



การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรง ขณะทำงานโดยวิธี  
ทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

ON-LINE IDENTIFICATION OF DC MOTOR CONTROL PARAMETERS  
USING RECURSIVE LEAST-SQUARE



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 47917  
วัน, เดือน, ปี..... 24 ส.ค. 2546

b..... 113 1205x  
i..... 11310146

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ที่สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-37-7

113 1205x

**ON-LINE IDENTIFICATION OF DC MOTOR CONTROL PARAMETERS  
USING RECURSIVE LEAST-SQUARE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-9546-37-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**COPYRIGHT 2002**

มีการแก้ไขที่ทรงสน อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรง ขณะทำงาน โดยวิธี ทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด
นักศึกษา	นายเจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข
รหัสประจำตัว	42061062
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. สุเชียร เกียรติสุนทร

### บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอแนวการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด คือ ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  ค่าเวลาคงตัวทางกล  $\tau_m$  ค่าความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $R_a$  ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $L_a$  ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $K_b$  ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด  $b$  และโมเมนต์ความเฉื่อย  $J$  จากการทดลองกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และมอเตอร์จริงในห้องปฏิบัติการ เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบมอเตอร์แบบเดิม ได้แก่ วิธีลือคโรเตอร์และป้อนแรงดันไฟฟ้า พบว่าสะดวก ประหยัดเวลามากกว่า และสามารถหาพารามิเตอร์ในรูปแบบสมการทางกายภาพ ที่ทำความเข้าใจได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	On-line Identification of DC Motor Control Parameters Using Recursive Least-square
<b>Student</b>	Jadsada Tangkadmongkolsuk
<b>Student ID.</b>	42061062
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Suthian Kiatsunthorn

### ABSTRACT

This thesis proposes the concept of on-line parametric estimation of DC motors by recursive least-square method. The parameters of interest are Electrical time constant, Mechanical time constant, Armature inductance, Armature resistance, Motor torque constant, Back emf constant, Moment of inertia and viscous friction coefficient. From computer simulation and operational DC motor's experiment, compared with other conventional methods such as locked-rotor and step-voltage tests, the proposed method is easier and less time-consuming. Estimated parameters in physical model are easy to understand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตาจากอาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ สุเชียร เกียรติสุนทร ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำ ชี้ให้เห็นถึงข้อผิดพลาดต่างๆ และจัดหาอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ให้แก่ข้าพเจ้ามาตลอด

ขอขอบคุณ รศ. ดร. จงกล งามวิวิทย์ ดร. นนทวัฒน์ จุลเคชะ อ.พรสุข รติโรจน์อนันต์ ผศ. ดร. ชรินทร์ บุญลักษณานุสรณ์ และ อ.ถาวร เบญจนาสุทธิ์ ที่คอยให้คำแนะนำ และได้ถามถึงความคืบหน้าของการทดลองอยู่เสมอ

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ และให้คำแนะนำแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อุปการะ รวมทั้งเป็นผู้ให้กำลังใจ และคอยแนะนำแก่ข้าพเจ้า มาโดยตลอด

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ ที่กรุณาสับสนุนอุปกรณ์ สถานที่ และเงินทุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนในภาค รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องแล็บที่ให้ใช้อุปกรณ์ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านเป็นอย่างสูงมา ณ. โอกาสนี้ด้วย

เจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ศึกษาและวิจัย.....	1
1.2 ความน่าสนใจของปัญหาที่ศึกษา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์และการนำเสนอหลักการใหม่.....	2
1.4 ขอบเขตในการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการพิจารณา.....	3
บทที่2 มอเตอร์กระแสตรง.....	4
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรง.....	4
2.1.1 สเตเตอร์.....	4
2.1.2 โรเตอร์.....	5
2.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง.....	5
2.3 วิธีทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง.....	9
2.3.1 วิธีลือคโรเตอร์.....	9
2.3.1.1 ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์.....	9
2.3.1.2 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์.....	10
2.3.2 วิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า.....	11
2.3.2.1 ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์.....	12
2.3.2.2 โมเมนต์ความเฉื่อย.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่3 ทฤษฎี และหลักการของการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ.....	14
3.1 ระบบพลวัต.....	14
3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ.....	15
3.3 วิธีดลถอยเชิงเส้น.....	20
3.4 วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์.....	22
3.4.1 วิธีเกรเดียนต์.....	23
3.4.2 วิธีการทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด.....	27
3.5 การเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda_1$ และ $\lambda_2$ .....	33
3.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองชนิดสัญญาณต่อเนื่อง.....	37
บทที่4 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง.....	39
4.1 การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงวิธีล้อคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า.....	40
4.1.1 ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์.....	40
4.1.2 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์.....	40
4.1.3 ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ และค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	41
4.1.4 โมเมนต์ความเฉื่อย.....	42
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด.....	43
4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์ควบคุมของมอเตอร์กระแสตรง.....	43
4.2.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอรืมอเตอร์กระแสตรง.....	44
4.2.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ.....	46
4.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรง.....	51
4.2.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอรืมอเตอร์กระแสตรง.....	53
4.2.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุป.....	61
5.2 ปัญหาที่พบ.....	61
5.3 การแก้ไขข้อผิดพลาด.....	62
5.4 แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งาน และการพัฒนา.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์กระแสตรง.....	65
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์.....	40
4.2 การทดสอบค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์.....	41
4.3 พารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง.....	51
4.4 พารามิเตอร์ควบคุมของมอเตอร์กระแสตรง.....	51
4.5 พารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรง.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพตัดขวางของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร.....	4
2.2 วงจรเสมือนของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร.....	6
2.3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง.....	8
2.4 วงจรเสมือนอาร์เมเจอร์.....	9
2.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับกระแสอาร์เมเจอร์.....	10
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับกระแสอาร์เมเจอร์ (ก) กราฟแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์.....	11
(ข) กราฟกระแสอาร์เมเจอร์.....	11
2.7 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับความเร็วเชิงมุมมอเตอร์.....	12
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ (ก) กราฟแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์.....	13
(ข) กราฟความเร็วเชิงมุมมอเตอร์.....	13
3.1 ระบบพลวัต.....	14
3.2 โพลซาร์ตแสดงขั้นตอนการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ.....	17
3.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบดั้งเดิม.....	18
3.4 หลักการประมาณค่าพารามิเตอร์.....	19
3.5 การประมาณสมการเส้นตรงโดยวิธีถดถอยเชิงเส้น.....	20
3.6 เส้นโค้งวงปิดไอโซคริตเทียบเรียน.....	24
3.7 ภาพแสดงการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เกรเดียนต์.....	26
4.1 มอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบ.....	39
4.2 กระแสอาร์เมเจอร์.....	41
4.3 ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์.....	42
4.4 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	45
4.5 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง.....	46
4.6 บล็อกไดอะแกรมการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง โดยเพิ่มวงจรกรองความถี่ แบบดิจิทัลชนิดความถี่ต่ำผ่าน.....	47
4.7 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง.....	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ค่าความผิดพลาดของความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ.....	49
4.9 การประมาณพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง	
(ก) พารามิเตอร์ $a_1$ .....	49
(ข) พารามิเตอร์ $a_2$ .....	50
(ค) พารามิเตอร์ $b_0$ .....	50
4.10 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	54
4.11 บล็อกไดอะแกรมการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง โดยเพิ่มวงจรรองความถี่แบบดิจิทัลชนิดความถี่ต่ำผ่าน	
(ก) การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ครั้งที่ 1.....	55
(ข) การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ครั้งที่ 2.....	55
4.12 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง.....	56
4.13 ค่าความผิดพลาดของความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ.....	57
4.14 การประมาณพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง	
(ก) พารามิเตอร์ $a_1$ .....	57
(ข) พารามิเตอร์ $a_2$ .....	58
(ค) พารามิเตอร์ $a_3$ .....	58
(ง) พารามิเตอร์ $b_0$ .....	59
(จ) พารามิเตอร์ $b_1$ .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

การออกแบบระบบควบคุม จำเป็นต้องทราบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการ (process) เช่น สมการอนุพันธ์ (differential equation) สมการผลต่าง (difference equation) หรือ สมการภาวะ (state equation) เพื่อให้การออกแบบระบบควบคุมได้ผลตามวัตถุประสงค์

กรณีที่ไม่ทราบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการ เนื่องจากขาดความรู้ทาง วิทยาศาสตร์กายภาพของกระบวนการ หรือไม่สามารถทดสอบกระบวนการ สามารถเลือกวิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ (system identification) เพื่อหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด (Recursive Least Squares: RLS) เพื่อหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงรูปสมการอนุพันธ์ และหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ในรูปพารามิเตอร์ควบคุม (control parameter) และพารามิเตอร์ทางกายภาพ (physical parameters) ซึ่งทำความเข้าใจ และสามารถใช้ประโยชน์ได้ดีกว่า วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทั่วไปที่หาแบบจำลองคณิตศาสตร์รูปสมการผลต่าง

### 1.1 ปัญหาที่ศึกษาและวิจัย

1.1.1 การทดสอบหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบเดิม โดยวิธีล็อก โรเตอร์ (lock rotor test) เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า อาร์เมเจอร์ และความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า (step voltage test) เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล คือ ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และโมเมนต์ความเฉื่อย มีขั้นตอนยุ่งยาก และไม่สามารถทดสอบมอเตอร์ขณะกำลังปฏิบัติงาน

1.1.2 วิธีการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทั่วไป พิจารณาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการรูปสมการผลต่าง ซึ่งไม่สามารถแปลความหมายโดยตรงจากความรู้ทาง วิทยาศาสตร์กายภาพ ทำให้ทำความเข้าใจยาก แยกต่างจากแบบจำลองคณิตศาสตร์รูปสมการอนุพันธ์ที่มีความหมายโดยสมบูรณ์ จึงทำความเข้าใจได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 1.2 ความน่าสนใจของปัญหาที่ศึกษา

1.2.1 การทดสอบหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบเดิม คือ วิธีล็อก โรเตอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า มีขั้นตอนยุ่งยาก ล้นเปลืองเวลามาก ไม่

สามารถทดสอบมอเตอร์ขณะกำลังปฏิบัติงาน และไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมอเตอร์ระหว่างปฏิบัติงาน วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบสามารถทดสอบหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงได้รวดเร็วขณะมอเตอร์กำลังปฏิบัติงาน และแบบจำลองคณิตศาสตร์เปลี่ยนแปลงตามความเป็นจริงตลอดเวลา

- 1.2.2 วิธีการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบรูปสมการผลต่าง ทำให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการไม่มีความหมายโดยตรงตามความรู้ทางวิทยาศาสตร์กายภาพ ทำให้ความเข้าใจได้ยาก วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบรูปสมการอนุพันธ์ ทำให้ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความหมายสมบูรณ์ตามความรู้ทางวิทยาศาสตร์กายภาพ รูปแบบสมการไม่ซับซ้อน และใช้ประโยชน์ได้ง่าย

### 1.3 วัตถุประสงค์ และการนำเสนอหลักการใหม่

- 1.3.1 นำเสนอวิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเพื่อทดสอบหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง แทนวิธีลอคโรเตอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า ทำให้สามารถทดสอบมอเตอร์ขณะกำลังปฏิบัติงาน ลดขั้นตอนยุ่งยาก ไม่สิ้นเปลืองเวลาทดสอบ และได้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องตลอดเวลา
- 1.3.2 นำเสนอวิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบรูปสมการอนุพันธ์ แทนวิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบรูปสมการผลต่าง ทำให้ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความหมาย รูปแบบสมการไม่ซับซ้อน และใช้ประโยชน์ได้ง่าย

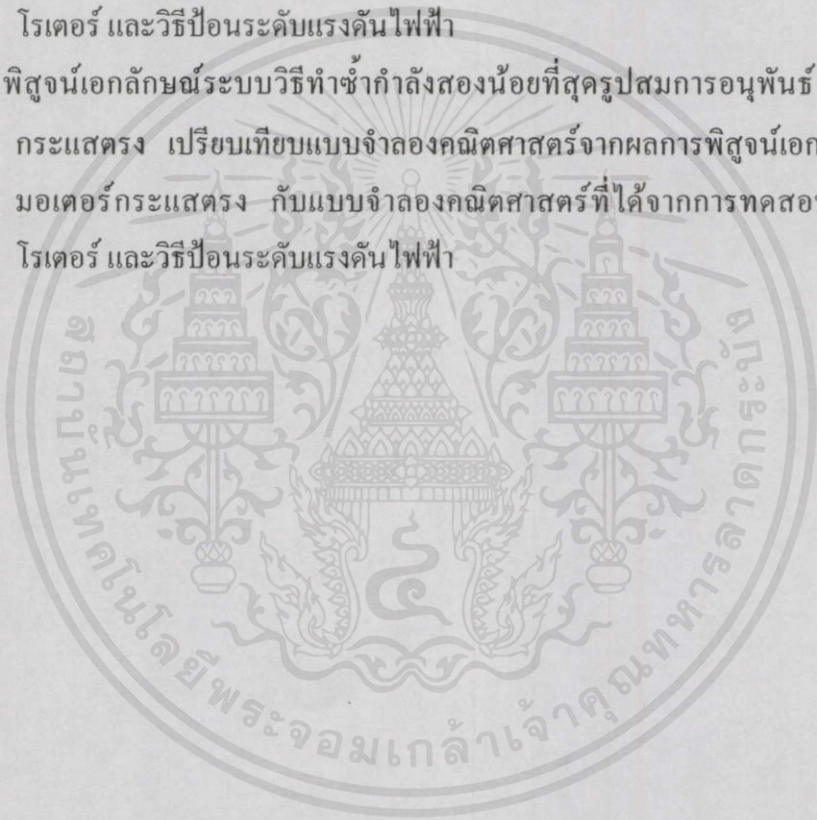
### 1.4 ขอบเขตในการวิจัย

- 1.4.1 พิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด หาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณต่อเนื่อง คือ ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  ค่าเวลาคงตัวทางกล  $\tau_m$  ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  และค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $K_b$
- 1.4.2 พิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด หาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงในรูปสมการทางกายภาพ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $R_a$  ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $L_a$  ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $K_b$  ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด  $b$  และโมเมนต์ความเฉื่อย  $J$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนการพิจารณา

- 1.5.1 ทดสอบหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง โดยวิธีลือคโรเตอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า
- 1.5.2 สร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีลือคโรเตอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า
- 1.5.3 พิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดรูปสมการอนุพันธ์ กับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง เปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ กับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีลือคโรเตอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า
- 1.5.4 พิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดรูปสมการอนุพันธ์ กับมอเตอร์กระแสตรง เปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง กับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีลือคโรเตอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

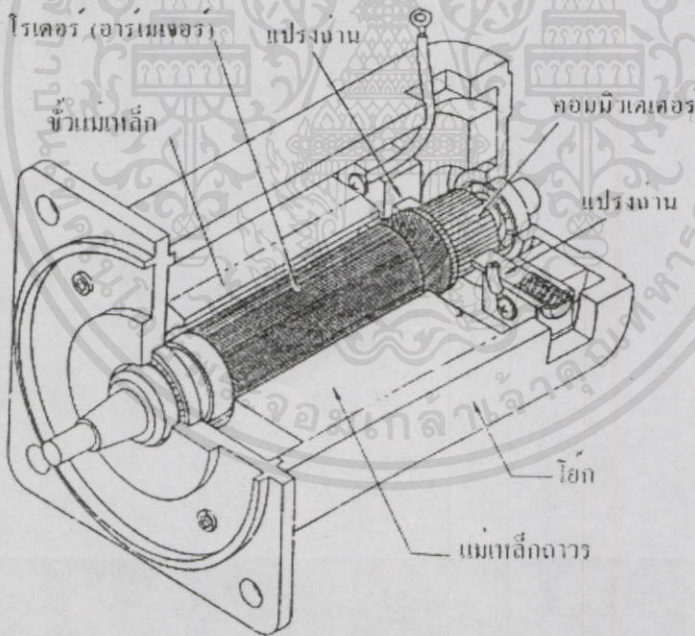
### มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายประเภท เช่น มอเตอร์กระแสตรง มอเตอร์กระแสสลับ และสเต็ปป์มอเตอร์ (stepping motor) ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (permanent-magnet) เป็นมอเตอร์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการควบคุมโดยระบบอัตโนมัติ

การออกแบบระบบควบคุมของมอเตอร์กระแสตรง จำเป็นต้องทราบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เพื่อให้การออกแบบระบบควบคุมได้ผลตามวัตถุประสงค์

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ และวิธีหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร

#### 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรง [1]



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

##### 2.1.1 สเตเตอร์ (stator) ส่วนหุคหนึ่งของมอเตอร์ ประกอบด้วย

1. โย้ก (yoke หรือ frame) คือ โครงสำหรับติดตั้งมอเตอร์ โย้กทำหน้าที่ยึดขั้วแม่เหล็กกับสเตเตอร์ และเชื่อมวงจรแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสองของมอเตอร์ให้ครบวงจร

2. ขั้วแม่เหล็ก (pole) คือ ส่วนสร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดแรงบิด (torque) เมื่อมีกระแสไหลในอาร์เมเจอร์ ขั้วแม่เหล็กประกอบด้วย แกนขั้วแม่เหล็ก (pole core) และ ขดลวดสนามแม่เหล็ก (field coil)

### 2.1.2 โรเตอร์ (rotor) ส่วนเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ประกอบด้วย

1. อาร์เมเจอร์ (armature) คือ ส่วนที่เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้า และเกิดแรงบิดจากสนามแม่เหล็ก อาร์เมเจอร์ประกอบด้วยแกนอาร์เมเจอร์ (armature core) ลักษณะเป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ (laminate) วางซ้อนเป็นรูปทรงกระบอกเพื่อลดการเกิดกระแสไหลวน (eddy current) ผิวด้านนอกของแกนอาร์เมเจอร์มีร่อง (slot) สำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature winding) ขดลวดอาร์เมเจอร์ทำหน้าที่เชื่อมวงจรไฟฟ้าระหว่างแปรงถ่าน (carbon brushes) กับโรเตอร์

2. แปรงถ่าน ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอาร์เมเจอร์ แปรงถ่านผลิตจากตัวนำ เช่น กราไฟต์ (graphite) เงิน หรือทองคำขาว มอเตอร์กระแสตรงต้องมีแปรงถ่านอย่างน้อย 1 คู่

3. คอมมิวเตเตอร์ (commutator) คือ แท่งตัวนำประกอบด้วยซี่ทองแดงรวมกันเป็นรูปทรงกระบอกและมีฉนวนระหว่างซี่ทองแดงเพื่อป้องกันการลัดวงจร คอมมิวเตเตอร์เป็นจุดต่อระหว่างขดลวดอาร์เมเจอร์ และแปรงถ่าน ทำหน้าที่ป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าอาร์เมเจอร์ ในกรณีที่ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์กระแสตรง

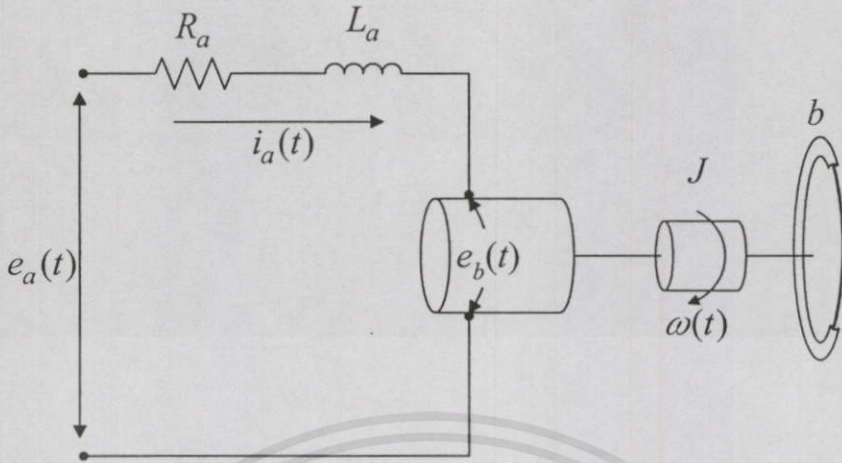
## 2.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง [2]

วงจรเสมือนของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร แสดงดังรูปที่ 2.2 สามารถแสดงโดยสมการ ดังนี้

สมการแรงดันไฟฟ้า

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{d i_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (2.1)$$

เมื่อ	$e_a$	แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (โวลต์)
	$i_a$	กระแสอาร์เมเจอร์ (แอมแปร์) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
	$R_a$	ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (โอห์ม) ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปลงโฆษณาขดลวดหรือสิ่งอื่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
	$L_a$	ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (เฮนรี่)
	$e_b$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (โวลต์)



รูปที่ 2.2 วงจรเสมือนของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร

สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back electromotive force)

$$e_b(t) = k \Phi \omega(t) \tag{2.2}$$

และ

$$k = \frac{Z_a P}{2 \pi a}$$

เมื่อ	$\omega$	ความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ (เรเดียน/วินาที)
	$\Phi$	สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร (เวเบอร์)
	$k$	ค่าคงที่มอเตอร์
	$Z_a$	จำนวนแท่งตัวนำทั้งหมดในอาร์เมเจอร์
	$a$	จำนวนวงจรขนาน
	$P$	จำนวนขั้วแม่เหล็ก

สมการแรงบิดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์  
 $T_m(t) = T_L(t) + J \frac{d \omega(t)}{dt} + b \omega(t)$  (2.3)

และ

$$T_m(t) = k \Phi i_a(t) \tag{2.4}$$

เมื่อ	$T_L$	ภาระแรงบิด (load torque) (นิวตัน-เมตร)
	$J$	โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) (กิโลกรัม-เมตร <sup>2</sup> )
	$b$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากความหนืด (viscous-friction coefficient) (นิวตัน-เมตร/เรเดียน/วินาที)

สมการ (2.1) ถึง สมการ (2.4) แสดงรูปตัวแปลงลาปลาซ (Laplace's transform) ดังนี้

$$E_a(s) = R_a I_a(s) + s L_a I_a(s) + E_b(s) \quad (2.5)$$

$$E_b(s) = K_b \omega(s) \quad (2.6)$$

$$T_m(s) = T_L(s) + s J \omega(s) + b \omega(s) \quad (2.7)$$

$$T_m(s) = K_m I_a(s) \quad (2.8)$$

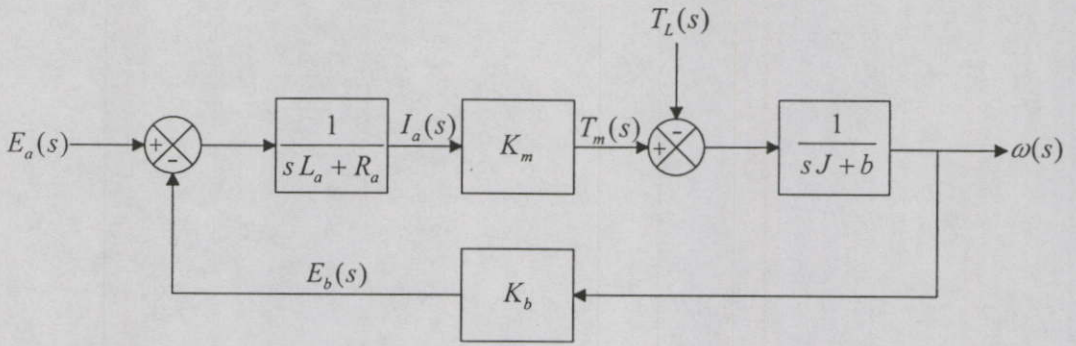
และ

$$k \Phi = K_m = K_b$$

เมื่อ	$K_m$	ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ (motor torque constant) (โวลต์/เรเดียน/วินาที)
	$K_b$	ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back emf constant) (โวลต์/เรเดียน/วินาที)

สมการ (2.5) ถึงสมการ (2.8) สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\omega(s)$  และ  $E_a(s)$  โดยไม่พิจารณาภาระแรงบิด  $T_L$  คือ

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{k\Phi}{(sL_a + R_a)(sJ + b) + (k\Phi)^2} \quad (2.9)$$

กำหนดให้

$$\tau_m = \frac{R_a J}{(k\Phi)^2} \quad (2.10)$$

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\tau_m$  ค่าเวลาคงตัวทางกล ((โอห์ม-กิโกรัม-เมตร<sup>2</sup>)/(โวลต์/เรเดียน/วินาที)<sup>2</sup>)  
 $\tau_e$  ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า (เฮนรี/โอห์ม)

แทนค่า  $\tau_m$  และ  $\tau_e$  จากสมการ (2.10) และสมการ (2.11) ในสมการ (2.9) เมื่อไม่พิจารณาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากความหนืด  $b$  เนื่องจากมีค่าน้อยมาก สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\omega(s)$  และ  $E_a(s)$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{1/k\Phi}{(s^2 \tau_m \tau_e + s \tau_m + 1)} \quad (2.12)$$

เนื่องจากค่า  $\tau_m$  มีค่ามากกว่า  $\tau_e$  มาก ดังนั้นสมการ (2.12) สามารถแสดงได้ใหม่ ดังนี้

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{1/k\Phi}{(s\tau_m + 1)} \quad (2.13)$$

## 2.3 วิธีทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง

การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง ประกอบด้วย วิธีล๊อคโรเตอร์ และวิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า [3][4]

