}{1+KG}$) และเทอมที่ 2 ($\frac{KGn}{r(1+KG)}$) มีค่าประมาณ 1 (≈ 1) ส่วนเทอมที่ 3 ($\frac{1}{1+KG}$) มีค่าประมาณ 0 (≈ 0) ดังนั้น เมื่อแทนสัมประสิทธิ์ในเทอมต่างๆในสมการ (2.33) จะทำให้ได้อัตราส่วนของเอาต์พุตและสัญญาณอ้างอิงดังนี้

$$\frac{y}{r} = 0 \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) แสดงให้เห็นว่าระบบไม่สามารถตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงได้ เพราะเอาต์พุต (y) จะมีค่าเท่ากับ 0 เสมอ และถ้ากำหนดอัตราการขยายของชุดควบคุมให้มีค่าต่ำมาก ๆ ทำให้เทอมที่ 1 และเทอมที่ 2 มีค่าประมาณ 0 (≈ 0) ส่วนเทอมที่ 3 ($\frac{1}{1+KG}$) มีค่าประมาณ 1 (≈ 1) จะทำให้ได้อัตราส่วนของเอาต์พุตและสัญญาณอ้างอิง ดังสมการที่ (2.36) จะให้เอาต์พุตตอบสนองตามตัวรบกวน (d)

$$\frac{y}{r} = \frac{d}{r} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อสังเกตข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าหากต้องการให้ระบบตอบสนองที่ดีและทนต่อตัวรบกวนต้องทำให้อัตราการขยายของชุดควบคุมมีค่าสูง แต่ชุดควบคุมแบบนี้จะมีสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับสัญญาณ (n) เข้ามาในระบบได้ และหากต้องการให้ทนต่อสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับสัญญาณได้ต้องทำให้อัตราการขยายของชุดควบคุมมีค่าต่ำ แต่ตัวรบกวน (d) จะมีผลต่อระบบ อย่างไรก็ตามระบบที่ตอบสนองได้ดีและทนต่อตัวรบกวนจะทำงานอยู่ในย่านความถี่ต่ำ และระบบที่สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับสัญญาณมักจะอยู่ในย่านความถี่สูง ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่า ระบบที่ดีต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้ คือ

- ในช่วงความถี่ต่ำ (Low Frequency) ระบบควรมีค่าอัตราการขยายที่สูง (High Gain) ซึ่งในที่นี้หมายถึงสมรรถนะที่ดีขึ้น
- ในช่วงความถี่สูง (High Frequency) ระบบควรมีค่าอัตราการขยายที่ต่ำ (Low Gain) หมายถึง ระบบมีความคงทน (robust stability) ต่อสัญญาณรบกวนได้ดี

พื้นฐานของเทคนิคนี้ อาศัยการแปลงการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (Coprime Factorization) ร่วมกับเทคนิคการควบคุมแบบการจัดสัดส่วนวงรอบ (Loop Shaping) สำหรับเทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบอื่นดังนี้

- ไม่ต้องออกแบบค่าน้ำหนักที่ไม่แน่นอนซึ่งในบางระบบทำได้ยากหรือทำไม่ได้
- สามารถใช้เทคนิคการจัดสัดส่วนวงรอบ (Loop Shaping) ซึ่งเป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีและนิยมใช้ในการควบคุมแบบดั้งเดิมมาออกแบบ ทำให้การออกแบบเข้าใจง่ายกว่า
- ระบบเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการควบคุมตารางจัดอัตราขยาย (Gain Scheduling Control)

อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ยังมีข้อเสียเช่นเดียวกับเทคนิคเอชอินฟินิตี้แบบอื่น ๆ คือ ตัวควบคุมที่ออกแบบมีอันดับสูงและโครงสร้างซับซ้อนทำให้ใช้งานจริงได้ยาก

สำหรับทฤษฎีการจัดสัดส่วนวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้แบบเดิมนั้นมีขั้นตอนพอสังเขปดังต่อไปนี้

1. ออกแบบฟังก์ชันน้ำหนัก น้ำหนักก่อน (pre-compensation) คือ W_1 เพื่อหาความต้องการเชิงสมรรถนะและลดผลจากตัวรบกวน (disturbance) และออกแบบฟังก์ชันน้ำหนักน้ำหนักหลัง (post-compensation) คือ W_2 เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวตรวจจับสัญญาณ (noise sensor) สำหรับระบบ G (Plant) ซึ่งหากกำหนดให้สัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับมีน้อย (ในทางปฏิบัติมักมีเซนเซอร์ที่ดีและระบบโดยทั่วไปจะลดทอนสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงอยู่แล้ว) ฟังก์ชัน W_2 สามารถกำหนดเป็นค่าคงที่ได้ โดยทั่วไปอาจกำหนดค่าฟังก์ชันน้ำหนักเหล่านี้เป็น

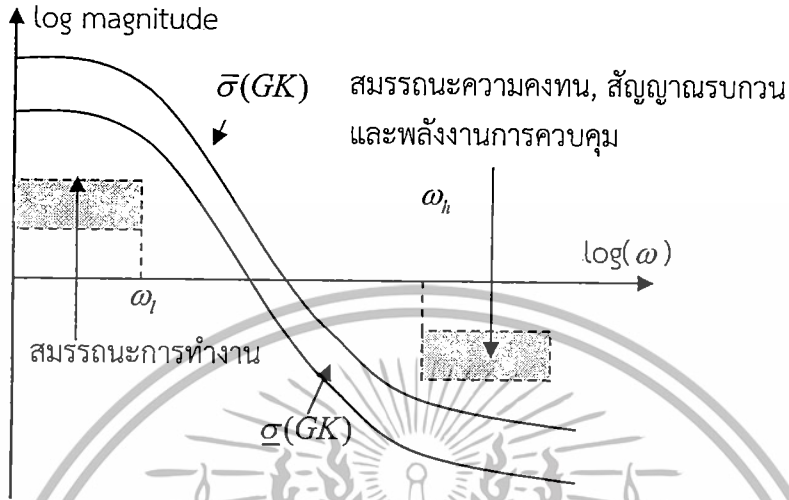
$$W_1 = K_w \frac{s+\alpha}{s+\delta}, \quad W_2 = \frac{b}{s+b} \quad (2.37)$$

โดยกำหนดให้ K_w, α, δ และ b ที่มีค่าบวก และค่า δ จะเป็นค่าบวกที่มีค่าน้อย ๆ จะได้ผลของอินทิกรัล ซึ่งทำให้ความผิดพลาดในช่วงสถานะคงที่เป็นศูนย์ เป็นต้น ระบบที่มีการจัดสัดส่วนสามารถเขียนได้เป็น

$$G_s = W_1 G W_2 \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

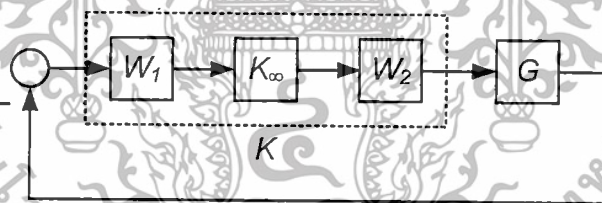
โดยทั่วไปจะกำหนดให้ฟังก์ชันน้ำหนักดังกล่าวทำให้ระบบที่จัดสรรแล้วมีค่า อัตราขยายสูงมีความถี่ต่ำเพื่อลดผลของตัวรบกวนและความไม่แน่นอนของระบบ อัตราขยายต่ำที่ความถี่สูงเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวน ค่าแบนด์วิธสูงเพื่อความไวในการตอบสนอง



รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพโบเดของระบบก่อนและหลังจัดสรรวงรอบ[1]

เมื่อดำเนินการจัดสรรที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสังเคราะห์หาตัวควบคุม

แบบคงทน



รูปที่ 2.22 แสดงภาพการ จัดสรรวงรอบเอชอินฟินิตี้[1]

2. หาค่านอร์มมันต์ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ในการออกแบบตัวควบคุม K_∞ โดยค่านี้เรียกว่า γ_{min}

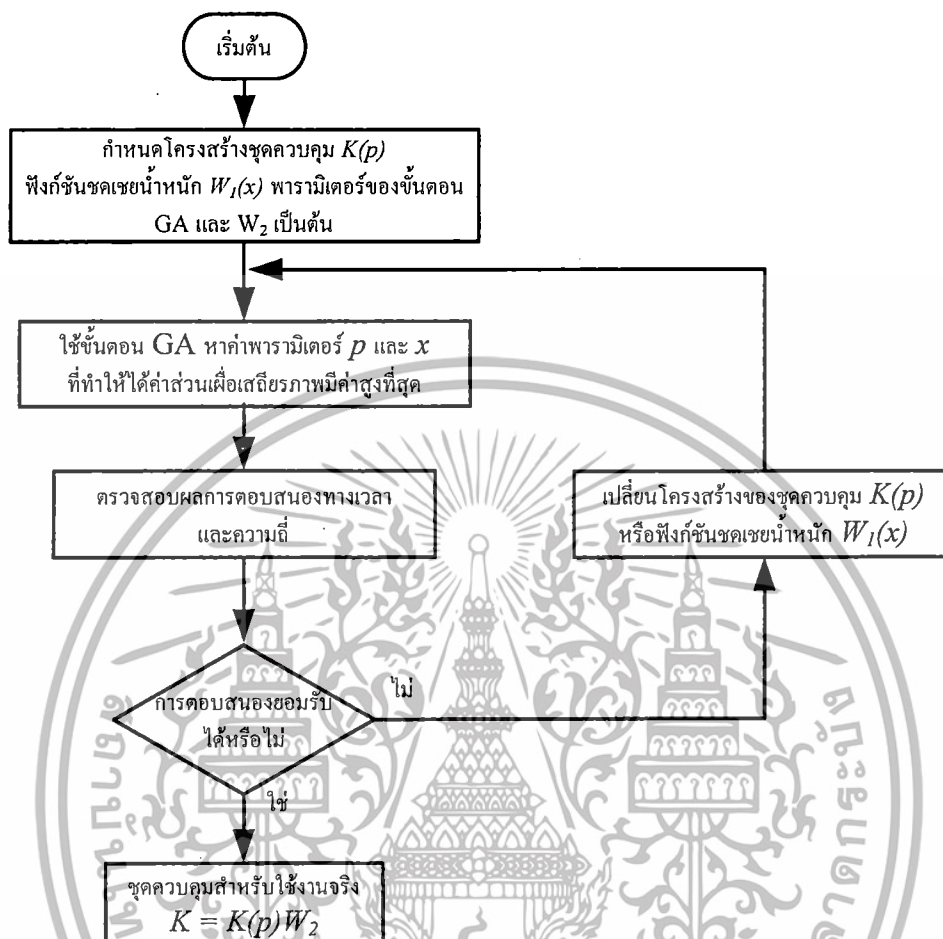
$$\gamma_{min} = \frac{1}{\epsilon_{mix}} = (1 + \lambda_{max}(XZ))^{\frac{1}{2}} \tag{2.39}$$

ถ้า $\epsilon_{max} < 0.25$ หรือ $\gamma_{min} > 4$ แสดงว่า W_1 และ W_2 ที่ออกแบบไว้ไม่เหมาะสมต้องทำการออกแบบใหม่

3. เลือกค่า $\epsilon < \epsilon_{max}$ และสังเคราะห์หาชุดควบคุม K_∞ โดยการแก้สมการริคาติ (Ricatti Equation) ของสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $\|T_{zw}\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty \end{bmatrix} (I + G_s K_\infty)^{-1} M_s^{-1} \right\|_\infty$ กำหนดให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.40) รค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าต่ำสุดของระบบต่าง ๆ ใช้เทคนิคหาค่าเหมาะสมจากวิธีเชิงพันธุกรรม



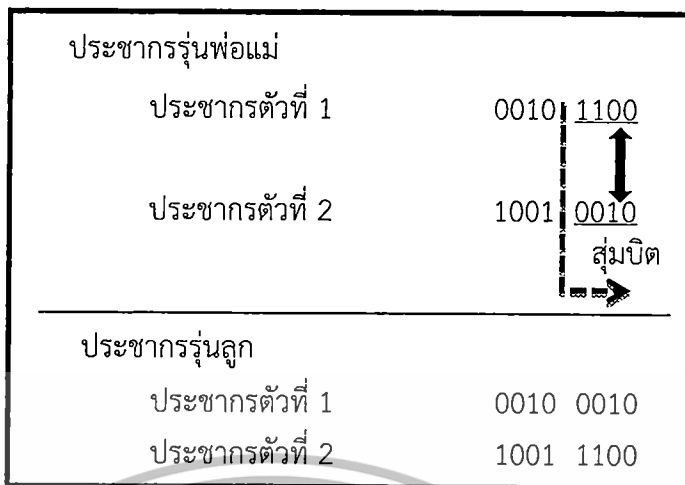
รูปที่ 2.23 แสดงแผนผังการทำงานของกรอกแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม[2]

2.8 ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยเทคนิคเชิงพันธุกรรม [1]

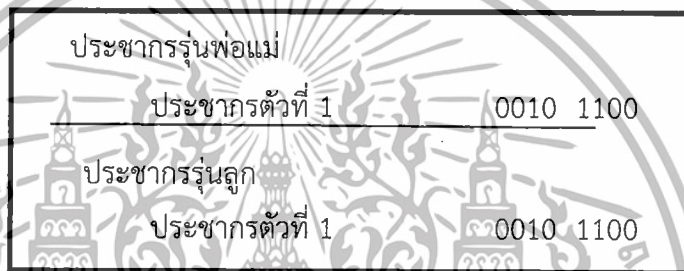
ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสามารถนำไปหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ซึ่งสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ได้ ในโครงการนี้ใช้เทคนิคนี้ร่วมกับเทคนิคการทำจัดสัดส่วนวงรอบ (Loop Shaping) ในการออกแบบการควบคุม สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้

กำหนดให้ค่าหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการหาเป็นโครโมโซม ในแต่ละรุ่น (Generation) จะมีโครโมโซมรวมกันอยู่และจะเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่าประชากร (Population) จำนวนประชากรในแต่ละรุ่นจะถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบ ประชากรแต่ละตัวในรุ่นจะมีค่าฟังก์ชันฟิตเนส (Fitness Function) แตกต่างกันไปโดยที่ค่าฟิตเนส เป็นค่าที่แสดงความเหมาะสมโครโมโซมนั้นคือปัญหาที่พิจารณาโครโมโซมที่มีค่าฟิตเนสสูงสุดจะเป็นคำตอบของรุ่นนั้น การสร้างประชากรรุ่นใหม่จะอาศัยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม โดยถ่ายทอดพันธุกรรมจากประชากรรุ่นพ่อแม่ไปสู่ประชากรรุ่นลูก ซึ่งมีด้วยกันสามวิธีหลักๆคือ แบบผสมข้ามพันธุ์ (Crossover) แบบถอดแบบจากต้นแบบ (Reproduction) และ

แบบกลายพันธุ์ (Mutation) ลักษณะของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะแสดงดังรูปข้างล่างนี้ โยชน์ด้านการคำนวณที่รวดเร็วและไม่แพงเกินไป อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

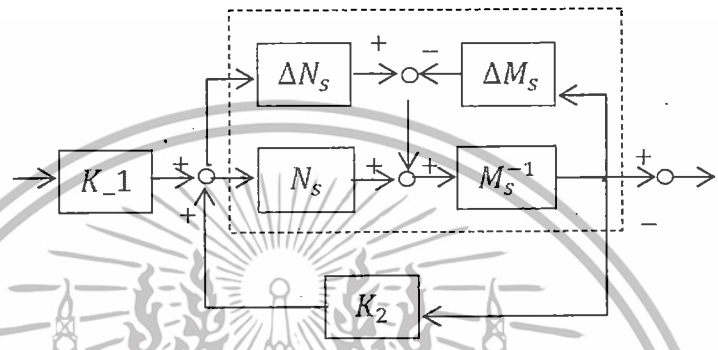
รูปที่ 2.24 (ค) แบบกลายพันธุ์ (ต่อ)

2.9 ควบคุมแบบคงทนสององศาอิสระ [33]

การควบคุมแบบจัดสัณฐานวงรอบสองแกนอิสระเอชอินฟินิตี้(2DOF loop shaping) เป็นวิธีการควบคุมที่สามารถทำการกำหนดข้อจำกัดขอบเขตทางเวลาได้ โดยชุดควบคุมประกอบไปด้วยชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward pre-filter controller ; K_1) และชุดควบคุมแบบป้อนกลับ (feed-back controller ; K_2) โดยที่ชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (K_1) ถูกใช้สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเอกสารได้แจ้งไปยังผู้จัดทำเอกสารแล้ว ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมผลการตอบสนองของขอบเขตเวลาของระบบแบบเปิดและชุดควบคุมแบบป้อนกลับ (K_2) ออกแบบใช้สำหรับความต้องการทางความเสถียรภาพคงทนและการลดผลโดยสิ่งรบกวน ซึ่งวิธีนี้ใช้เพียงฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักก่อน (pre-compensator weight function ; W_1) และแบบจำลองที่ใช้อ้างอิง (reference model ; T_{ref}) ในการกำหนดข้อกำหนดทางขอบเขตต่าง ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาระบบที่จัดสรรแล้ว (G_s) เป็นแบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor) ซึ่งในระบบจะประกอบไปด้วย ตัวตั้ง (nominator factor : N_s) และตัวหาร (denominator factor : M_s) รูปที่ 2.25 แสดงแบบจำลองที่ไม่แน่นอนของระบบและชุดควบคุมคงทนที่นำมาสังเคราะห์ระบบ



รูปที่ 2.25 แสดงความไม่แน่นอนของระบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor)

T_{ref} คือ ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ในการอ้างอิงในการพิจารณาในขอบเขตเวลา p คือ ค่าคงที่ที่ผู้ออกแบบใช้สำหรับออกแบบระบบตามความต้องการเชิงสมรรถนะ ระบบที่ถูกจัดสรรแล้วสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_s = GW_1 = M_s^{-1} N_s(1) \tag{2.41}$$

ระบบที่รวมความไม่แน่นอนแล้ว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_\Delta = (N_s + \Delta N_s)(M_s + \Delta M_s)^{-1} \tag{2.42}$$

- เมื่อ G_Δ คือ ระบบที่รวมความไม่แน่นอนแล้ว
- ΔN_s คือ ความไม่แน่นอนในฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวถูกหาร
- ΔM_s คือ ความไม่แน่นอนในฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวหาร

$$|\Delta N_s, \Delta M_s|_\infty \leq \epsilon \tag{2.43}$$

ϵ คือ ส่วนเพื่อเสถียรภาพ(stability margin)

ขั้นตอนในการออกแบบชุดควบคุมแบบสัญญาณวงรอบสององศาอิสระ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบตัวชดเชยนำหน้าก่อน (W_1) เพื่อให้ได้ความต้องการเชิงสมรรถนะในการจัดสัญญาณวงรอบแบบเปิด

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้อ้างอิง (T_{ref}) เพื่อใช้สำหรับการพิจารณาในส่วนของขอบเขตเวลาของระบบแบบปิด และทำการเลือกค่าคงที่ ρ เพื่อใช้ในการพิจารณาสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบระหว่างขอบเขตของเวลา และขอบเขตของความถี่ โดยค่าที่ใช้จะมีค่าที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้ค่า $\rho = 0$ ชุดควบคุมคงทนที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีแบบจัดสัญญาณวงรอบสององศาอิสระเอชอินฟินิตี้จะให้ผลการตอบสนองของระบบเหมือนกับชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าส่วนเผื่อเสถียรภาพ (ε_{opt}) สูงที่สุด โดยทำการสังเคราะห์ส่วนเผื่อเสถียรภาพดังสมการ

$$\gamma_{opt}\rho^{-2} = \varepsilon_{opt}^{-1}\rho^{-2} = \|(I - G_s K_2)^{-1} G_s K_1 - T_{ref}\|_{\infty} \quad (2.44)$$

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อได้ส่วนเผื่อเสถียรภาพแล้ว ทำการสังเคราะห์ชุดควบคุม (K_1 และ K_2)

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} \rho(I - K_2 G_s)^{-1} K_1 K_2 (I - G_s K_2)^{-1} M_s^{-1} \\ \rho(I - G_s K_2)^{-1} G_s K_1 (I - G_s K_2)^{-1} M_s^{-1} \\ \rho^2 [(I - G_s K_2)^{-1} G_s K_1 - T_{ref}] - \rho(I - G_s K_2)^{-1} M_s^{-1} \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \leq \varepsilon^{-1} \quad (2.45)$$

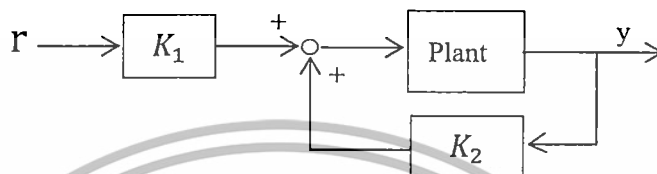
ขั้นตอนที่ 5 ทำการสังเคราะห์

$$W_i = [W_o (I - G_s(0)K_2(0))^{-1} G_s(0)K_1(0)]^{-1} T_{ref}(0) \quad (2.46)$$

เมื่อ (W_o) มีค่าเท่ากับ 1

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อได้ชุดควบคุม K_1 และ K_2 แล้วทดสอบผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการหรือไม่

จากขั้นตอนการออกแบบในข้างต้นทางพบว่าตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบนี้มีปัญหาในเรื่องของลำดับของตัวควบคุมโดยที่ลำดับของตัวควบคุมจะมีค่าสูงมากและนำไปใช้จริงได้ลำบาก ดังนั้นการออกแบบหาตัวควบคุม K_1 และ K_2 ที่กำหนดโครงสร้างได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าตอบ โดยกำหนดให้การหาค่าตัวควบคุม K_2 ทำโดยการหาค่าที่ทำให้ส่วนเหนือเสถียรภาพแบบหนึ่งองศาอิสระมีค่าสูงสุดและกำหนดให้ตัวควบคุม K_1 เป็นผลตอบสนองของตัวควบคุมมีสมรรถนะทางโดเมนเวลาเหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างซึ่งเป็นดังนี้



รูปที่ 2.26 การควบคุมแบบสององศาอิสระทั่วไป

- ขั้นตอนการออกแบบสามารถสรุปได้ดังนี้
- ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบโครงสร้างตัวควบคุม K_1 และ K_2 ออกแบบ W_1 และ T_{ref}
- ขั้นตอนที่ 2 ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหาตัวควบคุม K_2 ที่ทำให้ค่าดัชนีคงทนสมรรถนะแบบหนึ่งองศาอิสระต่อไปนี้มีค่าต่ำสุด

$$\|T_{zw}\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K_{2\infty} \end{bmatrix} (I + G_s K_{2\infty})^{-1} M_s^{-1} \right\|_\infty \leq \varepsilon^{-1} \tag{2.45}$$

เมื่อ
$$K_{2\infty} = W_1^{-1} K_2(p_2)$$

- ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้ตัวควบคุมแบบหนึ่งองศาอิสระ K_2 แล้วให้หาตัวควบคุมที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาที่มีค่าผิดพลาดกำลังสองทาง โดเมนเวลาเทียบโมเดลอ้างอิงมีค่าต่ำที่สุด
- ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบสมรรถนะ

บทที่ 3

การควบคุมคงทนเอชอินฟินีตีสององศาอิสระสำหรับระบบ มอเตอร์กระแสตรงโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมแบบโครงสร้างบังคับที่ จุดดำเนินการ

3.1 บทนำ

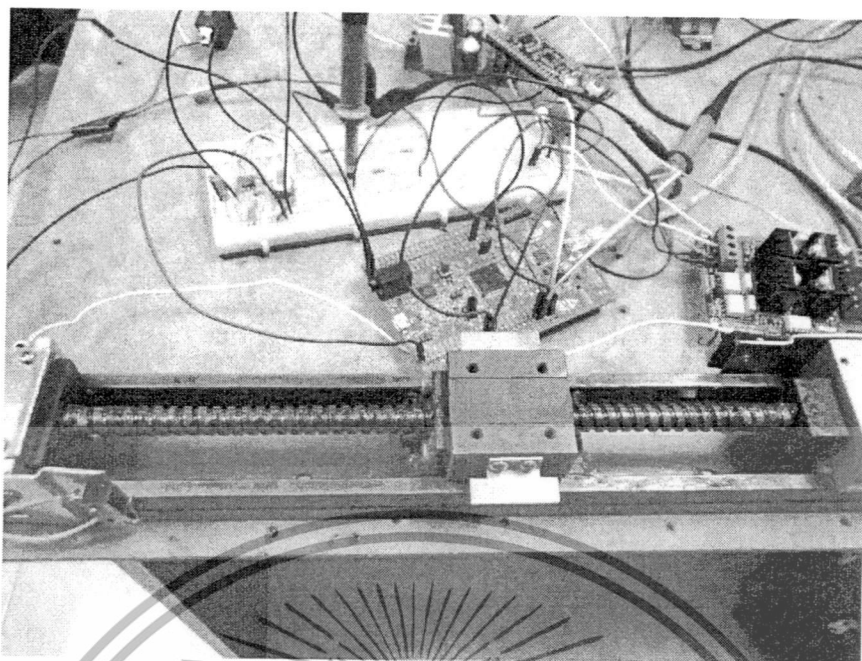
ในบทนี้จะทำการจำลองการควบคุมคงทนเอชอินฟินีตีสององศาอิสระสำหรับมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมแบบโครงสร้างบังคับที่จุดดำเนินการคือออกแบบที่ดิวตี้ไซเคิล 50-70% สิ่งที่น่าเสนอนี้มาเปรียบเทียบกับ การควบคุมคงทนเอชอินฟินีตีสององศาอิสระแบบธรรมดาซึ่งมีอันดับของการควบคุมที่สูง เมื่อมีอันดับที่สูงจะยากที่จะนำไปใช้ในการทดลองจริง อีกทั้งยังมีการทดสอบความคงทนเมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนไปอีกด้วย

3.2 การทดลองเรื่อง การควบคุมคงทนสององศาอิสระสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรง โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม

การทดลองนี้เกี่ยวกับการควบคุมคงทนสององศาอิสระแบบธรรมดาซึ่งให้อันดับของการควบคุมมีค่าที่สูง ซึ่งยากที่จะนำไปใช้ในระบบจริง ดังนั้นจึงนำเสนอวิธีใหม่เพื่อลดอันดับให้น้อยลงโดยการใช้โครงสร้างบังคับเพื่อให้ใช้งานได้จริง อีกทั้งยังใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบและเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการนำไปใช้งาน ถึงอย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ระบบคงทนจำเป็นอย่างยิ่งต้องหาแบบจำลองของระบบ ในการทดลองนี้จึงใช้วิธีการหาแบบจำลองเชิงเส้นด้วยวิธีความผิดพลาดเอาท์พุท (Output Error system identification)

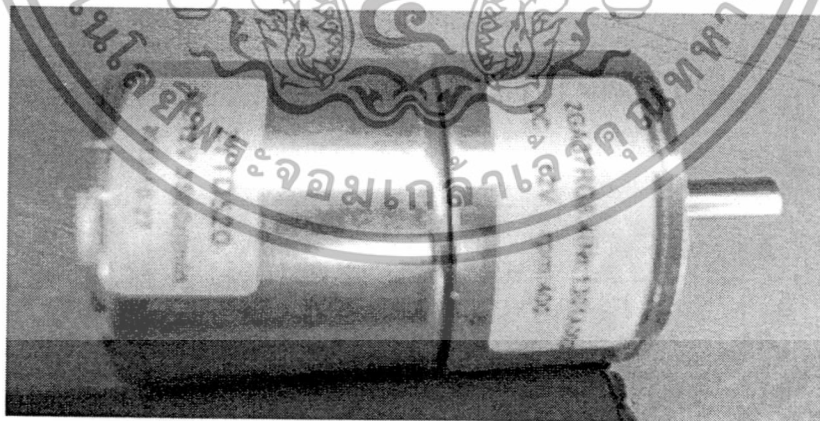
3.2.1 ระบบทางกล (Hardware)

