

การประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส แบบไร้แปรงถ่าน  
โดยไม่มีตัวรับรู้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

นายภาวินทร์ จายยญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2552

**ARTIFICIAL INTELLIGENT-BASE SENSORLESS  
SPEED ESTIMATION OF 3-PHASE  
BRUSHLESS DC MOTOR**

**Pawin Jawayon**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechatronics  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2009**

การประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส แบบไร้แปรงถ่าน  
โดยไม่มีตัวรับรู้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(อ. ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

\_\_\_\_\_

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ภาวินทร์ จาวญู : การประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส  
แบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ (ARTIFICIAL  
INTELLIGENT-BASE SENSORLESS SPEED ESTIMATION OF 3-PHASE  
BRUSHLESS DC MOTOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 85 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณคอมมิวเตชัน (Commutation Signal) กับจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับซึ่งสามารถประมาณได้ด้วยจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้โดยตรงจากขั้วของแต่ละเฟสของมอเตอร์ หรือแรงดันเฟสแทนการใช้ตัวรับรู้ ในปัจจุบันสัญญาณของฟังก์ชันการสับเปลี่ยนหรือเรียกว่าสัญญาณคอมมิวเตชันนั้นสามารถวัดได้จากสัญญาณของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ (Hall Effect Sensor) ที่ติดตั้งไว้ภายในตัวมอเตอร์ ซึ่งสัญญาณคอมมิวเตชันมีความสัมพันธ์กับตำแหน่ง และความเร็วของมอเตอร์ และยังมีสัมพันธ์กับจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์อีกด้วย ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณคอมมิวเตชันกับแรงดันเฟสแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การประมาณความถี่ของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันเฟสด้วยฟังก์ชันเงื่อนไข และนำความถี่นั้นมาเป็นช่วงความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับที่ประมาณได้จะถูกใช้ในการประมาณสัญญาณคอมมิวเตชัน และความเร็วของมอเตอร์ ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ของฟังก์ชันในการประมาณตำแหน่งของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันเฟส และตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถประมาณความเร็วได้ในช่วง 2,000-7,000 รอบต่อนาที โดยมีความแม่นยำมากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ และมีช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็ว (Over Head Time) น้อยกว่า 9 ms

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

PAWIN JAWAYON : ARTIFICIAL INTELLIGENT-BASE SENSORLESS  
SPEED ESTIMATION OF 3-PHASE BRUSHLESS DC MOTOR.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL,  
Ph.D., 85 PP.

BRUSSLESS DC MOTOR/BACK-EMF/ARTIFICIAL INTELLIGENCE/  
DIGITAL FILTER

This thesis describes the speed estimation of 3-phase brushless DC (BLDC) motor using relationship between commutation signal and back electromotive force (Back-EMF) instead the Hall Effect sensors. This Back-EMF signal can be estimated from phase voltage by condition function and low-pass filter. The estimation scheme has 2 steps. Firstly, the condition function is used to find the haft of phase voltage crossing point and calculate frequency. Secondly, the frequency from previous step is apply to find the frequency cut-off of low-pass filter for filtering phase voltage to estimate Back-EMF signal. Then frequency of the estimated Back-EMF signal can be calculated and used to estimate the commutation signal and motor speed. Artificial intelligence techniques are employed to find the coefficients of condition functions and filter's parameters of each speed. This proposed method can be estimated speed of BLDC motor in speed rang from 2,000 to 7,000 rpm. with more than 97% of accuracy and less than 9 ms of Over Head Time.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ มีความถูกต้องสมบูรณ์ด้วยความกรุณาเสมอมา

ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ อุ่นศิริไทย์ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และ อาจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง และ คุณนัฐกาญจน์ ชื่อตรง ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานในการทำวิจัยเสมอมา

ขอบพระคุณครับ พ่อ ขอบพระคุณครับ แม่

ขอบคุณ ผู้ที่ทำให้โลกสวยงาม

ภาวินทร์ จาวชญ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ .....	4
2.1.1 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน .....	5
2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส แบบไร้แปรงถ่าน .....	7
2.1.3 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ (Back Electromotive Force) .....	11
2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับและ ตำแหน่งของฮอลล์เอฟเฟกเซ็นเซอร์ .....	15

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2	Moving Average.....	16
2.3	ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth Low Pass Filter).....	17
2.4	การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม (Polynomial curve fitting) .....	20
2.5	จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm).....	22
2.6	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.7	สรุป .....	25
<b>3</b>	<b>วิธีการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน</b>	
	<b>โดยไม่มีตัวรับรู้.....</b>	<b>26</b>
3.1	การกำหนดแถบสัญญาณเริ่มต้น .....	28
3.2	การคำนวณหาเส้นขอบของสัญญาณที่ผ่านการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้น .....	29
3.3	การประมาณสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส .....	30
3.4	การประมาณแรงไฟฟ้าต้นเหนี่ยวนำกลับด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน .....	31
3.5	การคำนวณความเร็ว .....	32
3.6	การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของ สัญญาณคอมมิวเตชัน .....	33
3.6.1	การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลา ของสัญญาณคอมมิวเตชันด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม .....	33
3.6.1	การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับ คาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันด้วยจินเนติกอัลกอริทึม .....	33
3.7	สรุป .....	34
<b>4</b>	<b>การทดลองและวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>35</b>
4.1	เครื่องมือทดลอง .....	35
4.2	การวัดความเร็วของมอเตอร์.....	37
4.3	การวัดแรงดันไฟฟ้าจากแต่ละเฟสของมอเตอร์และการแปลงสัญญาณ .....	38