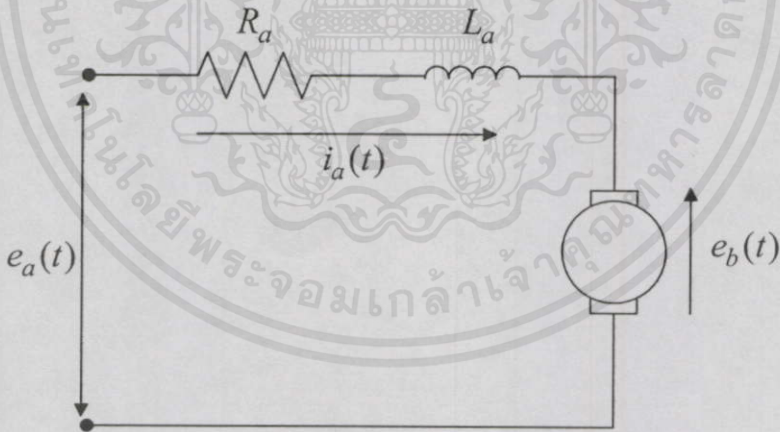
### 2.3.1 วิธีล๊อคโรเตอร์

วิธีล๊อคโรเตอร์ เป็นวิธีทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรง คือ ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ และความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

#### 2.3.1.1 ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์สามารถหาโดยพิจารณาวงจรเสมือนอาร์เมเจอร์ ดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 วงจรเสมือนอาร์เมเจอร์

พิจารณาสมการ (2.1) และสมการ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง i\_a(t) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{d i_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (2.1)$$

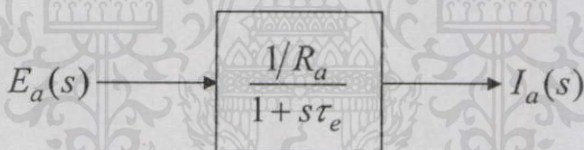
$$e_b(t) = k \Phi \omega(t) \quad (2.2)$$

เมื่อความเร็วเชิงมุมมอเตอร์  $\omega(t)$  มีค่า 0 และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $e_b(t)$  มีค่า 0 พิจารณาสมการ (2.1) เมื่อกระแส  $i_a(t)$  คงที่ และแรงดันไฟฟ้า  $v_{L_a}(t)$  มีค่า 0 กำหนดความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $R_a$  จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  และกระแสอาร์เมเจอร์  $i_a(t)$  ดังสมการ

$$R_a = \frac{e_a(t)}{i_a(t)} \quad (2.14)$$

### 2.3.1.2 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์สามารถหาโดยพิจารณาบล็อกไดอะแกรม รูปที่ 2.5 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  สามารถหาค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์  $i_a(t)$  ดังรูปที่ 2.6

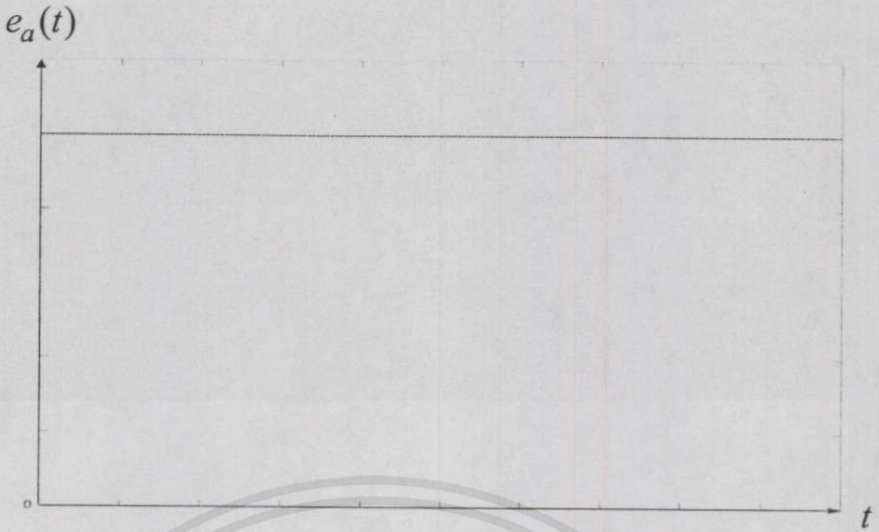


รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับกระแสอาร์เมเจอร์

ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $L_a$  สามารถหาได้โดยพิจารณา ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  ตามสมการ (2.16)

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กราฟแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์



(ข) กราฟกระแสอาร์เมเจอร์

รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับกระแสอาร์เมเจอร์

### 2.3.2 วิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า

วิธีป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า เป็นวิธีทดสอบคุณสมบัติทางกลของมอเตอร์กระแสตรง คือ ค่าเอคิงที่แรงบิดมอเตอร์ ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และโมเมนต์ความเฉื่อยมอเตอร์ นี้ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.1 ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์

ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ และค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ สามารถหาโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  และคำนวณค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์  $i_a(t)$  และค่าความเร็วเชิงมุมมอเตอร์  $\omega(t)$  ดังสมการ

จากสมการ (2.1) และ (2.2)

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{d i_a(t)}{dt} + K_m \omega(t)$$

พิจารณาที่สภาวะคงตัว

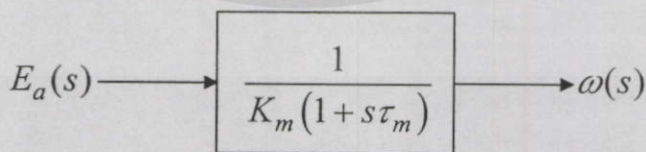
$$e_a(t) = R_a i_a(t) + K_m \omega(t)$$

$$K_m = \frac{e_a(t) - R_a i_a(t)}{\omega(t)} \quad (2.17)$$

### 2.3.2.2 โมเมนต์ความเฉื่อย

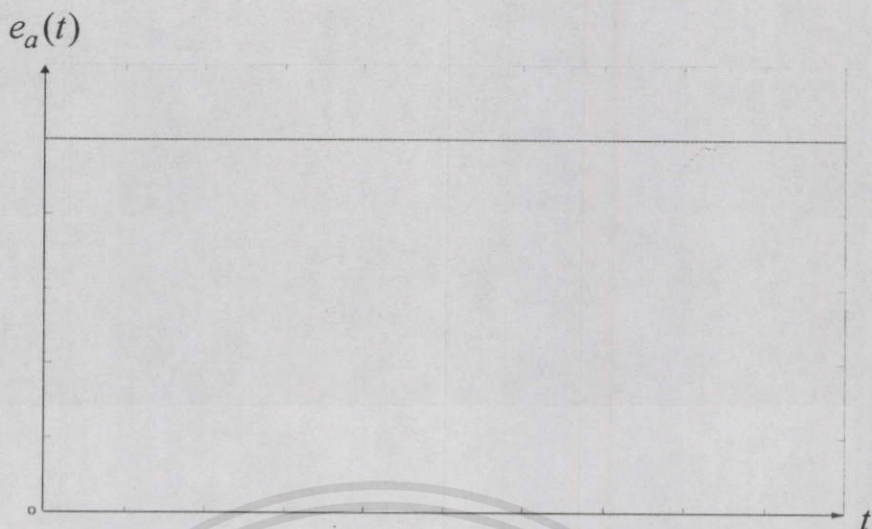
โมเมนต์ความเฉื่อยสามารถหาโดยพิจารณาสมการ 2.13 และบล็อกไดอะแกรม รูปที่ 2.7 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  สามารถหาค่าเวลาคงตัวทางกล  $\tau_m$  จากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมมอเตอร์  $\omega(t)$  ดังรูปที่ 2.8

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{1/k\Phi}{(s\tau_m + 1)} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับความเร็วเชิงมุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กราฟแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์



(ข) กราฟความเร็วเชิงมุมมอเตอร์

รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ กับความเร็วเชิงมุมมอเตอร์

โมเมนต์ความเฉื่อย  $J$  สามารถหาโดยพิจารณาค่าเวลาคงตัวทางกล  $\tau_m$  ตามสมการ (2.18)

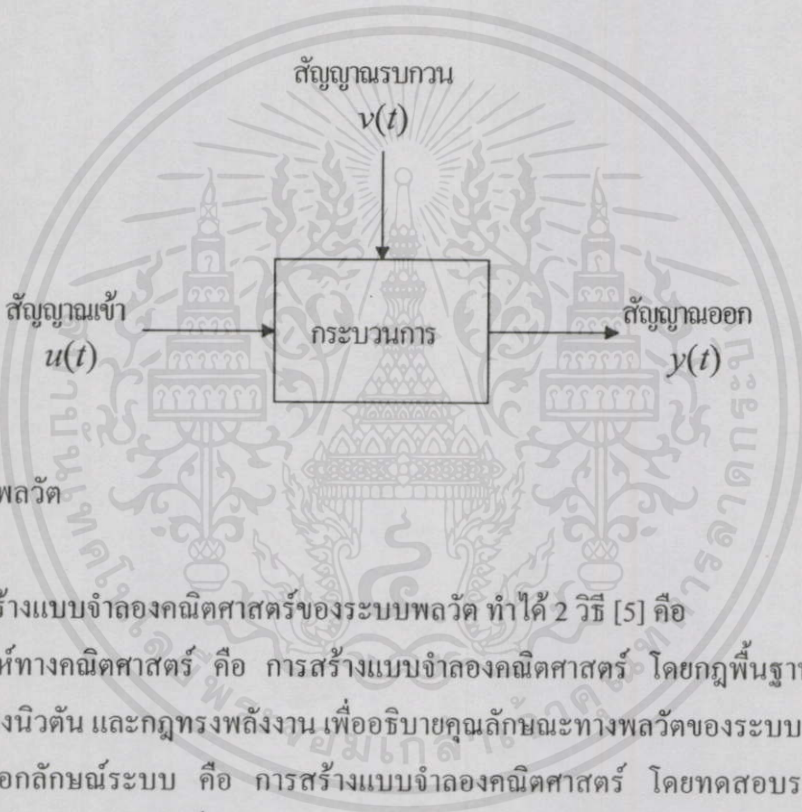
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ  $\tau_m = \frac{J}{(K_m)^2 / R_a}$  อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.18)

### บทที่ 3

## ทฤษฎี และหลักการของการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

### 3.1 ระบบพลวัต

ระบบพลวัตได้รับสัญญาณเข้า (input)  $u(t)$  และสัญญาณรบกวน (disturbance)  $v(t)$  ทำให้สัญญาณออก (output)  $y(t)$  เปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของกระบวนการ ระบบพลวัตแสดงดังรูปที่ 3.1



รูป 3.1 ระบบพลวัต

การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต ทำได้ 2 วิธี [5] คือ

- 1) วิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ คือ การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยกฎพื้นฐานทางฟิสิกส์ เช่น กฎของนิวตัน และกฎทรงพลังงาน เพื่ออธิบายคุณลักษณะทางพลวัตของระบบ
- 2) วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ คือ การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยทดสอบระบบเพื่อหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสม

กรณีระบบซับซ้อน และไม่สามารถหาแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยวิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เช่น แบบจำลองคณิตศาสตร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์หลายค่า แม้ว่าจะทราบโครงสร้างแบบจำลองจากกฎพื้นฐานทางฟิสิกส์ แต่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้

แบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมีคุณสมบัติที่ต่างจากแบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

- 1) แบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบสามารถอธิบายคุณสมบัติของระบบจริงได้ถูกต้อง ภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมเกี่ยวกับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเท่านั้น

- 2) แบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบสามารถอธิบายคุณสมบัติโดยรวมของระบบ โดยไม่อาจแปลความหมายวิทยาศาสตร์ทางกายภาพโดยตรง
- 3) การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบสามารถหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ง่ายกว่าวิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบที่มีความซับซ้อนมาก

แบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ จะสามารถอธิบายคุณสมบัติโดยรวมของระบบถูกต้องมากน้อยเพียงไร ประกอบด้วยปัจจัย ดังนี้

- 1) การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบต้องทราบ โครงสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบที่ถูกต้อง หากระบบมีคุณสมบัติซับซ้อน หรือมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) การกำหนดโครงสร้างแบบจำลองทำได้ยาก
- 2) การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมัก ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากค่าวัดบางข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลในการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบไม่สามารถตรวจสอบได้ และข้อมูลคลาดเคลื่อนจากสัญญาณเดิมเพราะสัญญาณรบกวนที่ไม่ทราบค่า
- 3) การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ไม่สามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบที่มีคุณสมบัติแปรตามเวลาได้

### 3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ คือ การหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตจากการวัดค่าสัญญาณเข้า และสัญญาณออก

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบได้รับผลกระทบจาก 4 ปัจจัย ดังนี้

- 1) ระบบ (system) ใช้แทนการอธิบายทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ เมื่อกำหนดให้กระบวนการ (process) คือรูปแบบทางกายภาพที่ทำให้เกิดข้อมูลในการทดลอง และข้อมูลที่ได้นำไปใช้ตามทฤษฎีการวิเคราะห์ของวิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ
- 2) โครงสร้างแบบจำลอง (model structure,  $M$ ) เช่น แบบจำลองนอนพารามตริก (nonparametric model) ที่อยู่ในรูปของเส้นโค้ง ฟังก์ชัน หรือตาราง โดยมีข้อมูลคุณสมบัติเฉพาะของระบบ ตัวอย่างของแบบจำลอง เช่น ผลตอบสนองต่อระดับ (step response) ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ (impulse response) และแผนภาพ หรือ แบบจำลองพารามตริก ที่อยู่ในรูปของเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta$  กำหนดให้เป็น  $M(\theta)$  แทนแบบจำลองพารามตริก เมื่อ  $\theta$  แปรค่าอยู่ในเซตของค่าที่เป็นไปได้ งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- 3) การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ มีอยู่หลายวิธี การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน

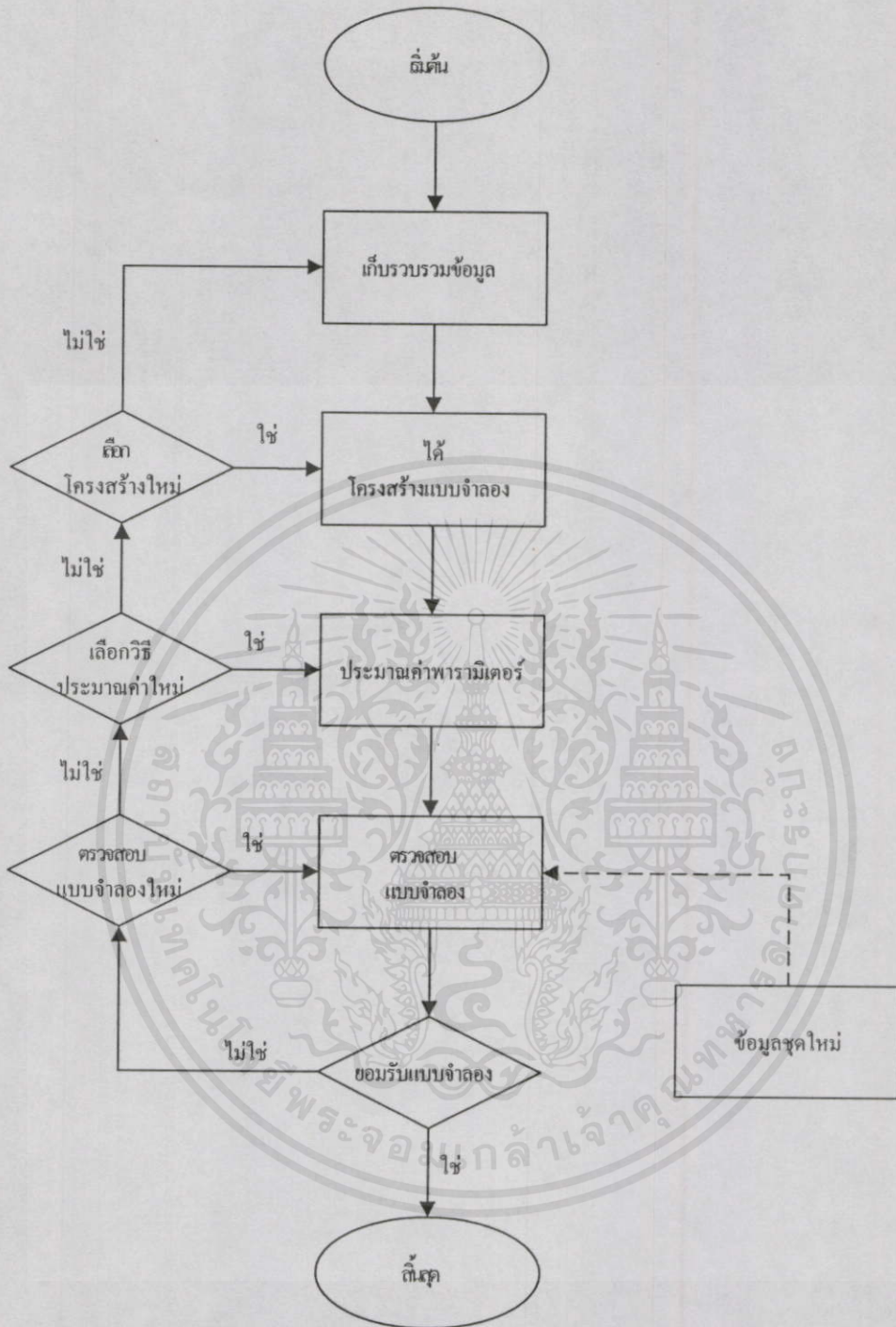
- 4) สภาวะการทดลอง (*experimental condition*) โดยอธิบายว่าการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจะสำเร็จได้อย่างไร รวมถึงการเลือก และการสร้างสัญญาณเข้า วงป้อนกลับ (*feedback loop*) ที่เป็นไปได้ในระบบ และช่วงเวลาการสุ่มค่าสัญญาณ ฯลฯ

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเป็นการทดลอง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้เข้าใกล้ค่าพารามิเตอร์จริงของแบบจำลองพลวัตที่พิจารณา ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้ [6]

- 1) รับสัญญาณเข้า และสัญญาณออกจากการทดลอง
- 2) เลือกโครงสร้างของแบบจำลองคณิตศาสตร์
- 3) วิเคราะห์พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์
- 4) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

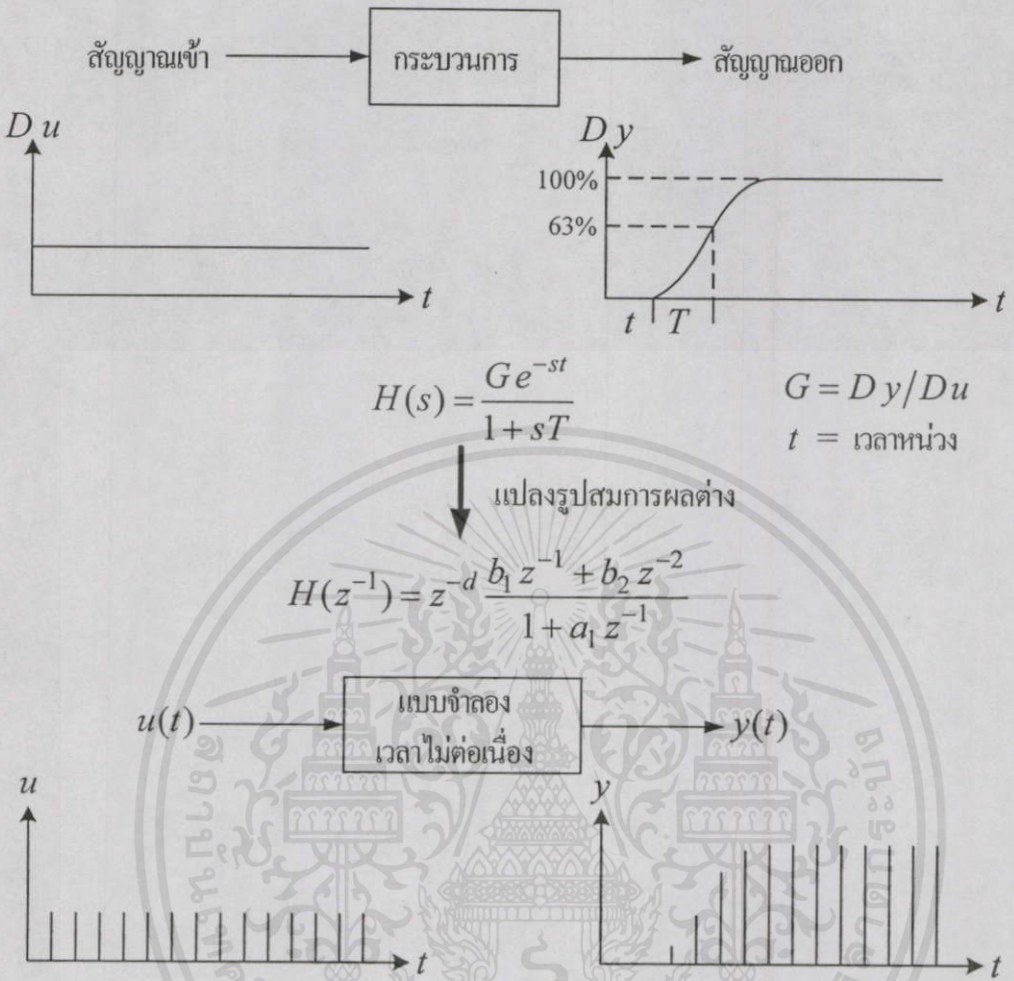
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบที่สมบูรณ์ต้องประกอบด้วย 4 ขั้นตอนข้างต้น วิธีที่ใช้ในแต่ละขั้นขึ้นกับชนิดของแบบจำลองคณิตศาสตร์ เช่น แบบจำลองพารามเมตริก หรือแบบจำลองนอนพารามเมตริก แบบจำลองเวลาต่อเนื่อง หรือแบบจำลองเวลาไม่ต่อเนื่อง ขั้นตอนการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โฟลวชาร์ตแสดงขั้นตอนการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบดั้งเดิม (classical) ใช้ในการหาแบบจำลองพารามेटริก จากเอกสารที่เป็นเอกสารทศงานไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เป็นที่เห็นเป็นประโยชน์ในการหาแบบจำลองนอนพารามेटริกในรูปของผลตอบสนองต่อระดับ วิธีนี้ขั้นแรกจะหาในรูปแบบจำลองพารามेटริกแบบเวลาต่อเนื่อง แล้วเปลี่ยนเป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบในรูปแบบจำลองเวลาไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.3

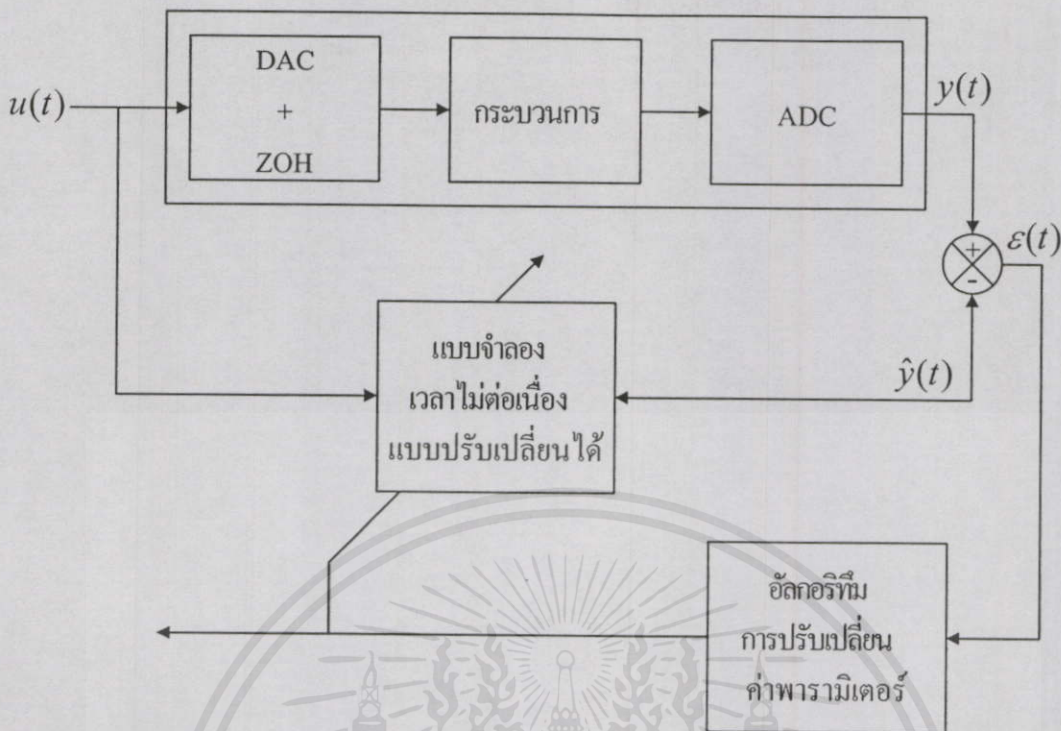


รูปที่ 3.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบดั้งเดิม

จากรูปร่างผลตอบสนองต่อระดับของระบบจะได้ชนิดของแบบจำลองคณิตศาสตร์ และพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์พิจารณาได้จากลักษณะของกราฟ

การปรับปรุงเพื่อทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบตามเวลาจริง (real-time) โดยใช้หลักการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ แสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 หลักการประมาณค่าพารามิเตอร์

วิธีประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ เรียกว่าวิธีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ (Parameter Adaptation Algorithm : PAA) เพื่อลดความผิดพลาดจากการทำนาย (prediction error)  $\epsilon(t)$  ระหว่างสัญญาณออกจริง  $y(t)$  กับสัญญาณออกของแบบจำลอง  $\hat{y}(t)$  ให้น้อยที่สุด การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยการทดสอบทางสถิติกับความผิดพลาดจากการทำนาย และสัญญาณออกของแบบ

วิธีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ ปรับแก้พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์จากข้อมูลสัญญาณเข้า และสัญญาณออกซ้ำทุกช่วงการสุ่มค่าสัญญาณ โดยคำนวณ พารามิเตอร์ใหม่จากพารามิเตอร์เดิม และความผิดพลาดจากการทำนายถัดไป หรือ

