

การประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิด
โดยวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้

นายยุทธพร คำชู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**LOAD TORQUE ESTIMATION OF SI ENGINE USING
ADAPTIVE OBSERVER - COMPENSATOR**

Yuthaporn Kumchoo

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิด
โดยวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสวีผล)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจันทร์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ยุทธพร คำชู : การประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิด โดยวิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ (LOAD TORQUE ESTIMATION OF SI ENGINE USING ADAPTIVE OBSERVER – COMPENSATOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสรีฐผล, 125 หน้า.

ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เป็นอุปกรณ์วัดกำลังของเครื่องจักรต้นกำลังที่มีความสำคัญต่อการวิจัยพัฒนาในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิจัยพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ดัดแปลงให้สามารถใช้เชื้อเพลิงทางเลือกประเภทต่าง ๆ ได้ การให้ภาระกรรมของไดนาโมมิเตอร์กับเครื่องยนต์ระหว่างการปรับแต่ง อาศัยหลักการของการดูดกลืนพลังงาน (Energy Absorption) จากเครื่องยนต์ ในขณะเดียวกันมีการวัดแรงบิด (Torque) และความเร็วเชิงมุม (Rotational Speed) ของเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามไดนาโมมิเตอร์ที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่และมีราคาแพง ทำให้ผู้ปรับแต่งเครื่องยนต์ไม่สามารถจัดหามาใช้ได้โดยทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณแรงบิดภาระกรรมโดยใช้วิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Observer - Compensator) ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เพื่อแทนไดนาโมมิเตอร์ได้

YUTHAPORN KUMCHOO : LOAD TORQUE ESTIMATION OF SI
ENGINE USING ADAPTIVE OBSERVER - COMPENSATOR. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 125 PP.

MATHEMATICAL MODEL OF THE ENGINE/ PARAMETER ESTIMATION/
ADAPTIVE OBSERVER – COMPENSATOR

Dynamometer is power measure device of engine prime mover which is an important part for engine developing in several directions. Especially, the research of performance modification in the internal combustion engine for being used the several of alternative fuel. The principal of the dynamometer loading applied with the engine is used the energy absorption from the engine. In addition, the torque and rotational speed of the engine are measured. The general of dynamometer are classify by several type as follow the energy absorption method such as, the hydraulic type, hydrostatic type, and electric eddy current type. The merit and demerit of individual dynamometer type are several different. In usually, the large size of import dynamometer is so expensive. In addition, the general dynamometers are not flexible for internal combustion engine research tuning. So that, it effect to the engine modifier cannot fulfill. This paper is present the estimate the engine load torque using the adaptive observer-compensator that can estimate engine state variables and calculate engine load torque simultaneously. Therefore, the method has ability to apply and implement as dynamometer.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

คุณศรัทธา โพธิสว่าง ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณอารณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา และคณะเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิทยบริการสารสนเทศ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพ่อเฉลิม คำชู และคุณแม่ปรางค์ พรหมดี รวมถึงครอบครัวทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา และขาดไม่ได้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาที่ใกล้ชิดทุกคนที่มีส่วนทำให้การเรียนในระดับปริญญาโทมีชีวิตชีวาขึ้น

ยุทธพร คำชู

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ผ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงาน.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	2
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 จินเนตออลกอริทึม.....	4
2.2 ตัวสังเกต.....	8
2.2.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม.....	8
2.3 การควบคุมปรับตัวได้นิคอ้างอิงแบบจำลอง.....	12
2.4 หลักการทำงานของไดนาโมมิเตอร์.....	13
2.4.1 แบบ Water Brake.....	13
2.4.2 แบบ Eddy Current Brake.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	แบบ Hysteresis Brake	14
2.4.4	แบบ DC	15
2.4.5	แบบตัว AC	16
2.5	ปรัทัศนัวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	16
2.6	สรุป	18
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	19
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จุดระเบิด (SI Engine)	19
3.1.1	แบบจำลองสมการอัตราการไหลของมวลอากาศ.....	20
3.1.2	แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์	22
3.1.3	แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์	24
3.2	ตัวสังเกต.....	24
3.3	ตัวชดเชยค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้.....	28
3.4	สรุป	31
4	การจำลองสถานการณ์ของเครื่องยนต์จุดระเบิด.....	32
4.1	การระบุเอกลักษณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด.....	32
4.2	การออกแบบตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ของเครื่องยนต์จุดระเบิด	39
4.3	กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด องศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อเปลี่ยนแปลง โดยไม่มีแรงบิดภายนอก	42
4.4	กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด องศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อแบบคงที่ โดยมีแรงบิดภายนอก.....	45
4.4.1	กรณีที่ 2.1 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้น เท่ากับ 2500 RPM	46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2	กรณี ที่ 2.2 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้น เท่ากับ 3000 RPM	50
4.4.3	กรณี ที่ 2.3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้น เท่ากับ 3500 RPM	53
4.5	กรณี ที่ 3 การจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิดค่า แรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์จุดระเบิด ที่ความเร็วรอบคงที่	56
4.5.1	กรณี ที่ 3.1 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์ที่ 2500 RPM	57
4.5.2	กรณี ที่ 3.2 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์ที่ 3000 RPM	60
4.5.3	กรณี ที่ 3.3 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์ที่ 3500 RPM	63
4.6	สรุป	66
5	การทดลองการทำงานของระบบเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด โดยวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้	67
5.1	เครื่องมือทดลอง	67
5.2	การวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกระทำกับระบบ	70
5.3	กรณี ที่ 1 การทดลองจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด องศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อเปลี่ยนแปลง โดยไม่มีแรงบิดภายนอก	73
5.4	กรณี ที่ 2 การทดลองจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด องศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อแบบคงที่ โดยมีแรงบิดภายนอก	77
5.4.1	กรณี ที่ 2.1 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้น เท่ากับ 2500 RPM	77
5.4.2	กรณี ที่ 2.2 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้น เท่ากับ 3000 RPM	81

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.3	กรณีที่ 2.3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 3500 RPM	85
5.5	กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิดหาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์จุดระเบิดที่ความเร็วรอบคงที่	88
5.5.1	กรณีที่ 3.1 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 2500 RPM	89
5.5.2	กรณีที่ 3.2 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 3000 RPM	93
5.5.3	กรณีที่ 3.3 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 3500 RPM	96
5.6	สรุป	100
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	101
6.1	สรุป	101
6.2	ข้อเสนอแนะ	101
	รายการอ้างอิง	103
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตัวชดเชยแปบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง	105
	ภาคผนวก ข. โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องยนต์	107
	ภาคผนวก ค. การใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม ในการระบุเอกลักษณ์	109
	ภาคผนวก ง. รายละเอียดของเซนเซอร์วัดแรงบิด	114
	ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	116
	ประวัติผู้เขียน	125

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	กำหนดตัวแปรสำหรับการระบุเอกลักษณ์34
4.2	ข้อมูลของเครื่องยนต์35
4.3	ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม36
4.4	การตั้งค่าในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม36
4.5	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบโดยใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม38
5.1	ผลค่าแรงบิดจากการคำนวณและค่าแรงบิดจากเซนเซอร์วัดแรงบิด..... 72



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต 11
2.2	แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS..... 12
3.1	โครงสร้างของเครื่องยนต์จุดระเบิด (SI Engine)..... 19
3.2	ภาพพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน 20
3.3	แผนภาพตัวสังเกตอันดับเต็มของระบบเครื่องยนต์..... 25
3.4	แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลง 31
4.1	แสดงการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยวิธีปัญญาประดิษฐ์ 33
4.2	แสดงค่าองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อ ($\theta(t)$) 37
4.3	แสดงค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 37
4.4	แสดงค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ 38
4.5	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 1..... 42
4.6	แสดงค่าแสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 1..... 42
4.7	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 43
4.8	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกต) 43
4.9	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 44
4.10	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)..... 44
4.11	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 45
4.12	แสดงค่า $T_l(t)$ เป็นแบบขั้นบันได สำหรับกรณีที่ 2.1 46
4.13	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1..... 46
4.14	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 47
4.15	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกต)..... 47
4.16	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 48
4.17	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)	49
4.19 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2.....	50
4.20 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2.....	50
4.21 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกต).....	51
4.22 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย).....	51
4.23 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)	52
4.24 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)	52
4.25 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3.....	53
4.26 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3	53
4.27 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกต).....	54
4.28 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย).....	54
4.29 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)	55
4.30 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)	55
4.31 แสดงค่า $T_f(t)$ เป็นแบบขั้นบันได สำหรับกรณีที่ 3	56
4.32 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.1.....	57
4.33 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1	57
4.34 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกต).....	58
4.35 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย).....	58
4.36 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)	59
4.37 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)	59
4.38 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.2.....	60
4.39 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกต)..... 61
4.41	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)..... 61
4.42	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 62
4.43	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 62
4.44	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.3..... 63
4.45	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 63
4.46	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกต)..... 64
4.47	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกต และตัวชดเชย)..... 64
4.48	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกต และตัวชดเชย) 65
4.49	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 65
5.1	ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 1 สูบแบบหัวฉีด 67
5.2	Data acquisition NI USB - 6008..... 68
5.3	เซนเซอร์วัดแรงบิด HBM T5..... 68
5.4	Data acquisition HBM Spider8 68
5.5	แผนภาพการจัดการข้อมูลจากชุดทดลอง..... 69
5.6	แสดงแรงต้านการหมุนที่ได้จากผ้าเบรก 70
5.7	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 1..... 73
5.8	แสดงค่าแสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 1..... 74
5.9	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 74
5.10	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกต) 75
5.11	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 75
5.12	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)..... 76
5.13	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1..... 77
5.15	แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1..... 78
5.16	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 78
5.17	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกต)..... 79
5.18	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)..... 79
5.19	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 80
5.20	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 80
5.21	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2..... 81
5.22	แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2..... 82
5.23	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 82
5.24	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกต)..... 83
5.25	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)..... 83
5.26	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 84
5.27	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 84
5.28	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3..... 85
5.29	แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3..... 85
5.30	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 86
5.31	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกต)..... 86
5.32	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)..... 87
5.33	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 87
5.34	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 88
5.35	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.1..... 89
5.36	แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.1..... 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.37	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 90
5.38	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกต) 90
5.39	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกต และตัวชดเชย) 91
5.40	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 92
5.41	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 92
5.42	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.2 93
5.43	แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.2 93
5.44	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 94
5.45	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกต) 94
5.46	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 95
5.47	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 95
5.48	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 96
5.49	แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.3 96
5.50	แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.3 97
5.51	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 97
5.52	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกต) 98
5.53	แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 98
5.54	แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 99
5.55	แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย) 99
ก.1	แสดงโปรแกรมสำหรับประมาณค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้ จากวิธี Gradient Method 106
ค.1	หน้าต่าง gatool 110
ค.2	การตั้งค่าวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร 110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.3	การกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการค้นหา 111
ค.4	แผนภาพแสดงการใส่ค่า Population Size 111
ค.5	แผนภาพแสดงการเลือก Selection 112
ค.6	แผนภาพแสดงการเลือกจำนวนรอบและค่าคลาดเคลื่อน 112
ค.7	แผนภาพแสดงการเลือกแสดงกราฟ..... 113
ง.1	รายละเอียดของเซนเซอร์วัดแรงบิด (Torque Transducer) 115



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_D	=	สัมประสิทธิ์อัตราการใช้เชื้อเพลิง
R	=	ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (J/Kg.K)
A_{th}	=	พื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (m ²)
P_o	=	ความดันในสถานะนิ่ง (N/m ²)
P_m	=	ความดันในท่อร่วม (N/m ²)
P_T	=	ความดันที่คอคออด (N/m ²)
T_o	=	อุณหภูมิในสถานะนิ่ง (K)
T_m	=	อุณหภูมิในท่อร่วม (K)
γ	=	อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลิ้นปีกผีเสื้อ (m)
d	=	ระยะที่เกิดจากการปรับองศาของลิ้นปีกผีเสื้อ (m)
θ	=	องศาของลิ้นปีกผีเสื้อที่ปรับ (degree)
θ_0	=	องศาของลิ้นปีกผีเสื้อตั้งต้น (degree)
m_m	=	มวลของอากาศในท่อไอเสีย (Kg)
$\dot{m}_{th}$	=	อัตราการไหลมวลอากาศที่ผ่านลิ้นแรง (Kg)
$\dot{m}_{ao}$	=	อัตราการไหลมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอเสีย (Kg)
$\dot{m}_{cyl}$	=	อัตราการไหลมวลอากาศที่เข้าไปในแต่ละกระบอกสูบ (Kg)
V_d	=	ปริมาตรของกระบอกสูบ (m ³)
V_m	=	ปริมาตรของท่อร่วมไอเสีย (m ³)
η_v	=	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร
η_i	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
λ	=	อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ
L_{th}	=	Theoretical Air/Fuel Mass Ratio
H_u	=	ค่าความร้อนของพลังงานเชื้อเพลิง (J/Kg)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P_{ind}	=	ตัวป่งชี้กำลังของเครื่องยนต์
T_{ind}	=	ค่าแรงบิดที่ได้จากการสันดาปภายใน (N.m)
T_e	=	ค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผล (N.m)
T_f	=	ค่าแรงบิดเสียดทาน (N.m)
T_l	=	แรงบิดภาระกรรมภายนอก (N.m)
$\hat{T}_l$	=	แรงบิดภาระกรรมภายนอกจากการประมาณ (N.m)
b	=	ค่าคงที่ความหนืดของลูกปืนเพลาคู่เหวี่ยง (N.m.sec/rad)
ω	=	ความเร็วเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec)
$\dot{\omega}$	=	ความเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec ²)
$\hat{\omega}$	=	ความเร็วเชิงมุมของเครื่องยนต์จากการประมาณ (rad/sec)
I_e	=	ความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ (Kg.m ²)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เป็นอุปกรณ์วัดกำลังของเครื่องจักรต้นกำลังที่มีความสำคัญต่อการวิจัยพัฒนาในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิจัยพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ดัดแปลงให้สามารถใช้เชื้อเพลิงทางเลือกประเภทต่าง ๆ ได้ การให้ภาระกรรมของไดนาโมมิเตอร์กับเครื่องยนต์ระหว่างการปรับแต่งอาศัยหลักการของการดูดกลืนพลังงาน (Energy Absorption) จากเครื่องยนต์ในขณะเดียวกันมีการวัดแรงบิด (Torque) และความเร็วเชิงมุม (Rotational Speed) ของเครื่องยนต์นั้น ๆ โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ตามวิธีการดูดกลืนพลังงาน ได้แก่ การใช้ระบบชลศาสตร์ (Hydraulic) ระบบอุทกสถิต (Hydrostatic) และระบบไฟฟ้า (Electric) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป

อย่างไรก็ตามไดนาโมมิเตอร์ที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่และมีราคาแพง ทำให้ผู้ปรับแต่งเครื่องยนต์ไม่สามารถจัดหามาใช้ได้โดยทั่วไป ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณแรงบิดภาระกรรม โดยใช้วิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Observer - Compensator) ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ เพื่อแทนไดนาโมมิเตอร์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด สำหรับการประมาณแรงบิดภาระกรรม
2. เพื่อประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดโดยวิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Observer - Compensator)

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดสำหรับการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมของเครื่องยนต์
2. การหาค่าแรงบิดภาระกรรมของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด จากการประมาณแรงบิดภาระกรรมของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์และประมาณค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด
- 1 ลูกสูบโดยวิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ
2. การประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดที่ความเร็วรอบคงที่ (2500 - 3500 RPM)
3. ประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดจากวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้ เทียบกับค่าที่วัดได้จาก Torque Transducer

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประมาณค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องแบบจุดระเบิดที่ใช้ทดสอบ
2. สามารถประมาณหาค่าแรงบิดของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดที่ใช้ทดสอบได้โดยวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้ที่ความเร็วรอบคงที่
3. การประยุกต์ใช้วิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด เปรียบเทียบกับค่าแรงบิดที่วัดได้จาก Torque Transducer.

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ของระบบ หลักการทำงานของไดนาโมมิเตอร์ การทำงานของตัวสังเกตและตัวชัดเจน รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด การออกแบบตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เปลี่ยนแปลงสำหรับเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด

บทที่ 4 การจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดที่ได้จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ และจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 การทดลองการทำงานของระบบเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดโดยวิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เปลี่ยนแปลงเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เป็นอุปกรณ์วัดกำลังของเครื่องจักรต้นกำลังที่มีความสำคัญต่อการวิจัยพัฒนาในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิจัยพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ดัดแปลง ซึ่งการที่จะวัดกำลังของเครื่องยนต์ของไดนาโมมิเตอร์นั้น ไดนาโมมิเตอร์ต้องมีการให้แรงบิดภาระกรรมกับเครื่องยนต์ ดังนั้นการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมของไดนาโมมิเตอร์ที่ให้กับเครื่องยนต์ก็จะหาแบบจำลองของระบบจริงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอการประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ ซึ่งทำให้ทราบถึงค่าแรงบิดลัพท์และแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อระบบหรือเครื่องยนต์ เพื่อใช้วิธีการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เพื่อแทนไดนาโมมิเตอร์

2.1 จินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) เป็นเทคนิคการค้นหาลำดับทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทรงประสิทธิภาพเทคนิคหนึ่งและเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยรับการพัฒนาจากการหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์จินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computing) โดยปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด โดย GA เป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบให้กับระบบ ดังนั้น GA จึงเป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณอย่างหนึ่งที่คอยทำงานอยู่ข้าง ๆ ระบบ โดยที่วัฏจักรของ GA โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic Operation, GO) และ การแทนที่ (Replacement) โดยแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนดังนี้

2.1.1 การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) คือขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป ซึ่งการคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ได้จะถูก

นำไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์หรือพ่อแม่เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้วเพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่ดีต้นกำเนิดของสายพันธุ์จะต้องดีด้วยจึงกลายเป็นปัญหาว่าจะทำการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ดีได้อย่างไรการคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่จะสามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่น สำหรับ GA นั้นจะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้นโครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและควรมีโอกาสที่จะให้ลูกหลาน (Offspring) ในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย

2.1.2 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic Operation, GO) คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์เป็นขั้นตอนการนำเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์นั้นมาทำการเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้เป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในวัฏจักรของ GA ที่ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นมานั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ที่เกิดขึ้นกับประชากรซึ่งเป็นคำตอบของระบบแล้ว เราสามารถเปรียบเทียบปฏิบัติการทางสายพันธุ์ได้กับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบนั่นเอง โดยปกติทั่วไปปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของ GA จะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน

1) ครอสโอเวอร์เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (Recombination Operator) โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไป เพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว โดยจะมีการกำหนดอัตราการทำครอสโอเวอร์เอาไว้ส่วนใหญ่จะใช้น่าจะเป็น (P_c) เป็นตัวกำหนดอัตราดังกล่าว การทำครอสโอเวอร์มีวิธีด้วยกัน 3 วิธีคือ

- การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (Single - Point Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวนี้นั้นโครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของแต่ละต้นกำเนิดอยู่อย่างละหนึ่งส่วน จุดตัดในการทำ ครอสโอเวอร์โดยปกติจะได้มาจากการสุ่มเลือกตัวอย่างของการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

- การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (Multiple - Point Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด โครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดอยู่มากกว่าหนึ่งส่วน หลักการเลือกจุดของครอสโอเวอร์นั้นมีอยู่หลายแบบแต่ละแบบจะให้ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสายพันธุ์ในโครโมโซมลูกหลานที่แตกต่างกันออกไป โดยวิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับทั่วไป คือ การสุ่มเลือกจุดครอสโอเวอร์ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดจะให้ผลของลูกหลานที่มีความหลากหลายกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวอันจะมีผลให้การเข้าสู่คำตอบของระบบสามารถ

ครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมลูกหลานได้มากกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวอาจจะทำให้มีโอกาสเบี่ยงเบนของคำตอบที่มีอยู่ในโครโมโซมลูกหลานได้ในอัตราที่สูงกว่าเช่นกัน

- ครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (Uniform Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวและหลายจุดมีการกำหนดจุดตัดเอาไว้ก่อนที่จะทำการสลับส่วนย่อยของโครโมโซมที่จุดนั้น ๆ วิธีดังกล่าวมีความแตกต่างไปจากการทำครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอที่ซึ่งถูกออกแบบให้ทุกจุดบนโครโมโซมสามารถเป็นจุดตัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการใช้ครอสโอเวอร์แมสก์หรือตัวพราง (Cross Over Mask) ช่วยในการทำครอสโอเวอร์ตัวพรางดังกล่าวจะเป็นชนิดไบนารี และมีขนาดจำนวนบิตเท่ากับความยาวของโครโมโซมค่าของตัวพรางที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะเป็นตัวบอกถึงการครอสโอเวอร์ระหว่างต้นกำเนิดสายพันธุ์ตำแหน่งที่ตัวพรางมีค่าเป็น 1 โครโมโซมลูกหลานจะได้จากการสลับส่วนย่อยของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ ถ้าตำแหน่งที่ตัวพรางมีค่าเป็น 0 โครโมโซมลูกหลานจะยังคงเป็นส่วนย่อยของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยไม่มีการสลับส่วนแต่อย่างใด

2) มิวเทชันเป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วนย่อยของโครโมโซม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยานั้นเองปกติแล้วอัตราการทำมิวเทชันจะมีค่าค่อนข้างต่ำหรืออาจจะกล่าวได้ว่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันนั้นมีค่าน้อยถ้ามิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซมแล้วมิวเทชันจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงตัวเลขของโครโมโซมนั้นเองเพราะในทางปฏิบัติแล้วยีนของโครโมโซมก็คือ บิตในระบบตัวเลขของคอมพิวเตอร์การทำงานมิวเทชันเปรียบเสมือนกับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบเช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์ นอกเหนือไปจากนั้นแล้วมิวเทชันยังทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากรมีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึมครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบทั่วถึงยิ่งขึ้น อัตราการทำมิวเทชันเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมและขนาดของประชากรเพื่อให้การสำรวจพื้นที่ในการค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างทั่วถึงดังนั้นการกำหนดอัตราการทำมิวเทชันต้องมีความเหมาะสมที่สุดต่อระบบด้วยเพื่อก่อให้เกิดผลในการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สรุปได้ว่าจุดประสงค์หลักของการทำมิวเทชัน คือเพื่อให้จินเนติกอัลกอริทึมสามารถหลุดพ้นออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยการป้องกันไม่ให้โครโมโซมประชากรเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่มีความคล้ายคลึงกันทั้งหมด ซึ่งการทำครอสโอเวอร์และมิวเทชันเป็นการสร้างการเปลี่ยนแปลงของต้นกำเนิดสายพันธุ์ซึ่งให้ผลเป็นโครโมโซมลูกหลาน การทำครอสโอเวอร์มีผลให้โครโมโซมลูกหลานได้รับสายพันธุ์จากต้นกำเนิดโดยโครโมโซมลูกหลานจะได้รับส่วนที่ดีจากส่วนย่อยของต้นกำเนิดสายพันธุ์ไปในขณะที่การทำมิวเทชันเป็นการสร้างความแปรผันขึ้นในโครโมโซม

ลูกหลานเพื่อให้เกิดประชากรใหม่ที่ดีกว่าขึ้นปฏิบัติการทางสายพันธุ์ทั้งสองถูกใช้ในจินเนติก อัลกอริทึมโดยหวังว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้โครโมโซมลูกหลานมีสายพันธุ์ที่ดีขึ้น อันจะนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดต่อไป

2.1.3 การแทนที่ (Replacement) คือ การที่ลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน จุดประสงค์ในการแทนที่นั้นค่อนข้างชัดเจนกล่าวคือ การนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อน จะทำให้ประชากรรุ่นใหม่ประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเพราะได้สืบสายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้วกลยุทธิ์ในการคัดเลือกกว่าโครโมโซมไหนจะถูกแทนที่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1) การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational GA) เป็นการนำประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีจำนวนประชากรเท่ากับ N จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่จะมาแทนที่จะต้องมีขนาด N เช่นกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกกว่าประชากรส่วนไหนจะถูกแทนที่ แต่การที่ไม่มีขั้นตอนดังกล่าวกลายเป็นข้อเสีย นั่นคือ โครโมโซมที่ดี ๆ ในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วย วิธีแก้ที่ง่าย ๆ คือ ก่อนที่จะทำการแทนที่ให้คัดเลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2 – 3 ตัวแรกเอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือกดังที่อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้วิธีดังกล่าวอาจเรียกได้ว่าเป็นกลยุทธิ์คัดเลือกหัวกระทิ (Elitist Strategy) อย่างไรก็ตามประชากรที่เหลืออยู่อาจจะถูกรอบงำด้วยโครโมโซมหัวกระทินี้ได้โดยง่ายกล่าวคือ ถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่นก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไป และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นทำให้ GA ไม่สามารถสร้างวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ ๆ ขึ้นมาได้ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซมหัวกระทิจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้แต่วิธีนี้ก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

2) การแทนที่ประชากรแบบบางส่วน (Partial GA) เป็นการนำเอาประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูกแทนที่ ซึ่งโดยปกติจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นเองโครโมโซมเก่าจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้น กลวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธี เช่น การแทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุดหรือการแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือก เป็นต้น

2.2 ตัวสังเกต (Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสแตต (State – Variable Feedback) เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสแตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสแตตหรือสัญญาณสแตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต (State Estimator) หรือตัวสังเกตมาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบที่จะทำการควบคุม วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก การออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full – Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตทุกตัวของระบบ และตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduce – Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้บางตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยการนำค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสแตต ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น โดยใช้ค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไปในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้บางสแตตเพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

2.2.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full – Order Observer)

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลของเอาต์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสแตต สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสแตตของตัวเองได้แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (Open – Loop Observer) พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเขียนในรูป State Space Form ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.1}$$

เมื่อ A = เมตริกซ์สแตตของระบบ $[n \times n]$
 B = เมตริกซ์อินพุตของระบบ $[n \times 1]$
 C = เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ $[1 \times n]$
 x = สเตตเวกเตอร์ของระบบ $[n \times 1]$
 u = อินพุตของระบบ $[1 \times 1]$
 y = เอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$
 n = จำนวนเต็มบวก

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}] \quad (2.2)$$

เมื่อ L = เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$
 $\hat{x}$ = ค่าตัวแปรสแตตของตัวสังเกต $[n \times 1]$

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.4) สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e \quad (2.5)$$

เมื่อ $e = x - \hat{x}$

เมื่อค่าความแตกต่างของ $x - \hat{x} \rightarrow 0$ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสแตตซึ่งวัดได้จากระบบจริงและตัวสังเกตหมดไป ผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสแตตในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบนั้นมีคุณสมบัติในการสังเกตได้หรือไม่ โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้

$$\text{Observability matrix} = \mathcal{G} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ระบบใด ๆ จะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n ($\text{Rank}[\mathcal{G}] = n$) เมื่อ n คือ อันดับของระบบหรือของเมตริกซ์ A สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต (Observer Gain) สามารถหาได้จาก Ackermann's Formula

$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

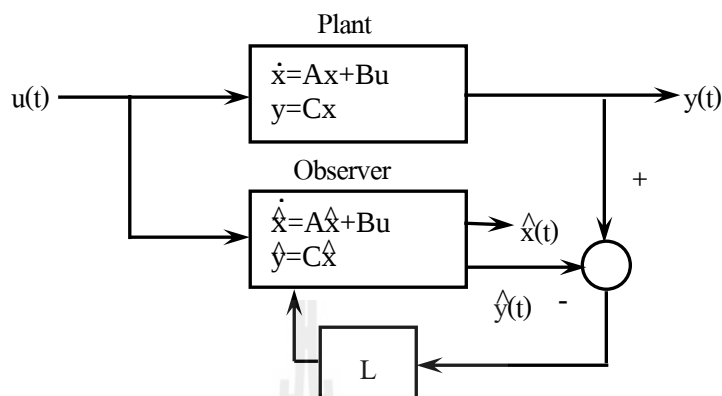
เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$q(\lambda) = \lambda^n + \alpha_1 \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \lambda + \alpha_n \quad (2.8)$$

$$q(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I \quad (2.9)$$

หลักการทำงานของตัวสังเกตคือจะนำอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกตและตัวสังเกตมาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรสแตตที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้

ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกตเพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้าง



รูปที่ 2.1 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

เมื่อ L = ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$

$u(t)$ = ค่าอินพุตของระบบ $[1 \times 1]$

$y(t)$ = ค่าเอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$

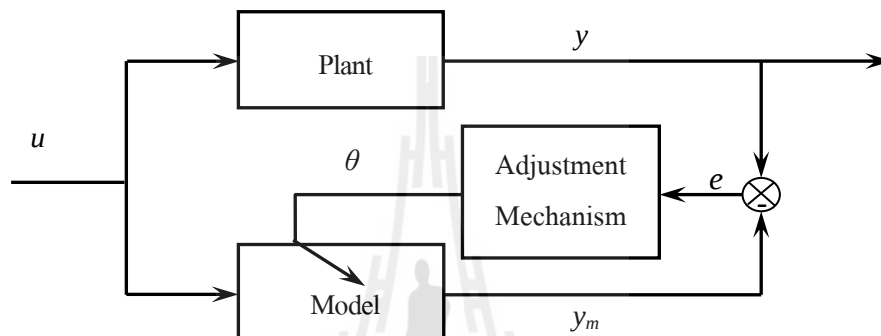
$\hat{y}(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวสังเกต $[1 \times 1]$

$\hat{x}(t)$ = ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต $[n \times 1]$

ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกต ซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือ การกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อให้ระบบของตัวสังเกตมีความเสถียรและมีความรวดเร็วในการตอบสนองเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือ สัญญาณประมาณ $\hat{x}(t)$ จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสถานะจริง หรือ $x(t)$ ในทางปฏิบัติการออกแบบจะให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตหากเราสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า รูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต (Observer Canonical Form) ได้ จะทำให้การออกแบบมีความสะดวกมากขึ้น โดยสามารถใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) ช่วยในการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้

2.3 การควบคุมปรับตัวได้นิยามเชิงแบบจำลอง

การปรับตัวได้นิยามเชิงแบบจำลอง มีหลักในการทำงาน คือ การปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาต์พุตของแบบจำลอง (Model) และระบบที่ต้องการ (Plant) หดไป จากรูปที่ 2.2 ให้เอาต์พุตของแบบจำลองเป็น y_m เอาต์พุตของระบบเป็น y และ e เป็นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสอง (error) และมีตัวแปรที่ทำการปรับค่าคือ θ



รูปที่ 2.2 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

การปรับค่าตัวแปร (θ) เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของแบบจำลองและระบบที่ต้องการหดไป โดยกำหนดให้ Loss function (J) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.10)$$

การปรับค่าของของตัวแปร(θ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (2.11)$$

$$e = y - y_m \quad (2.12)$$

$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{dy_m}{d\theta} \quad (2.13)$$

โดยที่ $-\gamma$ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

การควบคุมแบบปรับตัวได้นี้ได้อ้างอิงแบบจำลองจากทฤษฎีของ Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function (J) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบ และแบบจำลองหมดไปโดยความเร็วในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการปรับตัวซึ่งค่าอัตราการปรับตัวต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมเนื่องจากอาจจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

2.4 หลักการทำงานของไดนาโมมิเตอร์

ไดนาโมมิเตอร์ถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดชิ้นหนึ่งในระบบทดสอบเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำหน้าที่เบรกเพื่อด้านการหมุน หรือเป็นโหลดทางกลให้กับเครื่องยนต์ที่จะนำมาทดสอบ โดยที่จะสามารถแสดงค่าแรงบิดและความเร็ว ณ ขณะที่ทำการเบรกนั้นได้ หากแบ่งตามทิศทางการไหลของพลังงานแล้ว ไดนาโมมิเตอร์แบ่งได้สองชนิด คือ ไดนาโมมิเตอร์ที่ออกแรงขับโหลด (Driving Dynamometers) เช่น โหลดที่เป็นปั๊ม หรือโหลดที่เป็นคอมเพรสเซอร์ และไดนาโมมิเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นโหลดของอุปกรณ์ (Absorption Dynamometers) ที่จะนำมาทดสอบ เช่น มอเตอร์หรือเครื่องยนต์ ซึ่งไดนาโมมิเตอร์แบ่งตามหลักการทำงานจะมี 5 ชนิดที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปดังนี้

2.4.1 แบบ Water Brake

2.4.2 แบบ Eddy Current Brake

2.4.3 แบบ Hysteresis Brake

2.4.4 แบบ DC

2.4.5 แบบ AC

โดยหลักการทำงานของไดนาโมมิเตอร์แต่ละชนิดมีดังนี้

2.4.1 ไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake

ไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้ถือเป็นแบบดั้งเดิมที่มีหลักการง่าย ๆ แต่ได้ผลในระดับหนึ่ง โดยไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้จะใช้หลักการการคัปปลิงแบบหนืด (Viscous Coupling) โดยที่จะมีส่วนประกอบหลักคือโรเตอร์แบบใบพัดที่ไปปั่นน้ำทำให้เกิดความหนืด เมื่อเกิดความหนืดก็จะเกิดแรงต้านหรือการเบรก โดยแรงบิดที่ใช้เบรกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ หมายความว่าถ้าปริมาณน้ำมากจะทำให้แรงหนืดสูง และแรงบิดที่ใช้เบรกก็จะมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

ไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake นี้จะให้กำลังสูง โดยที่เราสามารถสร้างได้ในขนาดกำลังที่สูงในขณะที่มีราคาถูกกว่าแบบอื่น ๆ และยังมีความละเอียดอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากคุณสมบัติของน้ำทำให้การควบคุมไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake นี้กระทำได้ และยังต้องการการดูแลรักษาอย่างดี นอกจากนั้นไม่สามารถสร้างแรงบิดพิคกิ้งที่ความเร็วศูนย์หรือความเร็วต่ำ ๆ ได้ ข้อเสียอีกอย่างของไดนาโมมิเตอร์แบบนี้ก็การทำงานได้เพียง Absorption Mode เท่านั้น หรือไม่สามารถออกแรงหมุนเพื่อขับโหลดชนิดอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อเสียที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการทำงานที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานที่เบรกคืนสู่แหล่งจ่ายได้ นั่นหมายความว่า จะสูญเสียพลังงานในการทดสอบไปอย่างสิ้นเชิง

2.4.2 ไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake

ไดนาโมมิเตอร์แบบนี้อาศัยหลักการทางไฟฟ้า โดยใช้หลักการ Eddy Current ที่จะเหนี่ยวนำขึ้นในแผ่นโลหะที่หมุนได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก และจะทำให้แผ่นโลหะนี้เกิดการสูญเสียแบบ Eddy Current ทำให้แผ่นโลหะไม่สามารถหมุนได้อย่างอิสระ หรือจะถูกหน่วงหรือเบรกให้หมุนช้าลงนั่นเอง โดยแรงบิดที่เบรกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับกระแสที่จ่ายให้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถควบคุมแรงบิดที่ใช้ในการเบรกได้จากกระแสที่จ่ายให้กับขดลวด

ข้อดีของไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake คือควบคุมได้อย่างแม่นยำ และเนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน จึงทำให้ไม่ต้องการการดูแลรักษามากนัก

ข้อเสียของไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้ คือ มีความละเอียดสูง และไม่สามารถควบคุมให้สร้างแรงบิดที่พิคกิ้งที่ความเร็วศูนย์หรือความเร็วต่ำ นอกจากนี้ข้อเสียของไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake นี้จะเหมือนกับไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake คือ การทำงานได้เพียง Absorption Mode เท่านั้น และการที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเบรกคืนสู่แหล่งจ่ายได้

2.4.3 ไดนาโมมิเตอร์แบบ Hysteresis Brake

ไดนาโมมิเตอร์นี้อาศัยหลักการทางไฟฟ้าเหมือนกับไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake โดยอาศัยหลักการของ Hysteresis Loss ของเหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสสลับทำให้เกิดการเบรกโดยส่วนประกอบที่สำคัญประกอบไปด้วยโรเตอร์รูปถ้วย และขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กกระแสสลับเพื่อทำให้เกิด Hysteresis Loss ที่โรเตอร์ จากหลักการดังกล่าวข้างต้น เราจะสามารถควบคุมแรงบิดที่ใช้เบรกได้โดยการควบคุมความเข้มและความถี่ของ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตนเองไดนามอเตอร์แบบ Hysteresis Brake นี้สามารถควบคุมได้ง่าย เช่นเดียวกับไดนามอเตอร์แบบ Eddy Current Brake แต่ทว่าจะมีขนาดกำลังที่น้อยกว่ามาก

ส่วนข้อเสียของไดนามอเตอร์แบบนี้จะคล้าย ๆ กับไดนามอเตอร์แบบ Eddy Current Brake กล่าวคือมันไม่สามารถเบรกที่ความเร็วต่ำได้ ทำงานได้เพียง Absorption Mode เท่านั้น และไม่สามารถจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเบรกคืนสู่แหล่งจ่ายได้

2.4.4 ไดนามอเตอร์แบบ DC

ไดนามอเตอร์แบบ DC นี้แท้จริงแล้วก็คือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบ 4 – Quadrants หรือ 2 – Quadrants โดยถ้าเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบ 4 – Quadrants ทำให้ไดนามอเตอร์แบบ DC นี้ทำงานได้ทั้งสองทิศทางหมุน แต่ถ้าเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 – Quadrants จะทำให้ไดนามอเตอร์แบบ DC นี้ทำงานได้เพียงทิศทางเดียว ไดนามอเตอร์แบบ DC นี้มีข้อดีที่สามารถทำงานได้ทั้ง Absorption Mode และ Driving Mode โดยแรงบิดที่ใช้ในการเบรกหรือที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับกระแสอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องง่ายและแม่นยำที่จะควบคุมแรงบิดของไดนามอเตอร์แบบ DC นี้ และนอกจากนี้มีการตอบสนองต่อคำสั่งที่ดี ข้อดีที่สำคัญของไดนามอเตอร์แบบ DC คือ สามารถจ่ายพลังงานในการเบรกคืนสู่แหล่งจ่ายได้ อันเนื่องมาจากการใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่สามารถให้พลังงานไหลกลับทางได้ นั่นหมายความว่าแม้ว่าพลังงานที่ใช้ในการเบรกจะมหาศาลแค่ไหนก็ไม่จำเป็นต้องทิ้งไปในรูปของความร้อน และไม่จำเป็นต้องจัดหาอุปกรณ์ที่จะระบายพลังงานความร้อน แต่ไม่ได้หมายความว่าพลังงานในการเบรกจะสามารถจ่ายคืนแหล่งจ่ายได้ทั้งหมด 100% นั่นเป็นเพราะตัวไดนามอเตอร์แบบ DC เองที่ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็มีการสูญเสียภายในตัวเองอยู่ แต่พลังงานสูญเสียเหล่านี้มีค่าไม่สูง โดยตัวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเองจะมีประสิทธิภาพประมาณ 80% และตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมีประสิทธิภาพมากกว่า 95%

ข้อดีอีกข้อหนึ่งนั่น คือ การที่สามารถจะให้แรงบิดที่พิกัดที่ความเร็วต่ำจนถึงความเร็วเท่ากับศูนย์ได้ นั่นหมายความว่าไดนามอเตอร์แบบ DC นี้จะสามารถลือกมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบหรือเครื่องยนต์ที่จะทำการทดสอบให้หยุดนิ่งโดยให้แรงบิดเท่ากับค่าที่พิกัดของมันได้

2.4.5 ไลนาโมมิเตอร์แบบ AC

ไลนาโมมิเตอร์แบบ AC นี้ก็คือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยจะประกอบไปด้วยวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มอเตอร์อาจจะเป็นได้ทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือมอเตอร์เซอร์โวในขณะที่มอเตอร์เซอร์โวมักมีขนาดเล็กกว่าในกำลังที่เท่ากัน แต่ก็มีราคาที่สูงกว่ามากทำให้ไลนาโมมิเตอร์แบบ AC จะใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเสียเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับไลนาโมมิเตอร์แบบ DC ที่ทำงานได้ทั้ง Absorption Mode และ Driving Mode ไลนาโมมิเตอร์แบบ AC นี้ก็ทำงานได้ทั้งสอง Modes เช่นเดียวกัน และด้วยเทคโนโลยีที่เป็นไปอย่างรวดเร็วของไมโครโปรเซสเซอร์ทำให้การควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปอย่างง่ายดายไม่ต่างอะไรจากการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นไปได้อย่างมากในสมัยก่อนเนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเฉพาะมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำนั้นมีแบบจำลอง (Model) ที่ยุ่งยากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาก จำเป็นต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากเพื่อให้การควบคุมเป็นไปอย่างเที่ยงตรงและแม่นยำซึ่งก็ต้องขอบคุณเทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำที่ทำให้ไมโครโปรเซสเซอร์มีความเร็วในการประมวลผลที่เร็วขึ้นมากทำให้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปอย่างง่ายดายดังนั้น พลังงานที่ไลนาโมมิเตอร์ใช้ในการเบรกจะต้องถูกทำให้หายไปในรูปแบบของความร้อนโดย การทำให้เกิดการสูญเสียที่ Rdb (Dynamic Braking Resistor) แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการที่จะให้มีการจ่ายพลังงานคืนสู่แหล่งจ่ายในช่วงที่ไลนาโมมิเตอร์กำลังเบรกก็เป็นสิ่งที่เป็นไปได้โดยการใช้วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ (Switched – Mode Rectifiers) ที่ให้พลังงานไหลได้สองทางแทนที่วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอด จากเทคโนโลยีด้านการควบคุมมอเตอร์กระแสสลับทำให้ไลนาโมมิเตอร์แบบ AC สามารถสร้างแรงบิดสำหรับเบรกที่ค่าพิกัดได้แม้แต่ที่ความเร็วต่ำหรือความเร็วศูนย์