ออกแบบตัวระบบกล โดยการทำให้ระบบกลเคลื่อนที่แกนเดียวโดยขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม จากนั้นไปต่อกับสวิตช์กรูทำให้การเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น ทำให้ได้ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้นแกนเดียว ได้ทำการต่อตัวตรวจจับ(Encoder)ไว้ที่ท้ายของสวิตช์กรูเพื่อวัดรอบความเร็ว ตำแหน่ง ในทางฝั่งมอเตอร์ก็ต่อกับวงจรขับเคลื่อนแบบPWM และควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์มรุ่น ARM Cortex-M4 เพื่อรับส่งค่าและรับค่าจากตัวตรวจจับ (Encoder) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมป้อนกลับ



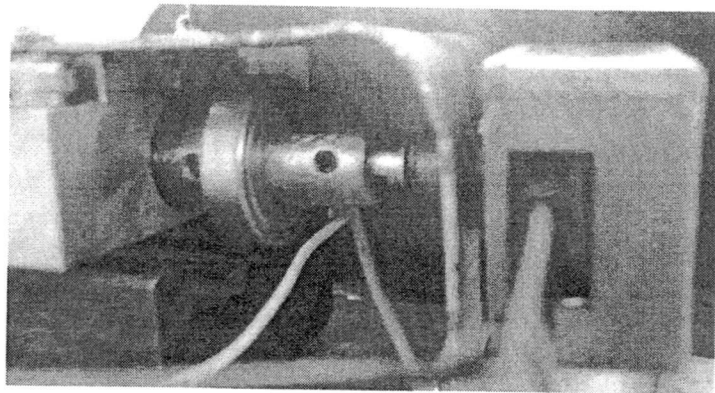
รูปที่ 3.1 ระบบที่จะทดสอบสมรรถนะจริง

ในการออกแบบนั้น จะคิดถึงความสะดวกในการวัดนั้น คือ 20 ไมครอน ดังนั้นความละเอียดที่ต้องการนั้นเกิดจากสองส่วน คือความละเอียดของตัวผลิตสกรูในการทดลองใช้ระยะทางที่เคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นได้ 5 mm. ต่อการหมุน 1 รอบ และตัวตรวจจับความเร็ว (Encoder) ซึ่งมีความละเอียดต่อ 1 รอบ เท่ากับ 500 ช่อง ดังนั้นจะเกิดความสัมพันธ์ว่า ในการตรวจจับ 1 ช่อง สามารถวัดได้ความละเอียดได้ในระดับ 10 ไมครอน ซึ่งเป็นค่าความละเอียดที่น้อยกว่าค่าที่ต้องการไว้อยู่ 2 เท่า เมื่อออกแบบระบบเครื่องกลได้แล้วมาเลือกตัวขับเคลื่อนนั้นคือมอเตอร์



รูปที่ 3.2 มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

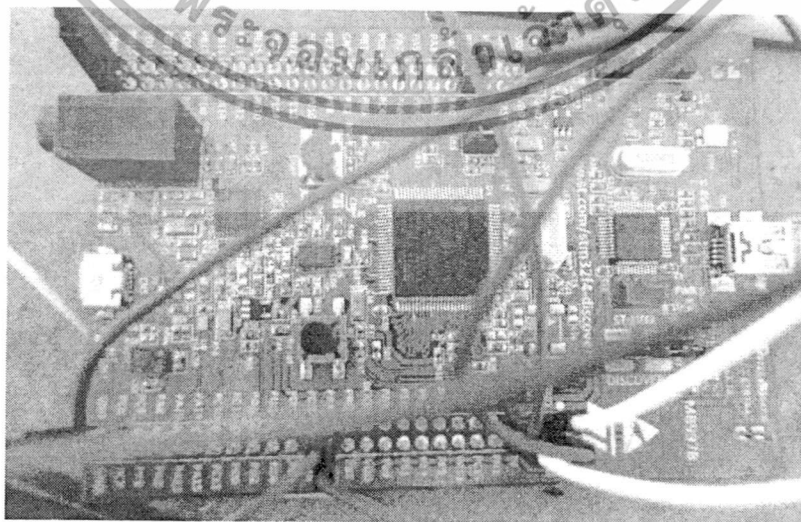


รูปที่ 3.3 ตัวตรวจจับความเร็ว(Encoder)

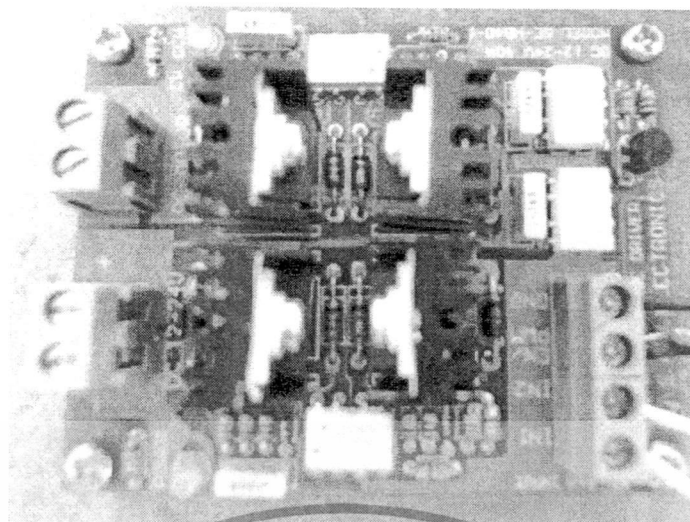
มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร (PMDC) ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญดังนี้

- โดยที่ แรงดันสูงสุด 12 โวลต์
- ความเร็วรอบ 400 rpm
- ความเหนียวน้ำ 45 mH
- ความต้านทานภายใน 0.16 โอห์ม
- K_v และ K_t 0.0199
- โมเมนต์แรงเฉื่อยของโหลดและมอเตอร์ 12 ไมโคร-กิโลกรัม-เมตร²
- สัมประสิทธิ์ของวิสคอสฟริกชัน 31.2 ไมโคร-กิโลกรัม-เมตร²/วินาที
- แรงบิดสูงสุด 150 mN-m
- เส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm

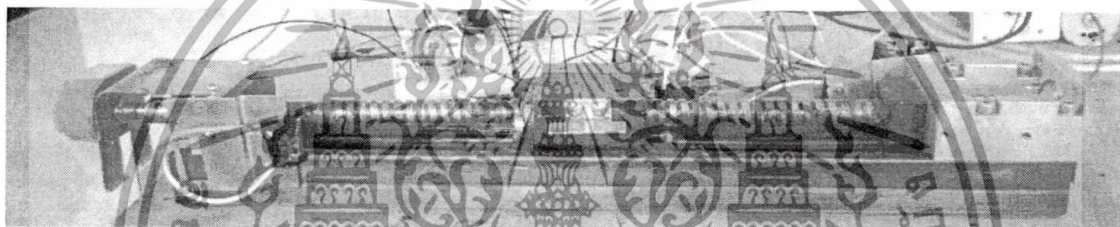
ในการควบคุมมอเตอร์นั้นจะต้องมีตัวขับมอเตอร์จะใช้บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบเอชบริดจ์ (H-bridge) จากนั้นคำสั่งที่จะใช้ควบคุมวัดผลแสดงผลได้มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์มรุ่น ARM Cortex-M4 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.7



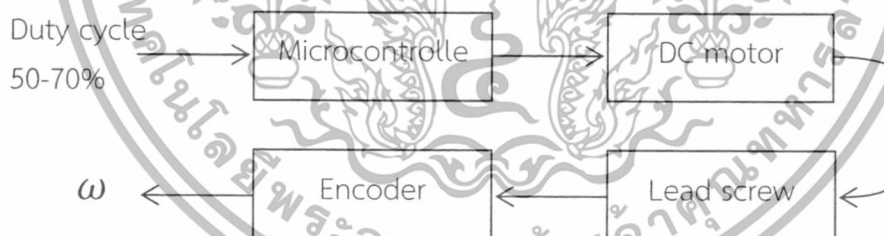
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์มรุ่น ARM Cortex-M4 ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบเอชบริดจ์ (H-bridge)



รูปที่ 3.6 ระบบมอเตอร์กระแสตรงแกนเดียว

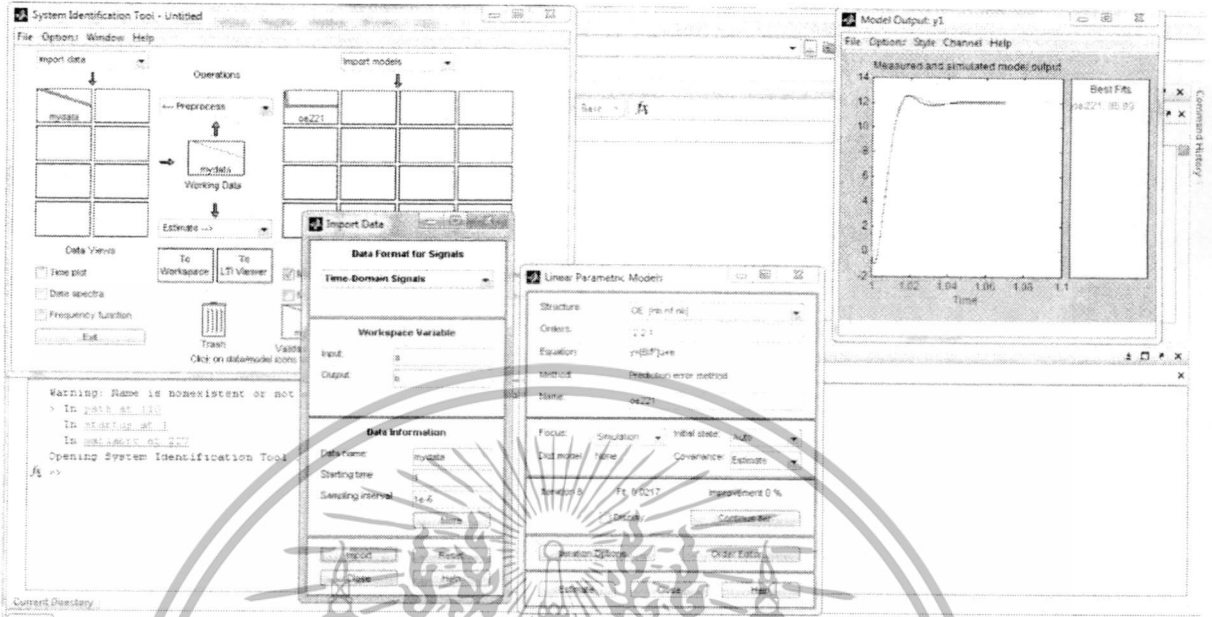


รูปที่ 3.7 แผนภาพของระบบมอเตอร์กระแสตรง

3.2.2 ระบบควบคุม (Software and simulation)

เทคนิคการหาพารามิเตอร์ระบบ เป็นการหาพารามิเตอร์ทางแบบจำลองพลวัตของระบบ โดยอาศัยข้อมูลที่วัดได้จากระบบใดระบบหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการศึกษานั้นๆ โดยในการหารูปแบบของระบบพลวัต จะมีวิธีประมาณการ หรือแบบจำลองหลายแบบ ซึ่งรูปแบบในประมาณการแต่ละแบบจะเหมาะกับการหาพารามิเตอร์ของระบบที่แตกต่างกัน เช่น สำหรับโครงสร้างของระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear structure) จะใช้รูปแบบ ARX (Auto Regressive with external input) รูปแบบ OE (Output Error) หรือรูปแบบ ARMAX (Auto Regressive Moving Average with external input) ในการหาแบบจำลองออกมา แต่สำหรับโครงสร้างของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear structure) จะใช้รูปแบบ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้แทนที่การคิดแบบจำลอง เมื่อผู้รู้เห็นระบบเชิงประจักษ์โดยที่ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

neural network) หรือใช้แบบจำลองแบบคลุมเครือ (Fuzzy model) ในการหาแบบจำลองของระบบออกมาแทนในที่นี้จะใช้รูปแบบ OE(Output Error) ในการจำลองออกมา



รูปที่ 3.8 โปรแกรมหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (System Identification Tool box)

จากรูปนี้แสดงถึงการใช้โปรแกรมในการหาแบบจำลองออกมา โดยเลือกค่า

$n_b = 2$ (จำนวนซีโรของระบบบวกด้วยหนึ่ง)

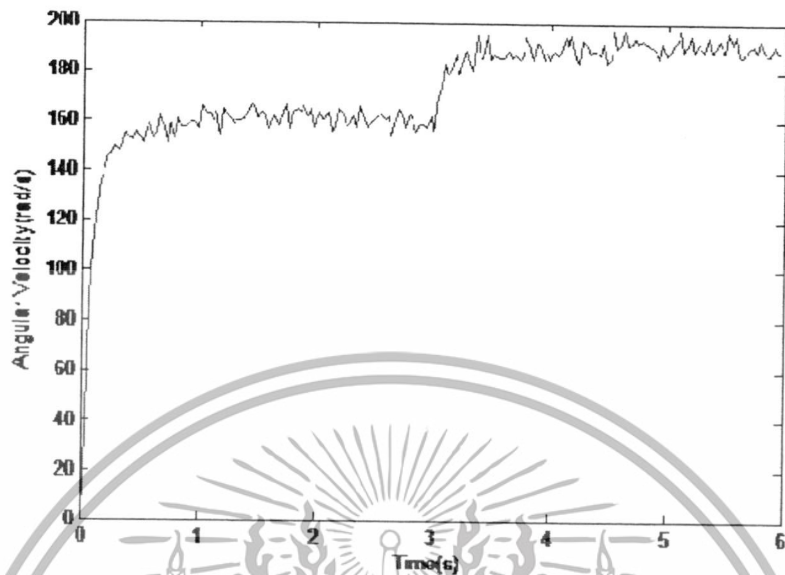
$n_f = 2$ (จำนวนโพลของระบบ)

$n_k = 1$ (จำนวนการสุ่มข้อมูลก่อนที่ค่าอินพุตจะมีผลต่อค่าเอาต์พุตของระบบ)

ค่าที่ได้ข้างบนจากการคำนวณหาแบบจำลองเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (transfer function) ของระบบออกมาจากบทที่ 2 แล้ววิเคราะห์ได้ว่ามี 1 ซีโร และ 2 โพล จากนั้นทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของระบบได้ดังนี้

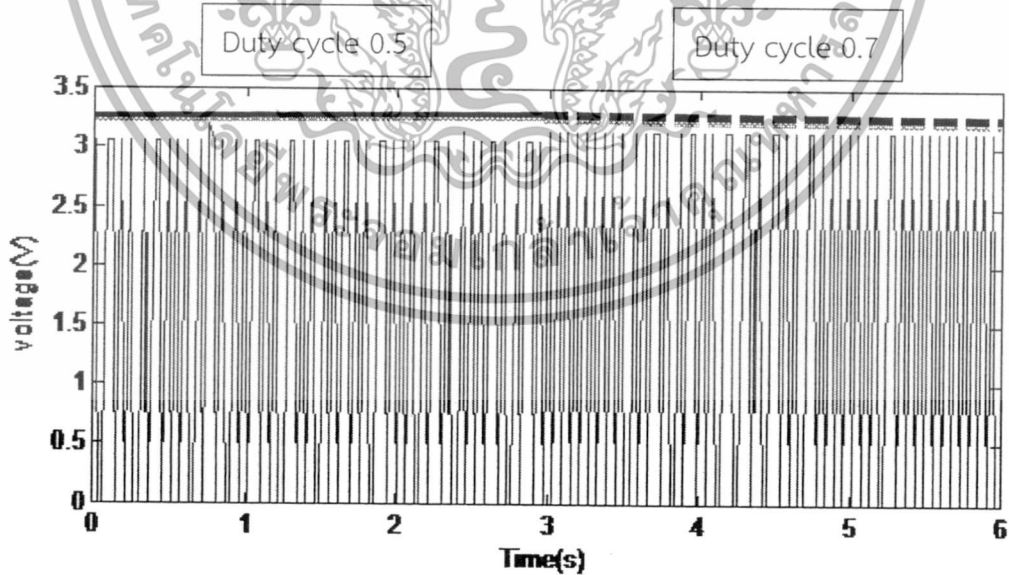
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. หาแบบจำลอง (Plant) ของระบบ
สัญญาณที่ได้จากการวัดจากตัวตรวจจับ (Encoder) ได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 สัญญาณขาออกของระบบ

จากกราฟเป็นการให้ดิวตี้ไซเคิลที่ 50% และ 70% จากนั้นหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผ่านโปรแกรมในโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) แล้วจะได้แบบจำลองดังตารางที่ 3.1



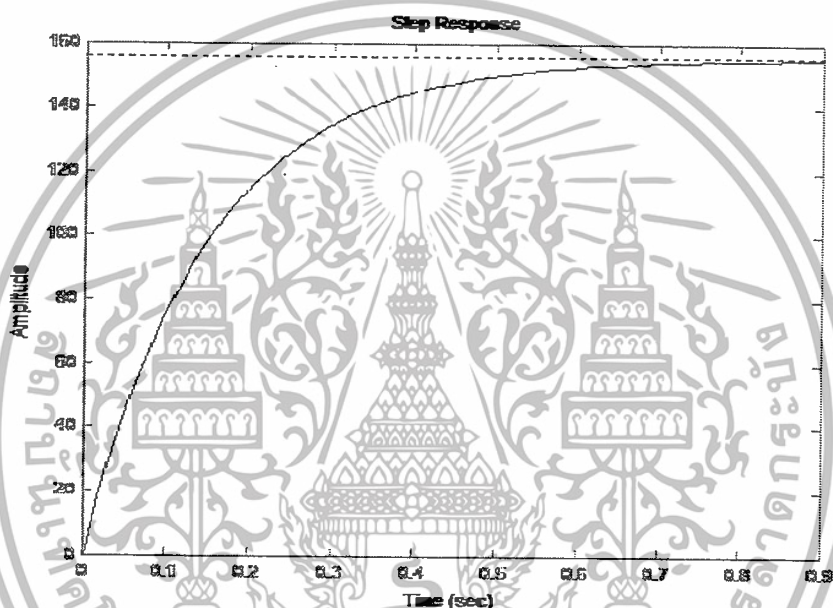
รูปที่ 3.10 สัญญาณขาเข้าสองดิวตี้ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบความผิดพลาดเอาทัพุด

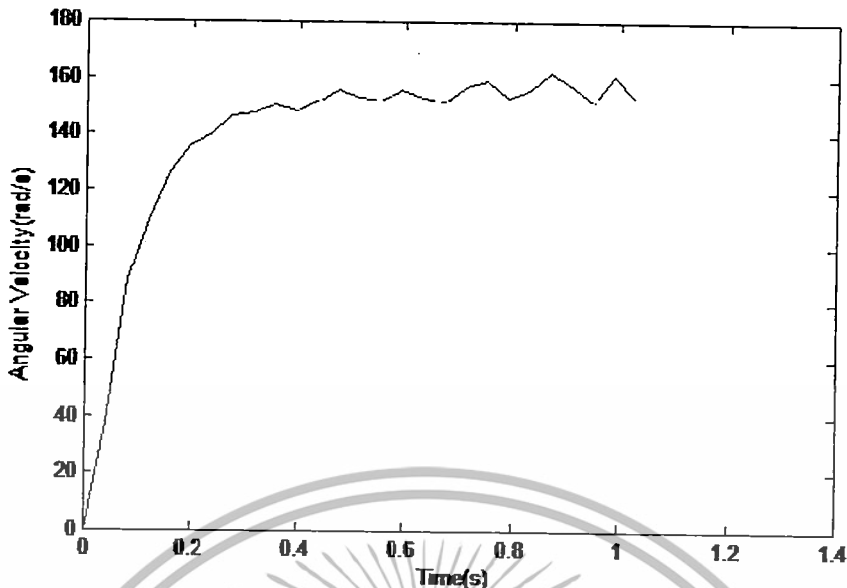
| ดีวีดีซีเคิล(%) | ฟังก์ชันถ่ายโอน |
|-----------------|--|
| 50-70 | $B(s) = 8.92 \times 10^3 s + 6.152 \times 10^9$ $F(s) = s^2 + 7.106 \times 10^7 s + 4.746 \times 10^8$ |
| 60-80 | $B(s) = 9.15 \times 10^3 s + 5.291 \times 10^9$ $F(s) = s^2 + 4.519 \times 10^7 s + 3.293 \times 10^8$ |

จากนั้นนำมาทดสอบด้วยผลตอบสนองขั้นบันไดที่ 12 V แล้วจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงผลตอบสนองแบบขั้นบันไดเพื่อทดสอบระบบที่จำลองของดีวีดีซีเคิล 50-70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

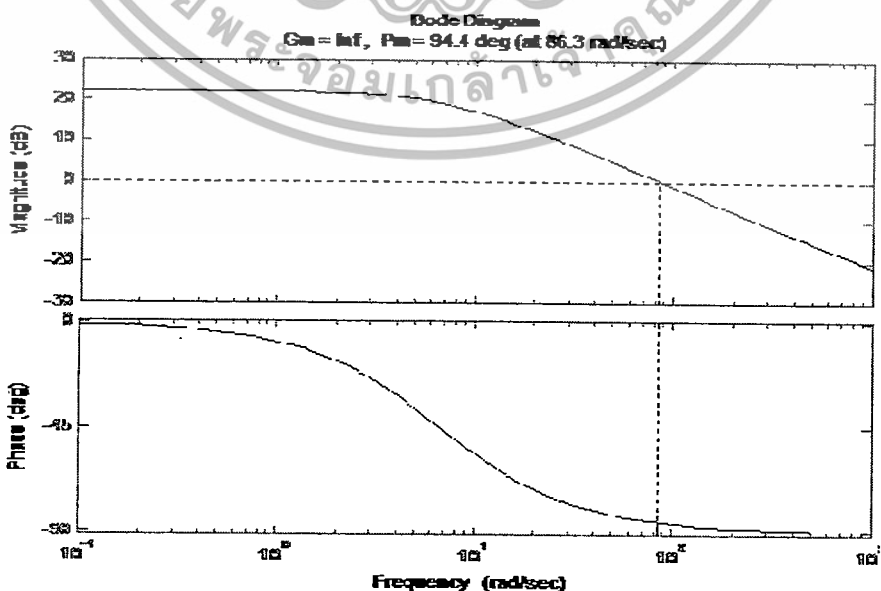


รูปที่ 3.12 แสดงผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระบบจริงที่ตัวตีไซเคิล 50%

ตารางที่ 3.2 ค่าทางพลศาสตร์ของผลตอบสนองขั้นบันไดของแบบจำลอง

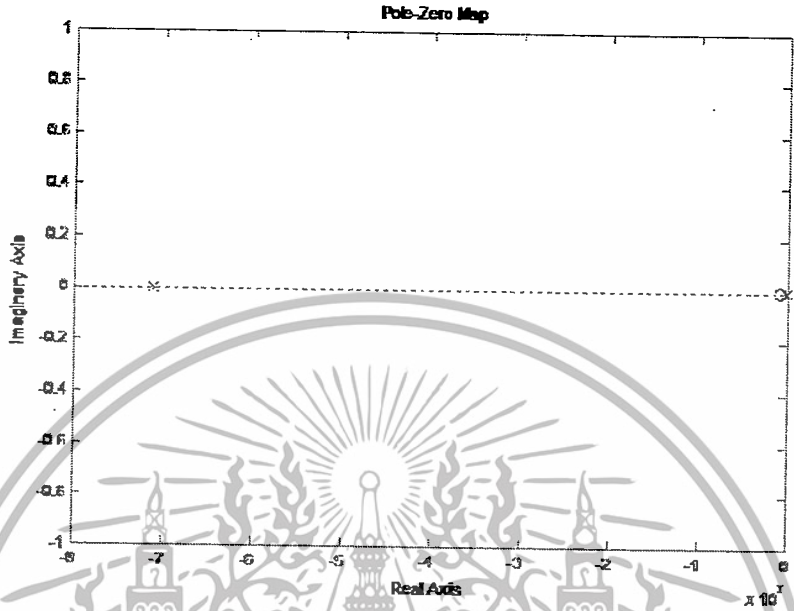
| | ผลตอบสนองขั้นบันได | | | |
|----------|--------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | เวลาขาขึ้น | เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว | สถานะไหวตัวเกิน | ขอบเขตเสถียรภาพ |
| แบบจำลอง | 0.329 | 0.586 | 0 | - |

เมื่อทดสอบทางเวลาแล้ว จากนั้นทดสอบทางความถี่ด้วยการวิเคราะห์กราฟโบเดดังรูปที่ 3.13



เอกสารรูปที่ 3.13 แผนภาพโบเดแสดงถึงขอบเขตอัตราขยาย ขอบเขตเฟส และแบนด์วิธของระบบ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟโพลเดแสดงให้เห็นถึงระบบมีความเสถียรน้อยโดยดูจากแบนด์วิธซึ่งมีค่าอยู่ที่ 6.6630 rad/s ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมเพื่อให้ประสิทธิภาพและความเสถียรภาพนั้นดีขึ้นกว่าเดิม



รูปที่ 3.14 กราฟโพลและซีโพลของแบบจำลอง

จากการทดสอบแบบจำลองพบว่าโพลหลักอยู่ใกล้ศูนย์คือมีโพลอยู่ที่ตำแหน่ง $-7.11e7, -6.68$ และมีซีโพลอยู่ที่ตำแหน่ง $-6.9e5$ นี้คือจุดอ่อนของระบบเพราะทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพช้าลงและเกิดค่าผิดพลาดที่ช่วงค่าคงที่ ดังนั้น จะทำการย้ายโพลให้ไกลจากศูนย์มากกว่าเดิมซึ่งจะแสดงโดยการดูผลตอบสนองแบบขั้นบันไดถ้าเวลาขาขึ้นและเวลาเข้าสู่ค่าคงที่น้อยลงก็สามารถสรุปได้ว่าระบบมีโพลติดลบมากขึ้นนั่นเอง

2. การควบคุมคงทนเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ

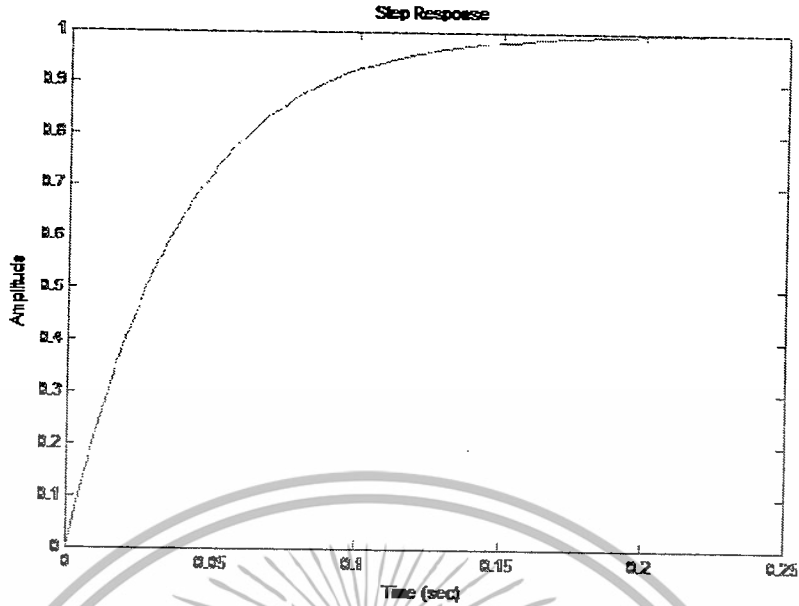
ออกแบบ W_1 จากแผนภาพ โพลเดจากแบบจำลองที่ได้จากตารางที่ 3.1 ของแบบจำลองที่ดิวตี้ไซเคิล 50-70% และหาฟังก์ชัน T_{ref} จาก เวลาเข้าสู่เสถียรภาพของวงรอบเปิดของระบบได้ดังสมการที่ (3.2) โดยออกแบบให้ได้ 1/4 เวลาเข้าสู่เสถียรภาพนั้นประมาณ 0.15 วินาที และออกแบบให้เป็น 1/3 เวลาเข้าสู่เสถียรภาพนั้นประมาณ 0.2 วินาทีดังสมการที่ (3.3) ซึ่งใช้ในบทที่ 4 และบทที่ 5 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

$$W_1 = \frac{99.52s+1659}{s+0.001} \tag{3.1}$$

$$T_{ref} = \frac{1}{0.0384s+1} \tag{3.2}$$

$$T_{ref} = \frac{1}{0.05s+1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (3.3) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองขั้นบันไดของ T_{ref} ที่ 1/4 เวลาเข้าสู่เสถียรภาพ