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในแต่ละฟังก์ชันกับคาบเวลาของสัญญาณ คอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม .....	39
4.4.1 การประมาณสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชัน ของแต่ละเฟส ด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม .....	40
4.4.2 การประมาณสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชัน ของแต่ละเฟสด้วยจินเนติกอัลกอริทึม .....	41
4.5 การทดสอบการประมาณความเร็วของมอเตอร์.....	48
4.6 สรุป .....	61
<b>5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>62</b>
5.1 สรุป .....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	63
5.2.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลงานวิจัยไปใช้งาน .....	63
รายการอ้างอิง .....	64
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดสอบ.....	66
ภาคผนวก ข. การใช้งาน GATool ของโปรแกรม MATLAB และ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ .....	68
ภาคผนวก ค. การใช้งาน โปรแกรม Open Choice Desktop .....	74
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	79
ประวัติผู้เขียน .....	85

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	
ค่าตัวของแปรของแต่ละฟังก์ชันในการประมาณความเร็ว คาบเวลา โดยประมาณของสัญญาณคอมมิวเตชัน ความเร็วของมอเตอร์และความถี่ตัดออก ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน .....	39
4.2	
ผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรของ GA ต่อค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ ในการค้นหาคำตอบของสัมประสิทธิ์ ของสมการพหุนามความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลา ของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส .....	45
4.3	
ความเร็ว ความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็ว เมื่อความเร็วอยู่ในสถานะ คงตัวและเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ใน สถานะคงตัว .....	59
4.4	
ความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็ว เมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว ของแต่ละช่วงความเร็วเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น .....	60
4.5	
ความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็ว เมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว ของแต่ละช่วงความเร็วเมื่อความเร็วลดลง.....	60

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนภาพประมาณการใช้อุปกรณ์ประเภทมอเตอร์ไฟฟ้าปี 2000-2005..... 1
2.1	ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิด 3 เฟส ..... 5
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างคอมมิวเตชันฟังก์ชันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ..... 5
2.3	แผนผังเวลา (timing diagram) ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ..... 6
2.4	แผนภาพสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ..... 8
2.5	ประจุและขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ ..... 11
2.6	การแผ่ของสนามแม่เหล็ก..... 13
2.7	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับแบบสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ..... 14
2.8	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับแบบสี่เหลี่ยมคางหมู..... 15
2.9	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ และสัญญาณจาก HES ..... 16
2.10	สัญญาณที่ผ่านการทำ MA..... 17
3.1	จุดผ่านศูนย์ จุดผ่านกึ่งหนึ่งแรงของคลื่นที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ และจุดผ่านแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แต่ละเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบไร้แปรงถ่าน..... 26
3.2	ลำดับวิธีในการประมาณความเร็วของมอเตอร์..... 27
3.3	แรงดันที่วัดได้ของแต่ละเฟส และข้อมูลที่ได้จากการเลือกด้วย แถบสัญญาณเริ่มต้น ..... 28
3.4	ข้อมูลที่ได้จากการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้น และสัญญาณที่ผ่านการทำ MA ..... 30
3.5	ข้อมูลที่ได้จากการทำ MA และสัญญาณคอมมิวเตชันจากการประมาณ ..... 31
3.6	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ก่อนและหลังผ่าน ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ..... 32
4.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประมาณความเร็ว ..... 36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	แผนภาพการอ่านแรงดันไฟฟ้าจากแต่ละเฟสของมอเตอร์ และการประมาณความเร็วของมอเตอร์ ..... 37
4.3	เครื่องวัดความเร็วรุ่น MANCHESTER M7 9RH ENGLAND..... 37
4.4	โปรแกรม Open Choice Oscilloscope PC Communication Tool ..... 38
4.5	เส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส ด้วยการปรับเส้นโค้ง เชิงพหุนาม ..... 40
4.6	GA Tool (GATool) ของโปรแกรม MATLAB ..... 41
4.7	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ของ สมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ กับคาบเวลาของ สัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool ..... 42
4.8	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\delta$ กับคาบเวลาของ สัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool ..... 43
4.9	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ของ สมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\beta$ กับคาบเวลาของ สัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool ..... 44
4.10	ตัวอย่างเส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากร ของ GA ..... 46
4.11	เส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ..... 47
4.12	สัญญาณ HES แรงดันเฟส และสัญญาณที่ประมาณได้ ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที ..... 48
4.13	การปรับตัวของตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที ..... 49



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 ข้อมูลและคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	67
ข.1 หน้าต่างของ GATool.....	69
ข.2 ตัวอย่างการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใน m-file.....	70
ข.3 การตั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร .....	70
ข.4 การกำหนดค่าขอบของตัวแปรทั้งหมดที่ต้องการค้นหา .....	71
ข.5 การกำหนดหน้าต่างแสดงผลระหว่างการค้นหา.....	71
ข.6 การกำหนดชนิดและขนาดของประชากร .....	72
ข.7 การกำหนดการตัดสินใจในการหยุดการค้นหา .....	72
ข.8 หน้าต่างแสดงผลการค้นหา.....	73
ค.1 หน้าต่างของโปรแกรม Open Choice Desktop.....	75
ค.2 หน้าต่างแสดงเครื่องมือที่ต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์.....	76
ค.3 หน้าต่างเลือกช่องของสัญญาณที่ต้องการวัด .....	76
ค.4 ข้อมูลที่อ่านเข้ามาในโปรแกรม .....	77
ค.5 โครงสร้างในการเก็บข้อมูลของสัญญาณที่วัดได้ .....	78