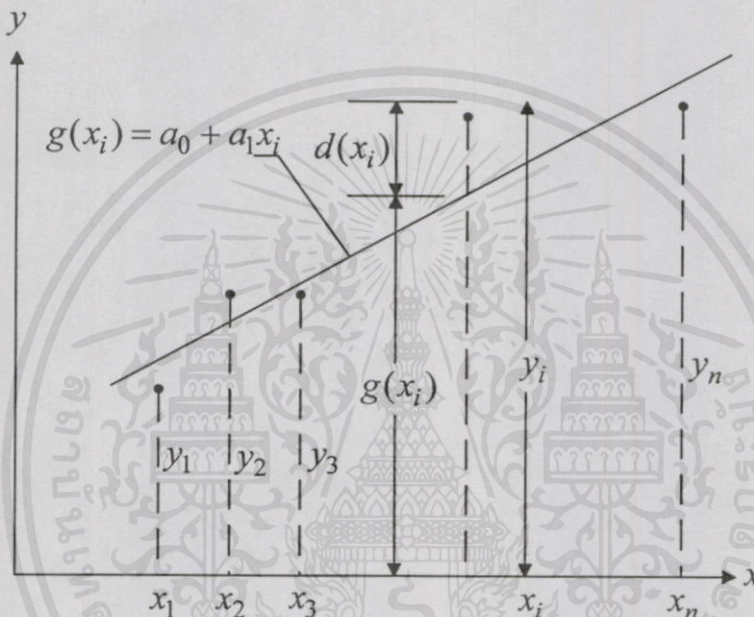
$$\begin{bmatrix} \text{การประมาณค่า} \\ \text{พารามิเตอร์ใหม่} \\ \text{(เวกเตอร์)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{การประมาณค่า} \\ \text{พารามิเตอร์ครั้งก่อน} \\ \text{(เวกเตอร์)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{อัตราขยาย} \\ \text{การปรับเปลี่ยน} \\ \text{(เมตริกซ์)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{ฟังก์ชัน} \\ \text{ถ่วง} \\ \text{(เวกเตอร์)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{ฟังก์ชันความผิดพลาด} \\ \text{จากการทำนาย} \\ \text{(สเกลลาร์)} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และตัดใจทิ้งลงไปยังที่ฟังก์ชันความผิดพลาด

### 3.3 วิธีถดถอยเชิงเส้น (linear regression) [7]

วิธีถดถอยเชิงเส้น คือ การประมาณสมการเส้นตรงของข้อมูล  $x_i$  และ  $y_i$  จำนวน  $n$  ข้อมูล ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) ดังรูปที่ 3.5 และสมการเส้นตรง คือ

$$g(x) = a_0 + a_1 x \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.5 การประมาณสมการเส้นตรงโดยวิธีถดถอยเชิงเส้น

พารามิเตอร์  $a_0$  และ  $a_1$  เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงที่ทำให้ความผิดพลาดรวมกำลังสองจากการประมาณค่า  $y_i$  จากตำแหน่ง  $x_i$  มีค่าน้อยที่สุด

การประมาณค่า  $y_i$  ของสมการเส้นตรง  $g(x_i)$  ที่ตำแหน่ง  $x_i$  ทำให้มีความผิดพลาด  $d(x_i)$  ความผิดพลาด  $E$  สามารถแสดงโดยสมการ

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \quad (3.2)$$

หรือสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 \quad (3.3)$$

แทนค่า  $g(x_i)$  จากสมการ (3.1)

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 \quad (3.4)$$

คำนวณ  $a_0$  และ  $a_1$  โดยให้ความผิดพลาดรวมกำลังสอง  $E$  มีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0 \quad (3.5a)$$

และ

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0 \quad (3.5b)$$

จากเงื่อนไขสมการ (3.5a)

$$2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)] (-1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n a_0 - \sum_{i=1}^n a_1 x_i = 0$$

$$n a_0 + \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) a_1 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.6)$$

จากเงื่อนไขสมการ (3.5b)

$$2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)] (-x_i) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n a_0 x_i - \sum_{i=1}^n a_1 x_i^2 = 0$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_i \right) a_0 + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_1 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.7)$$

แสดงสมการ (3.6) และสมการ (3.7) ในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

คำนวณ  $a_0$  และ  $a_1$  ดังนี้

$$a_0 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)}{n \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3.9)$$

$$a_1 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3.10)$$

### 3.4 วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์สำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ เพื่อลดความผิดพลาดจากการทำนาย แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. วิธีเกรเดียนต์
2. วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 วิธีเกรเดียนต์

วิธีเกรเดียนต์ มีจุดประสงค์เพื่อทำให้เกณฑ์กำลังสอง (quadratic criterion) ของค่าความผิดพลาดจากการทำนายมีค่าน้อยที่สุด โดยพิจารณาแบบจำลองชนิดเวลาไม่ต่อเนื่อง เมื่อ  $a_1$  และ  $b_1$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

$$y(t+1) = -a_1 y(t) + b_1 u(t) = \theta^T \varphi(t) \quad (3.11)$$

เวกเตอร์พารามิเตอร์ มีค่า

$$\theta^T = [a_1, b_1] \quad (3.12)$$

เวกเตอร์การวัด (measurement vector) หรือเวกเตอร์สังเกต (observation vector) มีค่า

$$\varphi(t)^T = [-y(t), u(t)] \quad (3.13)$$

แบบจำลองคณิตศาสตร์จากการทำนาย คือ

$$\begin{aligned} \hat{y}^{\circ}(t+1) &= \hat{y}[t+1 | \hat{\theta}(t)] = -\hat{a}_1(t) y(t) + \hat{b}_1(t) u(t) \\ &= \hat{\theta}^T(t) \varphi(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$\hat{y}^{\circ}(t+1)$  คือ สัญญาณออกของแบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีเพียโอริ (priori) โดยขึ้นกับพารามิเตอร์ที่เวลา  $t$  และเวกเตอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีเพียโอริ คือ

$$\hat{\theta}^T(t) = [\hat{a}_1(t), \hat{b}_1(t)] \quad (3.15)$$

$\hat{y}(t+1)$  คือ สัญญาณออกของแบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีโพสเทียเรียริ (posteriori) โดยขึ้นกับพารามิเตอร์ที่เวลา  $t+1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด  $\hat{y}(t+1) = \hat{y}[t+1 | \hat{\theta}(t+1)] = -\hat{a}_1(t+1) y(t) + \hat{b}_1(t+1) u(t)$  นำไปใช้

$$= \hat{\theta}^T(t+1) \varphi(t) \quad (3.16)$$

ความผิดพลาดจากการทำนายวิธีเพียโอริ คือ

$$\varepsilon^\circ(t+1) = y(t+1) - \hat{y}^\circ(t+1) \tag{3.17}$$

ความผิดพลาดจากการทำนายวิธีโพสเทียเรียริ คือ

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - \hat{y}(t+1) \tag{3.18}$$

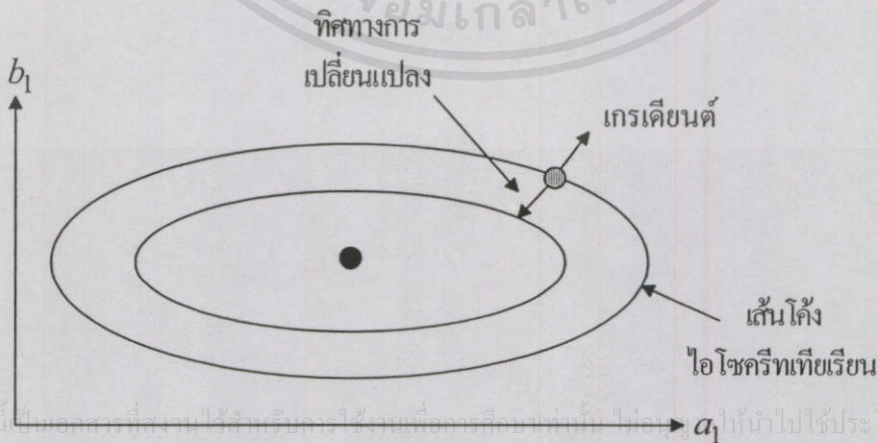
การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แบบทำซ้ำ คือ

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \Delta\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + f[\hat{\theta}(t), \varphi(t), \varepsilon^\circ(t+1)] \tag{3.19}$$

เงื่อนไขการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบต้องการลดความผิดพลาดรวมกำลังสองให้มีค่าน้อยที่สุด

$$\min_{\hat{\theta}(t)} J(t+1) = [\varepsilon^\circ(t+1)]^2 \tag{3.20}$$

ถ้าเส้นโค้งวงปิดไอโซคริทธิเยเรียน (isocriterion curve) บนระนาบ  $a_1$  และ  $b_1$  แสดงตำแหน่งค่า  $J$  คงที่ ดังรูปที่ 3.6 เส้นโค้งวงปิดเส้นนอกจะมีค่า  $J$  เพิ่มขึ้น เงื่อนไขการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบต้องเคลื่อนที่ได้เส้นโค้งวงปิดที่มีค่า  $J$  ลดลงให้น้อยที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษามาก่อน ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 เส้นโค้งวงปิดไอโซคริทธิเยเรียน

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ แสดงโดยสมการ

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) - P \frac{\partial J(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t)} \quad (3.21)$$

$P$  คือ เมตริกซ์อัตราขยายการเปลี่ยนแปลง มีค่า

$$P = \alpha I$$

เมื่อ  $I$  เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ และ  $\alpha$  มีค่ามากกว่า 0

พิจารณาสมการ (3.20)

$$\frac{1}{2} \frac{\partial J(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t)} = \frac{\partial \varepsilon^\circ(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t)} \varepsilon^\circ(t+1) \quad (3.22)$$

เมื่อ

$$\varepsilon^\circ(t+1) = y(t+1) - \hat{y}^\circ(t+1) = y(t+1) - \hat{\theta}^T(t) \varphi(t) \quad (3.23)$$

และ

$$\frac{\partial \varepsilon^\circ(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t)} = -\varphi(t) \quad (3.24)$$

แทนสมการ (3.24) ลงในสมการ (3.22) วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในสมการ (3.21) สามารถแสดงโดยสมการ

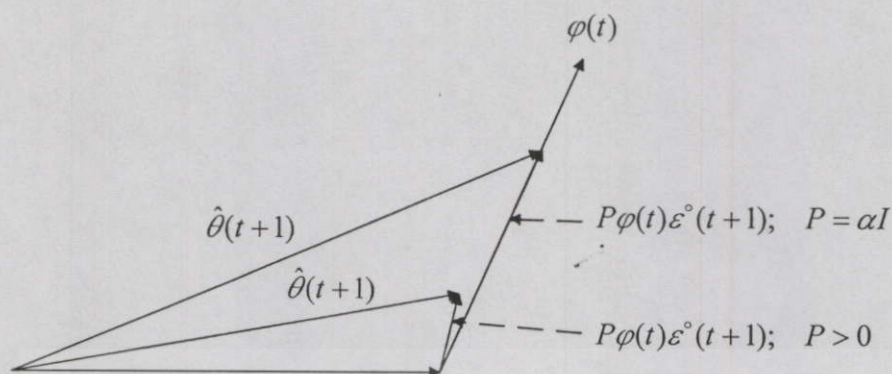
$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P \varphi(t) \varepsilon^\circ(t+1) \quad (3.25)$$

เงื่อนไขเมตริกซ์อัตราขยายการเปลี่ยนแปลง  $P$  ที่สอดคล้องกับสมการ (3.25) คือ

$$1) \quad P = \alpha I \quad \text{เมื่อ } \alpha > 0$$

$$2) \quad P \text{ เป็นเมตริกซ์บวกแน่นอน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เกรเดียนต์ สมการ (3.25) สามารถแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เกรเดียนต์

พิจารณาการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีเกรเดียนต์ในสมการ (3.25) อาจขาดเสถียรภาพ หากอัตราขยายการเปลี่ยนแปลงมีขนาดใหญ่ การหลีกเลี่ยงสามารถทำได้โดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีเกรเดียนต์ ดังสมการ

$$\min_{\hat{\theta}(t+1)} J(t+1) = [\varepsilon(t+1)]^2 \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial J(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t+1)} = \frac{\partial \varepsilon(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t+1)} \varepsilon(t+1) \quad (3.27)$$

แทนสมการ (3.16) ลงในสมการ (3.18) ความผิดพลาดจากการทำนายวิธีโพลสเทียบเรียริ สามารถแสดงโดยสมการ

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - \hat{y}(t+1) = y(t+1) - \hat{\theta}^T(t+1)\varphi(t) \quad (3.28)$$

และ

$$\frac{\partial \varepsilon(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t+1)} = -\varphi(t) \quad (3.29)$$

แทนสมการ (3.29) ลงในสมการ (3.27) วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์สามารถแสดง โดยสมการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P\varphi(t)\varepsilon(t+1) \quad (3.30)$$

พิจารณาสมการ (3.28) ดังสมการ

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - \hat{\theta}^T(t)\varphi(t) - [\hat{\theta}(t+1) - \hat{\theta}(t)]^T \varphi(t) \quad (3.31)$$

ความสัมพันธ์  $y(t+1) - \hat{\theta}^T(t)\varphi(t)$  กับ  $\varepsilon^\circ(t+1)$  สามารถแสดงโดยสมการ

$$\hat{\theta}(t+1) - \hat{\theta}(t) = P\varphi(t)\varepsilon(t+1) \quad (3.32)$$

แทนสมการ (3.17) และสมการ (3.32) ลงในสมการ (3.31)

$$\varepsilon(t+1) = \varepsilon^\circ(t+1) - \varphi^T(t)P\varphi(t)\varepsilon(t+1) \quad (3.33)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\varepsilon(t+1)$  และ  $\varepsilon^\circ(t+1)$  สามารถแสดงโดยสมการ

$$\varepsilon(t+1) = \frac{\varepsilon^\circ(t+1)}{1 + \varphi^T(t)P\varphi(t)} \quad (3.34)$$

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์สมการ (3.30) สามารถแสดงโดยสมการ

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \frac{P\varphi(t)\varepsilon^\circ(t+1)}{1 + \varphi^T(t)P\varphi(t)} \quad (3.35)$$

### 3.4.2 วิธีการทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด ปรับปรุงวิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีเกรเดียนต์ ซึ่งอัตราการขยายการเปลี่ยนแปลงมีค่าคงที่ ให้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดพิจารณาแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ (3.11) ถึงสมการ (3.18) เช่นเดียวกับวิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีเกรเดียนต์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\min_{\hat{\theta}(t+1)} J(t+1) = \sum_{i=1}^{t+1} [y(i) - \hat{\theta}^T(t+1)\varphi(i-1)]^2 \quad (3.36)$$

พิจารณาสมการ (3.36) เทอม  $\hat{\theta}^T(t+1)\varphi(i-1)$  คือ

$$\hat{\theta}^T(t+1)\varphi(i-1) = -\hat{a}_1(t+1)y(i-1) + \hat{b}_1(t+1)u(i-1) = \hat{y}[i|\hat{\theta}(t+1)] \quad (3.37)$$

เงื่อนไข  $\hat{\theta}(t+1)$  ที่ทำให้  $J(t+1)$  ของสมการ (3.36) มีค่าน้อยที่สุด คือ

$$\frac{\partial J(t+1)}{\partial \hat{\theta}(t+1)} = -2 \sum_{i=1}^{t+1} [y(i) - \hat{\theta}^T(t+1)\varphi(i-1)]\varphi(i-1) = 0 \quad (3.38)$$

กำหนดให้

$$[\hat{\theta}^T(t+1)\varphi(i-1)]\varphi(i-1) = \varphi(i-1)\varphi^T(i-1)\hat{\theta}(t+1)$$

สมการ (3.38) สามารถแสดง ดังรูป

$$\left[ \sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \right] \hat{\theta}(t+1) = \sum_{i=1}^{t+1} y(i)\varphi(i-1)$$

คูณสมการทั้งสองข้างด้วย

$$\left[ \sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \right]^{-1}$$

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด คือ

$$\hat{\theta}(t+1) = \left[ \sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \right]^{-1} \sum_{i=1}^{t+1} y(i)\varphi(i-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.39) รค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
เมื่อ

$$P^{-1}(t+1) = \sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} P^{-1}(t+1) &= \sum_{i=1}^t \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) + \varphi(t)\varphi^T(t) \\ &= P^{-1}(t) + \varphi(t)\varphi^T(t) \end{aligned} \quad (3.41)$$

จากสมการ (3.39)

$$\sum_{i=1}^{t+1} y(i)\varphi(i-1) = \sum_{i=1}^t y(i)\varphi(i-1) + y(t+1)\varphi(t) \quad (3.42)$$

เวกเตอร์พารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  มีค่า

$$\hat{\theta}(t) = P(t) \sum_{i=1}^t y(i)\varphi(i-1) \quad (3.43)$$

หรือ

$$P^{-1}(t)\hat{\theta}(t) = \sum_{i=1}^t y(i)\varphi(i-1) \quad (3.44)$$

แทนสมการ (3.41) สมการ (3.42) และสมการ (3.44) ลงในสมการ (3.39)

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t+1) &= P(t+1) \left[ \sum_{i=1}^t y(i)\varphi(i-1) + y(t+1)\varphi(t) \right] \\ &= P(t+1) \left[ P^{-1}(t)\hat{\theta}(t) + y(t+1)\varphi(t) \right] \\ &= P(t+1) \left\{ \left[ P^{-1}(t+1) - \varphi(t)\varphi^T(t) \right] \hat{\theta}(t) + y(t+1)\varphi(t) \right\} \\ &= \hat{\theta}(t) + P(t+1)\varphi(t) \left[ y(t+1) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t) \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)\varphi(t)\varepsilon^\circ(t+1) \quad (3.45)$   
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในสมการ (3.45) คล้ายกับการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีเกรเดียนต์ในสมการ (3.25) นอกจากเมตริกซ์อัตราขยายการเปลี่ยนแปลง  $P(t+1)$  เปลี่ยนแปลงตามเวลาจากข้อมูลที่วัดได้ สูตรการทำซ้ำของ  $P(t+1)$  หาได้จากสมการ (3.41) โดยใช้ทฤษฎีเสริมเมตริกซ์ส่วนกลับ (matrix inversion lemma) คือ

$$(P^{-1} + \varphi\varphi^T)^{-1} = P - \frac{P\varphi\varphi^T P}{1 + \varphi^T P \varphi} \quad (3.46)$$

เมื่อ  $P$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $n \times n$  และ  $\varphi$  เป็นเวกเตอร์ขนาด  $n$  พิจารณาสมการ (3.41) และสมการ (3.46) จะได้

$$P(t+1) \equiv P(t) - \frac{P(t)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t)}{1 + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)} \quad (3.47)$$

การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดคือ

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)\varphi(t)\varepsilon^\circ(t+1) \quad (3.48)$$

$$P(t+1) = P(t) - \frac{P(t)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t)}{1 + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)} \quad (3.49)$$

$$\varepsilon^\circ(t+1) = y(t+1) - \hat{\theta}(t)\varphi(t) \quad (3.50)$$

หรือ

$$\begin{aligned} [\hat{\theta}(t+1) - \hat{\theta}(t)] &= P(t+1)\varphi(t)\varepsilon^\circ(t+1) \\ &= P(t)\varphi(t) \frac{\varepsilon^\circ(t+1)}{1 + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)} \end{aligned} \quad (3.51)$$

พิจารณาจากสมการ (3.17) และสมการ (3.18) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดจากการทำนายแบบโพสเทียเรียริ และความผิดพลาดจากการทำนายแบบเพียโอริ ดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\varepsilon(t+1) &= y(t+1) - \hat{\theta}^T(t+1)\varphi(t) \\
&= y(t+1) - \hat{\theta}^T(t)\varphi(t) - [\hat{\theta}(t+1) - \hat{\theta}(t)]^T \varphi(t) \\
&= \varepsilon^\circ(t+1) - \varphi^T(t)P(t+1)\varphi(t) \frac{\varepsilon^\circ(t+1)}{1 + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)} \\
&= \frac{\varepsilon^\circ(t+1)}{1 + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)}
\end{aligned} \tag{3.52}$$

จากสมการ (3.51) สมการการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด คือ

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)\varphi(t)\varepsilon(t+1) \tag{3.53}$$

$$P^{-1}(t+1) = P^{-1}(t) + \varphi(t)\varphi^T(t) \tag{3.54}$$

$$P(t+1) = P(t) - \frac{P(t)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t)}{1 + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)} \tag{3.55}$$

$$\varepsilon(t+1) = \frac{y(t+1) - \hat{\theta}^T(t)\varphi(t)}{1 + \varphi^T(t)P(t)\varphi(t)} \tag{3.56}$$

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด พิจารณาเมตริกซ์อัตราขยายการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้น  $P(0)$  โดยเลือกค่า

$$P(0) = \frac{1}{\delta}I = (GI)I \quad \text{เมื่อ } 0 < \delta \ll 1 \tag{3.57}$$

กรณีไม่มีค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่ทำการประมาณ กำหนดให้เวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าเริ่มต้นเท่ากับเวกเตอร์ 0 จะพิจารณาอัตราขยายการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นที่ค่า  $GI$  มีค่ามาก โดย  $GI$  มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 1000

กรณีที่มีค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ที่ทำการประมาณ เช่น ได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบครั้งก่อน จะพิจารณาอัตราขยายการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นที่ค่า  $GI$  มีค่าน้อย โดย  $GI$  มีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับ 1

การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด มีอัตราขยายการเปลี่ยนแปลงแบบลดลง โดยพิจารณาจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าเดียว โดย  $P(t)$  และ  $\varphi(t)$  เป็นค่าสเกลาร์ และสมการ (3.55) คือ

$$P(t+1) = \frac{P(t)}{1 + \varphi^2(t)P(t)} \leq P(t) \quad \text{เมื่อ } \varphi(t) \text{ และ } P(t) \in R^I \quad (3.58)$$

เนื่องจากอัตราขยายการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลง เมื่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์เข้าใกล้ค่าที่ถูกต้อง ดังนั้นสามารถพิจารณาอัตราขยายการเปลี่ยนแปลงเป็นตัววัดความถูกต้องของการประมาณค่าพารามิเตอร์

การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด สามารถแสดงในรูปแบบจำลองคณิตศาสตร์ชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ดังนี้

$$y(t+1) = \frac{z^{-d} B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t) \quad (3.59)$$

เมื่อ

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (3.60)$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \quad (3.61)$$

สมการ (3.59) สามารถจัดรูปสมการใหม่ ดังนี้

$$y(t+1) = -\sum_{i=1}^n a_i y(t+1-i) + \sum_{i=1}^m b_i u(t-d-i+1) = \theta^T \varphi(t) \quad (3.62)$$

เวกเตอร์พารามิเตอร์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น  $\theta^T = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]$  และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.63)

และ เวกเตอร์สังเกต คือ

$$\varphi^T(t) = [-y(t), \dots, -y(t-n+1), u(t-d), \dots, u(t-d-m+1)] \quad (3.64)$$

สัญญาณออกของแบบจำลองคณิตศาสตร์วิธีเพียโอรี คือ

$$\begin{aligned} \hat{y}^\circ(t+1) &= -\sum_{i=1}^n \hat{a}_i y(t+1-i) + \sum_{i=1}^m \hat{b}_i u(t-d-i+1) \\ &= \hat{\theta}^T(t) \varphi(t) \end{aligned} \quad (3.65)$$

เวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์ คือ

$$\hat{\theta}^T(t) = [\hat{a}_1(t), \dots, \hat{a}_n(t), \hat{b}_1(t), \dots, \hat{b}_m(t)] \quad (3.66)$$

### 3.5 การเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda_1$ และ $\lambda_2$

การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด สามารถแสดงอัตราขยายการเปลี่ยนแปลง  $P(t)$  โดยมีค่าถ่วงน้ำหนัก (weighting sequences)  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ดังสมการ

$$P(t+1) = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ P(t) - \frac{\lambda_2 P(t) \varphi(t) \varphi^T(t) P(t)}{\lambda_1 + \lambda_2 \varphi^T(t) P(t) \varphi(t)} \right\} \quad (3.67)$$

เมื่อ

$$0 < \lambda_1(t) \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_2(t) < 2 \quad \text{และ} \quad P(0) > 0$$

ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ทำให้อัตราขยายการเปลี่ยนแปลง เปลี่ยนแปลง ได้ดังนี้

1. ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_1(t)$  ทำให้อัตราขยายการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น
2. ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_2(t)$  ทำให้อัตราขยายการเปลี่ยนแปลงลดลง

การพิจารณาเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  แบ่งเป็น 7 กรณี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4.1 อัตราขยายแบบลดลง (decreasing gain)  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ออกกฎหมายให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_1(t) = \lambda_1 = 1 \quad \text{และ} \quad \lambda_2(t) = 1 \quad (3.68)$$

อัตราขยายการเปลี่ยนแปลง  $P(t+1)$  เป็นแบบลดลง ดังสมการ (3.58) การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักกรณีอัตราขยายแบบลดลง เหมาะสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบคุณสมบัติคงที่

### A.2 ตัวประกอบการลืมคงที่ (constant forgetting factor)

$$\lambda_1(t) = \lambda_1 \quad \text{และ} \quad \lambda_2(t) = \lambda_2 = 1 \quad (3.69)$$

เมื่อ

$$0 < \lambda_1 < 1$$

ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_1$  ที่น้อยกว่า 1 นำไปสู่การให้ความสำคัญกับข้อมูลเก่า ดังนั้น  $\lambda_1$  จึงถูกเรียกว่าตัวประกอบการลืม (forgetting factor) ค่าความผิดพลาดรวมกำลังสองที่น้อยที่สุด คือ

$$J(t) = \sum_{i=1}^t \lambda_1^{(t-i)} \left[ y(i) - \hat{\theta}^T(t) \varphi(i-1) \right]^2 \quad (3.70)$$

การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักกรณีตัวประกอบการลืมคงที่ เหมาะสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบที่คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามเวลาช้าๆ