ตารางที่ 3.3 ค่าพลาศาสตร์ของแบบจำลองอ้างอิง

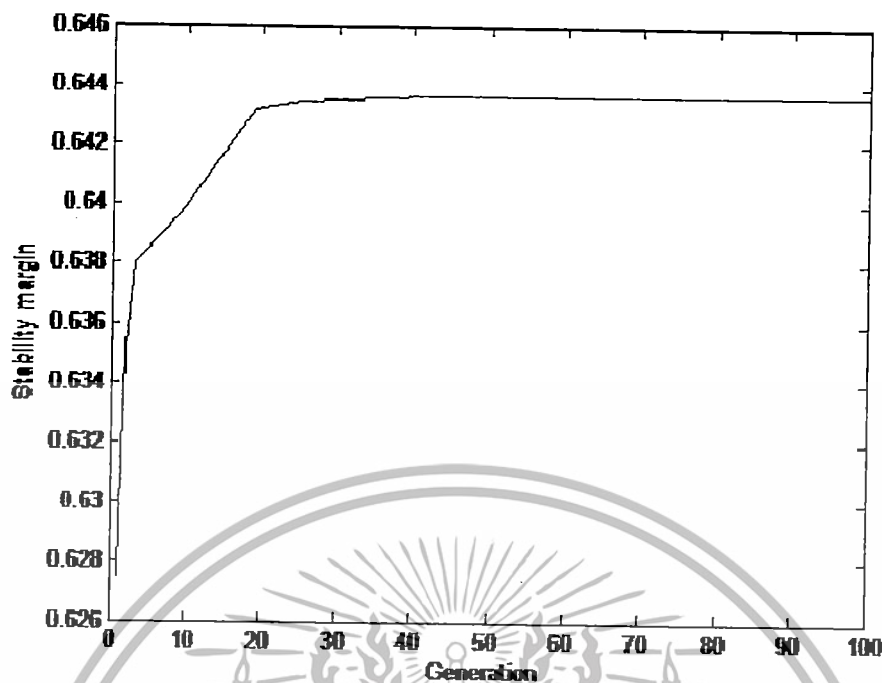
| | ผลตอบสนองขั้นบันได | | | |
|----------------|--------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | เวลาขาขึ้น | เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว | สถานะไหวตัวเกิน | ขอบเขตเสถียรภาพ |
| $T_{ref(1/4)}$ | 0.0844 | 0.15 | 0 | 0 |
| $T_{ref(1/3)}$ | 0.0938 | 0.2 | 0 | 0 |

3. เทคนิคที่นำเสนอใช้นั้นใช้ตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 และใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการหาพารามิเตอร์ในการควบคุม K_f, K_p, K_i ได้ $K_f = 1000.9, K_p = 31.0035, K_i = 1694.2$ และ $K_d = 0.492$ ส่วนการควบคุมคงทนแบบดั้งเดิมก็สามารถสังเคราะห์การควบคุมได้ตามสมการที่ (3.4) และ สมการที่ (3.5)

$$K_1(p) = \frac{2987s^3 + 1.351e11s^2 + 1.575e15s + 2.622e16}{s^4 + 4.944e07s^3 + 1.81e14s^2 + 7.729e15s + 7.855e16} \tag{3.4}$$

$$K_2(p) = \frac{-4.078e06s^3 - 1.842e14s^2 - 7.863e15s - 7.986e16}{s^4 + 4.944e07s^3 + 1.81e14s^2 + 7.729e15s + 7.855e16} \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 การลู่เข้าของค่าตอบของเทคนิคที่นำเสนอ

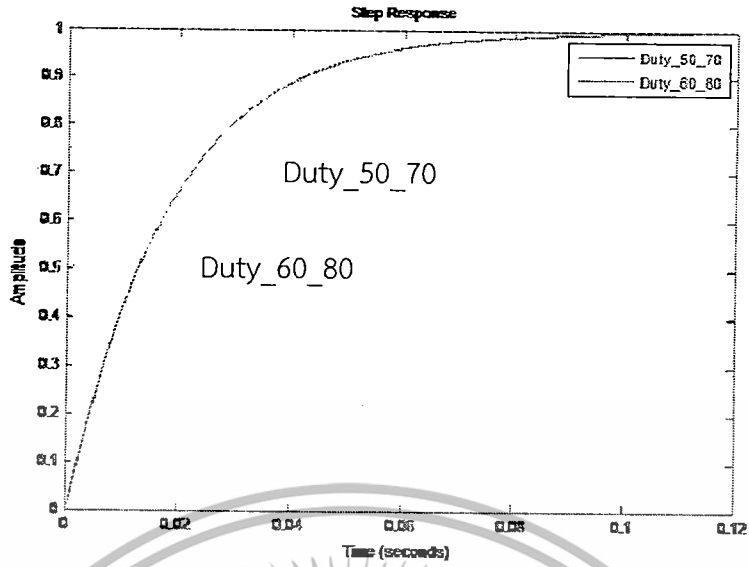
4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบกราฟและตารางได้ดังนี้

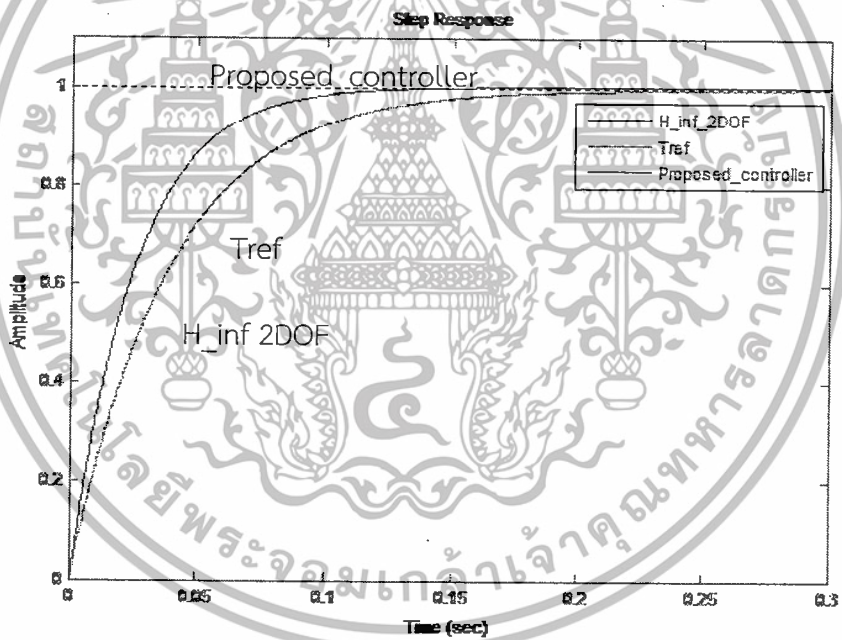
ตารางที่ 3.4 ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของการทดลองที่นำเสนอกับการควบคุมคงทนเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระแบบธรรมดา

| | ผลตอบสนองขั้นบันได | | | | |
|----------------------|--------------------|----------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | เวลาขาขึ้น | แบนด์วิธ | เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว | สถานะไหวตัวเกิน | ขอบเขตเสถียรภาพ |
| H_{∞} 2DOF GA | 0.0536 | 55.3986 | 0.0927 | 0 | 0.6436 |
| H_{∞} 2DOF | 0.0848 | 25.8496 | 0.151 | 0 | 0.6422 |
| T_{ref} | 0.0844 | - | 0.15 | 0 | - |

การทดลองนี้เป็นแบบจำลองจากระบบจริงของมอเตอร์กระแสตรงที่หมุนผ่านสกรู (lead screw) จากนั้น จับสัญญาณความเร็วเชิงมุมที่ได้กับสัญญาณขาเข้าเพื่อมาหาระบบจำลองที่ให้ตรงกับระบบจริงจากจำลองของระบบแบบความผิดพลาดเอาต์พุตจากนั้นทดสอบการควบคุมจากทฤษฎี การควบคุมสององศาอิสระแบบธรรมดา เพื่อมาเปรียบเทียบกับ การควบคุมที่นำเสนอ คือ การหาค่าพารามิเตอร์ K_f, K_p, K_i, K_d จากวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งการทดสอบจะทำการวัดค่าสัญญาณฟองเกิน เวลาขาขึ้น เวลาเข้าสู่สถานะคงที่แบนด์วิธและขอบเขตความเสถียรภาพ ซึ่งค่าเหล่านี้บ่งบอกถึง เสถียรภาพเป็นพลศาสตร์ของระบบและประสิทธิภาพของระบบนั้นคือเข้าสู่เสถียรภาพเร็วและแม่นยำ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

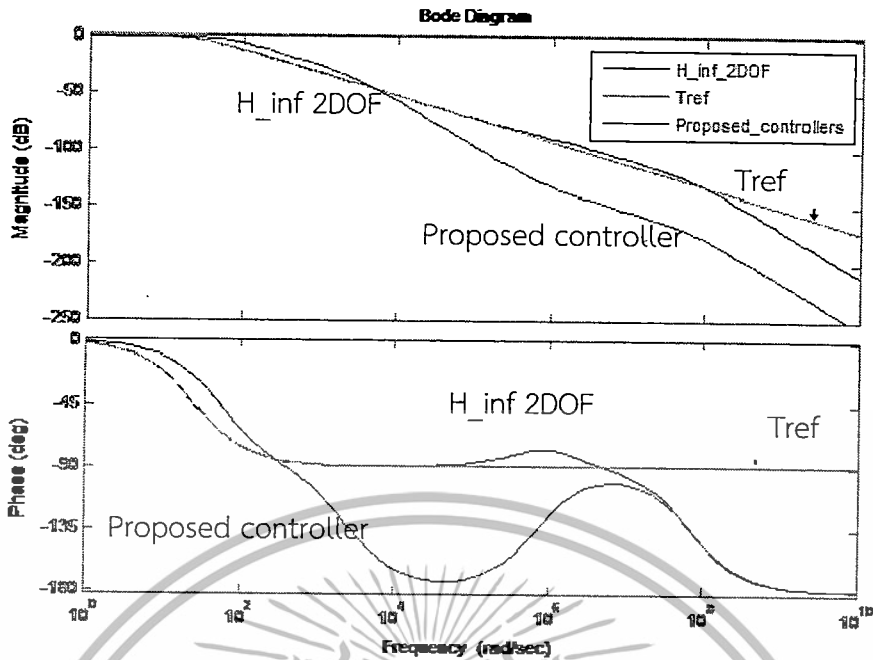


รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองขั้นบันไดเพื่อทดสอบความคงทนของระบบ



รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองแบบขั้นบันไดของการทดลองมาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แผนภาพโบเดของการทดลองมาเปรียบเทียบกัน

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้นั้น เมื่อทดสอบด้วยผลตอบสนองขั้นบันไดพบว่ามีความใกล้เคียงกับระบบจริงที่วัดได้ เป็นการยืนยันว่าระบบที่จำลองนั้นมาใกล้เคียงความเป็นจริง แต่ยังไม่มากเพราะความแม่นยำยังไม่มากอยู่ที่ประมาณ 60-80% จากนั้น ออกแบบตัวควบคุมและทดสอบผลตอบสนองขั้นบันไดกับการควบคุมคอนโทรลสององศาอิสระแบบธรรมดา และตัวควบคุมที่นำเสนอ พบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีเวลาขาขึ้นและเวลาเข้าสู่เสถียรภาพที่เร็วกว่าการควบคุมคอนโทรลสององศาอิสระแบบธรรมดา ซึ่งทำให้สมรรถนะของการควบคุมที่นำเสนอแยกว่าการควบคุมคอนโทรลสององศาอิสระแบบธรรมดา เพราะมีผลตอบสนองทางเวลาใกล้เคียงน้อยกว่าแบบจำลองอ้างอิง แต่ทั้งสองระบบมีขอบเขตความเสถียรภาพที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากแผนภาพโบเดพบว่า ระบบที่นำเสนอมีแบนด์วิธที่มากกว่าแสดงว่าระบบที่นำเสนอเร็วกว่าระบบการควบคุมคอนโทรลสององศาอิสระแบบธรรมดา สุดท้ายได้นำวิธีที่นำเสนอมาทดสอบความคงทนโดยการเปลี่ยนรูปแบบการจำลองโดยเป็นแบบจำลองที่ดิวตี้ไซเคิล 60-80% พบว่าระบบยังคงมีความคงทนอยู่ดังรูปที่ 3.17 อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าการควบคุมคอนโทรลเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระแบบธรรมดามีอันดับของการควบคุมที่สูงทำให้ยากที่นำไปใช้จริงซึ่งไม่เหมือนกับการควบคุมที่นำเสนอที่มีการกำหนดโครงสร้างทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้จริงมีประสิทธิภาพต่อระบบมอเตอร์กระแสตรงทั้งนี้สิ่งที่กล่าวมานั้นเป็นเพียงแค่แบบจำลองต้องทำการทดสอบจริงว่าจะเป็นไปตามระบบที่นำเสนอหรือไม่ใบบทที่ 4 และบทที่ 5

บทที่ 4

วิธีการควบคุมคอนโทรลเลอร์เชิงฟังก์ชันการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เทคนิควิธีเชิงฟังก์ชันการหาค่าเหมาะที่สุดดำเนินการในโครงสร้างบังคับบนระบบมอเตอร์กระแสตรง

4.1 บทนำ

วิธีการควบคุมคอนโทรลเลอร์เชิงฟังก์ชันการหาค่าเหมาะที่สุดดำเนินการในโครงสร้างบังคับนั้นได้ถูกนำเสนอโดยนักวิจัย ที่ได้ทำการศึกษามาแล้วบนระบบทอนทบแรงดัน[32] ผลการวิจัยพบว่า เทคนิคดังกล่าวให้สมรรถนะที่ดีและมีความคงทนต่อระบบทอนทบแรงดัน ในการทดลองนี้เช่นกัน ได้ทำการวิจัยโดยใช้เทคนิคการควบคุมคอนโทรลเลอร์เชิงฟังก์ชันการหาค่าเหมาะที่สุดร่วมกับเทคนิคสององศาอิสระเพื่อมาใช้กับระบบมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้เป็นเทคนิคที่คล้าย[32] ที่แตกต่างกันก็คือ ใช้วิธีสององศาอิสระมาทำการควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรง และได้นำมาเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ที่หาค่าเหมาะที่สุดจากวิธีเชิงฟังก์ชันการหาค่าเหมาะที่สุดซึ่งเป็นวิธีของ[32]

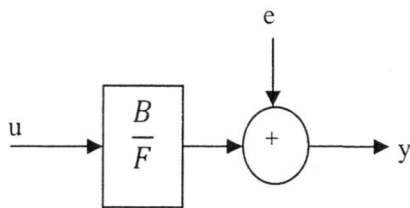
4.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (System Identification) บนระบบมอเตอร์กระแสตรงแบบความผิดพลาดของเอาต์พุต (Output Error Identification) และทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ [27]

เป็นที่ทราบกันดีว่าการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมระบบต่าง ๆ นั้น ต้องถูกวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองนั้นสามารถหาได้ในหลายวิธี เช่น แบบจำลองโดยใช้ความผิดพลาดของเอาต์พุต (Output Error identification) การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ฟัซซี่ (Fuzzy identification) เป็นต้น ในการทดลองนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใช้ความผิดพลาดของเอาต์พุต ซึ่งเป็นการจำลองที่ได้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องพอประมาณ ไม่ได้แม่นยำมากเหมือนการหาแบบจำลองแบบฟัซซี่ แต่วิธีนี้ง่ายและสะดวกกว่าในการหาแบบจำลอง

แบบจำลองนี้อาศัยการประมาณค่าความผิดพลาดในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบซึ่งรูปแบบโครงสร้างของการประมาณการแบบความผิดพลาดเอาต์พุตจะเป็นดังนี้

$$G(s) = \frac{B(s)}{F(s)} = \frac{b_n s^{(nb-1)} + b_{n-1} s^{(nb-2)} + \dots + b_1}{s^{nf} + f_{n-1} s^{(nf-1)} + \dots + f_1} \quad (4.1)$$

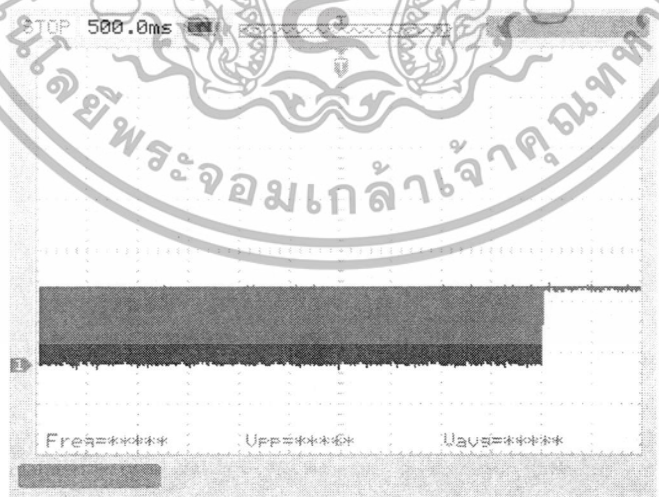
จากสมการที่ (4.1) เขียนในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองความผิดพลาดเอาท์พุท

สรุปวิธีการใช้ เมื่อใส่ข้อมูลค่าอินพุท และเอาท์พุท จากระบบที่วัดได้ พร้อมกับจำนวนของโพลและจำนวนซีโรบวกหนึ่งของระบบ ซึ่งในการใส่ค่า n_f (จำนวนโพล) n_b (จำนวนซีโร+1) และ n_x (จำนวนการสุ่มข้อมูล) นั้นก็จะอาศัยการสุ่มค่าตามแบบของโมเดลกล่องดำ (Black box model) คือไม่รู้ค่าจำนวนของโพลและซีโรของระบบมาก่อน ใช้การสุ่มค่าต่าง ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ถูกต้องออกมานั้นเอง ซึ่งคำตอบที่ออกมานั้นคือค่าพารามิเตอร์ f_1, f_2, \dots, f_{n_f} และ b_1, b_2, \dots, b_{n_b} ของสมการของระบบที่ต้องการรายละเอียดอยู่ในบทที่ 2

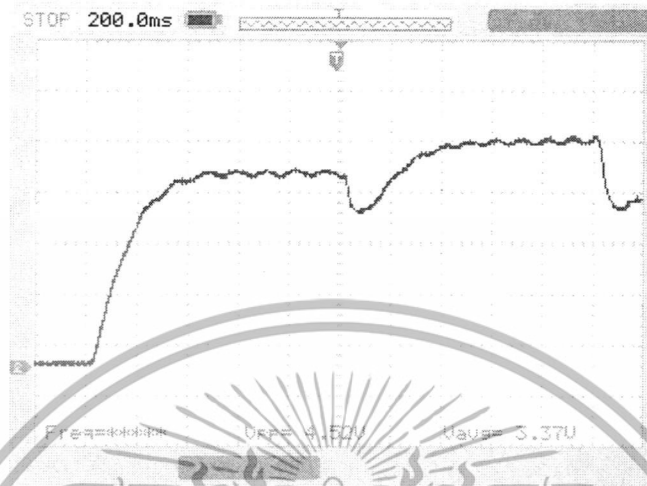
ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากระบบจริงในวิธีใดก็ตามจำเป็นต้องมีสัญญาณอินพุทที่วัดได้และสัญญาณเอาท์พุทที่วัดได้โดยเป็นผลมาจากสัญญาณอินพุทนั้น โดยสัญญาณทั้งสองต้องครอบคลุมถึงแบบจำลองที่ต้องการจะหา ในการทดลองนี้จึงให้สัญญาณอินพุทที่แปรผันตามช่วงของดิวิตีไซเคิลดังนี้ คือจะใส่สัญญาณที่ดิวิตีไซเคิล 50%-60%, 60%-70%, 70%-80%, 80%-90% และ 90%-100% ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเปลี่ยนช่วงดิวิตีไซเคิล ทุก ๆ 1 วินาที เพื่อหาแบบจำลองในทุก ๆ ช่วงของย่านความเร็วที่ศึกษาโดยสาเหตุที่ไม่ใส่ช่วงดิวิตีไซเคิล 1%-50% เพราะพิกัดของมอเตอร์อยู่ที่ 12 โวลต์ และไฟฟ้ากระแสตรงที่อินพุทให้กับวงจรขับเคลื่อนอยู่ที่ 24 โวลต์



รูปที่ 4.2 สัญญาณอินพุทที่ใช้ในการขับมอเตอร์ที่ดิวิตีไซเคิล 50%-60% หรือ ที่ 12-14.4 V

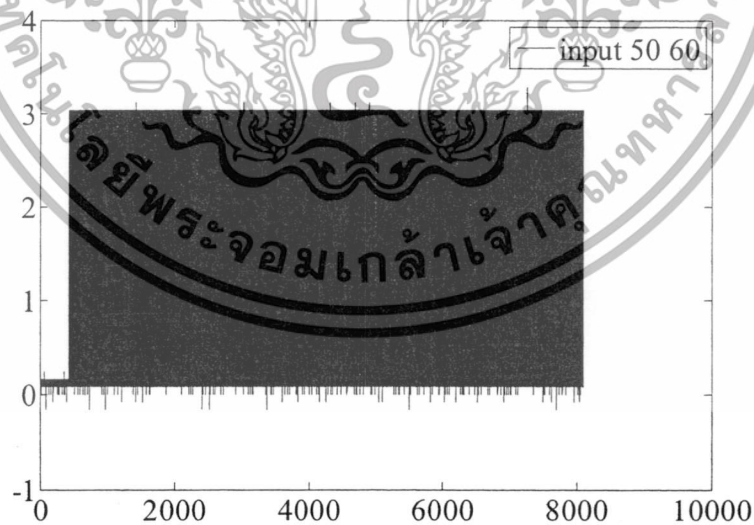
ดังนั้นสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จะปรากฏในรูปที่ 4.3 สาเหตุที่ต้องทำแบบนี้เพราะว่าจะได้แบบจำลองที่ครอบคลุมได้ทุกช่วงของความถี่เชิงมุมที่ศึกษา จะได้ไม่เป็นที่โต้แย้งว่าไม่ได้คิดผลของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบใช้ประโยชน์จากการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลศาสตร์ไม่มีรูปแบบตาม [24] และจะได้เห็นสัญญาณของพลศาสตร์ของระบบในทุกช่วงที่ศึกษา เพื่อให้ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สมบูรณ์ที่สุด และสามารถเชื่อถือได้ในการที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาเทคนิคในการควบคุมต่อไป



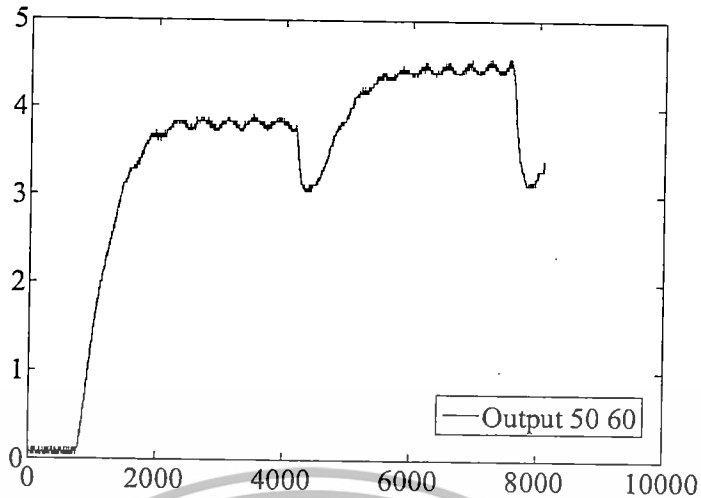
รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตเป็นความเร็วรอบมอเตอร์ที่วัดได้ในช่วงความถี่ไซเคิล 50%-60%

เมื่อได้สัญญาณที่ต้องการแล้ว นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) เพื่อหาแบบจำลองออกมา โดยแบบจำลองที่ได้นั้นจะเป็นตัวแทนของระบบมอเตอร์กระแสตรงวงรอบเปิด โดยสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่นำไปวิเคราะห์นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงความถี่ไซเคิล 50%-60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สัญญาณเอาต์พุตที่ใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงดิวิตซ์ไซเคิล 50%-60%

จากนั้นนำสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจากการทดลองไปหาแบบจำลองของระบบแบบความผิดพลาดของเอาต์พุตในโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะได้แบบจำลองระบบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แบบจำลองระบบด้วยวิธีความผิดพลาดเอาต์พุตของระบบมอเตอร์กระแสตรง

| ดิวิตซ์ไซเคิล (%) | ฟังก์ชันถ่ายโอน | ความถูกต้อง (%) |
|-------------------|---|-----------------|
| 50-60 | $B(s) = 2456 s + 6.905 \times 10^6$ $F(s) = s^2 + 1705 s + 3.005 \times 10^6$ | 63.55 |
| 60-70 | $B(s) = 2239 s + 3.123 \times 10^5$ $F(s) = s^2 + 7925 s + 1.348 \times 10^5$ | 62.91 |
| 70-80 | $B(s) = 4407 s + 2.567 \times 10^6$ $F(s) = s^2 + 1026 s + 1.269 \times 10^6$ | 57.29 |
| 80-90 | $B(s) = 1985 s + 3.464 \times 10^5$ $F(s) = s^2 + 8622 s + 1.687 \times 10^5$ | 61.24 |
| 90-100 | $B(s) = 4388 s + 4.464 \times 10^5$ $F(s) = s^2 + 1117 s + 2.314 \times 10^5$ | 74.94 |

จากผลแบบจำลองพบว่า การจำลองแบบใช้ความผิดพลาดเอาต์พุต (output error identification) ได้ให้ความถูกต้องพอประมาณ คือ 60-70% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องคิดจากสมการ (4.2) หรือสังเกตได้จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงว่าระบบมอเตอร์กระแสตรงจริงที่ศึกษานั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

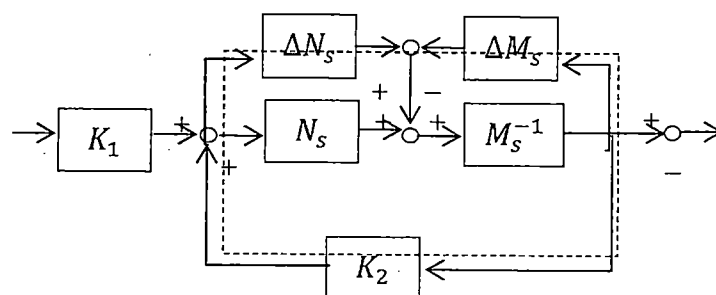
4.3 การออกแบบชุดควบคุมพีชชีแบบคงทนด้วยเทคนิคการจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ (H_∞ Loop Shaping 2 DOF) ที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสามารถนำไปหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ซึ่งสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ได้ ในการทดลองนี้ใช้เทคนิคนี้ร่วมกับเทคนิคการทำ Loop Shaping ในการออกแบบการควบคุม สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้

กำหนดให้ค่าหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการหาเป็นโครโมโซม ในแต่ละรุ่น (Generation) จะมีโครโมโซมรวมกันอยู่และจะเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่า ประชากร (Population) จำนวนประชากรในแต่ละรุ่นจะถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบ ประชากรแต่ละตัวในรุ่นจะมีค่าฟังก์ชันฟิตเนส (Fitness Function) แตกต่างกันไปโดยที่ค่าฟิตเนส เป็นค่าที่แสดงความเหมาะสม โครโมโซมนั้นคือปัญหาที่พิจารณา โครโมโซมที่มีค่าฟิตเนสสูงสุดจะเป็นคำตอบของรุ่นนั้น การสร้างประชากรรุ่นใหม่จะอาศัยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม โดยถ่ายทอดพันธุกรรมจากประชากรรุ่นพ่อแม่ไปสู่ประชากรรุ่นลูก ซึ่งมีด้วยกันสามวิธีหลัก ๆ คือ แบบผสมข้ามพันธุ์ (Crossover) แบบถอดแบบจากต้นแบบ (Reproduction) และแบบกลายพันธุ์ (Mutation)