2.5 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการวัดกำลังของเครื่องยนต์หรือการวัดแรงบิดของเครื่องยนต์นั้นโดยอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่ากำลังหรือแรงบิดได้ คือ ไลนาโมมิเตอร์ ซึ่งไลนาโมมิเตอร์นั้นก็จะมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับประเภทของการให้แรงบิดภาระกรรมที่ให้กับเครื่องยนต์ โดยแต่ละประเภทก็จะมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไปรวมทั้งราคาก็จะต่างกัน และไลนาโมมิเตอร์นั้นมีหน้าที่ให้แรงบิดด้านกำลังของเครื่องยนต์พร้อมทั้งวัดค่าแรงบิดที่ด้านกำลังของเครื่องยนต์ ซึ่งแรงบิดที่ไลนาโมมิเตอร์ให้กับเครื่องยนต์นั้นจะเท่ากับแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เครื่องยนต์ได้รับ ดังนั้นถ้าต้องการวัดค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เครื่องยนต์ โดยที่ไม่ใช้ไลนาโมมิเตอร์เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายนั้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยเพื่อประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนระบบของ

เครื่องยนต์ โดยในทางปฏิบัติค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกเปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ตัวสังเกตแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เปลี่ยนแปลงซึ่งใช้หลักการของการชดเชยแบบปรับตัวได้

Muske, Jones, and Franceschi (2008) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การปรับตัวของ การควบคุมสำหรับอัตราส่วนอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ซึ่งตัวควบคุมแบบเชิงเส้นนั้นใช้แบบ PID Control และใช้เป็นแบบควบคุมการวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพแบบออฟไลน์โดยใช้ คาลมานในการกรอง และได้ทำการประมาณส่วนที่ไม่แน่นอนของระบบ

Moraal (1996) งานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงการพัฒนาของขั้นตอนวิธีการปรับตัวสำหรับการชดเชยเชื้อเพลิงชั่วคราว โดยใช้การเปลี่ยนเซ็นเซอร์ก๊าซออกซิเจนของท่อไอเสีย (EGO)

Pavkovic, Deur, and Kolmanovsky (2009) งานวิจัยนี้เสนอการออกแบบโพลของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด ซึ่งค่าแรงบิดประมาณค่าตามการปรับตัวกรองของคาลมาน และใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ในการควบคุมและเทียบกับ PI, PID และ Polynomial Controllers ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีของตัวควบคุมแบบปรับตัวสำหรับระยะการใช้งานของเครื่องยนต์กว้าง

Hendricks, et al. (1996) ในงานวิจัยนี้แสดงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของตัวสังเกตกับเซ็นเซอร์ โดยวัดการไหลของมวลอากาศที่เกี่ยวข้องสำหรับการควบคุมอัตราส่วน A/F ซึ่งตัวสังเกตนี้อาจจะเรียกตัวสังเกตว่า MAP Observer เพราะพื้นฐานของ MAP Observer มาจากสมการของความดัน และมาจากเซ็นเซอร์ MAP และค่าคงที่ได้จากตัวกรองคาลมาน

Ali, and Blath, (2006) งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ออกแบบปัญหาการควบคุมแรงบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดแบบหัวฉีดตรง ซึ่งระบบควบคุมจะเป็นระบบไม่เชิงเส้นโดยเฉพาะ ส่วนใหญ่ที่ทางเข้าอากาศ ในส่วนแรกได้กำหนดให้เป็นพฤติกรรมเชิงเส้นทั้งหมด ส่วนที่สองจะ ใช้การทำนายแบบจำลองการควบคุมไม่เชิงเส้น ส่วนที่สามกำหนดตัวควบคุมอัตราขยาย (gain) โดยวิธี LQ – Optimal Control

Choi, Won, and Hedrick (1994) ในงานวิจัยนี้ใช้ขั้นตอนวิธีการควบคุมแบบสังเกตการณ์ที่ขึ้นอยู่กับการ sliding mode control ซึ่งเป็นวิธีที่ผู้วิจัยแนะนำให้ใช้สำหรับการตอบสนองอย่างรวดเร็ว และแอมพลิจูดขนาดเล็ก และการควบคุมการปรับตัวโดยใช้ Gaussian networks โดยตรงเพื่อนำไปใช้กับการชดเชยการฉีดน้ำมันชั่วคราว

Shiao, and Moskwa (1996) งานวิจัยนี้เสนอวิธีใหม่สำหรับการควบคุมปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงของแต่ละกระบอกสูบ ซึ่งได้ใช้วิธีการประมาณไม่เป็นเชิงเส้นในการประมาณปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ โดยอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงนั้นจะถูกส่งสัญญาณ

กลับไปยังส่วนควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ และปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำการประมาณนั้นจะฉีดเข้าไปในแต่ละพอร์ต้น้ำมันเชื้อเพลิง

Yan, Li, Dong, and Tang, (2009) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการควบคุมไม่เชิงเส้นแบบหลายอินพุตเอาต์พุตหลายรูปแบบของเครื่องยนต์ โดยการพัฒนาการควบคุมการปรับตัว และวิธีการเรียนรู้การควบคุมการออกแบบ ซึ่งในการทำวิจัยผู้ทำวิจัยได้หาระบบต่าง ๆ คือ ระบบการจ่ายน้ำมัน ระบบความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ระบบการไหลของอากาศ และได้ใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ในการทำวิจัย

Hong, Shen, and Ouyang, (2009) งานวิจัยนี้ใช้ตัวสังเกตการณ์แรงบิดไม่เป็นเส้นตรงซึ่งวัดผลมาจากแรงบิดแบบออนไลน์ ซึ่งฐานของการพัฒนาตัวสังเกตการณ์แรงบิดใช้วิธีการควบคุมแรงบิดแบบระบบปิดจะถูกออกแบบมาเพื่อติดตามให้ความต้องการแรงบิดที่มาพร้อมกับการแก้ปัญหาความเร็วที่ดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวสังเกตการณ์แรงบิดได้รับการออกแบบขึ้นอยู่กับรูปแบบการผลิตแรงบิด

2.6 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมและตัวสังเกตแบบต่าง ๆ เกี่ยวกับเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด ซึ่งปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนี้ได้วิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่าง ๆ และได้นำเสนอการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกของเครื่องยนต์สำหรับนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เพื่อแทนไดนามิเตอร์ ซึ่งการนำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นอีกการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เปลี่ยนแปลงกับเครื่องยนต์โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมภายนอกที่เปลี่ยนแปลงได้

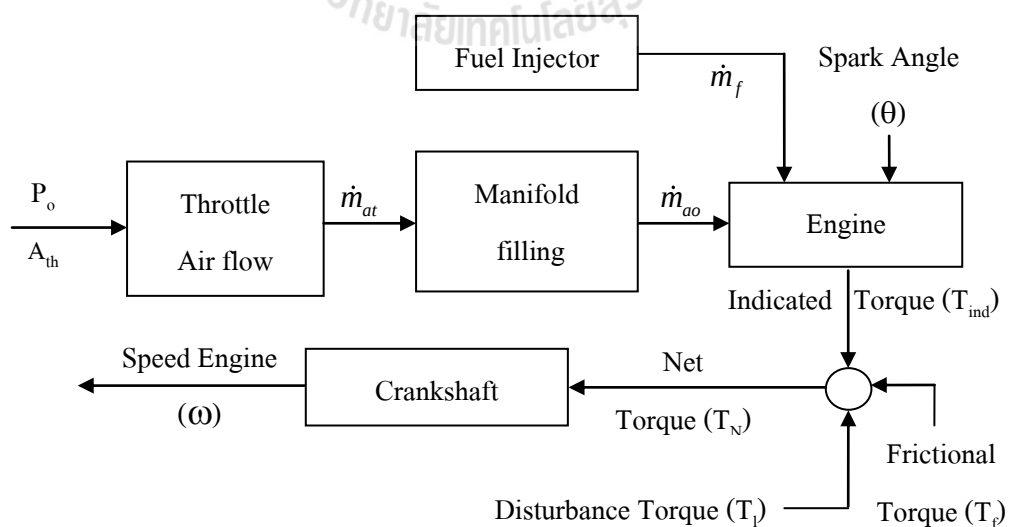
บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวัดกำลังของเครื่องยนต์นั้น จะใช้ไดนาโมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์การวัดและให้โหลดภาระกรรมกับเครื่องยนต์นั้น ๆ ถ้าต้องการทราบค่าแรงบิดภาระกรรมที่กระทำต่อเครื่องยนต์โดยที่ใช้การประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมประยุกต์ใช้แทนการใช้ไดนาโมมิเตอร์ เราจำเป็นต้องจำลองระบบของเครื่องยนต์ให้อยู่ในลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการสร้างตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับใช้ในวิเคราะห์ และอธิบายการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงซึ่งกระทำต่อเครื่องยนต์

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จุดระเบิด (SI Engine)

จากการศึกษาระบบของเครื่องยนต์จุดระเบิดได้จำลอง โครงสร้างของเครื่องยนต์จุดระเบิดได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งโครงสร้างของเครื่องยนต์จุดระเบิดจะประกอบไปด้วยมวลของอากาศ และมวลของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เครื่องยนต์เพื่อเกิดการสันดาปภายในเพื่อให้เครื่องยนต์เกิดเป็นกำลังของเครื่องยนต์ทำให้เพลาช้อเหวี่ยงหมุนเกิดความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ โดยมีแรงบิดที่รบกวนและแรงบิดที่เกิดจากความเสียดทานภายในเครื่องยนต์ด้านกำลังของเครื่องยนต์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องยนต์จุดระเบิด (SI Engine)

สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จรวดแบบแยกเป็น 3 ส่วนดังนี้

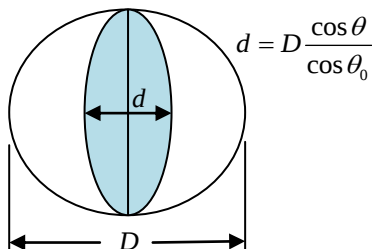
- 3.1.1 แบบจำลองสมการอัตราการไหลของมวลอากาศ (Air Part Model)
- 3.1.2 แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque Production Model)
- 3.1.3 แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์ (Rotation Dynamic Model)

3.1.1 แบบจำลองสมการอัตราการไหลของมวลอากาศ (Air Part Model)

อัตราการไหลของมวลอากาศผ่านลิ้นปีกผีเสื้อโดยปกติจะอธิบายด้วยสมการสำหรับการไหลแบบยวบยัตว์ผ่านคอขวด เมื่ออัตราส่วนความดันผ่านลิ้นแรงมากกว่าค่าวิกฤต $\left(\frac{P_T}{P_o} = 0.528\right)$ อัตราการไหลจะเป็น

$$\dot{m}_{th} = \frac{C_D A_{th} P_o}{(RT_o)^{1/2}} \left(\frac{P_T}{P_o}\right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_T}{P_o}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.1)$$

เมื่อ	C_D	=	สัมประสิทธิ์อัตราการไหล
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (J/Kg.K)
	A_{th}	=	พื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (m ²)
	P_o	=	ความดันในสถานะนิ่ง (N/m ²)
	T_o	=	อุณหภูมิในสถานะนิ่ง (K)
	P_T	=	ความดันที่คอขวด (N/m ²)
	γ	=	อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ $\left[k = \frac{C_p}{C_v} \right]$



รูปที่ 3.2 ภาพพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน

จากรูปที่ 3.2 สามารถประมาณพื้นที่หน้าตัดของล้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (A_{th}) จากสมการดังนี้

$$A_{th} = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{D^2}{4} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} \quad (3.3)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของล้นปีกผีเสื้อ (m)
 d = ระยะที่เกิดจากการปรับองศาของล้นปีกผีเสื้อ (m)
 θ = องศาของล้นปีกผีเสื้อที่ปรับ (degree)
 θ_0 = องศาของล้นปีกผีเสื้อตั้งต้น (degree)

เมื่ออัตราการไหลของมวลอากาศผ่านล้นปีกผีเสื้อเกิดการไหลเกิดไ้จะ ได้

$$\frac{P_T}{P_o} \leq [2/(\gamma+1)]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.4)$$

เมื่ออัตราส่วนความดันน้อยกว่าอัตราส่วนวิกฤตการไหลที่ล้นเร่งก็จะเกิดการไ้ (สภาวะที่ของไหลมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง) และจะได้อัตราการไหลของมวลอากาศเป็น

$$\dot{m}_{th} = \frac{C_D A_{th} P_o}{(RT_o)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (3.5)$$

การไหลของอากาศที่เข้าและออกจากท่อไอดีอาจอธิบายโดยใช้ตัวแบบ ซึ่งมีอยู่หลายแบบ โดยแบบที่ง่ายแบบหนึ่งก็คือตัวแบบการเติมเข้าและถ่ายออก (Filling and Emptying Model) ซึ่งสมมติให้ความดันในท่อไอดีที่เวลาหนึ่ง ๆ สมำเสมอ และจากสมการความต่อเนื่องของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากท่อไอดีจะได้เป็น

$$\frac{dm_m}{dt} = \dot{m}_{th} - \sum \dot{m}_{cyl} \quad (3.6)$$

เมื่อ m_m = มวลของอากาศในท่อไอดี (Kg)
 $\dot{m}_{th}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศที่ผ่านล้นเร่ง (Kg)

$\dot{m}_{cyl}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าไปในแต่ละกระบอกสูบ (Kg)
 ซึ่งอัตราการไหลของอากาศผ่านลิ้นเร่งได้ให้ไว้ในสมการที่ (3.6) ถ้าสมมติให้การไหลของมวลอากาศที่เข้าไปในกระบอกสูบอยู่ในสภาวะคงตัวจะได้

$$\sum \dot{m}_{cyl} = \frac{\eta_v P_m V_d \omega}{4\pi R T_m} \quad (3.7)$$

และถ้าสมมติให้อุณหภูมิของอากาศคงตัว แล้วใช้กฎของแก๊สอุดมคติสำหรับแก๊สในท่อ ($P_m V_m = m_{a,m} R T_m$) สมการที่ (3.7) ก็จะเขียนได้เป็น

$$\frac{dP_m}{dt} = \dot{m}_{th} \frac{R T_m}{V_m} - \frac{\eta_v V_d \omega}{4\pi V_m} P_m \quad (3.8)$$

สมการข้างต้นนี้จะใช้สำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความดันในท่อไอดี

โดย	p_m	=	ความดันในท่อร่วม (N/m^2)
	T_m	=	อุณหภูมิในท่อร่วม (K)
	V_d	=	ปริมาตรของกระบอกสูบ (m^3)
	V_m	=	ปริมาตรของท่อร่วมไอดี (m^3)
	η_v	=	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร
	ω	=	ความเร็วเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec)

3.1.2 แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque Production Model)

เมื่ออัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง ($\dot{m}_f$) มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี ($\dot{m}_{ao}$) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda \cdot L_{th}} \quad (3.9)$$

โดย $\dot{m}_{ao}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี (Kg)

λ = อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ ($\lambda=1$)

L_{th} = theoretical air/fuel mass ratio = 14.7

และตัวบ่งชี้กำลัง (P_{ind}) ซึ่งเป็นกำลังที่ได้จากการสันดาปน้ำมันเชื้อเพลิงจะได้จากสมการ

$$P_{ind} = H_u \eta_i \dot{m}_f \quad (3.10)$$

โดย H_u = ค่าความร้อนของพลังงานเชื้อเพลิง (J/Kg)

η_i = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

โดยที่อัตราการไหลมวลอากาศที่เข้าไปในแต่ละกระบอกสูบ ($\dot{m}_{cyl}$) จะเท่ากับอัตราการไหลของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี ($\dot{m}_{ao}$) เมื่อแทนสมการที่ (3.7) และ (3.9) ในสมการที่ (3.10) และจากสมการสมการที่ (3.10) ตัวบ่งชี้กำลังของเครื่องยนต์เปลี่ยนเป็นสมการแรงบิดของเครื่องยนต์จะได้แรงบิดจากการสันดาปภายใน (T_{ind})

$$T_{ind} = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda T_m} p_m \quad (3.11)$$

เมื่อเพิ่มฟังก์ชันการจุดระเบิด ($SI(\phi)$) ซึ่งเป็นข้อมูลจากผลการทดลองจากการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุดระเบิดก่อนมุมของการจุดระเบิดจะถึงจุดศูนย์ตาย (TDC) จะได้ฟังก์ชัน $SI(\phi)$ เพิ่มเข้ามาในสมการของแรงบิดจากการสันดาปภายใน (T_{ind})

$$T_{ind} = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda T_m} SI(\phi) p_m \quad (3.12)$$

อย่างไรก็ตามถ้ามีการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงจะเกิดแรงเสียดทาน (T_f) เข้ามาในระบบ ดังนั้นค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผลของเครื่องยนต์ (T_e) จะได้

$$T_e = T_{ind} - T_f \quad (3.13)$$

โดย T_e = ค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผล (mean effective torque) (N.m)

เมื่อแทนสมการที่ (3.12) ในสมการที่ (3.13) จะได้

$$T_e = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda T_{man}} SI(\phi) p_m - T_f \quad (3.14)$$

3.1.3 แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์ (Rotation Dynamic Model)

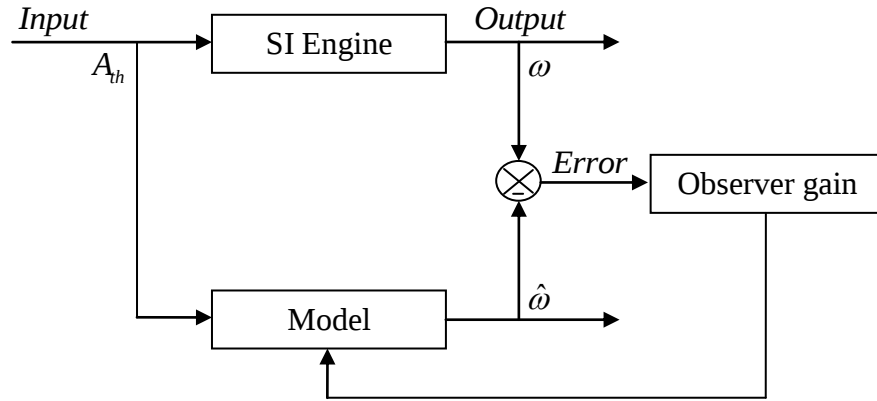
ค่าพลศาสตร์การหมุนเครื่องยนต์ได้จากกฎข้อที่ 2 ของ Newton

$$I_e \dot{\omega} = T_e - T_l - b\omega \quad (3.15)$$

โดย	T_l	=	แรงบิดภาระกรรมภายนอก (N.m)
	b	=	ค่าคงที่ความหนืดของลูกปืนเพลาคือเหวี่ยง (N.m.sec/rad)
	$\dot{\omega}$	=	ความเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec ²)
	I_e	=	ความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ (Kg.m ²)

3.2 ตัวสังเกต

ในทางปฏิบัติตัวแปรสแตตของระบบเครื่องยนต์แบบจตุระเบิดที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นถ้าหากจำเป็นจะต้องประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบ โดยใช้ตัวสังเกตระบบจะต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ ซึ่งระบบที่จะสามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตโดยใช้ตัวสังเกตได้นั้นต้องสามารถทราบค่าอินพุต และเอาต์พุตของระบบ โดยหลักการการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสแตต และเอาต์พุตจากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวสังเกตที่เป็นอันดับเต็มโดยที่ระบบที่ทำการศึกษามีค่าอินพุต คือ องศาการปรับของมุมลื่นปีกผีเสื้อ และเอาต์พุต คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ส่วนตัวแปรสแตตที่พิจารณามีสองตัว คือ ค่าของความเร็วยรอบ และค่าองศาการปรับของมุมลื่นปีกผีเสื้อ เมื่อมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบการทำงานของตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงต้องมีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และชดเชยให้กับตัวสังเกตเพื่อลดความผิดพลาดจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ แผนภาพตัวสังเกตอันดับเต็มของระบบเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพตัวสังเกตอันดับเต็มของระบบเครื่องยนต์

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดจากสมการที่ (3.8) และ (3.15) จัดให้อยู่ในรูป State Space Form และกำหนดให้ค่าความเร็วรอบในการสังเกตเป็นค่าคงที่ (k) จะได้

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-b}{I_e} & \frac{H_u V_d n_i n_v SI(\phi)}{4\pi L_{th} \lambda RT_m I_e} \\ 0 & -\frac{V_d k n_v}{4\pi V_m} \end{bmatrix}$$

เนื่องจากสมการมีจำนวนตัวแปรจำนวนมาก โดยจะกำหนดตัวแปรใหม่นี้

$$A_1 = \frac{-b}{I_e}, A_2 = \frac{H_u V_d n_i n_v SI(\phi)}{4\pi L_{th} \lambda RT_m I_e}, A_3 = 0, A_4 = -\frac{V_d k n_v}{4\pi V_m}$$

จะได้

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{RT_m C_D P_o}{V_m (RT_o)^{1/2}} \left(\frac{P_T}{P_o} \right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_T}{P_o} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = 0, B_2 = \frac{RT_m C_D P_o}{V_m (RT_o)^{1/2}} \left(\frac{P_T}{P_o} \right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_T}{P_o} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2}$$

จะได้

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ และ } J = \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix}$$

คุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$P_c = \begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

หากค่า $\det(P_c) \neq 0$ ระบบจะมีคุณสมบัติในการควบคุมได้
คุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ พิจารณา

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

หากค่า $\det(P_o) \neq 0$ ระบบมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

การหาค่าอีตราชายของตัวสังเกต พิจารณาจาก

$$|\lambda I - A| \quad (3.18)$$

จะได้ $(\lambda - \sigma_1)(\lambda - \sigma_2)$ เมื่อ σ_1 และ σ_2 คือ ค่าโพลของระบบเดิม

การหาค่าอีตราชายของตัวสังเกต (G_c) พิจารณาจากสมการเฉพาะของระบบ โดยสามารถปรับค่าโพลของตัวสังเกต กำหนดให้ ϕ เป็นค่าในการปรับโพลของตัวสังเกตเพื่อให้ตัวสังเกตทำงานได้ผลการตอบสนองตามต้องการ ซึ่งการหาค่า G_c จากสมการ

$$|\lambda I - (A - G_c)| = (\lambda - \phi\sigma_1)(\lambda - \phi\sigma_2) \quad (3.19)$$

โดยที่อีตราชายจะอยู่ในรูป

$$G_c = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{P}_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega \\ P_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot A_{th} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{T}_l + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_f \\ &+ \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \{e\} \\ \hat{y} &= [1 \quad 0] \cdot \begin{Bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{P}_m \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.21)$$

เมื่อ $e = y - C\hat{x} = \omega - \hat{\omega}$

เมื่อกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ ‘^’ คือ ค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากระบบของเครื่องยนต์ และ e คือ ค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องยนต์ และตัวสังเกต

3.3 ตัวชดเชยแรงบิดค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้

พิจารณาสมการของเครื่องยนต์ภาวะที่มีแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงกับเครื่องยนต์ คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ P_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot A_{th} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_l + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_f \quad (3.22)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega \\ P_m \end{bmatrix}$$

สมการของตัวสังเกตในกรณีทีระบบได้รับแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงกับเครื่องยนต์ คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{P}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ P_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot A_{th} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{T}_l + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_f \quad (3.23)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{P}_m \end{bmatrix}$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.22) ที่อยู่ในรูป State Space Form ให้มาอยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สองสมการที่มีอินพุต คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดของล้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (A_{th}) และเอาต์พุต คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์แสดงได้ดังสมการที่ (3.24) และ (3.25)

$$A_{th} = \frac{1}{B_2} \frac{dP_m}{dt} - \frac{A_4}{B_2} P_m \quad (3.24)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = A_1 \omega + A_2 P_m - \frac{T_f}{I_e} - \frac{T_l}{I_e} \quad (3.25)$$

จัดรูปสมการที่ (3.23) ให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์

$$A_{th} = \frac{1}{B_2} \frac{d\hat{P}_m}{dt} - \frac{A_4}{B_2} \hat{P}_m \quad (3.26)$$

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = A_1 \hat{\omega} + A_2 \hat{P}_m - \frac{T_f}{I_e} - \frac{\hat{T}_l}{I_e} \quad (3.27)$$

ในการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงกับเครื่องยนต์ของวิธีการ Gradient Method นั้นเงื่อนไขในการปรับค่า คือ การหาค่าของค่าของความแตกต่างระหว่างความเร็วของเครื่องยนต์ และค่าความเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกต เมื่อพิจารณาแบบว่ามีอินพุต คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดของลึนปิกฟีลล์ที่ให้อากาศไหลผ่าน (A_{th}) และเอาต์พุตคือค่าความเร็วรอบจากสมการเครื่องยนต์และเมื่อทำการจำลองระบบเครื่องยนต์โดยใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ จะพบว่าค่าที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของตัวแปรสแตต คือ ค่าแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป (T_l) ซึ่งถ้าต้องการนำวิธีการประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมวิธีนี้ไปใช้แทนไดนามิเตอร์อาจทำให้ไม่สามารถทราบ ค่าแรงบิดภาระกรรม (T_l) นั้นได้ ดังนั้นจึงใช้หลักการทำงานของตัวหัดเชยแบบปรับค่าได้หัดเชยค่าแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวสังเกต ($\hat{T}_l$) เพื่อให้ค่าความผิดพลาดของ ระบบของตัวสังเกต และระบบจริงหมดไป ดังนั้นหลักการทำงานของตัวหัดเชยแบบปรับตัวได้ คือ การปรับค่าตัวแปร ($\hat{T}_l$) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไปทำได้โดยกำหนดให้ Loss Function (J) มีค่า

$$J(\hat{T}_l) = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.28)$$

สมการที่ (3.25) ลงด้วยสมการที่ (3.27) จะได้

$$\dot{e} = A_1 e - A_2 (P_m - \hat{P}_m) - \frac{1}{I_e} (T_f - \hat{T}_f) - \frac{1}{I_e} (T_L - \hat{T}_L) \quad (3.29)$$

เมื่อ $\dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\hat{\omega}}$, $e = \omega - \hat{\omega}$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{T}_l} = -\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{T}_l} \quad (3.30)$$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{T}_l$) ในทิศทาง Negative Gradient of Loss Function (J) คือ

$$\frac{\partial \hat{T}_l}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{T}_l} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \hat{T}_l} \quad (3.31)$$

โดยที่ γ คือ อัตราการปรับตัวซึ่งอัตราการปรับตัวนี้มีผลต่อการตอบสนองต่อระบบ คือ ถ้ามีค่าของอัตราการปรับขยายที่มากผลการตอบสนองของระบบจะเร็วแต่ถ้ามากเกินไประบบจะไม่มีเสถียรภาพ แต่ถ้าอัตราการปรับตัวน้อยผลการตอบสนองก็จะช้า ดังนั้นการเลือกค่าอัตราการปรับตัวจึงเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง และกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{T}_l} \quad (3.32)$$

เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{T}_l$) ที่มีความสัมพันธ์กับ Sensitivity Function จะนำสมการที่ (3.32) แทนในสมการที่ (3.30) จะได้

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{T}_l} = -v \quad (3.33)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.33) แทนในสมการที่ (3.31) จะได้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{T}_l$) ที่มีความสัมพันธ์กับ Sensitivity Function

$$\frac{\partial \hat{T}_l}{\partial t} = +\gamma e v \quad (3.34)$$

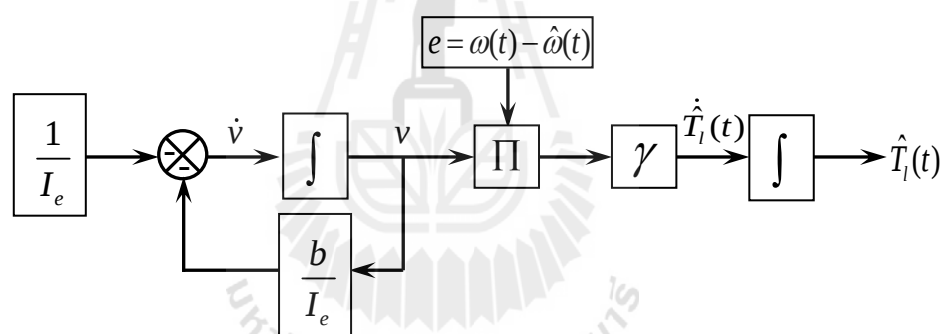
เมื่อตัวแปรปรับค่า ($\hat{T}_l$) มีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของสมการที่ (3.27) ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่าจะได้สมการ

$$\frac{\partial v}{\partial t} - A_1 v = -\frac{1}{I_e} \quad (3.35)$$

เมื่อแทนค่า A_1 เข้าไปในสมการ (3.35) จะได้

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{b}{I_e} v = -\frac{1}{I_e} \quad (3.36)$$

จากสมการ (3.34) และสมการ (3.36) สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพบล็อกการทำงานได้ดังรูป



รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method
สำหรับประมาณค่าแรงบิดภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลง

3.4 สรุป

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จุดระเบิดนั้นในงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองของเครื่องยนต์จุดระเบิดแบบสูบเดี่ยว ซึ่งโครงสร้างของเครื่องยนต์จุดระเบิดจะประกอบไปด้วยส่วนอินพุตที่เป็นองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อเพื่อเปิดรับปริมาณอากาศ และเอาต์พุตที่เป็นความเร็วรอบของเครื่องยนต์ โดยมีแรงบิดที่รบกวนด้านกำลังของเครื่องยนต์ และได้มีการสร้างตัวสังเกต และตัวชดเชยขึ้นมาเพื่อทำการประมาณตัวแปรสเตรต และประมาณค่าแรงบิดที่รบกวนจากภายนอกของระบบของเครื่องยนต์

บทที่ 4

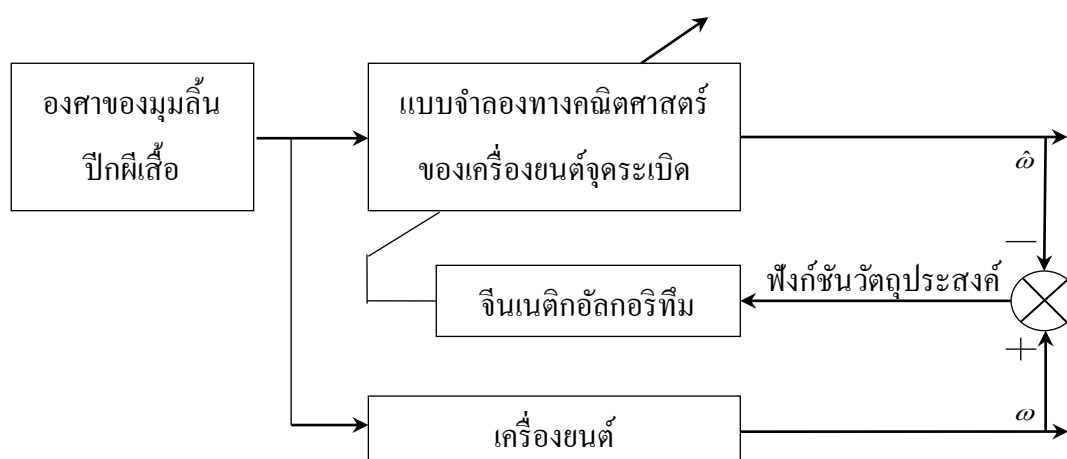
การจำลองสถานการณ์ของเครื่องยนต์จุดระเบิด

จากบทที่ 3 ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ และสร้างตัวสังเกตและตัวชดเชยเพื่อประมาณค่าแรงบิดรบกวนภายนอก ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของระบบของเครื่องยนต์จุดระเบิด โดยใช้ตัวสังเกตและตัวชดเชยค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้โดยตัวชดเชยค่าแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวนั้นได้ใช้วิธีการ Gradient Method และในการจำลองสถานการณ์นี้จะแบ่งพิจารณาเป็นแบบละ 3 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 องศาของมุมของลิ้นปีกผีเสื้อแบบเปลี่ยนแปลง ($\theta(t)$) โดยไม่มีแรงบิดภายนอก
- กรณีที่ 2 องศาของมุมของลิ้นปีกผีเสื้อแบบคงที่ โดยมีแรงบิดภายนอกแบบขั้นบันได (Step Function)
 - กรณีที่ 2.1 ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องยนต์เท่ากับ 2500 RPM
 - กรณีที่ 2.2 ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องยนต์เท่ากับ 3000 RPM
 - กรณีที่ 2.3 ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องยนต์เท่ากับ 3500 RPM
- กรณีที่ 3 หาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์จุดระเบิดที่ความเร็วรอบคงที่
 - กรณีที่ 3.1 ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องยนต์เท่ากับ 2500 RPM
 - กรณีที่ 3.2 ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องยนต์เท่ากับ 3000 RPM
 - กรณีที่ 3.3 ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องยนต์เท่ากับ 3500 RPM

4.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด

ในการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตแบบวงเปิดของเครื่องยนต์จุดระเบิด ในงานวิจัยนี้ใช้การค้นหาลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอน เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยวิธีปัญญาประดิษฐ์

การค้นหาลักษณะของเครื่องยนต์จุดระเบิดเป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ โดยจินเนติกอัลกอริทึมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่าได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด โดยที่ข้อมูลที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบของเครื่องยนต์จุดระเบิดในงานวิจัยนี้จะใช้องศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อเป็นอินพุตให้กับระบบ และในส่วนของการตอบสนองของระบบนั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งในขั้นตอนของการระบุเอกลักษณ์นั้นจะทำการกำหนดค่าความแตกต่างของความเร็วรอบของเครื่องยนต์จากแบบจำลองกับข้อมูลความเร็วรอบของเครื่องยนต์จริงเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งตัวจินเนติกอัลกอริทึมจะทำการปรับหาค่าพารามิเตอร์ของระบบจนกว่าค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบของเครื่องยนต์ลดลง เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณนั้นทำให้แบบจำลองมีการตอบสนองที่สอดคล้องกับข้อมูลความเร็วรอบของเครื่องยนต์จริง

ในการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องยนต์จุดระเบิดนั้น ในส่วนของข้อมูลที่ทำาการระบุเอกลักษณ์ได้มาจากการวัดองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำการเก็บข้อมูลความเร็วรอบอยู่ในช่วง 1000 – 3500 RPM โดยทำการเก็บข้อมูล 10 ข้อมูลในเวลา 1 วินาที และในการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องยนต์ใช้สมการควบคุมของบทที่ 3 ดังนี้

จากสมการที่ (3.3) และ (3.5) แทนในสมการที่ (3.8) จะได้เป็นสมการเพื่อหาค่าความดันในท่อร่วมที่มีผลมาจากการปรับองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อ

$$\frac{dP_m}{dt} = \left[\frac{C_D \left(\pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{D^2}{4} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} \right) P_o}{(RT_o)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \right] \frac{RT_m}{V_m} - \frac{\eta_v V_d \omega}{4\pi V_m} P_m \quad (4.1)$$

นำสมการที่ (3.14) แทนในสมการที่ (3.15) จะได้สมการเพื่อหาค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่มีผลมาจากการเปลี่ยนความดันในท่อร่วม

$$I_e \dot{\omega} = \left(\frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda T_{man}} SI(\phi) p_m - T_f \right) - T_l - b\omega \quad (4.2)$$

และกำหนดให้ ฟังก์ชันการจุดระเบิด ($SI(\phi)$) ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็นสมการอย่างง่ายจะได้

$$SI(\phi) = a\omega + d \quad (4.3)$$

โดยตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า $\eta_i, \eta_v, a, d, L_{th}, \lambda, I_e, C_d, T_f$ และ b ซึ่งเป็นตัวแปรของสมการในระบบ และกำหนดตัวแปรเพิ่มสำหรับการระบุเอกลักษณ์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 กำหนดตัวแปรสำหรับการระบุเอกลักษณ์

ค่าตัวแปรต่างๆ									
พารามิเตอร์	$\eta_i \eta_v$	a	I_e	T_f	b	C_d	$\frac{V_d \eta_v}{4\pi V_m}$	$\frac{1}{\lambda L_{th}}$	d
ตัวแปร	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9

ในการระบุเอกลักษณ์ค่าตัวแปรต่าง ๆ นั้นเพื่อให้จะได้ค่าที่ได้จากที่ใกล้เคียงกับระบบเครื่องยนต์จุดระเบิดแบบสูบเดียวนั้นจะต้องมีการกำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของตัวแปร

ต่าง ๆ ซึ่งขอบเขตเหล่านั้นจะกำหนดตามลักษณะของเครื่องยนต์ ซึ่งข้อมูลของเครื่องยนต์นั้นแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของเครื่องยนต์

ประเภท	ค่า	หน่วย
กระบอกสูบ X ระยะชัก	50 x 55.6	mm
ปริมาตรกระบอกสูบ	109.1	cm ³
อัตราส่วนการอัด	9 : 1	
แรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์	8.59	N.m

สำหรับขอบเขตของความเป็นไปได้ของค่าตัวแปรแสดงดังต่อไปนี้

η_i และ η_v คือ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพเชิงปริมาตรตามลำดับ สำหรับเครื่องยนต์แล้วค่าของตัวแปรจะอยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 80% เพราะว่าไม่มีเครื่องยนต์ชนิดใดที่สามารถให้ค่าประสิทธิภาพในการทำงานได้ 100% เนื่องจากการสูญเสียต่าง ๆ ในระบบ

I_e คือ ค่าความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์จุดระเบิดสูบเดี่ยว ดังนั้นค่าความเฉื่อยส่วนใหญ่จะเกิดจากเพลาคือเหียงของเครื่องยนต์ซึ่งสามารถประมาณค่าจากการคำนวณได้

T_f คือ ค่าแรงบิดเสียดทานของเครื่องยนต์ ซึ่งค่าแรงบิดเสียดทานโดยระบบเครื่องยนต์ทั่วไปแล้วค่าแรงบิดไม่ควรมีค่ามากกว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ ดังนั้นค่าแรงบิดเสียดทานโดยทั่วไปของเครื่องยนต์อยู่ที่ประมาณ 30 - 40% ของแรงบิดเครื่องยนต์

λ คือ ค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ 1 และ L_{th} คือ ค่ามวลของอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี ซึ่งมีค่าประมาณ 14.7 สำหรับเชื้อเพลิงแก๊สโซลีน

เมื่อทราบขอบเขตของตัวแปรบางตัวที่สามารถระบุค่าขอบเขตแล้วเราจะนำขอบเขตเหล่านั้นที่ทราบค่านำไปใส่ในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึมให้โปรแกรมทำการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งได้กำหนดขอบเขตต่างๆแสดงตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม

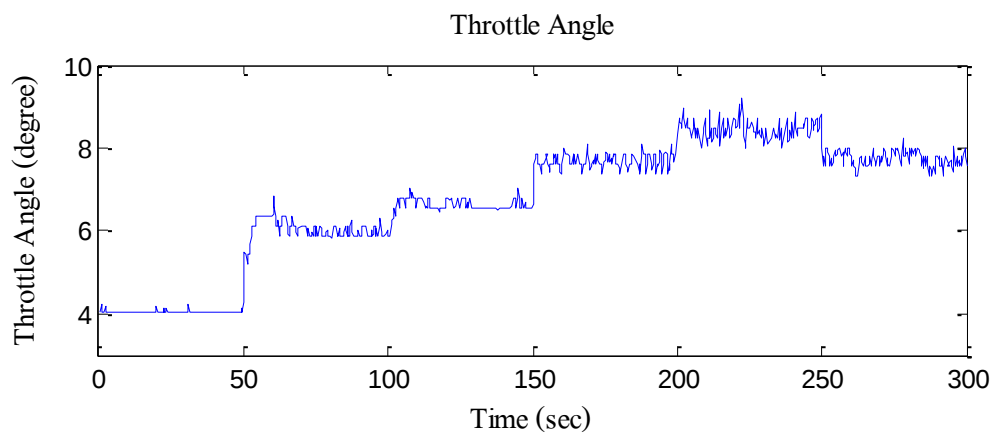
พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
$\eta_i \eta_v$	X_1	0.5	0.9
a	X_2	0.00001	0.0001
I_e	X_3	0.001	0.1
T_f	X_4	1	3.7
b	X_5	0.01	0.1
C_d	X_6	0.1	0.7
$\frac{V_d \eta_v}{4\pi V_m}$	X_7	0.001	0.1
$\frac{1}{\lambda L_{th}}$	X_8	0.05	0.97
d	X_9	0.1	0.1

ในส่วนของโปรแกรมจินเนติก (Genetic Program) ซึ่งต้องมีการเซตค่าให้กับโปรแกรมแสดงในตารางที่ 4.4

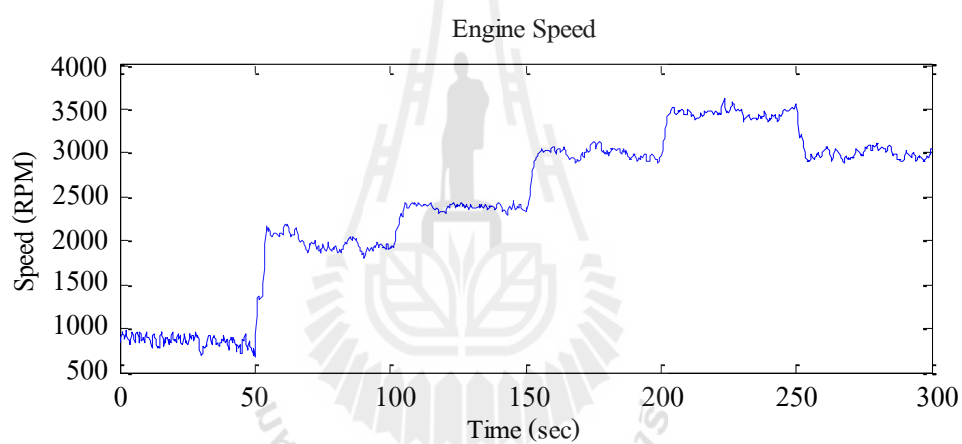
ตารางที่ 4.4 การตั้งค่าในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึม	พารามิเตอร์ Toolbox
Population	200
Generation	3000
Stall Gen.	inf
Fitness Func.	error