### A.3 ตัวประกอบการลืมแปรค่า (variable forgetting factor)

$$\lambda_2(t) = \lambda_2 = 1 \quad (3.71)$$

ตัวประกอบการลืม กำหนดให้เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังสมการ

$$\lambda_1(t) = \lambda_0 \lambda_1(t-1) + 1 - \lambda_0 \quad \text{เมื่อ} \quad 0 < \lambda_0 < 1 \quad (3.72)$$

$$\lambda_1(0) = 0.95 \text{ ถึง } 0.99 \quad \text{และ} \quad \lambda_0 = 0.95 \text{ ถึง } 0.99$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดพลาดรวมกำลังสองที่น้อยที่สุด คือ

$$J(t) = \sum_{i=1}^t \lambda_1^{(t-i)}(i) \left[ y(i) - \hat{\theta}^T(t) \varphi(i-1) \right]^2 \quad (3.73)$$

พิจารณาสมการ (3.72) ตัวประกอบการลิม  $\lambda_1(t)$  จะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อเวลาที่มีค่า  $t$  มากขึ้น ทำให้ อัตราขยายการเปลี่ยนแปลงลดลง

การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักกรณีตัวประกอบการลิมแปรค่า เหมาะสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบที่คุณสมบัติคงที่ โดยอัตราขยายการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากในตอนเริ่มต้น เมื่อ พารามิเตอร์ที่ทำการประมาณมีค่าห่างจากค่าจริงมาก ทำให้การลู่เข้าเร็วขึ้น

#### A.4 พหุคูณที่ (constant trace)

ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ถูกกำหนดเพื่อให้ค่าพหุคูณของเมตริกซ์อัตราขยายการเปลี่ยนแปลงคงที่

$$\text{tr } P(t+1) = \text{tr } P(t) = \text{tr } P(0) = nGI \quad (3.74)$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนพารามิเตอร์ที่ทำการประมาณค่า และ  $GI$  เป็นค่าอัตราขยายเริ่มต้น โดยทั่วไป  $GI$  มีค่า 0.1 ถึง 4 และเมตริกซ์  $P(0)$  มีค่า

$$P(0) = \begin{bmatrix} GI & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & GI \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  พิจารณาจากสมการ

$$\begin{aligned} \text{tr } P(t+1) &= \frac{1}{\lambda_1(t)} \text{tr} \left[ P(t) - \frac{P(t) \varphi(t) \varphi^T(t) P(t)}{\alpha(t) + \varphi^T(t) P(t) \varphi(t)} \right] \\ &= \text{tr } P(t) \end{aligned} \quad (3.77)$$

เมื่อ

$$\alpha(t) = \lambda_1(t)/\lambda_2(t)$$

ค่าความผิดพลาดรวมกำลังสองที่น้อยที่สุด คือ

$$J(t) = \sum_{i=1}^t f(t,i) \left[ y(i) - \hat{\theta}^T(t) \varphi(i-1) \right]^2 \quad (3.76)$$

การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักกรณีทฤษฎีที่เหมาะสมสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบที่คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามเวลา

#### A.5 อัตราขยายแบบลดลง + ทฤษฎี

การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจะใช้ค่าถ่วงน้ำหนักกรณีอัตราขยายแบบลดลง และเปลี่ยนเป็นค่าถ่วงน้ำหนักกรณีทฤษฎีเมื่อ

$$\text{tr } P(t) \leq nGI \quad \text{เมื่อ } G = 0.1 \text{ ถึง } 4 \quad (3.78)$$

โดยค่า  $G$  ถูกเลือกล่วงหน้า การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักกรณีนี้ เหมาะสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบที่คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อไม่ทราบข้อมูลเริ่มต้นของพารามิเตอร์

#### A.6 ตัวประกอบการลิมแปรค่า + ทฤษฎี

การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักจะใช้ค่าถ่วงน้ำหนักกรณีตัวประกอบการลิมแปรค่า และเปลี่ยนเป็นค่าถ่วงน้ำหนักกรณีทฤษฎีเมื่อ

$$\text{tr } P(t) \leq nGI \quad (3.79)$$

โดยค่า  $G$  ถูกเลือกล่วงหน้า การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักกรณีนี้ เหมาะสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบที่คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อไม่ทราบข้อมูลเริ่มต้นของการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

เอกสาร A.7 อัตราขยายคงที่ (constant gain) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_1(t) = \lambda_1 = 1 \quad \text{และ} \quad \lambda_2(t) = \lambda_2 = 0 \quad (3.80)$$

พิจารณาอัตราขยายการเปลี่ยนแปลง สมการ (3.67) ตามเงื่อนไขสมการ (3.80)

$$P(t+1) = P(t) = P(0) \quad (3.81)$$

การเลือกค่าตัวงนำหนักกรณีอัตราขยายคงที่ เหมาะสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบที่คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามเวลา และพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์มีจำนวนน้อย

### 3.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองชนิดสัญญาณต่อเนื่อง [8]

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองชนิดสัญญาณต่อเนื่อง ทำได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้า  $u(t)$  และสัญญาณออก  $y(t)$  ตามสมการ

$$y(t) = \frac{B(s)}{A(s)} u(t) \quad (3.82)$$

เมื่อ  $B(s)$  เป็นฟังก์ชันพหุนามเศษลำดับที่  $m$  และ  $A(s)$  เป็นฟังก์ชันพหุนามส่วนลำดับที่  $n$

$$A(s) = 1 + a_1 s + \dots + a_n s^n \quad (3.83)$$

และ

$$B(s) = b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m \quad (3.84)$$

กำหนดเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta$  และเวกเตอร์สังเกต  $\varphi(t)$  ดังสมการ

$$\theta^T = \{a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_m\} \quad (3.85)$$

$$\varphi^T(t) = \left\{ -\frac{d}{dt} y(t), -\frac{d^2}{dt^2} y(t), \dots, -\frac{d^n}{dt^n} y(t), u(t), \frac{d}{dt} u(t), \dots, \frac{d^m}{dt^m} u(t) \right\} \quad (3.86)$$

แทนสมการ (3.85) และสมการ (3.86) ลงในสมการ (3.82) สัญญาณออก  $y(t)$  สามารถแสดงโดย

สมการนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta \quad (3.87)$$

การประมาณค่าสัญญาณออก  $y(t)$  โดยเวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์  $\hat{\theta}(t)$  คือ

$$y_m(t) = \varphi^T(t) \hat{\theta}(t) \quad (3.88)$$

การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด โดยเลือกเวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  เพื่อให้ความผิดพลาดจากการทำนาย  $\varepsilon(t)$  รวมกำลังสองน้อยที่สุด

$$\varepsilon(t) = y(t) - y_m(t) \quad (3.89)$$

กำหนดเวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  ดังสมการ

$$\hat{\theta}^T(t) = \{a_1(t), a_s(t), \dots, a_n(t), b_0(t), b_z(t), \dots, b_m(t)\} \quad (3.90)$$

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด ของแบบจำลองชนิดสัญญาณต่อเนื่องสามารถทำได้ ดังนี้

ค่าผิดพลาดจากการทำนาย

$$\hat{\varepsilon}(t) = y(t) - \varphi^T(t) \hat{\theta}(t - T_s) \quad (3.91)$$

อัตราขยายการเปลี่ยนแปลง

$$P(t) = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ P(t - T_s) - \frac{\lambda_2 P(t - T_s) \varphi(t) \varphi^T(t) P(t - T_s)}{\lambda_1 + \lambda_2 \varphi^T(t) P(t - T_s) \varphi(t)} \right\} \quad (3.92)$$

และเวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $P(t - T_s) \varphi(t)$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงแก้ไข หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 กติการทุกครั้งที่มีการนำออกไปใช้

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t - T_s) + \frac{P(t - T_s) \varphi(t)}{1 + \varphi^T(t) P(t - T_s) \varphi(t)} \hat{\varepsilon}(t) \quad (3.93)$$

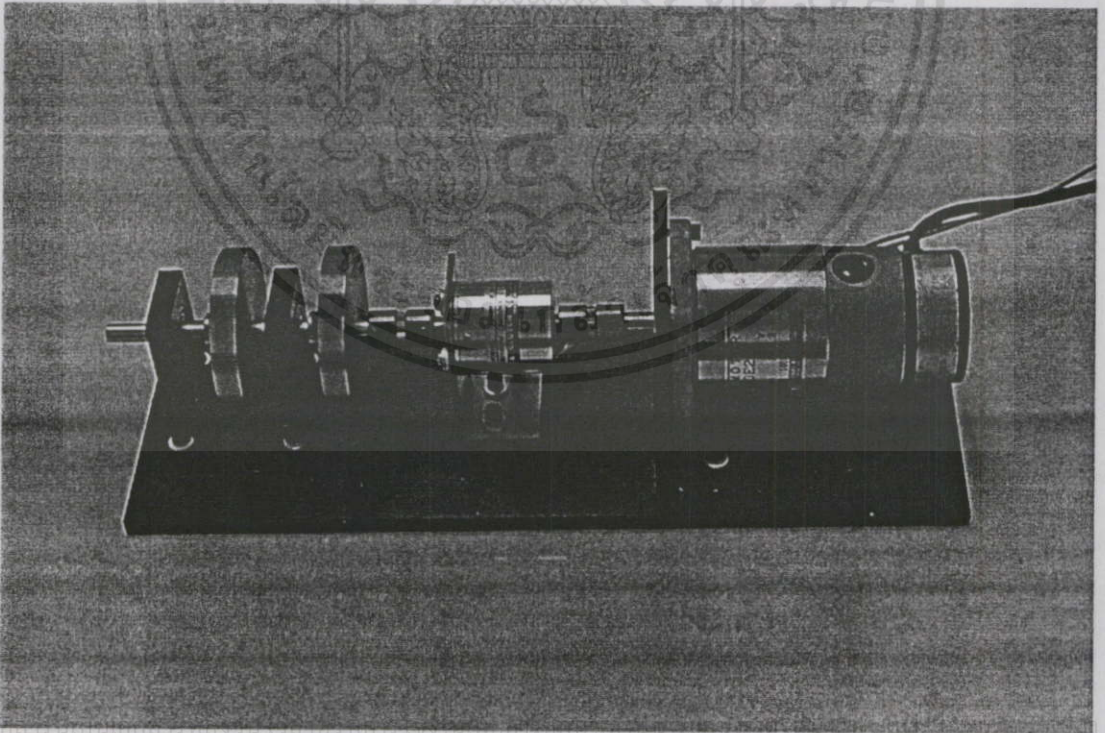
เมื่อ  $T_s$  เป็นคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (sampling time)

## บทที่ 4

### การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง

บทนี้กล่าวถึงการทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด เปรียบเทียบผลการทดสอบกับพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงจากการทดสอบแบบเดิม พารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงที่ทำการทดสอบและเปรียบเทียบ คือ พารามิเตอร์ควบคุม ได้แก่ ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  ค่าเวลาคงตัวทางกล  $\tau_m$  ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  และค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $K_b$  และพารามิเตอร์ทางกายภาพ ได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $R_a$  ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $L_a$  ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $K_b$  สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด  $b$  และโมเมนต์ความเฉื่อย  $J$

รูปที่ 4.1 แสดงมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบ และคุณสมบัติเฉพาะของมอเตอร์กระแสตรงแสดงในภาคผนวก ก.



10 การนำเสนอเนื้อหาที่สงวนลิขสิทธิ์โดย สำนักพิมพ์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 มอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบ

#### 4.1 การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงวิธีลือคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงด้วยวิธีลือคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า ปฏิบัติตามขั้นตอนในบทที่ 2 ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

##### 4.1.1 ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  วัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $i_a(t)$  และคำนวณความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $R_a$  ดังแสดงในตารางที่ 4.1

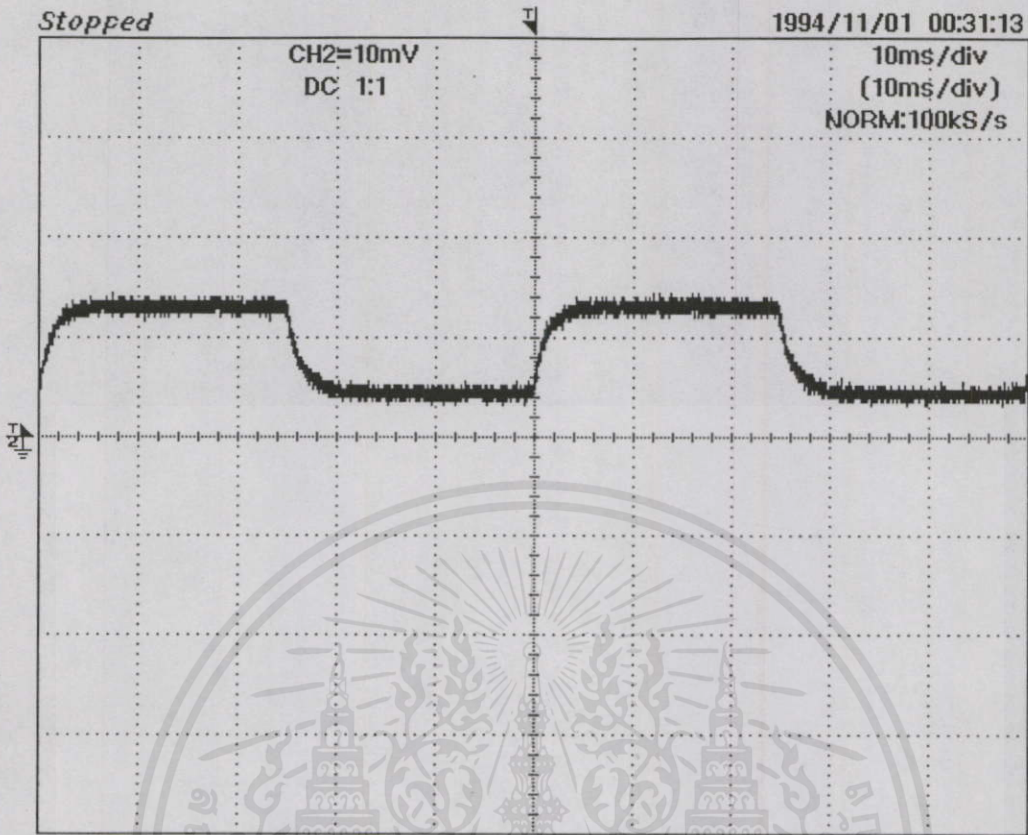
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (โวลต์)	กระแสอาร์เมเจอร์ (แอมแปร์)	ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (โอห์ม)
3.00	0.59	5.08
3.50	0.68	5.15
4.00	0.78	5.13
4.50	0.88	5.11
5.00	1.00	5.00
5.50	1.10	5.00
6.00	1.22	4.92
6.50	1.34	4.85
7.00	1.45	4.83
7.50	1.56	4.81

จากตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $R_a$  คือ 4.98 โอห์ม

##### 4.1.2 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

การทดสอบความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  ชนิดเป็นระดับ ขนาด +1.2 ถึง +4 โวลต์ ความถี่ 20 เฮิรตซ์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์  $i_a(t)$  แสดงโดยรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กระแสอาร์เมเจอร์

การเปลี่ยนแปลงกระแสอาร์เมเจอร์ในรูปที่ 4.2 ได้ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  มีค่า 0.0013 วินาที และจากสมการ (2.15) ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $L_a$  คือ 6.474 มิลลิเฮนรี

#### 4.1.3 ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ และค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

การทดสอบค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ และค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $i_a(t)$  และค่าความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์  $\omega(t)$  แสดงโดยตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การทดสอบค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์

กระแสไฟฟ้า อาร์เมเจอร์ (แอมแปร์)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์)	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)	ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ (โวลต์/เรเดียน/วินาที)
0.150	23.875	150.011	0.075
0.300	23.383	146.920	0.072
0.500	21.699	136.338	0.070

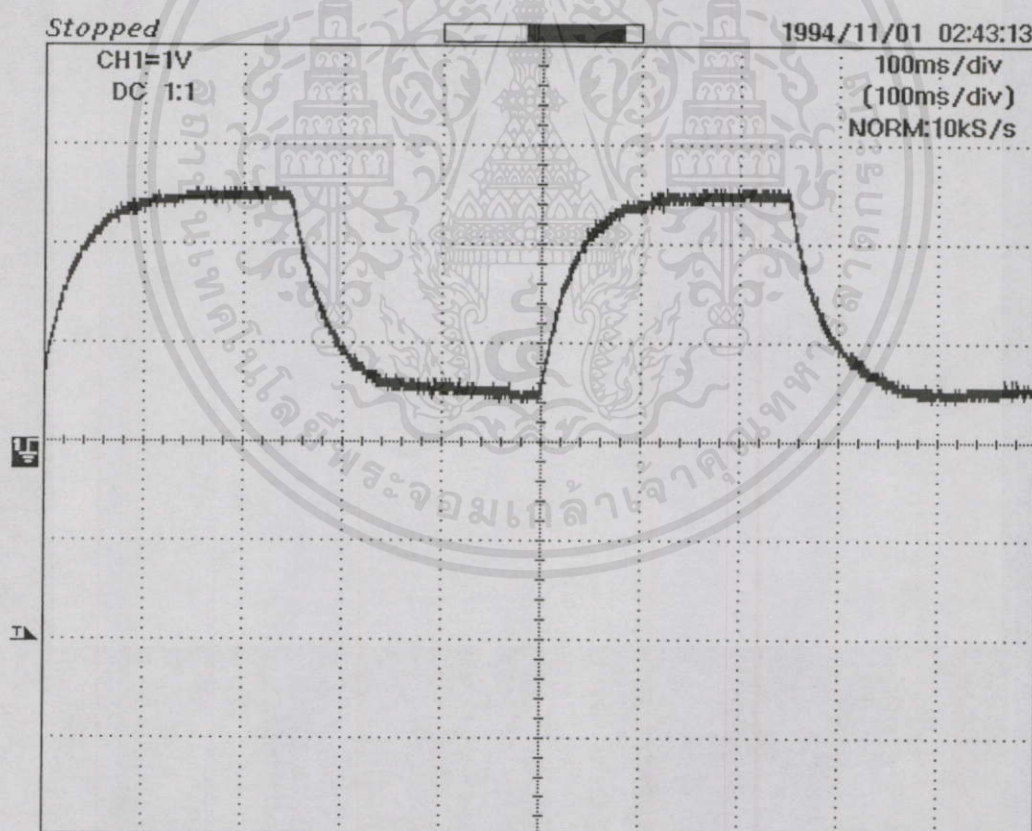
### ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กระแสไฟฟ้า อาร์เมเจอร์ (แอมแปร์)	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)	ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ (โวลต์/เรเดียน/วินาที)
0.700	19.905	125.066	0.068
1.000	16.846	105.847	0.067

จากตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  คือ 0.070 โวลต์/เรเดียน/วินาที

#### 4.1.4 โมเมนต์ความเฉื่อย

การทดสอบโมเมนต์ความเฉื่อย โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  ชนิดเป็นระดับขนาด +1.6 ถึง +6 โวลต์ ความถี่ 2 เฮิรตซ์ การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์  $\omega(t)$  แสดงโดยรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในรูปที่ 4.3 ได้ค่าคงตัวทางกล  $\tau_m$  มีค่า 0.03  
วินาที และจากสมการ (2.17) โมเมนต์ความเฉื่อย  $J$  คือ  $29.76 \times 10^{-6}$  กิโลกรัม-เมตร

## 4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง จากการทดสอบพารามิเตอร์โดยวิธีสี่คโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า คือ

$$E_a(s) = 4.98I_a(s) + 0.006s I_a(s) + 0.070\omega(s) \quad (4.1)$$

$$0.070I_a(s) = 0.00003s \omega(s) + 0.0003\omega(s) \quad (4.2)$$

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{14.28}{0.000039s^2 + 0.03s + 1} \quad (4.3)$$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง โดยการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดในรูปสมการอนุพันธ์ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดแควตอร์สังเกต  $\varphi(t)$  และแควตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  ที่ต้องการ
- 2) กำหนดค่าอัตราการสุ่มสัญญาณ  $T_s$  ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  แควตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น  $\hat{\theta}(0)$  และเมตริกซ์อัตราขยายการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้น  $P(0)$
- 3) รับค่าสัญญาณออก  $y(t)$  และแควตอร์สังเกต  $\varphi(t)$  ของมอเตอร์กระแสตรงขณะกำลังปฏิบัติงานผ่านคาร์คแปลงสัญญาณแอนะลอก เป็นดิจิตอล ทุกคาบของการสุ่มสัญญาณ
- 4) ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบของมอเตอร์กระแสตรงเพื่อหาแควตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  จากสมการ (3.90) ถึงสมการ (3.92) ทุกคาบของการสุ่มค่าสัญญาณ

### 4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์ควบคุมของมอเตอร์กระแสตรง [8][9]

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงจากการทดสอบวิธีสี่คโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า คือ

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{14.28}{0.000039s^2 + 0.03s + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
พิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด หาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงในรูปพารามิเตอร์ควบคุม ได้แก่ ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  ค่าเวลาคงตัวทางกล  $\tau_m$  ค่าคงที่แรงบิด

มอเตอร์  $K_m$  และค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $K_b$  โดยพิจารณาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง ดังสมการ

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{b_0}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \quad (4.4)$$

$$\theta^T = \{a_1, a_2, b_0\} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $a_1$   $a_2$  และ  $b_0$  คือ  $\tau_m$   $\tau_m \tau_e$  และ  $1/K_b$  ตามลำดับ

เวกเตอร์สังเกต  $\varphi(t)$  และเวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  คือ

$$\varphi^T(t) = \left\{ -\frac{d}{dt} y(t), -\frac{d^2}{dt^2} y(t), u(t) \right\} \quad (4.6)$$

และ

$$\hat{\theta}^T(t) = \{a_1(t), a_2(t), b_0(t)\} \quad (4.7)$$

การทดสอบประมาณค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และอนุพันธ์อันดับสองของ  $y(t)$  โดยสมการ

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} y(t) &\cong \frac{y(t) - y(t - T_s)}{T_s} \\ \frac{d^2}{dt^2} y(t) &\cong \frac{\left( \frac{d}{dt} y(t) - \frac{d}{dt} y(t - T_s) \right)}{T_s} \end{aligned} \quad (4.8)$$

#### 4.2.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์มอเตอร์กระแสตรง

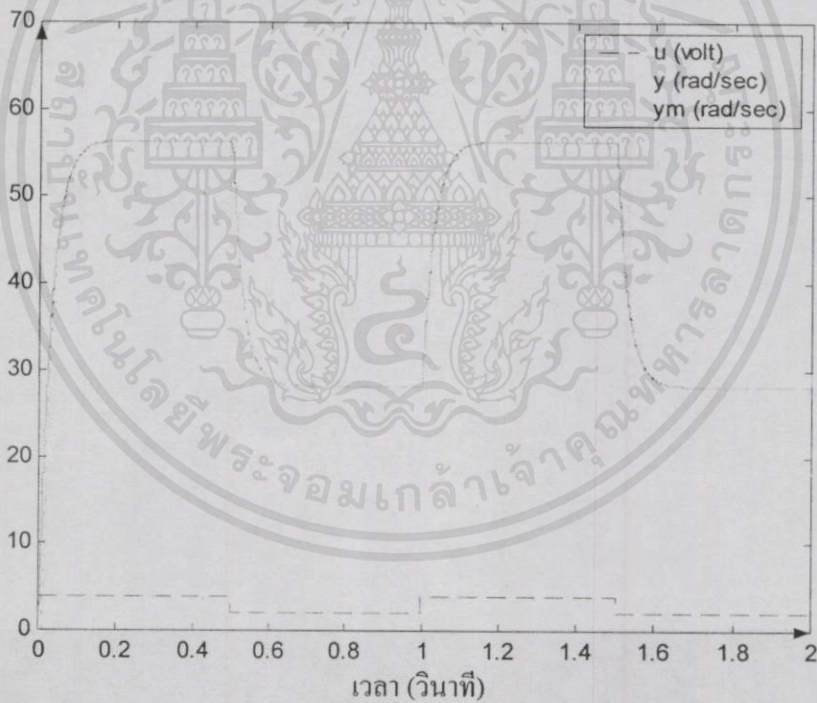
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง เป็นการทดสอบระบบที่คุณสมบัติคงที่ และเพื่อให้มีความเร่งในการลู่เข้า ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักกรณีตัวประกอบการลิมแปรค่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น  $\lambda_1(t) = \lambda_0 \lambda_1(t-1) + 1 - \lambda_0$  ต้องอ้างอิงถึง และเอกสารทุกฉบับ  $\lambda_2$  คือ 1 นำไปใช้

เมื่อ  $\lambda_1(0)$  เท่ากับ 0.95 และ  $\lambda_0$  เท่ากับ 0.99

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ทดสอบในกรณีไม่ทราบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง คือ เวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น  $\hat{\theta}(0)$  คือ เวกเตอร์ 0 และกำหนดให้อัตราการขยายการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้น  $P(0)$  เท่ากับ  $10000I$  เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์มีค่ามากในตอนเริ่มต้น

ในการทดสอบพารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์มเจอร์  $e_a(t)$  รูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับ +2 ถึง +4 โวลต์ คาบเวลา 1 วินาที และกำหนดคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ  $T_s$  เท่ากับ 0.0005 วินาที

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอรืมอเตอร์กระแสตรงเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของแบบจำลองคณิตศาสตร์  $y(t)$  กับ ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ  $y_m(t)$  แสดง โดยรูปที่ 4.4 เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์มเจอร์



รูปที่ 4.4 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอรื

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจากรูปที่ 4.4 แสดงว่า ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ต่างจากความเร็วเชิงมุมจากแบบจำลองคอมพิวเตอรืเพียงเล็กน้อยในระยะเริ่มต้นประมาณ 0.2 วินาที หลังจากนั้นความเร็วเชิงมุมของแบบจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