4.3.1 ควบคุมแบบคงทนสององศาอิสระ

การควบคุมแบบจัดสรรฐานวงรอบสองแกนอิสระเอชอินฟินิตี้ (2DOF loop shaping) เป็นวิธีการควบคุมที่สามารถทำการกำหนดข้อกำหนดขอบเขตทางเวลาได้ โดยชุดควบคุมประกอบไปด้วยชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward pre-filter controller ; K_1) และชุดควบคุมแบบป้อนกลับ (feed-back controller ; K_2) โดยที่ชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (K_1) ถูกใช้สำหรับควบคุมผลการตอบสนองของขอบเขตทางเวลาของระบบแบบเปิดและชุดควบคุมแบบป้อนกลับ (K_2) ออกแบบใช้สำหรับความต้องการทางความเสถียรภาพคงทนและการลดผลโดยสิ่งรบกวน ซึ่งวิธีนี้ใช้เพียงฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักก่อน (pre-compensator weight function ; W_1) และแบบจำลองที่ใช้อ้างอิง (reference model ; T_{ref}) ในการกำหนดข้อกำหนดขอบเขตต่าง ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาระบบที่จัดสรรฐานแล้ว (G_s) เป็นแบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor) ซึ่งในระบบจะประกอบไปด้วย ตัวหาร (nominator factor : N_s) และตัวหาร (denominator factor : M_s) รูปที่ 4.8 แสดงแบบจำลองที่ไม่แน่นอนของระบบและชุดควบคุมคงทนที่นำมาสังเคราะห์ระบบ



เอกสารนี้ **รูปที่ 4.8** แสดงความไม่แน่นอนของระบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor) การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{ref} คือ ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ในการอ้างอิงในการพิจารณาในขอบเขตเวลา p คือ ค่าคงที่ที่ผู้ออกแบบใช้สำหรับออกแบบระบบตามความต้องการเชิงสมรรถนะ ระบบที่ถูกจัดตั้งฐานแล้วสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_s = GW_1 = M_s^{-1} N_s \quad (4.3)$$

ระบบที่รวมความไม่แน่นอนแล้ว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_\Delta = (N_s + \Delta_{N_s})(M_s + \Delta_{M_s})^{-1} \quad (4.4)$$

เมื่อ

G_Δ คือ ระบบที่รวมความไม่แน่นอนแล้ว

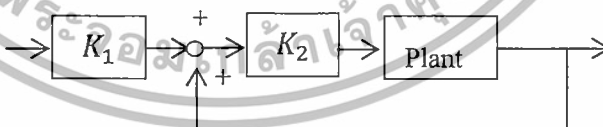
Δ_{N_s} คือ ความไม่แน่นอนในฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวถูกหาร

Δ_{M_s} คือ ความไม่แน่นอนในฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวหาร

$$|\Delta_{N_s}, \Delta_{M_s}|_\infty \leq \varepsilon \quad (4.5)$$

ε คือ ส่วนเผื่อเสถียรภาพ(stability margin)

การออกแบบหาค่าควบคุม K_1 และ K_2 ที่กำหนดโครงสร้างได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการหาค่าตอบซึ่งเป็นการออกแบบที่นำเสนอ โดยกำหนดให้การหาค่าตัวควบคุม K_2 ทำโดยการหาค่าที่ทำให้ส่วนเผื่อเสถียรภาพแบบหนึ่งองศาอิสระมีค่าสูงสุดและกำหนดให้ตัวควบคุม K_1 เป็นผลตอบสนองของตัวควบคุมมีสมรรถนะทางโดเมนเวลาเหมาะสมที่สุด เมื่อเทียบกับโครงสร้างซึ่งเป็นที่ตั้ง



รูปที่ 4.9 การควบคุมแบบสององศาอิสระทั่วไป

ขั้นตอนการออกแบบสามารถสรุปได้ดังนี้ [33]

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบโครงสร้างตัวควบคุม K_1 และ K_2 ออกแบบ W_1 และ T_{ref}

ขั้นตอนที่ 2 ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหาตัวควบคุม K_2 ที่ทำให้ ค่าดัชนีคงทนสมรรถนะแบบหนึ่งองศาอิสระต่อไปนี้มีค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

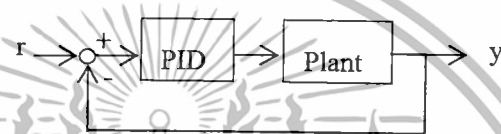
$$\|T_{ZW}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K_{2\infty} \end{bmatrix} (I + G_S K_{2\infty})^{-1} M_S^{-1} \right\|_{\infty} \leq \varepsilon^{-1} \quad (4.6)$$

$$\text{เมื่อ } K_{2\infty} = W_1^{-1} K_2(p_2)$$

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้ตัวควบคุมแบบหนึ่งองศาอิสระ K_2 แล้วให้หาตัวควบคุมที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาที่มีค่าผิดพลาดกำลังสองทางโดเมนเวลาเทียบโมเดลอ้างอิงมีค่าต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบสมรรถนะ

จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบพีไอดี โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าเหมาะสมโดยไม่มี การทำให้ระบบคงทนซึ่งมีการกำหนดโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 4.10 การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป

ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบโครงสร้างตัวควบคุมพีไอดี

ขั้นตอนที่ 2 ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหาตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้ ค่าดัชนีคงทนสมรรถนะแบบหนึ่งองศาอิสระต่อไปนี้มีค่าต่ำสุด

$$\|T_{ZW}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K_{PID\infty} \end{bmatrix} (I + G_S K_{PID\infty})^{-1} M_S^{-1} \right\|_{\infty} \leq \varepsilon^{-1} \quad (4.7)$$

$$\text{เมื่อ } K_{PID\infty} = W_1^{-1} K_{PID}(p_2)$$

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบสมรรถนะ

4.4 การสังเคราะห์ชุดควบคุมแบบที่นำเสนอและการควบคุมแบบพีไอดี (PID controller optimized by GA) ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

จากการหาแบบจำลองความผิดพลาดเอาต์พุตที่จุดดำเนินการ คือที่ตัวตีไซเคิล 50-60% เมื่อวิเคราะห์ในโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time) ให้อยู่ในเชิงของความถี่ (S-domain) ดังตารางที่ 4.1 จากนั้นทำการหาค่าความเหมาะสมโดยวิธีเชิงพันธุกรรมตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยจะกำหนดโครงสร้าง W_1 ดังสมการที่ (4.8)

$$W_1 = \frac{x_1 s + x_2}{s + 0.001} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการทดลองนี้ได้กำหนดโครงสร้างของชุดควบคุมเป็นแบบพีไอดี (PID Controller) และชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward pre-filter controller) ซึ่งมีโครงสร้างดังสมการที่ (4.9) และ (4.10) ตามลำดับ

$$K_1(p) = \left[\frac{1}{K_{f1}s+1} \right] \quad (4.9)$$

$$K_2(p) = \left[K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} + \frac{K_{d1}s}{T_{d1}s+1} \right] \quad (4.10)$$

ส่วนการควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้นำมาเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่นำเสนอ นั้น จะใช้ W_1 ที่คิดได้จากวิธีเชิงพันธุกรรมจากสมการที่ (4.8) ส่วนการควบคุมจะเป็นแบบพีไอดีตามสมการที่ (4.11)

$$K_{PID}(p) = \left[K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{0.0001s+1} \right] \quad (4.11)$$

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมและขอบเขตของการควบคุม

| พารามิเตอร์ | มีค่า |
|--------------|--------------|
| K_{p1} | [10, 200] |
| K_{i1} | [1000, 5000] |
| K_{d1} | [0, 1] |
| K_p | [1, 10] |
| K_i | [1, 20] |
| K_d | [0, 0.005] |
| T_{d1} | [0, 100] |
| x_1 | [0, 100] |
| x_2 | [0, 3000] |
| K_{f1} | [995, 1005] |
| จำนวนประชากร | 100 |

ขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรม จะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนี้ และกำหนดขอบเขตของชุดควบคุมและฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักดังในตารางที่ 4.2 เมื่อดำเนินขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมจะได้ชุดควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในจุดดำเนินการ โดยจะมีส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบเท่ากับ 0.6325 ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 สำหรับการควบคุมที่นำเสนอ และสมการที่ (4.12) กับสมการที่ (4.13), (4.14) และ(4.15) จะแสดงฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมที่เหมาะสมที่ได้ในจุดดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

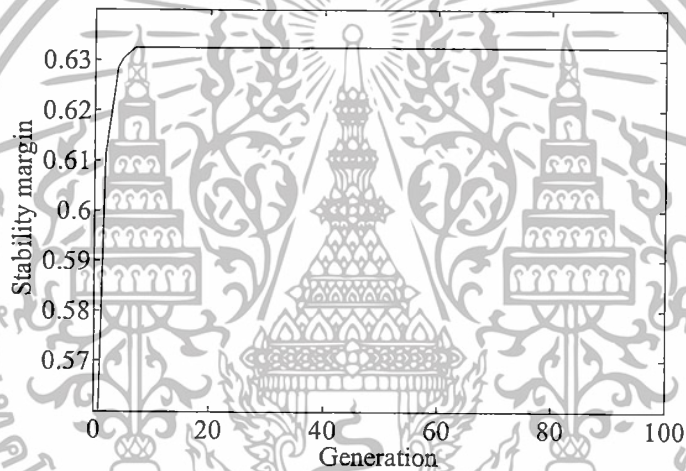
$$W_1 = \frac{96.7703s+824.2056}{s+0.001} \quad (4.12)$$

$$T_{ref} = \frac{1}{0.05s+1} \quad (4.13)$$

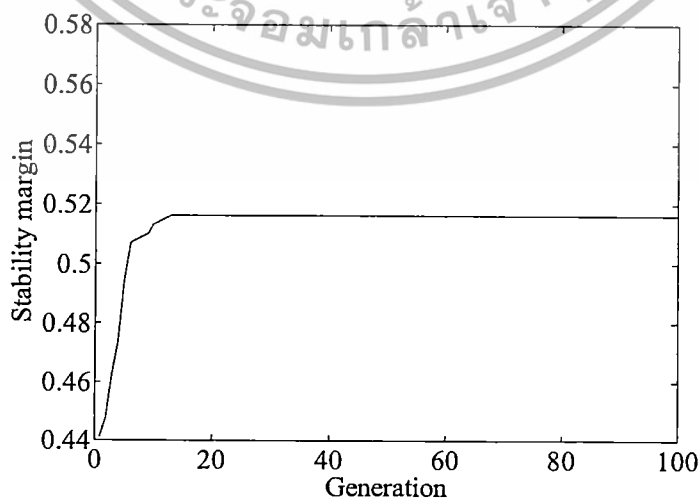
$$K_2(p) = 97.1672 + \frac{2428.4561}{s} + \frac{0.7884s}{94.5042s+1} \quad (4.14)$$

$$K_1(p) = \frac{1}{1003.5345s+1} \quad (4.15)$$

$$K_{PID}(p) = 1.387 + \frac{17.194}{s} + \frac{0.002512s}{0.0001s+1} \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.11 ส่วนเพื่อเสถียรภาพของการควบคุมที่นำเสนอ

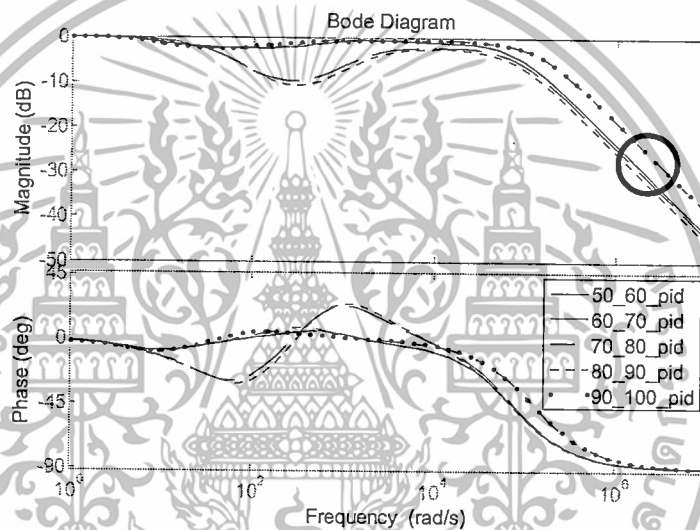


รูปที่ 4.12 ส่วนเพื่อเสถียรภาพของการควบคุมแบบพีไอดี

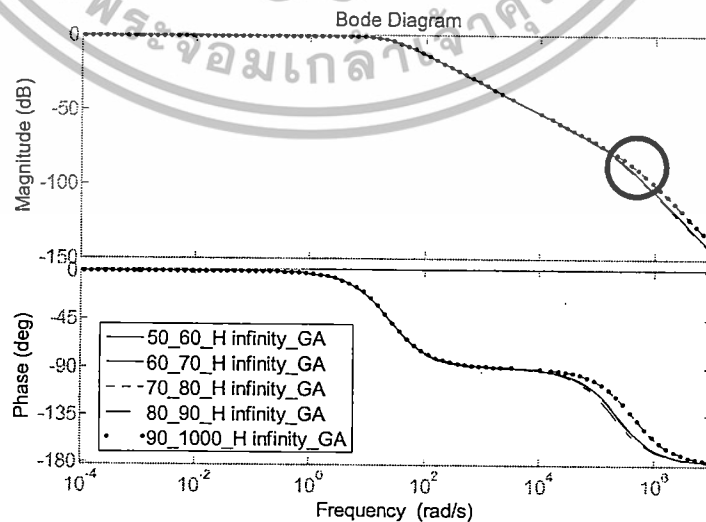
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของชุดควบคุมที่นำเสนอในบทนี้ ได้มีการเปรียบเทียบกับการออกแบบชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบพีไอดีที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่ดิวตี้ไซเคิล 50-60% [32] โดยมีฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมดังสมการที่ (4.12) และ (4.16) ตามลำดับ โดยจะมีส่วนเพื่อเสถียรภาพเท่ากับ 0.5163 ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.12

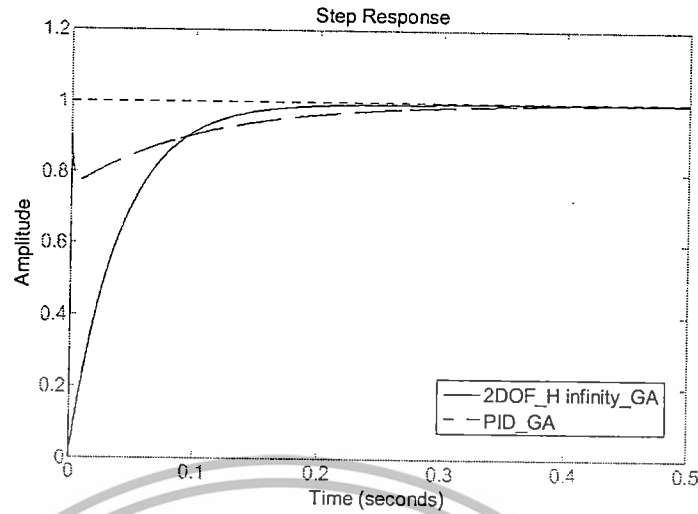
เมื่อนำการควบคุมนำเสนอและนำการควบคุมแบบพีไอดีไปทำการพล็อตแผนภาพโบเดโดยกำหนดให้ค่าดิวตี้ไซเคิลเปลี่ยนแปลงไปแล้วจะได้แผนภาพดังรูปที่ 4.14 จะพบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอจะมีค่าแบนด์วิธที่ใกล้เคียงกันทุกเส้น และเมื่อเปรียบเทียบกับแผนภาพโบเดของระบบที่มีการควบคุมคงทนแบบพีไอดีแล้วจะได้แผนภาพโบเดดังรูปที่ 4.13 จะพบว่าเทคนิคที่นำเสนอนั้นจะให้วงรอบตามที่ต้องการ โดยที่ความถี่ต่ำจะให้อัตราขยายที่สูงและความถี่สูงจะให้อัตราขยายที่ต่ำและกราฟไม่กระจายตัวออกจากวงรอบที่ต้องการ แสดงถึงชุดควบคุมที่นำเสนอนี้มีการตอบสนองต่อวงรอบที่ดีกว่า



รูปที่ 4.13 แผนภาพโบเดของการควบคุมพีไอดีที่ออกแบบการควบคุมที่ลดดำเนินการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.14 แผนภาพโบเดของการควบคุมที่นำเสนอใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับการควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่ออกแบบชุดควบคุมที่จุดดำเนินการ

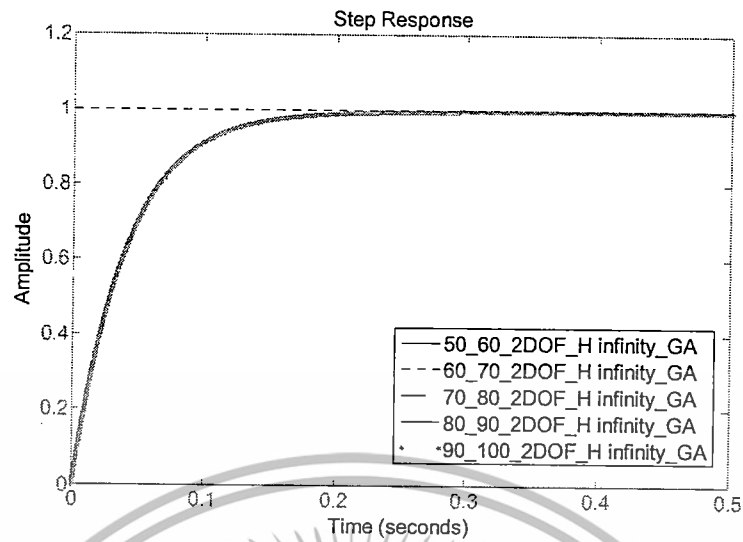
ตารางที่ 4.3 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับการควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่ออกแบบชุดควบคุมที่จุดดำเนินการ

| การควบคุมที่นำเสนอ | | การควบคุมคงทนแบบพีไอดี | |
|--------------------|----------------|------------------------|----------------|
| เวลาสู่สมดุลย์ (s) | เวลาขาขึ้น (s) | เวลาสู่สมดุลย์ (s) | เวลาขาขึ้น (s) |
| 0.2514 | 0.1274 | 0.3823 | 0.1629 |

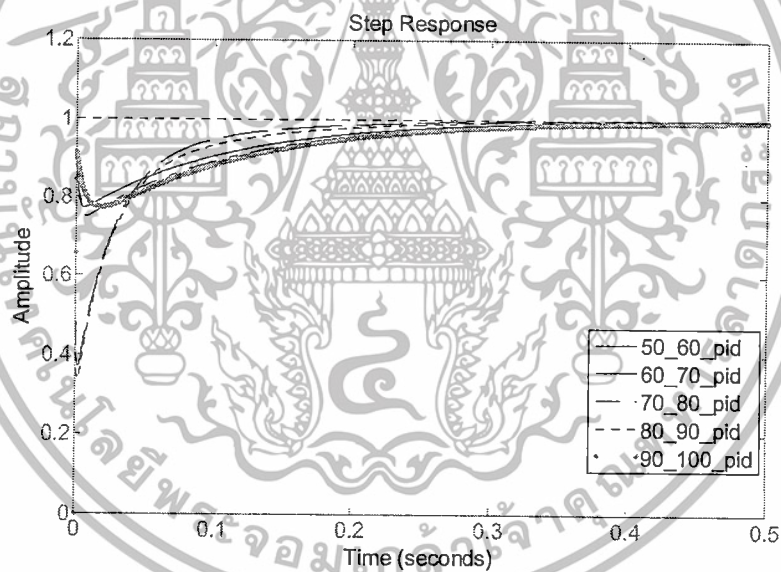
จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.3 พบว่าการควบคุมที่นำเสนอมีความเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดีกว่าการควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่ออกแบบการควบคุมที่จุดดำเนินการ ไม่ว่าจะเป็นเวลาขาขึ้นและเวลาเข้าสู่สมดุลย์ที่เร็วกว่าและเข้าใกล้แบบจำลองอ้างอิงมากกว่าแต่เปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูตไม่เกิดขึ้นทั้งคู่

4.5 การจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริง

เพื่อแสดงการเปรียบเทียบความคงทนและสมรรถนะของการควบคุมที่นำเสนอในการทดลองนี้[32] ได้มีการทดสอบจากระบบจริง แต่ก่อนที่จะทดสอบระบบจริงได้นำการควบคุมที่นำเสนอกับการควบคุมแบบพีไอดีไปทดสอบความคงทนโดยเปลี่ยนแบบจำลองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวดีไซเคิลตารางที่ 4.1 ซึ่งจะได้ผลตอบสนองแบบขั้นบันไดของการควบคุมที่นำเสนอในรูปที่ 4.16 และผลตอบสนองแบบขั้นบันไดของการควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 4.17 เป็นดังนี้



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองขั้นบันไดของการควบคุมที่นำเสนอเมื่อแบบจำลองเปลี่ยนไป



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองขั้นบันไดของการควบคุมพีไอดีเมื่อแบบจำลองเปลี่ยนไป

จากการทดลองพบว่า การควบคุมที่นำเสนอมีความคงทนที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีเมื่อแบบจำลองเปลี่ยนไป สังเกตได้จากกราฟมีการตอบสนองขั้นบันไดของแบบจำลองที่จุดดำเนินการนั้นไม่ได้แตกต่างจากผลการตอบสนองขั้นบันไดเมื่อแบบจำลองเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการตอบสนองของระบบที่ออกแบบชุดควบคุม และระบบหลังเปลี่ยนแบบจำลองของชุดควบคุมที่นำเสนอและชุดควบคุมพีไอดี

| ดิวตี้ไซเคิล | ชุดควบคุมที่นำเสนอ | | ชุดควบคุมพีไอดี | |
|--------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | เวลาขาขึ้น | เวลาสู่สมดุลย์ | เวลาขาขึ้น | เวลาสู่สมดุลย์ |
| 50-60% | 0.1274 วินาที | 0.2514 วินาที | 0.1629 วินาที | 0.3823 วินาที |
| 60-70% | 0.1274 วินาที | 0.2514 วินาที | 0.0988 วินาที | 0.3611 วินาที |
| 70-80% | 0.1274 วินาที | 0.2514 วินาที | 0.1779 วินาที | 0.4091 วินาที |
| 80-90% | 0.1274 วินาที | 0.2514 วินาที | 0.1043 วินาที | 0.3703 วินาที |
| 90-100% | 0.1274 วินาที | 0.2514 วินาที | 0.1861 วินาที | 0.4127 วินาที |

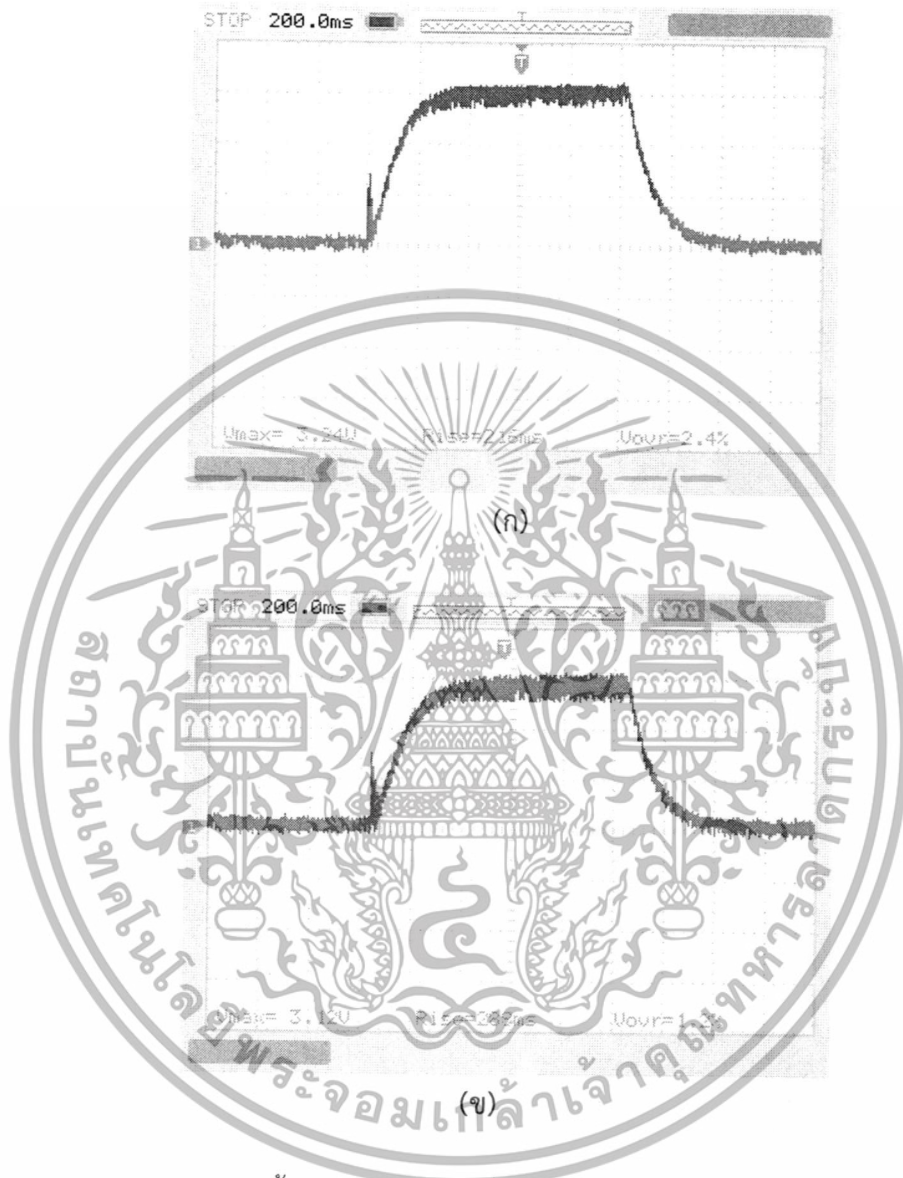
จากการทดลองได้มีการออกแบบตัวระบบกล ได้ไปทำระบบกลเคลื่อนที่แกนเดียวโดยขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม จากนั้นไปต่อกับสวิตสกรูทำให้การเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น ทำให้ได้ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้นแกนเดียว ได้ทำการต่อตัวตรวจจับ (Encoder) ไว้ที่ท้ายของสวิตสกรูเพื่อวัดรอบความเร็ว ตำแหน่ง ในทางฝั่งมอเตอร์ก็ต่อกับวงจรขับเคลื่อนแบบพีดับบลิวเอ็ม (PWM) และควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์มรัน ARM Cortex-M4 เพื่อรับส่งค่าและรับค่าจากตัวตรวจจับ (Encoder) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมวงรอบกลับ



รูปที่ 4.18 ระบบที่จะทดสอบสมรรถนะจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมมอเตอร์นั้น จะต้องมีตัวขับเคลื่อนมอเตอร์จะใช้บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบเอชบริดจ์ (H-bridge) จากนั้นคำสั่งที่จะใช้ควบคุมวัดผลแสดงผลได้มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์มรุ่น ARM Cortex-M4 และวัดความเร็วรอบด้วยไอซี LM331



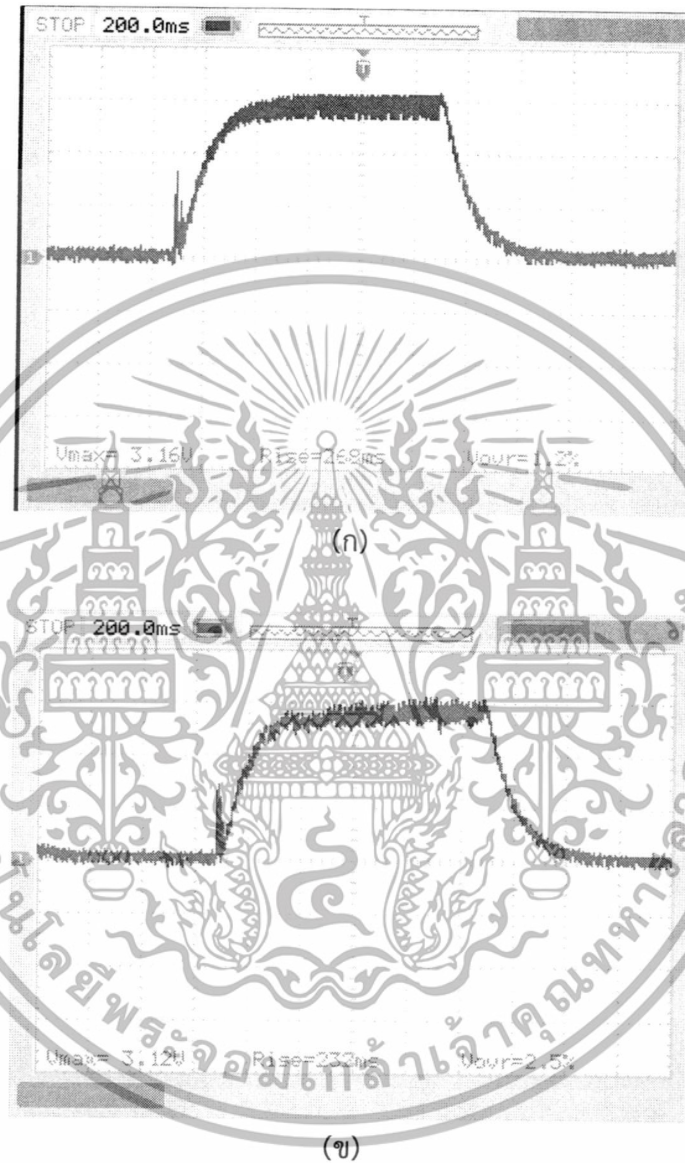
รูปที่ 4.19 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของระบบที่ออกแบบการควบคุม (Nominal Plant)
(ก) ชุดควบคุมที่นำเสนอละ (ข) ชุดควบคุมพีไอดี