ในการทดลองจะให้อินพุตของระบบเป็นองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อ ซึ่งลักษณะการให้อินพุตกับระบบนั้นจะให้เป็นลักษณะแบบขั้นบันได เพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลเอาต์พุต คือ ความเร็วรอบที่ครอบคลุมทั้งช่วงในงานวิจัยนี้ คือ ให้ได้ความเร็วรอบในช่วง 2500 – 3500 RPM ซึ่งอินพุตแสดงดังรูปที่ 4.2 และ เอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงค่าองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อ ($\theta(t)$)

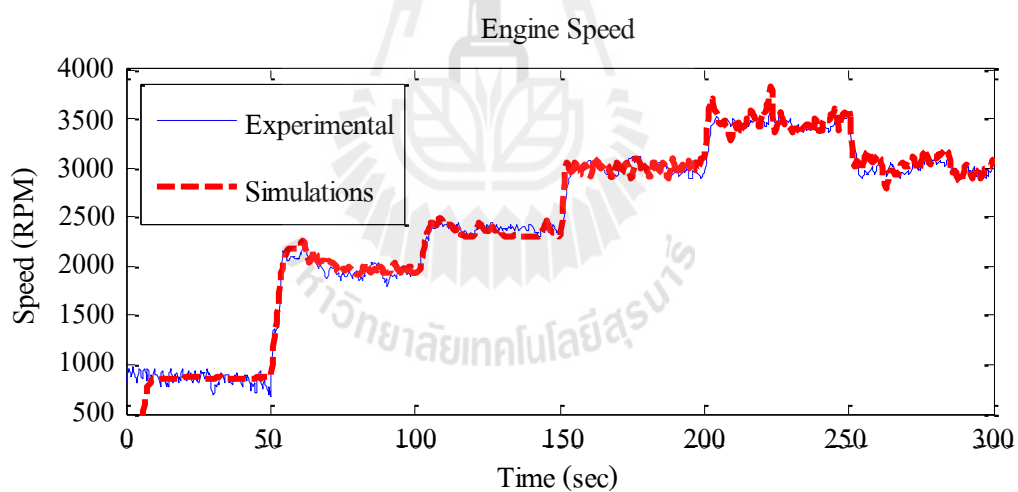


รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ผลจากการทดลองหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบโดยใช้จูนเนติกอัลกอริทึมได้ค่าตัวแปรแสดงดังตารางที่ 4.5 และผลความเร็วรอบเครื่องยนต์ของระบบจำลองที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ค่าตัวแปรแสดงดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบโดยใช้โปรแกรมจิ้นเนติกอัลกอริทึม

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่าตัวแปร
$\eta_i \eta_v$	X_1	0.62530
a	X_2	9.95353e-5
I_e	X_3	0.09999
T_f	X_4	3.26516
b	X_5	0.025923
C_d	X_6	0.69999
$\frac{V_d \eta_v}{4\pi V_m}$	X_7	0.016555
$\frac{1}{\lambda L_{th}}$	X_8	0.90297
d	X_9	0.54491



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์

4.2 การออกแบบตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ของเครื่องยนต์จุดระเบิด

การออกแบบตัวสังเกต จากสมการของเครื่องยนต์ในบทที่ 3 สมการที่ (3.22) คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega \\ P_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot A_{th} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_l + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_f$$

$$y = [1 \quad 0] \cdot \begin{Bmatrix} \omega \\ P_m \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{P}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega \\ P_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot A_{th} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{T}_l + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I_e} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_f$$

$$\hat{y} = [1 \quad 0] \cdot \begin{Bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{P}_m \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

พิจารณาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form ในกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบเพื่อออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม พิจารณา

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบเครื่องยนต์ จะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ

$$\eta_i \eta_v = 0.62530, I_e = 0.09999 \text{ Kg.m}^2, I_f = 3.26516 \text{ N.m}, b = 0.025923 \frac{\text{N.m.sec}}{\text{rad}}$$

$$C_d = 0.69999, \frac{V_d \eta_v}{4\pi V_m} = 0.016555, \frac{1}{\lambda L_{th}} = 0.90297, \gamma = 1.4, R = 286 \frac{\text{J}}{\text{Kg.K}}$$

$$T_0 = 303 \text{ K}, P_0 = 101,325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}, a = 9.95353 \text{e} - 5, d = 0.11939$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการของระบบเครื่องยนต์สมการ (4.4) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ P_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.016167 & 0.0129156 \\ 0 & -0.1275657 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega \\ P_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.229802 \times 10^{10} \end{bmatrix} \cdot A_{th} \\ &+ \begin{bmatrix} -\frac{2.7596}{0.0056717} \\ 0 \end{bmatrix} \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \omega \\ P_m \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

การออกแบบตัวสังเกตสำหรับประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบใด ๆ ต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ และคุณสมบัติในการควบคุมเพื่อจะได้ค่าตัวแปรสแตตในการออกแบบระบบควบคุมต่อไปพิจารณาคุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$\begin{aligned} P_c = [B \quad AB] &= \begin{bmatrix} 0 & 1.4857 \times 10^6 \\ 1.229802 \times 10^{10} & -0.40 \times 10^6 \end{bmatrix} \\ \det(P_c) &= -1.9533721 \times 10^{18} \neq 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ระบบมีคุณสมบัติในการควบคุมได้ และพิจารณาคุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ

$$\begin{aligned} P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.01617 & 0.0129156 \end{bmatrix} \\ \det(P_o) &= 0.0129156 \neq 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

ระบบมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

หาค่า Eigen Value ระบบเปิดของระบบเครื่องยนต์จากสมการ $|\lambda I - A|$ จะได้โพล σ_1 และ σ_2 ของระบบเดิม คือ -0.1275657 และ -0.01617

โดยกำหนดค่า $\phi = 10$ เพื่อได้ผลการตอบสนองเร็วกว่าระบบเดิม 10 เท่า และหาค่า G_c จากสมการ

$$|\lambda I - (A - G_c)| = (\lambda - \phi\sigma_1)(\lambda - \phi\sigma_2) \quad (4.8)$$

$$\text{จะได้ } |\lambda I - (A - G_c)| = (\lambda + 1.275657)(\lambda + 0.1617)$$

$$\text{ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต คือ } G_c = \begin{bmatrix} 3 \times 10^{-6} \\ 3.09 \times 10^{-8} \end{bmatrix}$$

จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{P}_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.016167 & 0.0129156 \\ 0 & -0.1275657 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega \\ P_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.229802 \times 10^{10} \end{bmatrix} \cdot A_{th} \\ &+ \begin{bmatrix} -\frac{2.7596}{0.0056717} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \times 10^{-6} \\ 3.09 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \{e\} \end{aligned}$$

เมื่อ G_c คือ ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต และ e คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วของระบบจริง และตัวสังเกต การจำลองระบบเครื่องยนต์และการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ไม่มีแรงบิดภายนอกเปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบการทำงานของระบบการจำลองของเครื่องยนต์ และตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากบทที่ 3 จากสมการที่ (3.34) และสมการที่ (3.36) นำมาแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้
สมการที่ (3.34) กำหนดให้ อัตราการปรับตัว γ มีค่าเท่ากับ 0.00015 จะได้

$$\frac{\partial \hat{T}_l}{\partial t} = +\gamma e v \longrightarrow \frac{\partial \hat{T}_l}{\partial t} = +0.00015 e v$$

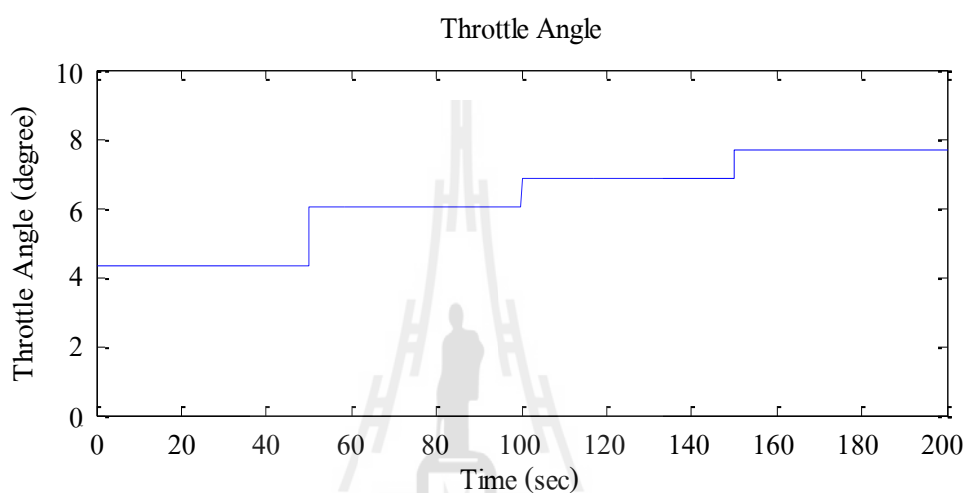
สมการที่ (3.36) จะได้

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{b}{I_e} v = -\frac{1}{I_e} \longrightarrow \frac{\partial v}{\partial t} + 2.850468 v = -\frac{1}{0.0056717}$$

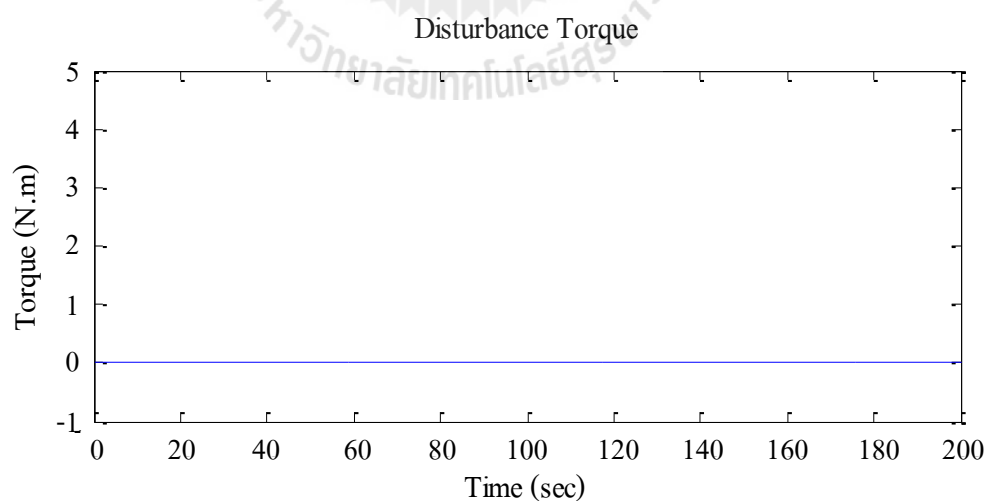
4.3 กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด

องศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อเปลี่ยนแปลง โดยไม่มีแรงบิดภายนอก

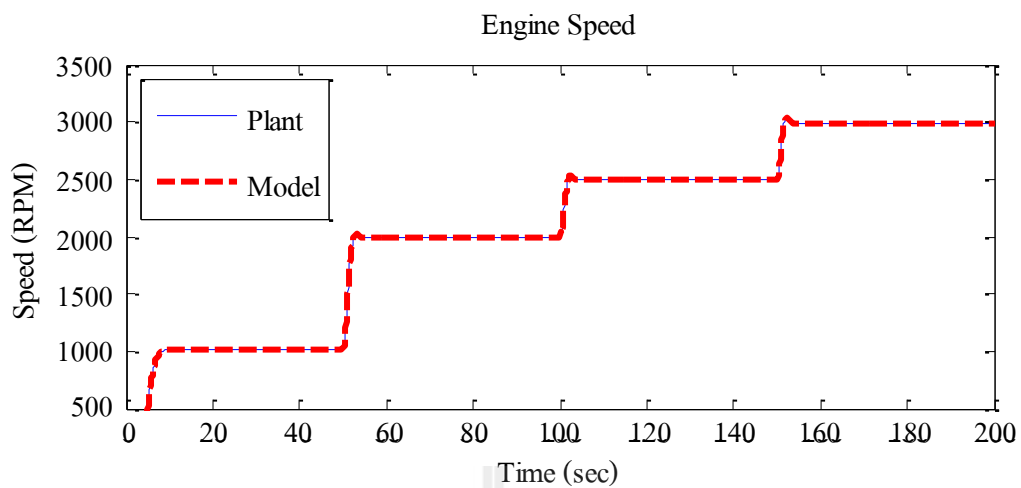
การกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ของระบบถือเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการจำลองสถานการณ์ ซึ่งจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบเครื่องยนต์จะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อนำมาจำลองสถานการณ์การทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิด สำหรับกรณีที่ 1 จะได้ผลการจำลองสถานการณ์ดังนี้



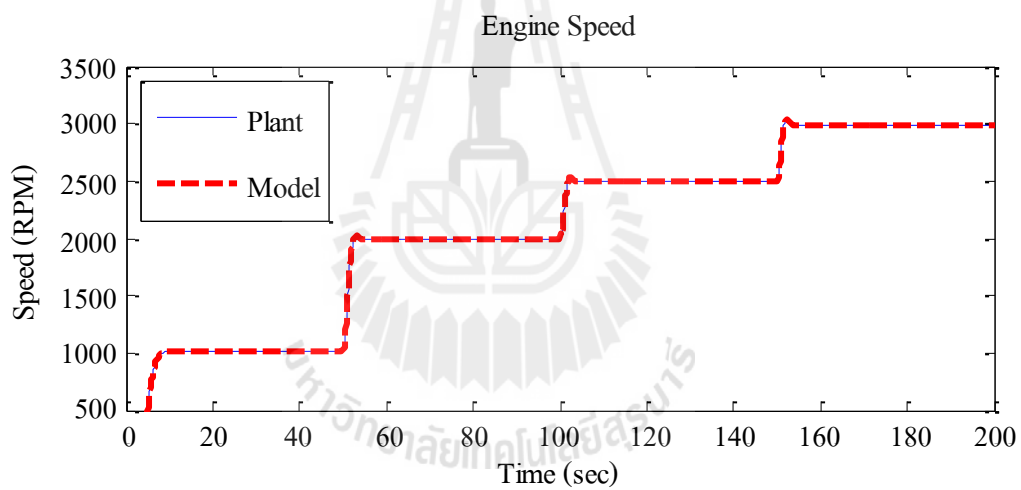
รูปที่ 4.5 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



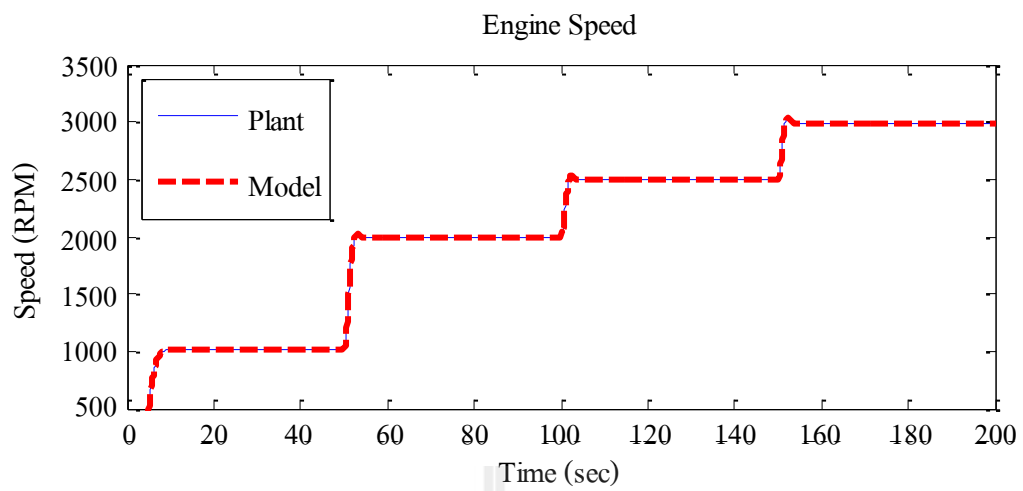
รูปที่ 4.6 แสดงค่าแสดงค่า $T_d(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



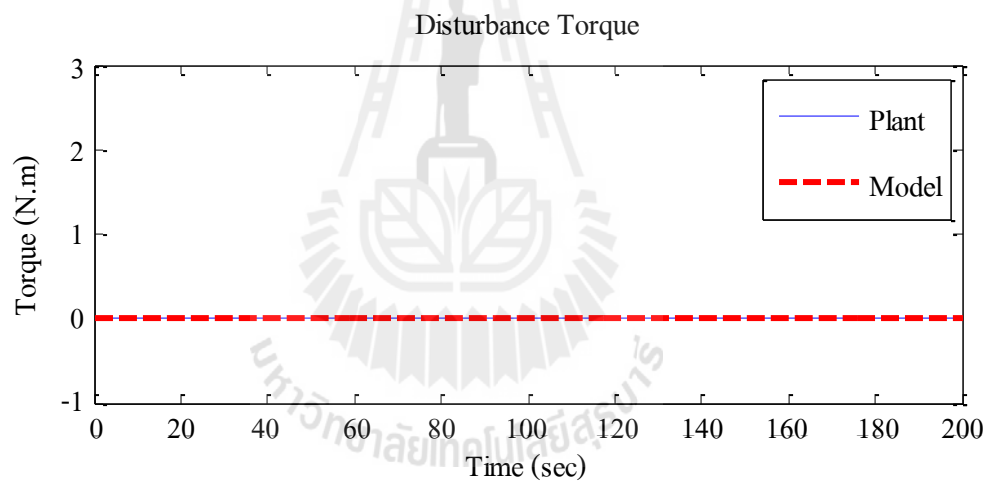
รูปที่ 4.7 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1



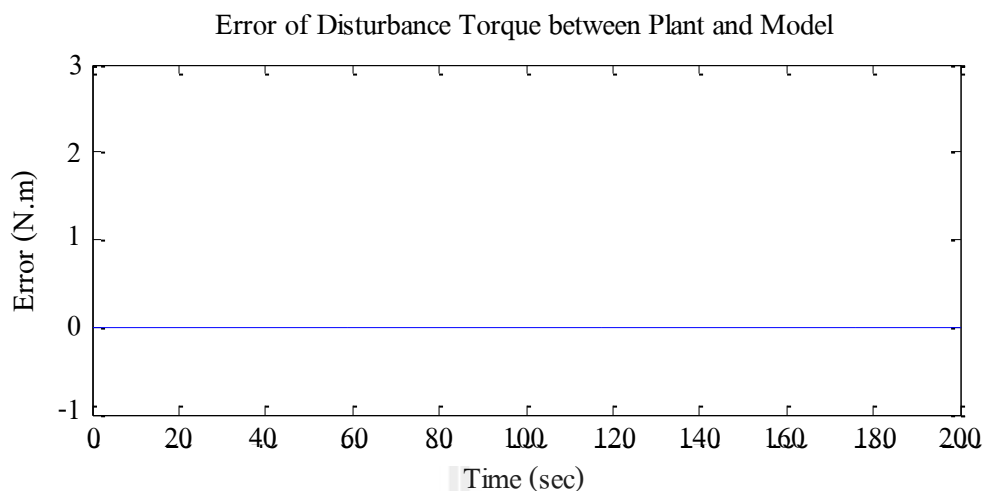
รูปที่ 4.8 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 4.9 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 4.10 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

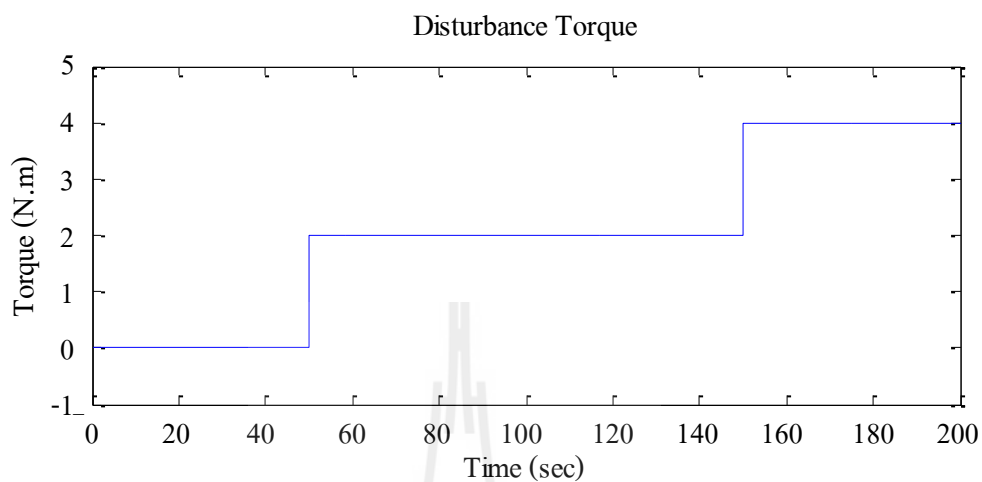
จากผลการทดลองในกรณีที่ 1 ในลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์เมื่อทำการปรับองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อเพิ่มขึ้นหรือลดลง ลักษณะของผลการตอบสนองของระบบจะต้องมีลักษณะคล้ายกับการปรับองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อ ถ้าไม่มีแรงบิดหรือผลกระทบจากสิ่งรบกวนจากภายนอกมากระทำต่อระบบ ซึ่งผลจากการจำลองของระบบสำหรับกรณีที่ 1 รูปที่ 4.7 มีผลการตอบสนองคล้ายกับผลการตอบสนองจริง และคล้ายกับการปรับองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อสำหรับผลการตอบสนองของระบบจำลองที่แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ที่มีตัวสังเกตและตัวชดเชยนั้นจะเห็นว่าผลการตอบสนองของระบบยังคงคล้ายกับผลการตอบสนองจริงเนื่องจาก ระบบไม่ถูกรบกวนจากแรงบิดภายนอกจึงทำให้มีผลการตอบสนองที่คล้ายกัน ดังนั้นสำหรับการชดเชยแรงบิดที่แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีแรงบิดรบกวนจากภายนอกซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการตอบสนองจริง

4.4 กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด

องศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อคงที่ โดยมีแรงบิดภายนอก

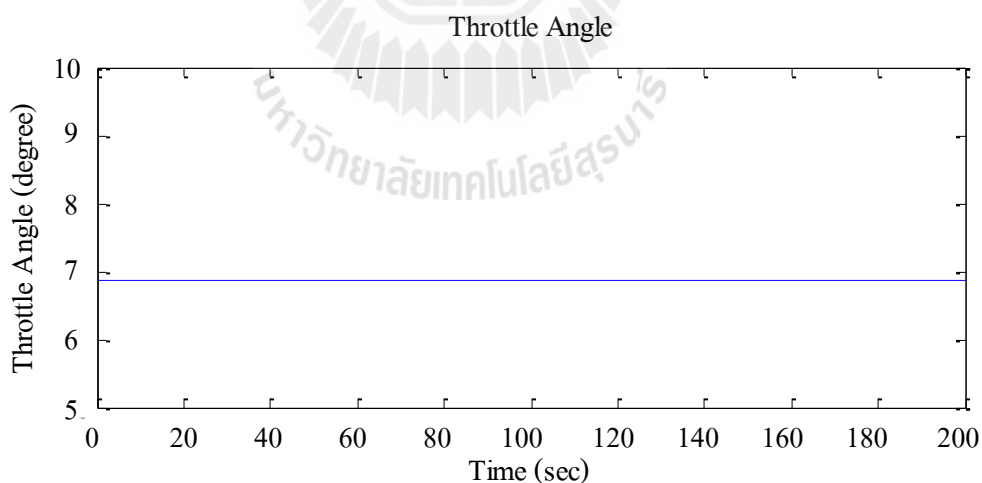
ในกรณีที่ระบบเครื่องยนต์ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอก การทำงานของระบบจำลองถ้าหากทราบค่าแรงบิดจากภายนอกที่กระทำกับระบบจำลอง ผลการตอบสนองของระบบจำลองก็จะมีผลการตอบสนองที่แตกต่างกับผลการตอบสนองจริงในช่วงที่มีแรงบิดรบกวนกับระบบจำลอง แต่ถ้าหากชดเชยค่าแรงบิดที่มารบกวนให้กับระบบ

จำลองได้นั้นจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบจำลองมีลักษณะคล้ายกับผลการตอบสนองจริง ซึ่งในการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 2 มีแรงบิดที่กระทำต่อระบบแบบขั้นบันได ดังรูปที่ 4.12

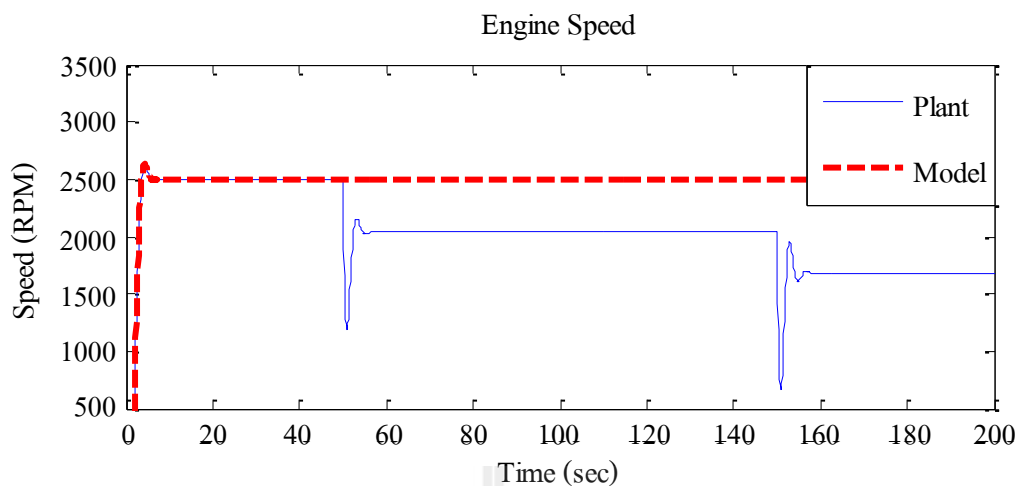


รูปที่ 4.12 แสดงค่า $T_d(t)$ เป็นแบบขั้นบันได สำหรับกรณีที่ 2.1

4.4.1 กรณีที่ 2.1 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 2500 RPM

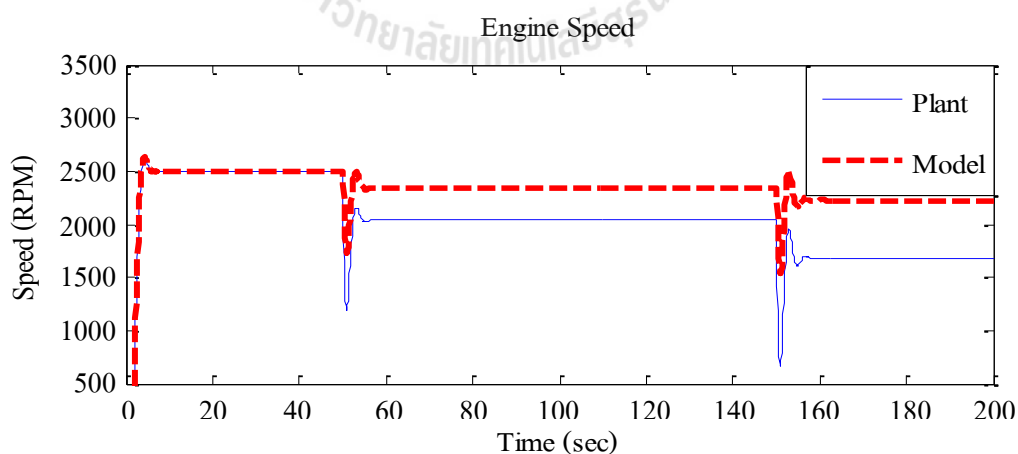


รูปที่ 4.13 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1



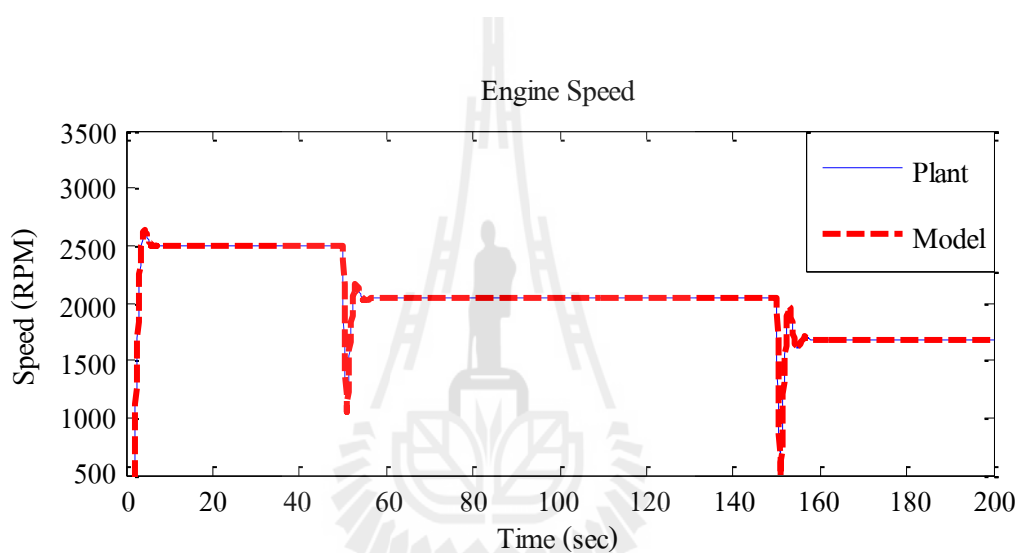
รูปที่ 4.14 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าความเร็วรอบ โดยระบบจำลองนั้นไม่มีตัวสังเกตและไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามากระทำต่อระบบจริงในส่วนของความเร็วรอบของระบบจำลองนั้นจะแตกต่างกับความเร็วรอบของระบบจริง เนื่องจากระบบจำลองนั้นไม่รู้ค่า และไม่สามารถชดเชยค่าแรงบิดที่เข้ามากระทำกับระบบจำลองทำให้มีผลการตอบสนองในส่วนของความเร็วรอบผิดพลาด แต่ค่าความเร็วรอบของระบบจำลองยังคงมีลักษณะคล้ายกับองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อ ซึ่งองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อแสดงดังรูปที่ 4.13



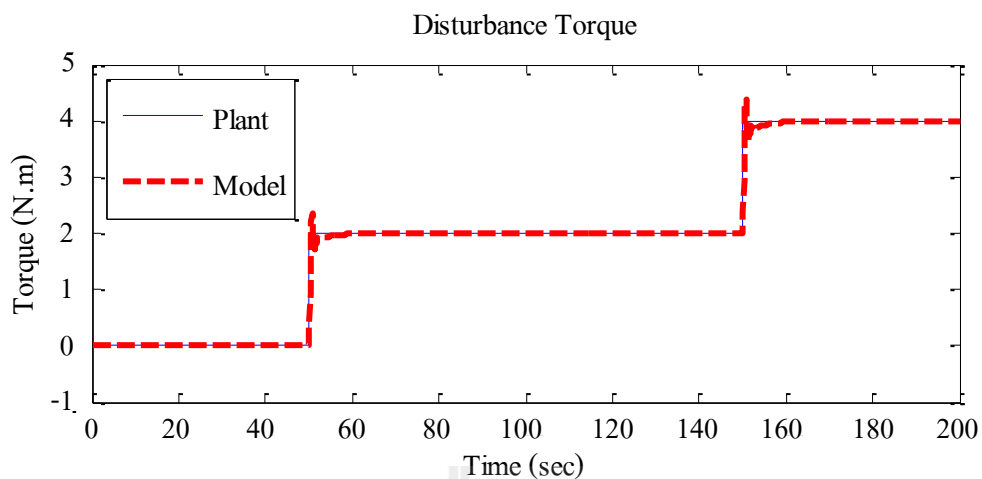
รูปที่ 4.15 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกต)

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าความเร็วรอบ โดยระบบจำลองนั้นมีตัวสังเกตแต่ไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้น ลักษณะความเร็วรอบของระบบจำลองนั้นมีลักษณะคล้ายผลการตอบสนองของระบบจริงในช่วงที่ถูกแรงบิดภายนอกมากระทำ เนื่องจากระบบจำลองนั้นได้เพิ่มตัวสังเกตเข้ามาในระบบจำลองโดยหน้าที่ของตัวสังเกตนั้นจะทำหน้าที่ประมาณค่าตัวแปรสเตตภายในระบบเพื่อให้ลดค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุต ดังนั้นผลของความเร็วรอบของระบบจำลองจึงมีลักษณะที่คล้ายกับความเร็วรอบของระบบจริงโดยมีแรงรบกวน แต่ผลความเร็วรอบที่มีลักษณะคล้ายกับระบบจริงก็ยังคงมีความผิดพลาดอยู่เนื่องจากระบบยังไม่รู้ค่าที่แรงบิดรบกวนที่เข้ามากระทำกับระบบ

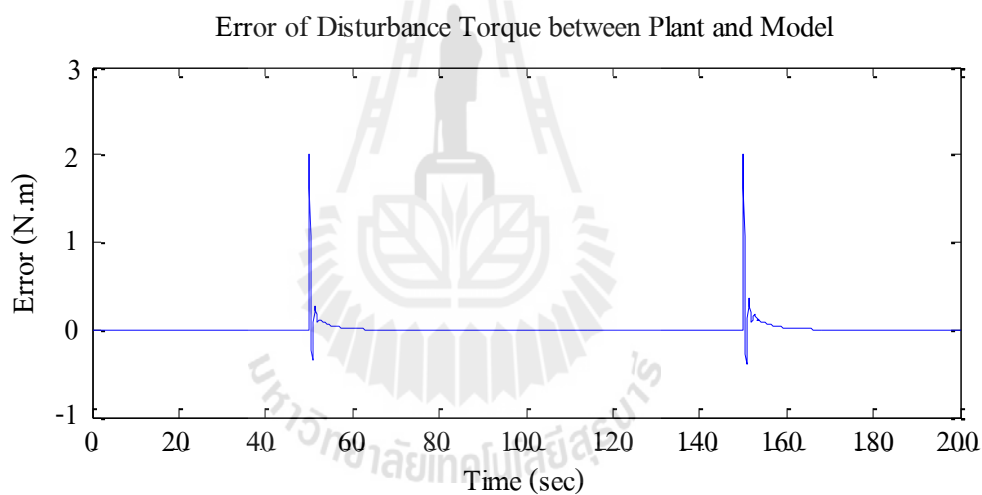


รูปที่ 4.16 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

จากรูปที่ 4.16 แสดงค่าความเร็วรอบ โดยระบบจำลองนั้นมีตัวสังเกตและมีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นจะเห็นว่าค่าความเร็วรอบของระบบจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบจริง ซึ่งค่าที่ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.17



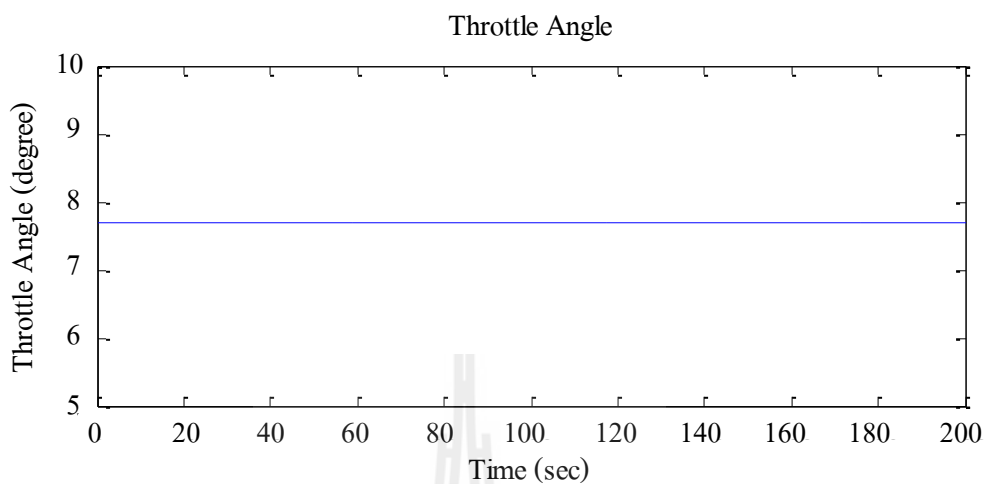
รูปที่ 4.17 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



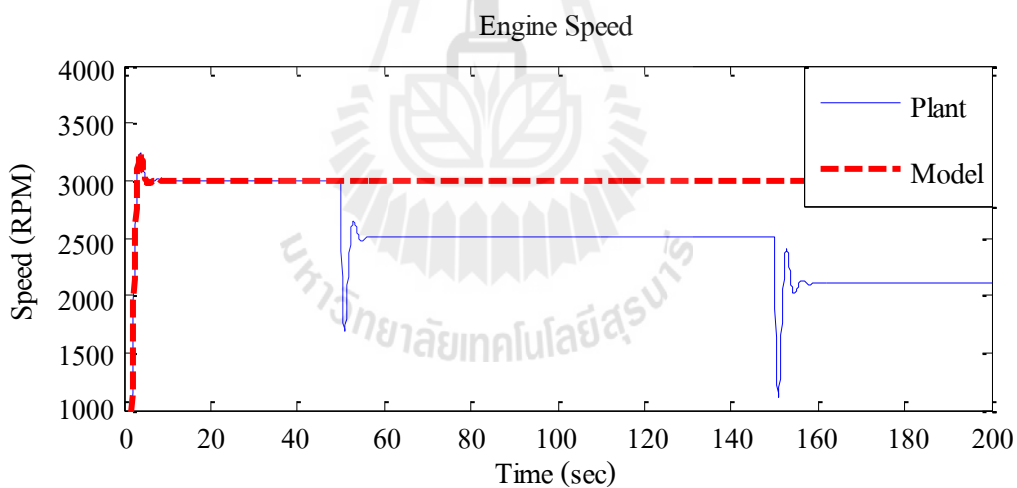
รูปที่ 4.18 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของระบบจำลองที่ได้ทำการประมาณ
เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นเล็กน้อยเฉพาะในช่วงเริ่มมีการให้แรงบิดรบกวนกับระบบจำลอง

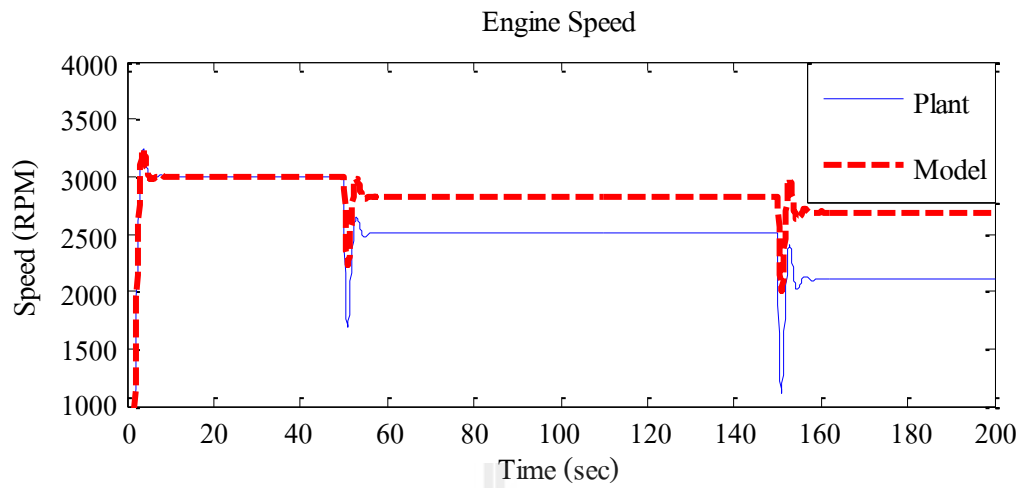
4.4.2 กรณีที่ 2.2 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 3000 RPM



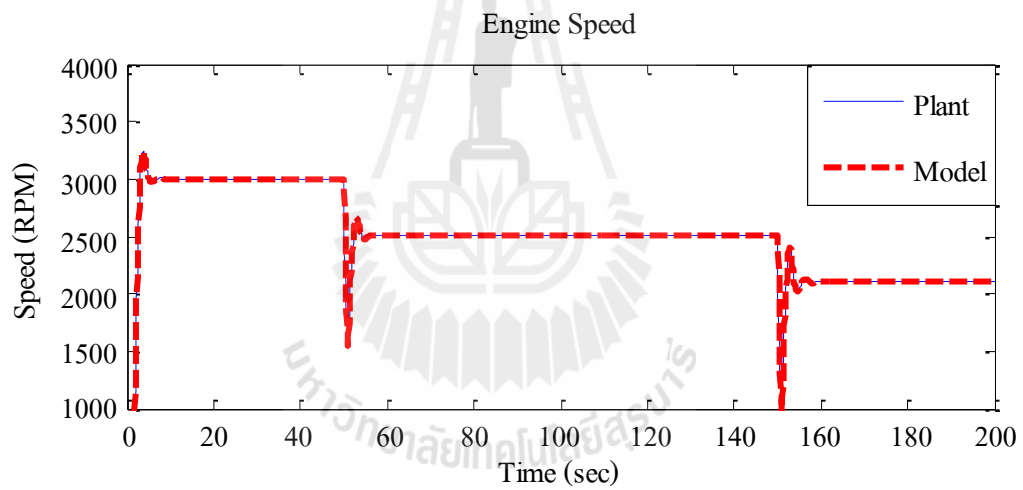
รูปที่ 4.19 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2