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

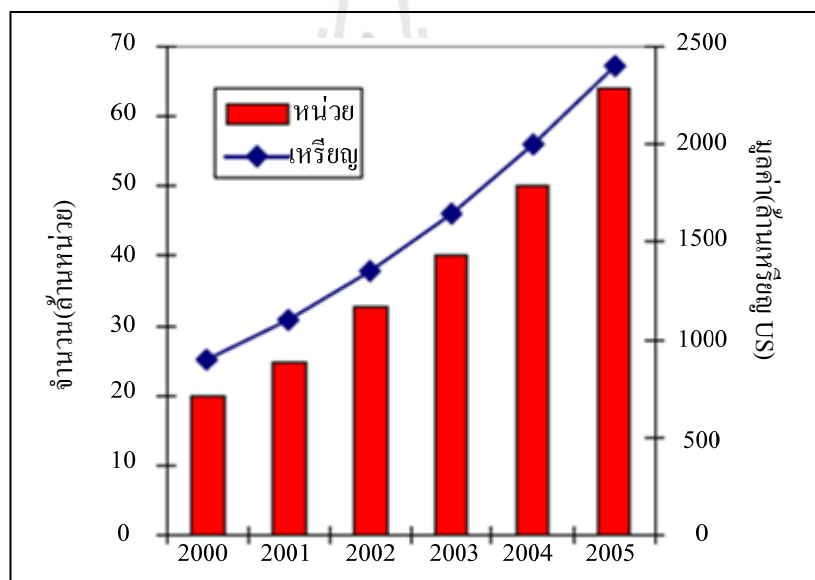
BLDC	=	Brushless Direct Current Motor
GA	=	Genetic Algorithm
HES	=	Hall Effect Sensor
MA	=	Moving Average
BEMF	=	Back Electromotive force
$\omega$	=	ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
$R_s$	=	ความต้านทานของสเตเตอร์แต่ละเฟส
$I_a, I_b, I_c$	=	กระแสที่ไหลผ่านเฟส $a$ $b$ และ $c$ ของสเตเตอร์
$V_a, V_b, V_c$	=	คือแรงไฟฟ้าคั่นที่จ่ายให้เฟส $a$ $b$ และ $c$ ของมอเตอร์.
$E_a, E_b, E_c$	=	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับในเฟส $a$ $b$ และ $c$
$B$	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
$T_1$	=	แรงบิดภายนอก
$J$	=	ความเฉื่อยของโรเตอร์
$Z_{pol}$	=	จำนวนของโพลของมอเตอร์
$L_1$	=	ค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์
$\Omega_c$	=	ความถี่ตัดออก [rad/s]
$\delta$	=	ความกว้างของขอบเขตของข้อมูลที่ต้องการเลือก
$\sigma$	=	ขนาดของหน้าต่างในการทำ MA
$\beta$	=	ช่วงเวลาอื่นหลังจากตำแหน่งปัจจุบัน
$e_\sigma$	=	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร $\sigma$
$e_\delta$	=	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร $\delta$
$e_\beta$	=	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร $\beta$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวัน และงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เมื่อพิจารณาจากแผนภาพการประมาณจำนวนมอเตอร์ไฟฟ้า และมูลค่าเมื่อเทียบกับช่วงเวลาในแต่ละปี จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ามีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ตามครัวเรือนต่าง ๆ ในปี 2000-2005 ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพประมาณการใช้อุปกรณ์ประเภทมอเตอร์ไฟฟ้าปี 2000-2005

ในงานทางด้านอุตสาหกรรม เครื่องบิน รถยนต์ ด้านการแพทย์ ระบบเครื่องมือวัด และงานในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสค์ไดรฟ์ นิยมใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เนื่องจากมีประสิทธิภาพ และอายุในการใช้งานสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบใช้แปรงถ่าน

ในปัจจุบันต้องเล็งงบประมาณไปจำนวนมากในการปรับปรุง ควบคุม และซื้ออุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ ของมอเตอร์ หนึ่งในนั้นคือ ตัวป้อนกลับ (Feed back) หรือตัวรับรู้ (Sensor) ซึ่งในการใช้งานส่วนใหญ่มีความต้องการตัวป้อนกลับในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ตัวเข้ารหัส (Encoder)



ทาโค (Taco) ตัวรับรู้แรงบิด (Torque sensor) และตัวป้อนกลับอื่น ๆ ซึ่งตัวป้อนกลับเหล่านี้มีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับราคาของมอเตอร์ ทำให้เกิดแนวคิดในการลดจำนวนตัวรับรู้หรือตัวป้อนกลับเหล่านี้จะทำให้ค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียให้กับมอเตอร์ลดลงโดยมีงานวิจัยต่าง ๆ ในการลดการใช้งานตัวป้อนกลับเหล่านี้ เช่นการลดตัวรับรู้แรงบิด โดยใช้การประมาณแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ การควบคุมความเร็วและตำแหน่งด้วยการใช้ตัวป้อนกลับจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ (Back-EMF) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกลับซึ่งจะรวมมากับแรงดันไฟฟ้าในแต่เฟสของมอเตอร์ สามารถวัดได้โดยตรงจากแต่ละขั้วของมอเตอร์และสัญญาณจากฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ เพื่อสร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ในแต่ละระดับความเร็วและนำความสัมพันธ์ในแต่ละระดับความเร็วมาหาความสัมพันธ์ในช่วงความเร็วใช้งานโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ และเพื่อลดความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วเมื่อได้ความถี่ของคอมมิวเตเตอร์หรือความเร็ว โดยประมาณจากวิธีข้างต้นแล้วจะนำแรงดันเฟสในช่วงเวลาที่ผ่านไป มาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำโดยให้ความถี่ตัดออก เท่ากับความถี่ที่ประมาณได้ข้างต้นเพื่อประมาณสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับและนำความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับไปประมาณความเร็วที่ถูกต้องขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษา และประมาณความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

ออกแบบ และทำการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยไม่ใช้ตัวรับรู้จะกระทำในช่วงความเร็ว 2,000 ถึง 7,000 รอบต่อนาที

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

สามารถประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์โดยไม่ใช้ตัวรับรู้ได้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประมาณความสัมพันธ์ของระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับกับความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน และหาวิธีการที่เหมาะสมในการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่ใช้ตัวรับรู้

## 1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

*บทที่ 1* บทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัย ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

*บทที่ 2* กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านรวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

*บทที่ 3* กล่าวถึงวิธีและขั้นตอนในการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

*บทที่ 4* การทดสอบการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและวิเคราะห์ผลการทดลอง