เมื่อนำชุดควบคุมที่ได้จากการออกแบบไปใช้กับระบบมอเตอร์กระแสตรงจริงโดยมีการสั่งให้ระบบตอบสนองเป็นขั้นบันได จะพบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอมีการตอบสนองที่ดีไม่มีโอเวอร์ชูตเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ก) ส่วนรูปที่ 4.19 (ข) แสดงการตอบสนองของชุดควบคุมพีไอดีซึ่งจะพบว่ามีความล่าช้าที่ช้ากว่าชุดควบคุมแบบที่นำเสนอละเล็กน้อยและไม่มีโอเวอร์ชูตเช่นกัน

เพื่อทดสอบความคงทนได้ทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ภายในระบบ โดยใส่น้ำหนักที่เพิ่มละ 2 กิโลกรัมจนถึง 16 กิโลกรัม จะพบว่าชุดควบคุมแบบที่นำเสนอยังมีการตอบสนองที่ดีอยู่ดังในรูปที่ 4.20 (ก) ส่วนการตอบสนองของการควบคุมพีไอดีที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์จะทำให้

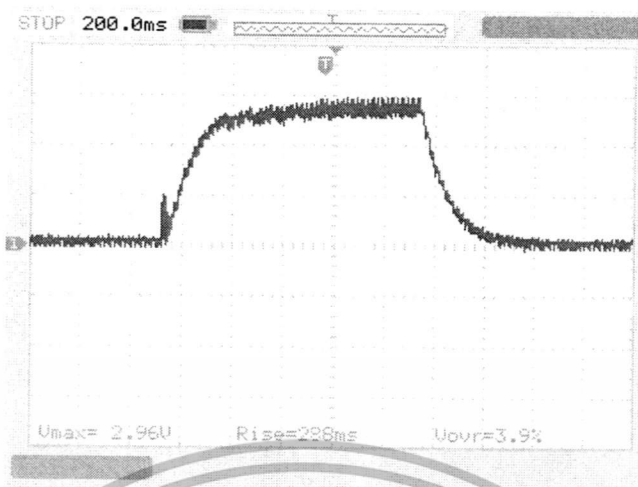
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่ขอขึ้นบัญชี เมื่อผู้เขียนหรือเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองข้างลง เกิดการสั่นของระบบ และเกิดความผิดพลาดที่สถานะคงตัว โดยขณะที่ใส่น้ำหนักที่ 8 กิโลกรัม ดังรูปที่ 4.20(ข) เมื่อทดสอบที่น้ำหนัก 10 กิโลกรัม พบว่าการควบคุมแบบพีไอดีมีการตอบสนองที่ไม่ดีอย่างเห็นได้ชัด จากผลที่ได้แสดงถึงความคงทนต่อสภาวะที่เปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของชุดควบคุมแบบที่นำเสนอที่ดีกว่า



รูปที่ 4.20 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ (กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 8 กิโลกรัม) (ก) ชุดควบคุมที่นำเสนอและ (ข)ชุดควบคุมพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ (กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 10 กิโลกรัม) (ก) ชุดควบคุมที่นำเสนอและ (ข) ชุดควบคุมพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการตอบสนองจริงของระบบที่ออกแบบชุดควบคุม และระบบหลังเปลี่ยน พารามิเตอร์ของชุดควบคุมที่นำเสนอและชุดควบคุมพีไอดี

| น้ำหนัก | ชุดควบคุมที่นำเสนอ | | | ชุดควบคุมพีไอดี | | |
|-------------|--------------------|----------------|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------------|
| | เวลาขาขึ้น | เวลาสู่สมดุลย์ | ความผิดพลาดสถานะคงที่ | เวลาขาขึ้น | เวลาสู่สมดุลย์ | ความผิดพลาดสถานะคงที่ |
| 0 กิโลกรัม | 0.22 วินาที | 0.25 วินาที | 0% | 0.3 วินาที | 0.4 วินาที | 0% |
| 2 กิโลกรัม | 0.22 วินาที | 0.25 วินาที | 0% | 0.3 วินาที | 0.4 วินาที | 0% |
| 4 กิโลกรัม | 0.22 วินาที | 0.25 วินาที | 0% | 0.3 วินาที | 0.4 วินาที | 0% |
| 6 กิโลกรัม | 0.22 วินาที | 0.25 วินาที | 0% | 0.3 วินาที | 0.4 วินาที | 1.2% |
| 8 กิโลกรัม | 0.22 วินาที | 0.25 วินาที | 1.2% | 0.5 วินาที | 0.55 วินาที | 6% |
| 10 กิโลกรัม | 0.27 วินาที | 0.35 วินาที | 3.8% | 0.55 วินาที | 0.65 วินาที | 10.25% |
| 12 กิโลกรัม | 0.30 วินาที | 0.4 วินาที | 5.1% | 0.6 วินาที | 0.65 วินาที | 19.87% |
| 14 กิโลกรัม | 0.32 วินาที | 0.4 วินาที | 5.1% | 0.65 วินาที | 0.7 วินาที | 23.07% |
| 16 กิโลกรัม | 0.35 วินาที | 0.4 วินาที | 6% | 0.7 วินาที | 0.75 วินาที | 26.28% |

4.6 สรุปผล

จากผลที่ได้พบว่า ชุดควบคุมที่นำเสนอในการทดลองนี้มีความคงทนที่ดี โดยที่ชุดควบคุมสามารถกำหนดโครงสร้างได้และอาศัยพื้นฐานของการออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ (H_∞ Loop Shaping 2DOF Control) แล้วใช้ขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมมาแก้ปัญหาชุดควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบที่จัดดำเนินการของแบบจำลองความผิดพลาดของเอาต์พุต (Output Error identification) จากผลการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมที่นำเสนอมีสมรรถนะและความคงทนที่ดี ถึงแม้ว่าจะเพิ่มน้ำหนักภายในระบบ ชุดควบคุมที่นำเสนอนี้ ก็ยังมีการตอบสนองที่ดีอยู่เมื่อมีการนำมาเปรียบเทียบกับชุดควบคุมคงทนแบบพีไอดี พบว่าได้ค่าทางพลศาสตร์ที่ดีกว่าในทุก ๆ กรณี ไม่ว่าจะเป็นเวลาขาขึ้น เวลาเข้าสู่สมดุลย์ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว อีกทั้งการลู่เข้าหาสัญญาณวงรอบที่ต้องการได้ดีตามต้องการ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพโพล และเมื่อนำมาทดสอบความคงทนจริง ก็พบว่าชุดควบคุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่นำเสนอมีความคงทนถึง 10 กิโลกรัม แต่ชุดควบคุมแบบพีไอดีคงทนได้อยู่ที่ 8 กิโลกรัม และเมื่อทดสอบที่ 10 กิโลกรัม ระบบเกิดการสั่นเมื่อระบบนั้นดำเนินการไปได้ 1 นาที และไม่ได้ความเร็วตามที่ต้องการ สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิธีการควบคุมคอนโทรลเลอร์แบบปรับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวมในโครงสร้างบังคับบนระบบมอเตอร์กระแสตรง

5.1 บทนำ

วิธีการควบคุมคอนโทรลเลอร์แบบปรับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวมในโครงสร้างบังคับนั้นได้ถูกนำเสนอโดยนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษามาแล้วบนระบบนิวเมตริก [12] ผลการวิจัยพบว่าเทคนิคดังกล่าวให้สมรรถนะที่ดีและมีความคงทนต่อระบบนิวเมตริกที่ดีกว่าวิธีการควบคุมคอนโทรลเลอร์แบบปรับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวมในโครงสร้างบังคับในตำแหน่งที่ออกแบบ อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังมีการเปรียบเทียบในแบบจำลองของเทคนิคการควบคุมคอนโทรลเลอร์แบบปรับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวมในโครงสร้างบังคับกับวิธีที่ได้นำเสนอของงานวิจัยนั้น พบว่าเทคนิคที่นำเสนอมีการจัดสรรฐานวงรอบที่ดีกว่าเทคนิคการควบคุมคอนโทรลเลอร์แบบปรับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวมในโครงสร้างบังคับ ในการทดลองนี้ก็เช่นกัน ทำการวิจัยโดยการใช้เทคนิคการควบคุมคอนโทรลเลอร์แบบปรับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวมในโครงสร้างบังคับมาใช้ร่วมกับเทคนิคสององศาอิสระเพื่อมาใช้กับระบบมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอเสนอนี้เป็นเทคนิคที่คล้าย [12] ที่แตกต่างกันก็คือใช้วิธีสององศาอิสระมาทำการควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรง

5.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (System Identification) บนระบบมอเตอร์กระแสตรงแบบฟัซซี (Fuzzy Model) และทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้

เป็นที่ทราบกันดีว่าการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมระบบต่าง ๆ นั้นต้องถูกวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองนั้นสามารถหาได้ในหลายวิธี เช่น แบบจำลองโดยใช้ความผิดพลาดของเอาต์พุต (Output Error identification) ,การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ฟัซซี (Fuzzy identification) เป็นต้น ในการทดลองนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซีของทาคาจิ-ซีเงะโนะ [15] บนเทคนิคของงานวิจัย [14] ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคของ [14] นั้นสามารถให้แบบจำลองที่แม่นยำสูง ในการทดลองนี้ก็เช่นเดียวกันจะทำการเปรียบเทียบแบบจำลองของระบบจริงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซีของทาคาจิ-ซีเงะโนะกับแบบจำลองโดยใช้ความผิดพลาดของเอาต์พุต เพื่อให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซีของทาคาจิ-ซีเงะโนะสามารถให้ความแม่นยำที่สูงกว่าและจะได้แบบจำลองที่เที่ยงตรงกว่าดังนี้

ในการทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์ระบบเป็นแบบดิสครีต (Discrete Model) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบจำลองฟัซซีทาคาจิ-ซีเงะโนะสามารถแสดงโครงสร้างกฎของแบบจำลองได้ดังนี้

$$R_j: \text{if } \bar{y}(k) \text{ is } A_j \text{ then } y^i(k+1) = a_1^j y(k) + a_2^j y(k-1) + b_1^j u(k-d+1) \quad (5.1)$$

เมื่อ \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบของระบบมอเตอร์กระแสตรง k คือ จำนวนของการสุ่มข้อมูล (Sample Data No.k) d คือ จำนวนของค่าของเวลาหน่วง (Number of Time Delay) และ A_j คือ ฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซี (Fuzzy Membership Function) จากแบบจำลองในสมการ (5.1) มีค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบของระบบมอเตอร์กระแสตรงมาเป็นตัวตรวจสอบเงื่อนไข (Scheduling Vector) ของแบบจำลองฟัซซีทาคาจิ-ซีเงะโนะ โดยที่กำหนดให้จำนวนกฎของฟัซซี (Number of Rules in the Fuzzy Model) เท่ากับ 5 โดยที่ระบบในตำแหน่งต่าง ๆ (Local Models) สามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$G = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & b_1^1 \\ a_1^2 & a_2^2 & b_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_1^5 & a_2^5 & b_1^5 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ในระบบ G แล้วนำไปพิจารณาตามแบบจำลองฟัซซีทาคาจิ-ซีเงะโนะ จะได้ระบบ $G_{\bar{y}}$ ที่สัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบระบบมอเตอร์กระแสตรง (\bar{y}) ดังแสดงได้ดังนี้

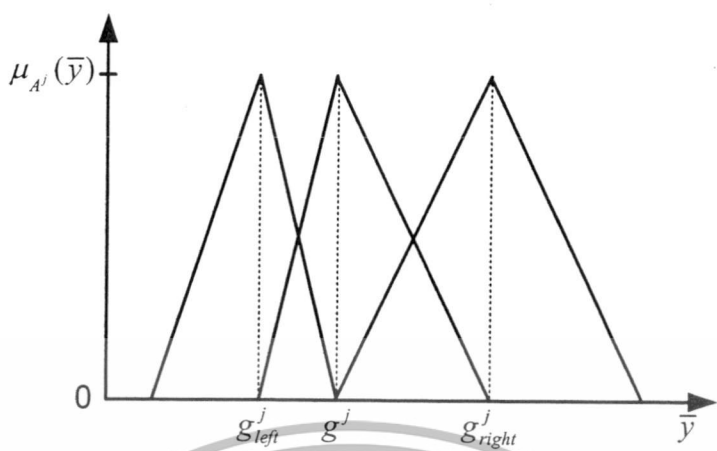
$$G_{\bar{y}} = \frac{\sum_{j=1}^M \mu_j G_j}{\sum_{j=1}^M \mu_j} \quad (5.3)$$

เมื่อ $\mu_j = \mu_{A_j}(\bar{y})$ คือ ค่าของฟังก์ชันสมาชิกของระบบในความเร็วรอบที่ j (j^{th} Local Model) G_j คือ ระบบในความเร็วรอบที่ j และ M คือ จำนวนของระบบในความเร็วรอบต่างๆ มีจำนวนเท่ากับ 5 ความเร็วรอบตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 220, 260, 300, 340 และ 380 (rpm) ของระบบและได้กำหนดฟังก์ชันสมาชิกที่เป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mu_{A^j}(\bar{y}) = \begin{cases} \frac{\bar{y} - g_{left}^j}{g^j - g_{left}^j} & \text{for } g_{left}^j < \bar{y} < g^j \\ \frac{g_{right}^j - \bar{y}}{g_{right}^j - g^j} & \text{for } g^j < \bar{y} < g_{right}^j \end{cases} \quad (5.4)$$

เมื่อ g^j, g_{left}^j และ g_{right}^j จุดกึ่งกลางของสามเหลี่ยมตัวของ j ด้านซ้ายและด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันสมาชิกที่เป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม

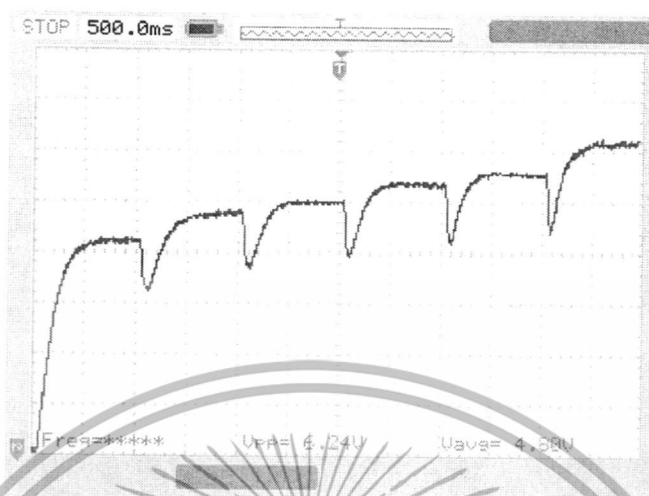
ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากระบบจริงในวิธีใดก็ตามจำเป็นต้องมีสัญญาณอินพุตที่วัดได้และสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้โดยเป็นผลมาจากสัญญาณอินพุตนั้น โดยสัญญาณทั้งสองต้องครอบคลุมถึงแบบจำลองที่ต้องการจะหา ในการทดลองนี้จึงสัญญาณอินพุตที่แปรผันตามช่วงของดิวิตีไซเคิลดังนี้คือจะใส่สัญญาณที่ดิวิตีไซเคิล 50%-60%, 60%-70%, 70%-80%, 80%-90% และ 90%-100% ตามรูปที่ 5.2 ซึ่งจะเปลี่ยนช่วงดิวิตีไซเคิล ทุก ๆ 1 วินาทีโดยสาเหตุที่ไม่ใส่ช่วงดิวิตีไซเคิล 1%-50% เพราะที่กัตของมอเตอร์อยู่ที่ 12 โวลต์ และไฟฟ้ากระแสตรงที่อินพุตให้กับวงจรขับเคลื่อนอยู่ที่ 24 โวลต์



รูปที่ 5.2 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการขับมอเตอร์ที่ดิวิตีไซเคิล 50%-100% หรือ ที่ 12-24 V

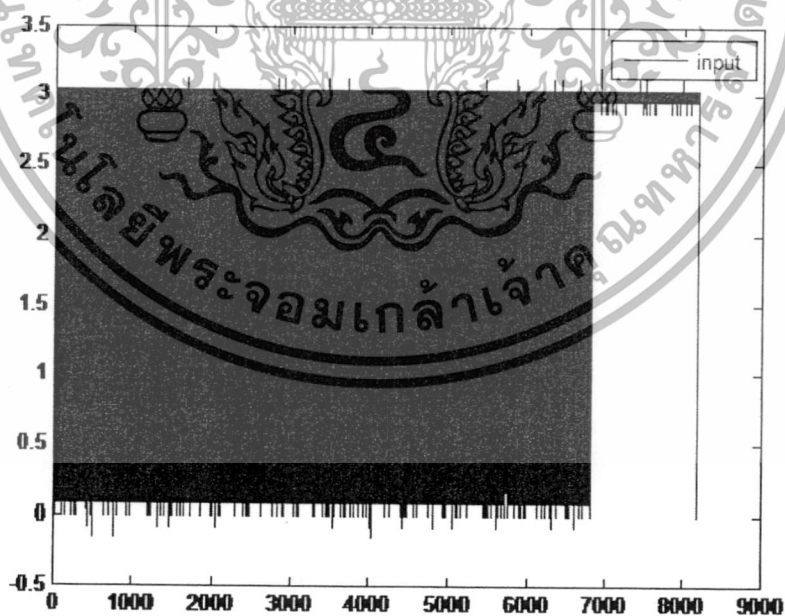
ดังนั้น สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะปรากฏในรูปที่ 5.3 สาเหตุที่ต้องทำแบบนี้เพราะว่าจะได้แบบจำลองที่ครอบคลุมได้ทุกช่วงของความเร่งเชิงมุมที่ศึกษา จะได้ไม่เป็นที่โต้แย้งว่าไม่ได้คิดผลของพลศาสตร์ไม่มีรูปแบบตาม [24] และจะให้เห็นสัญญาณของพลศาสตร์ของระบบในทุกช่วงที่ศึกษา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนอินเตอร์เน็ตไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สมบูรณ์ที่สุดและสามารถเชื่อถือได้ในการที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาเทคนิคในการควบคุมต่อไป



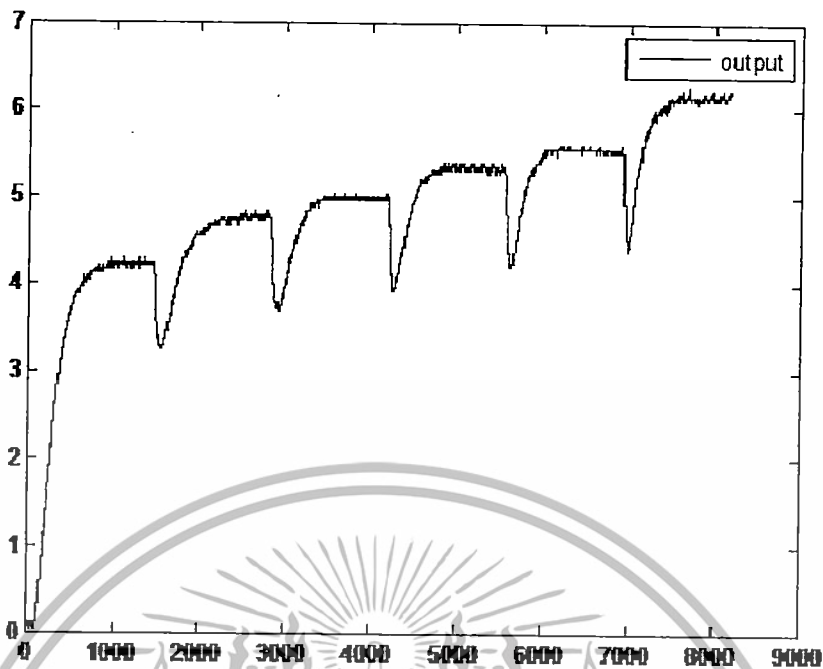
รูปที่ 5.3 สัญญาณเอาต์พุตเป็นความเร็วรอบมอเตอร์ที่วัดได้

เมื่อได้สัญญาณที่ต้องการแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) เพื่อหาแบบจำลองออกมาโดยแบบจำลองที่ได้นั้น จะเป็นตัวแทนของระบบมอเตอร์กระแสตรงวงรอบเปิดโดยสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่นำไปวิเคราะห์นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5



รูปที่ 5.4 สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สัญญาณเอาต์พุตที่ใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากนั้นนำสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจากการทดลองไปหาแบบจำลองของระบบแบบพีชคณิต [14] จะได้ค่าพารามิเตอร์ a_1^i , a_2^i และ b_1^i ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองพีชคณิตเชิงเส้นของระบบมอเตอร์กระแสตรง

| ความเร็วรอบ(rpm) | พารามิเตอร์ a_1^i | พารามิเตอร์ a_2^i | พารามิเตอร์ b_1^i | จำนวนของค่าของเวลาห้วง d |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| 1 (y=220) | 0.5863 | -0.4139 | 0.000482 | 3 |
| 2 (y=260) | 0.5897 | 0.4101 | -0.000125 | 2 |
| 3 (y=300) | 0.5315 | 0.4685 | 0.000307 | 2 |
| 4 (y=340) | 0.1844 | 0.8149 | 0.000651 | 2 |
| 5 (y=380) | 0.7183 | 0.2813 | 0.001613 | 2 |

จากผลแบบจำลองพบว่า การจำลองแบบพีชคณิตมีความถูกต้องกว่าแบบจำลองแบบใช้ความผิดพลาดเอาต์พุต (output error identification) โดยแบบจำลองแบบพีชคณิตมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องอยู่ที่ 99.99% ส่วนแบบจำลองแบบใช้ความผิดพลาดเอาต์พุตมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ที่ 38.79% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องคิดจากสมการ (5.5) หรือสังเกตได้จากรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 พบว่าแบบจำลองแบบฟัซซีที่มีความถูกต้องกว่าแบบจำลองแบบใช้ความผิดพลาดเอาท์พุทอย่างชัดเจน แสดงว่าระบบมอเตอร์กระแสตรงจริงที่ศึกษานั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้นเพราะถ้าระบบมีความเป็นเชิงเส้นจริงแล้วการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีความผิดพลาดเอาท์พุทต้องมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่สูงด้วย จึงเป็นการพิสูจน์ว่าแบบจำลองฟัซซีเหมาะกับการจำลองระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น

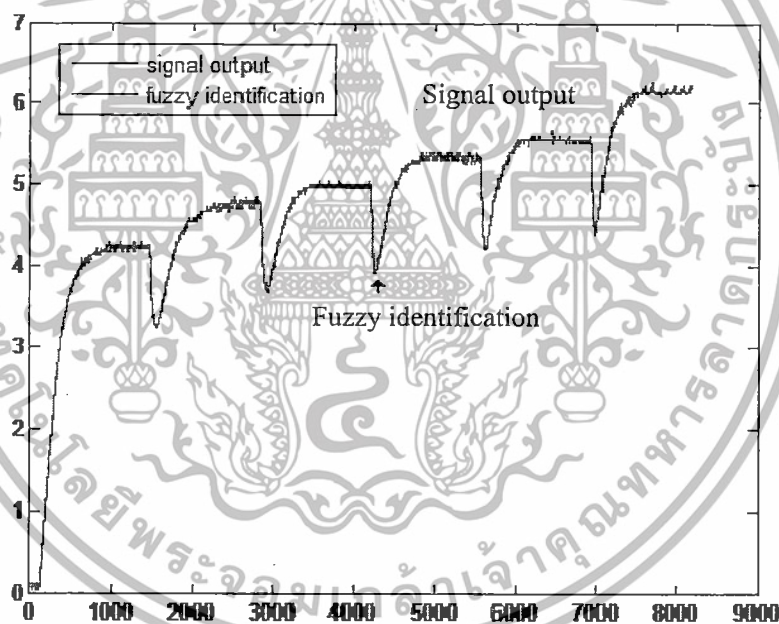
$$Fit = 100\% \left[1 - \frac{A-B}{A} \right] \quad (5.5)$$

โดยที่

Fit คือ เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง

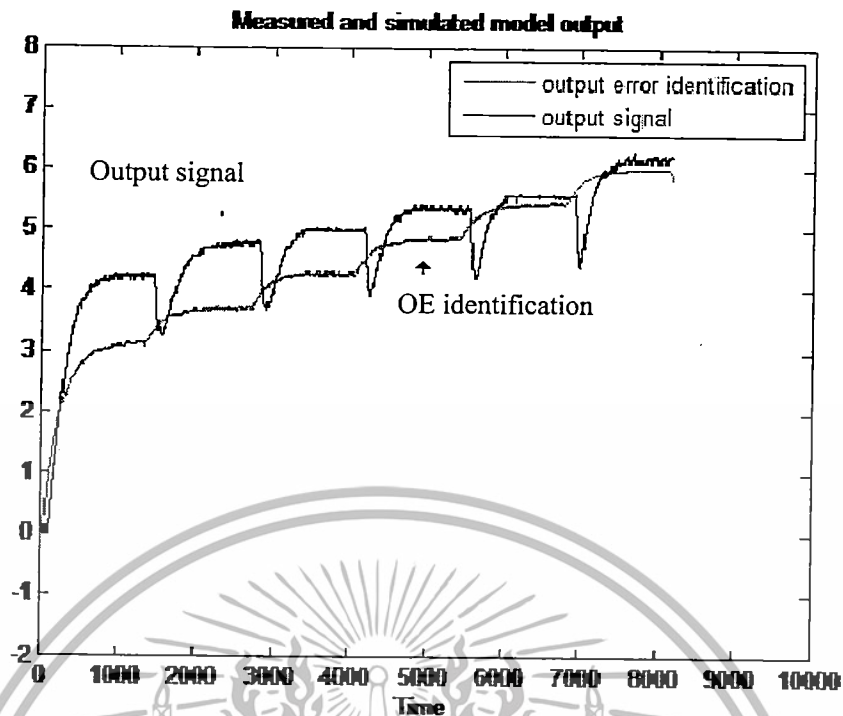
A คือ เอาท์พุทจริง

B คือ แบบจำลองที่จำลองได้



รูปที่ 5.6 ผลการจำลองระบบแบบฟัซซีทาคาจิ-ซีเงะโนะ(TS fuzzy identification)ได้ความถูกต้องที่ 99.99%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