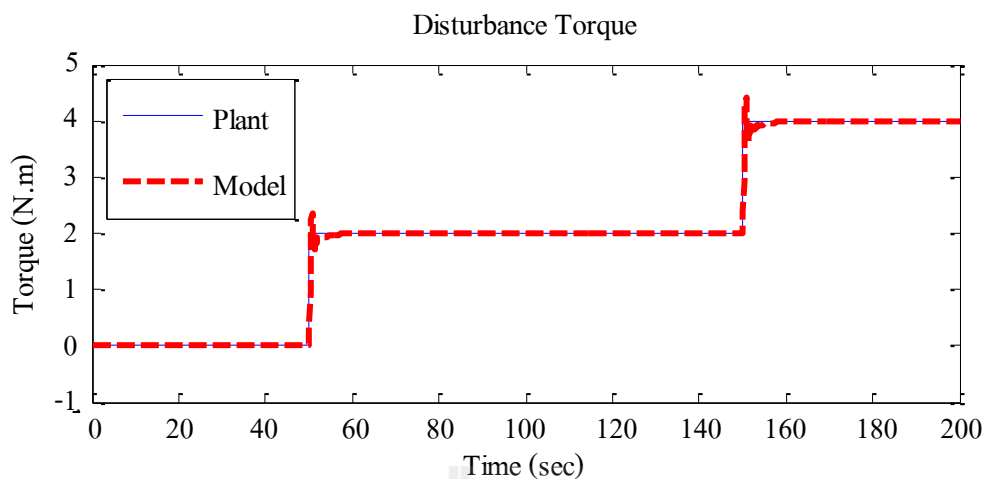
รูปที่ 4.20 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2



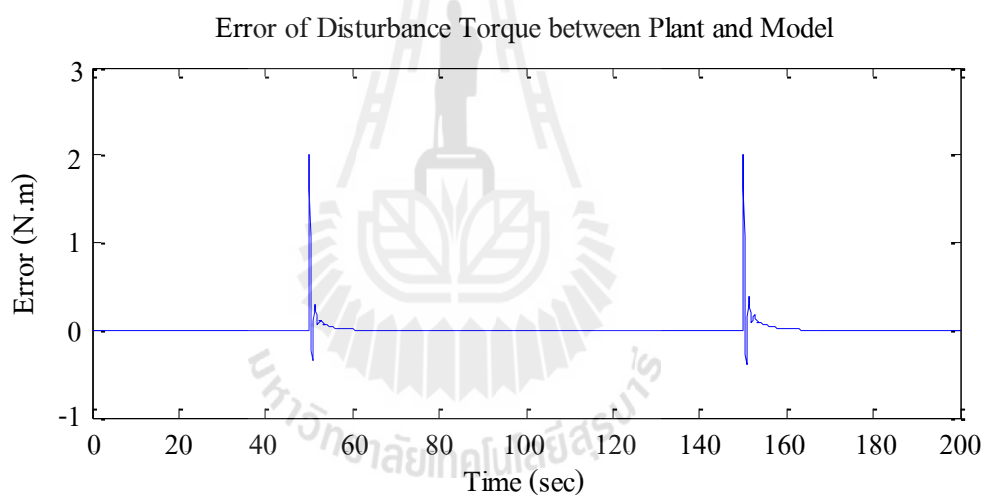
รูปที่ 4.21 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 4.22 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



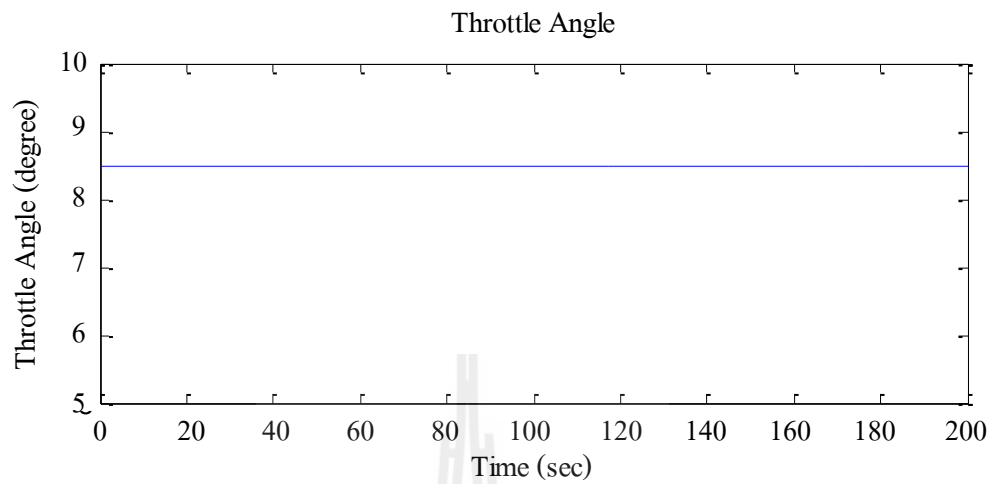
รูปที่ 4.23 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



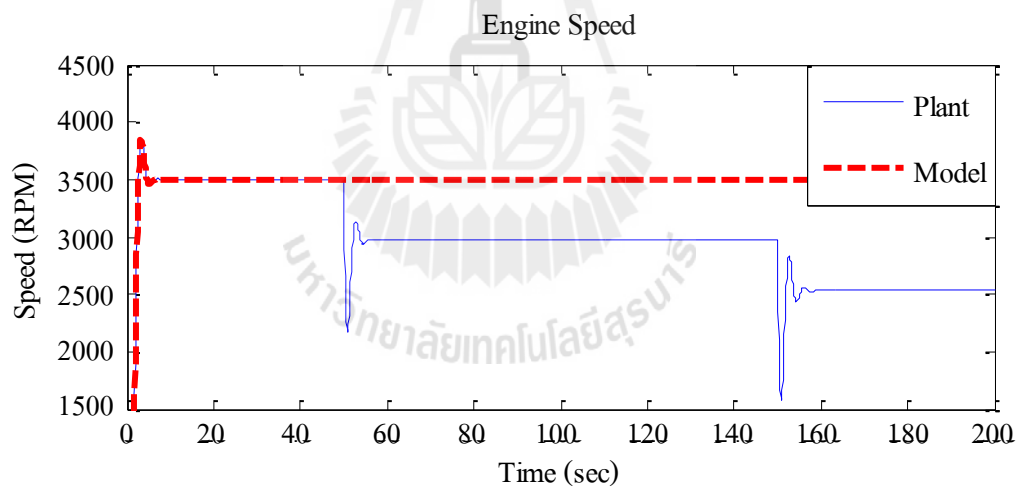
รูปที่ 4.24 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกต และตัวชดเชย)

สำหรับกรณีที่ 2.2 โดยมีค่าองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อแบบคงที่ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งในส่วนของการตอบสนองของระบบจำลองทั้งระบบลงเพียงอย่างเดียว ระบบจำลองที่มีตัวสังเกต และระบบจำลองที่มีตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชยนั้น ให้ผลการตอบสนอง และผลการประมาณค่าแรงบิดรบกวนที่มีลักษณะเดียวกันกับผลการตอบสนองสำหรับกรณีที่ 2.1 เพียงแต่ในกรณีที่ 2.2 นี้จะมีค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์เริ่มต้นที่มีค่ามากกว่ากรณีที่ 2.1

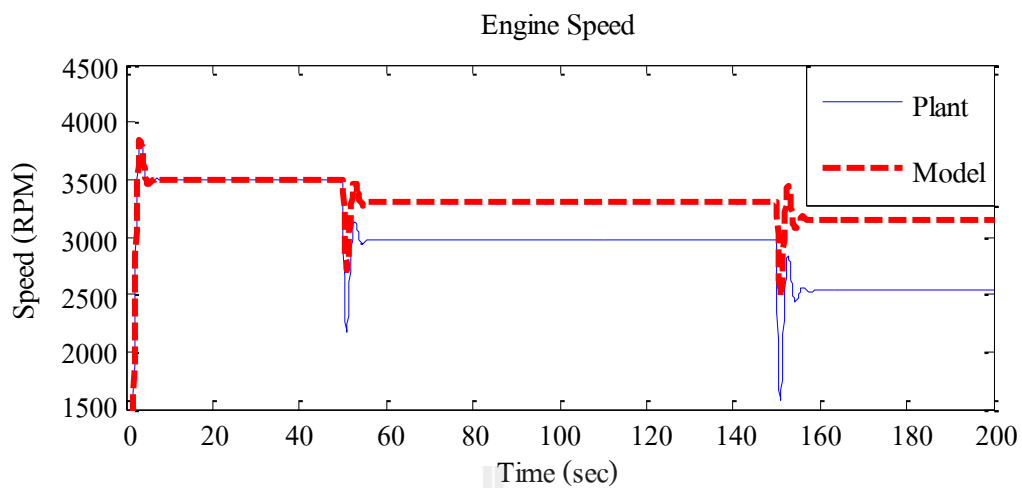
4.4.3 กรณีที่ 2.3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 3500 RPM



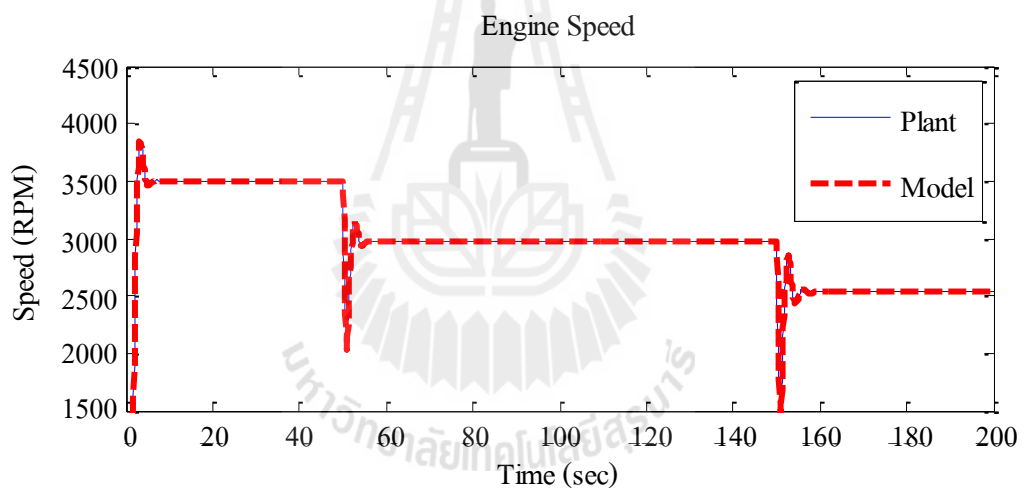
รูปที่ 4.25 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3



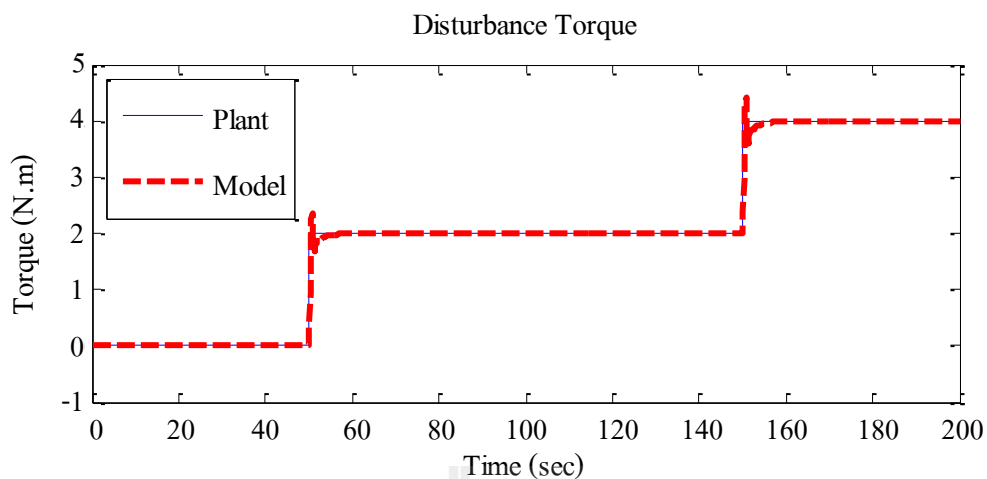
รูปที่ 4.26 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3



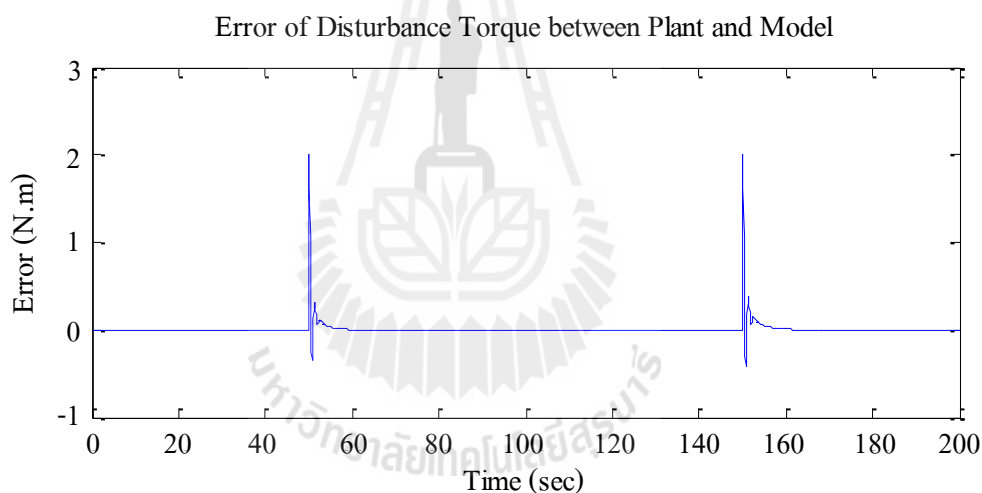
รูปที่ 4.27 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 4.28 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 4.29 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



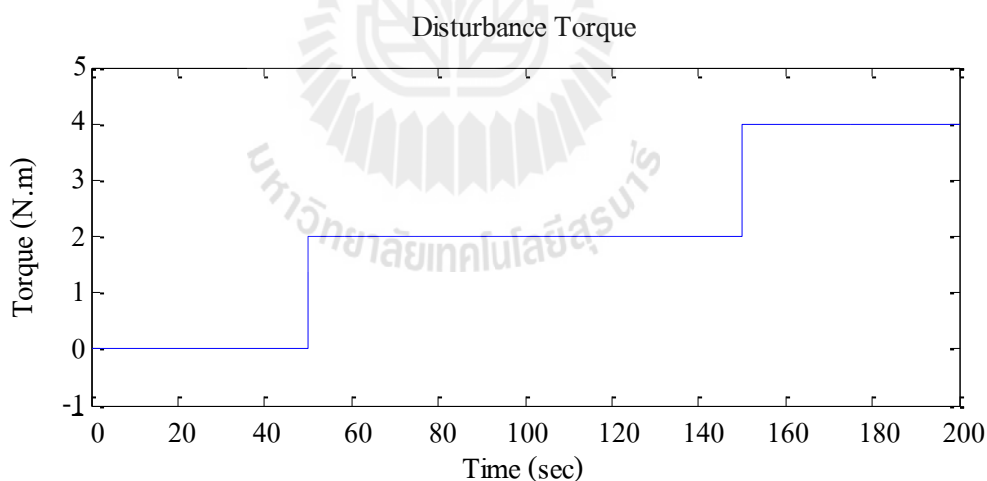
รูปที่ 4.30 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

สำหรับกรณีที่ 2.3 โดยมีค่าองศาของมุมลื่นปีกสี่เส้าแบบคงที่ ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งในส่วนของผลของการตอบสนองของระบบจำลองทั้งระบบลองเพียงอย่างเดียว ระบบจำลองที่มีตัวสังเกต และระบบจำลองที่มีตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชยนั้น ให้ผลการตอบสนอง และผลการประมาณค่าแรงบิดรบกวนที่มีลักษณะเดียวกันกับผลการตอบสนองสำหรับกรณีที่ 2.1 และ 2.2 เพียงแต่ในกรณีที่ 2.3 นี้จะมีค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์เริ่มต้นที่มีค่ามากกว่ากรณีที่ 2.1 และ 2.2

4.5 กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด

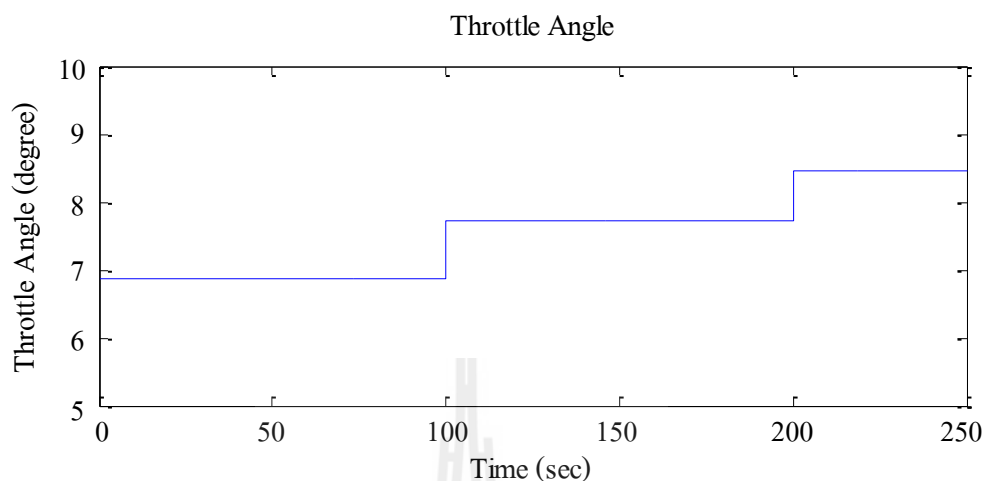
หาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์จุดระเบิดที่ความเร็วรอบคงที่

ในการทดสอบหาแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์โดยไม่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปหรือโปรแกรมของไดนาโมมิเตอร์เพื่อหาค่ากำลังหรือแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ว่ามีค่าแรงบิดของเครื่องยนต์สูงสุดอยู่ที่ความเร็วรอบเท่าใดนั้น จะต้องทดสอบหาแรงบิดที่ความเร็วรอบคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง โดยที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และทำการเพิ่มแรงบิดภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ ซึ่งที่ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์ความเร็วหนึ่งนั้นจะมีค่าแรงบิดหรือค่ากำลังสูงสุดของเครื่องยนต์เพียงค่าเดียว ดังนั้นถ้าต้องการทราบค่าแรงบิดของเครื่องยนต์มีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบเท่าใดนั้น จะต้องทดสอบหาค่าแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบคงที่หลายครั้ง เพื่อนำค่าแรงบิดสูงสุดในแต่ละความเร็วรอบนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ว่ามีค่ามากที่สุดเท่าใด และอยู่ ณ ความเร็วรอบเท่าใด ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 3 นี้ จะมีการปรับองศาของลิ้นปีกผีเสื้อ เพื่อให้ทำให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ในขณะที่มีการเพิ่มแรงบิดรบกวน ซึ่งในการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 3 มีแรงบิดที่รบกวนต่อระบบแบบขั้นบันได ดังรูปที่ 4.31

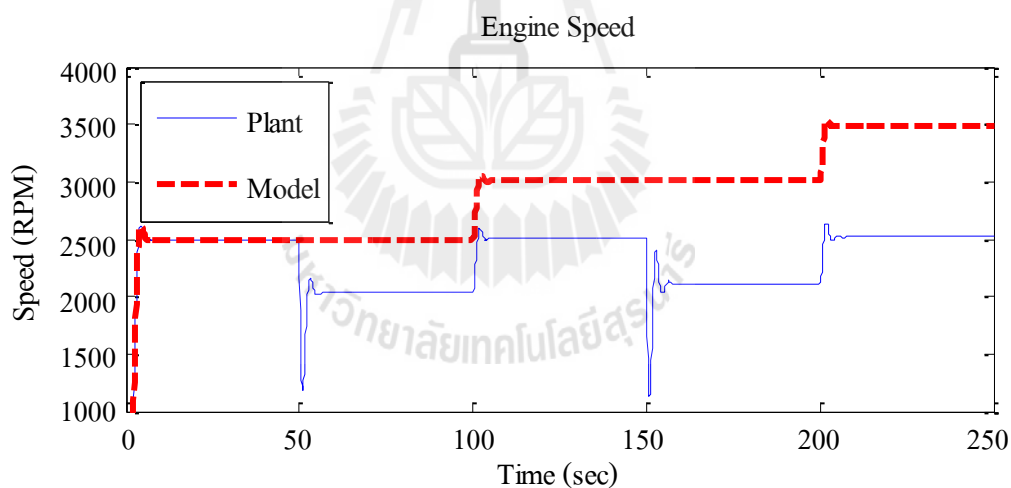


รูปที่ 4.31 แสดงค่า $T_f(t)$ เป็นแบบขั้นบันได สำหรับกรณีที่ 3

4.5.1 กรณีที่ 3.1 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 2500 RPM

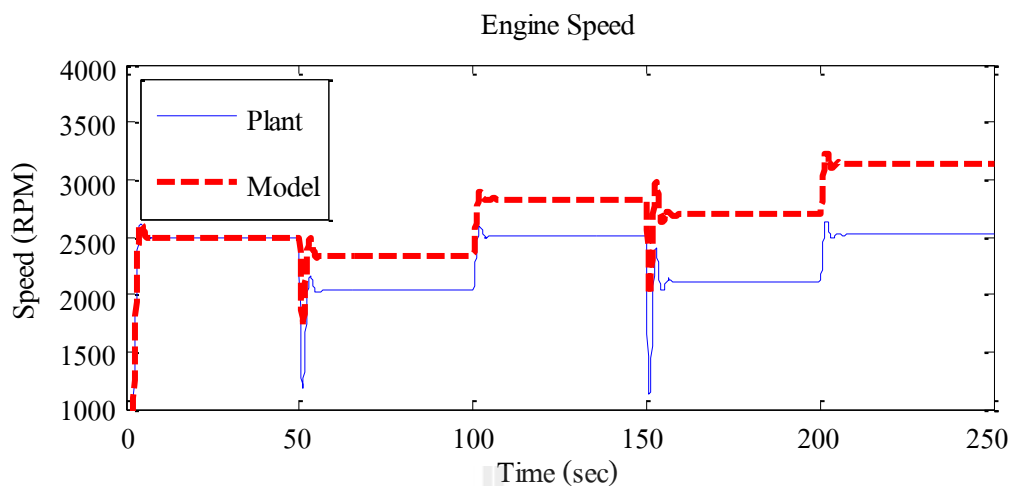


รูปที่ 4.32 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.1



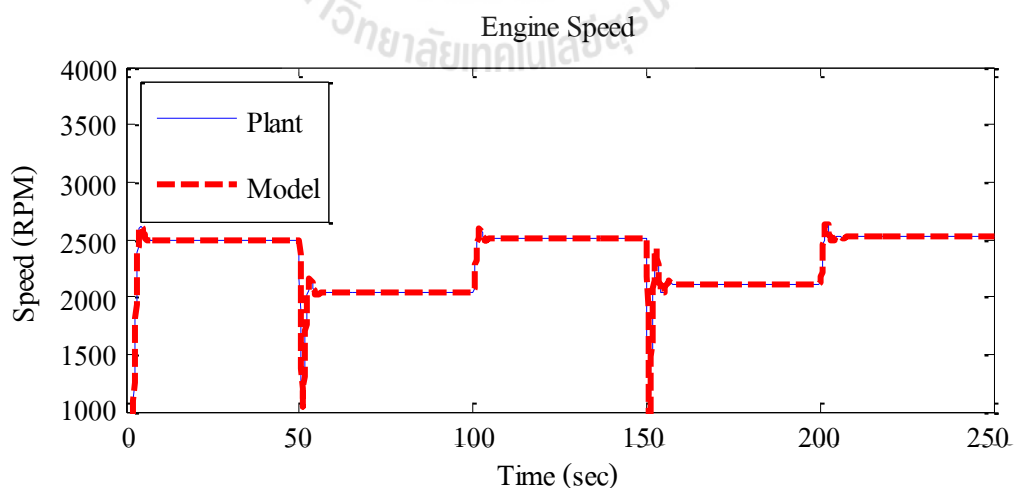
รูปที่ 4.33 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1

จากรูปที่ 4.33 โดยระบบจำลองนั้นไม่มีตัวสังเกตและไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะไม่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะแรงบิดภายนอกมากระทำ เช่นเดียวผลการจำลองระบบในกรณีที่ 2 ซึ่งระบบจำลองนั้นไม่มีตัวสังเกต และไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวแต่ในส่วนของการความเร็วรอบของเครื่องยนต์ของระบบจำลองนั้นจะยังคงสามารถเปลี่ยนแปลงตามลักษณะคล้ายกับของสายของมุลีนปีกผีเสื้อเช่นเดียวกับกรณีที่ 1



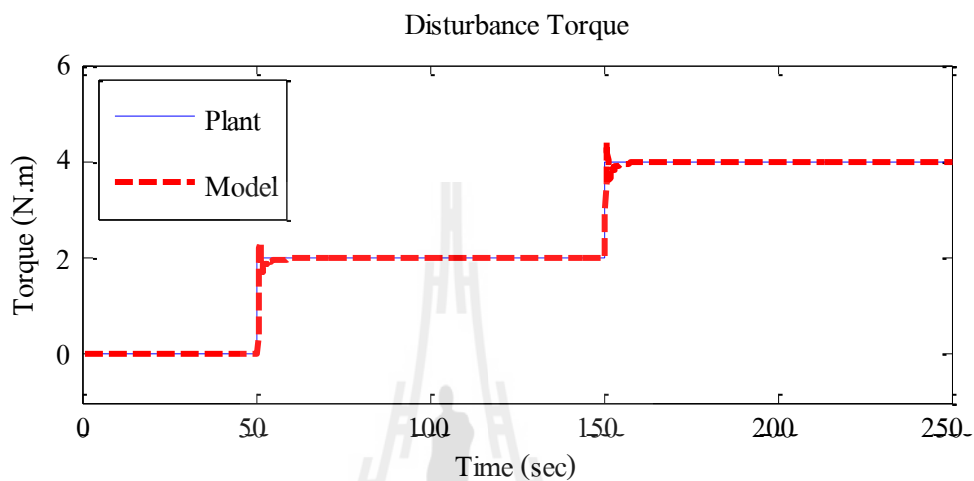
รูปที่ 4.34 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกต)

จากรูปที่ 4.34 โดยระบบจำลองนั้นมีตัวสังเกตแต่ไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้น แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะมีเปลี่ยนแปลงตามลักษณะแรงบิดภายนอกในขณะที่แรงบิดมากระทำเช่นเดียวผลการจำลองระบบในกรณีที่ 2 ซึ่งระบบจำลองนั้นมีตัวสังเกตแต่ไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ สำหรับความเร็วรอบของระบบจำลองนั้นถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีแรงบิดมากระทำแต่ยังเห็นได้ถึงความแตกต่างจากความเร็วรอบของระบบจริง ซึ่งเนื่องมาจากระบบจำลองนั้นยังไม่รู้ค่าแรงบิดที่เข้ามากระทำต่อระบบจำลอง

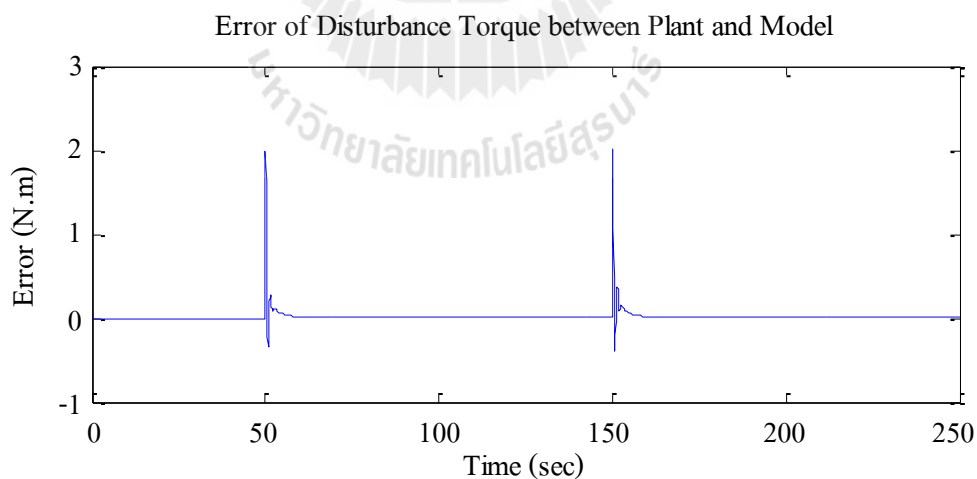


รูปที่ 4.35 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

จากรูปที่ 4.35 โดยระบบจำลองนั้นมีตัวสังเกตและมีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้น จะเห็นว่าค่าความเร็วรอบของระบบจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบจริง ซึ่งเป็นผลมาจากระบบจำลองนั้นได้มีตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเทภายในระบบ และได้มีการชดเชยค่าแรงบิดภายนอกที่ไม่รู้ค่าโดยตัวชดเชย ซึ่งค่าที่ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.36



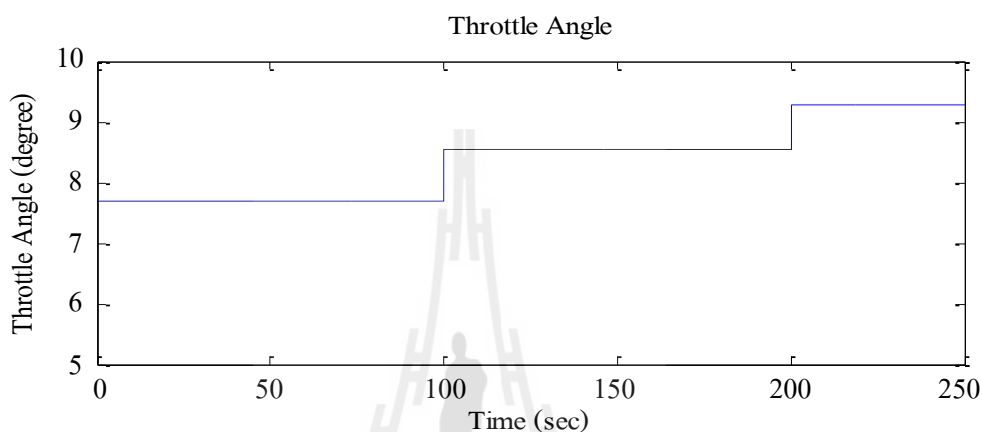
รูปที่ 4.36 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



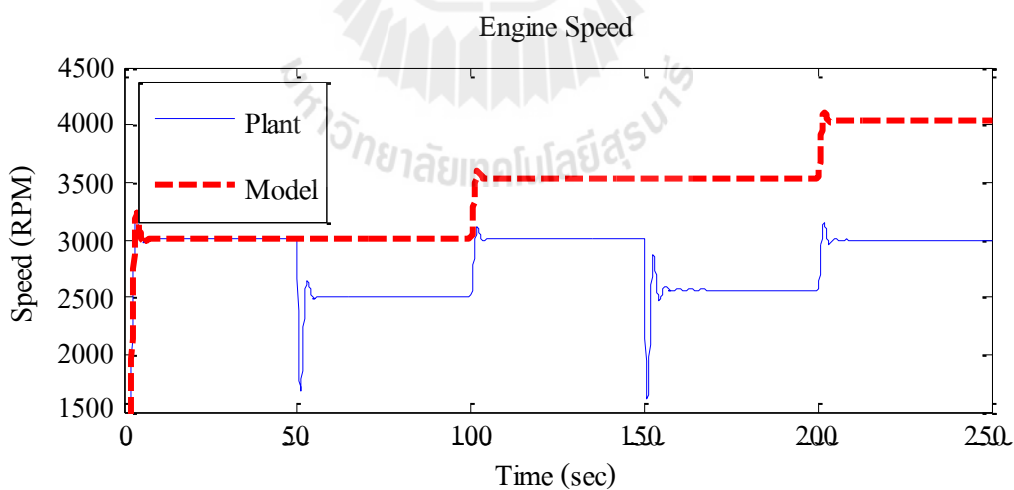
รูปที่ 4.37 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบจำลองสำหรับกรณีที่ 3.1 นั้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบจำลองมีตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ แม้ว่าจะทำการปรับองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อหรือมีแรงบิดรบกวนอย่างไรนั้น ระบบจำลองจะมีผลการตอบสนองใกล้เคียงกับระบบจริง

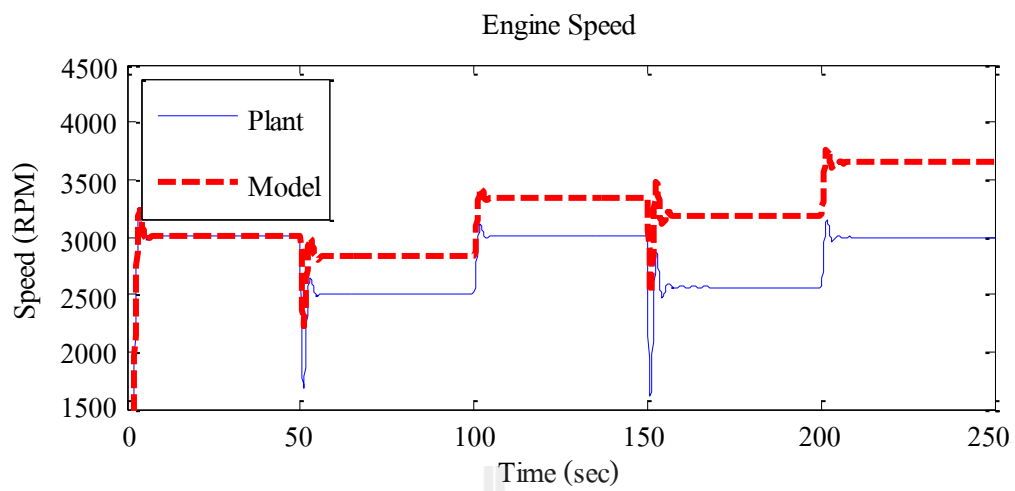
4.5.2 กรณีที่ 3.2 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 3000 RPM



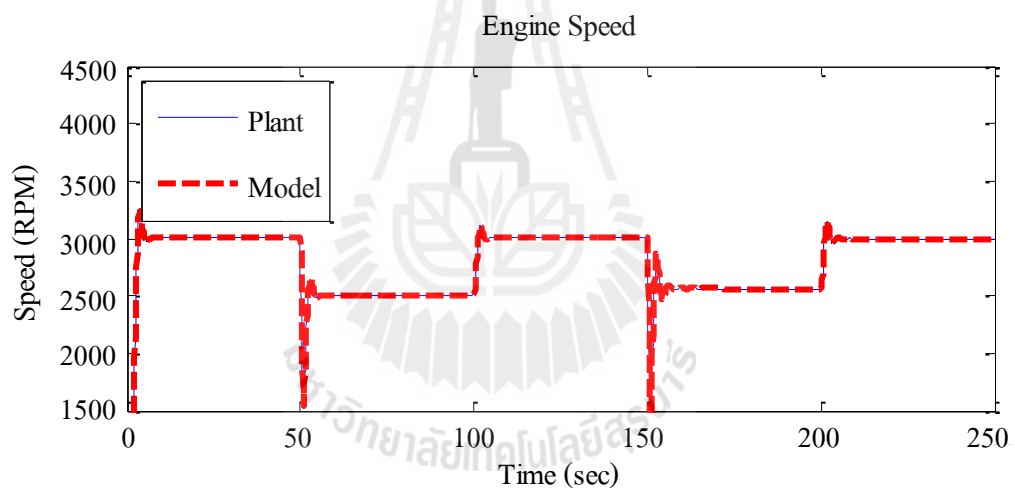
รูปที่ 4.38 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.2



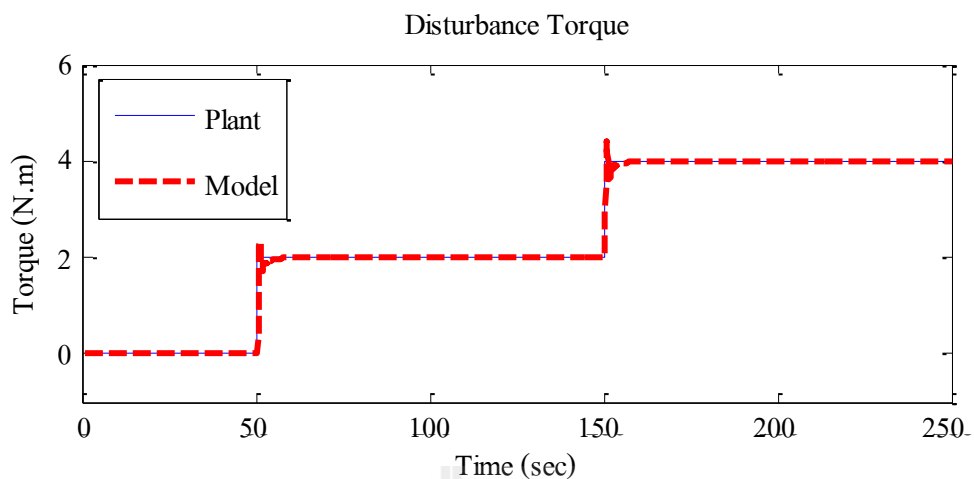
รูปที่ 4.39 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2



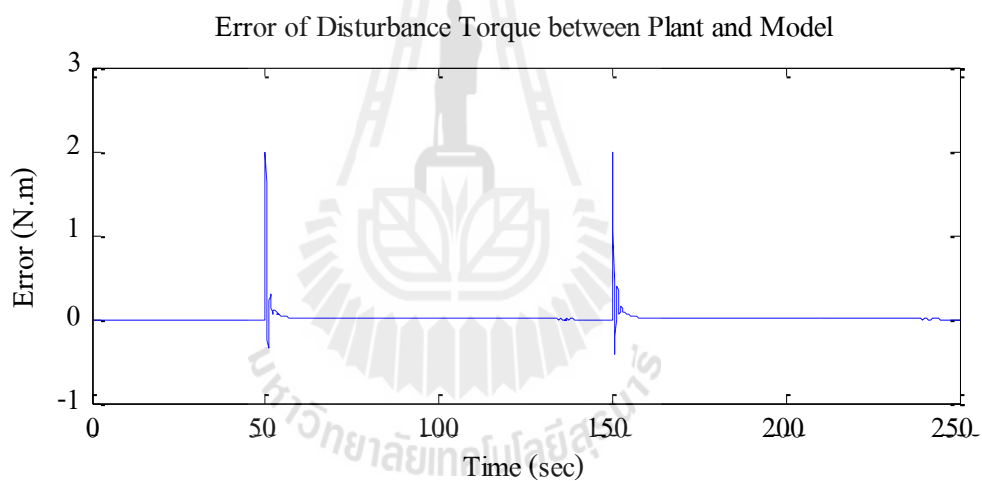
รูปที่ 4.40 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 4.41 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



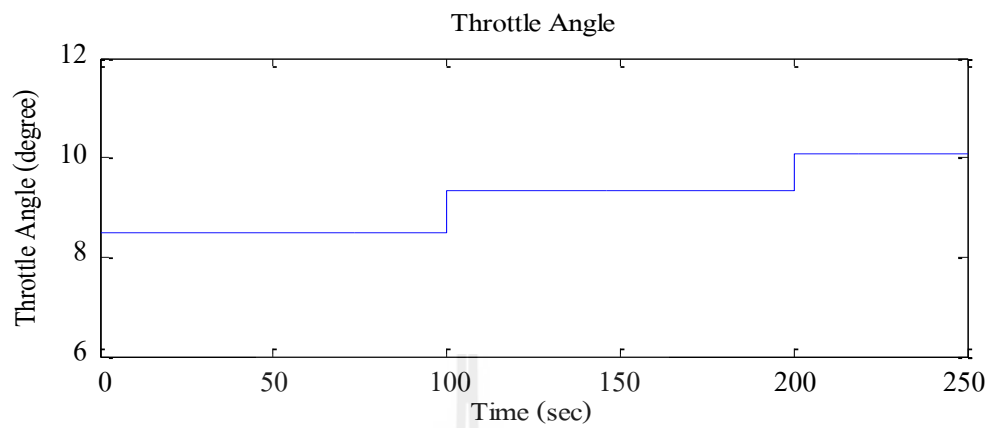
รูปที่ 4.42 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



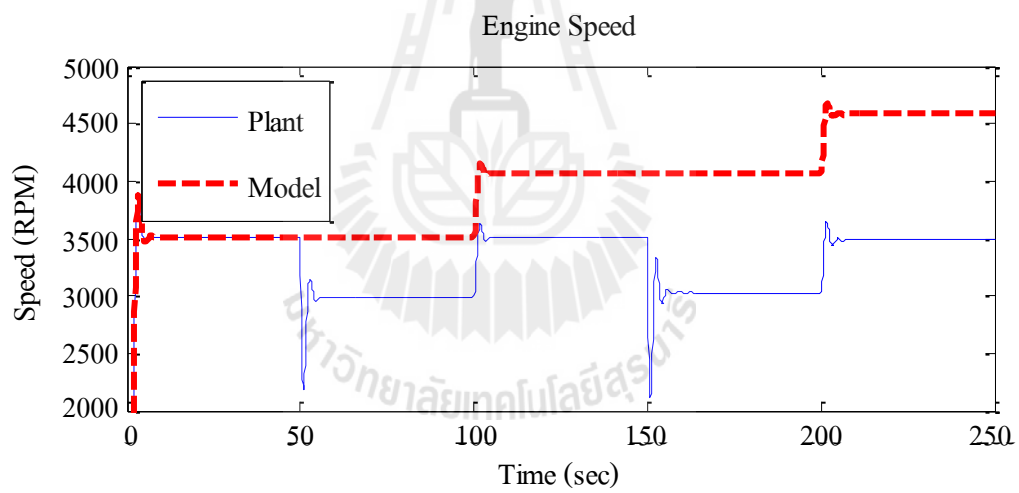
รูปที่ 4.43 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบจำลองสำหรับกรณีที่ 3.2 นั้นระบบจำลองที่ไม่มีตัวสังเกตและไม่มีตัวชดเชย ระบบจำลองที่มีตัวสังเกตแต่ไม่มีตัวชดเชย และระบบจำลองที่มีตัวสังเกตและมีตัวชดเชยนั้น มีผลการจำลองคล้ายกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบจำลองสำหรับกรณีที่ 3.1