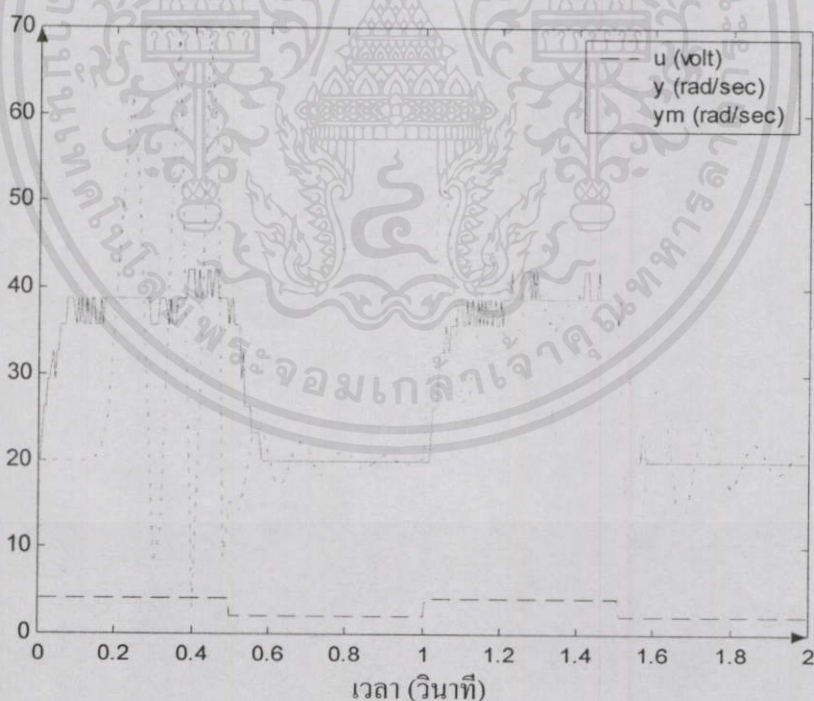
ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด ได้พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนี้

$$\begin{aligned} a_1 &= \tau_m &= & 0.029 \\ a_2 &= \tau_m \tau_e &= & 0.000024 \\ b_0 &= 1/K_b &= & 14.07 \end{aligned}$$

#### 4.2.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง ดำเนินขั้นตอนตามการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์

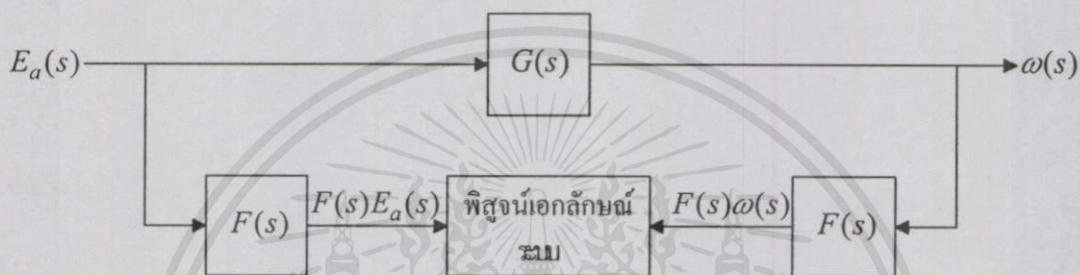
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรงเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์กระแสตรง  $y(t)$  กับ ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ  $y_m(t)$  แสดงโดยรูปที่ 4.5 เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์มเจอร์



รูปที่ 4.5 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูงที่เกิดขึ้นกับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์กระแสตรง ทำให้ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเกิดการแกว่ง

ในการทดสอบทำการเพิ่มวงจรรองความถี่แบบดิจิตอลชนิดความถี่ต่ำผ่าน  $F(s)$  สำหรับกรองสัญญาณเข้า  $E_a(s)$  และสัญญาณออก  $\omega(s)$  ของมอเตอร์กระแสตรง เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง ก่อนใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ดังแสดงโดยบล็อกไดอะแกรมการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง โดยเพิ่มวงจรรองความถี่แบบดิจิตอลชนิดความถี่ต่ำผ่าน

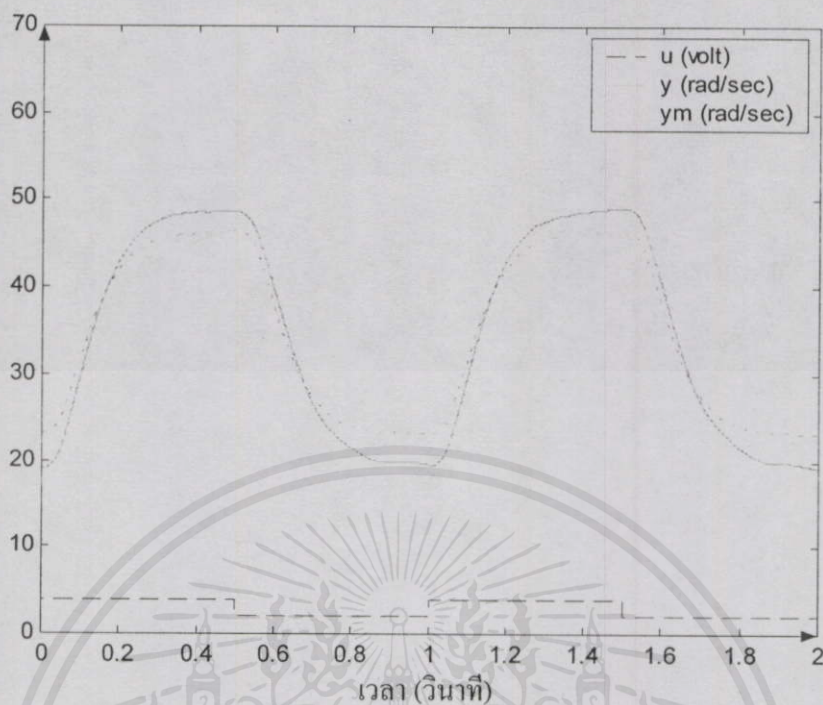
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่แบบดิจิตอลชนิดความถี่ต่ำผ่านสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์มอเตอร์กระแสตรง คือ

$$F(s) = \frac{1}{(\alpha s + 1)^2} \quad \text{เมื่อ } \alpha = 0.1$$

แบบจำลองคณิตศาสตร์รวมของมอเตอร์กระแสตรง และวงจรรองความถี่ คือ

$$G(s) = \frac{F(s)\omega(s)}{F(s)E_a(s)} = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{b_0}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \tag{4.9}$$

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรงเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์กระแสตรง  $y(t)$  กับ ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ  $y_m(t)$  แสดงโดยรูปที่ 4.7 เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

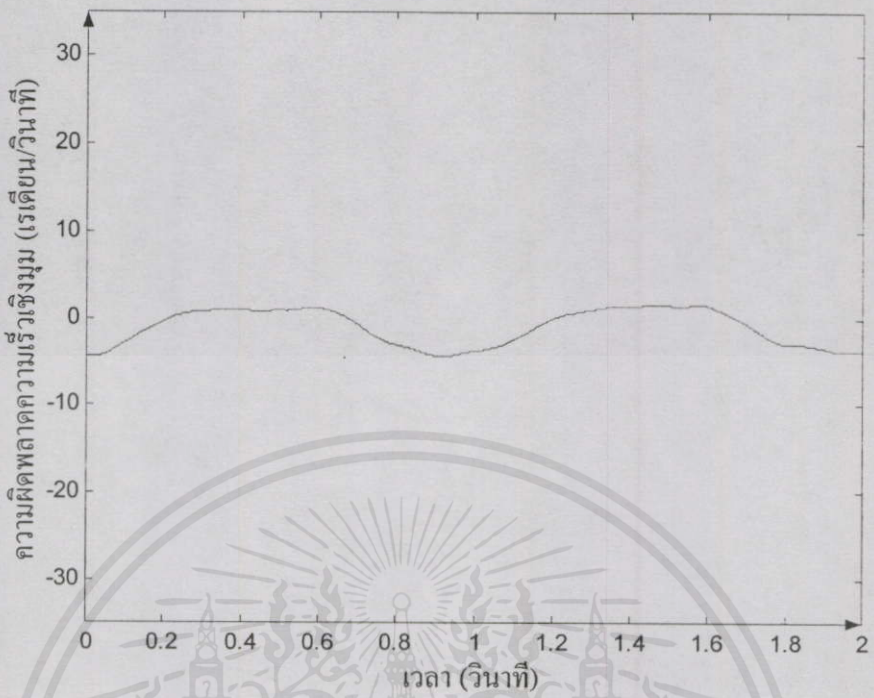


รูปที่ 4.7 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง

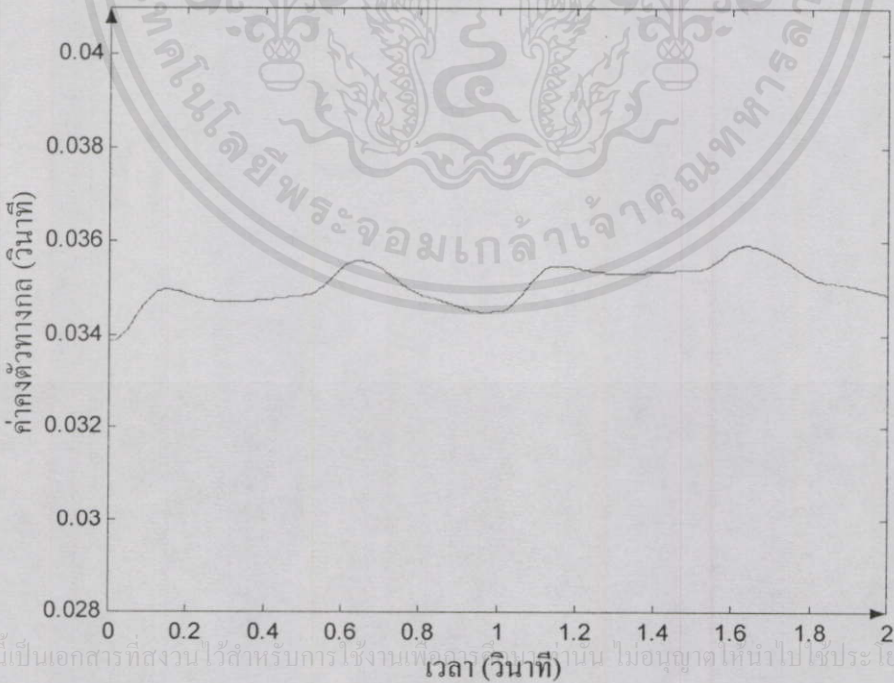
ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจากรูปที่ 4.7 แสดงว่า ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ แตกต่างจากความเร็วเชิงมุมมอเตอร์กระแสตรง ทำให้เกิดความผิดพลาดของความเร็วเชิงมุมช่วงคงตัว มีค่า -4 ถึง +1 เรเดียน/วินาที ดังแสดงโดยรูปที่ 4.8

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบประมาณพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง  $a_1$   $a_2$  และ  $b_0$  แสดงดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

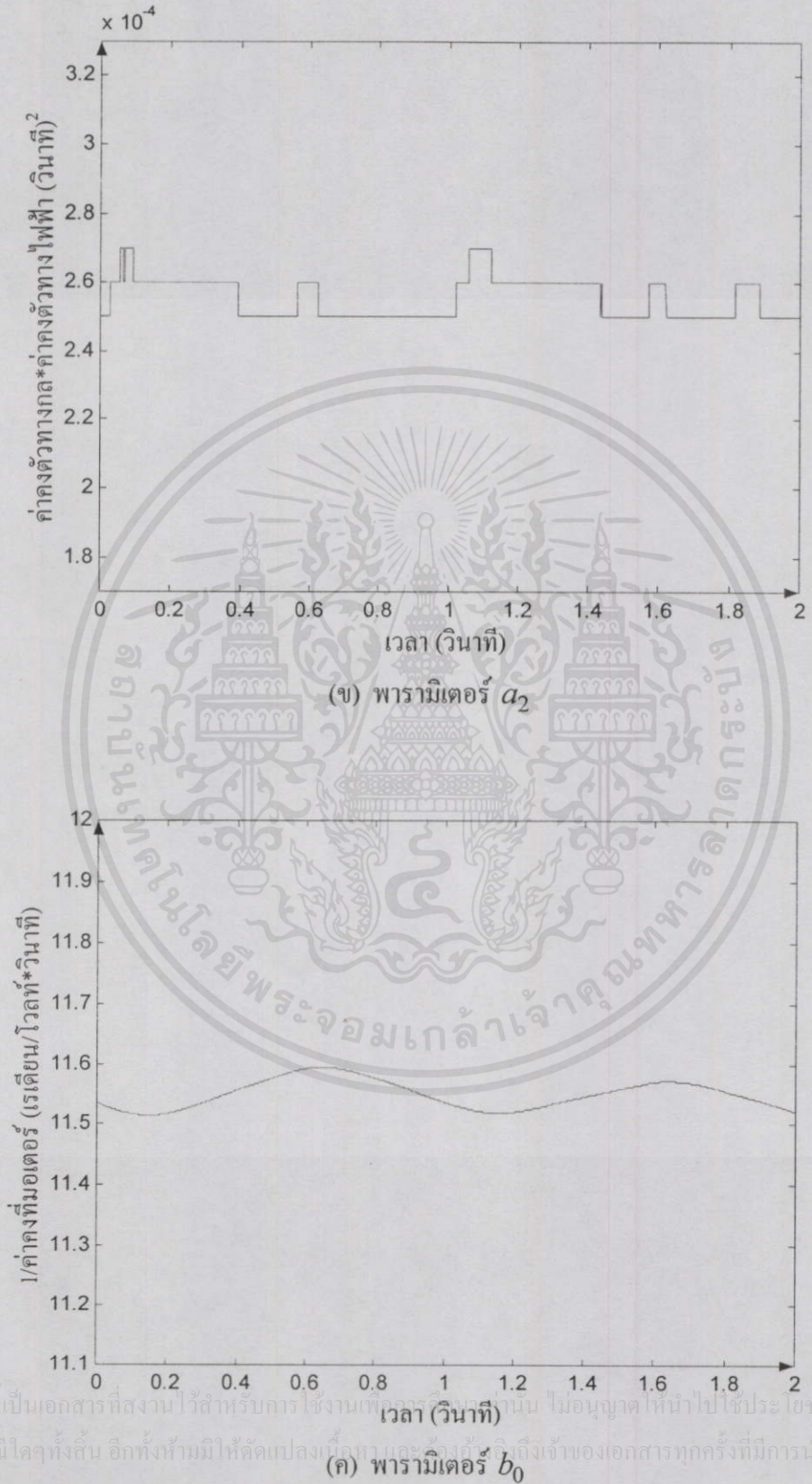


รูปที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดของความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และอ้างถึงหรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
(ก) พารามิเตอร์  $a_1$

รูปที่ 4.9 การประมาณพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 4.9 (ต่อ)

พารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรงจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรงจากการทดสอบวิธีลอคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง

	$a_1$	$a_2$	$b_0$
วิธีลอคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า	0.03	0.000039	14.28
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์	0.029	0.000024	14.07
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง	0.035	0.000255	11.55

พารามิเตอร์ควบคุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ เปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ควบคุมจากการทดสอบวิธีลอคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ควบคุมของมอเตอร์กระแสตรง

	$\tau_m$	$\tau_e$	$K_b$
วิธีลอคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า	0.03	0.0013	0.070
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์	0.029	0.0008	0.071
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง	0.035	0.0073	0.087

#### 4.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรง [10]

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงจากการทดสอบวิธีลอคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า คือ  $i_a(t)$  ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_a(t) = 4.98i_a(t) + 0.006 \frac{d i_a(t)}{dt} + 0.070\omega(t)$$

$$0.070i_a(s) = 0.00003s \frac{d\omega(t)}{dt} + 0.0003\omega(t)$$

พิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด หาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงในรูปพารามิเตอร์ทางกายภาพ ได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $R_a$  ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $L_a$  ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์  $K_m$  ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ  $K_b$  สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด  $b$  และโมเมนต์ความเฉื่อย  $J$  โดยพิจารณาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง ดังสมการ

$$e_a(t) = a_1 i_a(t) + a_2 \frac{d i_a(t)}{dt} + a_3 \omega(t) \quad (4.10)$$

$$\theta_1^T = \{a_1, a_2, a_3\} \quad (4.11)$$

$$a_3 i_a(s) = b_0 s \frac{d\omega(t)}{dt} + b_1 \omega(t) \quad (4.12)$$

$$\theta_2^T = \{b_0, b_1\} \quad (4.13)$$

เมื่อ  $a_1$   $a_2$   $a_3$   $b_0$  และ  $b_1$  คือ  $R_a$   $L_a$   $K_m$   $b$  และ  $J$  ตามลำดับ

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบหาพารามิเตอร์ทางกายภาพ จะทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ 2 ครั้ง ครั้งที่หนึ่งทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบหาเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta_1$  โดยมีเวกเตอร์สังเกต  $\varphi_1(t)$  และเวกเตอร์การประมาณพารามิเตอร์  $\hat{\theta}_1(t)$  คือ

$$\varphi_1^T(t) = \left\{ i_a(t), \frac{d i_a(t)}{dt}, \omega(t) \right\} \quad (4.14)$$

และ

$$\hat{\theta}_1^T(t) = \{a_1(t), a_2(t), a_3(t)\} \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบครั้งที่สองนำค่า  $a_3$  จากเวกเตอร์การประมาณพารามิเตอร์  $\hat{\theta}_1(t)$  ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบหาเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta_2$  โดยมีเวกเตอร์สังเกต  $\varphi_2(t)$  และเวกเตอร์การประมาณพารามิเตอร์  $\hat{\theta}_2(t)$  คือ

$$\varphi_2^T(t) = \left\{ \omega(t), \frac{d\omega(t)}{dt} \right\} \quad (4.16)$$

และ

$$\hat{\theta}_2^T(t) = \{b_0(t), b_1(t)\} \quad (4.17)$$

การทดสอบประมาณค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ  $y(t)$  ตามสมการ (4.8)

$$\frac{d y(t)}{dt} \cong \frac{y(t) - y(t - T_s)}{T_s}$$

#### 4.2.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์มอดูเลเตอร์กระแสตรง

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอดูเลเตอร์กระแสตรง เป็นการทดสอบระบบที่คุณสมบัติคงที่ และเพื่อให้มีความเร่งในการสู่เข้า ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักกรณีตัวประกอบการลื่นแปรค่า

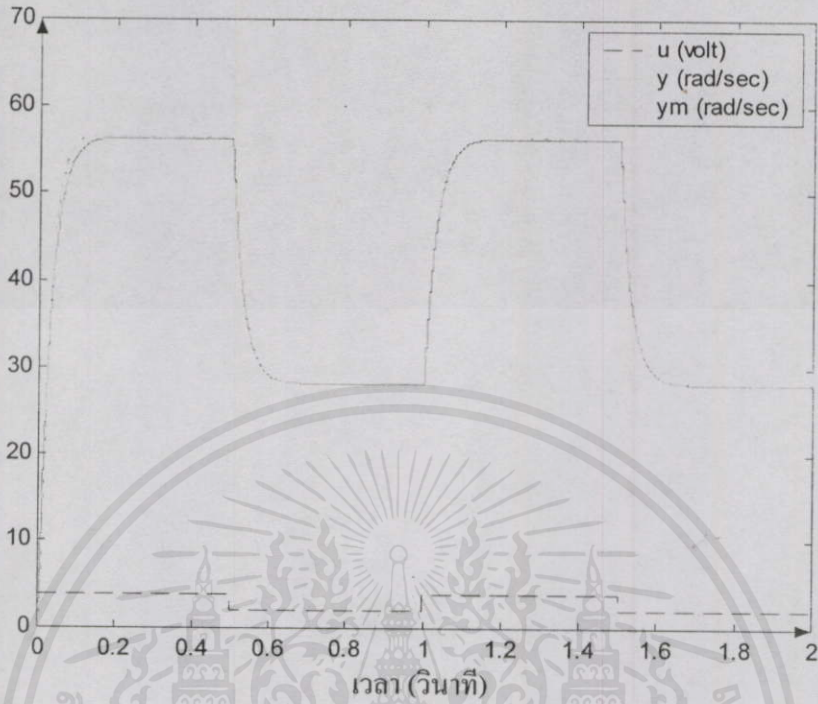
$$\lambda_1(t) = \lambda_0 \lambda_1(t-1) + 1 - \lambda_0 \quad \text{และ} \quad \lambda_2 = 1$$

เมื่อ  $\lambda_1(0)$  เท่ากับ 0.95 และ  $\lambda_0$  เท่ากับ 0.99

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ทดสอบในกรณีไม่ทราบพารามิเตอร์ของมอดูเลเตอร์กระแสตรง คือ เวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น  $\hat{\theta}(0)$  คือ เวกเตอร์ 0 และกำหนดให้อัตราการขยายการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้น  $P(0)$  เท่ากับ  $10000I$  เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์มีค่ามากในตอนเริ่มต้น

ในการทดสอบพารามิเตอร์มอดูเลเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $e_a(t)$  รูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับ +2 ถึง +4 โวลต์ คาบเวลา 1 วินาที และกำหนดคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ  $T_s$  เท่ากับ 0.0005 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณี การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์มอดูเลเตอร์กระแสตรงเปรียบเทียบกับความเร็ว  
เชิงมุมของแบบจำลองคณิตศาสตร์  $y(t)$  กับ ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์  
ระบบ  $y_m(t)$  แสดงโดยรูปที่ 4.10 เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์



รูปที่ 4.10 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจากรูปที่ 4.10 แสดงว่า ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ต่างจากความเร็วเชิงมุมจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพียงเล็กน้อยในระยะเริ่มต้นประมาณ 0.2 วินาที หลังจากนั้นความเร็วเชิงมุมของแบบจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำค่าทั้งสองน้อยที่สุด ได้พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนี้

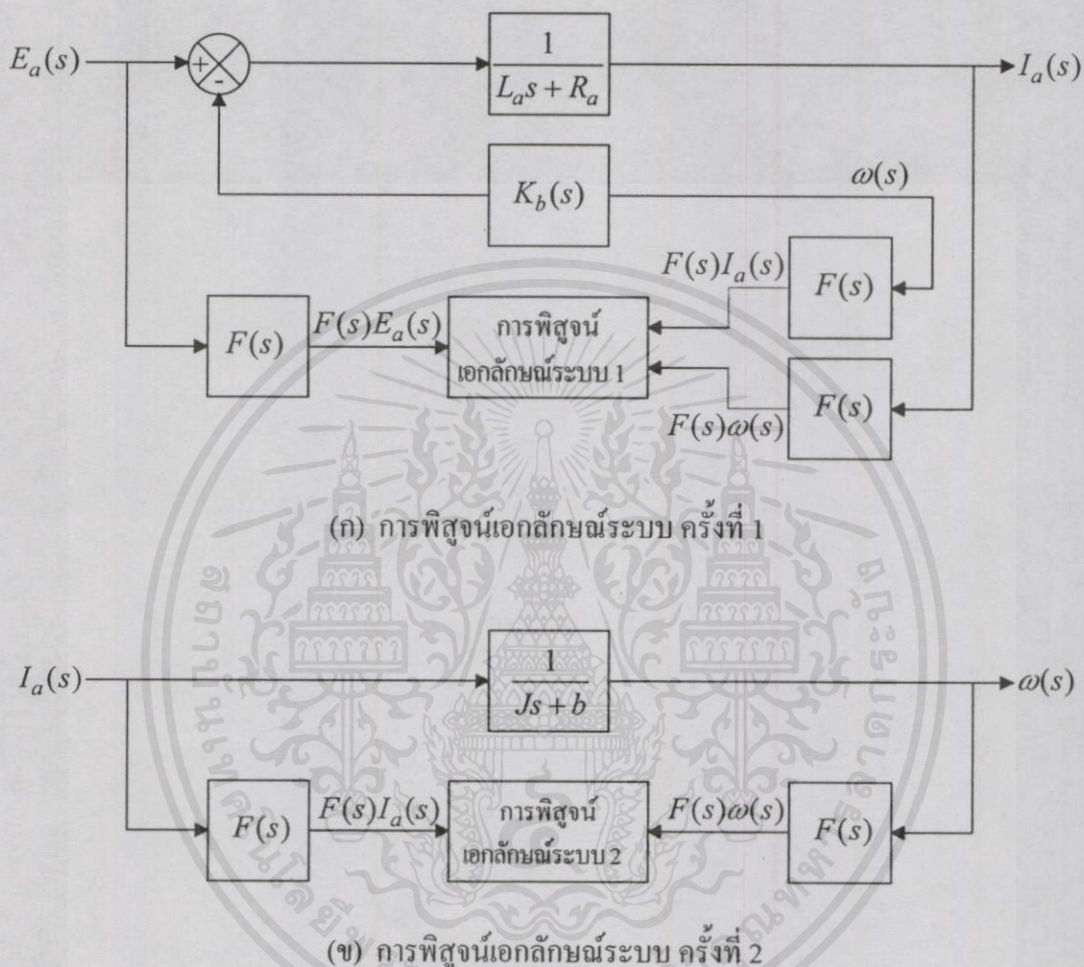
$a_1$	=	$R_a$	=	5.145
$a_2$	=	$L_a$	=	0.004
$a_3$	=	$K_m$	=	0.049
$b_0$	=	$b$	=	0.00021
$b_1$	=	$J$	=	0.00002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4.2.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรงในห้วงปฏิบัติการ

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทดสอบพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง ดำเนินขั้นตอนตามการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยเพิ่มวงจรรองความถี่แบบดิจิทัลชนิดความถี่

ต่ำผ่าน  $F(s)$  สำหรับกรองสัญญาณเข้า และสัญญาณออกของการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบทั้งสอง ครั้ง เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง ก่อนใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ดังแสดงโดยบล็อกไดอะแกรมการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ รูปที่ 4.11