*บทที่ 5* บทสรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

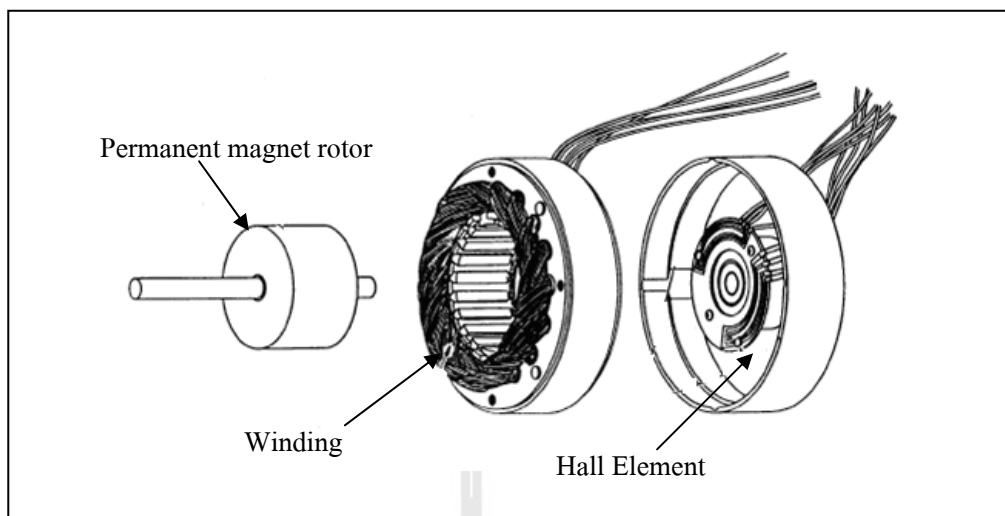
### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้สามารถทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ โดยทำการประมาณฟังก์ชันในการสับเปลี่ยนการป้อนแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟส เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่เรียกว่า คอมมิวเตชันฟังก์ชันและความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับซึ่งเกิดจากขดลวดโรเตอร์ที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ด้วยฟังก์ชันที่กำหนดขึ้นมาเพื่อทำการประมาณตำแหน่งและความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสและนำความถี่ที่ได้มาเป็นความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อกรองสัญญาณแรงดันเฟสออกให้เหลือเพียงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับทำให้สามารถประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชันและความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสได้

#### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน หรือ Brushless Direct Current Motor (BLDC) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเร็วรอบ แรงบิด และประสิทธิภาพที่สูง และต้องการการบำรุงรักษาน้อยเนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน

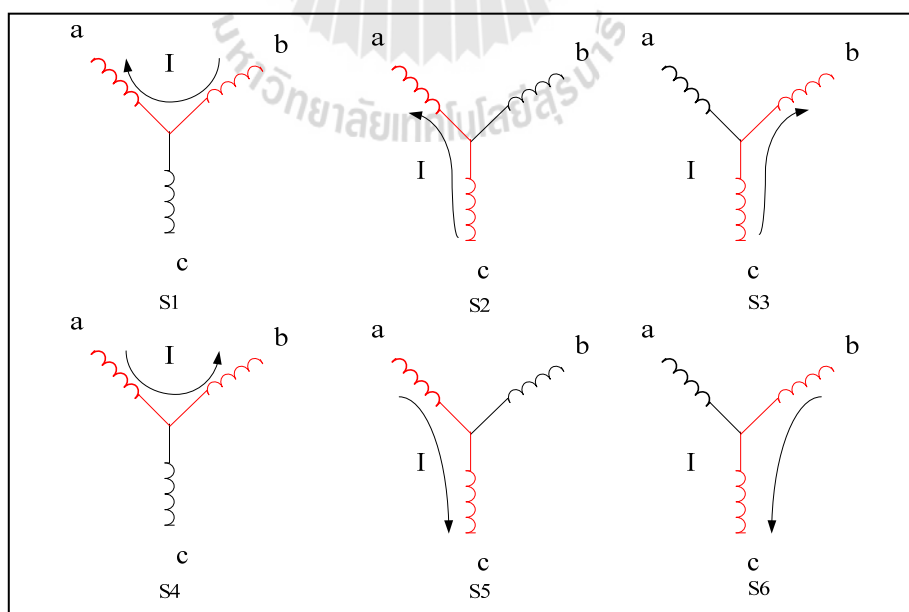
โครงสร้างทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะคล้ายกับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะมีฟลักซ์ของแม่เหล็กถาวรของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรจะเป็นแบบคลื่นรูปไซน์ แต่ฟลักซ์ของแม่เหล็กถาวรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านส่วนใหญ่จะมีคลื่นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปร่งถ่านชนิด 3 เฟส