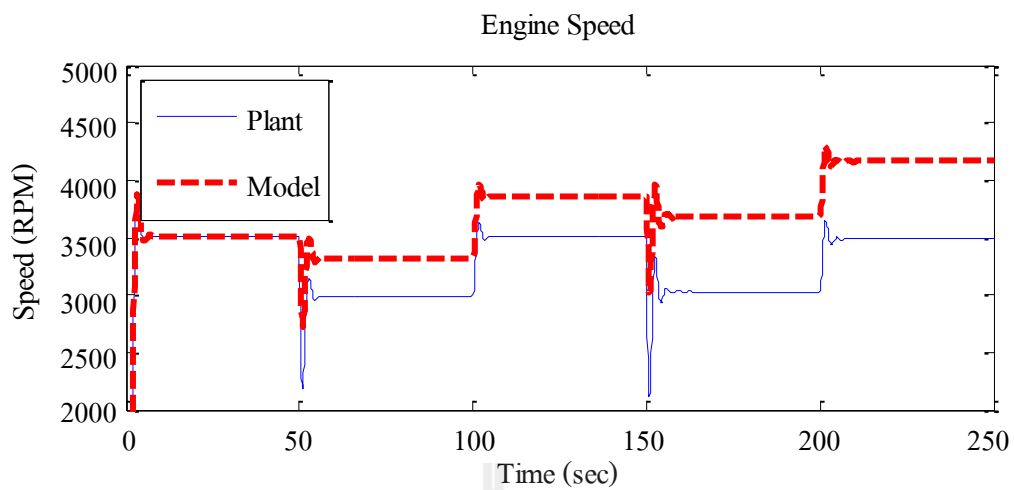
4.5.3 กรณีที่ 3.3 ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 3500 RPM



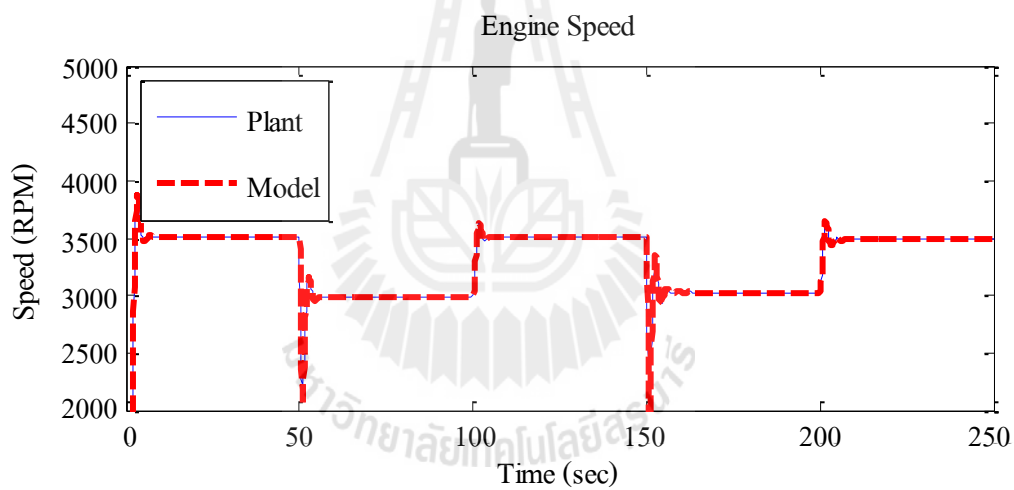
รูปที่ 4.44 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.3



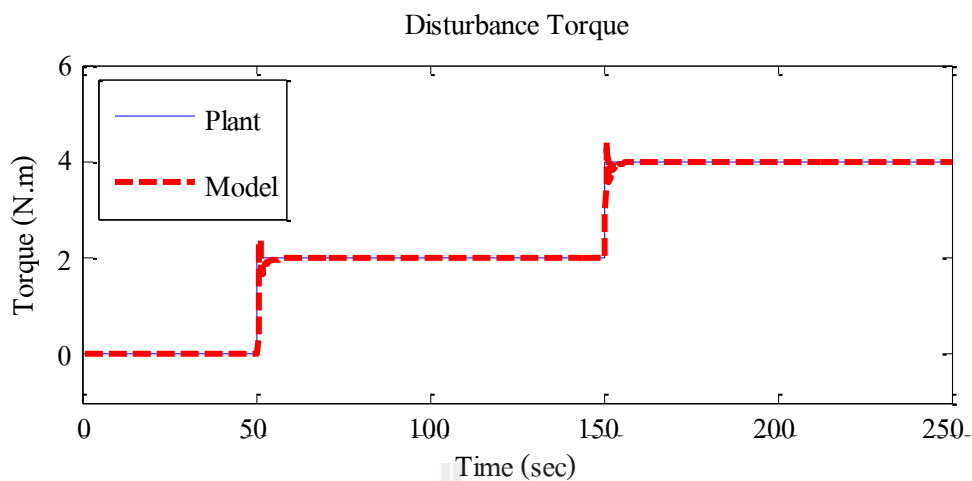
รูปที่ 4.45 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3



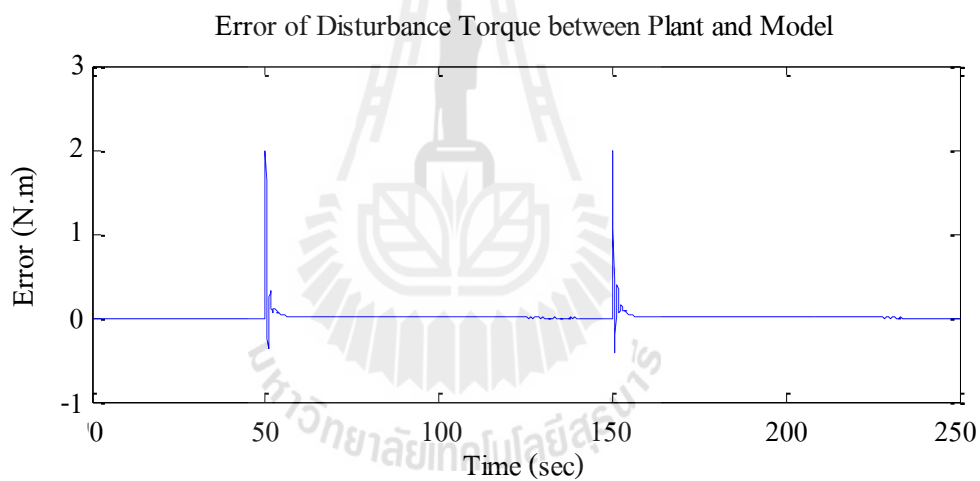
รูปที่ 4.46 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 4.47 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 4.48 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 4.49 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบจำลองสำหรับกรณีที่ 3.3 นั้นระบบจำลองที่ไม่มีตัวสังเกตและไม่มีตัวชดเชย ระบบจำลองที่มีตัวสังเกตแต่ไม่มีตัวชดเชย และระบบจำลองที่มีตัวสังเกตและมีตัวชดเชย มีผลการจำลองคล้ายกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบจำลองสำหรับกรณีที่ 3.1 และ 3.2

4.6 สรุป

จากผลการระบุเอกลักษณ์ของระบบนั้น ทำให้ได้ระบบจำลองที่มีผลการตอบสนองในส่วน
ของความเร็วย้อนมีความคล้ายกับระบบเครื่องยนต์จริง ซึ่งทำให้สามารถนำระบบจำลองนั้นไป
ประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าแรงบิดหรือไปจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ของระบบเครื่องยนต์ได้

จากผลการตอบสนองของการจำลองสถานการณ์ของระบบจำลองของเครื่องยนต์ที่มีตัว
สังเกตและตัวชดเชยนั้น มีผลการตอบสนอง และมีแนวโน้มการตอบสนองที่มีลักษณะที่คล้ายกับ
ระบบจริง และสามารถประมาณค่าความเร็วย้อนของเครื่องยนต์มีค่าใกล้เคียงกับค่าของระบบจริง
ดังนั้นการจำลองสถานการณ์ของระบบการจำลองนี้สามารถนำไปวิเคราะห์สร้างตัวสังเกต และ
ประมาณค่าแรงบิดรบกวนหรือประมาณหาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ได้



บทที่ 5

การทดลองการทำงานของระบบเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด โดยวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้

5.1 เครื่องมือทดลอง

การทดลองนี้ใช้เครื่องมือคือ ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 1 สูบแบบหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีระบบหลักเป็นเครื่องยนต์เบนซิน 1 สูบแบบหัวฉีด โดยมีชุดสร้างแรงดันแรงบิดของเครื่องยนต์โดยใช้หลักการของแรงเสียดทาน และมีเซนเซอร์วัดแรงบิดอยู่ระหว่างชุดสร้างแรงดันแรงบิดกับเครื่องยนต์ การเก็บข้อมูลของค่าของมุมลิ้นปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะใช้ชุดเชื่อมต่อสัญญาณจากเครื่องยนต์สื่อสารกับคอมพิวเตอร์ คือ Data Acquisition (DAQ) NI USB – 6008 แสดงดังรูปที่ 5.2 และใช้โปรแกรม LabView แสดงข้อมูลและเก็บข้อมูลขององศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ในส่วนของข้อมูลแรงบิดของเครื่องยนต์นั้นจะใช้เซนเซอร์วัดแรงบิด HBM T5 แสดงดังรูปที่ 5.3 เป็นตัววัดค่าแรงบิด และใช้ชุดเชื่อมต่อสัญญาณจากเซนเซอร์สื่อสารกับคอมพิวเตอร์ คือ Data Acquisition (DAQ) HBM Spider8 แสดงดังรูปที่ 5.4 และใช้โปรแกรม catmanEASY ในการเก็บข้อมูลแรงบิด



รูปที่ 5.1 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์เบนซิน 1 สูบแบบหัวฉีด



รูปที่ 5.2 Data acquisition NI USB - 6008

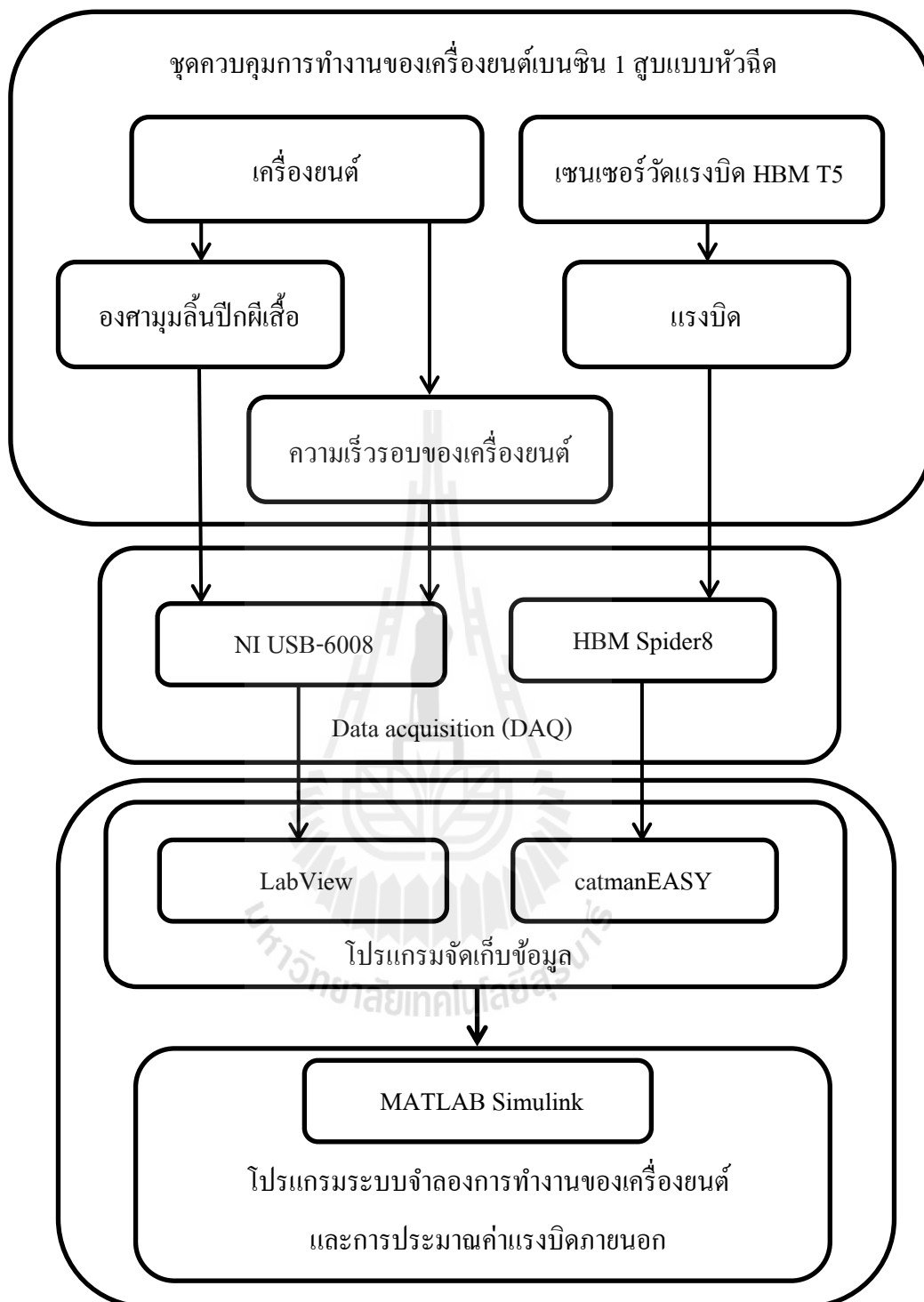


รูปที่ 5.3 เซนเซอร์วัดแรงบิด HBM T5



รูปที่ 5.4 Data acquisition HBM Spider8

เมื่อได้ข้อมูลของมุมลื่นปีกผีเสื้อ, ความเร็วรอบของเครื่องยนต์และค่าแรงบิดเรียบร้อยแล้ว ต่อมานำข้อมูลที่ได้มาใช้กับแบบจำลองที่สร้างขึ้นซึ่งในแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นใช้โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink เพื่อทำการทดสอบระบบจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ และการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เครื่องยนต์ได้รับ โดยรูปที่ 5.5 จะแสดงแผนภาพการจัดการข้อมูลจากชุดทดลอง



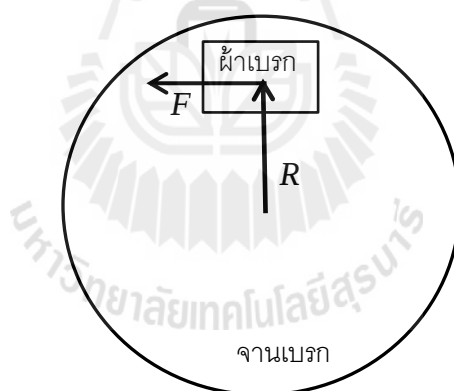
รูปที่ 5.5 แผนภาพการจัดการข้อมูลจากชุดทดลอง

5.2 การวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกระทำกับระบบ

ในทางปฏิบัติการหาแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับเครื่องยนต์ถ้าไม่ใช่ชุดเซนเซอร์ในการวัดค่าแรงบิดนั้นจะต้องทำการคำนวณจากลักษณะการใส่แรงบิดให้กับเครื่องยนต์ ซึ่งสำหรับชุดทดสอบเครื่องยนต์ 1 สูบแบบหัวฉีดนี้สามารถทำได้โดยการการวัดค่าแรงกดหรือวัดแรงดันในการกดผ้าเบรก แล้วนำค่าแรงกดหรือแรงดันในการกดนั้นมาคำนวณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับเครื่องยนต์ได้ (ความดันของน้ำมันเบรกนั้นสามารถอ่านค่าได้จากมาตรวัดแรงดันน้ำมันเบรกจากชุดทดสอบ) สามารถหาค่าแรงบิดจากแรงเสียดทานของผ้าเบรกจากสมการ

$$T_l = F.R \quad (5.1)$$

เมื่อ	T_l	=	แรงบิดที่ได้จากแรงเสียดทานของผ้าเบรก ($N.m$)
	F	=	แรงต้านการหมุนที่ได้จากผ้าเบรก (N)
	R	=	รัศมีของจานเบรกจากจุดศูนย์กลางจานเบรกถึงกึ่งกลางผ้าเบรก (m)



รูปที่ 5.6 แสดงแรงต้านการหมุนที่ได้จากผ้าเบรก

ซึ่งรัศมี R จากชุดทดลองได้จากการวัดซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.0885 m และสามารถหาค่าแรงต้านการหมุนจากผ้าเบรกได้จากสมการ

$$F = \mu x N \quad (5.2)$$

เมื่อ μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรก
 N = แรงกดของผ้าเบรก (N)

โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกจะแบ่งตามชนิดของผ้าเบรกซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต่างกัน ชนิดแบบทั่วไป (General) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกประมาณ 0.3 – 0.45 และชนิดดีที่สุด (Ultimate) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกประมาณ 0.45 – 0.55 และแรงกดของผ้าเบรกสามารถหาได้จากสมการ

$$N = 9.81(A \times P_{gage}) \quad (5.3)$$

เมื่อ A = พื้นที่ของผ้าเบรก (cm^2)
 P_{gage} = แรงกดของผ้าเบรก (kg / cm^2)

ซึ่งพื้นที่ของผ้าเบรกได้จากการวัดมีค่าเท่ากับ 12.42 cm^2 เมื่อนำสมการที่ (5.1) และ (5.2) แทนในสมการที่ (5.1) จะได้

$$T_l = 10.7828577(P_{gage} \times \mu) \quad (5.4)$$

สำหรับค่ามาตรวัดหน่วยเป็น PSI เมื่อ 1 PSI เท่ากับ $0.0703 \frac{kg}{cm^2}$ จะได้ค่าแรงบิดดังสมการที่ (5.5)

$$T_l = 0.758034896(P_{gage} \times \mu) \quad (5.5)$$

จากการทดลองวัดค่าแรงบิดจากการคำนวณเทียบกับค่าแรงบิดจากเซนเซอร์วัดแรงบิดที่กระทำกับเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ 2500 RPM และใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรก 0.3 ได้ผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลค่าแรงบิดจากการคำนวณและค่าแรงบิดจากเซนเซอร์วัดแรงบิด

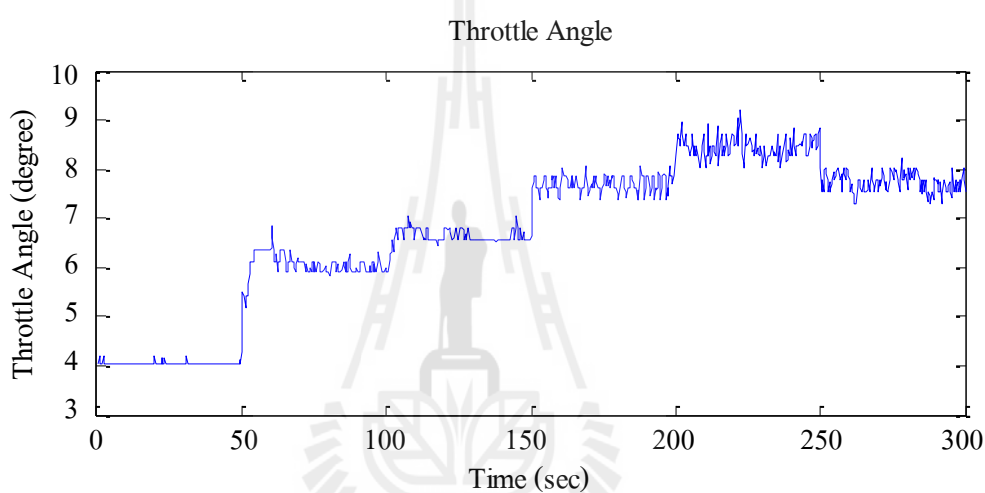
ค่าแรงบิดจากเซนเซอร์ (N.m)	ค่าจากมาตรวัด (PSI)	ค่าแรงบิดจากการคำนวณ (N.m)
1	5	1.07281
1.5	7	1.50193
2	10	2.14562
2.5	10.5	2.25290
3	11	2.36018
3.5	13	2.78931
4	13.5	2.89659
4.5	14	3.00387
5	14.5	3.11115

จากตารางที่ 5.1 ผลค่าแรงบิดจะเห็นในช่วงค่าแรงบิดจากเซนเซอร์ 1 - 2 N.m นั้นค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงบิดจากเซนเซอร์ และช่วงค่าแรงบิดจากเซนเซอร์ 2.5 – 5 N.m ค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณนั้นมีน้อยกว่ากับค่าแรงบิดจากเซนเซอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากการทดลองทำการใส่ค่าแรงบิดเพิ่มเรื่อย ๆ โดยไม่หยุดการทดลองทำให้อุณหภูมิของผ้าเบรกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อดูจากผลแรงบิดของเซนเซอร์ที่มีค่าสูงขึ้น แต่ส่วนค่าแรงบิดจากการคำนวณนั้นเพิ่มขึ้นไม่มาก แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรคนั้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลของอุณหภูมิของผ้าเบรกมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลในการเก็บข้อมูลจากการทดลองทำให้ลักษณะแรงบิดที่อ่านจากเซนเซอร์วัดแรงบิดมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นแบบลาดเอียงเมื่อทำการใส่ค่าแรงบิดให้กับเครื่องยนต์เป็นเวลานาน และผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรคนั้นเป็นไปในแนวทางเดียวกับการศึกษางานวิจัยของผู้อื่น คือ เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกจะสูงขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิสูงมาก จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกจะลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการวัดค่าแรงบิดจากเซนเซอร์เพียงอย่างเดียว เพื่อวัดค่าแรงบิดและตัดปัญหาผลกระทบดังกล่าว

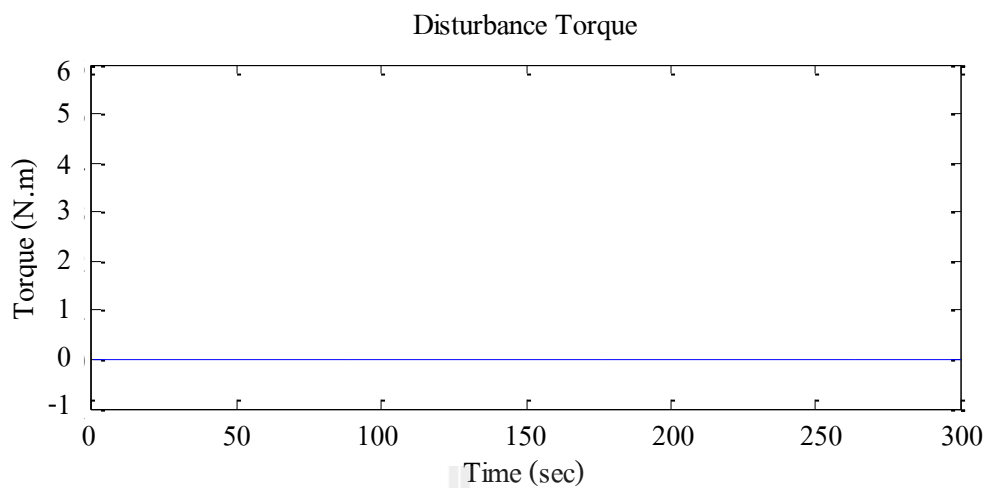
เนื่องจากในบทที่ 4 ได้ทำการจำลองสถานการณ์ของระบบของเครื่องยนต์ ดังนั้นในบทนี้เป็นการแสดงผลการทดลองการประมาณค่าแรงบิดรอบวงที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอกของเครื่องยนต์จุดระเบิดที่ใช้ตัวสังเกตร่วมกับการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้ โดยจะแบ่งพิจารณาเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกับบทที่ 4 คือ

5.3 กรณีที่ 1 การทดลองการจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด องศาของมุลิ้นปีกผีเสื้อเปลี่ยนแปลงโดยไม่มีแรงบิดภายนอก

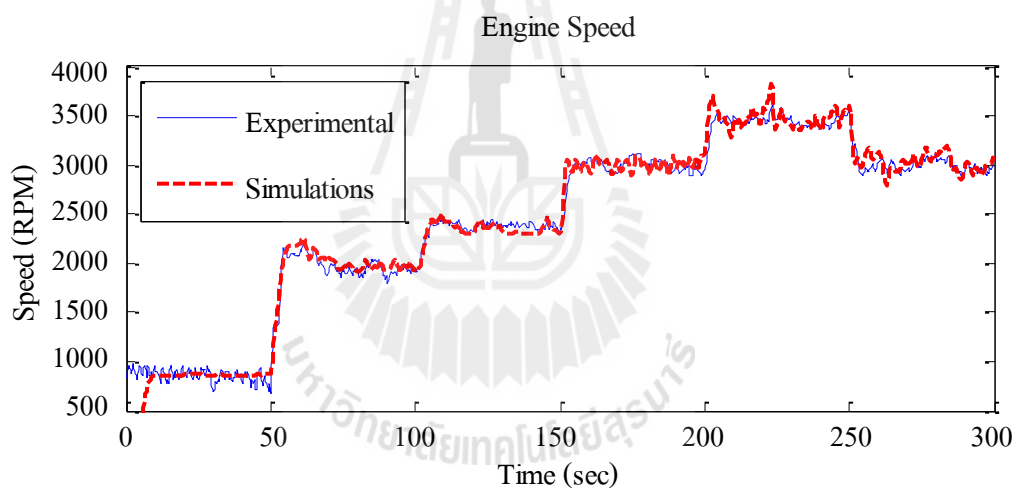
ในกรณีที่ 1 นี้จะศึกษาผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีแรงบิดรบกวน ขณะทำการเปลี่ยนแปลงองศาของมุลิ้นปีกผีเสื้อ ผลการตอบสนองของระบบจำลองจะมีผลการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และระบบจำลองที่ได้จากการระบบเอกลักษณ์ของระบบนั้นมีความสอดคล้องกับระบบจริงหรือไม่ และคุณลักษณะการทำงานของตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ เมื่อทำการทดสอบกับข้อมูลจริง



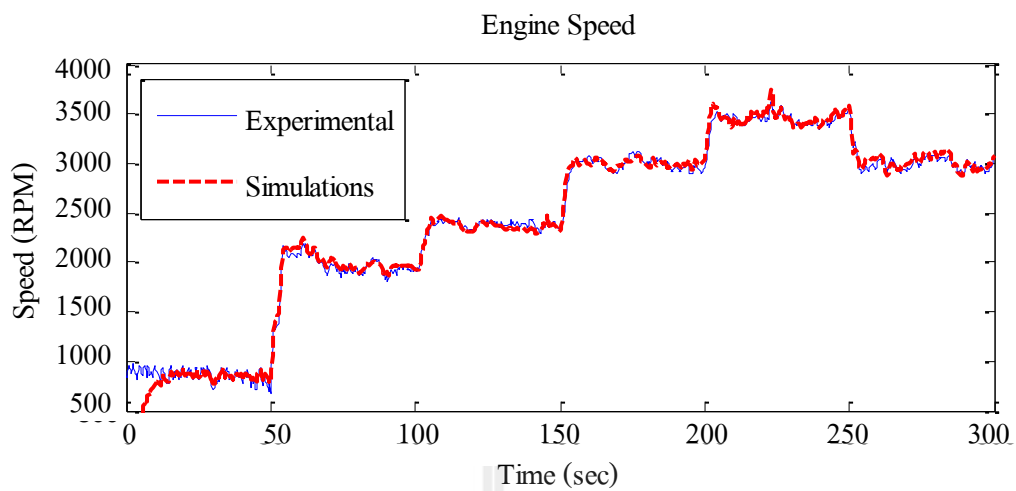
รูปที่ 5.7 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



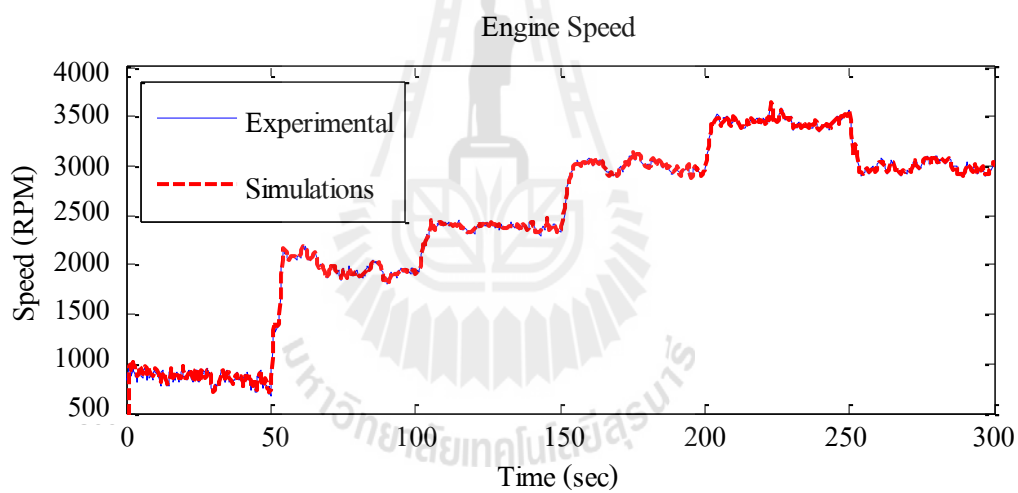
รูปที่ 5.8 แสดงค่าแสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



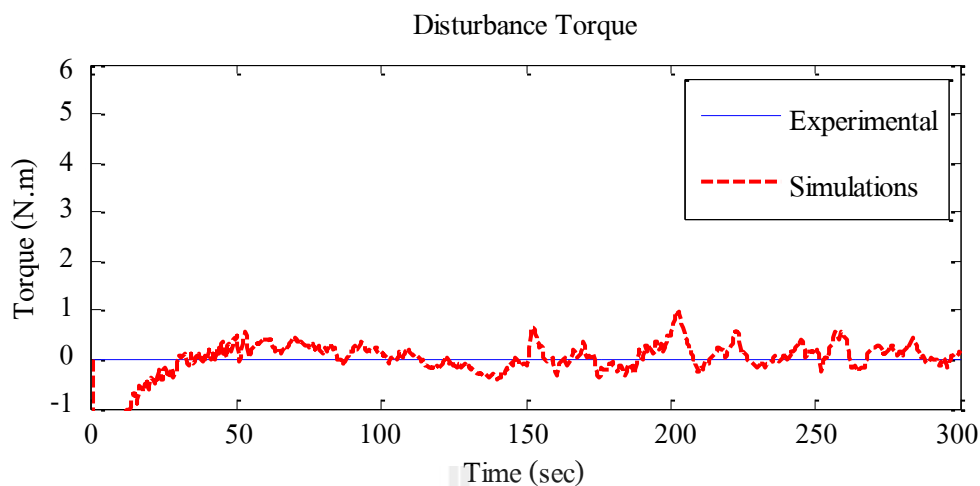
รูปที่ 5.9 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1



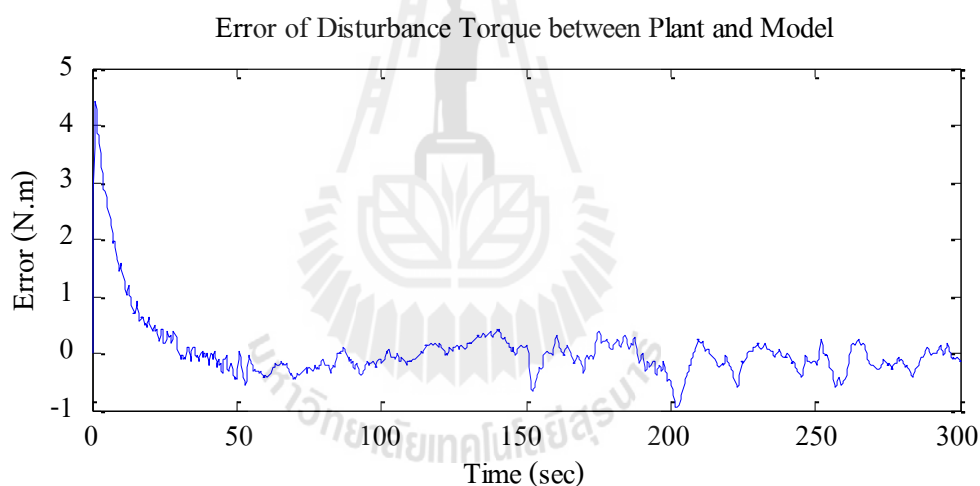
รูปที่ 5.10 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 5.11 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 5.12 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 5.13 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

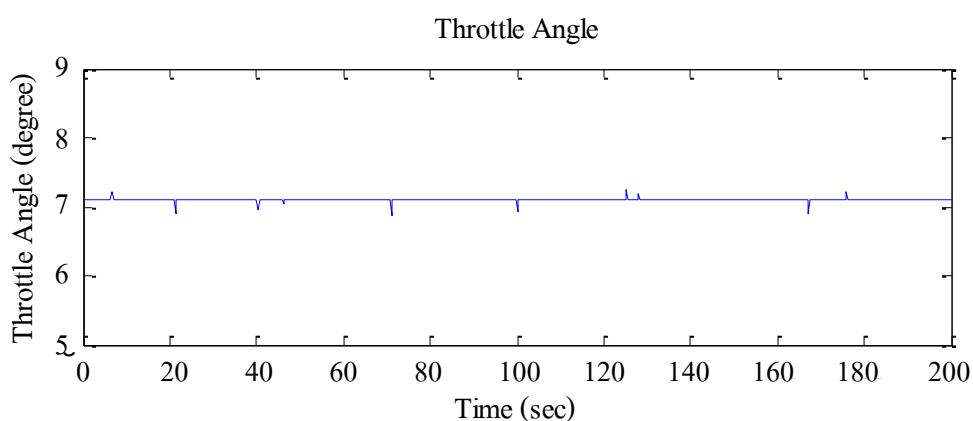
จากผลการในกรณีที่ 1 ในลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์โดยทั่วไปเมื่อทำการปรับองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อเพิ่มขึ้นหรือลดลง ลักษณะของผลการตอบสนองของระบบจะต้องมีลักษณะคล้ายกับการปรับองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อ ถ้าไม่มีแรงบิดหรือผลกระทบจากสิ่งรบกวนจากภายนอกมากระทำต่อระบบ ซึ่งผลจากการจำลองของระบบที่ได้จากการวิธีระบบเอกลักษณ์โดยไม่มีตัวสังเกตและตัวชดเชยนั้นแสดงดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจะเห็นว่าผลการตอบสนองมีความใกล้เคียงกับการตอบสนองของเครื่องยนต์จริง แต่ก็ยังมีค่าที่ผิดพลาดเนื่องจากระบบ

จำลองนั้นได้มาจากวิธีการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ จากระบบจริงโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการจำลองระบบจำลอง ดังนั้นจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงทำให้ค่าผลการตอบสนองของระบบจำลองนั้นเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ และจากรูปที่ 5.10 ผลการตอบสนองของระบบจำลองโดยมีตัวสังเกตนั้นมีผลการตอบสนองใกล้เคียงมากกว่าผลการตอบสนองของระบบที่ไม่มีตัวสังเกต ซึ่งเป็นผลมาจากตัวสังเกตสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับผลการตอบสนองที่มีตัวสังเกตและมีตัวชดเชยค่าแรงบิดนั้นแสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งจากผลการตอบสนองของระบบจำลองจะเห็นว่าผลการตอบสนองของระบบจำลองที่มีตัวสังเกตและมีตัวชดเชยนั้นผลการตอบสนองของระบบจำลองมีค่าใกล้เคียงผลการตอบสนองจริงมากที่สุด เนื่องจากระบบที่ทำการชดเชยจากตัวชดเชยนั้นได้ถูกชดเชยค่าความผิดพลาดของตัวแปรสเตตของตัวสังเกต จึงทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวสังเกตลดลง ซึ่งค่าที่ถูกชดเชยให้กับระบบจำลองนั้นแสดงดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 แสดงค่าความผิดพลาดของแรงบิดรบกวนระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง

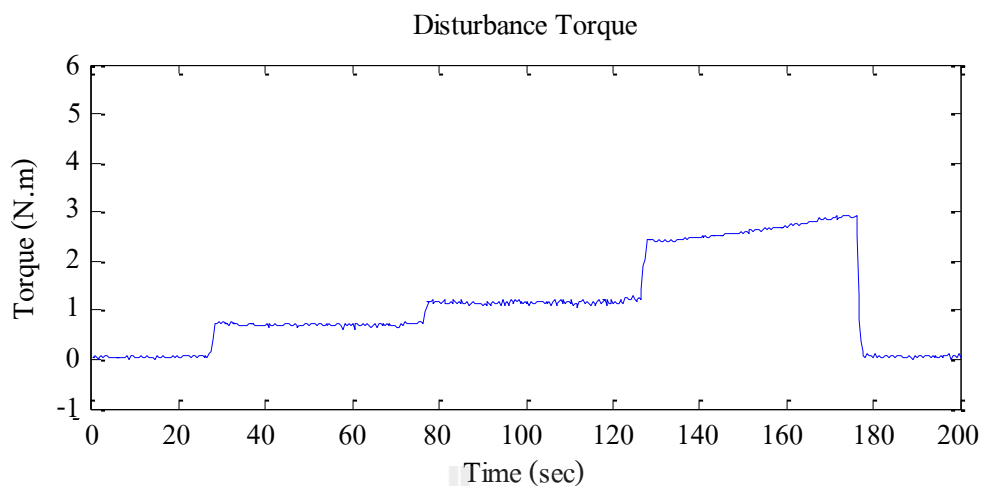
5.4 กรณีที่ 2 การทดลองการจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิดของสาขามุมล้นปีกผีเสื้อคงที่โดยมีแรงบิดภายนอก

ในกรณีที่ 2 พิจารณาทดลองกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดโดยให้แรงบิดมีลักษณะเป็นแบบขั้นบันได

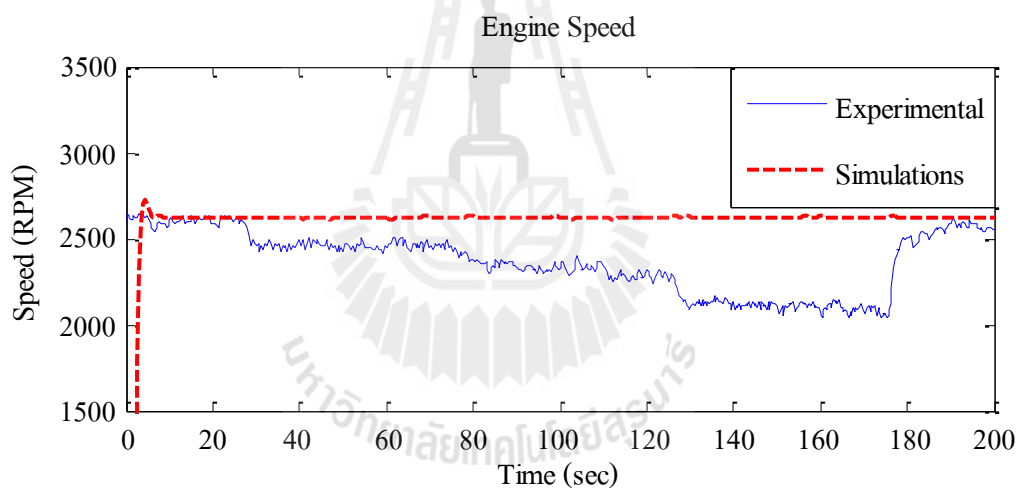
5.4.1 กรณีที่ 2.1 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 2500 RPM



รูปที่ 5.14 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1

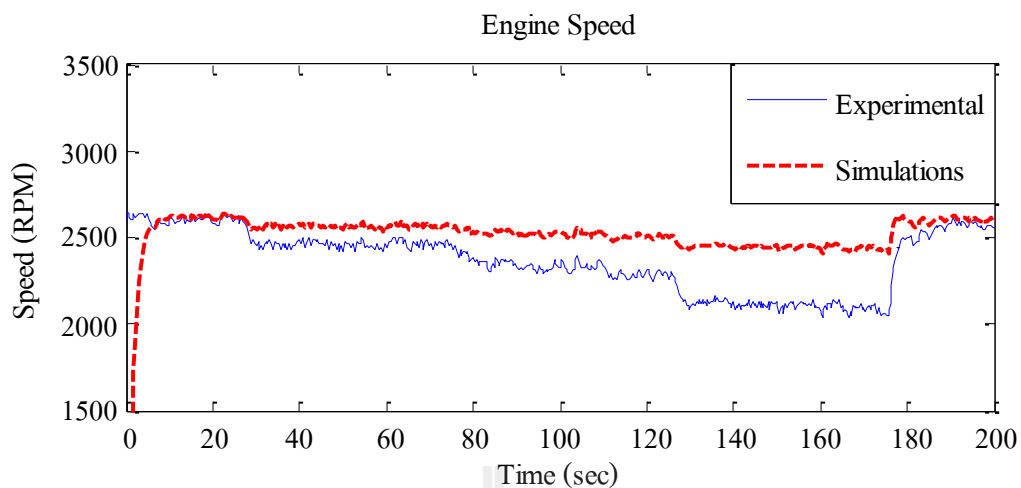


รูปที่ 5.15 แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.1



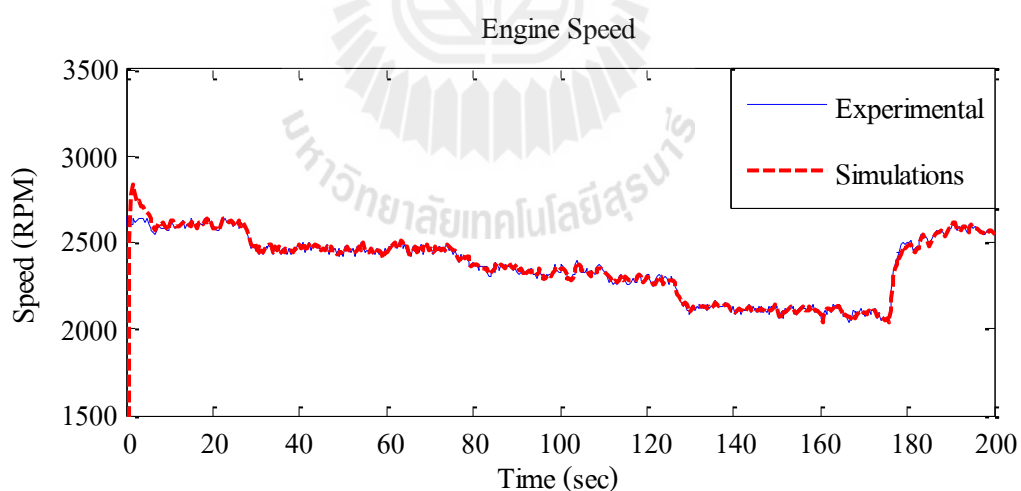
รูปที่ 5.16 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1