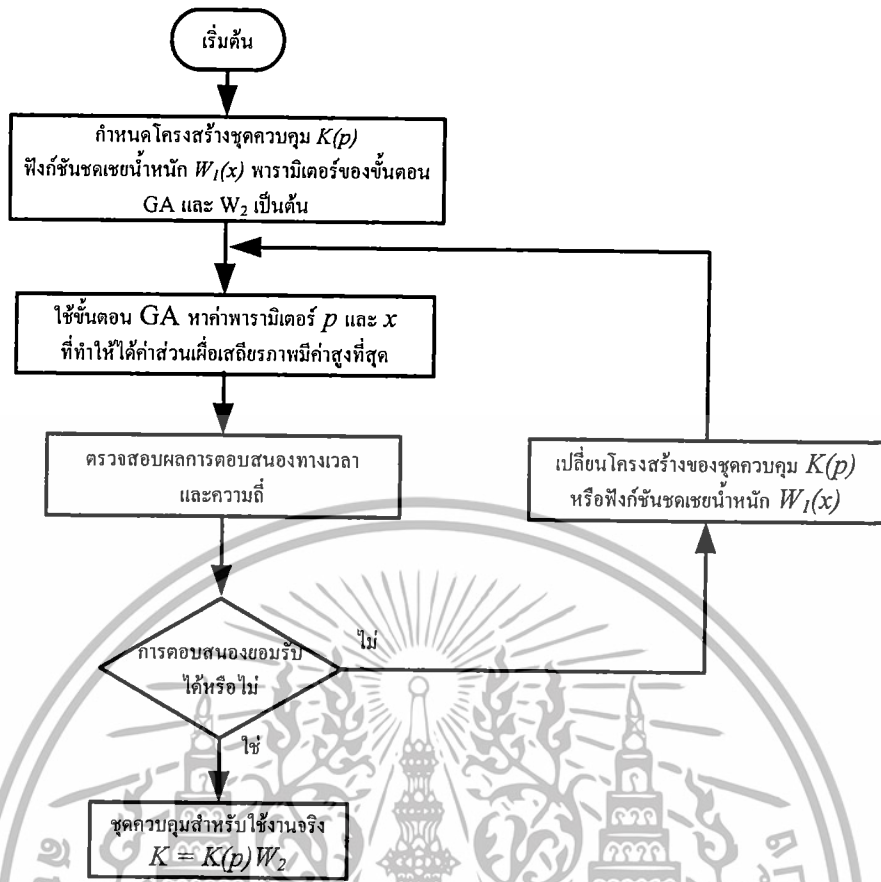
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองระบบแบบความผิดพลาดเอาต์พุต (output error) ได้ความถูกต้องที่ 38.79%

5.3 การออกแบบชุดควบคุมฟuzzyแบบคงทนด้วยเทคนิคการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ (H_∞ Loop Shaping 2 DOF) ที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสามารถนำไปหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ซึ่งสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ได้ ในการทดลองนี้ใช้เทคนิคนี้ร่วมกับเทคนิคการทำการจัดสัญญาณวงรอบ (Loop Shaping) ในการออกแบบการควบคุม สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้

กำหนดให้ค่าหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการหาเป็นโครโมโซม. ในแต่ละรุ่น (Generation) จะมีโครโมโซมรวมกันอยู่และจะเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่าประชากร (Population) จำนวนประชากรในแต่ละรุ่นจะถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบ ประชากรแต่ละตัวในรุ่นจะมีค่าฟังก์ชันฟิตเนส (Fitness Function) แตกต่างกันไปโดยที่ค่าฟิตเนส เป็นค่าที่แสดงความเหมาะสมโครโมโซมนั้นคือปัญหาที่พิจารณา โครโมโซมที่มีค่าฟิตเนสสูงสุดจะเป็นคำตอบของรุ่นนั้น การสร้างประชากรรุ่นใหม่จะอาศัยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม โดยถ่ายทอดพันธุกรรมจากประชากรรุ่นพ่อแม่ไปสู่ประชากรรุ่นลูก ซึ่งมีด้วยกันสามวิธีหลัก ๆ คือ แบบผสมข้ามพันธุ์ (Crossover) แบบถอดแบบจากต้นแบบ (Reproduction) และแบบกลายพันธุ์ (Mutation) ลักษณะของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะแสดงดังรูปข้างล่างนี้

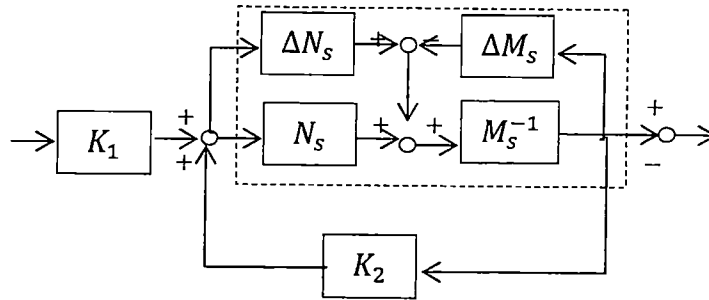
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงแผนผังการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

5.3.1 ควบคุมแบบคงทนสององศาอิสระ [33]

การควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบสองแกนอิสระเอชอินฟินิตี้ (2DOF-loop shaping) เป็นวิธีการควบคุมที่สามารถทำการกำหนดข้อจำกัดขอบเขตทางเวลาได้ โดยชุดควบคุมประกอบไปด้วยชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward pre-filter controller ; K_1) และชุดควบคุมแบบป้อนกลับ (feed-back controller ; K_2) โดยที่ชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (K_1) ถูกใช้สำหรับควบคุมผลการตอบสนองของขอบเขตทางเวลาของระบบแบบเปิดและชุดควบคุมแบบป้อนกลับ (K_2) ออกแบบใช้สำหรับความต้องการทางความเสถียรภาพคงทนและการลดผลโดยสิ่งรบกวน ซึ่งวิธีนี้ใช้เพียงฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักก่อน (pre-compensator weight function ; W_1) และแบบจำลองที่ใช้อ้างอิง (reference model ; T_{ref}) ในการกำหนดข้อจำกัดทางขอบเขตต่างๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาระบบที่จัดสัญญาณแล้ว (G_s) เป็นแบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor) ซึ่งในระบบจะประกอบไปด้วย ตัวหาร (nominator factor : N_s) และตัวหาร (denominator factor : M_s) รูปที่ 5.9 แสดงแบบจำลองที่ไม่แน่นอนของระบบและชุดควบคุมคงทนที่นำมาสังเคราะห์ระบบ



รูปที่ 5.9 แสดงความไม่แน่นอนของระบบแบบการแยกตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor)

T_{ref} คือ ฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้ในการอ้างอิงในการพิจารณาในขอบเขตเวลา ρ คือ ค่าคงที่ที่ผู้ออกแบบใช้สำหรับออกแบบระบบตามความต้องการเชิงสมรรถนะ ระบบที่ถูกจัดสรรแล้ว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_s = GW_1 = M_s^{-1} N_s \tag{5.6}$$

ระบบที่รวมความไม่แน่นอนแล้ว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_\Delta = (N_s + \Delta N_s)(M_s + \Delta M_s)^{-1} \tag{5.7}$$

เมื่อ

G_Δ คือ ระบบที่รวมความไม่แน่นอนแล้ว

ΔN_s คือ ความไม่แน่นอนในฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวถูกหาร

ΔM_s คือ ความไม่แน่นอนในฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวหาร

$$|\Delta N_s, \Delta M_s|_\infty \leq \mathcal{E} \tag{5.8}$$

\mathcal{E} คือ ส่วนเผื่อเสถียรภาพ(stability margin)

ขั้นตอนในการออกแบบชุดควบคุมแบบสัญญาณวงรอบสององศาอิสระ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างได้ดังนี้ [33]

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบตัวชดเชยน้ำหนักก่อน (W_1) เพื่อให้ได้ความต้องการเชิงสมรรถนะในการจัดสรรวงรอบแบบเปิด

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบฟังก์ชันแบบจำลองที่ใช้อ้างอิง (T_{ref}) เพื่อใช้สำหรับการพิจารณาในส่วนของขอบเขตเวลาของระบบแบบปิด และทำการเลือกค่าคงที่ ρ เพื่อใช้ในการพิจารณาสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบระหว่างขอบเขตของเวลา และขอบเขตของความถี่ โดยค่าที่ใช้จะมีค่าที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้ค่า $\rho = 0$ ชุดควบคุมคงทนที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีแบบ

จัดสัญญาณวงรอบสององศาอิสระเอชอินฟินิตี้จะให้ผลการตอบสนองของระบบเหมือนกับชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าส่วนเพื่อเสถียรภาพ (ϵ_{opt}) สูงที่สุด โดยทำการสังเคราะห์ส่วนเพื่อเสถียรภาพดังสมการ

$$\gamma_{opt}\rho^{-2} = \epsilon_{opt}^{-1}\rho^{-2} = \|(I - G_s K_2)^{-1} G_s K_1 - T_{ref}\|_{\infty} \quad (5.9)$$

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพแล้ว ทำการสังเคราะห์ชุดควบคุม (K_1 และ K_2)

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} \rho(I - K_2 G_s)^{-1} K_1 K_2 (I - G_s K_2)^{-1} M_s^{-1} \\ \rho(I - G_s K_2)^{-1} G_s K_1 (I - G_s K_2)^{-1} M_s^{-1} \\ \rho^2 [(I - G_s K_2)^{-1} G_s K_1 - T_{ref}] \quad \rho(I - G_s K_2)^{-1} M_s^{-1} \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \leq \epsilon^{-1} \quad (5.10)$$

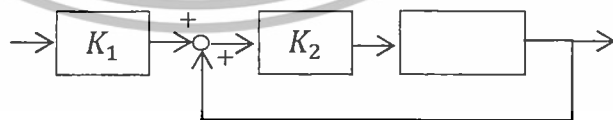
ขั้นตอนที่ 5 ทำการสังเคราะห์

$$W_t = \left[W_o (I - G_s(0) K_2(0))^{-1} G_s(0) K_1(0) \right]^{-1} T_{ref}(0) \quad (5.11)$$

เมื่อ (W_o) มีค่าเท่ากับ 1

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อได้ชุดควบคุม K_1 และ K_2 แล้วทดสอบผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการหรือไม่

จากขั้นตอนการออกแบบในข้างต้นทางพบว่าตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบนี้มีปัญหาในเรื่องของลำดับของตัวควบคุมโดยที่ลำดับของตัวควบคุมจะมีค่าสูงมากและนำไปใช้จริงได้ลำบาก ดังนั้นการออกแบบหาตัวควบคุม K_1 และ K_2 ที่กำหนดโครงสร้างได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าตอบ โดยกำหนดให้การหาค่าตัวควบคุม K_2 ทำโดยการหาค่าที่ทำให้ส่วนเพื่อเสถียรภาพแบบหนึ่งองศาอิสระมีค่าสูงสุดและกำหนดให้ตัวควบคุม K_1 เป็นผลตอบสนองของตัวควบคุมมีสมรรถนะทางโดเมนเวลาเหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างซึ่งเป็นดังนี้



รูปที่ 5.10 การควบคุมแบบสององศาอิสระทั่วไป

ขั้นตอนการออกแบบสามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบโครงสร้างตัวควบคุม K_1 และ K_2 ออกแบบ W_1 และ T_{ref}

ขั้นตอนที่ 2 ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหาตัวควบคุม K_2 ที่ทำให้ค่าดัชนีคงทนสมรรถนะแบบหนึ่งองศาอิสระต่อไปนี้มีค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\|T_{zw}\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K_{2\infty} \end{bmatrix} (I + G_s K_{2\infty})^{-1} M_s^{-1} \right\|_\infty \leq \varepsilon^{-1} \quad (5.12)$$

$$\text{เมื่อ } K_{2\infty} = W_1^{-1} K_2(p_2)$$

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้ตัวควบคุมแบบหนึ่งองศาอิสระ K_2 แล้วให้หาตัวควบคุมที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาที่มีค่าผิดพลาดกำลังสองทางโดเมนเวลาเทียบโมเดลอ้างอิงมีค่าต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบสมรรถนะ

การออกแบบชุดควบคุมแบบที่นำเสนอในการทดลองนี้จะออกแบบชุดควบคุม $K_1(p)$, $K_2(p)$ และ $W_1(x)$ ที่ทำให้อินฟินิตีโนรม (∞ -norm) แล้วยกตัวรบกวนไปยังสถานะให้มีค่าต่ำที่สุดโดยกำหนดโครงสร้างชุดควบคุมเป็นแบบฟัซซี โดยในบทนี้ตัวควบคุม $K_1(p)$ และ $K_2(p)$ จะหมายถึงเมตริกซ์ของชุดควบคุมในความเร็วรอบต่าง ๆ (Local Model) และจะรวมชุดควบคุมดังกล่าวโดยใช้ฟัซซี (Fuzzy) ดังนั้นการออกแบบชุดควบคุมในการทดลองนี้จึงต้องมีการพิจารณาระบบเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบฟัซซี โดยพิจารณาจากแบบจำลองฟัซซีทาคางิ-ซึเงะโนะ (Takagi-Sugano Fuzzy Model : TS Fuzzy Model) จากนั้นกำหนดให้ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมเป็นไปดังสมการที่ (5.13) และ (5.14) ตามลำดับโดยที่สมการทั้งสองจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบฟัซซี

$$W_y = \frac{\sum_{j=1}^M \mu_j W_j}{\sum_{j=1}^M \mu_j} \quad (5.13)$$

$$K_y = \frac{\sum_{j=1}^M \mu_j K_j}{\sum_{j=1}^M \mu_j} \quad (5.14)$$

เมื่อ M คือ จำนวนกฎของฟัซซี μ_j คือ ค่าของฟังก์ชันสมาชิกของระบบที่ความเร็วรอบ j W_j และ K_j คือ ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมที่ความเร็วรอบ j โดยที่ส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบในความเร็วรอบต่างๆ เมื่อได้ ε , คือ ส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบ (Stability Margin) ของระบบในแต่ละความเร็วรอบ (Local Linear Models) ที่ความเร็วรอบ y เมื่อใช้ขั้นตอนการหาค่าความเหมาะสมของวิธีเชิงพันธุกรรมมาทำหาค่าพารามิเตอร์ x และ p ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีการกำหนดขอบเขตของฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมดังนี้

$$\begin{aligned} x_{j,\min} < x_j < x_{j,\max} , \\ p_{j,\min} < p_j < p_{j,\max} \end{aligned} \quad (5.15)$$

ซึ่งเมื่อนำ x_n และ p_n แต่ละตัวไปสังเคราะห์จะได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบในแต่ละตำแหน่งจากนั้นก็สมารถนำส่วนเพื่อเสถียรภาพในช่วงต่างๆของระบบไปหาส่วนเพื่อเสถียรภาพเฉลี่ยของระบบโดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{av} = \frac{\sum_{k=1}^O \frac{\sum_{j=1}^M \mu_j \varepsilon_{y_k}}{\sum_{j=1}^M \mu_j}}{O} \quad (5.16)$$

เมื่อ ε_{av} คือ ส่วนเพื่อเสถียรภาพเฉลี่ยรวมของระบบ O คือ จำนวนของส่วนเพื่อเสถียรภาพย่อยทั้งหมด และมีการกำหนดพิตเนตฟังก์ชันของขั้นตอนการหาค่าความเหมาะสมของขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดวิธีเชิงพันธุกรรมดังสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$fitness(fs) = \begin{cases} \varepsilon_{tol} \\ 0.0001 \end{cases} \quad (5.17)$$

จากสมการที่ (5.17) ค่าพิตเนตจะถูกกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่ใด ๆ ที่มีค่าน้อยมาก ๆ (0.0001) เมื่อค่าพารามิเตอร์ x และ p ของฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมตามลำดับ ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ

5.4 การสังเคราะห์ชุดควบคุมแบบที่นำเสนอและชุดควบคุมคงทนจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ (Conventional H_∞ Loop Shaping) ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

จากการหาแบบจำลองของฟิชชีทาคางิ-ซีเงะโนะเมื่อวิเคราะห์ในโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time) ให้อยู่ในเชิงของควมถี่ (S-domain) ดังตารางที่ 5.2 เมื่อทำการออกแบบชุดควบคุมในแต่ละความเร็วรอบ (Local Controllers) จะกำหนดให้ในแต่ละความเร็วรอบที่ 220,260,300,340 และ 380 (rpm) ของระบบ เช่นเดียวกับความเร็วรอบที่ใช้ออกแบบแบบจำลองฟิชชีทาคางิ-ซีเงะโนะในหัวข้อที่ผ่านมาและได้กำหนดโครงสร้างของฟังก์ชันชดเชยน้ำหนัก W_1 ดังนี้

$$W_1 = \begin{bmatrix} \frac{x_{11}s+x_{21}}{s+0.001} \\ \frac{x_{12}s+x_{22}}{s+0.001} \\ \vdots \\ \frac{x_{15}s+x_{25}}{s+0.001} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

และในการทดลองนี้ได้กำหนดโครงสร้างของชุดควบคุมเป็นแบบพีไอดี (PID Controller) และชุดควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed-forward pre-filter controller) ซึ่งมีโครงสร้างดังสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ (5.20) และ (5.19) ตามลำดับโดยแบ่งชุดควบคุมไว้สำหรับความเร็วรอบต่าง ๆ ของแบบจำลองของ ฟิชชีทาคางิ-ซีเงะโนะจำนวน 5 ความเร็วรอบ

$$K_1(p) = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_{f1}s+1} \\ \frac{1}{K_{f2}s+1} \\ \vdots \\ \frac{1}{K_{f5}s+1} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$K_2(p) = \begin{bmatrix} K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} + \frac{K_{d1}s}{T_{d1}s+1} \\ K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} + \frac{K_{d2}s}{T_{d2}s+1} \\ \vdots \\ K_{p5} + \frac{K_{i5}}{s} + \frac{K_{d5}s}{T_{d5}s+1} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

ตารางที่ 5.2 ระบบในแต่ละความเร็วรอบต่าง ๆ (Local Models)

| ความเร็วรอบ (rpm) | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ตำแหน่งต่างๆ $G_i(s)$ |
|-------------------|--|
| 220 | $G_{220}(s) = \frac{0.0004111 s^2 + 1644 s + 1.644 \times 10^9}{s^2 + 4.824e06s + 4.639 \times 10^8}$ |
| 260 | $G_{260}(s) = \frac{0.0001227 s^2 + 490.6s + 4.906 \times 10^8}{s^2 + 4.8e06s + 1.759 \times 10^8}$ |
| 300 | $G_{300}(s) = \frac{0.0001873 s^2 + 749.2 s + 7.492 \times 10^8}{s^2 + 5.082e06s + 1.462 \times 10^8}$ |
| 340 | $G_{340}(s) = \frac{0.0005055s^2 + 2022s + 2.022 \times 10^9}{s^2 + 6.931e06 s + 1.254 \times 10^9}$ |
| 380 | $G_{380}(s) = \frac{0.0008008s^2 + 3203 s + 3.203 \times 10^9}{s^2 + 5.32e06 s + 1.148 \times 10^9}$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมและขอบเขตของชุดควบคุม

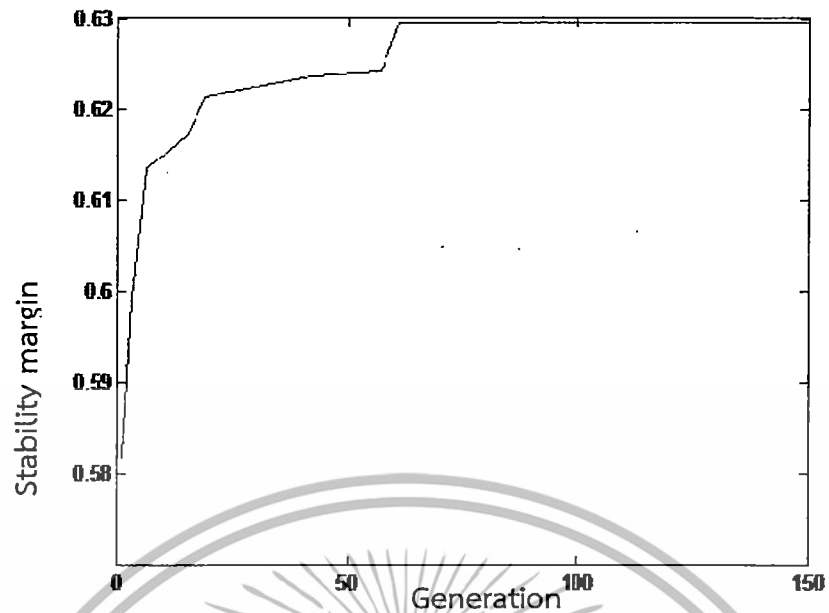
| พารามิเตอร์ | มีค่า |
|---------------|--------------|
| K_{p1-5} | [10, 200] |
| K_{i1-5} | [1000, 5000] |
| K_{d1-5} | [0, 1] |
| τ_{d1-5} | [0, 100] |
| X_{11-15} | [0, 100] |
| X_{21-25} | [0, 3000] |
| K_{f1-5} | [995, 1005] |
| จำนวนประชากร | 150 |

ขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวิธีการการหาค่าที่เหมาะสมนี้ และกำหนดขอบเขตของชุดควบคุมและฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักดังในตารางที่ 5.3 เมื่อดำเนินขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรมจะได้ชุดควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละความเร็วรอบ โดยจะได้ส่วนเพื่อเสถียรภาพเฉลี่ยของระบบเท่ากับ 0.6416 ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 และตารางที่ 5.4 กับ ตารางที่ 5.5 จะแสดงฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมที่เหมาะสมที่ได้แต่จะตำแหน่ง

ตารางที่ 5.4 ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักและชุดควบคุมที่เหมาะสมในแต่ละตำแหน่งของระบบ (Local Linear Model)

| ความเร็วรอบ (rpm) | ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักก่อน (W_1) | ชุดควบคุม (K_2) |
|-------------------|---|--|
| 220 | $W_1 = \frac{99.152s + 87.888}{s + 0.001}$ | $K_2(p) = 102.227 + \frac{1421.964}{s} + \frac{0.487s}{38.844s + 1}$ |
| 260 | $W_1 = \frac{96.649s + 896.621}{s + 0.001}$ | $K_2(p) = 97.225 + \frac{3216.227}{s} + \frac{0.424s}{64.273s + 1}$ |
| 300 | $W_1 = \frac{96.229s + 19.896}{s + 0.001}$ | $K_2(p) = 96.899 + \frac{3013.643}{s} + \frac{0.922s}{43.544s + 1}$ |
| 340 | $W_1 = \frac{95.614s + 669.763}{s + 0.001}$ | $K_2(p) = 97.246 + \frac{4676.801}{s} + \frac{0.216s}{78.004s + 1}$ |
| 380 | $W_1 = \frac{93.858s + 723.963}{s + 0.001}$ | $K_2(p) = 97.831 + \frac{1829.808}{s} + \frac{0.042s}{22.876s + 1}$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ส่วนเผื่อเสถียรภาพของในแต่ละตำแหน่ง (local model) ของระบบ

ตารางที่ 5.5 ชุดควบคุมที่เหมาะสมในแต่ละตำแหน่งของระบบ(Local Linear Model)

| ความเร็วรอบ (rpm) | ชุดควบคุม (K_1) |
|----------------------|------------------------------------|
| 220 | $K_1(p) = \frac{1}{997.438s + 1}$ |
| 260 | $K_1(p) = \frac{1}{1004.991s + 1}$ |
| 300 | $K_1(p) = \frac{1}{1003.742s + 1}$ |
| 340 | $K_1(p) = \frac{1}{1000.573s + 1}$ |
| 380 | $K_1(p) = \frac{1}{1000.410s + 1}$ |

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของชุดควบคุมที่นำเสนอในบทนี้ ได้มีการเปรียบเทียบกับกรอกแบบชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่พิกัด คือ 220 rpm[2] โดยมีฟังก์ชันขดเขย่นน้ำหนักและชุดควบคุมดังสมการที่ (5.21) และ (5.22) กับ (5.23) ตามลำดับ โดยจะมีส่วนเผื่อเสถียรภาพเท่ากับ 0.6520

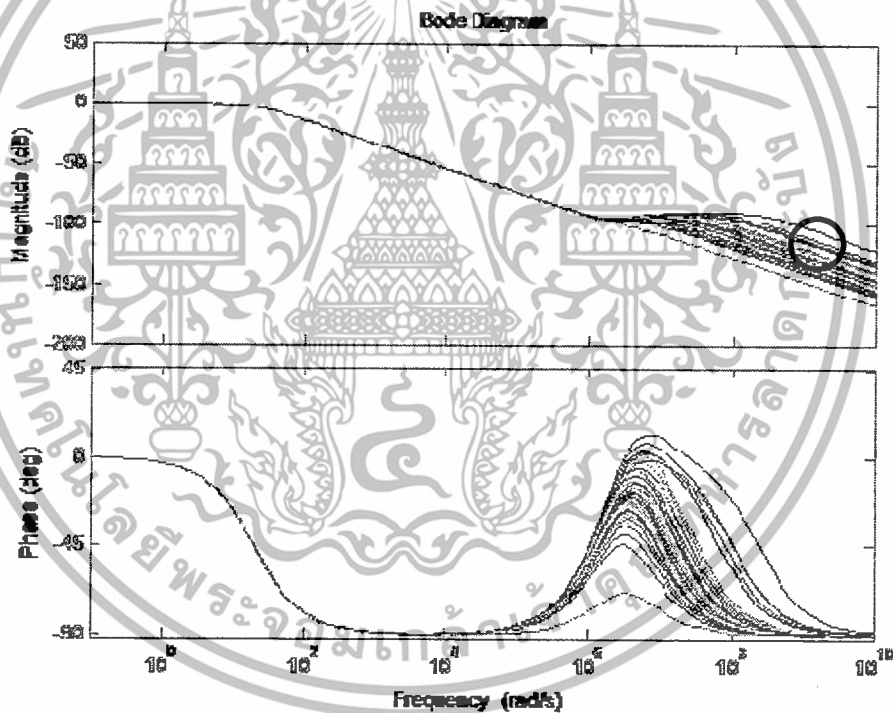
$$W_1 = \frac{99.152s + 87.888}{s + 0.001} \quad (5.21)$$

$$K_1(p) = \frac{1869s^3 + 1.003e10s^2 + 5.916e14s + 5.244e14}{s^4 + 2.021e07s^3 + 8.572e13s^2 + 1.79e15s + 1.52e15} \quad (5.22)$$

$$K_2(p) = \frac{-0.1183s^4 - 1.738e07s^3 - 8.944e13s^2 - 1.868e15s - 1.595e15}{s^4 + 2.021e07s^3 + 8.572e13s^2 + 1.79e15s + 1.52e15} \quad (5.23)$$

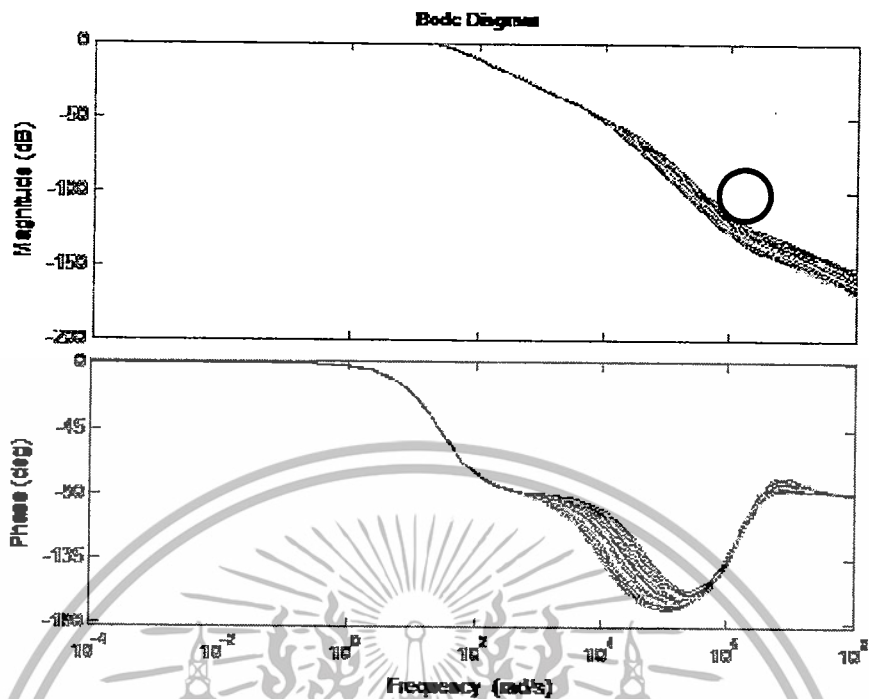
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำชุดควบคุมแต่ละความถี่รอบ (Local Controllers) จากตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 ไปออกแบบเป็นชุดควบคุมแบบพีซีและทำการพล็อตแผนภาพโบเดโดยกำหนดให้ค่าความถี่รอบเปลี่ยนแปลงไปแล้วจะได้แผนภาพดังรูปที่ 5.13 จะพบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอจะมีค่าแบนด์วิธที่ใกล้เคียงกันทุกเส้น และเมื่อเปรียบเทียบกับแผนภาพโบเดของระบบที่มีชุดควบคุมคงทนแบบเชิงเส้นแล้วจะได้แผนภาพโบเดดังรูปที่ 5.12 จะพบว่าเทคนิคที่นำเสนอจะให้วงรอบตามที่ต้องการ โดยที่ความถี่ต่ำจะให้อัตราขยายที่สูงและความถี่สูงจะให้อัตราขยายที่ต่ำและกราฟไม่กระจายตัวออกจากวงรอบที่ต้องการ แสดงถึงชุดควบคุมที่นำเสนอมีการตอบสนองต่อวงรอบที่ดีกว่า อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงแบนด์วิธของทั้งสองกราฟพบว่าเทคนิคที่นำเสนอมีแบนด์วิธที่สูงกว่าชุดควบคุมเชิงเส้นที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความถี่รอบที่พิกัดแสดงว่าระบบที่ถูกใช้เทคนิคนี้มีสมรรถนะที่ดีกว่าและมีความเสถียรภาพมากกว่าชุดควบคุมเชิงเส้นที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความถี่รอบที่พิกัด โดยที่ชุดควบคุมที่นำเสนอมีแบนด์วิธเท่ากับ 89.3 rad/s และ ชุดควบคุมเชิงเส้นที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความถี่รอบที่พิกัดมีแบนด์วิธเท่ากับ 81.7 rad/s