### 2.1.1 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปร่งถ่าน

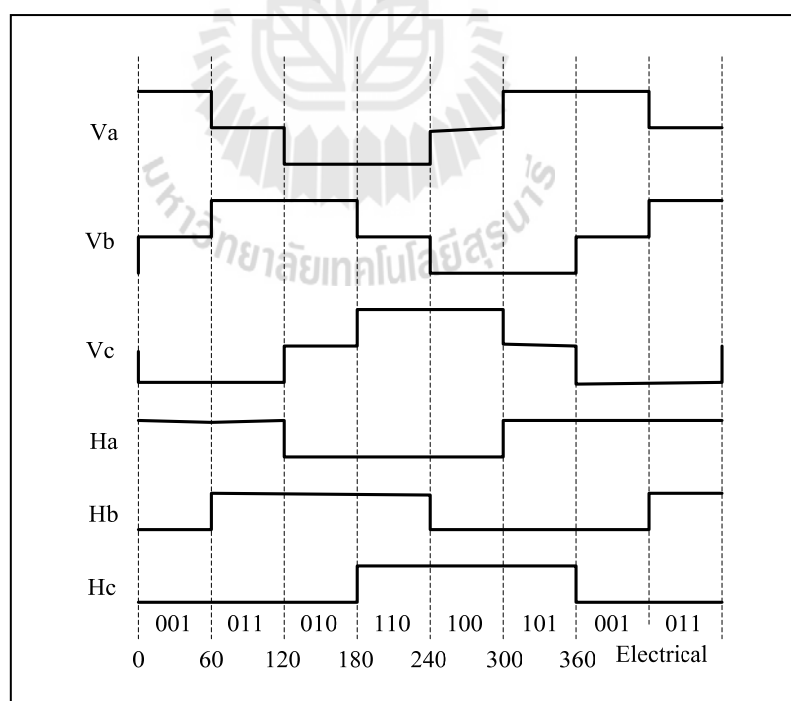
ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปร่งถ่านจะมีขดลวดอยู่ 3 ชุด และจะทำงานครั้งละ 2 ชุด สับเปลี่ยนกันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปร่งถ่านชนิด 3 เฟสจะมีสาย 3 เส้นต่อออกมาคือ ขั้ว A B และ C ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคอมมิวเตชันฟังก์ชันกับการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นโรเตอร์ (Rotor) ที่เป็นแม่เหล็กถาวรอยู่ตรงกลาง และขดลวด A B และ C อยู่รอบ ๆ แต่หากเป็นมอเตอร์ที่เปลือกหมุน (Out-runner) จะกลับกันคือขดลวดจะอยู่ตรงกลางแล้วมีเปลือกแม่เหล็กเป็นวงกลมอยู่รอบนอกแทน

จากภาพจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดจาก A ไป B ตามเส้นทางที่ 1 ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสำหรับดึงดูดแกนหมุนให้อยู่ระหว่างขั้วของ A และ B หรือมอเตอร์จะวางตัวอยู่ตามรูปที่ 2.2 และหากให้การกระแสไหลตามเส้นทางที่ S5 คือ จากขั้ว A ไปยังขั้ว C จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กระหว่างขั้ว A และ C จะทำให้ตัวหมุนเคลื่อนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ไปอยู่ระหว่างขั้ว C และ A แทน หรือขั้ว N ประมาณเลข 11 บนหน้าปัดนาฬิกา และหากเปลี่ยนกระแสให้ไหลในเส้นทางที่ S6 คือ จาก B ไปยัง C ต่อไปอีก ตัวหมุน จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ต่อไปอีกขั้ว N จะอยู่ที่ระหว่างขั้ว B และ C หรือที่ประมาณ 9 นาฬิกา ดังนั้นหากให้เกิดการหมุนต่อเนื่อง จะต้องทำการสับขั้วให้กระแสไหลในจังหวะที่เหมาะสมตามลำดับไป หรือเรียกว่าคอมมิวเตชันฟังก์ชันและเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคอมมิวเตชันฟังก์ชัน จะเปลี่ยนไป ตามความถี่ของสัญญาณที่เรียกว่าสัญญาณคอมมิวเตชัน เมื่อกระทำต่อเนื่องไปจนครบ 6 ขั้นจะเกิดการหมุนครบ 1 รอบพอดี



รูปที่ 2.3 แผนผังเวลา (Timing diagram) ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

### 2.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิด 3 เฟส

เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านในรูปที่ 2.4 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการสถานะได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{as} - V_n \\ V_{bs} - V_n \\ V_{cs} - V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

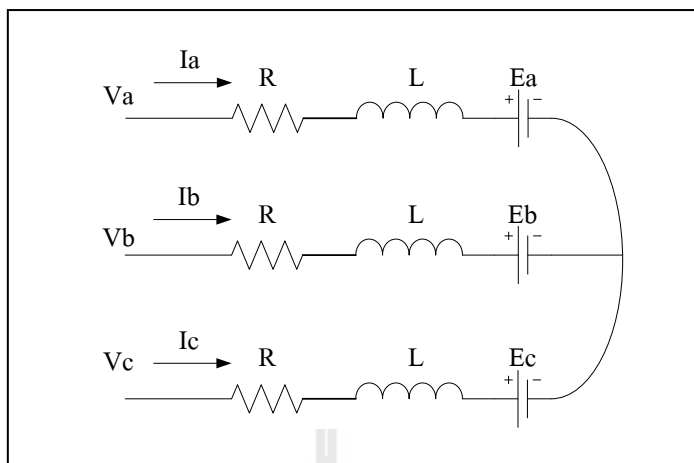
เมื่อ  $R_s$  คือ ความต้านทานของสเตเตอร์ต่อเฟส  
 $I_a I_b I_c$  คือ กระแสที่ไหลผ่านแต่ละเฟสของสเตเตอร์  
 $p$  คือ เวลาช้อยในการหาอนุพันธ์  
 $E_a E_b E_c$  คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับในแต่ละเฟส

$$V_n = \frac{1}{3} [V_{as} + V_{bs} + V_{cs}] - \sum BEMFs \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\sum BEMFs$  คือ ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับของทุกเฟส โดยในแต่ละเฟสสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_p = (BLv)N = N(Blr\omega) = N\phi\omega = \lambda\omega \quad (2.3)$$

เมื่อ  $B$  คือ ความเข้มฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก  
 $L$  คือ ความยาวของโรเตอร์  
 $N$  คือ จำนวนของขดลวดต่อเฟส  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม  
 $\phi$  คือ  $BLr$



รูปที่ 2.4 แผนภาพสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในขณะที่ทั้ง 3 เฟสอยู่ในเฟสสมมาตรเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโรเตอร์กับมุม

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิดดังสมการ (2.6)

$$T_e = \frac{E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c}{\omega} \quad (2.6)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.7)

$$\begin{aligned} E_a &= f_a(\theta)\lambda\omega \\ E_b &= f_b(\theta)\lambda\omega \\ E_c &= f_c(\theta)\lambda\omega \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.6) และ (2.7) สามารถหาแรงบิดได้ดังสมการ (2.8)

$$J \frac{d}{dt} \omega + B\omega = T_c - T_l \quad (2.8)$$

เมื่อ  $T_l$  คือ แรงบิดภายนอก  
 $J$  คือ ความเฉื่อย  
 $B$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุม และมุมของ โรเตอร์ เป็นดังสมการ