จากรูปที่ 5.16 แสดงค่าความเร็วรอบ โดยระบบจำลองนั้นไม่มีตัวสังเกตและไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อมีแรงบิดรบกวนดังรูปที่ 5.15 เข้ามากระทำต่อระบบจริง ในส่วนความเร็วรอบของระบบจำลองนั้นจะแตกต่างกับความเร็วรอบของระบบจริง เนื่องจากระบบจำลองนั้นไม่รู้ค่า และไม่สามารถชดเชยค่าแรงบิดให้กับระบบจำลองได้ แต่ค่าความเร็วรอบของระบบจำลองยังคงมีลักษณะคล้ายกับองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อ ซึ่งองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อแสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.17 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสั่นเกิด)

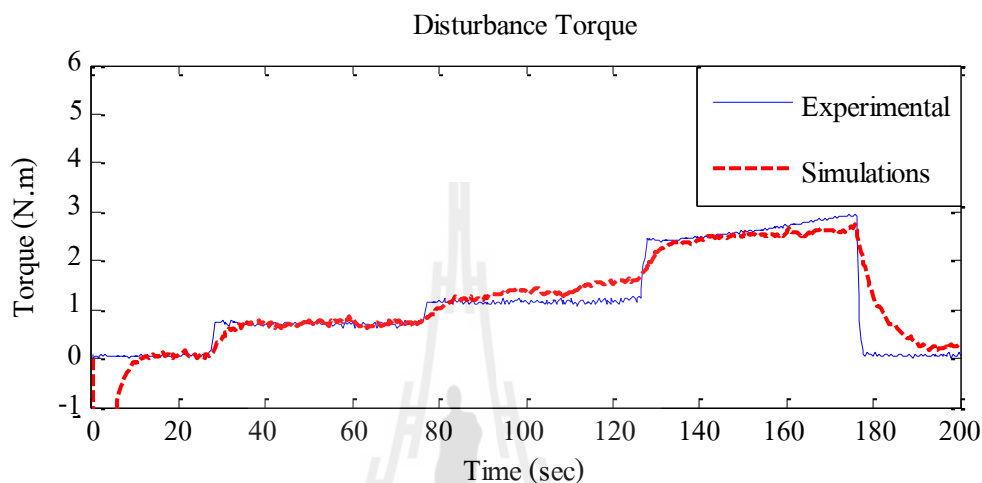
จากรูป 5.17 เมื่อระบบจำลองมีตัวสั่นเกิดเพิ่มเข้ามาในระบบทำให้ผลการตอบสนองคล้ายกับระบบจริงช่วงที่ถูกแรงบิดภายนอกมากระทำ แต่ผลความเร็วรอบที่มีลักษณะคล้ายกับระบบจริงก็ยังคงมีความผิดพลาดอยู่เนื่องจากระบบยังไม่รู้ค่าที่แรงบิดภายนอก



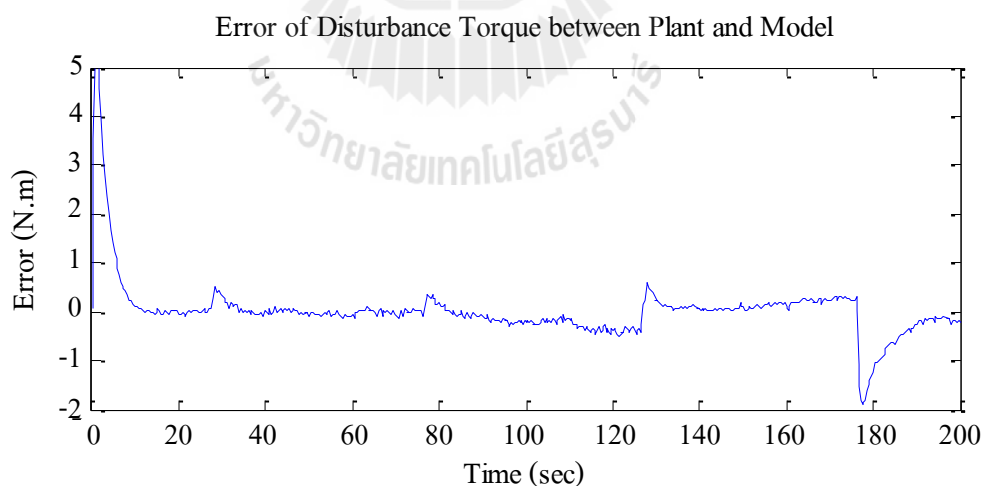
รูปที่ 5.18 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสั่นเกิดและตัวชดเชย)

จากรูปที่ 5.18 เมื่อระบบจำลองนั้นมีตัวสั่นเกิดและมีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ผลของการตอบสนองของความเร็วรอบของระบบจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบจริง ซึ่งเป็นผลมาจากระบบจำลองนั้นได้มีตัวสั่นเกิดเพื่อการประมาณค่าตัวแปรสเตรตภายในระบบ และมีการชดเชย

ค่าแรงบิดภายนอกที่ไม่รู้ค่าโดยตัวชดเชย ซึ่งค่าที่ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นแสดงดังรูปที่ 5.19 และจากค่าแรงบิดที่ชดเชยให้กับระบบจำลองมีผลทำให้มีการตอบสนองของความเร็วรอบที่มีค่าคล้ายกับระบบจริงนั้นก็จะได้ค่าแรงบิดที่ชดเชยให้กับระบบจำลองที่มีความคล้ายกับค่าแรงบิดจริง โดยรูปที่ 5.20 แสดงค่าความผิดพลาดของแรงบิดรบกวนระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง



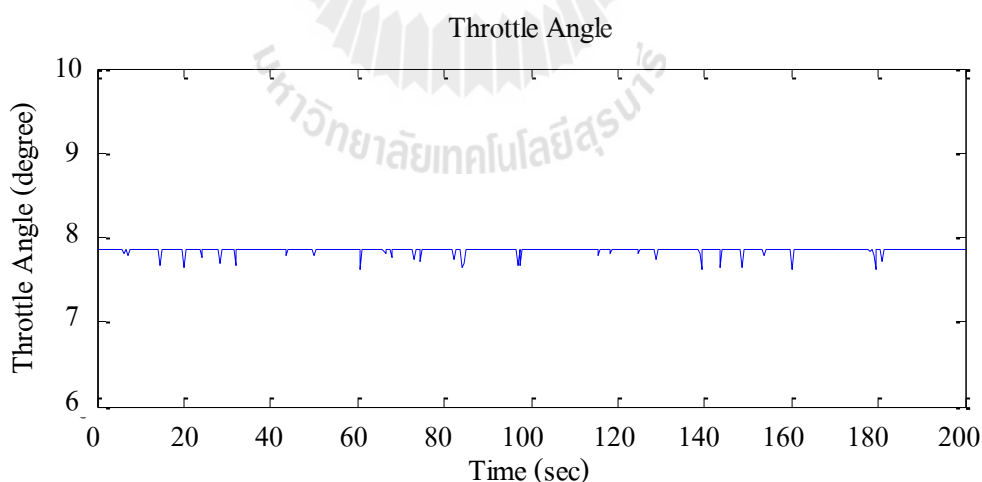
รูปที่ 5.19 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



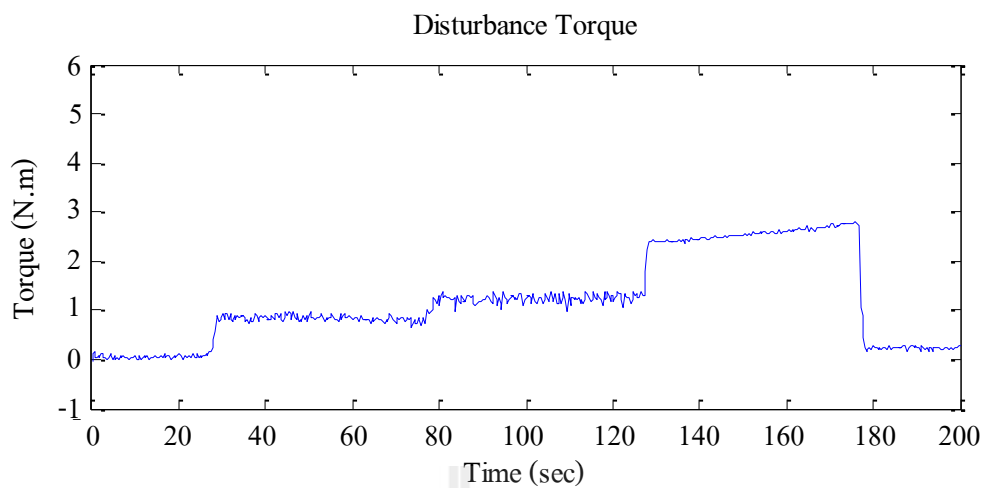
รูปที่ 5.20 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 2.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

สำหรับกรณีที่ 2.1 โดยมีค่าองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อแบบคงที่ สำหรับแรงบิดรบกวนที่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่ 2.1 ผลที่ได้ คือ หากระบบจำลองนั้นไม่มีตัวสังเกตและไม่มีตัวชดเชยจะทำให้ผลของระบบจำลองมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในขณะที่ระบบมีแรงบิดรบกวนภายนอกทำให้ผลการตอบสนองของระบบจำลองนั้นไม่เป็นไปตามผลการตอบสนองจริง และถ้าต้องการทำให้ผลการตอบสนองของระบบจำลองมีลักษณะการตอบสนองคล้ายกับการตอบสนองจริงนั้นจะต้องเพิ่มตัวสังเกตเข้ามาในระบบจำลอง ซึ่งผลของระบบจำลองที่มีตัวสังเกตเพียงอย่างเดียว นั้นจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มตัวสังเกตเข้ามาในระบบจำลองแล้วทำให้ผลการตอบสนองของระบบในช่วงที่มีแรงบิดรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แต่ยังมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นทำให้ผลค่าการตอบสนองของระบบจำลองมีค่าแตกต่างกับระบบเครื่องยนต์จริง การที่จะทำให้ค่าที่ผิดพลาดของผลการตอบสนองของความเร็วรอบลดมีค่าน้อยลงนั้น จะต้องทราบค่าแรงบิดรบกวนที่มากระทำต่อระบบ ซึ่งในการลดค่าความผิดพลาดเหล่านั้นจะใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ โดยตัวชดเชยจะทำการประมาณค่าแรงบิดที่รบกวนกับระบบจริงให้กับระบบจำลองเพื่อลดค่าความผิดพลาดของระบบจำลอง ซึ่งผลการทดลองระบบจำลองที่มีตัวสังเกตและตัวชดเชยส่วนของความเร็วรอบของระบบจำลองเครื่องยนต์ จะมีค่าใกล้เคียงกับระบบเครื่องยนต์จริง

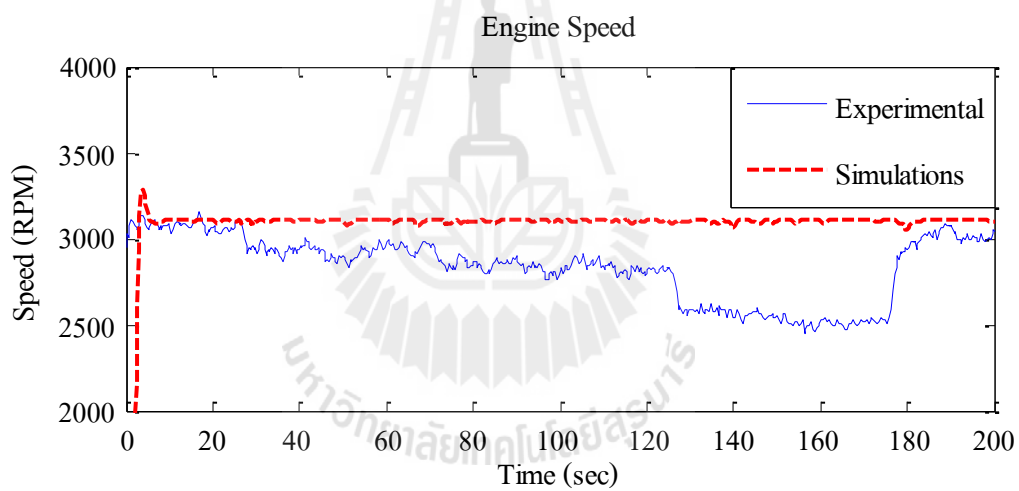
5.4.2 กรณีที่ 2.2 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 3000 RPM



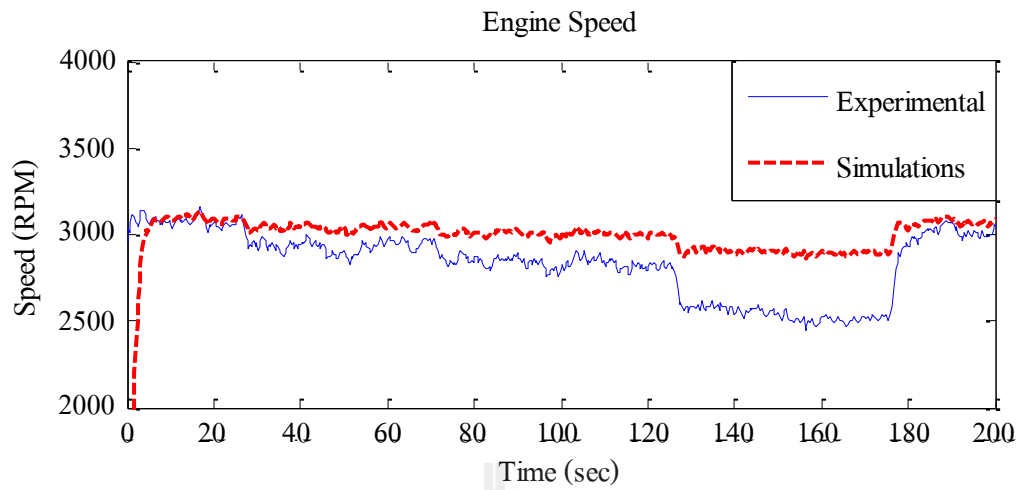
รูปที่ 5.21 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2



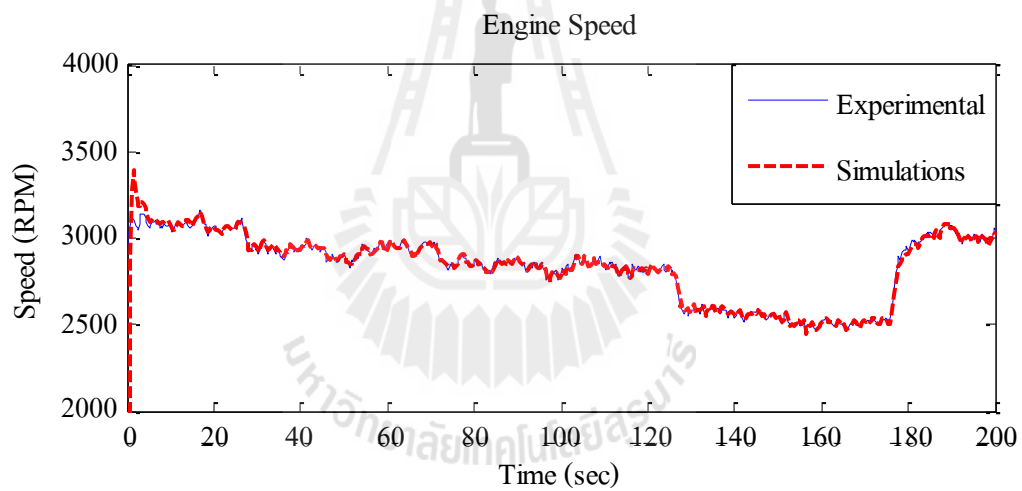
รูปที่ 5.22 แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.2



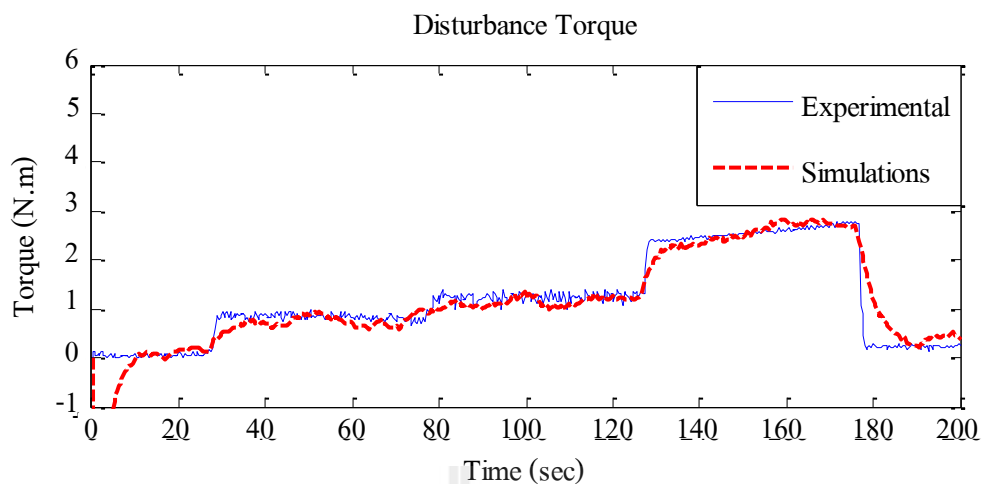
รูปที่ 5.23 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2



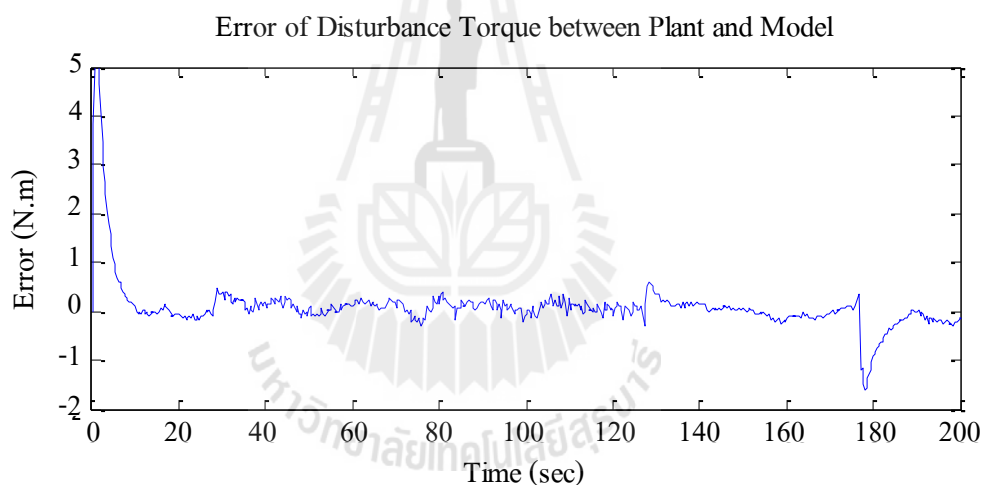
รูปที่ 5.24 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 5.25 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



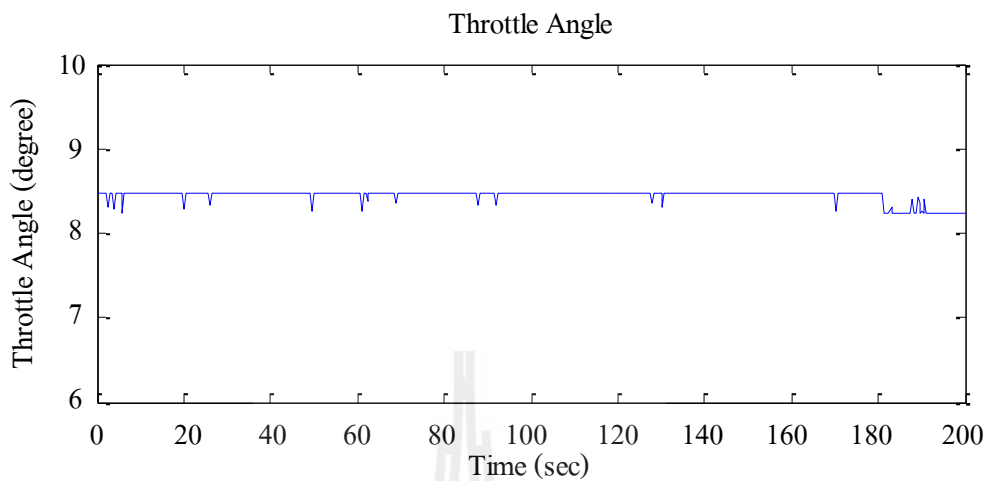
รูปที่ 5.26 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



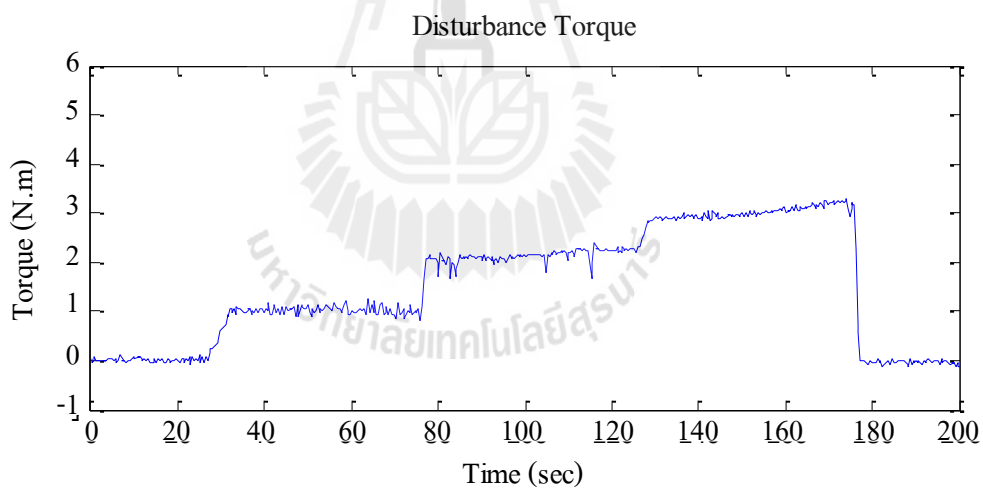
รูปที่ 5.27 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 2.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

สำหรับกรณีที่ 2.2 โดยมีค่าองศาของมุมลื่นปีกผิเสื่อแบบคงที่ ดังรูปที่ 5.21 และมี $T_d(t)$ ดังรูปที่ 5.22 ซึ่งในส่วนของผลของการตอบสนองของการทดลองระบบจำลองทั้งระบบจำลองเพียงอย่างเดียว ระบบจำลองที่มีตัวสังเกต และระบบจำลองที่มีตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชย ให้ผลการตอบสนอง และผลการชดเชยหรือผลการประมาณค่าแรงบิดรบกวนที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลการตอบสนองสำหรับกรณีที่ 2.1

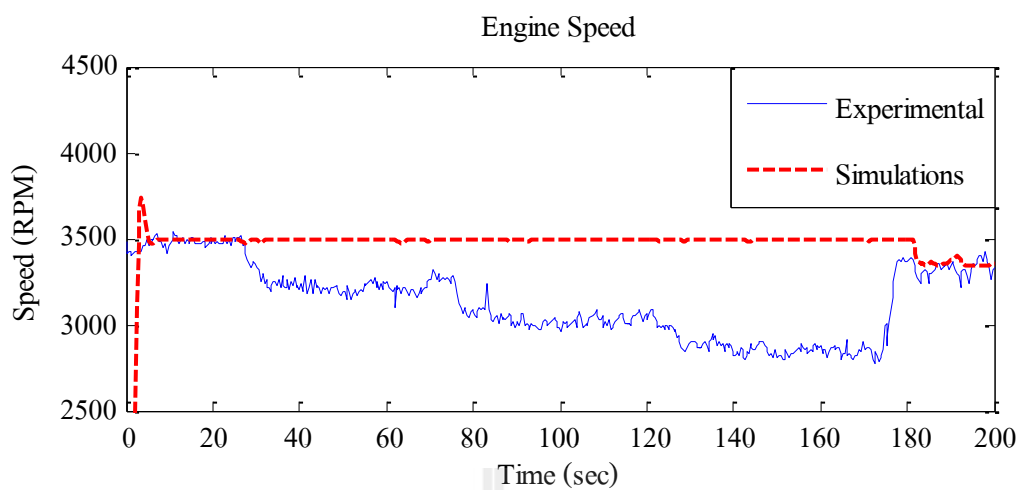
5.4.3 กรณีที่ 2.3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 3500 RPM



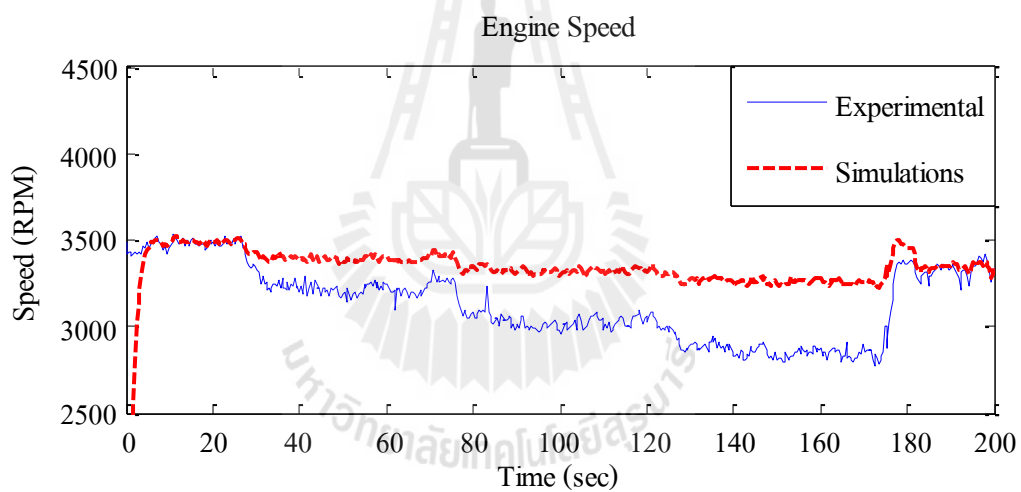
รูปที่ 5.28 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3



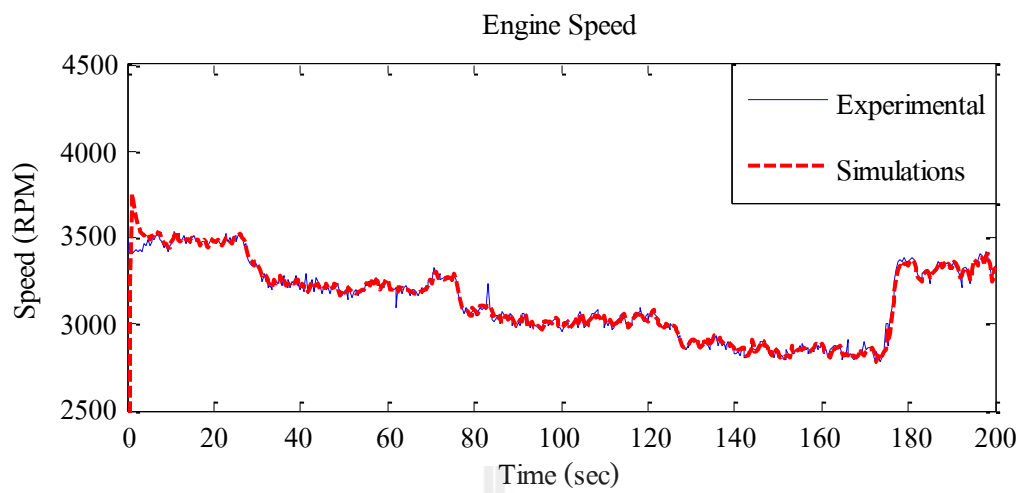
รูปที่ 5.29 แสดงค่า $T_d(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.3



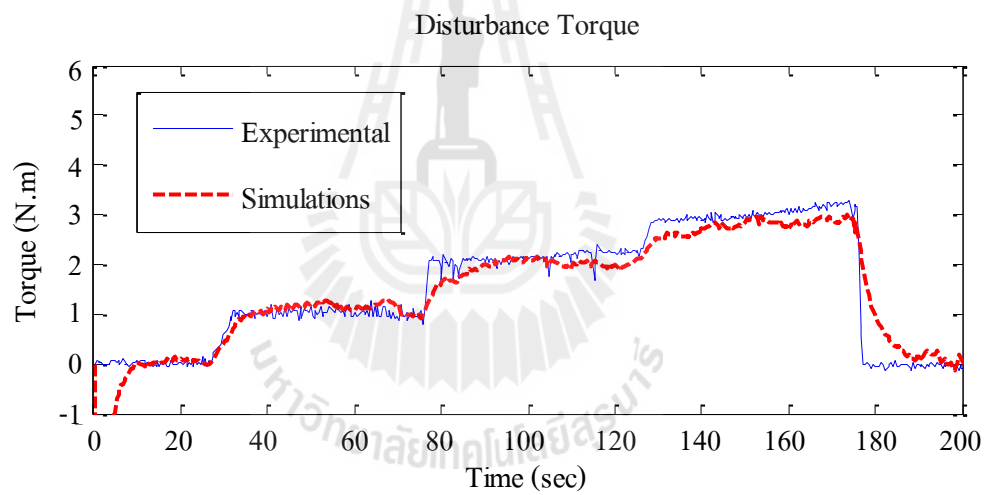
รูปที่ 5.30 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3



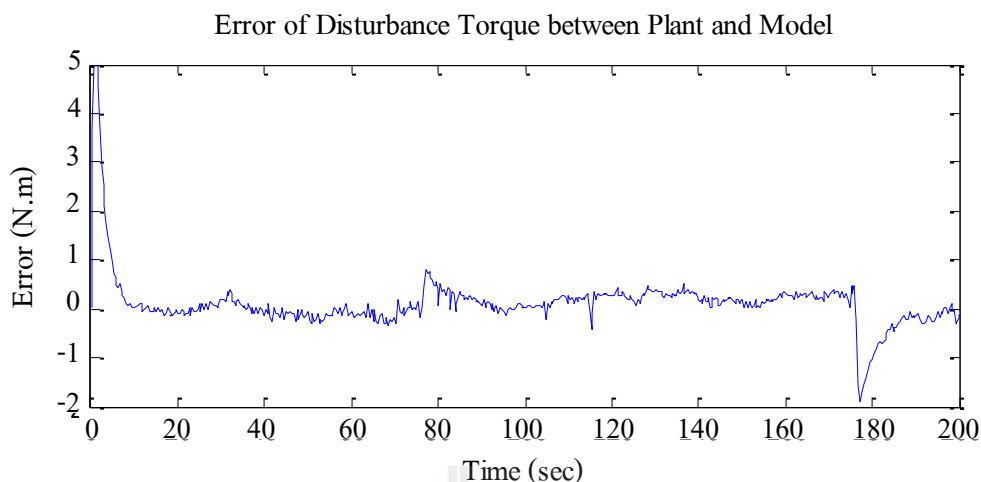
รูปที่ 5.31 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 5.32 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 5.33 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



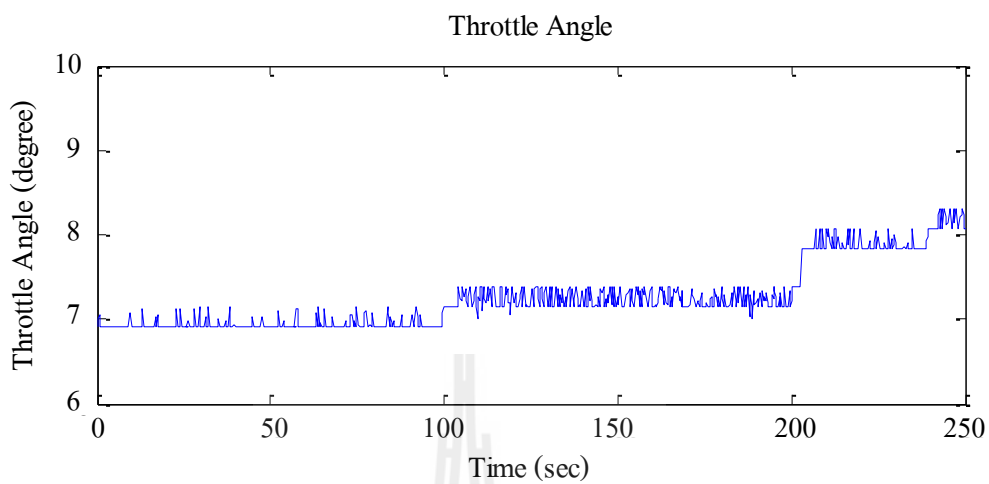
รูปที่ 5.34 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 2.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

สำหรับกรณีที่ 2.3 โดยมีค่าองศาของมุมลื่นปีกผีเสื้อแบบคงที่ดังรูปที่ 5.28 และมี $T_f(t)$ เป็นดังรูปที่ 5.29 ซึ่งในส่วนของผลของการตอบสนองของการทดลองระบบจำลองทั้งระบบจำลองเพียงอย่างเดียว ระบบจำลองที่มีตัวสังเกต และระบบจำลองที่มีตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชย ให้ผลการตอบสนอง และผลการชดเชยหรือผลการประมาณค่าแรงบิดรบกวนที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลการตอบสนองสำหรับกรณีที่ 2.1 และกรณีที่ 2.2

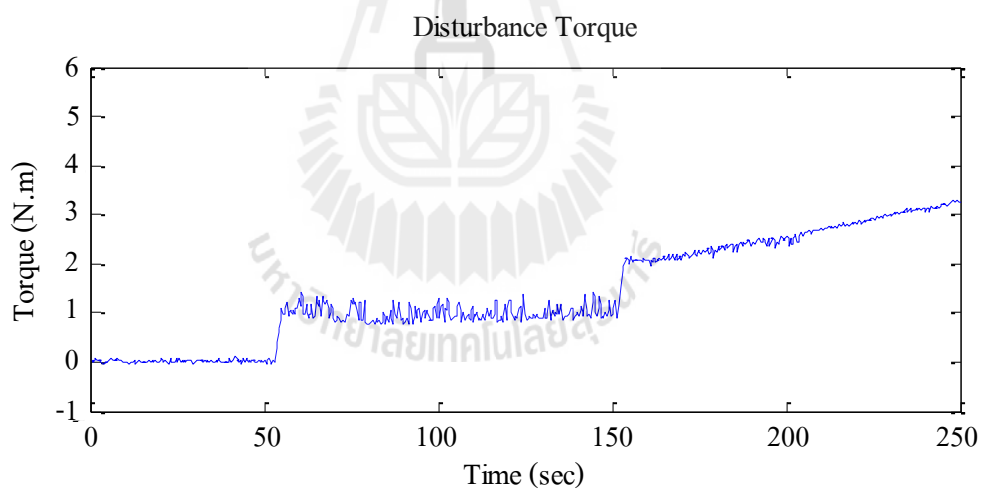
5.5 กรณีที่ 3 การทดลองการจำลองสถานการณ์ของระบบเครื่องยนต์จุดระเบิด หาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์จุดระเบิดที่ความเร็วรอบคงที่

ในการทดลองหาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์จุดระเบิดที่ความเร็วรอบคงที่นั้น จะทำการเพิ่มแรงบิดรบกวนจากภายนอกให้กับเครื่องยนต์ และในขณะเดียวกันจะต้องทำให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีค่าคงที่เท่าเดิม เพื่อที่จะหาว่าที่ความเร็วรอบ ณ ค่าคงที่นั้นมีค่าแรงบิดสูงสุดเท่าใด ดังนั้นการทดลองหาค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์จุดระเบิดที่ความเร็วรอบคงที่ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ดังในบทที่ 4 คือ

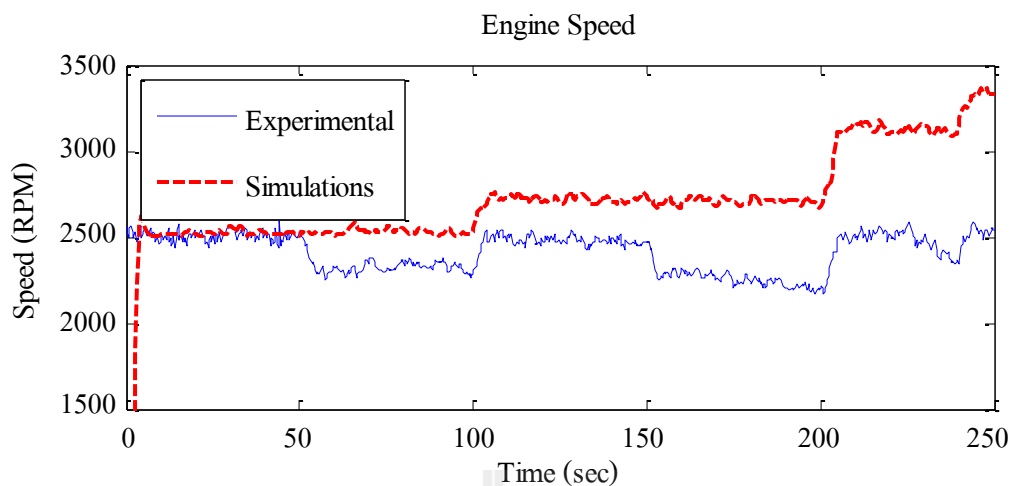
5.5.1 กรณีที่ 3.1 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 2500 RPM



รูปที่ 5.35 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.1

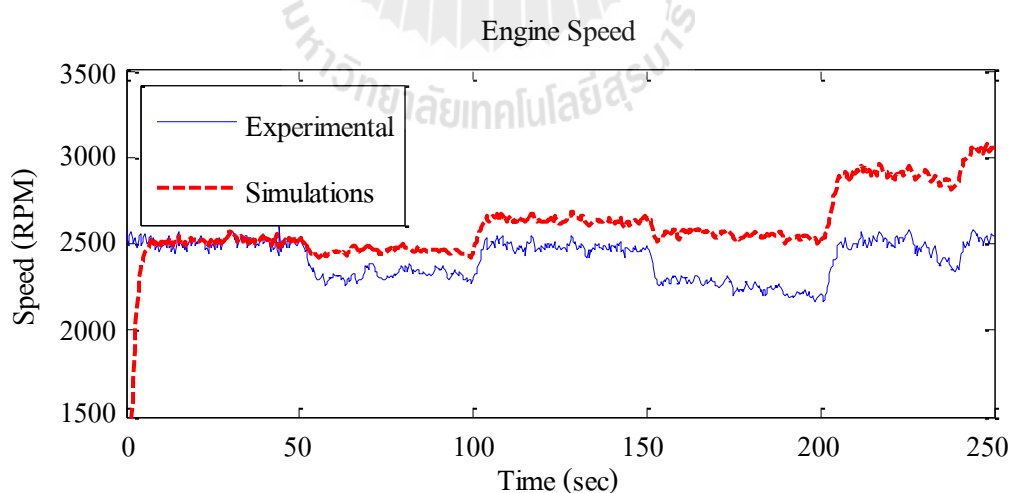


รูปที่ 5.36 แสดงค่า $T_d(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.1



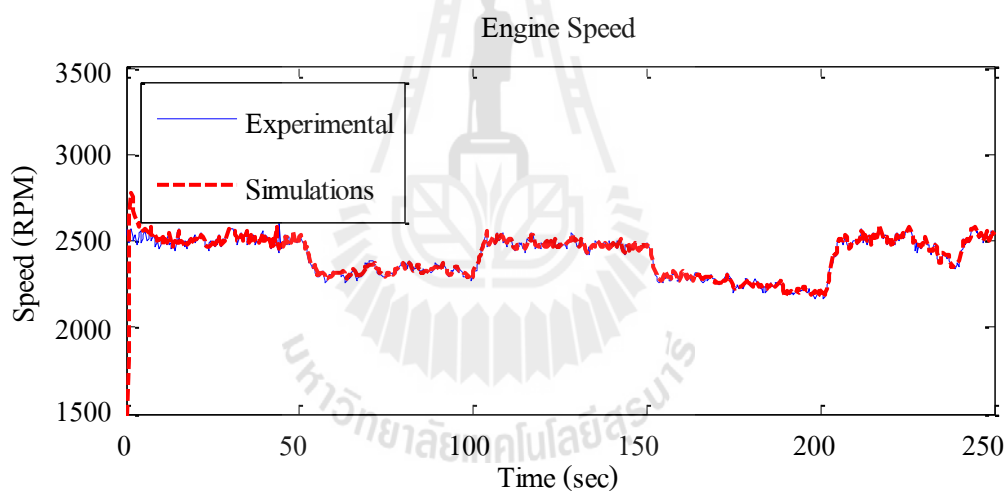
รูปที่ 5.37 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1