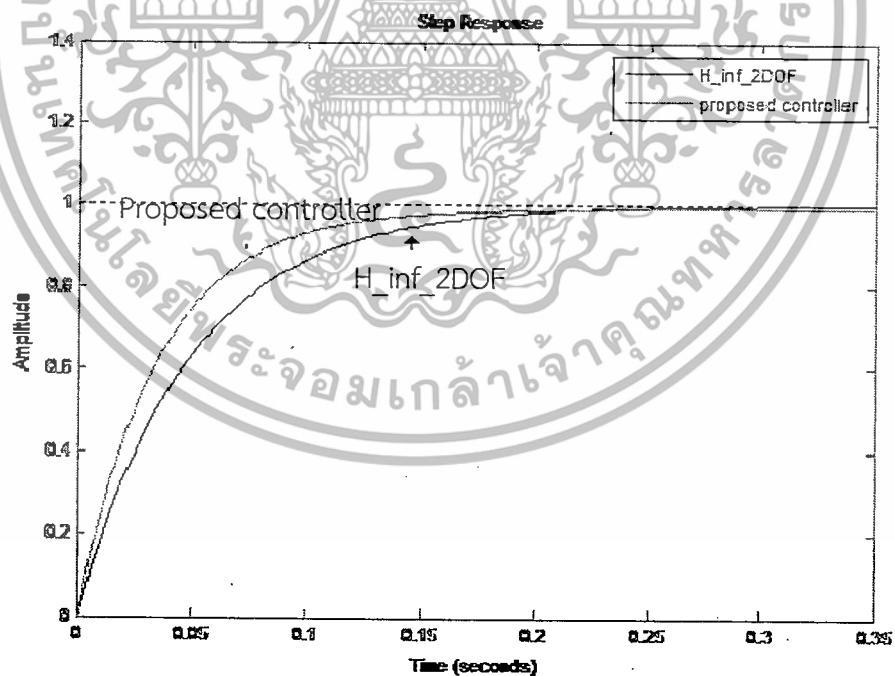


รูปที่ 5.12 แผนภาพโบเดของชุดควบคุมเชิงเส้นที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความถี่รอบที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แผนภาพโบเดของชุดควบคุมที่ซีแบบคงทนที่น่าเสนอ



รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่น่าเสนอโดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมคงทนแบบจัด
สัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

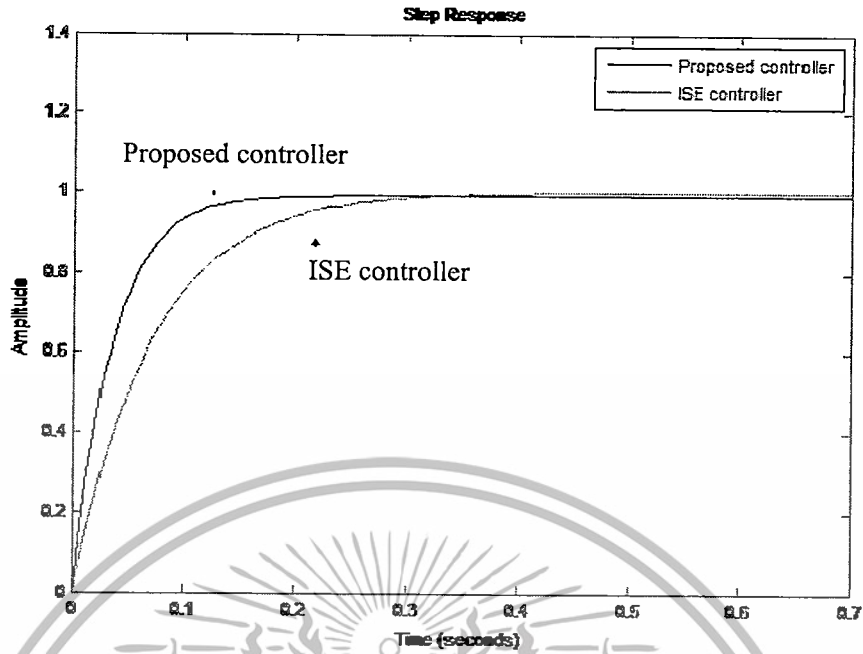
ตารางที่ 5.6 ผลตอบสนองขั้นบันไดของเทคนิคที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัมฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่พิกัด

| ชุดควบคุมพีชชีที่นำเสนอ | | | ชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัมฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ | | |
|-------------------------|-----------------------|-------------------|---|-----------------------|-------------------|
| แบนด์วิธ (rad/s) | เวลาสู่สมดุลย์ (s) | เวลาขาขึ้น (s) | แบนด์วิธ (rad/s) | เวลาสู่สมดุลย์ (s) | เวลาขาขึ้น (s) |
| 89.3 | 0.194 | 0.088 | 81.7 | 2.011 | 0.13 |

จากรูปที่ 5.14 และตารางที่ 5.6 พบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอมีความเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดีกว่าชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัมฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระที่ออกแบบชุดควบคุมที่ความเร็วรอบที่พิกัดไม่ว่าจะเป็นเวลาขาขึ้นและเวลาเข้าสู่สมดุลย์ที่เร็วกว่าแบนด์วิธที่มากกว่าแต่เปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูตไม่เกิดขึ้นทั้งคู่ อีกทั้งชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัมฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระไม่สามารถที่ใช้จริงในการทำการทดสอบจริงเนื่องจากมีชุดควบคุมที่มีอันดับสูงกว่าตามสมการที่ (5.22) และสมการที่ (5.23)

5.5 การจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริง

เพื่อแสดงการเปรียบเทียบความคงทนและสมรรถนะของชุดควบคุมที่นำเสนอในการทดลองนี้[12] ได้มีการออกแบบชุดควบคุมที่มีการปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม (Integrate Square Error : ISE) สำหรับระบบในแต่ละความเร็วรอบ (Local Linear Model) ของตารางที่ 5.2 โดยการปรับแต่งชุดควบคุมสำหรับระบบที่ออกแบบชุดควบคุม (Nominal Plant) ให้มีการตอบสนองใกล้เคียงกับแบบจำลองอ้างอิง (Model Reference) ที่ต้องการให้ระบบมีการตอบสนองให้เร็วที่สุดและเกิดโอเวอร์ชูตน้อยที่สุด และนำชุดควบคุมที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมในแต่ละความเร็วรอบมารวมกันโดยใช้พีชชี หรือเรียกชุดควบคุมชนิดนี้อีกอย่างว่า ชุดควบคุมพีชชีแบบจัดตารางอัตราการขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ยรวม (Fuzzy Gain Scheduled Controller Tuned by ISE Method) รูปที่ 5.15 แสดงการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ของการตอบสนองของชุดควบคุมแบบที่นำเสนอและชุดควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมที่ความเร็วรอบ 220 rpm จะพบว่าชุดควบคุมที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมจะมีการตอบสนองที่ช้ากว่าชุดควบคุมแบบที่นำเสนอเมื่อนำมาใช้กับระบบที่ออกแบบชุดควบคุม



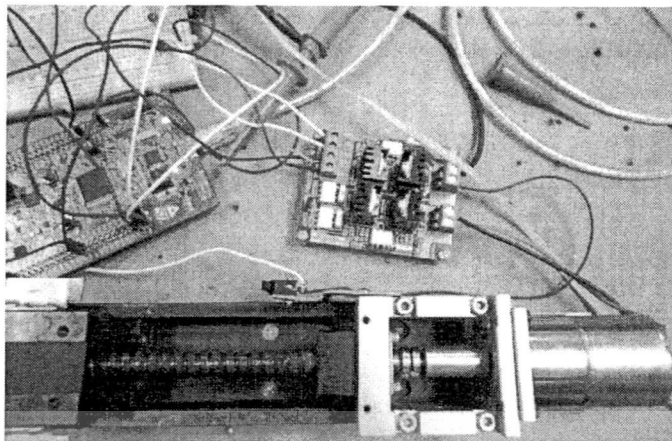
รูปที่ 5.15 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของชุดควบคุมแบบฟuzzyที่นำเสนอและชุดควบคุมฟuzzyแบบ จัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม

ตารางที่ 5.7 ผลการตอบสนองแบบขั้นบันไดของชุดควบคุมแบบฟuzzyที่นำเสนอและชุดควบคุมฟuzzy แบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของ ผลรวม

| ชุดควบคุมฟuzzyที่นำเสนอ | | ชุดควบคุมISE | |
|-------------------------|----------------|--------------------|----------------|
| เวลาสู่สมดุลย์ (s) | เวลาขาขึ้น (s) | เวลาสู่สมดุลย์ (s) | เวลาขาขึ้น (s) |
| 0.194 | 0.088 | 2.871 | 0.161 |

จากการทดลองได้มีการออกแบบตัวระบบกล ได้ไปทำระบบกลเคลื่อนที่แกนเดียวโดย ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม จากนั้นไปต่อกับลิตสกรูทำให้การเคลื่อนที่ เป็นเชิงเส้น ทำให้ได้ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้นแกนเดียว ได้ทำการต่อตัวตรวจจับ (Encoder) ไว้ที่ท้าย ของลิตสกรูเพื่อวัดรอบความเร็ว ตำแหน่ง ในทางฝั่งมอเตอร์ก็ต่อกับวงจรขับเคลื่อนแบบพีดับลิวเอม (PWM) และควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอาร์มรุ่น ARM Cortex-M4 เพื่อรับส่งค่าและรับค่า จากตัวตรวจจับ (Encoder) และวัดความเร็วรอบด้วยไอซี LM331 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การควบคุม วงรอบกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ระบบที่จะทดสอบสมรรถนะจริง



รูปที่ 5.17 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของระบบที่ออกแบบชุดควบคุม (Nominal Plant)

(ก) ชุดควบคุมแบบพีซีซีที่นำเสนอและ (ข) ชุดควบคุมพีซีซีแบบจัดตารางอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารเผยแพร่ที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำชุดควบคุมที่ได้จากการออกแบบไปใช้กับระบบมอเตอร์กระแสตรงจริงโดยมีการสั่งให้ระบบตอบสนองเป็นขั้นบันได จะพบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอมีการตอบสนองที่ดีไม่มีโอเวอร์ชูตเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.17 (ก) ส่วนรูปที่ 5.17 (ข) แสดงการตอบสนองของชุดควบคุมพีซีแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมซึ่งจะพบว่ามีเวลาสู่สมดุลย์ที่ช้ากว่าชุดควบคุมแบบที่นำเสนอเล็กน้อยและไม่มีโอเวอร์ชูตเช่นกัน

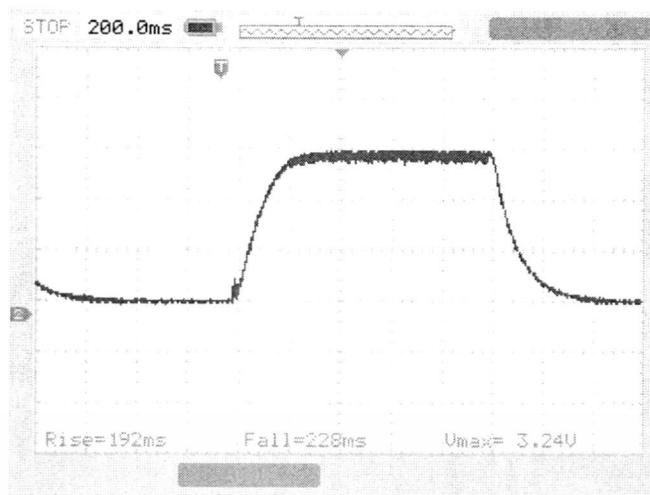
เพื่อทดสอบความคงทน ได้ทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ภายในระบบ โดยใส่น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น 2 กิโลกรัมจนถึง 15 กิโลกรัม จะพบว่าชุดควบคุมแบบที่นำเสนอยังมีการตอบสนองที่ดีอยู่ดังในรูปที่ 5.18 (ก) ส่วนการตอบสนองของชุดควบคุมพีซีแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ จะทำให้ผลตอบสนองช้าลง และเกิดความผิดพลาดที่สถานะคงตัว โดยขณะที่ใส่น้ำหนักที่ 10 กิโลกรัม ดังรูปที่ 5.18 (ข) จากผลที่ได้แสดงถึงความคงทนต่อสภาวะที่เปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของชุดควบคุมแบบที่นำเสนอที่ดีกว่า



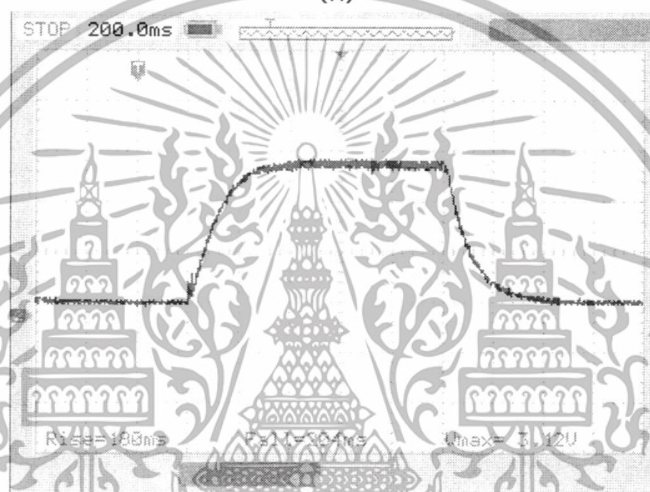
(ข)

รูปที่ 5.18 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ (ก) ชุดควบคุมพีซีที่นำเสนอและ (ข) ชุดควบคุมพีซีแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม (กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 10 กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.19 การตอบสนองแบบขั้นบันไดของ (ก) ชุดควบคุมพีซีที่น้ำเสนอและ (ข) ชุดควบคุมพีซีแบบจัดตารางอัตราการขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม(กรณีน้ำหนักเปลี่ยนเป็น 15 กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ผลการตอบสนองของระบบที่ออกแบบชุดควบคุม และระบบหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบฟuzzyที่นำเสนอและชุดควบคุมฟuzzyแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม

| น้ำหนัก | ชุดควบคุมฟuzzyที่นำเสนอ | | | ชุดควบคุมฟuzzyแบบจัดตารางอัตราขยาย | | |
|-------------|-------------------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| | เวลาขาขึ้น | เวลาสู่สมดุลย์ | ความผิดพลาดสถานะคงที่ | เวลาขาขึ้น | เวลาสู่สมดุลย์ | ความผิดพลาดสถานะคงที่ |
| 0 กิโลกรัม | 0.18 วินาที | 0.2 วินาที | 0% | 0.19 วินาที | 0.2 วินาที | 0% |
| 2 กิโลกรัม | 0.18 วินาที | 0.2 วินาที | 0% | 0.19 วินาที | 0.2 วินาที | 0% |
| 4 กิโลกรัม | 0.18 วินาที | 0.2 วินาที | 0% | 0.19 วินาที | 0.2 วินาที | 0% |
| 6 กิโลกรัม | 0.18 วินาที | 0.2 วินาที | 0% | 0.19 วินาที | 0.2 วินาที | 0% |
| 8 กิโลกรัม | 0.18 วินาที | 0.2 วินาที | 0% | 0.21 วินาที | 0.25 วินาที | 2.4% |
| 10 กิโลกรัม | 0.18 วินาที | 0.2 วินาที | 0% | 0.24 วินาที | 0.3 วินาที | 4.8% |
| 12 กิโลกรัม | 0.19 วินาที | 0.21 วินาที | 0% | 0.24 วินาที | 0.3 วินาที | 5.1% |
| 15 กิโลกรัม | 0.19 วินาที | 0.21 วินาที | 1.2% | 0.24 วินาที | 0.3 วินาที | 6% |

5.6 สรุปผล

จากผลที่ได้พบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอนี้ในการทดลองนี้มีความคงทนที่ดี โดยที่ชุดควบคุมสามารถกำหนดโครงสร้างได้และอาศัยพื้นฐานของการออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ (H_∞ Loop Shaping 2DOF Control) แล้วใช้ขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุดของวิธีเชิงพันธุกรรม มาแก้ปัญหาชุดควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบในแต่ละความเร็รรอบ (Local Models) ของแบบจำลองฟuzzyทาคากิ-ซึเงะโนะ (Takagi-Sugano Fuzzy Model : TS Fuzzy Model) จากผลการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมที่นำเสนอมีสมรรถนะและความคงทนที่ดี ถึงแม้ว่าจะเพิ่มน้ำหนักภายในระบบ แต่ชุดควบคุมที่นำเสนอนี้ก็ยังมี การตอบสนองที่ดีอยู่ ซึ่งก็ได้มีการนำมาเปรียบเทียบกับชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัณฐานวงรอบสององศาอิสระ และชุดควบคุมฟuzzyแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม (Fuzzy Gain Scheduled Controller Tuned by ISE Method พบว่าได้ค่าทางพลศาสตร์ที่ดีว่าในทุกๆกรณี ไม่ว่าจะเป็นเวลาขาขึ้น เวลาเข้าสู่สมดุลย์ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสถานะคงที่ อีกทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่าแบนด์วิธที่สูงกว่าและลู่อู่เข้าหาสัญญาณวงรอบที่ต้องการได้ติดตามต้องเมื่อพิจารณาจากแผนภาพ โบเด และเมื่อนำมาทดสอบความคงทนจริงก็พบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอมีความคงถึง 15 กิโลกรัม แต่ชุดควบคุมด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมจะคงทนได้อยู่ที่ 10 กิโลกรัมและเมื่อทดสอบที่ 15 กิโลกรัมระบบเกิดความล้มเหลวเมื่อระบบนั้นดำเนินการไปได้ 1 นาที โดยชุดควบคุมทั้งหมดมีพื้นฐานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากพืชซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับระบบที่เป็นไม่เชิงเส้นเพราะสามารถจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีความถูกต้องจึงเป็นที่น่าเชื่อถือต่อหาพารามิเตอร์ต่างๆในชุดควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปผล

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ พบว่าชุดควบคุมชนิดนี้มีจุดเด่นคือสามารถรับประกันการทำงานของระบบได้ถึงแม้ว่าระบบจะมีตัวรบกวนเข้ามาในยังระบบหรือแม้แต่จากสภาวะที่ระบบเองมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในระบบ ดังนั้นการออกแบบชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระจึงเป็นการออกแบบชุดควบคุมที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง อย่างไรก็ตามการออกแบบชุดควบคุมระบบที่ใช้งานโดยทั่วไป หรืองานในอุตสาหกรรมต่างๆต้องการชุดควบคุมที่มีโครงสร้างที่ถูกกำหนดไว้ตายตัวอยู่แล้ว หรือไม่มีโครงสร้างเป็นแบบง่าย ทำให้ไม่สามารถนำชุดควบคุมคงทนที่มีโครงสร้างซับซ้อนและลำดับที่สูงไปใช้งานโดยทั่วไปได้ ดังนั้นการออกแบบชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ที่กำหนดโครงสร้างได้จึงเป็นขั้นตอนที่น่าสนใจเป็นอย่างมากสำหรับการนำชุดควบคุมคงทนไปใช้ในงานทั่วไป ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบชุดควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระแบบที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยขั้นตอนปัญญาประดิษฐ์ทั้งชุดควบคุมแบบเชิงเส้นและชุดควบคุมฟัซซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นขั้นตอนหาค่าความเหมาะสมที่สุด ทำให้ง่ายต่อการออกแบบชุดควบคุมที่น่าเสนอนี้

ในส่วนของผลการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ระบบมอเตอร์กระแสตรงมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการสังเคราะห์ชุดควบคุม โดยทั่วไประบบมอเตอร์กระแสตรงเป็นระบบที่ได้รับความนิยมใช้งานโดยแพร่หลาย จากผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นสมรรถนะและความคงทนของชุดควบคุมที่ออกแบบขึ้นอย่างชัดเจน โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของระบบมอเตอร์กระแสตรง

6.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบชุดควบคุมคงทนสององศาอิสระแบบกำหนดโครงสร้างได้สำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรง และการออกแบบชุดควบคุมคงทนสององศาอิสระแบบกำหนดโครงสร้างแบบฟัซซีสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรงกับการออกแบบชุดควบคุมคงทนสององศาอิสระแบบกำหนดโครงสร้างสำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ชุดควบคุมฟัซซีแบบจัดตารางอัตราขยายที่ปรับแต่งด้วยวิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม

ในส่วนแรกเป็นการออกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระแบบกำหนดโครงสร้างได้สำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรง ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของชุดควบคุมที่น่าเสนอขึ้นดีกว่าการควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระแบบธรรมดาและดีกว่าการควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบกำหนดโครงสร้างได้จากการออกแบบพบว่าชุดควบคุมที่น่าเสนอจะมีความคงทนที่ดีเท่ากันกับการควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ และดีกว่าการควบคุมคงทนแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบกำหนดโครงสร้างได้โดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดความคงทนคือส่วนเผื่อเสถียรภาพและเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้งานจริงพบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอก็มีความคงทนและสมรรถนะดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดจนเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรอกแบบชุดควบคุมคงทนจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบกำหนดโครงสร้างได้สำหรับระบบมอเตอร์กระแสตรง

ในส่วนที่สองเป็นการออกแบบชุดควบคุมแบบพีซีซีที่นำเสนอโดยใช้กับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงในระบบมอเตอร์กระแสตรง จากการทดลองกับชุดควบคุมคงทนสององศาอิสระแบบกำหนดโครงสร้างได้เพียงตัวเดียวพบว่ามีการตอบสนองของระบบในช่วงที่ความเร็วเชิงมุมสูงหรือไกลออกจุดความเร็วที่ใช้ออกแบบมีสมรรถนะไม่ตี เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบชุดควบคุมแบบพีซีซีคงทนแบบกำหนดโครงสร้างสำหรับตำแหน่งต่างๆของระบบตลอดช่วงความเร็วของระบบมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งการออกแบบชุดควบคุมในลักษณะนี้จะต้องมีการพิจารณาระบบให้เป็นแบบพีซีซีด้วย และนอกจากนั้นยังได้มีการออกแบบชุดควบคุมพีซีซีที่ปรับแต่งโดยใช้วิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม (Integrate Square Error : ISE) จากผลการทดลองจะพบว่าชุดควบคุมพีซีซีที่นำเสนอที่สภาวะการทำงานปกติมีการตอบสนองที่ดีกว่าชุดควบคุมพีซีซีที่ปรับแต่งโดยใช้วิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวม และเมื่อทดสอบความคงทนจะพบว่าชุดควบคุมที่ปรับแต่งโดยใช้วิธีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลรวมจะมีการแกว่งของระบบเกิดขึ้นขณะที่ชุดควบคุมที่นำเสนอมีความคงทน

6.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ในการออกแบบชุดควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความรู้พื้นฐานของการออกแบบชุดควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระร่วมกับขั้นตอนปัญญาประดิษฐ์ (ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและขั้นตอนวิธีพีซีซี) การหาคำตอบจะต้องใช้เวลาและการตั้งค่าพารามิเตอร์ขั้นตอนปัญญาประดิษฐ์นั้นมีผลต่อการลู่เข้าของคำตอบและการตัดสินใจของคำตอบ

นอกจากนั้นการกำหนดโครงสร้างของชุดควบคุมจะมีผลต่อการลู่เข้าของคำตอบหรือมีค่าส่วนเพื่อเสถียรภาพที่ดีที่สุดแตกต่างกันไปเช่นเดียวกัน ดังนั้นผู้ใช้งานอาจจะต้องมีการศึกษาหาโครงสร้างชุดควบคุมที่เหมาะสมสำหรับงานในแต่ละกรณีด้วย อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบพีไอ พีไอดีเป็นโครงสร้างที่ไม่มีปัญหาในการออกแบบเนื่องจากลักษณะของโครงสร้างเอื้ออำนวยต่อการออกแบบแบบคงทน และการได้สมรรถนะที่ดี

6.3 ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัย

การออกแบบตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สององศาอิสระ (2DOF H_∞ Loop Shaping) ที่กำหนดโครงสร้างได้ ที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่น ๆ ได้ แต่จะต้องมีการพิจารณาการออกแบบชุดควบคุมที่สามารถสรุปได้ดังนี้

6.3.1 ผู้ออกแบบจะต้องทราบถึงโครงสร้างของชุดควบคุมที่ออกแบบขึ้นมา นั้น มีความเหมาะสมต่อระบบที่ต้องการควบคุมหรือไม่