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{Z_{pol}}{2} \omega \quad (2.9)$$

เมื่อจำนวน โพลของมอเตอร์แทนด้วย  $Z_{pol}$  ซึ่งสามารถเขียนสมการสถานะได้ดังสมการ (2.10)

$$X' = Ax + Bu \quad (2.10)$$

$$x = [I_a \quad I_b \quad I_c \quad \omega \quad \theta]^T \quad (2.11)$$



$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_l} & 0 & 0 & \frac{\lambda p f_a(\theta)}{j} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_l} & 0 & \frac{\lambda p f_b(\theta)}{j} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_s}{L_l} & \frac{\lambda p f_c(\theta)}{j} & 0 \\ \frac{\lambda p f_a(\theta)}{j} & \frac{\lambda p f_b(\theta)}{j} & \frac{\lambda p f_c(\theta)}{j} & \frac{-B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

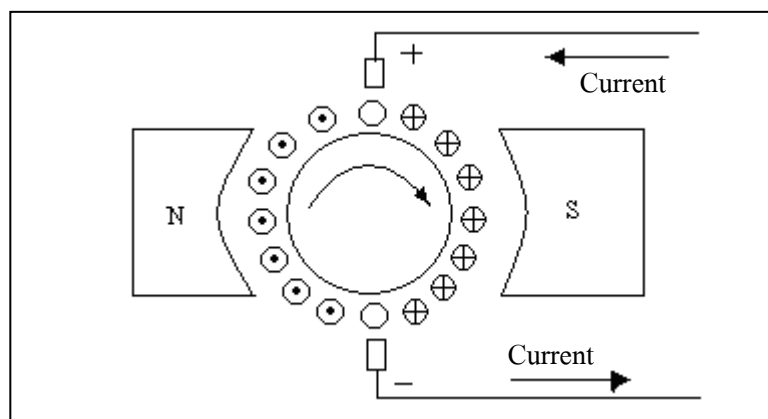
$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$U = [V_a \quad V_b \quad V_c \quad T_l]^T \quad (2.14)$$

- เมื่อ
- $L_l$  คือ  $L-M$
  - $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองในแต่ละเฟส
  - $M$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำต่อกันของเฟส
  - $V_a \quad V_b \quad V_c$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แต่ละเฟสของมอเตอร์

### 2.1.3 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ (Back Electromotive Force)

ขณะที่อาร์เมเจอร์หมุนในสนามแม่เหล็กตัวนำอาร์เมเจอร์จะตัดสนามแม่เหล็ก N-S ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นบนตัวนำอาร์เมเจอร์ เป็นไปตามกฎมือขวาของเฟลมมิง มีทิศทางการไหลของกระแสเหนี่ยวนำตรงข้ามในลักษณะที่ต่อต้านการไหลของกระแสของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ” (Back Electromotive force) หรือ BEMF



รูปที่ 2.5 ประจุและขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์

ภายในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านจะเกิดสนามแม่เหล็ก โดยแม่เหล็กที่ติดอยู่ภายในผนังด้านในของมอเตอร์ แม่เหล็กแต่ละขั้วจะแผ่สนามแม่เหล็กทิศทางขนานหรือทิศทางตามแนวรัศมีของมอเตอร์ดังรูปที่ 2.5 ส่วนปกติ  $B_r$  และ ส่วนตรงกันข้าม  $B_t$  ของสนามแม่เหล็กภายในช่องบริเวณช่องว่างของโรเตอร์สามารถอธิบายได้โดยสมการดังนี้

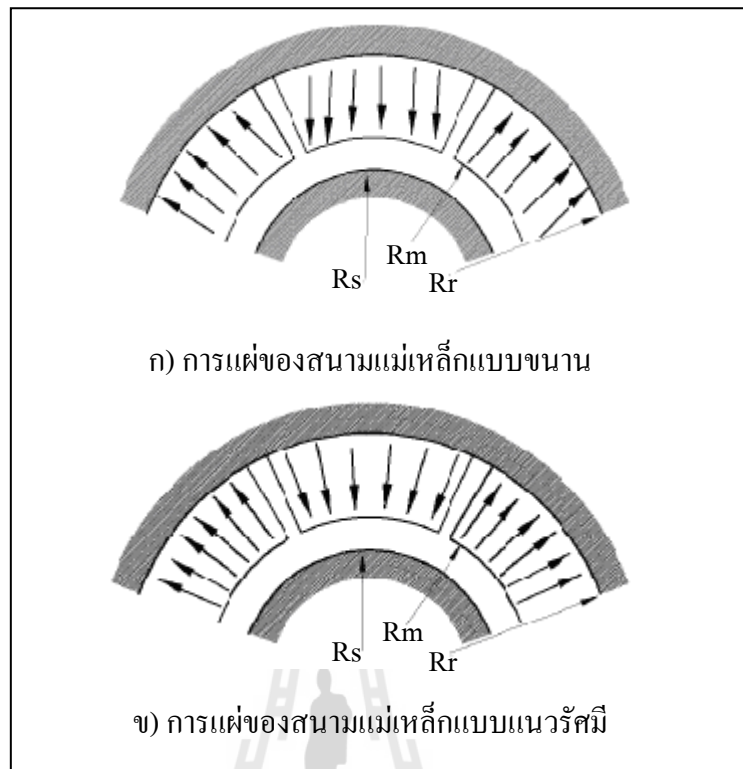
$$B_r(r, \theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} K_b(n) f_{Br}(r) \cos(np\theta) \quad (2.15)$$

$$B_t(r, \theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} K_b(n) f_{Bt}(r) \sin(np\theta) \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาในกรณีที่มอเตอร์มีขั้วมากกว่า 1 ขั้วและเป็นมอเตอร์แบบมีโรเตอร์  
อยู่ด้านนอก ( $R_s \langle R_m \langle R_r$ ) โดยมีการแพร่ของสนามแม่เหล็กแบบขนาน

$$K_b(n) = \frac{-\mu_0 M_n \cdot np}{2\mu_r (np)^2 - 1} \cdot \left\{ \frac{(A_{3n} - 1) \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^{2np} + 2 \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^{np-1} - (A_{3n} + 1)}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[ 1 - \left( \frac{R_s}{R_r} \right)^{2np} \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[ \left( \frac{R_s}{R_m} \right)^{2np} - \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^{2np} \right]} \right\} \quad (2.17)$$