จากรูปที่ 5.37 โดยระบบจำลองนั้นไม่มีตัวสังเกตและไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะไม่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะแรงบิดภายนอกมากระทำ เช่นเดียวผลการจำลองระบบในกรณีที่ 2 แต่ในส่วนของคุณค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ของระบบจำลองนั้นจะยังคงสามารถเปลี่ยนแปลงตามลักษณะคล้ายกับของสายของมุมลื่นปีกผีเสื้อโดยไม่มีผลกระทบของแรงบิดภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

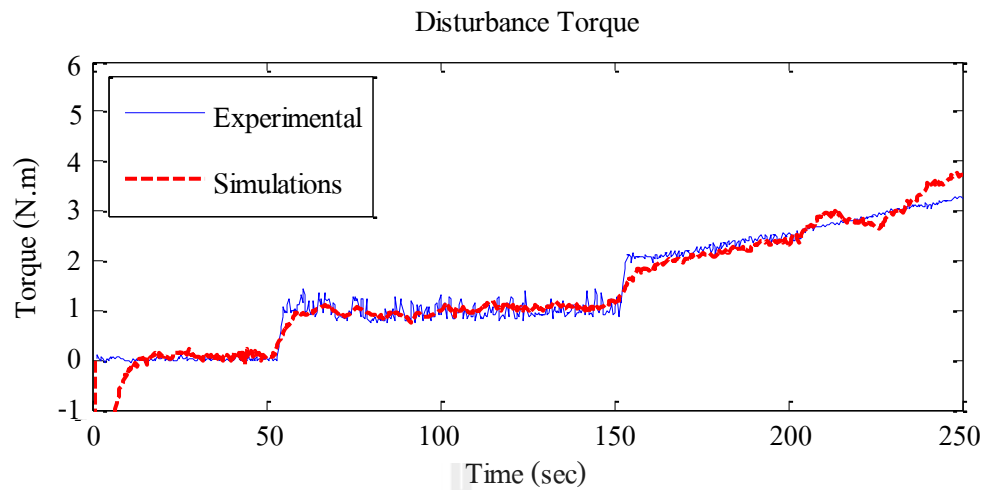


รูปที่ 5.38 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกต)

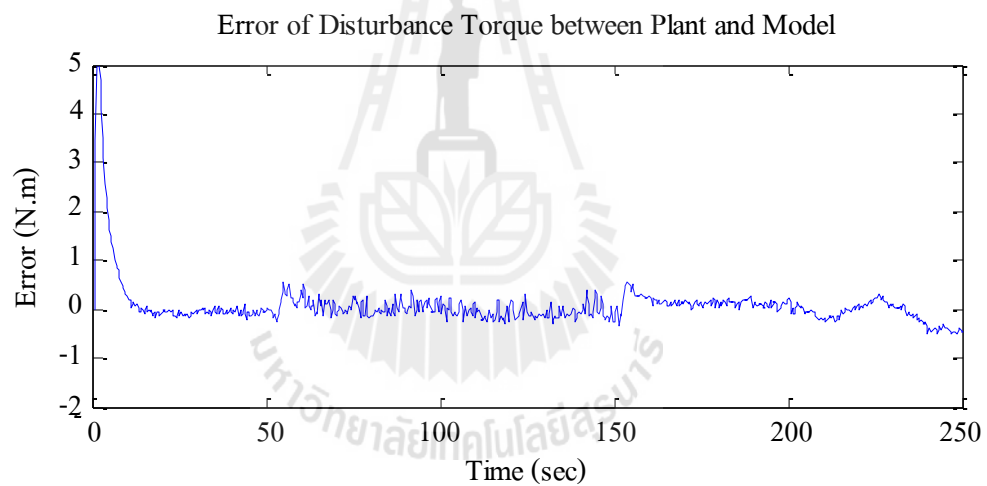
จากรูปที่ 5.38 โดยระบบจำลองนั้นมีตัวสังเกตเพิ่มเข้ามา แต่ไม่มีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะแรงบิดภายนอก ในขณะที่แรงบิดมากระทำ สำหรับความเร็วรอบของระบบจำลองนั้นถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีแรงบิดมากระทำแต่ยังเห็นได้ชัดว่ามีความแตกต่างจากความเร็วรอบของระบบจริง ซึ่งเนื่องมาจากระบบจำลองนั้นยังไม่รู้ค่าแรงบิดที่เข้ามากระทำต่อระบบจำลอง แต่ถ้าระบบจำลองมีตัวสังเกตและมีตัวชดเชยแรงบิด จะทำให้ค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ของระบบจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบจริง แสดงดังรูปที่ 5.39 และผลจากการประมาณค่าแรงบิดของตัวชดเชยที่ชดเชยค่าแรงบิดให้กับระบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.40 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ตัวชดเชยนั้นประมาณค่าแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพให้กับระบบจำลองจึงทำให้ค่าแรงบิดที่ประมาณค่าได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าแรงบิดที่กระทำต่อระบบจริง และรูปที่ 5.41 แสดงค่าความผิดพลาดของแรงบิดระบบระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง



รูปที่ 5.39 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

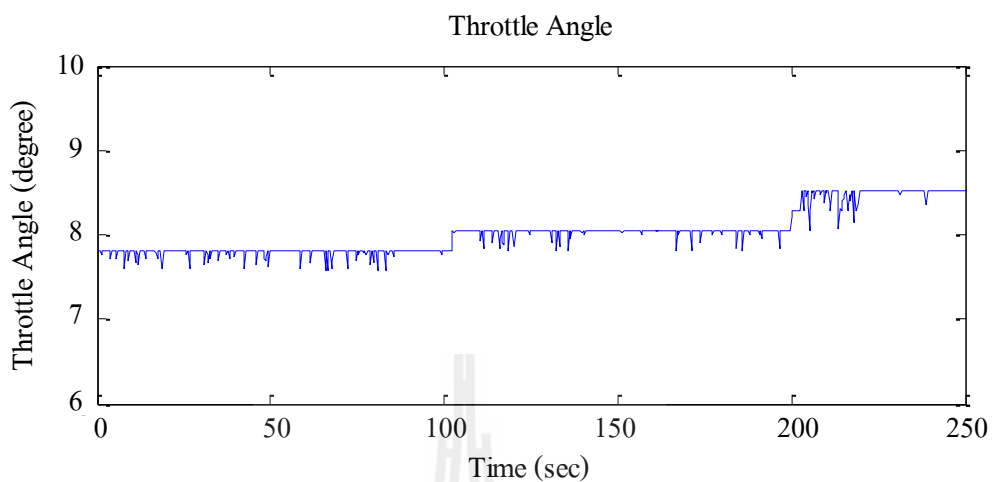


รูปที่ 5.40 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

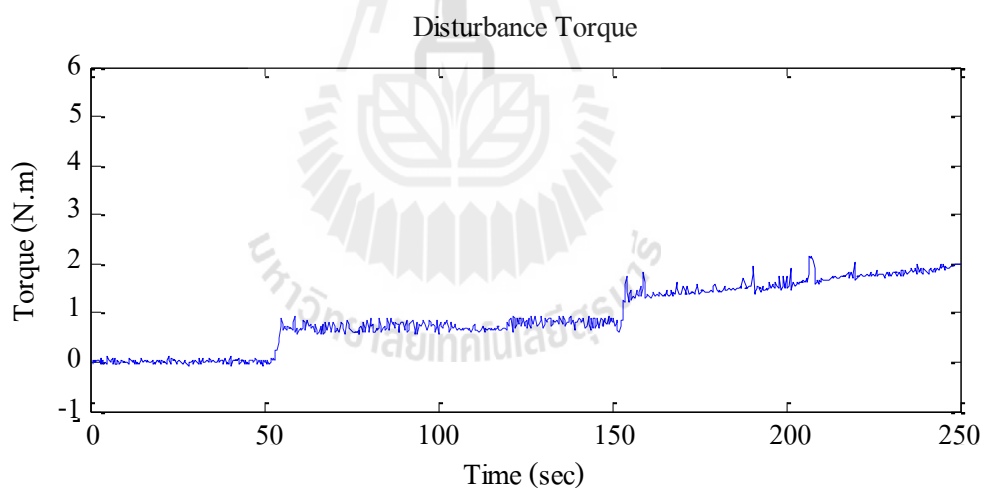


รูปที่ 5.41 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 3.1 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

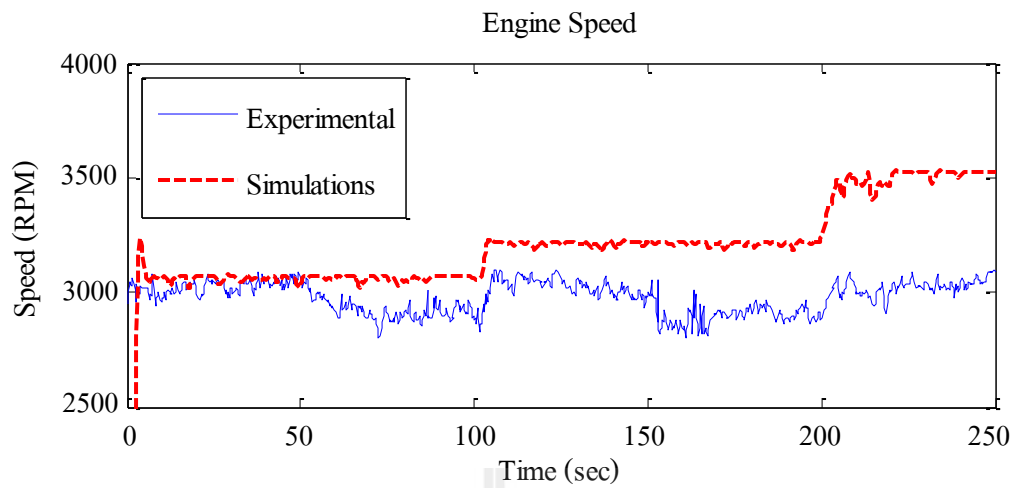
5.5.2 กรณีที่ 3.2 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 3000 RPM



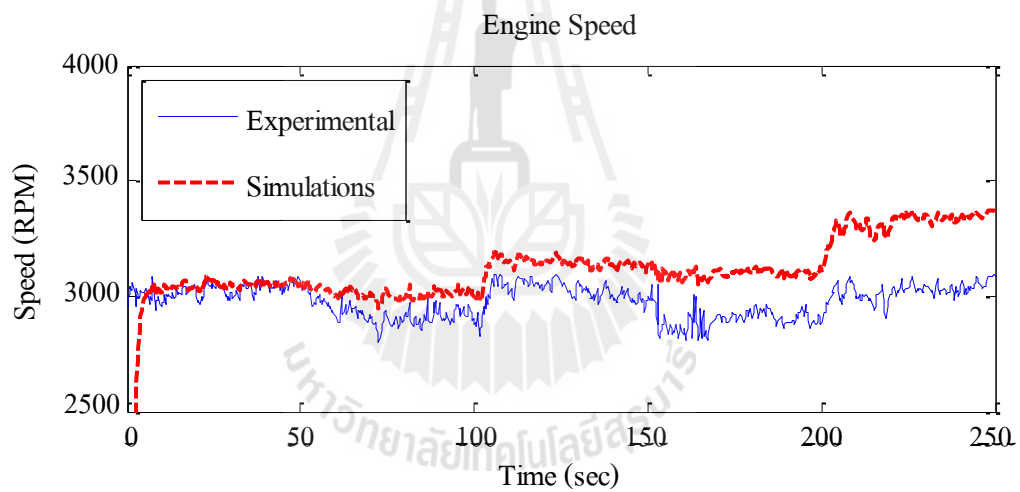
รูปที่ 5.42 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.2



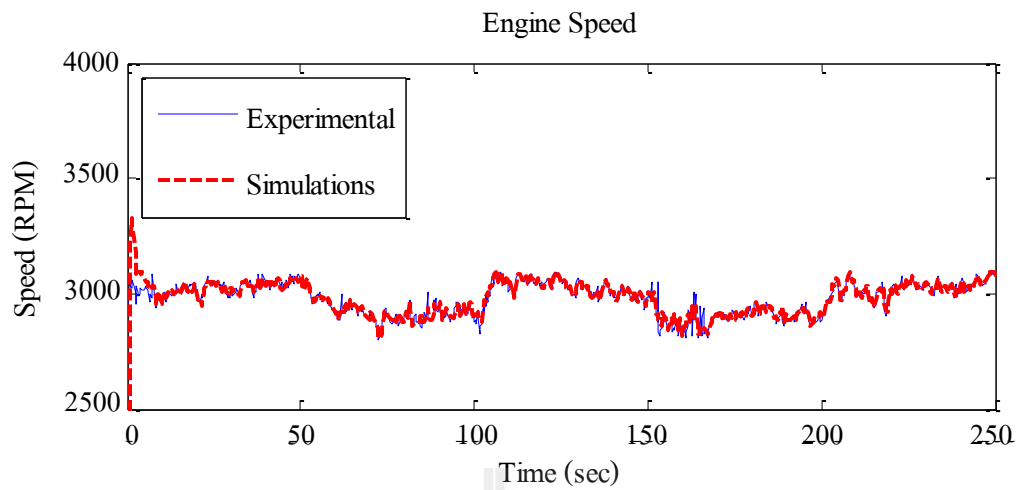
รูปที่ 5.43 แสดงค่า $T_d(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.2



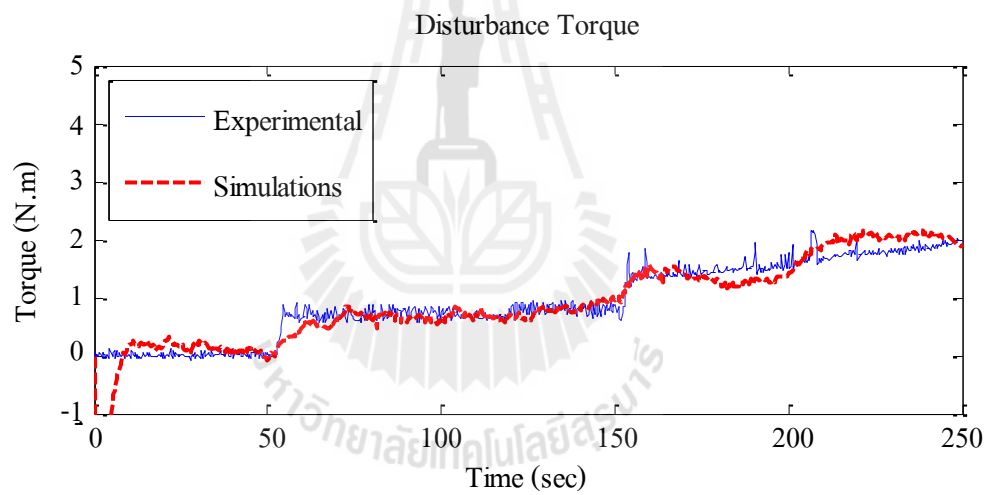
รูปที่ 5.44 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2



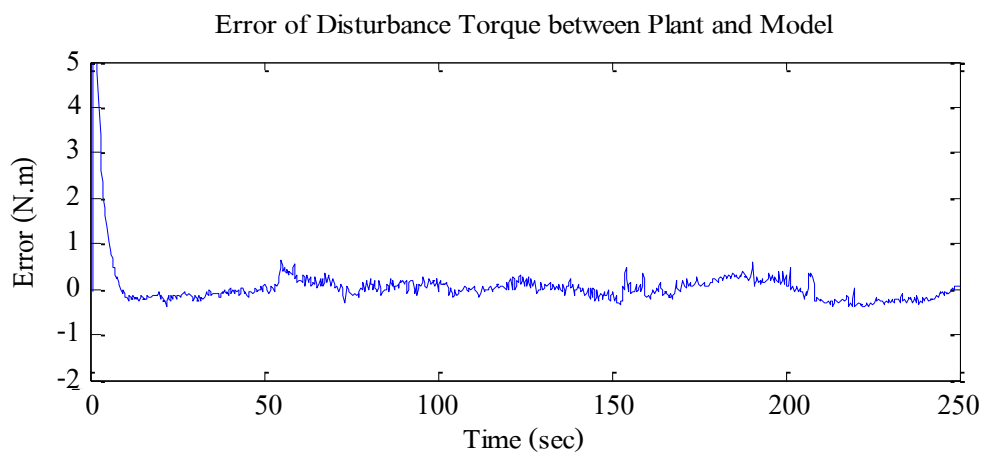
รูปที่ 5.45 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 5.46 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



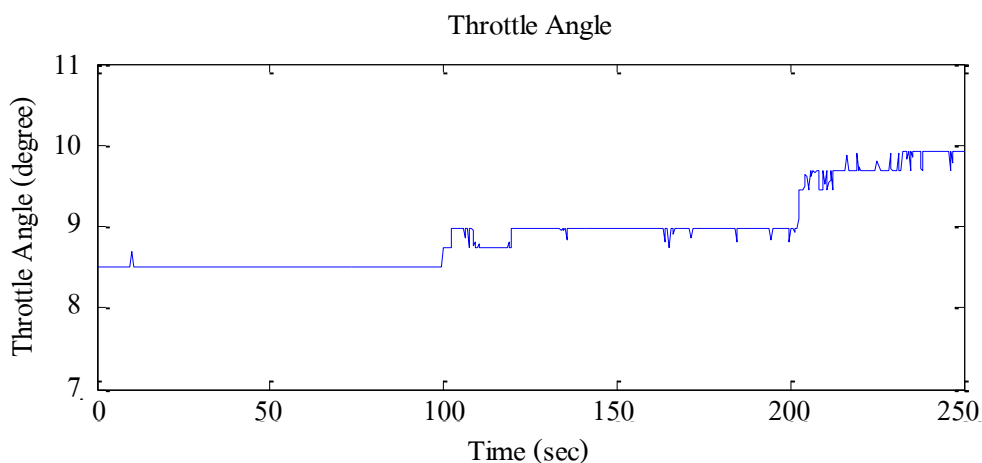
รูปที่ 5.47 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



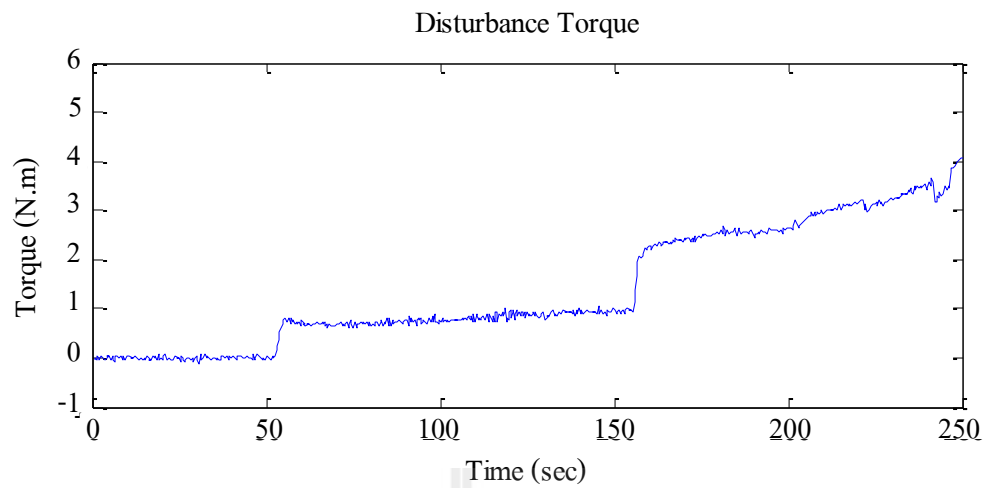
รูปที่ 5.48 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
กรณีที่ 3.2 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

สำหรับกรณีที่ 3.2 ผลของระบบจำลองนั้นระบบจำลองจะมีผลการตอบสนองของระบบจำลองคล้ายกับผลของระบบจำลองสำหรับกรณีที่ 3.1 เพียงแต่การทดลองนั้นใช้ความเร็วในการทดลองที่ต่างกัน และค่าแรงบิดที่กระทำต่อระบบต่างกัน อย่างไรก็ตามระบบจำลองในกรณีที่ 3.2 นี้ระบบจำลองยังคงสามารถประมาณค่าแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพถ้าหากระบบจำลองนั้นมีทั้งตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เช่นเดียวกับกรณี 3.1

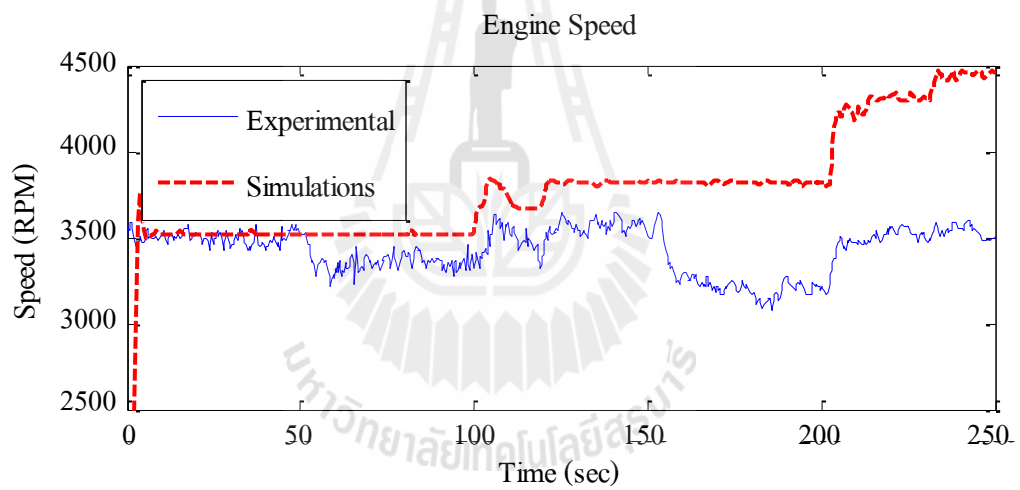
5.5.3 กรณีที่ 3.3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่เท่ากับ 3500 RPM



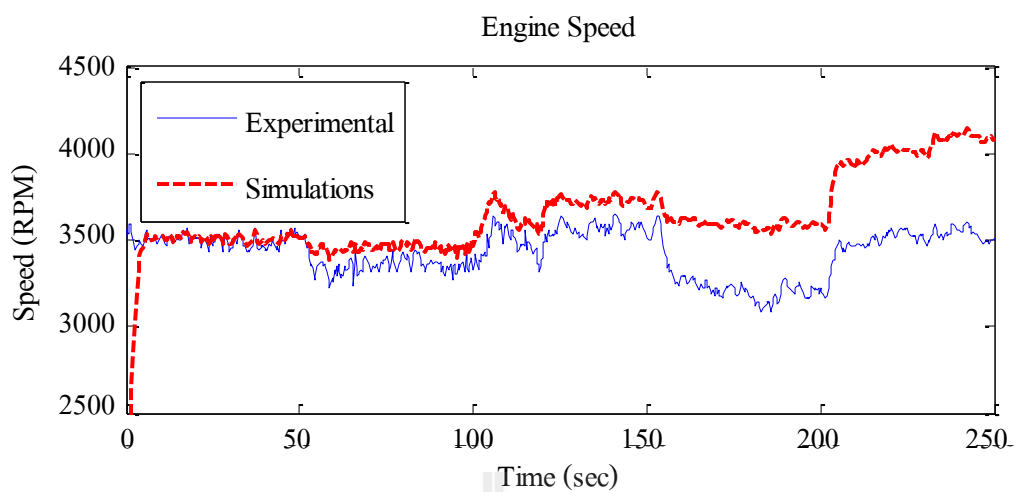
รูปที่ 5.49 แสดงค่า $\theta(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.3



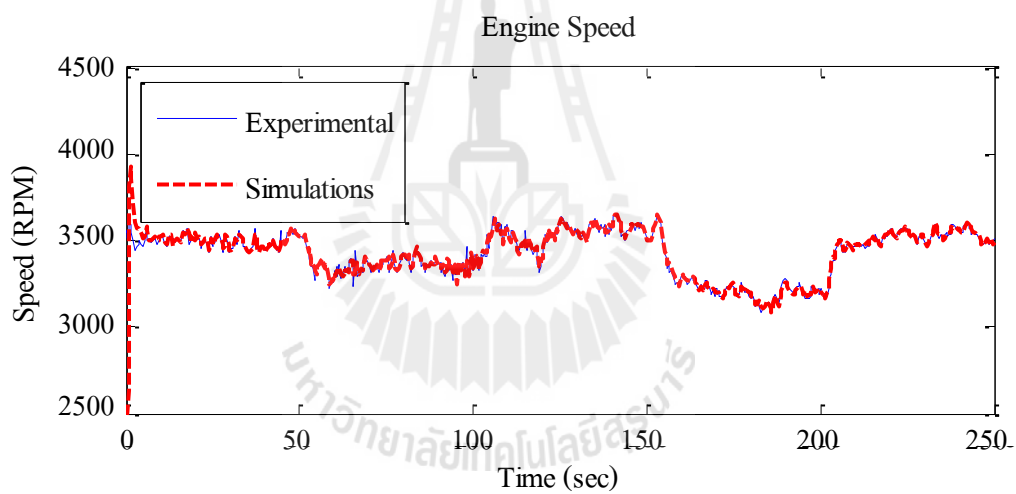
รูปที่ 5.50 แสดงค่า $T_l(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.3



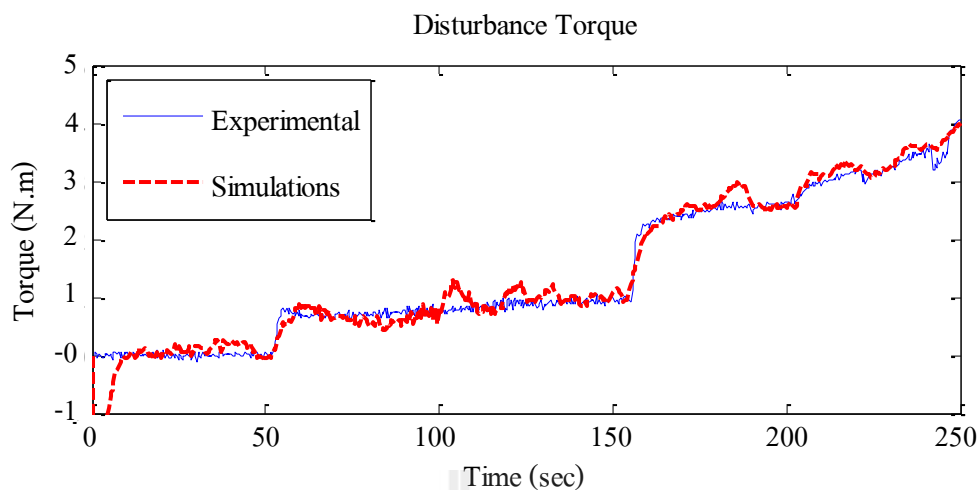
รูปที่ 5.51 แสดงค่า ω และ $\hat{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3



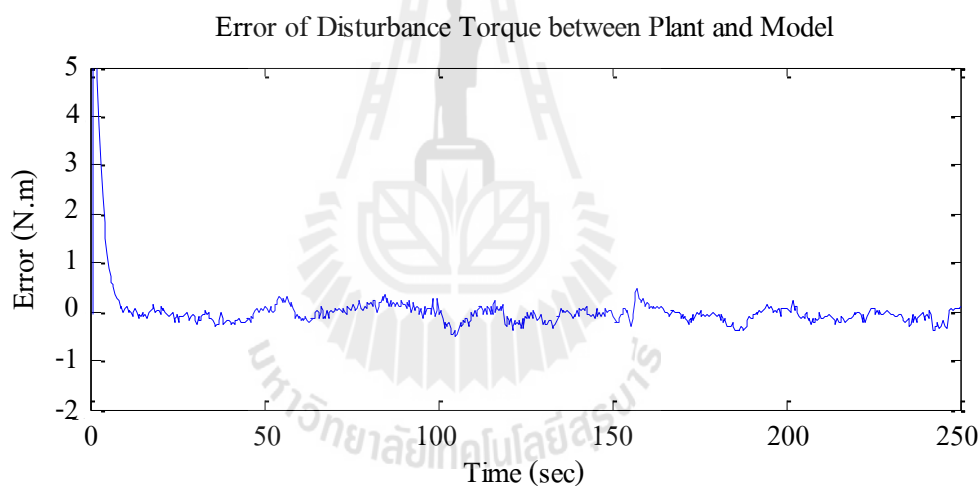
รูปที่ 5.52 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกต)



รูปที่ 5.53 แสดงค่า ω และ $\dot{\omega}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 5.54 แสดงค่า T และ $\hat{T}$ สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)



รูปที่ 5.55 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง
สำหรับกรณีที่ 3.3 (มีตัวสังเกตและตัวชดเชย)

ในทำนองเดียวกันสำหรับกรณีที่ 3 ผลของระบบจำลองนั้นระบบจำลองจะมีผลการตอบสนองของระบบจำลองคล้ายกับผลของระบบจำลองสำหรับกรณีที่ 3.1 และ 3.2 และเช่นเดียวกันการประมาณค่าแรงบิดของระบบจำลองในกรณีที่ 3.3 นี้ระบบจำลองยังคงสามารถประมาณค่าแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพถ้าหากระบบจำลองนั้นมีทั้งตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

สำหรับทั้ง 3 กรณี คือ กรณีที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ในส่วนของผลการตอบสนองของระบบจำลองเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีตัวสังเกตและตัวชดเชยจะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของระบบจะมีลักษณะคล้ายกับองศาของมุมลื่นปึกผีเสื้อที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระบบจำลองไม่ทราบค่าแรงบิดมารบกวนต่อระบบจำลอง และผลการตอบสนองของระบบก็จะไม่มีลักษณะที่คล้ายกับระบบจริง ซึ่งผลการจำลองในส่วน of ระบบจำลองที่มีตัวสังเกตจะเห็นว่าระบบจำลองนั้นมีผลการตอบสนองที่คล้ายกับระบบจริงในช่วงที่มีแรงบิดรบกวนจากภายนอก แต่ยังคงมีความผิดพลาดในส่วน of ความเร็วรอบของระบบจำลอง โดยส่วน of ค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบนั้นจะใช้ตัวชดเชยค่าแรงบิดรบกวนประมาณหาค่าแรงบิดเพื่อให้ค่าความเร็วรอบของระบบจำลองมีค่าความเร็วรอบใกล้เคียงกับค่าความเร็วรอบจริง ซึ่งทั้ง 3 กรณีนี้จะเห็นได้ว่าระบบจำลองที่มีตัวสังเกต และมีตัวชดเชยนั้นจะให้ผลสอดคล้องกันทั้งกรณีที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ซึ่งตัวชดเชยสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกให้กับระบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ และค่าแรงบิดที่ชดเชยนั้นทำให้ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกตมีความถูกต้องมากขึ้น จึงทำให้ค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ของระบบจำลองนั้นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วของระบบเครื่องยนต์จริง

5.6 สรุป

จากผลการทดลองจำลองระบบการทำงานของเครื่องยนต์ที่มีตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการของ Gradient Method นั้นแสดงให้เห็นว่า ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่ไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบเท่านั้น สำหรับระบบที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบที่มีเฉพาะตัวสังเกตไม่สามารถทำให้ค่าผลการตอบสนองเป็นไปตามค่าผลการตอบสนองจริงได้ เนื่องจากระบบไม่รู้ค่าตัวแปรสเตตของเครื่องยนต์ที่ถูกรบกวนเข้ามาในระบบ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวชดเชยเข้ามาช่วยในการชดเชยค่าที่ไม่รู้ให้กับค่าตัวแปรสเตตที่ไม่รู้ค่าของระบบจำลองที่มีเฉพาะตัวสังเกต ซึ่งจากผลการทดลองของระบบจำลองที่มีตัวชดเชยแรงบิดสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของเครื่องยนต์ให้กับระบบทำให้ผลการตอบสนองของระบบดีขึ้นหรือถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับระบบเครื่องยนต์จริง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบจำลองเครื่องยนต์ที่ได้จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ที่ได้ค่าตัวแปรของระบบจำลองที่เหมาะสมและระบบจำลองซึ่งมีตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกได้ ดังนั้นวิธีดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์หรือพัฒนาแทนไดนาโมมิเตอร์ได้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้ ซึ่งได้แบ่งขั้นตอนของการออกแบบการทดลองดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จุดระเบิดแบบ 1 ลูกสูบ โดยมีอินพุตเป็นองศาของมุมลิ้นปีกผีเสื้อ และเอาต์พุตเป็นความเร็วรอบของเครื่องยนต์
 2. การหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยจินเนติกอัลกอริทึม โดยการค้นหาตัวแปรของระบบในขอบเขตความเป็นไปได้ของตัวแปรนั้น ๆ
 3. สร้างตัวสังเกต เพื่อหาค่าตัวแปรสแตตของเครื่องยนต์ที่ไม่สามารถวัดได้ เช่น ค่าแรงบิดที่รับกวนภายนอกจากเครื่องยนต์ ค่าความดันอากาศภายในเครื่องยนต์ เป็นต้น
 4. สร้างตัวชัดเจนแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้ที่กระทำต่อเครื่องยนต์ เพื่อให้ตัวสังเกตกับเครื่องยนต์จุดระเบิดมีการตอบสนองที่สอดคล้องกัน และสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกได้
- ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวสังเกต และตัวชัดเจนแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อระบบได้ และผลการทดลองได้ให้ผลการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่สอดคล้องกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการนี้เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้แทนไดนาโมมิเตอร์ และพัฒนาไปสู่ระบบการควบคุมแรงบิดได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

การประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยวิธีการสังเกตที่ชัดเจนแบบปรับตัวได้ เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้แทนไดนาโมมิเตอร์ มีข้อเสนอแนะดังนี้

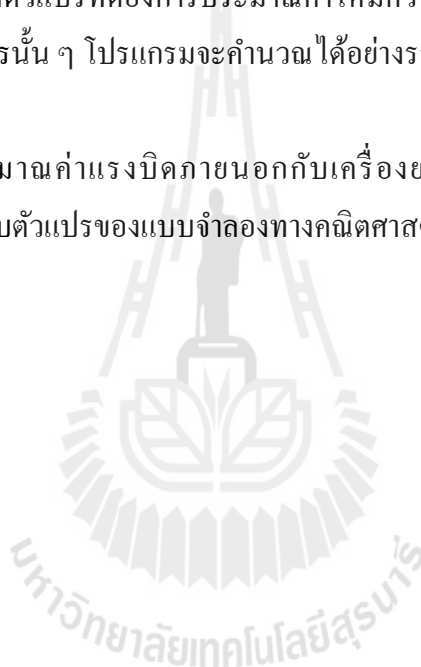
1. ในการเก็บข้อมูล เราจำเป็นต้องเก็บข้อมูลที่ได้จากเครื่องยนต์ โดยมีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมที่ทำการหาค่าตัวแปรของระบบ เนื่องจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ นั้นจะมีผลต่อเอาต์พุตของระบบ
2. ในการเชื่อมโยงข้อมูลที่ได้จากเครื่องยนต์ และโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์นั้น ถ้าต้องการประมาณค่าแรงบิดในขณะที่ทำการเก็บข้อมูลจากเครื่องยนต์

ไปพร้อมกันนั้น ควรเลือกใช้โปรแกรมที่สามารถทำการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลของเครื่องยนต์ได้ภายในโปรแกรมเดียว เพื่อที่จะทำให้ประมาณค่าแรงบิดไปพร้อมกับการเก็บข้อมูล

3. เกี่ยวกับระบบจำลอง ถ้าระบบจำลองนั้นหากทราบสมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเครื่องยนต์ และมีผลกระทบต่อเครื่องยนต์นั้น จะทำให้ระบบจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบเครื่องยนต์จริงมากยิ่งขึ้น

4. การระบุเอกลักษณ์ของระบบหากไม่กำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรที่ทำการประมาณค่าให้อยู่ในขอบเขตกับความเป็นไปได้ของตัวแปรนั้น ๆ จะทำให้โปรแกรมประมาณค่าตัวแปรได้ช้า และมีค่าความผิดพลาดของตัวแปรที่ได้ค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้ค่าที่ได้จะผิดไปความเป็นจริง แต่ถ้ากำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการประมาณค่าให้มีความใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงหรือความเป็นไปได้ของตัวแปรนั้น ๆ โปรแกรมจะคำนวณได้อย่างรวดเร็ว และค่าที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น

5. ในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกกับเครื่องยนต์ จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รายการอ้างอิง

- วีระศักดิ์ กรัยวิเชียร (1999). เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในและทฤษฎีการคำนวณ. (แปลจากต้นฉบับของ Heywood, J.B., 1998); วิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ. 564 หน้า
- Ali, A., and Blath, J.P. (2006). Application of Modern Techniques to SI-Engine Torque Control. **Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications**, pp.2405-2410. October 4-6, 2006. Munich, Germany.
- Choi, S.B., Won, M.C., and Hedrick, J.K. (1994). Fuel-Injection Control of SI Engines. **Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control**, pp.1609-1614. December 14-16, 1994. Lake Buena Vista, Florida, U.S.A.
- Hendricks, E., Poulsen, J., Olsen, M.B., Jensen, P.B., Fon, M., and Jepsen, C. (1996). Alternative Observers for SI Engine Air/Fuel Ratio Control. **Proceedings of the 23rd Conference on Decision and Control (CDC)**, January 1, 1996. pp.2806-2811. Kobe, Japan.
- Hong, M., Shen, T., and Ouyang, M. (2009). Nonlinear Observer-Based Torque Control for SI Engine. **ICCAS-SICE International Joint Conference**, pp.4114-4119. August 18-21, 2009. Fukuoka, Japan.
- Ma, Y., Martynkova, G.S., Valaskova, M., Matejka, V., and Lu, Y. (2008). Effects of ZrSiO₄ in Non-metallic Brake Friction Materials on Friction Performance. **Tribology International**, Vol.41, No.3, March 2008. pp.166-174.
- Moraal, P.E. (1995). Adaptive Compensation of Fuel Dynamics in an SI Engine Using an Switching EGO Sensor. **Proceedings of the 34th Conference on Decision and Control**, Vol.1, pp.661-666. December 13-15, 1995. New Orleans, LA.
- Muske, K.R., Jones, J.C.P., and Franceschi, E.M. (2008). Adaptive Analytical Model - Based Control for SI Engine Air-Fuel Ratio. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Vol.16, No.4, July, 2008. pp.763-768.
- Ogata, K. (2002). **Modern Control Engineering**. (4th Edition), USA, Prentice Hall PTR. 964 pp.

- Pavkovic, D., Deur, J., and Kolmanovsky, I. (2009). Adaptive Kalman Filter-Based Load Torque Compensator for Improved SI Engine Idle Speed Control. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Vol.17, No.1, January, 2009. pp.98-101.
- Shiao, Y.J., and Moskwa, J.J. (1996). Model-Based Cylinder-by-Cylinder Air-Fuel Ratio Control for SI Engines Using Sliding Observers. **Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications**, pp.347-354. September 15-18, 1996. Dearborn, Miami, U.S.A.
- Yan, R., Li, H.Z., Dong, Z.Y., and Tang, H.J. (2009). Nonlinear Control Approaches for SI Engine Model with Uncertainties. **Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control** (held jointly with the 28th Chinese Control), pp.5440-5445. Shanghai, China.