6.3.2 ในการหาค่าความเหมาะสมนั้น จะต้องมีการกำหนดขอบเขต ดังนั้นผู้ที่ออกแบบจะต้องทราบถึงช่วงอัตราขยายของชุดควบคุมกับระบบนั้นๆ เพื่อช่วยให้การหาค่าที่เหมาะสม เอกสารที่วางไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชำนาญ โกยทรัพย์. “การควบคุมแบบจัดสัณฐานวงรอบแบบคงทนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เทคนิคแอลเอ็มไอ และวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างกระชับ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554
- [2] ปิยะพงษ์ โอรพาทิชาชาติ. “ชุดควบคุมคงทนจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบกำหนดโครงสร้างได้สำหรับระบบเซอร์โวนิวแมติก.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554
- [3] Apkarian P, Bompard V. “Nonsmooth structured control design with applications to PID loop shaping of a process.” *Int J Robust Nonlinear Control* ; 17(14): 1320–42, 2007.
- [4] Bor-Sen Chen and Yu-Min Cheng. “A Structure-Specified optimal Control Design for Practical Applications: A Genetic Approach” *IEEE Transactions on Control System Technology*, 6(6), 707-718, 1998.
- [5] A. U. Genc, “A state-space algorithm for designing H_∞ loop shaping PID controllers.” technical report. Cambridge University, Cambridge, UK, Oct. 2000.
- [6] S. Kaitwanidvilai and M. Parnichkun. “Genetic algorithm based fixed-structure robust H_∞ loop shaping control of a pneumatic servo system,” *International Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16, No. 4, 2004.
- [7] Prempain E and Postlethwaite, I., Static H_∞ loop shaping control of fly-by-wire helicopter. In *Conference on decision and control*, pp. 1188-1195, 2004.
- [8] Kaitwanidvilai S. Particle swarm optimization based fixed structure H_∞ loop shaping control of MIMO system. In: *IASTED international conference on modeling identification and control*; 2008.
- [9] Ejaz M, Arbab MN. Automatic weight selection in H_∞ loop shaping using genetic algorithm. In: *ICET '06 international conference on emerging technologies*; p. 334–42., 13–14 November, 2006.
- [10] Zhang L, Shi P, Boukas EK, Wang C. H_∞ model reduction for switched linear discrete-time systems with polytopic uncertainties. *Automatica*; 44(11): 2944–9, 2008.
- [11] Zhang L, Shi P. l_2 - l_∞ model reduction for switched LPV systems with average dwell time. *IEEE Trans Autom Control*; 53(10):2443–8, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Somyot Kaitwanidvilai and Piyapong Olanthichachat., “Robust loop shaping–fuzzy gain scheduling control of a servo-pneumatic system using particle swarm optimization approach” *Mechatronics* 21 (2011) 11–21.
- [13] Franco, A.L.D., Bourles, H., De Pieri, E.R. and Guillard, H., “Robust nonlinear control associating robust feedback linearization and H_∞ control” *Automatic Control, IEEE Transactions* on Volume 51, Issue 7, pp. 1200 – 1207, 2006.
- [14] Abonyi J, Babuška R, Verbruggen HB, Szeifert F. Incorporating prior knowledge in fuzzy model identification. *Int J SystSci*; 31:657–67, 2000.
- [15] T. Takagi and M. Sugeno., Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 15(1):116–132, 1985.
- [16] D. C. McFarlane, and K. Glover, “A loop shaping design procedure using H_∞ synthesis” *IEEE Trans. On Automatic Control* AC-37 (6), pp. 759-769, 1992.
- [17] F.J. Lin, C.M. Liaw, Y.S. Shieh, R.J. Guey, and M.S. Hwang, “Robust two-degrees-of-freedom control for induction motor servodrive,” *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 142, No. 2, March 1995, pp. 79-86.
- [18] K.I.Hwu and C.M.Liaw. “Robust quantitative speed control of a switched reluctance motor drive” *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* Vol 148, No. 4, July 2001, pp. 345-353.
- [19] H.-P.Lee and D.K.Schmidt, “Robust two-degree-of-freedom H_m control of a seeker scan loop system” *IEE Proc.-Control Theon Appl.*, Vol. 149, No. 2, March 2002, pp. 149-156.
- [20] Dominique Knittel, Edouard Laroche, Daniel Gigan, and Hakan Koç, “Tension Control for Winding Systems With Two-Degrees-of-Freedom H_∞ Controllers,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 39, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2003, pp. 113-120.
- [21] Kazuaki Itoh, Makoto Iwasaki, and Nobuyuki Matsui, “Optimal Design of Robust Vibration Suppression Controller Using Genetic Algorithms.” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 51, NO. 5, OCTOBER 2004, pp. 947-953.
- [22] Patra S., Sen S., and Ray G. “Design of static H_∞ loop shaping controller in four-block framework using LMI approach.” *Science Direct, Automatica*. January 2008. pp. 2214-2220.
- [23] C. Peng, H. Xu, Q. Zou, J. Zhang, “Inversion-based robust feedforward–feedback two-degree-of-freedom control approach for multi-input multi-output systems with uncertainty.” *IET Control Theory Appl.*, 2012, Vol. 6, Iss. 14, pp. 2279–2291.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Lennart Harnefors, Seppo E. Saarakkala, and Marko Hinkkanen, "Speed Control of Electrical Drives Using Classical Control Methods." *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 49, NO. 2, MARCH/APRIL 2013, pp. 889-898.
- [25] B. C. Kuo, *Automatic Control Systems*. Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [26] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 15, pp. 116–132, 1985.
- [27] Ljung, L. *System Identification: Theory for the User*. 2nd edition. New Jersey: Prentice-Hall; 1999
- [28] Sigurd Skogestad, Ian Postlethwaite. *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*. 2nd ED. New York : John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [29] Gu D.-W., Petkov P. Hr. and Konstantinov M. M. *Robust Control Design with MATLAB*. London : Springer, Inc. 2005.
- [30] Lee Jietae, Edgar Thomas F. ISE tuning rule revisited. *Automatica* 661;40(8):1455–8, 2004.
- [31] Document , *MATLAB 2013a ,What is Fuzzy logic ?* [Online]. Available :<http://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-fuzzy-logic.html>
- [32] Olanthichachat, P. ; Saenthon, A. ; Kaitwanidvilai, S., Genetic algorithm based fixed-structure H_{∞} loop shaping control of a buck-boost converter , *Robotics and Biomimetics*, 2008. *ROBIO 2008. IEEE International Conference* , P 1944- 1949, 2009.
- [33] Nuttapon Phurahong, Somyot Kaitwanidvilai and Atthapol Ngaopitakkul. "Fixed Structure Robust 2DOF H-infinity Loop Shaping Control for AC/DC Buck Converter using Genetic Algorithm." *Proceedings of the Vol II, IMECS 2012*, March 14-16, 2012, Hong Kong, pp. 1030-1035.
- [34] Document , *world robotics 2011 executive summary* [Online]. Available: http://www.roboned.nl/sites/roboned.nl/files/2011_Executive_Summary.pdf

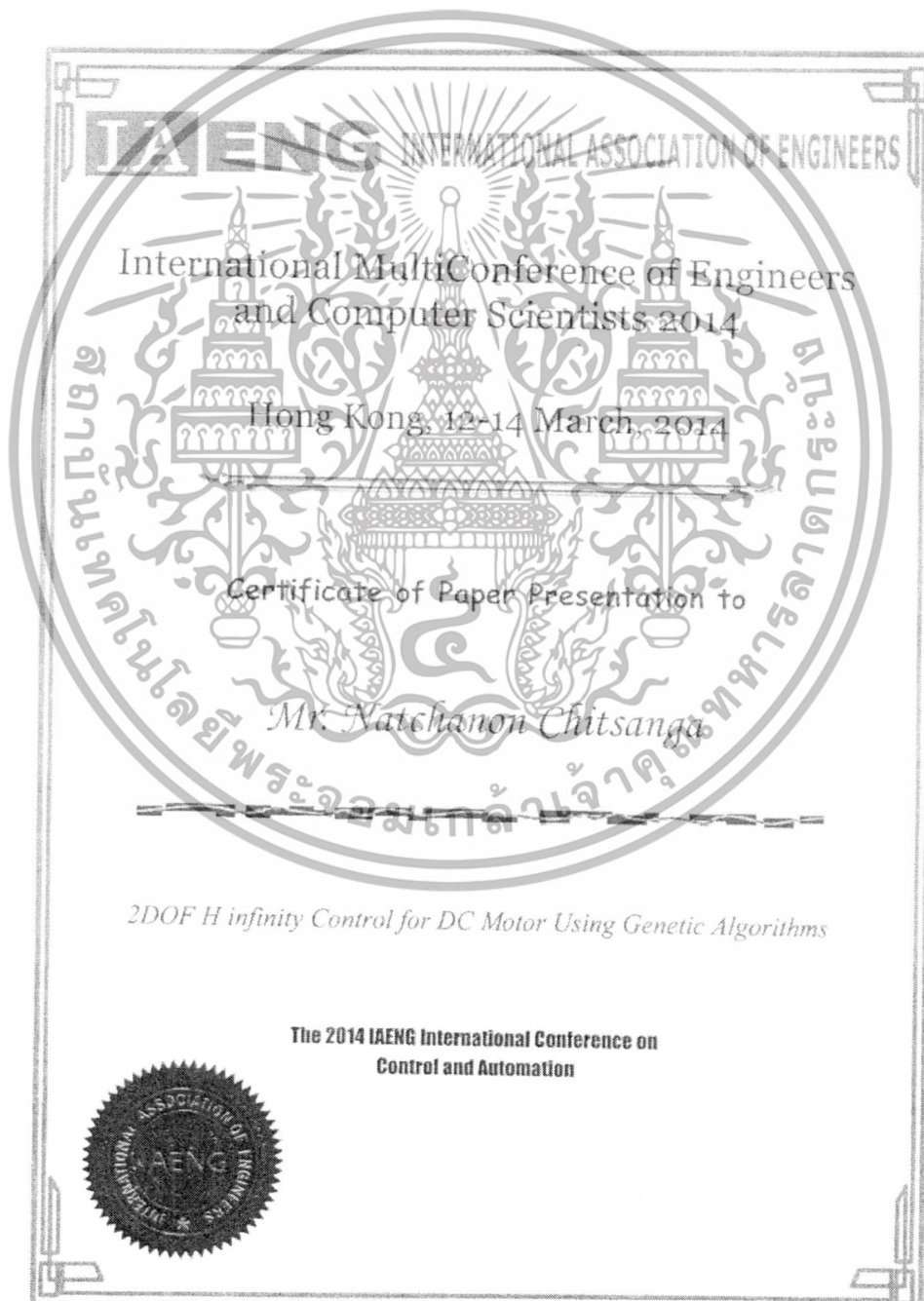


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
บทความที่ได้ตีพิมพ์

การประชุมวิชาการนานาชาติ

- [1] NatchanonChitsanga and SomyotKaitwanidvilai, "2DOF H infinity Control for DC Motor Using Genetic Algorithms", Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2014 Vol I, IMECS 2014, March 12 - 14, pp272-276 , Hong Kong 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2DOF H infinity Control for DC Motor Using Genetic Algorithms

Natchanon Chitnangs and Somyer Kaistwanitvithai

Abstract—This paper presents a new method of 2DOF H infinity Control for DC Motor. The proposed technique applies the Genetic Algorithms to achieve the specified structure robust control design. The robustness in terms of robust 2DOF control is achieved by the proposed design and the control results are compared with the conventional 2DOF H infinity control. As results indicated, the proposed method is simpler and the order of the proposed controller is lower than that of the conventional robust control technique. The comparison is done by performing the simulation using the transfer function of the real motor system.

Index Terms—2DOF H infinity Control, DC motor system, genetic algorithm.

I. INTRODUCTION

Both 2DOF control and robust control can be incorporated to design a robust controller to achieve both time and frequency domain specifications. The technique, called 2 DOF H infinity control is widely used to design the robust control with the time domain specifications. However, similar to the robust control techniques, the structure of the resulting controller is normally complicated with high order. In this paper, we propose the design control technique using 2DOF H infinity control and Genetic Algorithms to the DC motor speed control. Many researchers proposed the control techniques for speed control of the motor. Han and Lim [1] studied the speed control of the switch reluctance motor. In their paper, they found that the dynamic system can be approximated but hardly to be accomplished. Lee and Schmidt [2] applied the control method for controlling an uncertainty system and an external disturbance which was examined in the high sensitive system called "seeker seen loop system". Additionally, they summarized that the 2DOF control is better than the 1DOF control.

Kudrol et al [3] presented that the 2DOF H infinity Control can hold the tension control which is disturbed by the adding load torque. Owing to torque load increased, a speed drive was vibrating while operating. The 2DOF H infinity control is able to reduce the vibration in this problem. Hamedani et al [4] adopted the 2DOF H infinity Control for controlling a permanent magnet servo motor which was driven by field oriented control. The results in this paper

showed that the 2DOF H infinity control can not only decrease the un-modeled dynamics, but also better perform the response than that of the 1DOF H infinity control.

The outline of the article is as follows. Section II consists of the theory of 2DOF H infinity control, the output error system identification, and the new technique of 2DOF H infinity Control for DC Motor using Genetic Algorithms. Section III presents the design of the proposed controller using the 2DOF H infinity Control for DC Motor using Genetic Algorithms. Simulation results are shown and discussed in this section. Finally, the last section concludes the research work and illustrates the discussion.

II. 2DOF H INFINITY CONTROL, SYSTEM IDENTIFICATION AND THE PROPOSED TECHNIQUE

A. System Identification

Standard system identification can be performed to determine the parameters of the dynamic model from the measured data in any systems. The measured data derived from the input and output system are used to the identification process. In this paper, the OE (Output Error) method [5] is selected as the linear model of DC motor.

Bringing the measured data and the number of poles (n_p) with zero plus one (n_z) of system and delay (d), the black box model identification process can be performed. The results of this process are the model parameter, i.e. f_1, f_2, \dots, f_n and b_1, b_2, \dots, b_n . The transfer function of the system is as the following equation.

$$G(s) = \frac{b_0 s^{n_z} + b_1 s^{n_z-1} + \dots + b_n}{s^{n_p} + f_1 s^{n_p-1} + \dots + f_n} \quad (1)$$

Fig. 1 shows the diagram of the OE model.

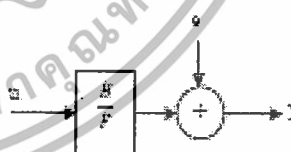


Fig. 1 Diagram of the OE model

B. 2DOF H infinity control

2DOF H infinity control is a method which is able to specify the time domain specifications into the H infinity robust control. Normally, H infinity control specifies the specifications in the frequency domain. The 2DOF H infinity control consists of a feed-forward pre-filter controller, K_p , and a feedback controller, K_f . K_p is used for controlling the response of time domain of the closed loop system. In addition, K_f is designed for achieving the robust performance and disturbed rejection of the entire system. The 2DOF H

Manuscript received January 06, 2014. This work was funded by Csi-Group Electronic (Thailand) Public Company Limited and BGRAB, KMITL. This work was also supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

Corresponding author with the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520. E-mail: natchanon.chitnangs@kmitl.ac.th
Somyer Kaistwanitvithai, Natchanon Chitnangs and Somyer Kaistwanitvithai with College of Dea Storage Institute, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand. E-mail: natchanon.chitnangs@kmitl.ac.th

infinity control uses only one weighting function which is the pre-compensator weight function, W , to specify the loop shape. In addition, the reference model, T_{ref} is applied to establish the time domain specification. Considering the shaped system (N_s) which can be formulated as co-prime factors: $[G]$ which consists of the numerator factor N_s and the denominator factor M_s , Fig. 2 demonstrates the uncertainty model of the system and robust control synthesized system.

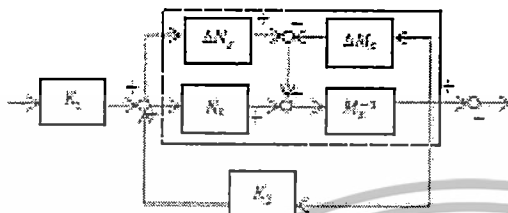


Fig. 2 uncertainty system of co-prime factors

When T_{ref} is used for refining the model of the time domain specification.

ρ is a constant which is designed to modify the roll performance of the control system. Loop shaping system can be described in the following equation:

$$T_{ref} = \rho W_p W_c W_s \quad (2)$$

Equation (2) converts the uncertainty into the shaped system.

$$G_s = (N_s + \Delta N_s) / (M_s + \Delta M_s) \quad (3)$$

G_s is uncertain system.

N_s is uncertain transfer function of the numerator.

M_s is the uncertain transfer function of the denominator.

$$|\Delta N_s|, |\Delta M_s| \leq \epsilon \quad (4)$$

ϵ is stability margin.

The following are the steps of the conventional design procedure of the 2DOF H infinity control.

Step 1 Pre-compensator weight function (W_p) is designed to perform an open loop shaping.

Step 2 Reference model (T_{ref}) is designed to refer the time domain specification of the closed loop system, and to use ρ to select the performance and efficiency of time and frequency domain. ρ has ranged from 0 to 1. If the designer select $\rho = 0$, the 2DOF H infinity control becomes the 1 DOF H infinity control.

Step 3 ϵ_{opt} is determined by solving the following equation (5).

$$\|K_{opt}\|^{-2} = \epsilon_{opt}^2 \rho^{-2} = \|(I - G_c K_1)^{-1} G_c K_1 - T_{ref}\|_{\infty}^{-2} \quad (5)$$

Step 4 After step 3, the K_1 and K_2 are synthesized [7] by solving the following equation.

$$\|W_p \begin{bmatrix} (I - G_c K_1)^{-1} K_1 & K_1 (I - G_c K_1)^{-1} K_2^{-1} \\ \rho (I - G_c K_1)^{-1} G_c K_1 & (I - G_c K_1)^{-1} G_c K_2^{-1} \\ \rho^2 [(I - G_c K_1)^{-1} G_c K_1 - T_{ref}] & \rho (I - G_c K_1)^{-1} G_c K_2^{-1} \end{bmatrix}\|_{\infty} \leq \epsilon^{-1} \quad (6)$$

Step 5 (6) is synthesized by:

$$W_1 = [W_p (I - G_c(0)K_1(0))^{-1} G_c(0)K_2(0)]^{-1} T_{ref}(0) \quad (7)$$

By $W_2 = 1$

Step 6 K_1 and K_2 is tested to ensure the performance of the designed system.

The resulting controller obtained from the above mentioned procedure has high order. If the order of the controller is high, it is difficult to be implemented in real system. To overcome this problem in the proposed technique, the design of the structure of the controller K_1 and K_2 is firstly selected and then the genetic algorithms are adopted to compute the control parameters of K_1 and K_2 to achieve the maximum stability margin in (6). Generally, the controller is shown in Fig. 3 for real implementation.



Fig. 3 2DOF control

To summarize the proposed design, the following steps of the proposed technique are described.

Step 1 T_{ref} and W_p are selected to achieve both desired loop shape and time domain response. Also, the structures of the controller K_1 and K_2 are selected. In this paper, we selected the structures as:

$$K_1 = \frac{1}{s^2 + s + 1} \quad (8)$$

$$K_2 = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (9)$$

Step 2 Genetic algorithm is applied for determining the parameters in K_1 and K_2 so that the maximum stability margin can be achieved.

$$W_p W_s = \begin{bmatrix} (I - G_c K_1)^{-1} K_1 & K_1 (I - G_c K_1)^{-1} K_2^{-1} \\ \rho (I - G_c K_1)^{-1} G_c K_1 & (I - G_c K_1)^{-1} G_c K_2^{-1} \\ \rho^2 [(I - G_c K_1)^{-1} G_c K_1 - T_{ref}] & \rho (I - G_c K_1)^{-1} G_c K_2^{-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

By $K_{opt} = W_p^{-1} K_2(0)$

Step 3 System performance of the proposed controller is tested.

III. DC MOTOR SYSTEM AND SYSTEM IDENTIFICATION

The DC motor system is designed to create the single axis driving with DC motor. The load screw changes from the radial motion to linear motion. The angular velocity is measured by the encoder joined at the end of the lead screw. DC motor is driven by H-bridge circuit, and PWM signal is

made from a microcontroller, "ARM Cortex-M4 processor" to transfer the data for feedback control.

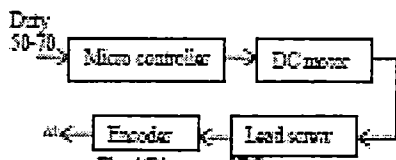


Fig. 4 Diagram of DC motor system

The system identification technique was performed to determine the parameters of the dynamic model of DC motor from the measured data. The measured data derived from the input duty cycle shown in Fig. 5, and the speed output shown in Fig. 6. OE (Output Error) method is used for modeling the linear model of DC motor. This model is created by selecting the identification parameter as $n_x = 2, n_y = 2, n_u = 1$.

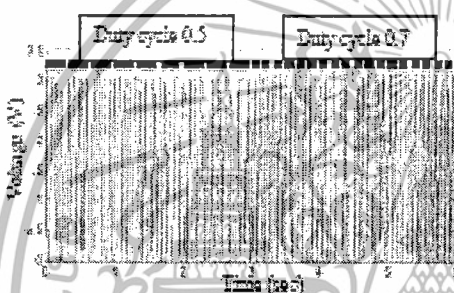


Fig. 5 Input signal of system (Voltage)



Fig. 6 Output signal of system (Speed)

TABLE I. Transfer function derived from system identification

| Duty cycle(%) | Transfer function |
|---------------|--|
| 50-70 | $G_1(s) = \frac{2.92 \times 10^3 s + 6.152 \times 10^4}{s^2 + 7.106 \times 10^3 s + 4.746 \times 10^4}$ $F(s) = \frac{0.15 \times 10^3 s + 3.291 \times 10^4}{s^2 + 4.519 \times 10^3 s + 3.293 \times 10^4}$ |
| 60-90 | |

IV. EXPERIMENTAL AND SIMULATION RESULTS

This experimental setup adopted in this paper for the system identification is shown in Fig. 4. When applying the proper signal to the system, the measured data needed for the identification can be achieved. Then the identified model was used to the controller design. The identified plants are

shown in TABLE I. The designed plant is the plant at the operating point (duty 50%-70%) and the other plant with duty cycle 60-90% is used to verify the robustness when the plant is changed. The conventional H infinity 2DOF control and the 2DOF H infinity control using genetic algorithms are tested in the system by applying the step response. The performance and robustness in terms of the rise time, overshoot, settling time, bandwidth, and stability margin of the proposed algorithm are investigated in comparison with the conventional control.

In the conventional technique, the weight and reference model were selected as:

$$W_1 = \frac{9852s+1029}{s+0.021} \tag{11}$$

$$T_{ref} = \frac{1}{0.0234s+1} \tag{12}$$

The selected W_1 results in the optimal stability margin $\gamma_{opt} > 0.25$ and the T_{ref} results in the specified settling time.

Then, the K_1 and K_2 were synthesized using the conventional technique as the filter with 4th order.

$$K_1(s) = \frac{-2.697s^4 + 1.151s^3s^2 + 1.375s^2s + 2.622s + 0}{s^4 + 4.644s^3s + 1.278s^2s^2 + 3.326s + 5.655s + 0} \tag{13}$$

$$K_2(s) = \frac{-4.976s^4s^2 - 4.942s^3s^2 - 7.644s^2s - 3.896s + 0}{s^4 + 4.644s^3s + 1.278s^2s^2 + 3.326s + 5.655s + 0} \tag{14}$$

The designed controller by the proposed technique using genetic algorithms was evaluated. The structure of controllers in (13) and (14) were selected. After running the GA for 50 generations, the optimal control parameters $K_1 = 10000, K_2 = 31.0023, K_3 = 1604.7$, and $K_4 = 0.492$ were obtained for K_1 and K_2 .

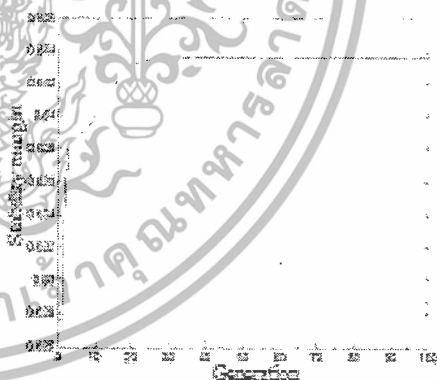


Fig. 7 Stability margin versus generations obtained from the genetic algorithm

The equations (11), (13), and (14) are the weight function and the conventional 2DOF robust controller. As comparison with the proposed controller evolved by GA, the order of the proposed controller is low which is easy to be implemented in practical system.

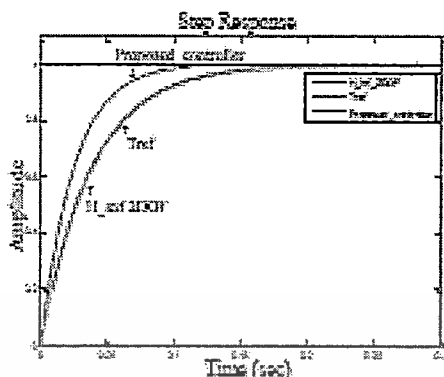


Fig. 8 Step response of the closed loop system from various controller.

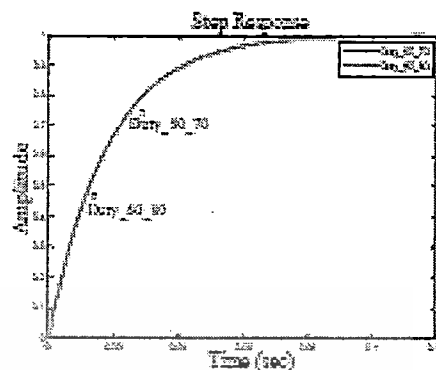


Fig. 10 The robustness of the system is tested by the step response in other operating points.

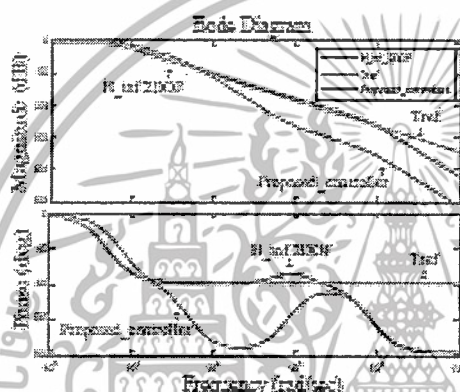


Fig. 9 Bode diagram of the closed loop system from various controller.

The time domain performance of various controller is compared as shown in TABLE II.

TABLE II. The comparison of the DC motor control system with various controllers.

| | Rise time | Step response result | | | Stability margin |
|-------------------------------|-----------|----------------------|---------------|-----------|------------------|
| | | Bandwidth | Settling time | Overshoot | |
| H _∞ inf 2 DOF (GA) | 0.6614 | 25.3965 | 0.0927 | 0 | 6.2434 |
| H _∞ inf 2 DOF | 0.6616 | 25.6456 | 0.113 | 0 | 6.5422 |
| T _{ref} | 0.6614 | - | 0.15 | 0 | - |

The result of simulation shows that the identified transfer functions of Output Error system identification are moderate because the studied system is nonlinear system, but the Output Error system model is suitable for the linear system. The step response of the proposed controller and the H_∞ inf 2DOF control are investigated in the simulation result. As seen in the result in Figs. 8 and 9, the rise time and settling time of the proposed controller is less than the H_∞ inf 2DOF control and the bandwidth of the proposed controller is near the H_∞ inf 2DOF control. In addition, the stability and performance of the proposed controller is similar to the H_∞ inf 2DOF control while the order of the proposed controller is much lower than that of the conventional technique.

Simulation results shown in Fig. 10 of the changing plants from the designed plant (duty 90%-70%) and the other plant (duty 60%-80%) of the proposed controller shows that the proposed system is robust. The response is similar to the original design even the plant is changed.

V. CONCLUSIONS

This paper proposes the new technique of H_∞ inf 2DOF control using genetic algorithm which is used to search the parameters of controller in fixed structure fashion. The performance of the proposed controller is nearly the same as the conventional H_∞ inf 2DOF control achieved by the synthesis of mathematics. However, the conventional robust 2DOF control is hardly to be used in the practical system because K_1 and K_2 are normally high order controller. In contrary, the order of the proposed controller is lower, and the proposed system still remains the good performance and robustness. The stability margin verifies the effectiveness of the proposed algorithm. As seen in frequency domain plots and time domain responses, the proposed technique is a promising technique which can be applied to the DC motor system.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by Cal-Comp Electronics (Thailand) Public Company Limited and DSTAR, RMITL. This work was also supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

REFERENCES

- [1] K. A. Ibra and C.M. Liew, "Robust quantitative speed control of a switched reluctance motor drive," *IEEE Proc-Elec. Power Appl.*, Vol. 148, No. 4, July 2001, pp. 343-353.
- [2] H.-P. Lee and G.K. Sideris, "Robust two-degree-of-freedom control of a motor speed loop system," *IEEE Proc-Control Theory Appl.*, Vol. 197, No. 2, March 2002, pp. 110-116.
- [3] Rodriguez Kratoch, Edward Laroche, Edward Gigue, and Helen Koo, "Trajectory Control for Windup Systems With Two-Degree-of-Freedom H_∞ Controllers," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL APPLICATIONS*, VOL. 38, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2002, pp. 111-120.
- [4] Anuran Manandhar, Suppor K. Karathilaka, and Marco Hablmann, "Speed Control of Electrical Drive Using Classical Control Methods," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL APPLICATIONS*, VOL. 46, NO. 3, MARCH/APRIL 2010, pp. 182-188.
- [5] Ljung, J. System Identification: Theory for the User, 2nd edition. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2014 Vol I
IMECS 2014, March 12 - 14, 2014, Hong Kong

- [6] Mohamed Elmaghrabi, "Global Mesh," "A loop-shaping design procedure using the synthesis," *IEEE Transactions on automatic control* vol. 37, no. 6, June 1992, pp. 759-768.
- [7] Nongnong Phairatong, Komsoy Kiatwattana and Anurong Ngayonkittai, "Fixed Structure Robust H_∞ H₂ Indirect Loop Shaping Control for ACDC Buck Converter using Genetic Algorithm," *Proceedings of the 9th IEEE 2012, March 04-05, 2012, Hong Kong*, pp. 1030-1032.



ISBN: 978-966-19121-5-1
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

IMECS 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายณัฐชนน จิตต์สง่า เกิดวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2533
ที่อยู่ 404 ซอยจรัญสนิทวงศ์ 85 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงบางอ้อ เขตบางพลัด
กรุงเทพมหานคร 10700

จบการศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมระบบและข้อมูล
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง

E-mail : natchanon51@hotmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้