เมื่อ	$f_{Br}(r)$	คือ	$\left( \frac{r}{R_m} \right)^{np-1} + \left( \frac{R_s}{R_m} \right)^{np-1} \left( \frac{R_s}{r} \right)^{np+1}$
	$f_{B\theta}(r)$	คือ	$-\left( \frac{r}{R_m} \right)^{np-1} + \left( \frac{R_s}{R_m} \right)^{np-1} \left( \frac{R_s}{r} \right)^{np+1}$
	$A_{3n}$	คือ	$\left( np - \frac{1}{np} \right) \frac{M_{rn}}{M_n} + \frac{1}{np}$
	$M_n$	คือ	$M_{rn} + np M_{\theta n}$
	$M_{rn}$	คือ	$\frac{B_r}{\mu_0} \alpha_p (A_{1n} + A_{2n})$
	$M_{\theta n}$	คือ	$\frac{B_r}{\mu_0} \alpha_p (A_{1n} - A_{2n})$
	$A_{1n}$	คือ	$\frac{\sin \left[ (np+1) \alpha_p \frac{\pi}{2p} \right]}{(np+1) \alpha_p \frac{\pi}{2p}}$
	$A_{2n}$	คือ	$\frac{\sin \left[ (np-1) \alpha_p \frac{\pi}{2p} \right]}{(np-1) \alpha_p \frac{\pi}{2p}}$
	$r$	คือ	รัศมีของช่องว่างภายใน
	$\theta$	คือ	ตำแหน่งของโรเตอร์
	$n$	คือ	ตัวเลข ฮาร์โมนิกส์
	$p$	คือ	จำนวนโพลของมอเตอร์
	$\alpha_p$	คือ	อัตราส่วนระหว่างความโค้งของขั้วแม่เหล็กและระยะพิทซ์



รูปที่ 2.6 การแผ่ของสนามแม่เหล็ก

เมื่ออาร์เมเจอร์เคลื่อนที่ผ่านรอบแม่เหล็ก ขดลวดในแต่ละช่องของอาร์เมเจอร์จะได้รับฟลักซ์ที่ต่างกัน ฟลักซ์ที่ขดลวดจะได้รับมากที่สุดจะเกิดขึ้นในขณะที่แกนของขดลวดอยู่ในแนวเดียวกันกับแกนของแม่เหล็ก และเมื่อแกนของขดลวดตั้งฉากกับแกนของแม่เหล็ก จะทำให้ขดลวดได้รับฟลักซ์น้อยที่สุด จากสมการที่ (2.15) การเชื่อมต่อของฟลักซ์ต่อขดลวดสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.18)

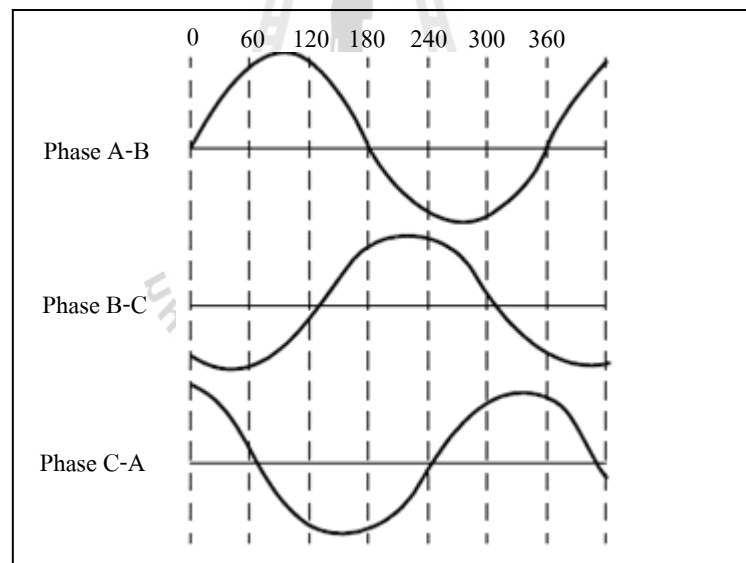
$$\varphi_{coil}(r = R_s, \theta) = 2R_s l_a N_c \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{np} K_{pn} K_B(n) \cdot f_{Br}(r = R_s) \cdot \cos(np\theta) \quad (2.18)$$

เมื่อ	$y$	คือ จำนวนช่องเปิด
	$l_a$	คือ ความยาวของชั้นของแกนมอเตอร์
	$N_c$	คือ จำนวนรอบของขดลวด

โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมต่อฟลักซ์ ของขดลวดแรกเป็นไปดังสมการ

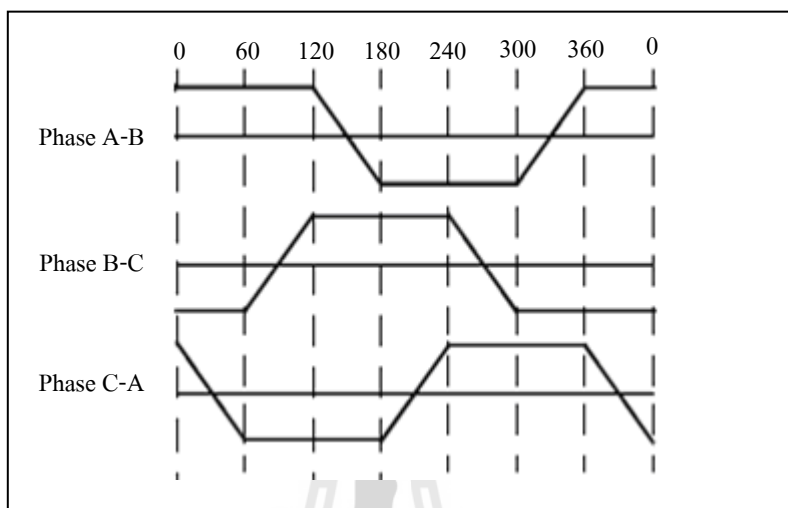
$$EMF_{coil\_1}(r = R_s, \theta) = 2R_s I_a N_c \omega \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} K_{dpn} K_B(n) \cdot f_{Br}(r = R_s) \cdot \sin(np\theta) \quad (2.19)$$