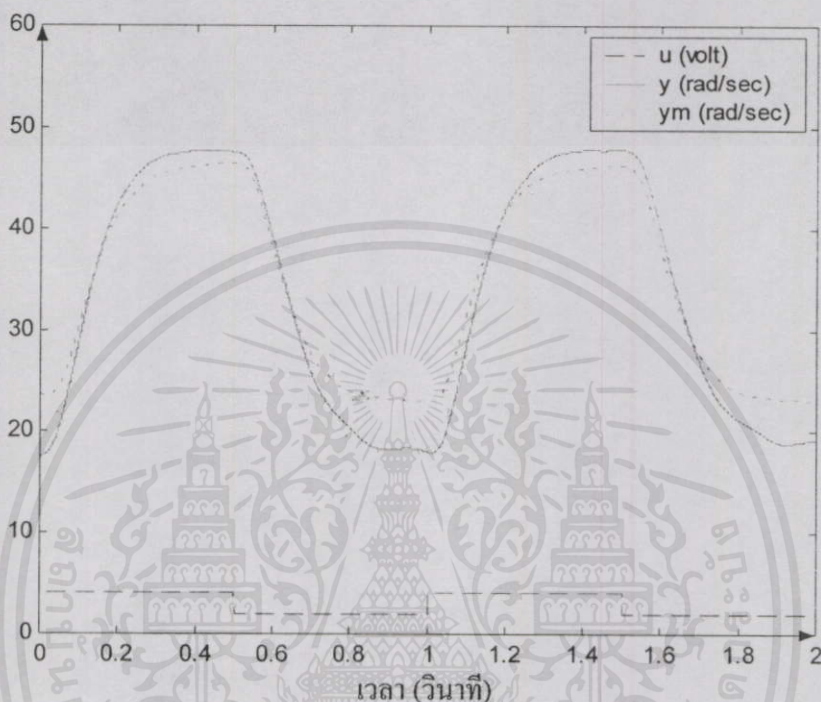


รูปที่ 4.11 บล็อกไดอะแกรมการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง โดยเพิ่มวงจรกรองความถี่แบบคัตออฟความถี่ต่ำผ่าน

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่แบบคัตออฟความถี่ต่ำผ่านสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์มอเตอร์กระแสตรง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรงเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์กระแสตรง  $y(t)$  กับ ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ  $y_m(t)$  แสดงโดยรูปที่ 4.12 เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์

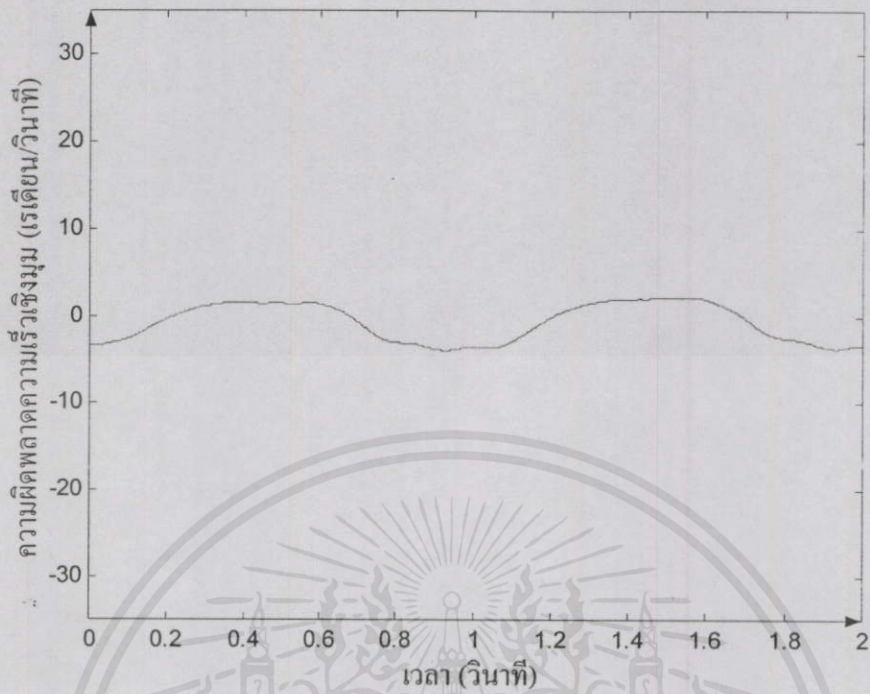


รูปที่ 4.12 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง

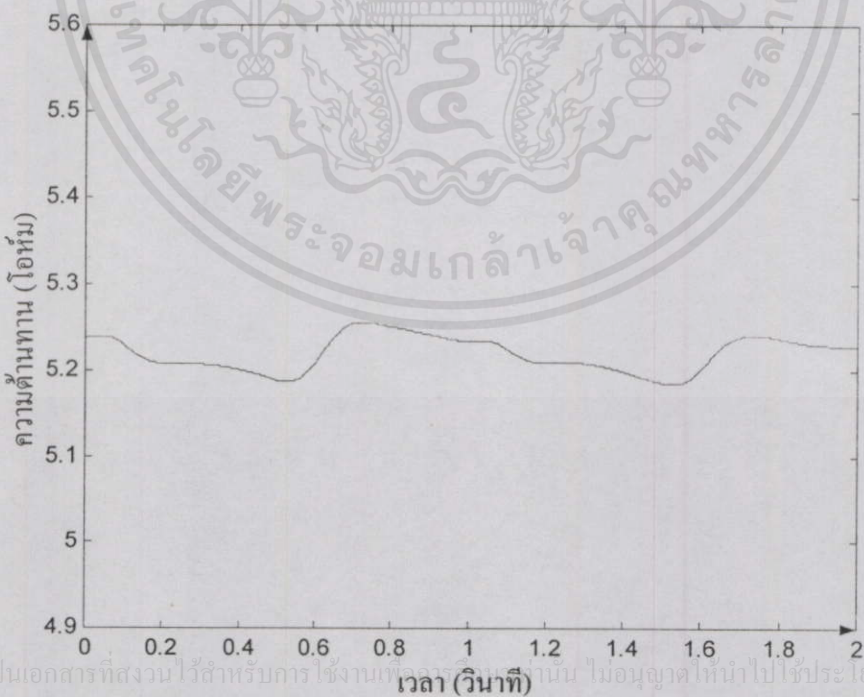
ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจากรูปที่ 4.12 แสดงว่า ความเร็วเชิงมุมแบบจำลองจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ แตกต่างจากความเร็วเชิงมุมมอเตอร์กระแสตรง ทำให้เกิดความผิดพลาดของความเร็วเชิงมุมช่วงคงตัว มีค่า  $-4$  ถึง  $+2$  เรเดียน/วินาที ดังแสดงโดยรูปที่ 4.13

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบประมาณพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง  $a_1$   $a_2$   $a_3$   $b_0$  และ  $b_1$  แสดงดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

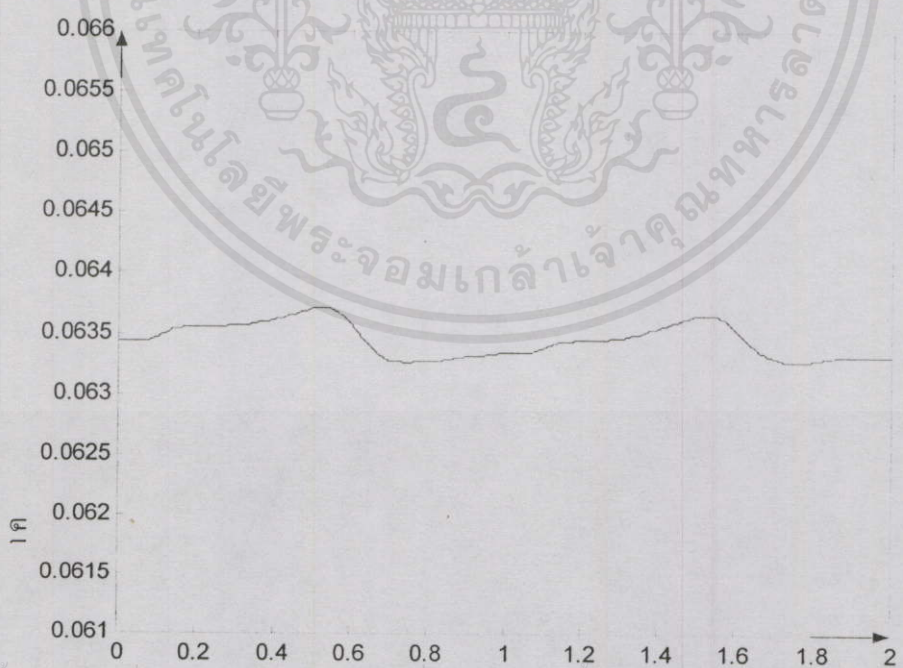
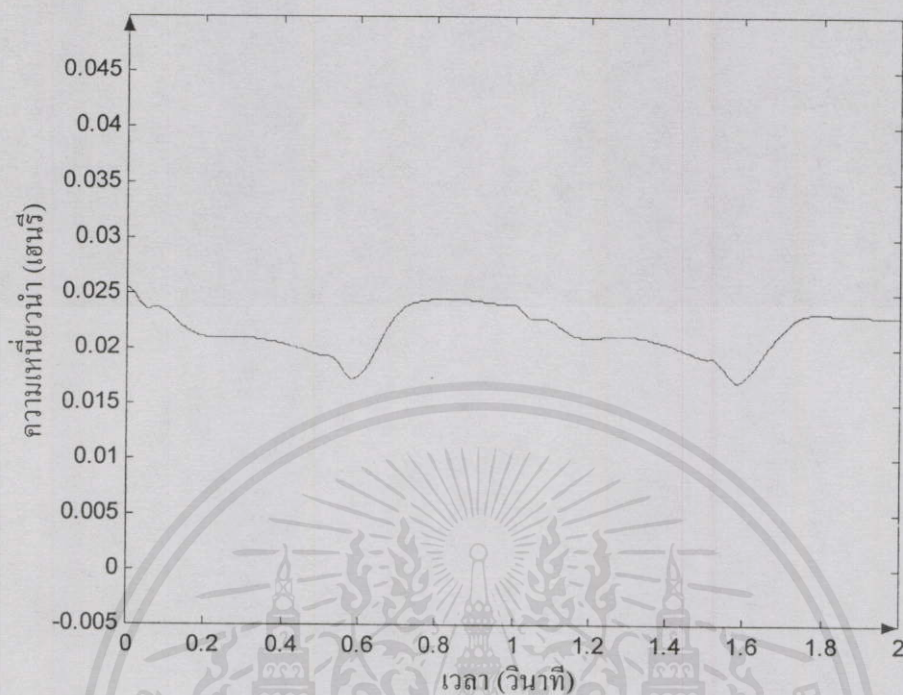


รูปที่ 4.13 ค่าความผิดพลาดของความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ



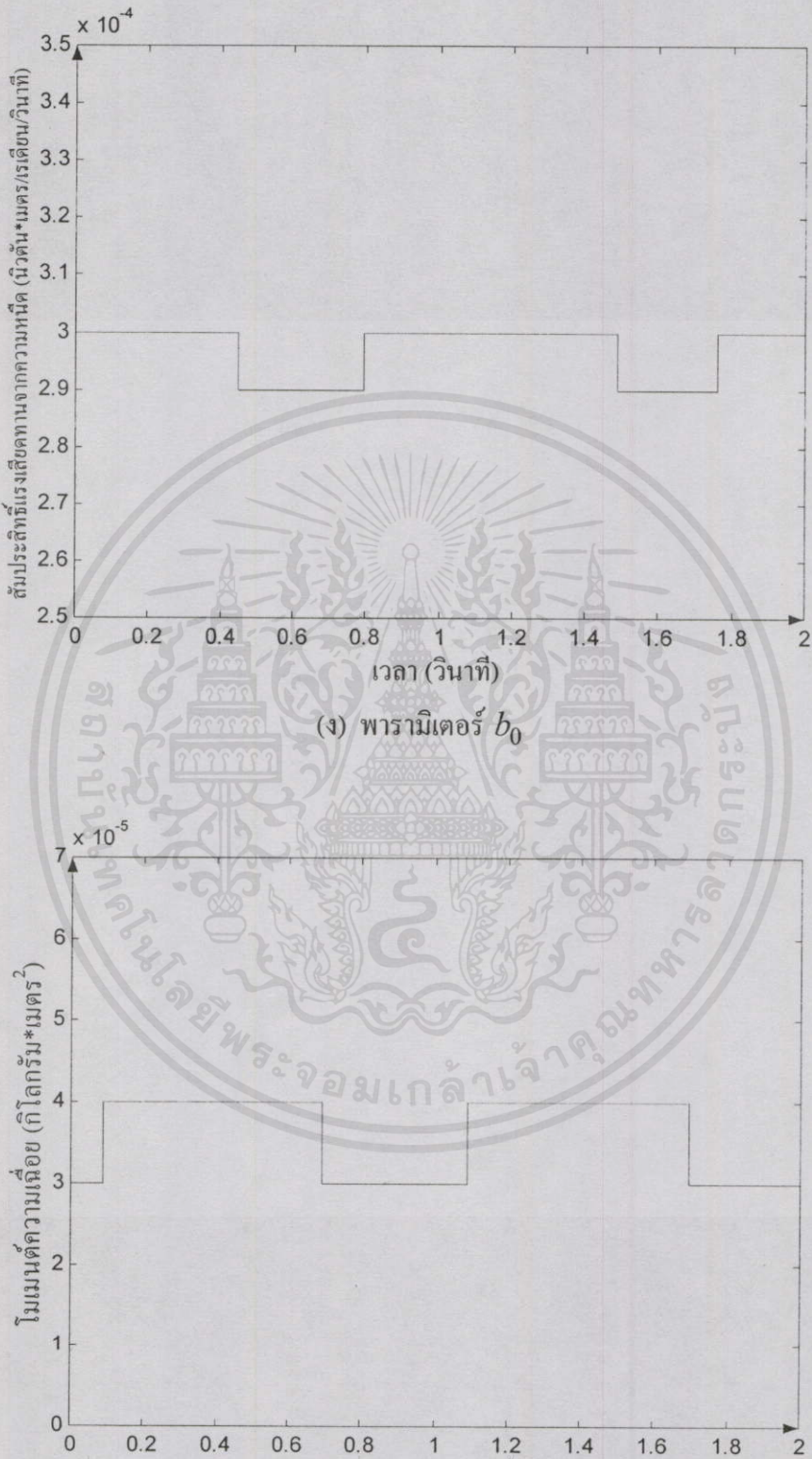
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
(ก) พารามิเตอร์  $\alpha_1$

รูปที่ 4.14 การประมาณพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ เวลา (วินาที) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงหรือ  
การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ เวลา (วินาที) นั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง (จ) พารามิเตอร์  $b_1$  จึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 (ต่อ)

พารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรงจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรงจากการทดสอบวิธีลอคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรง

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_0$	$b_1$
วิธีลอคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า	4.98	0.0065	0.070	0.0003	0.00003
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์	5.14	0.0043	0.049	0.0002	0.00002
การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบมอเตอร์กระแสตรง	5.22	0.022	0.066	0.0003	0.00002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผล และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุป

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงานในรูปพารามิเตอร์ควบคุม และพารามิเตอร์ทางกายภาพ กับแบบจำลองคอมพิวเตอร์มอเตอร์กระแสตรง และมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ โดยเพิ่มวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลชนิดความถี่ต่ำผ่าน เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง แสดงให้เห็นความสามารถในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงได้รวดเร็ว และสะดวกกว่าการทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงวิธีลือคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า

การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบรูปสมการอนุพันธ์ ทำให้ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความหมายสมบูรณ์ตามความรู้ทางวิทยาศาสตร์กายภาพ รูปแบบสมการไม่ซับซ้อน และใช้ประโยชน์ได้ง่ายกว่าการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบรูปสมการผลต่าง และสามารถใช้หลักการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบรูปแบบสมการอนุพันธ์ ไปประยุกต์เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ เมื่อได้แบบจำลองคณิตศาสตร์จากกฎทางฟิสิกส์

### 5.2 ปัญหาที่พบ

5.2.1 จากภาคผนวก ข เอกสารอ้างอิง [10] ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์  $L_a$  ที่ทดสอบโดยวิธีลือคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า เป็นค่าที่ทำการทดสอบผิดพลาด ได้ทำการคำนวณแก้ไขใหม่ และเปรียบเทียบกับค่าจากข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์กระแสตรงในภาคผนวก ก ดังแสดงในตารางที่ 4.5

5.2.2 ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์  $L_a$  ที่ทดสอบการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดกับมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ ในตารางที่ 4.5 มีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าในข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์กระแสตรงในภาคผนวก ก และค่าที่ได้จากการทดสอบวิธีลือคโรเตอร์ และป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า โดยได้ตั้งข้อสมมติฐานของความผิดพลาดไว้ ดังนี้

5.2.2.1 ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และการคำนวณ เช่น ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และอุปกรณ์ไมโครโพรเซสเซอร์ที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก และการปัดเศษในการคำนวณ

- 5.2.2.2 การเขียนโปรแกรมการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ บางชุดคำสั่ง หรือบางตัวแปรอาจทำงานซ้ำซ้อน ทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณ และใช้เวลานานในการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ
- 5.2.2.3 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลชนิดกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเพื่อทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ ที่มีผลต่อภาวะชั่วคราว (transient) ของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่
- 5.2.2.4 อัตราการสุ่มสัญญาณ ถูกจำกัดด้วยเวลาในการรับส่งข้อมูล การคำนวณ และการแสดงผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้ไม่สามารถทำการสุ่มสัญญาณด้วยความถี่สูง

### 5.3 การแก้ไขข้อผิดพลาด

- 5.3.1 จัดหาอุปกรณ์ที่มีความละเอียด และถูกต้อง เพื่อใช้ในการทดสอบการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูง
- 5.3.2 ศึกษาโปรแกรม และคู่มือของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบให้ละเอียด เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างถูกต้องมีประสิทธิภาพสูงสุด ทำการแก้ไขโปรแกรมผิดพลาด ตัดส่วนที่ซ้ำซ้อน ไม่จำเป็นออก เพื่อลดเวลาในการทำงาน
- 5.3.3 ตรวจสอบผลกระทบของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลชนิดความถี่ต่ำผ่าน ต่อความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์

จากสมมติฐานความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ทั้ง 4 ข้อ ได้ทำการทดสอบโดยเพิ่มวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลในการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์  $L_a$  ที่ได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ ไม่มีความแตกต่างจากกรณีไม่มีวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลมากนัก

สำหรับอัตราการสุ่มสัญญาณ ได้เปลี่ยนอัตราการสุ่มสัญญาณจาก 0.0005 วินาที เป็น 0.0001 วินาที ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์  $L_a$  ที่ได้ คือ 0.00063 เฮนรี โดยมีค่าเข้าใกล้ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ในเอกสารของมอเตอร์กระแสตรงในภาคผนวก ก มากกว่าค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการสุ่มสัญญาณที่ 0.0005 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.5

จากการทดสอบเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดในการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบหาค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ สรุปได้ว่าการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบเพื่อทดสอบพารามิเตอร์ทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรง วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์  $L_a$  น้อยมาก แต่สำหรับอัตราการสุ่มสัญญาณที่ความถี่สูง ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์  $L_a$  จะมีค่าใกล้เคียงค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ในเอกสารของมอเตอร์กระแสตรงในภาคผนวก ก มากกว่า

#### 5.4 แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งาน และการพัฒนา

- 5.4.1 สามารถนำการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง และค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ เพื่อทำการออกแบบระบบควบคุมที่ต้องการได้
- 5.4.2 สามารถนำหลักการหาค่าพารามิเตอร์ที่เขียนไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปปรับปรุงให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของระบบอื่นที่ไม่ใช่มอเตอร์กระแสตรงได้ โดยอาจหาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณต่อเนื่อง หรือในรูปสมการทางกายภาพ
- 5.4.3 ปรับปรุงการหาค่าพารามิเตอร์ จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์แบบอื่นที่เหมาะสมกับระบบที่กำลังศึกษาอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Kenjo and S. Nagamori. **Permanent-Magnet and Brushless DC Motors**. Monographs in Electrical and Electronic Engineering 18. Oxford : Clarendo Press. 1985.
- [2] N. Mohan, T.M. Undeland & W.P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design." Wiley, 1989, pp. 383-386.
- [3] Siemens, "Module Experimental System Instruction: Power electronics and control techniques." Siemens Aktiengesellschaft, 1978, pp. 83-129.
- [4] ชนกเนตต์ แส่นศรีแก้ว, นายภูริ โสธรวิทย์ และนางสาวอุษุณี วงษ์กรรเวช. "การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [5] Torsten Soderstrom and Petre Stoica. **System Identification**. New York : Prentice Hall. 1989.
- [6] Ioan Dore' Landou, 1990. **System Identification and Control Design using P.I.M. + software**. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- [7] กิตติศักดิ์ โควินท์ทวีวัฒน์, นายชัชวาลย์ ทวีศักดิ์ศิริผล และศุภโชคสุทธาพานิช. "การหาพารามิเตอร์ของระบบ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [8] จงกล งามวิวิทย์, สุเชียร เกียรติสุนทร, นนทวัฒน์ จุลเดชะ, พรสุขุช รติโรจน์อนันต์ และถาวร เบนญจนราสุทธิ์. 2542. "การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า PW256-259.
- [9] เจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข, จงกล งามวิวิทย์, สุเชียร เกียรติสุนทร, นนทวัฒน์ จุลเดชะ และ Hiroshi Hirata. 2543. "การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะกำลังทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า PW217-220.
- [10] เจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข, ภาณุวัชร ศรีโปดก, สุเชียร เกียรติสุนทร, นนทวัฒน์ จุลเดชะ และจงกล งามวิวิทย์. 2544. "การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรงในรูปแบบสมการทางกายภาพ ขณะกำลังทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า PW217-222.

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์กระแสตรง

ภาคผนวก ก กล่าวถึงข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ทดสอบ คือ มอเตอร์กระแสตรง ชนิด SS40E2-E ขนาด 20 W 24 โวลต์ และมีเอนโค้ดเดอร์ขนาด 1000P/R

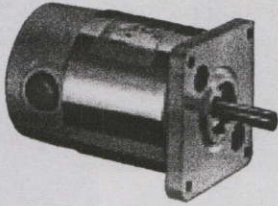


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

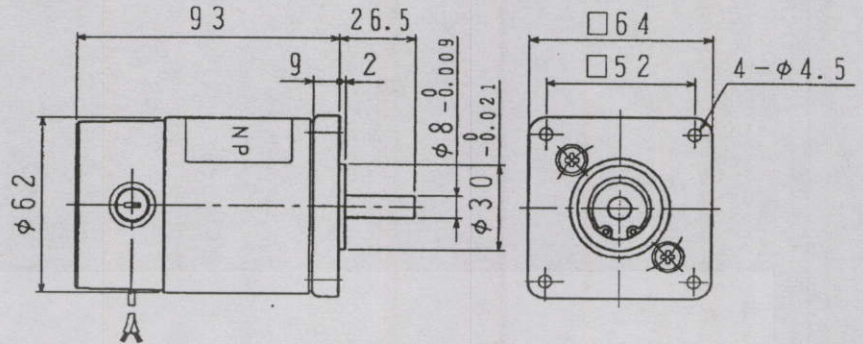
標準定格電圧  
Standard Rated Voltage  
12V/24V/100V

DC モーター  
DC MOTOR 20W

MODEL SS40E2



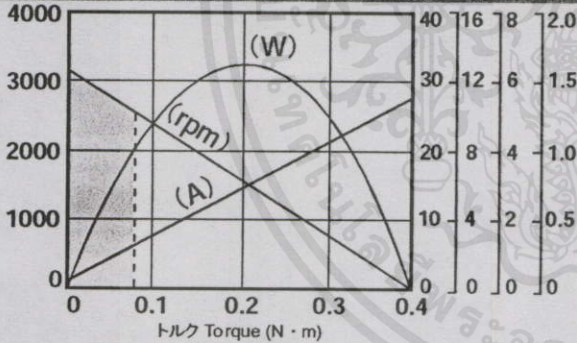
質量Mass 0.85kg



連続定格 Continuous rating				無負荷 No load		電機子抵抗 Armature R.	電機子 慣性モーメント(GD <sup>2</sup> ) R. Inertia	機械的 時定数 (tm)	逆起電力 定数 (Ke)	トルク 定数 (Kt)	ブラシ 長さ Brush L
電圧 Voltage DC-V	電流 Current A	回転速度 Speed rpm	トルク Torque N·m (kgf·cm)	電流 Current A	回転速度 Speed rpm	Ω	kg·cm <sup>2</sup> (kgf·cm <sup>2</sup> )	ms	V/krpm	N·m/A	mm
12	3.2	2500	0.078 (0.8)	0.5	3200	1.1	0.4 (1.6)	30	3.75	0.036	10 限度長さ 4
24	1.5	2500	0.078 (0.8)	0.2	3200	4.3	0.4 (1.6)	30	7.5	0.072	
100	0.35	2500	0.078 (0.8)	0.05	3200	70	0.4 (1.6)	30	31.3	0.3	

標準定格電圧以外の電圧も製作いたします。  
Ready for offering manufacturing service for a special-voltage product, apart from standard voltage.

回転速度  
Speed  
(rpm)  
負荷特性曲線  
Load Characteristic Curve



連続使用領域 Scope for continual use

許容オーバーハング荷重 : 49N(5kgf) 許容スラスト荷重 : 78N(8kgf)  
Permissible Overhung Load Permissible Thrust Load  
オーバーハング荷重の着力点は、軸端部長さの1/2の位置。  
Point of application of force for overhung load lies on half as long as shaft edge length.

●適用ドライバ Matching Driver List

電源電圧 Supply Voltage	ドライバ形式名 Driver Model	ページ Page
DC12V	MS-100□05	62
	MS-400□1204	66
DC24V	MS-100□05	62
	MS-400□2404	66
AC100V	MS-300□1001	64

●標準仕様

- 使用温度 : -10°C~40°C
- 使用湿度 : 40%~90% 結露なきこと
- 回転方向 : 可逆
- 絶縁種別 : B種
- 絶縁抵抗 : DC500Vメガにて、20MΩ以上
- 耐電圧 : AC 1000V 1分間
- 外観 : 生地(鉄ケース部めっき)

●取り扱い上の注意

- モーターリード線の赤を(+)に、青を(-)に接続するとモーター軸から見ると時計方向に回転します。
- DC電源の極性を替えると、正逆相似の特性が得られます。モーターが回転中に極性を替えると、モーターや相手装置に悪影響を与えます。一旦停止後に逆方向に回転して下さい。
- 定格は平滑な直流電源での連続定格です。脈流電源を使用する場合は温度上昇が高くなりますのでモーターの温度上昇に注意して下さい。

本カタログ記載の内容は予告なく変更させていただく場合がありますのでご了承下さい。 Content of this catalogue is subject to change without notice.