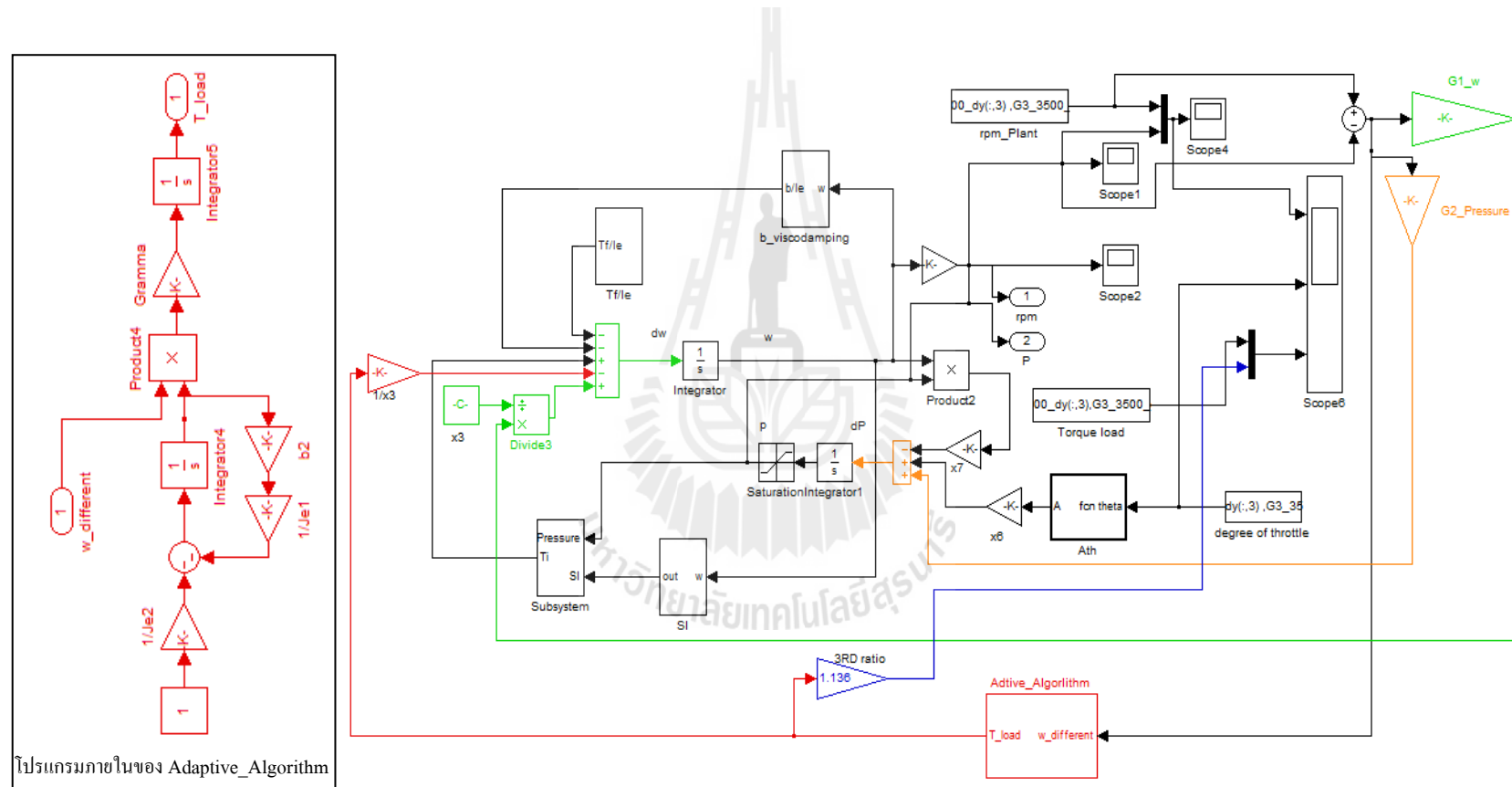


ภาคผนวก ก

ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

ก. ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

โปรแกรมการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากวิธีการ Gradient Method



รูปที่ ก.1 แสดงโปรแกรมสำหรับประมาณค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method



ภาคผนวก ข

โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องยนต์

ข. โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องยนต์

```
function f = IDEN_EULER_ENGINE(x)

clc

a = 7.82e-3; %constant from speed model
b = 7.35e9; %constant from pressure model
sum_error1=0;

load data_new %load data into this program

h=0.1;

We(1)=157; %initial speed
Pm(1)=53500; %initial pressure

%*****model*****
*
for i=1:1:3001
    y = x(2)*(30/pi)*We(i) + x(9);

%*****speed*****
    We(i+1)=We(i)+((a*x(1)*y*Pm(i)*x(8))/(x(3)))-(x(4)/x(3))-
    (x(5)*We(i)/x(3))*h;

%*****pressure*****
    Pm(i+1)=Pm(i)+((b*(pi/4)*((22e-3)^2)*(1-
    (cos((pi/180)*data_new(i,2))/cos(2.5*pi/180))))*x(6))-
    (x(7)*We(i)*Pm(i))*h;

%*****sum_error*****

    sum_error1=sum_error1+(abs(((data_new(i,3)))-
    We(i)*(30/pi))/(data_new(i,3)))*100;

end

%***** End model*****

sum=(sum_error1);

f = (sum/3001);

return
```

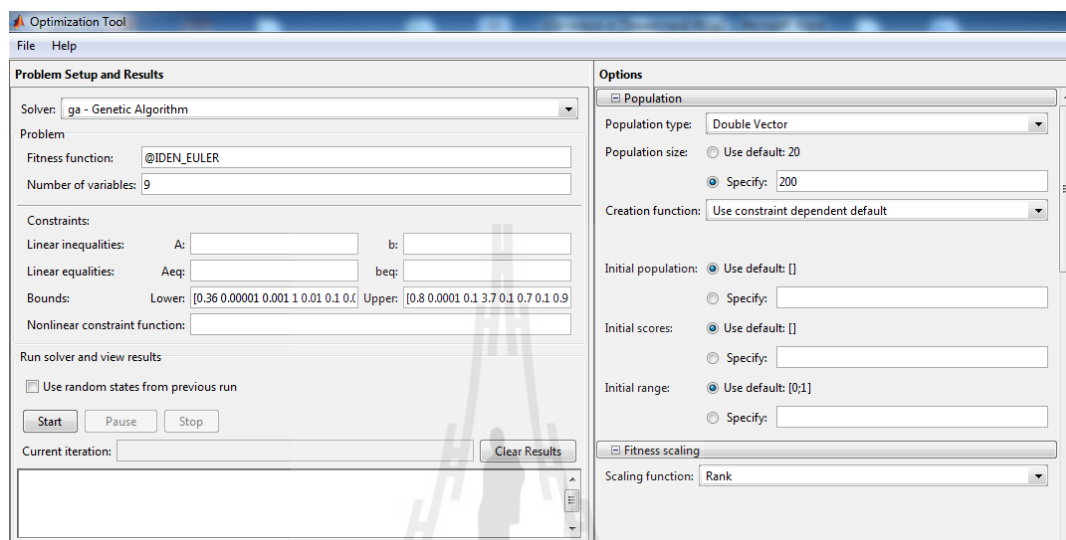


ภาคผนวก ค

การใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม ในการระบุเอกลักษณ์

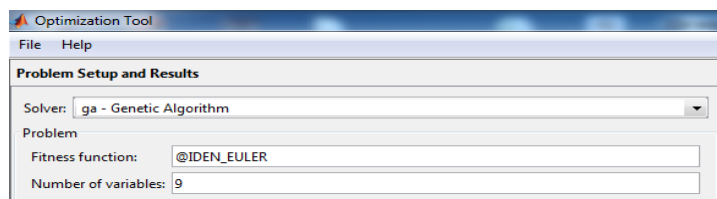
ค. การใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม ในการระบุเอกลักษณ์

1. พิมพ์คำสั่ง “gatool” ลงในหน้าต่าง “command line” ของโปรแกรม MATLAB จะปรากฏหน้าต่างของ GATOOL ดังแสดงในรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 หน้าต่าง gatool

2. ใส่ค่าฟังก์ชันโดยใช้อักษร @ นำหน้าชื่อของฟังก์ชัน และใส่จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการหาดังแสดงในรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 การตั้งค่าวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร

3. กำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรค่าต่ำสุด และสูงสุดของตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ ก.3

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: [0.86 0.00001 0.001 1 0.01 0.1 0.1] Upper: [0.8 0.0001 0.1 3.7 0.1 0.7 0.1 0.9]

Nonlinear constraint function:

รูปที่ ก.3 การกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการค้นหา

4. การใส่จำนวนประชากร (Population Size) โดยไปที่ Option => Population โปรแกรมจะกำหนดค่าพื้นฐานจำนวนการสุ่มหาให้เท่ากับ 20 ถ้าต้องการปรับทำได้โดยเลือก Population Size => Specify แล้วระบุจำนวน แสดงดังรูป ก.4

Options

Population

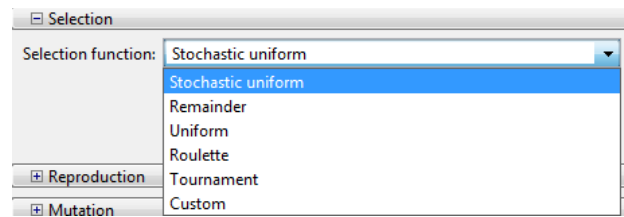
Population type: Double Vector

Population size: ☐ Use default: 20 ☒ Specify: 200

Creation function: Use constraint dependent default

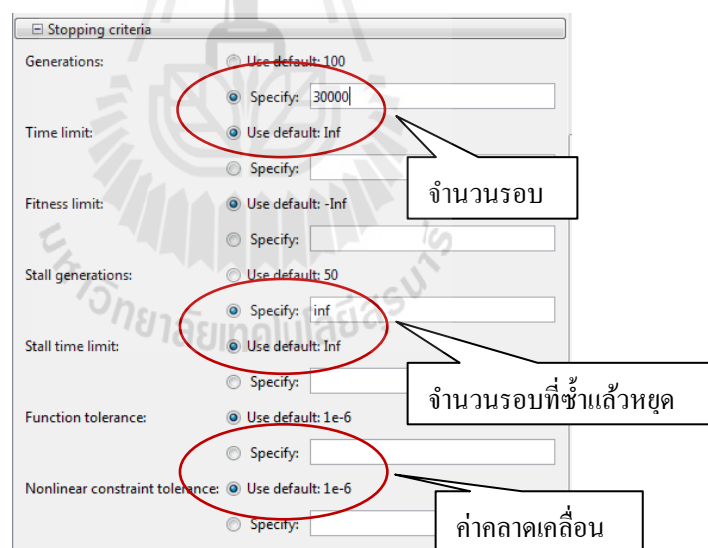
รูปที่ ก.4 แผนภาพแสดงการใส่ค่า Population Size

5. การกำหนดวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) โดยไปที่ Option => Selection มีวิธีการเลือกประชากรลูกหลานมีหลายวิธีเช่น วิธีการจัดอันดับ (Rank) วิธีเป็นรูปแบบ (Uniform) วิธีจัดการแข่งขัน (Tournament) วิธีของวงล้อรูเล็ต (Roulette) และวิธีการสุ่มแบบครอจกรวาล (Stochastic universal) แสดงดังรูปที่ ก.5



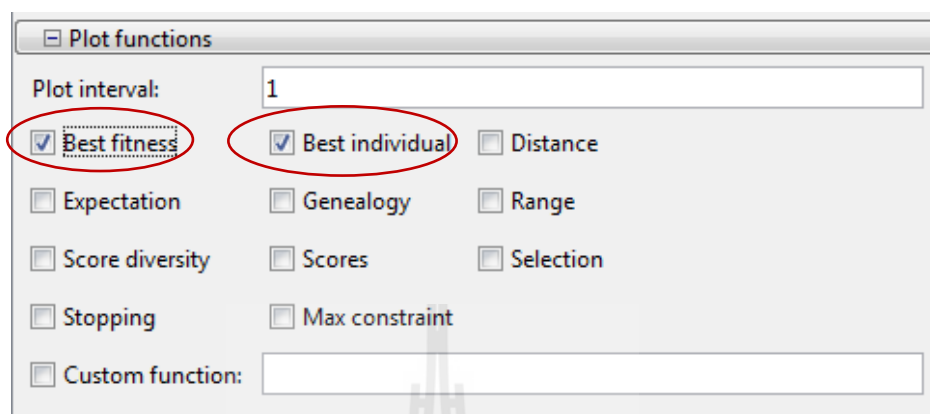
รูปที่ ค.5 แผนภาพแสดงการเลือก Selection

6. การกำหนดจำนวนรอบของการค้นหาและกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทำได้โดยไปที่ Option => Stopping criteria => Generations เพื่อกำหนดจำนวนรอบ กำหนดช่วงเวลาในการรัน โดย Option => Stopping criteria => Time limit กำหนดจำนวนรอบที่มีคำตอบเท่าเดิมแล้วหยุดทำงาน โดย Option => Stopping criteria => Stall Generations กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ โดย Option => Stopping criteria => Function tolerance แสดงดังรูปที่ ค.6



รูปที่ ค.6 แผนภาพแสดงการเลือกจำนวนรอบและค่าคลาดเคลื่อน

7. การแสดงกราฟ โดย Option => Plot Function => Best fitness และ Bestindividual แสดงดังรูปที่ ค.7



รูปที่ ค.7 แผนภาพแสดงการเลือกแสดงกราฟ

8. เริ่มทำการค้นหาโดยกดปุ่ม “start”



ภาคผนวก ง

รายละเอียดของเซนเซอร์วัดแรงบิด (Torque Transducer)

ง. รายละเอียดของเซนเซอร์วัดแรงบิด (Torque Transducer)

Specifications

Type		T5					
Accuracy class		0,1					
Nominal torque	N m	10	20	50	100	200	
Nominal sensitivity (nominal output signal at nominal torque)	mV/V			2			
Sensitivity tolerance	%			< ± 0.2			
Temperature effect per 10 K in the nominal temperature range	%			< ± 0.1			
On output signal (related to actual value)	%			< ± 0.1			
On zero signal (related to nominal sensitivity)	%			< ± 0.1			
Linearity deviation, including hysteresis, related to nominal sensitivity	%			< ± 0.1			
Relative standard deviation of reproducibility according to DIN 1319 (related to variation of output signal)	%			< ± 0.05			
Input resistance at reference temperature	Ω			350 ± 1.8			
Output resistance at the reference temperature	Ω			350 ± 1.5			
Maximum permissible excitation voltage	V			20			
Nominal range of the excitation voltage	V			0.5...12			
Reference temperature	°C [°F]			+23 [+73.4]			
Nominal temperature range	°C [°F]			+10...+60 [+50...+140]			
Service temperature range	°C [°F]			-10...+60 [+14...+140]			
Storage temperature range	°C [°F]			-50...+70 [-13...+158]			
Mechanical values (related to nominal torque)							
Static limit load	%			150			
Static breaking load	%			300			
Bending limit moment ¹⁾	N·m	1.2	2.3	6	11	23	
Axial limit force ¹⁾	kN	0.6	1.9	3.5	5.5	8.8	
Lateral limit force ¹⁾	N	9	26	50	80	125	
Torsion angle at nominal torque, approx.	degrees			0.85			
Moment of inertia	kg·m ² × 10 ⁻³		0.041		0.047		
Maximum permissible speed	rpm			4000			
Service life of the slipping system, approx.	revol.			3×10 ⁸			
Vibration amplitude to ISO/R 373 (related to the nominal torque M _N) ²⁾	%			70 (Peak-to-peak)			
Additional reliability data							
Mechanical impact test, degree of precision to IEC 68-2-27-1987							
Number	n			1000			
Duration	ms			3			
Acceleration	m/s ²			500			
Vibration stress test, degree of precision to IEC 68-2-6-1982							
Frequency range	Hz			5...65			
Duration	h			1.5			
Acceleration	m/s ²			50			
Protection class according to EN 60529				IP 50			
Weight, approx.	kg		0.5		0.6		

ง.1 รายละเอียดของเซนเซอร์วัดแรงบิด (Torque Transducer)

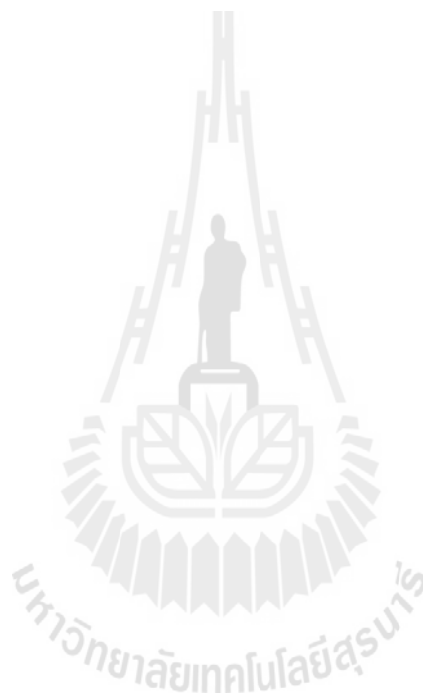


ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Kumchoo, Y., Dolwichai, T., Srisertpol, J., and Nantasukon, J. (2012). Load Torque Estimation of SI Engine using Adaptive Observer - Compensator. **The 26th Mechanical Engineering Conference**, CD ME – NETT 26th, DRC2024, 7pp. 24 - 27 October. Chiangrai, Thailand.



DRC2024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

การประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยวิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ Load Torque Estimation of SI Engine using Adaptive Observer-Compensator

ยุทธพร คำชู*, ธีทัต ตลิวชัย, จิระพล ศรีเสริมผล และ จักรกานันท์ นันทสุคนธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 3000

*ติดต่อ: yuthy.kumchoo@hotmail.com, 085-4940819

บทคัดย่อ

ไดนาโมมิเตอร์(Dynamometer) เป็นอุปกรณ์วัดกำลังของเครื่องจักรต้นกำลังที่มีความสำคัญต่อการวิจัยพัฒนาในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิจัยพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ดัดแปลงให้สามารถใช้เชื้อเพลิงทางเลือกประเภทต่างๆได้ การให้ภาระกรรมของไดนาโมมิเตอร์กับเครื่องยนต์ระหว่างการปรับแต่งอาศัยหลักการของการดูดกลืนพลังงาน (Energy Absorption) จากเครื่องยนต์ ในขณะที่เดียวกันมีการวัดแรงบิด (Torque) และความเร็วเชิงมุม (Rotational Speed) ของเครื่องยนต์นั้นๆ โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดตามวิธีการดูดกลืนพลังงาน ได้แก่ การใช้ระบบชลศาสตร์ (Hydraulic), ระบบอุทกสถิต (Hydrostatic) และ ระบบไฟฟ้า (Electric) ซึ่งแต่ละระบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามไดนาโมมิเตอร์ที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่และมีราคาแพง ทำให้ผู้ปรับแต่งเครื่องยนต์ไม่สามารถจัดหามาใช้ได้โดยทั่วไป ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณแรงบิดภาระกรรม โดยใช้วิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้(Adaptive observer-compensator) ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เพื่อแทนไดนาโมมิเตอร์ได้

คำหลัก: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์, การประมาณค่าตัวแปร, การสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้

Abstract

Dynamometer is power measure device of engine prime mover which is an important part for engine developing in several directions. Especially, the research of performance modification in the internal combustion engine for be used the several of alternative fuel. The principal of the dynamometer loading applied with the engine is used the energy absorption from the engine. In addition, the torque and rotational speed of the engine are measured. The general of dynamometer are classify by several type as follow the energy absorption method such as, the hydraulic type, hydrostatic type, and electric eddy current type. The merit and demerit of individual dynamometer type are several different. In usually, the large size of import dynamometer is so expensive. In addition, the general dynamometers are not flexible for internal combustion engine research tuning. So that, it effect to the engine modifier cannot fulfill. This paper are presents the estimate the engine load torque using the adaptive observer-compensator that can estimate engine state variables and calculate engine load torque simultaneously. Therefore, the method has ability to apply and implement as dynamometer.

Keywords: Mathematical model of the engine, Parameter estimation, Adaptive observer-compensator

1.เนื้อหา

ในบทความนี้เสนอการประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์โดยใช้วิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ ในส่วนที่ไม่ทราบค่าตัวแปรของเครื่องยนต์จะใช้วิธีการของจินตคณิตอัลกอริทึม(Genetic Algorithm) ซึ่งเมื่อค่า

ของตัวแปรในระบบของเครื่องยนต์ทราบค่าตัวแปรทำให้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองระบบเครื่องยนต์ได้ และเมื่อทราบค่าตัวแปรของระบบเครื่องยนต์ จะสามารถสร้างตัวสังเกตได้บนพื้นฐานของค่าตัวแปรของระบบที่คงที่และเป็นระบบเชิงเส้น(linear system)ได้และ



การประมาณค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ หาได้จากตัวสังเกตการ ในการประมาณค่าแรงบิดนั้นระบบจะต้องไม่ถูกรบกวนจากแรงกระทำภายนอกเพราะจะทำให้ตัวสังเกตการประมาณค่าแรงบิดไม่ถูกต้อง ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากแรงกระทำภายนอก ทำได้โดยสร้างตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive compensator) ทำการปรับค่าแรงกระทำแล้วส่งไปให้ตัวสังเกต หากค่าความแตกต่างของระบบจริงและระบบจำลองมีค่าลดลง ตัวสังเกตการจะสามารถประมาณค่าต่างๆของระบบได้

2. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซิน (SI Engine)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้การสร้างแบบจำลองระบบของเครื่องยนต์ อาศัยหลักการพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ กลศาสตร์การไหลและกลศาสตร์ของแข็ง โดยทั้ง 3 หลักการนี้จะมีสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น สมการเชิงซ้อนและค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แบบจำลองโดยทั่วไปประกอบด้วย

2.1 แบบจำลองเส้นทางการไหลของอากาศ (Air Path Model)

สมการอัตราการไหลมวลของอากาศไหลผ่านลิ้นปีกผีเสื้อ ($\dot{m}_{at}$) ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{at} = C_t \frac{\pi}{4} D^2 \frac{P_{amb}}{\sqrt{RT_{amb}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} (1 - \cos \phi) PRI \quad (1)$$

PRI = ฟังก์ชันที่ผลต่อความดันในการไหลของอากาศผ่านลิ้นปีกผีเสื้อ

$$PRI = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{p_r - p_c}{1 - p_c}\right)^2} & p_r > p_c \\ 1 & p_r \leq p_c \end{cases} \quad (2)$$

โดย $p_r = \frac{P_{man}}{P_{amb}}$ และ p_c คืออัตราความดันวิกฤต

สามารถสมมติให้มีค่าเท่ากับ 0.5283

C_t = สัมประสิทธิ์อัตราการไหล

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นลิ้นปีกผีเสื้อ [m]

P_{amb} = ความดันในสถานะนิ่ง [N/m^2]

T_{amb} = อุณหภูมิในสถานะนิ่ง [K]

R = ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ

k = อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ [$k = \frac{c_p}{c_v}$]

θ = มุมของแผ่นลิ้นปีกผีเสื้อ [rad]

p_{man} = ความดันในท่อร่วม [N/m^2]

T_{man} = อุณหภูมิในท่อร่วม [K]

ที่อากาศที่ท่อร่วมไอดีพิจารณาเป็นปริมาตรแข็งเกร็ง (rigid volume) (V_m) กับอัตราการไหลของมวลอากาศผ่านลิ้นปีกผีเสื้อเข้าไปในท่อร่วมไอดี ($\dot{m}_{at}$) จะได้สมการ

$$\dot{P}_{man} = \frac{RT_{man}}{V_m} \dot{m}_{at} - \frac{V_d \omega}{4\pi V_m} \eta_v P_{man} \quad (3)$$

P_{man} = ความดันในท่อร่วม [N/m^2]

T_{man} = อุณหภูมิในท่อร่วม [K]

R = ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ

V_d = ปริมาตรของกระบอกสูบ

V_m = ปริมาตรของท่อร่วมไอดี

η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

ω_e = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ซึ่งค่า η_v จากสมการที่ (1) เป็นการยากในการหาค่าตัวแปรดังกล่าว ฉะนั้นจึงต้องย่อสมการเป็นดังสมการที่ (4)

$$\eta_v \cdot p_{man} = s p_{man} - y \quad (4)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ $s > 0, y > 0$ มีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัยเช่น อัตราส่วนกำลังอัด, อุณหภูมิของอากาศในท่อร่วมไอดีและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อนำสมการที่ (4) ไปแทนในสมการที่ (3) จะได้สมการ Air path Model ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\dot{P}_{man} = \frac{RT_{man}}{V_m} \dot{m}_{at} - \frac{V_d s}{4\pi V_m} \omega P_{man} + \frac{V_d y}{4\pi V_m} \omega \quad (5)$$

$$\dot{P}_{man} = C_1 \dot{m}_{at} - C_2 \omega P_{man} + C_3 \omega \quad (6)$$

เมื่อค่า C_1, C_2 และ $C_3 > 0$ และเป็นค่าคงที่เพราะว่า R, T_{man}, V_d และ V_{man} ประมาณค่าคงที่



2.2 แบบจำลองการสร้างแรงบิด (Torque Production model)

เมื่อใช้สูตรความเร็วหนาแน่นของอัตราการผลิตของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี ($\dot{m}_{ao}$) จะได้สมการ (7)

$$\dot{m}_{ao} = \frac{V_d \eta_v P_{man} n}{120 R T_{man}} \quad (7)$$

โดย n = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่อวินาที

เมื่อ อัตราการผลิตของมวลเชื้อเพลิง ($\dot{m}_f$) มีความสัมพันธ์กับอัตราการผลิตของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี ($\dot{m}_{ao}$) ซึ่งเป็นระบบควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (8)

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda L_{th}} \quad (8)$$

$\dot{m}_{ao}$ = อัตราการผลิตของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี

λ = อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ ($\lambda=1$)

L_{th} = theoretical air/fuel mass ratio = 14.7

และ ค่ากำลังบ่งชี้ (Indicated power) (P_i) ซึ่งเป็นกำลังที่ได้จากเพลาลูกเบี้ยว จากการเปลี่ยนรูปพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง หาได้จากสมการที่ (9)

$$P_i = H_u \eta_i \dot{m}_f \quad (9)$$

H_u = ค่าคงที่ของพลังงานเชื้อเพลิง

η_i = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

เมื่อแทนสมการ (7) และ (8) ในสมการที่ (9) จะได้แรงบิดจากการเผาไหม้ (T_{ind}) ดังสมการที่ (10)

$$T_{ind} = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4 \pi R \lambda L_{th} T_{man}} P_{man} \quad (10)$$

เมื่อเพิ่มฟังก์ชันการจู่ระบบ ($SI(\theta)$) ซึ่งเป็นข้อมูลจากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาในการจู่ระบบก่อนมุมมองจู่ระบบถึงจุดศูนย์ตาย (TDC) จะได้ฟังก์ชัน $SI(\theta)$ เพิ่มเข้ามาในสมการของแรงบิดจากการเผาไหม้ (T_{ind}) ดังสมการที่ (11)

$$T_{ind} = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4 \pi R \lambda L_{th} T_{man}} SI(\alpha) P_{man} \quad (11)$$

อย่างไรก็ตามหากมีการหมุนของเพลาลูกเบี้ยวจะเกิดแรงเสียดทาน (T_f) ขึ้นในระบบ เมื่อแทนเข้าไปในสมการ (11) จะได้สมการใหม่คือ

$$T_e = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4 \pi R \lambda L_{th} T_{man}} SI(\alpha) P_{man} - T_f \quad (12)$$

T_e = ค่าแรงบิดที่มีประสิทธิภาพ

2.3 แบบจำลองการหมุนของไดนาโมมิเตอร์ (Rotation Dynamic model)

ค่าพลศาสตร์การหมุนเครื่องยนต์ได้จากกฎข้อที่ 2 ของ Newton

$$I_e \dot{\omega} = T_e - T_L - b\omega \quad (13)$$

I_e = the engine rotational inertia

T_L = Load Torque

b = viscous damping constant of the crankshaft bearing

ω = angular speed of the engine

$\dot{\omega}$ = angular acceleration of the engine

3. การออกแบบตัวสังเกตการณ์

ค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนของการควบคุมระบบจะเพิ่มขึ้นหาก จำนวนของเซนเซอร์ที่ใช้มีมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วิธีการสังเกตโดยตัวสังเกตจะถูกออกแบบเพื่อการประมาณค่าของระบบผ่านการวัดค่าจริง ถ้าการสังเกตประมาณค่าของระบบได้เหมือนระบบจริง จะเป็นวิธีการประมาณค่าระบบโดยไม่ต้องทำการวัดค่าของระบบจริง และสมการของตัวสังเกตแสดงดังสมการที่ (14) และ (15)

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -\frac{b}{I_e} \hat{\omega} + \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4 \pi R \lambda L_{th} T_{man} I_e} SI(\alpha) P_{man} - \frac{T_f}{I_e} - \frac{T_L}{I_e} + e G_1 \quad (14)$$

$$\frac{d\hat{P}_{man}}{dt} = c_1 \dot{m}_{at} - c_2 \omega P_{man} + c_3 \omega + e G_2 \quad (15)$$

เมื่อ G_1 และ G_2 เป็น observer gain ($\wedge$) คือ

ค่าประมาณระบบ และ e คือค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความเร็วที่ได้จากการวัดและค่าความเร็วที่ได้จากการประมาณ ($e = \omega - \hat{\omega}$)

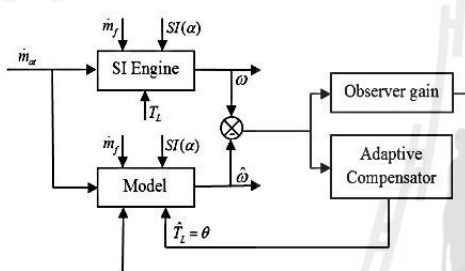
4. การควบคุมที่ปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง

(Model reference adaptive system or MRAS)

การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง มีหลักการในการทำงานคือ วิธีปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อให้ความแตกต่างของเอาต์พุตของแบบจำลอง (model) และระบบที่ต้องการ (plant) หดไป ระบบควบคุมประกอบด้วยแบบจำลอง ที่ได้ทำการสรรหาค่าที่



เหมาะสมที่สุดแล้ว เพื่อให้ได้การตอบสนองตามที่ต้องการ และนำมาใช้เป็นแบบจำลอง ในส่วนที่สร้างขึ้นมาก็คือ กลไกที่สามารถปรับได้ ที่ทำหน้าที่ปรับปรุง ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Controller) เพื่อใช้ ควบคุมให้ระบบหรือ plant ให้มีการตอบสนองตาม ตาม (Output) ของแบบจำลองตามต้องการจากรูปที่ 1 ให้ เอาท์พุทของแบบจำลองเป็น $\hat{\omega}$ เอาท์พุทของระบบเป็น ω และ e เป็นความแตกต่างระหว่างเอาท์พุททั้งสอง (error) และมีพารามิเตอร์ที่ทำการปรับค่า คือ θ .



รูปที่ 1 Diagram of MRAS

การปรับค่าพารามิเตอร์ (θ) เพื่อให้ความแตกต่างระหว่าง เอาท์พุทของแบบจำลองและระบบที่ต้องการหมดไป โดย กำหนดให้ Loss function (J) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (16)$$

การปรับค่าของตัวแปร (θ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (17)$$

เมื่อ

$$e = \omega - \hat{\omega} \quad (18)$$

$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{d\hat{\omega}}{d\theta} \quad (19)$$

โดยที่ $-\gamma$ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

5. ผลการจำลองระบบ

การจำลองระบบเครื่องยนตและส่วนควบคุมใน การศึกษาครั้งนี้ ค่าตัวแปรที่ใช้จำลองแสดงดังตารางที่ 1. โดยกำหนดความเร็วรอบเครื่องยนตที่ 680 rad/s

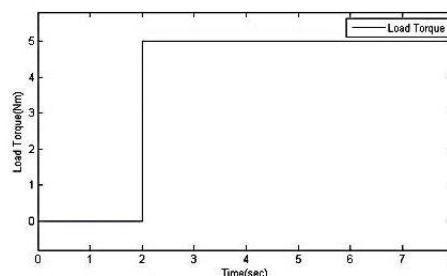
ตารางที่ 1 การประมาณค่าตัวแปรโดยวิธีจิ้นติกอัลกอริทึม

Parameter	Parameter estimate
b	0.007852
I_e	298.379826
X (1)	0.107603
C_1	6.983683
C_2	0.020539
C_3	0.178416
T_f	0.003931

เมื่อ X (1) คือ สมการ $\frac{H_u V_d \eta \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}}$

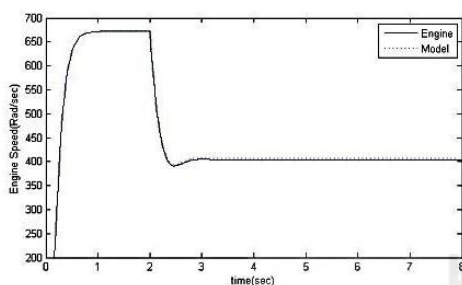
การจำลองครั้งนี้ จะแสดงผลของความเร็วรอบเครื่องยนต , ความดันในท่อไอติ,และแรงบิดของเครื่องยนตและผล การประมาณค่าตัวแปรที่ได้จากวิธีการสังเกตที่ชดเชย แบบปรับตัวได้ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของมวล อากาศไหลผ่านลิ้นปีกผีเสื้อ ($\dot{m}_{air}$) ที่ 58 g/s โดยกำหนด เงื่อนไขการจำลองทั้งสิ้น 4 เงื่อนไขคือ

เงื่อนไขที่1: ให้โหลดเป็นแบบ step function มี ค่า เท่ากับ 5Nm, ดังแสดงในรูปที่2 และการจำลองระบบ โดยไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้แสดงในรูปที่ 3, 4 และ 5.

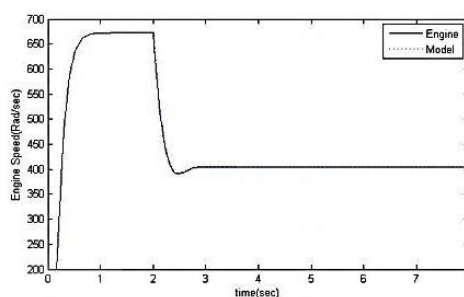


รูปที่ 2 The function of load torque

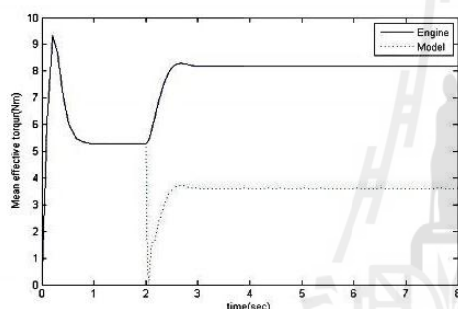
DRC2024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

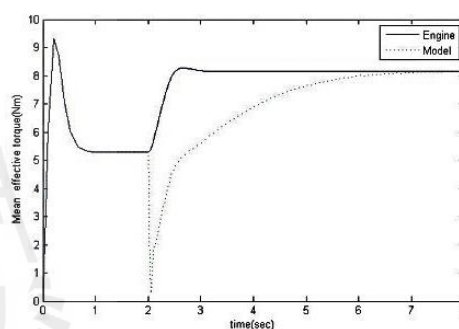
รูปที่ 3 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้



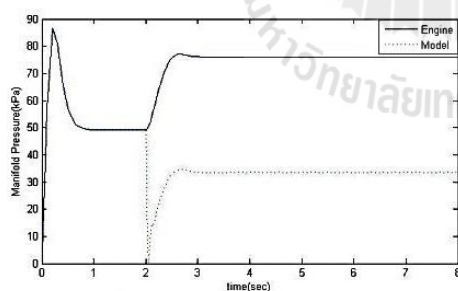
รูปที่ 6 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้



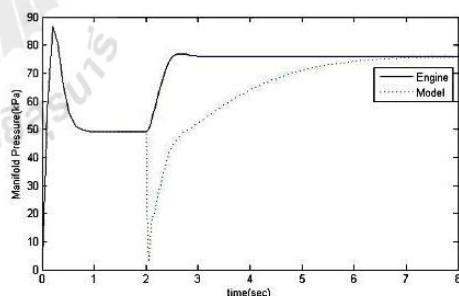
รูปที่ 4 ค่าแรงบิดที่ไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้



รูปที่ 7 ค่าแรงบิดที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้



รูปที่ 5 ค่าความดันที่ไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้

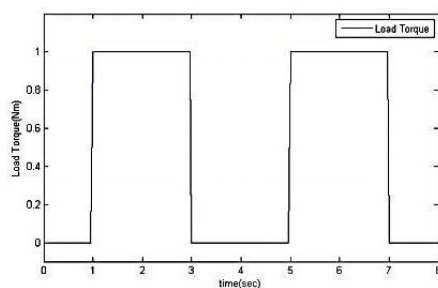


รูปที่ 8 ค่าความดันที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้

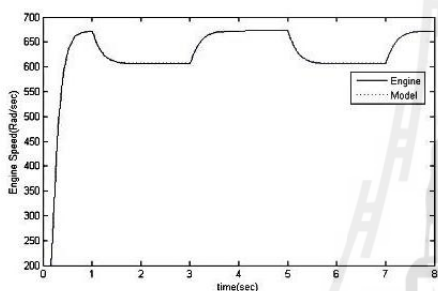
เงื่อนไขที่2: ให้โหลดเป็นแบบ step function มีค่าเท่ากับเงื่อนไขที่1และการจำลองระบบโดยไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้แสดงในรูปที่ 6, 7 และ 8

เงื่อนไขที่3: ให้โหลดเป็นแบบ Pulse มีค่า amplitude เท่ากับ 1, Periodเท่ากับ4secs,Pulse Width=50 แสดงในรูปที่9 และการจำลองระบบโดยไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้แสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12.

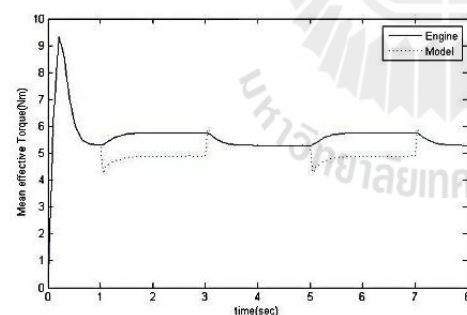
DRC2024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

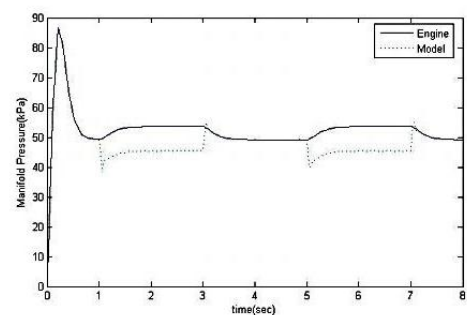
รูปที่ 9 the function of load torque



รูปที่ 10 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้

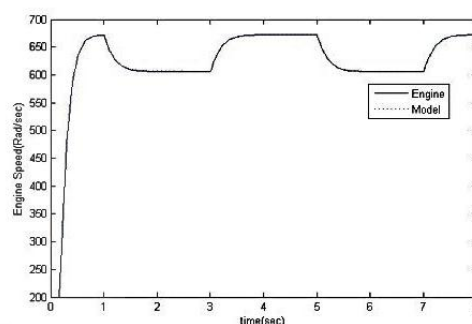


รูปที่ 11 ค่าแรงบิดที่ไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้

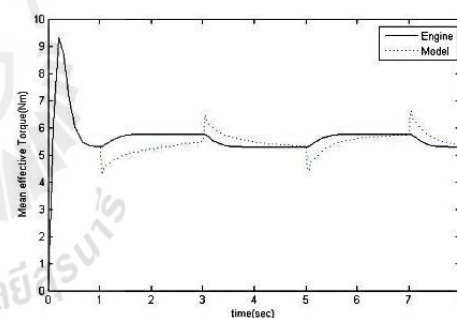


รูปที่ 12 ค่าความดันที่ไม่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้

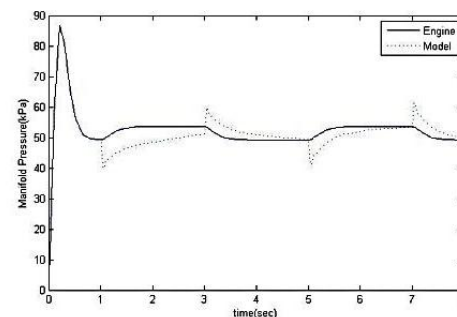
เงื่อนไขที่ 4: ให้โหลดเป็นแบบ Pulse เหมือนเงื่อนไขที่ 3 และการจำลองระบบโดยมีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้แสดงในรูปที่ 13, 14 และ 15.



รูปที่ 13 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้



รูปที่ 14 ค่าแรงบิดที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้



รูปที่ 15 ค่าความดันที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้



6.สรุปผล

จากผลการจำลองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จุดระเบิดและตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้ พบว่าค่า output ของแบบจำลองที่มีตัวสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้จะมีลักษณะการปรับค่า output ของแบบจำลองเข้าหาค่า output ของระบบจริง ซึ่งในบทความแสดงให้เห็นถึงวิธีการประมาณค่าตัวแปรของระบบที่มีการใช้เซ็นเซอร์จำนวนน้อย และผลการทดลองสามารถประมาณค่าตัวแปรของระบบและค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ได้ นอกจากนี้วิธีการสังเกตที่ชดเชยแบบปรับตัวได้สามารถพัฒนาสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เพื่อแทนไดนาโมมิเตอร์ได้

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Pavel Deutsch and Ondrej Vysoky, "In-cycle thermodynamic model of linear combustion engine", Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications Munich, Germany, October 4-6, 2006
- [2] Paolo Lino, Member, IEEE, Bruno Maione, Member, IEEE, Claudio Amorese and Sisto De Matthaeis, "Modeling and Predictive Control of New Injection System for Compressed Natural Gas Engine" Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications Munich, Germany, October 4-6
- [3] ZHI-HU, SHANG LIU, RUN PIE, "Robust model predictive control of engine idle speed with disturbance observer", Proceeding of the Seventh International Conference on Mechanic Learning and Cybernetics, Kunming, 12-15 July 2008
- [4] Rui Yan, Haizhou Li, Zhao Yang Dong and Huajin Tang, "Nonlinear Control Approaches for SI Engine Model with uncertainties", Joint 48th IEEE conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009
- [5] Munan Hong, Tielong Shen, Member, IEEE, Minggao Ouyang, and Junichi Kako, "Torque Observers Design for Spark Ignition Engines With Different Intake Air Measurement Sensors", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, No. 1, January 2011
- [6] Toshihiro Aono and Takehiko Kowatari, "A Throttle Control Algorithm for Improving Response Based on the Characteristics of Electronic-Throttle-Control Actuator", The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2001), pp. 546-551
- [7] P.V. Manivannan, M. Singaperumal and A. Ramesh, "Development of an Idle Speed Engine Model using In-Cylinder Pressure Data and an Idle Speed Controller for a Small Capacity Port Fuel Injected SI Engine", International Journal of Automotive Technology (2011), Vol. 12, No. 1, pp. 11-20
- [8] Chanyut Khajorntraidet, and Jiraphon Srisertpol, "Torque Control for DC Servo Motor using Adaptive Load Torque Compensation", The 9th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSSE'10), Iwate, Japan, pp. 454-458, October (4-6) 2010.
- [9] Srisertpol, J. and Khajorntraidet, C. "Estimation of DC Motor Variable Torque Using Adaptive Compensation" Proceedings of 21st the Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2009), Guilin, China, June. 17-19, 2009, pp. 712-717.
- [10] Bo-Chiuan Chen, Yuh-Yih Wu, and Feng-Chi Hsieh, "Estimation of Engine Rotational Dynamics Using Kalman Filter Based on a Kinematic Model", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 59, NO. 8, OCTOBER 2010

ประวัติผู้เขียน

นายยุทธพร คำชู เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2529 ที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 ถึงมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมยานยนต์) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และในปี พ.ศ. 2552 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 3 (2) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 และ (3) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2 เป็นเวลา 3 ปี ระหว่างศึกษาระดับมหาบัณฑิตได้นำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง Load Torque Estimation of SI Engine using Adaptive Observer – Compensator ใน การ ประ ชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ในระหว่างวันที่ 24 - 26 ตุลาคม 2555 ณ จังหวัดเชียงราย มีรายละเอียดดังภาคผนวก จ.