# 電磁ブレーキ ELECTROMAGNETIC BRAKE

# DC タコジェネレータ DC TACHO-GENERATOR

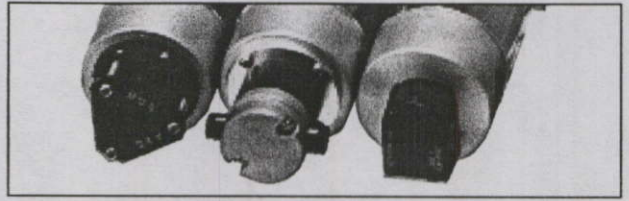
# エンコーダ ENCODER

### ■付属品

DCモータSS40E2は、減速機とともに下記の付属品とも自由に組み合わせられます。

### ■ACCESSORIES

DC motor model SS40E2 is freely combined with any gear head and any accessories to be given below.



## 電磁ブレーキ付DCモータ DC MOTOR WITH ELECTROMAGNETIC BRAKE

電磁ブレーキの詳細は p.52を参照下さい。 As for details of the brake, refer to page52

### SS40E2-B

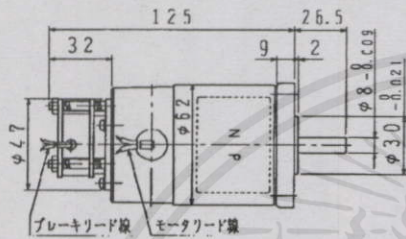
通電時開放型  
Released on Excitation Type

DC-V

12, 24, 90

静摩擦トルク  
Static Friction Torque

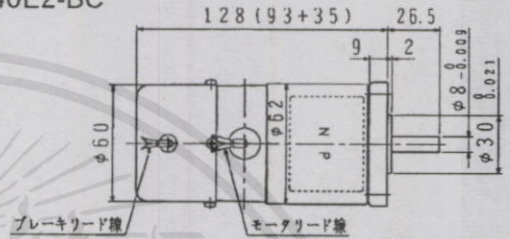
0.2N・m  
(2kgf・cm)



質量Mass 1.0kg

## 電磁ブレーキカバー付 ELECTROMAGNETIC BRAKE WITH COVER

### SS40E2-BC

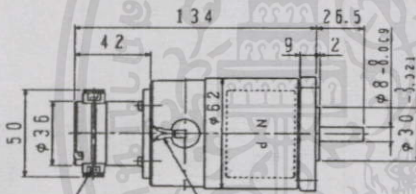


質量Mass 1.1kg

## DCタコジェネレータ付DCモータ DC MOTOR WITH TACHO-GENERATOR

タコジェネレータの詳細は p.48を参照下さい。 As for details of Tacho-generator, refer to page48

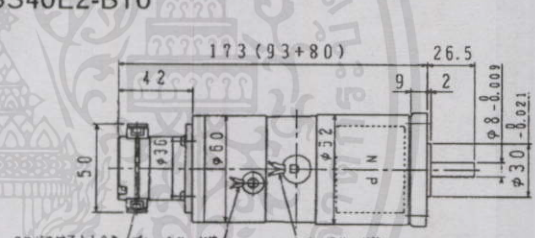
### SS40E2-T0



質量Mass 1.1kg

## ブレーキ+DCタコジェネレータ BRAKE+TACHO-GENERATOR

### SS40E2-BT0



質量Mass 1.4kg

## エンコーダ付DCモータ DC MOTOR WITH E0 type ENCODER

エンコーダの詳細は p.50を参照下さい。 As for details of the encoder, refer to page50

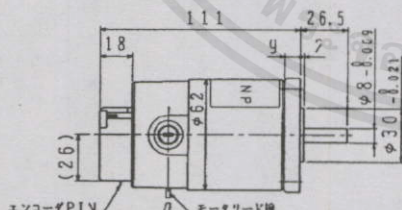
### SS40E2-E0

出力パルス数  
Output Pulses

100P/R  
500P/R

入出力取出方式  
Connection Method

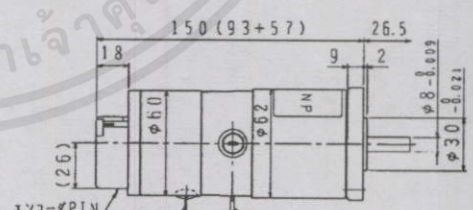
コネクタ  
Connector



質量Mass 0.9kg

## ブレーキ+E0型エンコーダ BRAKE+E0 type ENCODER

### SS40E2-BE0



質量Mass 1.2kg

## エンコーダ付DCモータ DC MOTOR WITH E type ENCODER

エンコーダの詳細は p.50を参照下さい。 As for details of encoder, refer to page 50

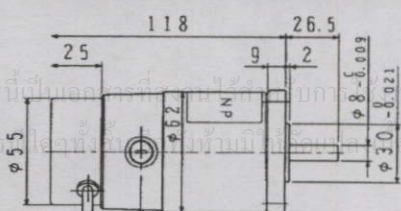
### SS40E2-E

出力パルス数  
Output Pulses

100P/R  
600P/R  
1000P/R

入出力取出方式  
Connection Method

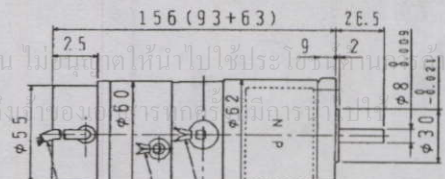
リード線  
Lead Wire



質量Mass 1.1kg

## ブレーキ+E型エンコーダ BRAKE+E type ENCODER

### SS40E2-BE



質量Mass 1.4kg

本カタログ記載の内容は予告なく変更させていただく場合がありますのでご了承下さい。 Content of this catalogue is subject to change without notice.

## ภาคผนวก ข

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความที่ 1 ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543 ดำเนินการจัดประชุมโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในชื่อเรื่อง

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะกำลังทำงาน โดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด  
On-line Identification of DC Motor Control Parameters Using Recursive Least-Square Method

บทความที่ 2 ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 วันที่ 22-23 พฤศจิกายน 2544 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในชื่อเรื่อง

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรงในรูปแบบสมการทางกายภาพ ขณะกำลังทำงาน โดย  
วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด  
On-line Physical Model Identification of DC Motor Using Recursive Least-Square Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะกำลังทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

## On-line Identification of DC Motor Control Parameters Using Recursive Least-Square Method

เจษฎา หังเขมมงคลสุข \* จงกล งามวิวิทย์ \* สุเชียร เกียรติสุนทร \* นนทวัฒน์ จุลเคชะ \* และ Hiroshi Hinata \*\*

\* ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. (02) 326-9989 E-mail: s2061062@kmitl.ac.th

\*\* Department of Control Engineering, School of Engineering, Tokai University, Japan

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด พารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ คือ ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า  $\tau_e$  ค่าเวลาคงตัวทางกล  $\tau_m$  ค่าคงที่ของมอเตอร์กระแสตรง  $K_m$  และ ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ  $K_b$  เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบมอเตอร์ทั่วไปเช่น วิธีล๊อคโรเตอร์ และป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบเดิม จะพบว่าง่าย และประหยัดเวลาในการพิจารณามากกว่า

คำสำคัญ : มอเตอร์กระแสตรง, การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ, วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

### Abstract

This paper presents the concept of on-line parametric estimation of DC motors by recursive least-square method. The parameters of interest are electrical time constant, mechanical time constant, motor constant, and back emf constant. Compared with other conventional methods such as locked-rotor and step-voltage tests, the proposed method is easier and less time-consuming.

Keyword : DC motor, System Identification, Recursive Least-Square Method

### 1. บทนำ

ปัญหาการออกแบบระบบควบคุมสำหรับมอเตอร์กระแสตรง คือ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบข้อมูล ด้านคุณสมบัติ และพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ปัจจุบันข้อมูลของมอเตอร์กระแสตรงสามารถหาได้ โดยการทดสอบที่มีขั้นตอนค่อนข้างยุ่งยาก และซับซ้อน อาทิเช่น การล๊อคโรเตอร์ (lock-rotor) เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และการป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า (step-voltage) เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล [1] โดยการทดสอบต้องแยกมอเตอร์ออกจากกระบวนขณะทดสอบ ซึ่งทำให้

ต้องการบุคลากรที่มีความรู้ และใช้เครื่องมือเฉพาะด้าน ดังนั้นการออกแบบ และติดตั้งระบบควบคุมสำหรับมอเตอร์กระแสตรงสิ้นเปลืองเวลา และค่าใช้จ่ายสูง

การทดสอบหาพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด จะทำการตรวจสอบ คุณสมบัติของมอเตอร์ขณะทำงาน โดยผู้ปฏิบัติงานตัวแปรเข้า และตัวแปรออกของมอเตอร์ คือ แรงดันไฟฟ้าเข้า และความเร็วของมอเตอร์ เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ โดยไม่จำเป็นต้องจัดการทดสอบมอเตอร์ เช่นวิธีทดสอบแบบเดิม

การทดสอบพารามิเตอร์ด้วยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดยังสามารถตรวจสอบคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงระหว่างกำลังปฏิบัติงานตามปกติได้ จึงสามารถใช้วิธีการทดสอบดังกล่าวตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมอเตอร์ แล้วออกแบบระบบควบคุมที่เปลี่ยนคุณสมบัติการควบคุมให้เหมาะสมกับมอเตอร์กระแสตรงได้ตลอดเวลา

### 2. ทฤษฎี

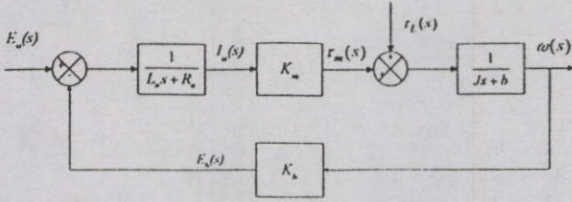
#### 2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง [2]

มอเตอร์กระแสตรงสามารถพิจารณาโดยบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 1 สามารถแสดงคุณสมบัติและความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วเชิงมุม  $\omega$  กับ แรงดันไฟฟ้า  $E_a$  โดยไม่พิจารณาภาระแรงบิด  $\tau_L$  ได้ตามสมการ (1)

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{(L_a s + R_a)(J s + b) + K_m K_b} \quad (1)$$

เมื่อ	$L_a$	=	ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์
	$R_a$	=	ความต้านทานอาร์เมเจอร์
	$J$	=	โมเมนต์ความเฉื่อย
	$b$	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากความหนืด
	$K_m$	=	ค่าคงที่ของมอเตอร์
	$K_b$	=	ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ

ต้องอ้างอิงถึงเข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 บล็อกโคจรแอมโพลีโพลีของมอเตอร์กระแสตรง

เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากความหนืด  $b$  ของมอเตอร์กระแสตรง คำน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา และกำหนดค่าเวลาคงตัวทางกล (mechanical time constant:  $\tau_m$ ) และค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า (electrical time constant:  $\tau_e$ )

$$\tau_m = \frac{R_a J}{K_m K_b} \quad \text{และ} \quad \tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (2)$$

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงสมการ (1) สามารถแสดงโดยสมการ (3)

$$G(S) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{Js(L_a s + R_a) + K_m K_b} = \frac{1}{K_b(\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1)} \quad (3)$$

### 2.2 การหาพารามิเตอร์โดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด สามารถทำได้โดย พิจารณาแบบความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรเข้า  $u(t)$  และตัวแปรออก  $y(t)$  ตามสมการ (4)

$$y(t) = \frac{B(D)}{A(D)} u(t) \quad (4)$$

เมื่อ  $B(D)$  และ  $A(D)$  เป็น พังก์ชันพหุนามเศษ และ พังก์ชันพหุนามส่วน ของตัวดำเนินการอนุพันธ์ (differential operator)  $D$  ตามลำดับ

$$A(D) = 1 + a_1 D + \dots + a_n D^n \quad (5)$$

และ 
$$B(D) = b_0 + b_1 D + \dots + b_m D^m \quad (6)$$

เมื่อ  $n$  และ  $m$  เป็นจำนวนเต็ม และ  $m$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $n$

กำหนด เวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta$  และเวกเตอร์จัดดอย (regression vector)  $\varphi(t)$  ดังนี้

$$\theta^T = \{a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_m\} \quad (7)$$

และ 
$$\varphi^T(t) = \left\{ -\frac{d}{dt} y(t), -\frac{d^2}{dt^2} y(t), \dots, -\frac{d^n}{dt^n} y(t), u(t), \frac{d}{dt} u(t), \dots, \frac{d^m}{dt^m} u(t) \right\} \quad (8)$$

ตัวแปรออก  $y(t)$  สามารถแสดงโดยสมการ (9)

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta \quad (9)$$

การประมาณค่า ตัวแปรออก  $y(t)$  โดย แบบจำลองคณิตศาสตร์  $y_m(t)$  สามารถแสดงได้โดยสมการ (10)

$$y_m(t) = \varphi^T(t)\hat{\theta}(t) \quad (10)$$

การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด จะเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  เพื่อให้การประมาณค่าตัวแปรออก  $y(t)$  โดยมีกำลังสองรวมของความคลาดเคลื่อน  $\varepsilon(t)$  น้อยที่สุด เมื่อ

$$\varepsilon(t) = y(t) - y_m(t) \quad (11)$$

โดยกำหนด เวกเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  เพื่อการประมาณ เวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta$  ตามสมการ (12)

$$\hat{\theta}^T(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t), b_0(t), b_1(t), \dots, b_m(t)\} \quad (12)$$

สรุปขั้นตอน การทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด สามารถคำนวณตามสมการ ต่อไปนี้ [3]

การปรับค่าพารามิเตอร์:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t - T_s) + \frac{P(t - T_s)\varphi(t)}{1 + \varphi^T(t)P(t - T_s)\varphi(t)} \varepsilon(t) \quad (13)$$

ค่าประมาณความคลาดเคลื่อน

$$\hat{\varepsilon}(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t - T_s) \quad (14)$$

และอัตราขยายอแดปทีฟ (adaptive gain):

$$P(t) = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ P(t - T_s) - \frac{\lambda_2 P(t - T_s)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t - T_s)}{\lambda_1 + \lambda_2 \varphi^T(t)P(t - T_s)\varphi(t)} \right\} \quad (15)$$

เมื่อค่า  $T_s$  เป็นคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (sampling time)  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  เป็นค่าคงที่

### 3. การทดลอง

การทดลองหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงพิกัดแรงดัน 24 โวลต์ 20 วัตต์ 2500 รอบต่อนาที โดยทำการทดสอบขณะใช้งานกับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ทราบค่าพารามิเตอร์ โดยวิธีฮ็อก โรเจอร์ และ ป้อนแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{10}{0.0001s^2 + 0.03s + 1} \quad (16)$$

การทดลองเลือก คาบเวลาการสุ่มสัญญาณ  $T_s = 0.0005$  วินาที

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง สำหรับการทดสอบหาพารามิเตอร์โดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดคือ

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{b_0}{1 + a_1s + a_2s^2} \quad (17)$$

เมื่อ  $a_1, a_2$  และ  $b_0$  คือ  $\tau_m, \tau_m \tau_e$  และ  $1/K_b$  ตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์ตามสมการ (4) มีค่า  $n = 2$  และ  $m = 1$  จะได้เวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta$  เวกเตอร์คดออก  $\varphi(t)$  และเวกเตอร์การประมาณพารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  ตามสมการ (7) (8) และ (12) เป็น

$$\theta^T = \{a_1, a_2, b_0\} \quad (18)$$

$$\varphi^T(t) = \left\{ -\frac{d}{dt} y(t), -\frac{d^2}{dt^2} y(t), u(t) \right\} \quad (19)$$

และ 
$$\hat{\theta}^T(t) = \{a_1(t), a_2(t), b_0(t)\} \quad (20)$$

เนื่องจากการทดสอบไม่สามารถวัดค่าอนุพันธ์ของความเร็วเชิงมุม จึงต้องประมาณค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และอนุพันธ์อันดับสองโดยสมการ (21)

$$\frac{d}{dt} y(t) \cong \frac{y(t) - y(t - T_s)}{T_s}$$

$$\frac{d^2}{dt^2} y(t) \cong \frac{\left( \frac{d}{dt} y(t) - \frac{d}{dt} y(t - T_s) \right)}{T_s} \quad (21)$$

การทดลอง เลือก  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ค่าใดๆ โดย  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  เท่ากับ 1 ( $0 < \lambda_1 \leq 1; 0 \leq \lambda_2 < 2$ ) อัตราการขยายแคปทีฟเริ่มต้น  $P(0) = 10000$  เวกเตอร์การประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่ม  $\hat{\theta}(0) = \{0, 0, 0\}$  และสัญญาณเข้าแรงดันไฟฟ้า  $E_a$  เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับ 0 ถึง 2 โวลต์ และคาบเวลา 0.5 วินาที

ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของโครงสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์จากการประมาณ  $y_m(t)$  ตามสมการ (10) กับความเร็วเชิงมุมจริง  $y(t)$  (เรเดียน/วินาที) แสดงตามรูปที่ 2 เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) ได้พารามิเตอร์จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ ดังนี้

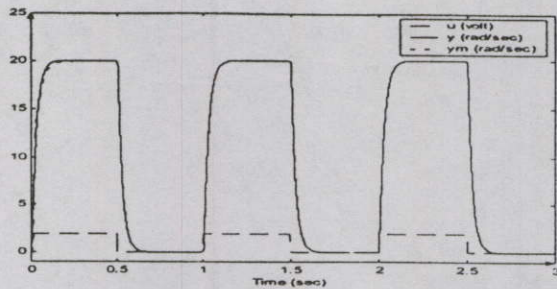
$$a_1 = \tau_m = 0.0289$$

$$a_2 = \tau_m \tau_e = 0.00085$$

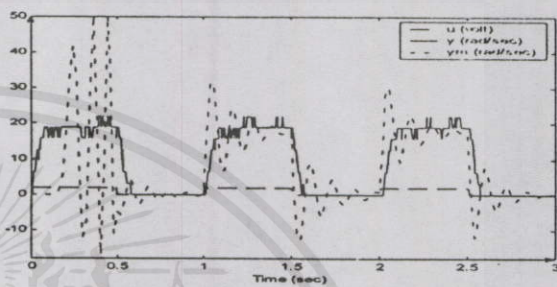
$$b_0 = 1/K_b = 9.989373$$

การทดสอบหาพารามิเตอร์ กับมอเตอร์ไฟฟ้าจริงในห้องปฏิบัติการ โดยกำหนดค่าเริ่มต้น เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ได้ผลการทดลอง เปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมจากการประมาณ  $y_m(t)$  กับค่าความเร็วเชิงมุมจริง  $y(t)$  ดังรูปที่ 3

ผลการทดลองรูปที่ 3 พบว่า  $y(t)$  เกิดการแกว่งจากการผิดพลาดของการวัด และ  $y_m(t)$  มีค่าพุ่งเกิน (over shoot) จากการแกว่งของ  $y(t)$  และการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้องในช่วงเริ่มต้น ขณะ



รูปที่ 2 เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของแบบจำลองคณิตศาสตร์ กับความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3 เปรียบเทียบสัญญาณความเร็วเชิงมุมจริง กับความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

การแก้ไขโดยการเพิ่มวงจรถองความถี่ต่ำผ่าน  $F(s)$  ทรองสัญญาณเข้า  $E_a(s)$  และ สัญญาณออกของมอเตอร์ ดังรูปที่ 4

$$F(s) = \frac{1}{(\alpha s + 1)^2} \quad ; \alpha = 0.1$$



รูปที่ 4 บล็อกโคแอมเพนของมอเตอร์กระแสตรง และวงจรถองความถี่ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบที่ได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์คือ

$$G(s) = \frac{F(s)\omega(s)}{F(s)E_a(s)} = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{b_0}{1 + a_1s + a_2s^2} \quad (22)$$

หลังเพิ่มตัวกรองความถี่ได้ทำการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง โดยกำหนดค่าเริ่มต้น เช่นเดียวกับการทดลองเดิม ผลการทดลองประกอบด้วย การเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมจากการประมาณ  $y_m(t)$  กับค่าความเร็วเชิงมุมจริง  $y(t)$  ดังรูปที่ 5

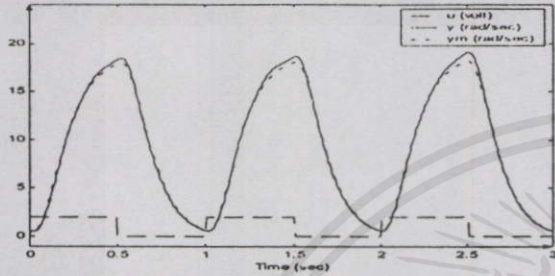
ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง  $a_1, a_2$  และ  $b_0$  โดยเปรียบเทียบขณะไม่มีวงจรถองความถี่ แสดงในรูปที่ 6 และตารางที่ 1

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

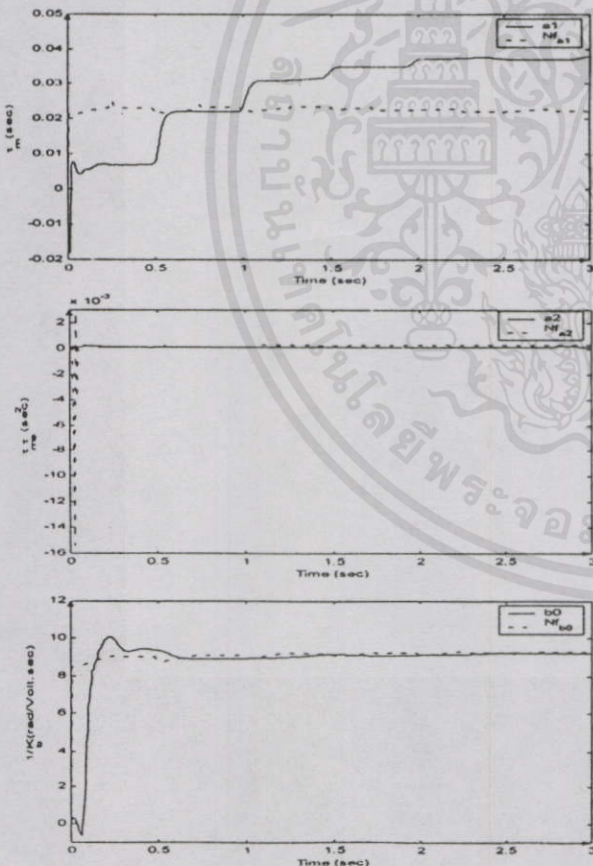
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง

	$a_1 (\tau_m)$	$a_2 (\tau_m \tau_e)$	$b_0 (1/K_b)$
พารามิเตอร์มอเตอร์จริง	0.03	0.0001	10
ไม่มีวงจรงรองความถี่	0.023	0.0003	9.3
เพิ่มวงจรงรองความถี่	0.036	0.00017	9.5

ผลการประมาณค่าของ  $\tau_m$ ,  $\tau_e$  และ  $K_b$  ได้ว่า  $\tau_m \cong 0.036$  วินาที,  $\tau_e \cong 0.00472$  วินาที และ  $K_b \cong 0.105263$  โวลต์-วินาที/แรงบิด



รูปที่ 5 เปรียบเทียบสัญญาณความเร็วเชิงมุมจริงหลังผ่านวงจรงรองความถี่ กับ ความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบขณะไม่มีตัวกรองความถี่ และภายหลังเพิ่มวงจรงรองความถี่

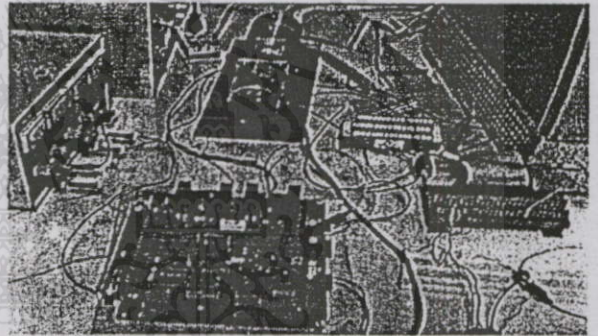
ผลการทดลองแสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของ  $y(t)$  และ  $y_m(t)$  ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นโดย  $y(t)$  การแกว่งลดลง และ  $y_m(t)$  ค่าพุ่งเกินลดลง

4. สรุป

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงาน โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบกับการทดลองกับมอเตอร์จริงในห้องปฏิบัติการ และปรับปรุงโดยเพิ่มวงจรงรองความถี่แบบคิจิคอล แสดงว่าสามารถหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบเดิม โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเทียบเท่ากับพารามิเตอร์จริงเป็นดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าผิดพลาดจากการหาพารามิเตอร์เมื่อเทียบกับค่าจริง

	%Error $a_1$	%Error $a_2$	%Error $b_0$
ไม่มีวงจรงรองความถี่	-23.33	300	-7
เพิ่มวงจรงรองความถี่	20	70	-5



รูปที่ 7 มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ทดสอบ การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Siemens, "Module Experimentel System Instruction: Power electronics and control techniques." Siemens Aktiengesellschaft, pp. 83-129, 1978.
- [2] N. Mohan, T.M. Undeland & W.P. Robbins, "Power Electronics: Converts, Applications, and Design." Wiley, pp. 383-386, 1989.
- [3] L. Ljung, "System Identification Theory for the User." Prentice Hall, pp. 363-368, 1987.
- [4] จงกล งานวิวิทย์, สุเชิธร เกียรติสุนทร, นนทวัฒน์ จุลเคชะ, พรสุขรดิโรจน์อนันต์ และ ดาวร เบญจนราสุทธิ, "การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงาน โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 หน้า PW256-259

2542-2543 นั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรงในรูปแบบสมการทางกายภาพ ขณะกำลังทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

## On-line Physical Model Identification of DC Motor Using Recursive Least-Square Method

เจนภา คังเขมมงคลสุข ภาณุวัชร ศรีโปคก สุเชิธร เกียรติสุนทร นนทวัฒน์ จุลละชะ และ จงกล งามวิวิท  
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. (02) 326-9989 E-mail: s2061062@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการทดสอบหาพารามิเตอร์ในรูปแบบกายภาพของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงานโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด คือ ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ ( $L_a$ ), ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ ( $R_a$ ), ค่าคงที่ของมอเตอร์ ( $K_m$ ), ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ ( $K_b$ ), โมเมนต์ความเฉื่อย ( $J$ ) และ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด ( $b$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับารทดสอบมอเตอร์ทั่วไปเช่น วิธีล็อกโรเตอร์ และป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบเดิม พบว่าสะดวก และประหยัดเวลามากกว่า และพารามิเตอร์ที่ได้อยู่ในรูปแบบของสมการทางกายภาพ ที่ทำความเข้าใจง่ายกว่า

### Abstract

This paper presents the concept of on-line physical parametric estimation of DC motors by recursive least-square method. The parameters of interest are Armature inductance, Armature resistance, Motor gain constant, Back emf constant, Moment of inertia and viscous friction coefficient. Compared with other conventional methods such as locked-rotor and step-voltage tests, the proposed method is easier and less time-consuming. Estimated parameters will be in physical model that easy to understand.

**Keywords :** DC motor, System Identification, physical model, Recursive Least-Square Method

### 1. บทนำ

ปัญหาการออกแบบระบบควบคุมสำหรับมอเตอร์กระแสตรง คือ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบข้อมูล ด้านคุณสมบัติ และพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ปัจจุบันข้อมูลของมอเตอร์กระแสตรงสามารถหาได้

การล็อกโรเตอร์ (lock-rotor) เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และการป้อนระดับแรงดันไฟฟ้า (step-voltage) เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล [1] โดยการทดสอบต้องแยกมอเตอร์ออกจากระบบขณะทดสอบ ซึ่งทำให้ต้องการบุคลากรที่มีความรู้ และใช้เครื่องมือเฉพาะด้าน ดังนั้นการออกแบบ และติดตั้งระบบควบคุมสำหรับมอเตอร์กระแสตรงสิ้นเปลืองเวลา และค่าใช้จ่ายสูง

การทดสอบหาพารามิเตอร์วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด จะทำการตรวจสอบ คุณสมบัติของมอเตอร์ขณะทำงาน โดยสุ่มสัญญาณคัวแปรเข้า และคัวแปรออกของมอเตอร์ คือ แรงดันไฟฟ้าเข้า และความเร็วมอเตอร์ เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ โดยไม่จำเป็นต้องจัดการทดสอบมอเตอร์ เช่นวิธีทดสอบแบบเดิม

การทดสอบพารามิเตอร์ด้วยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดยังสามารถตรวจสอบคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงระหว่างกำลังปฏิบัติงานตามปกติได้ จึงสามารถใช้วิธีการทดสอบดังกล่าวตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมอเตอร์ แล้วออกแบบระบบควบคุมที่เปลี่ยนคุณสมบัติการควบคุมให้เหมาะสมกับมอเตอร์กระแสตรงได้ตลอดเวลา

### 2. ทฤษฎี

#### 2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง [2]

จากกฎทางฟิสิกส์ เราจะได้สมการของมอเตอร์กระแสตรงดังสมการ

$$E_a(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + E_b(s) \tag{1}$$

$$E_b(s) = K_b \omega(s) \tag{2}$$

$$\tau_m(s) = \tau_L(s) + sJ\omega(s) + b\omega(s) \tag{3}$$

$$\tau_m(s) = K_m I_a(s) \tag{4}$$

จากสมการข้างต้น เมื่อไม่พิจารณาภาระแรงบิด  $\tau_L$  เราจะลดรูปสมการได้เป็น

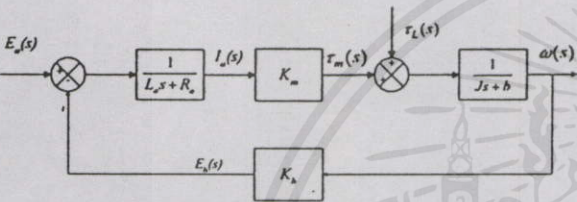
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24) 22-23 พฤศจิกายน 2544

$$E_a(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + K_b \omega(s) \quad (5)$$

$$K_m I_a(s) = sJ\omega(s) + b\omega(s) \quad (6)$$

- เมื่อ  $L_a$  = ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์  
 $R_a$  = ความต้านทานอาร์เมเจอร์  
 $J$  = โมเมนต์ความเฉื่อย  
 $b$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากความหนืด  
 $K_m$  = ค่าคงที่ของมอเตอร์  
 $K_b$  = ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

และเราจะได้บล็อกโคแรมของมอเตอร์กระแสตรง โดยพิจารณา ระหว่าง ความเร็วเชิงมุม  $\omega$  กับ แรงดันไฟฟ้า  $E_a$  ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกโคแรมของมอเตอร์กระแสตรง

2.2 การหาพารามิเตอร์โดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด สามารถทำได้โดย พิจารณาแบบความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรเข้า  $u(t)$  และตัวแปรออก  $y(t)$  ตามสมการ (4)

$$y(t) = \frac{B(D)}{A(D)} u(t) \quad (7)$$

เมื่อ  $B(D)$  และ  $A(D)$  เป็น พึ่งกซ์ันพหุนามเศษ และ พึ่งกซ์ันพหุนามส่วน ของตัวดำเนินการอนุพันธ์ (differential operator)  $D$  ตามลำดับ

$$A(D) = 1 + a_1 D + \dots + a_n D^n \quad (8)$$

$$\text{และ } B(D) = b_0 + b_1 D + \dots + b_m D^m \quad (9)$$

เมื่อ  $n$  และ  $m$  เป็นจำนวนเต็ม และ  $m$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $n$  กำหนด เวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta$  และเวกเตอร์ถดถอย (regression vector)  $\varphi(t)$  ดังนี้

$$\theta^T = \{a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_m\} \quad (10)$$

สำหรับการใช้ (10) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และอัตราขยายอแดปทีฟ (adaptive gain) ไม่สามารถใช้งานได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ } \varphi^T(t) = \left\{ -\frac{d}{dt} y(t), -\frac{d^2}{dt^2} y(t), \dots, -\frac{d^n}{dt^n} y(t), u(t), \frac{d}{dt} u(t), \dots, \frac{d^m}{dt^m} u(t) \right\} \quad (11)$$

$$u(t), \frac{d}{dt} u(t), \dots, \frac{d^m}{dt^m} u(t) \}$$

ตัวแปรออก  $y(t)$  สามารถแสดงโดยสมการ (9)

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta \quad (12)$$

การประมาณค่า ตัวแปรออก  $y(t)$  โดย แบบจำลองคณิตศาสตร์  $y_m(t)$  สามารถแสดงได้โดยสมการ (10)

$$y_m(t) = \varphi^T(t) \hat{\theta}(t) \quad (13)$$

การหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงโดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด จะเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  เพื่อให้การประมาณค่าตัวแปรออก  $y(t)$  โดยมีกำลังสองรวมของความคลาดเคลื่อน  $\varepsilon(t)$  น้อยที่สุด เมื่อ

$$\varepsilon(t) = y(t) - y_m(t) \quad (14)$$

โดยกำหนด เวกเตอร์  $\hat{\theta}(t)$  เพื่อการประมาณ เวกเตอร์พารามิเตอร์  $\theta$  ตามสมการ (12)

$$\hat{\theta}^T(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t), b_0(t), b_1(t), \dots, b_m(t)\} \quad (15)$$

สรุปขั้นตอน การทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง โดยวิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด สามารถคำนวณตามสมการ ต่อไปนี้ [3]

การปรับค่าพารามิเตอร์:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t - T_S) + \frac{P(t - T_S) \varphi(t)}{1 + \varphi^T(t) P(t - T_S) \varphi(t)} \hat{\varepsilon}(t) \quad (16)$$

ค่าประมาณความคลาดเคลื่อน

$$\hat{\varepsilon}(t) = y(t) - \varphi^T(t) \hat{\theta}(t - T_S) \quad (17)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ P(t-T_s) \frac{\lambda_2 P(t-T_s) \varphi(t) \varphi^T(t) P(t-T_s)}{\lambda_1 + \lambda_2 \varphi^T(t) P(t-T_s) \varphi(t)} \right\} \quad (18)$$

และ  $\hat{\theta}_2^T(t) = \{b_0(t), b_1(t)\} \quad (28)$

ทำการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับ 1 โดยสมการ (26)

$$\frac{d y(t)}{dt} \approx \frac{y(t) - y(t-T_s)}{T_s} \quad (29)$$

เมื่อค่า  $T_s$  เป็นคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (sampling time)  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  เป็นค่าคงที่

3. การทดลอง และผลการทดลอง

การทดลองหาพารามิเตอร์ของมีซีเคอร์กระแสตรงที่กักแรงดัน 24 โวลต์ 20 วัตต์ 2500 รอบต่อนาที โดยทำการทดสอบขณะใช้งานกับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ทราบค่าพารามิเตอร์ โดยวิธีลือโครเดอร์ และป้อนแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$E_a(s) = 5I_a(s) + 0.02sI_a(s) + 0.07\omega(s) \quad (19)$$

$$0.07I_a(s) = 0.00003576s\omega(s) + 0.0003\omega(s) \quad (20)$$

การทดลองเลือก คาบเวลาการสุ่มค่าสัญญาณ  $T_s = 0.0005$  วินาที

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง สำหรับการทดสอบหาพารามิเตอร์โดยวิธีทำซ้ำค่าถึงสองน้อยที่สุด คือ

$$E_a(s) = a_1 I_a(s) + a_2 s I_a(s) + a_3 \omega(s) \quad (21)$$

$$a_3 I_a(s) = b_0 \omega(s) + b_1 s \omega(s) \quad (22)$$

เมื่อ  $a_1, a_2, a_3, b_0$  และ  $b_1$  คือ  $R_a, L_a, K_m, b$  และ  $J$  ตามลำดับ

ในการทดลองจะทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ 2 ครั้ง โดยในครั้งแรกจะทำการหาค่าแอมพลิจูดพารามิเตอร์  $\theta_1$  โดยมีแอมพลิจูดคดออก  $\varphi_1(t)$  และแอมพลิจูดการประมาณพารามิเตอร์  $\hat{\theta}_1^T(t)$  ดังนี้

$$\theta_1^T = \{a_1, a_2, a_3\} \quad (23)$$

$$\varphi_1^T(t) = \left\{ J a(t), \frac{d I_a(t)}{dt}, \omega(t) \right\} \quad (24)$$

และ  $\hat{\theta}_1^T(t) = \{a_1(t), a_2(t), a_3(t)\} \quad (25)$

นำค่า  $a_3$  จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ในครั้งแรก มาใช้ในการหาค่าแอมพลิจูดพารามิเตอร์  $\theta_2$  โดยมีแอมพลิจูดคดออก  $\varphi_2(t)$  และแอมพลิจูดการประมาณพารามิเตอร์  $\hat{\theta}_2^T(t)$  ดังนี้

$$\theta_2^T = \{b_0, b_1\} \quad (26)$$

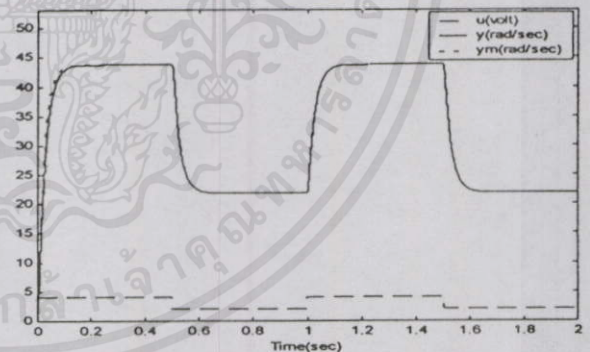
$$\varphi_2^T(t) = \left\{ \omega(t), \frac{d \omega(t)}{dt} \right\} \quad (27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้  $F(s) = \frac{1}{(\alpha s + 1)}$ ;  $\alpha = 0.1$

ในการทดลอง เลือกค่า  $\lambda_2 = 1$  และ  $\lambda_1 = \lambda_0 \lambda_1(t-1) + 1 - \lambda_0$  ( $0 < \lambda_1 \leq 1$ ) โดยให้  $\lambda_1(0) = 0.95$  และ  $\lambda_0 = 0.99$  อัตราการขยายอแคทิฟเริ่มต้น  $P(0) = 10000$  แอมพลิจูดการประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น  $\hat{\theta}(0) = \{0, 0, 0\}$  และสัญญาณเข้าแรงดันไฟฟ้า  $E_a$  เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระดับ +2 ถึง +4 โวลต์ และคาบเวลา 1 วินาที

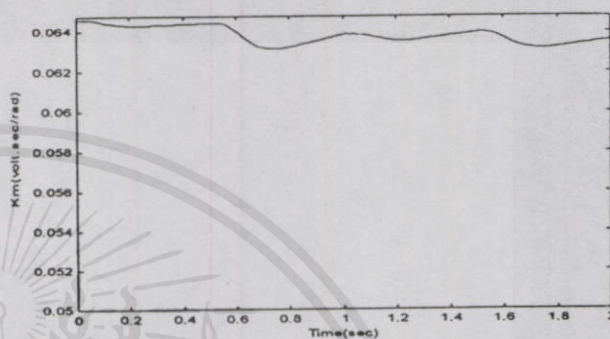
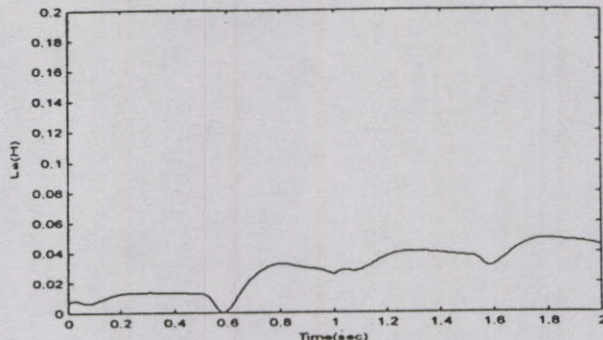
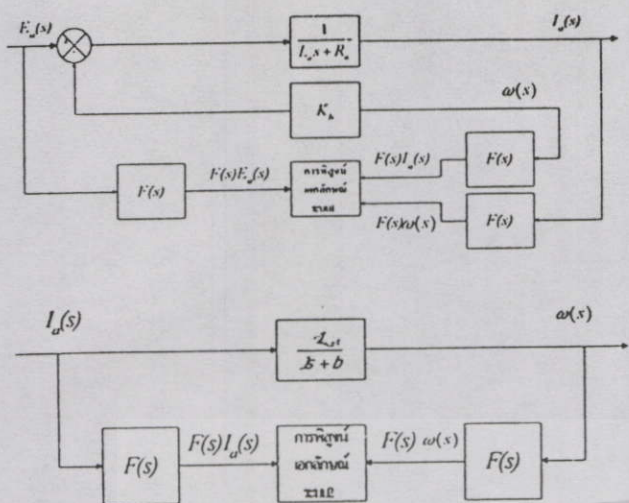
ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของโครงสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์จากการประมาณ  $y_m(t)$  กับ ความเร็วเชิงมุมจริง  $y(t)$  (เรเดียน/วินาที) แสดงตามรูปที่ 2 เมื่อ  $u(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) ได้พารามิเตอร์จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ ดังนี้

$a_1 = R_a$	=	4.929246
$a_2 = L_a$	=	0.017536
$a_3 = K_m$	=	0.070295
$b_0 = b$	=	0.000301
$b_1 = J$	=	0.000036



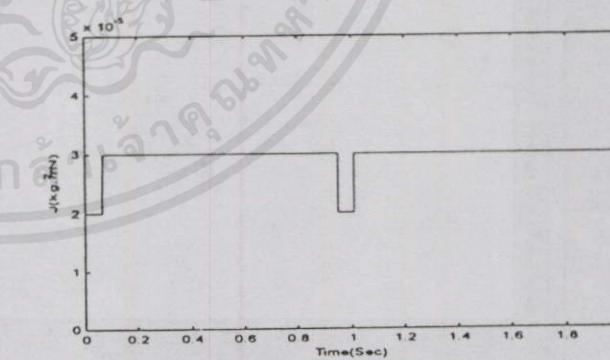
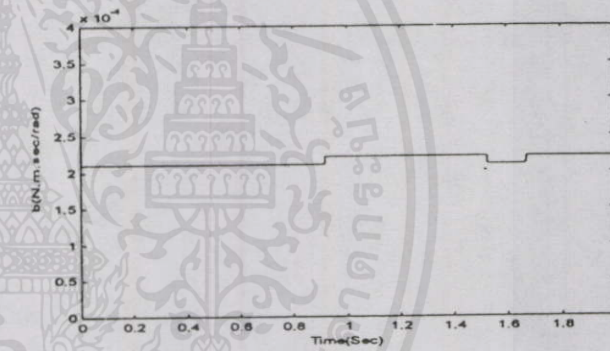
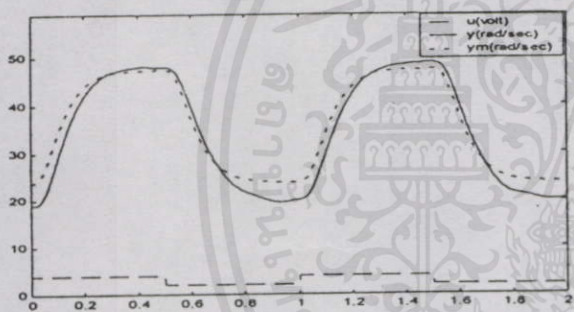
รูปที่ 2 เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของแบบจำลองคณิตศาสตร์ กับความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ทำการทดสอบหาพารามิเตอร์ กับมอเตอร์ไฟฟ้าจริงในห้องปฏิบัติการ โดยเพิ่มวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบคัตออฟ  $F(s)$  กรองสัญญาณเข้า และสัญญาณออกดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง และวงจรกรองความถี่

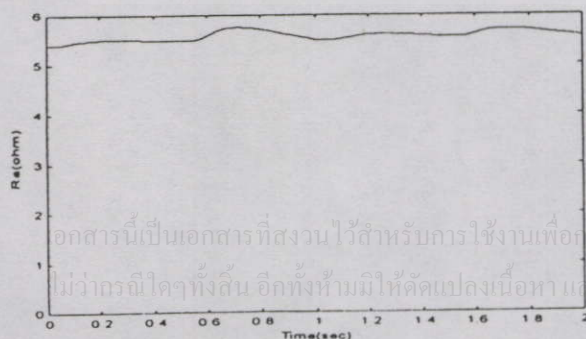
กำหนดค่าเริ่มต้น เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ให้ผลการทดลอง เปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมจากการประมาณ  $y_m(t)$  กับค่าความเร็วเชิงมุมจริง  $y(t)$  ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เปรียบเทียบสัญญาณความเร็วเชิงมุมจริงหลังผ่านวงจรกรองความถี่ กับ ความเร็วเชิงมุมจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรง  $a_1, a_2, a_3, b_0$  และ  $b_1$  แสดงในรูปที่ 5 และ ตารางที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการลือคโรเตอร์, จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบกับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง

ค่าพารามิเตอร์	$a_1$ ( $R_a$ )	$a_2$ ( $L_a$ )	$a_3$ ( $K_m$ )	$b_0$ ( $b$ )	$b_1$ ( $J$ )
การลัด โรเตอร์	5	0.025	0.07	0.0003	0.0000 3576
แบบจำลอง คอมพิวเตอร์	4.92924	0.0219	0.0702	0.0003	0.0000
มอเตอร์ใน ห้องปฏิบัติการ	6	2	95	01	36
	5.5	0.04	0.063	0.0002 6	0.0000 22



รูปที่ 7 มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ทดสอบ การพิสูจน์เอกลักษณ์ระบบ

4. สรุป

การหาค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงาน ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบกับการทดลองกับมอเตอร์จริงในห้องปฏิบัติการ และปรับปรุงโดยเพิ่มวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล แสดงให้เห็นว่าสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบ กับวิธีการทดสอบแบบลัดโรเตอร์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเทียบกับพารามิเตอร์ที่หาได้จากการลัดโรเตอร์ดังตารางที่ 2

ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้อยู่ในรูปแบบของสมการทางกายภาพ ทำให้มองเห็นส่วนประกอบของตัวมอเตอร์ได้ง่ายกว่า การหาในรูปแบบของค่าคงตัวทางเวลา [5] อีกทั้งยังสามารถใช้หลักการนี้เข้าไปประยุกต์ใช้กับโมเดลที่ไม่ทราบพารามิเตอร์ฟังก์ชัน แต่ทราบสมการทางฟิสิกส์ของโมเดลนั้นๆ ได้อีกด้วย

ตารางที่ 2 ค่าผิดพลาดจากการหาค่าพารามิเตอร์เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการลัดโรเตอร์

%Error	$a_1$ ( $R_a$ )	$a_2$ ( $L_a$ )	$a_3$ ( $K_m$ )	$b_0$ ( $b$ )	$b_1$ ( $J$ )
แบบจำลอง คอมพิวเตอร์	-1.415	-12.32	0.42	0.333	0.67
มอเตอร์ใน ห้องปฏิบัติการ	10	37.5	-10	-13.33	-38.48

เอกสารอ้างอิง

- [1] Siemens, "Module Experimental System Instruction: Power electronics and control techniques." Siemens Aktiengesellschaft, 1978, pp. 83-129.
- [2] N. Mohan, T.M. Undeland & W.P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design." Wiley, 1989, pp. 383-386.
- [3] L. Ljung, "System Identification Theory for the User." Prentice Hall, 1987, pp. 363-368.
- [4] จงกล งามวิวิทย์, สุเชิธร เกียรติสุนทร, นนทวัฒน์ จุลเสชะ, พรศุข รัศโรจน์นันต์ และ ถาวร เบนญจนราษฎร์, "การทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงานโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22, 2542, หน้า PW256-259.
- [5] เจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข, จงกล งามวิวิทย์, สุเชิธร เกียรติสุนทร, นนทวัฒน์ จุลเสชะ และ Hiroshi Hirata, "การพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอเตอร์กระแสตรงขณะกำลังทำงานโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23, 2543, หน้า PW217-220.



เจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ปีการศึกษา 2541 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโททางวิศวกรรมไฟฟ้าที่ สจล.



ภาณุวัชร ศรีโปดก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สจล. ปีการศึกษา 2524 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโททางวิศวกรรมไฟฟ้าที่ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สุเจียร เกียรติคุณธร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโททางวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สจล. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สจล.



นนทวัฒน์ จุลเดชะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกทางวิศวกรรมไฟฟ้า จาก INSA de Lyon ประเทศฝรั่งเศส ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สจล.



จกมล งามวิวิทย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก อิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



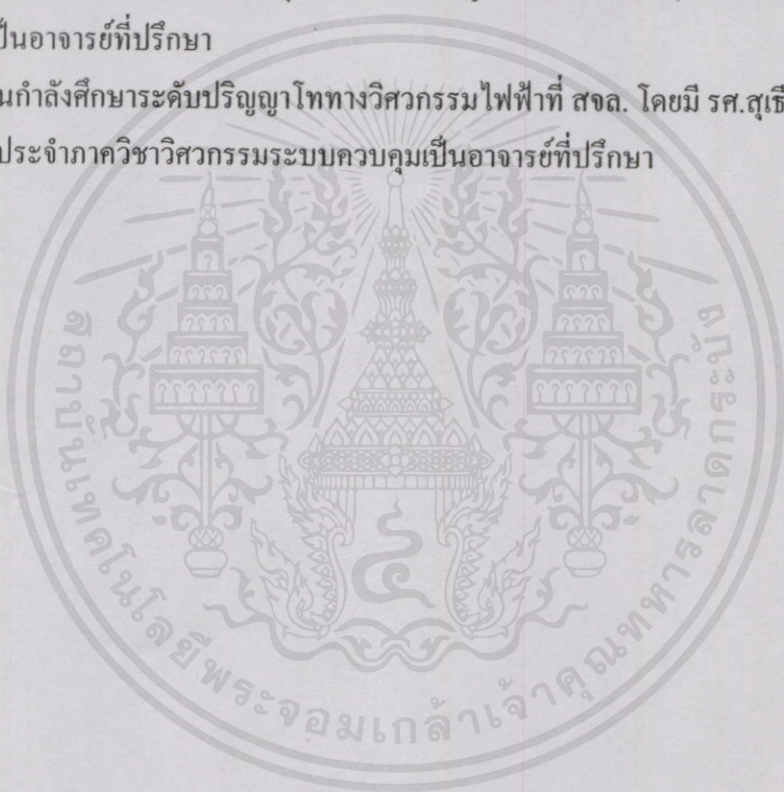
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายเจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถม มัธยมต้น และมัธยมปลาย จากโรงเรียนเซนต์คาเบรียล แล้วทำการสอบแข่งขันเข้ามหาวิทยาลัยประจำปีการศึกษา 2538 และสามารถเข้าเรียนทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาระบบควบคุม ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)

ปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาตรีทางวิศวกรรมไฟฟ้า จากหัวข้อวิจัย เรื่อง ตัวควบคุมแบบ PID ชนิดหลายอินพุท (Universal input PID controller) โดยมี อาจารย์สว่าง เลิศศิริสุนทร เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา

ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโททางวิศวกรรมไฟฟ้าที่ สจล. โดยมี รศ.สุเชียร เกียรติสุนทร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้