เนื่องมาจากฟลักซ์ของแม่เหล็กในมอเตอร์มีรูปแบบที่แตกต่างกันทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีรูปร่างที่ต่างกันตามรูปแบบของฟลักซ์ของแม่เหล็กแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ มีรูปร่างแบบสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 2.7 และมีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 2.8 โดยฟลักซ์ที่เกิดจากแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่มีรูปแบบเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ จะทำให้รูปแบบของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์เป็นแบบสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจะให้แรงบิดที่มีความเรียบกว่ามอเตอร์ที่มีรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับที่มีสัญญาณแบบสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 2.7 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับแบบสัญญาณรูปคลื่นไซน์

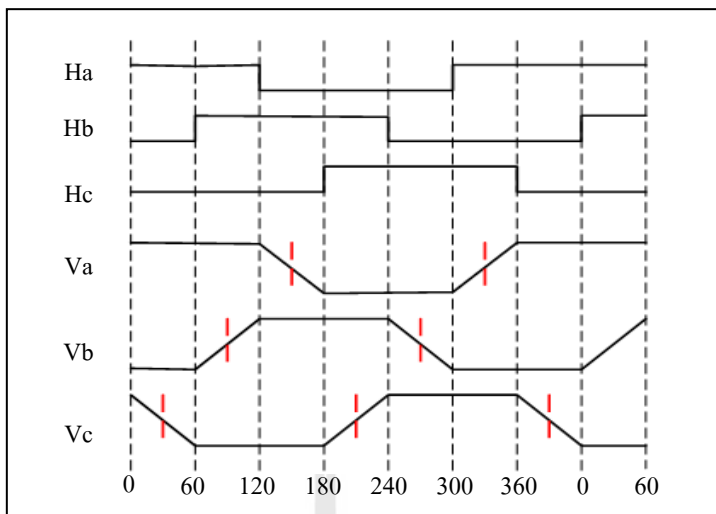
มอเตอร์ที่มีรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับแบบสี่เหลี่ยมคางหมู  
เกิดจากมอเตอร์ที่ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรซึ่งจะมีฟังก์ชันของฟลักซ์แม่เหล็กแบบ  
สี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 2.8 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

#### 2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับและตำแหน่งของ ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

เมื่อขดลวดสองขดถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนผ่านสนามแม่เหล็กทำให้เกิด  
แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับเกิดขึ้นในขดลวดแต่ละขดซึ่งแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับในขดลวด  
แต่ละเฟสมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ (Hall Effect Sensor) หรือ HES  
ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันการสับเปลี่ยน หรือคอมมิวเตชันฟังก์ชัน



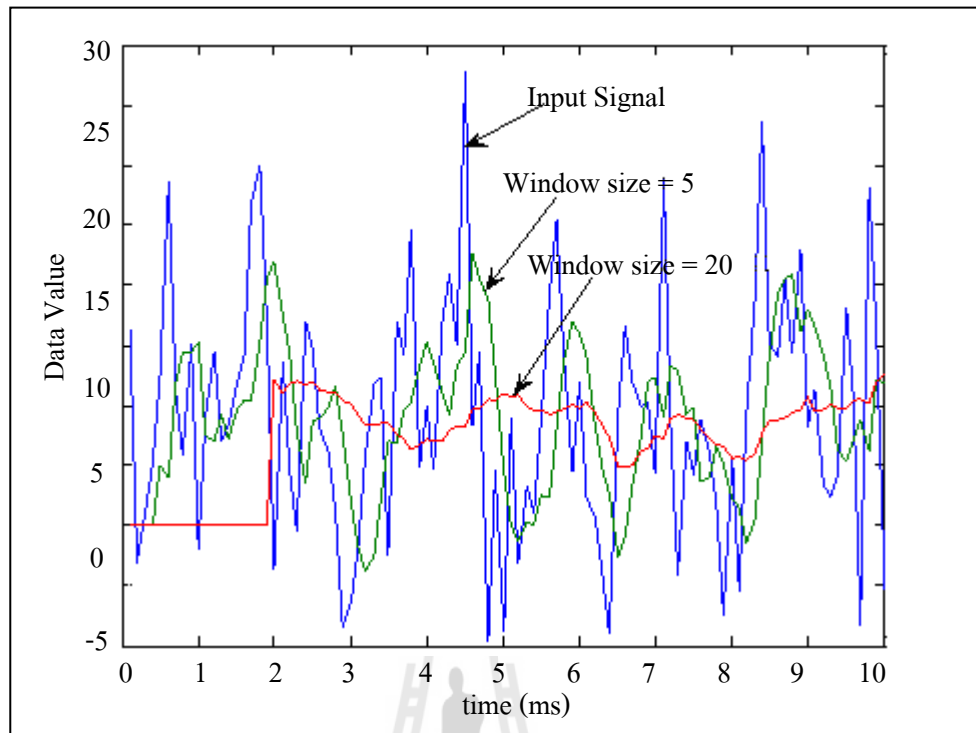
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับและสัญญาณจาก HES

## 2.2 Moving Average

Moving Average หรือ MA เป็นการหาเส้นขอบของสัญญาณหรือข้อมูล ซึ่งมีการทำงานคล้ายกับตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน MA มีความซับซ้อนน้อยดังสมการ (3.2) เมื่อนำสัญญาณอินพุตมาผ่าน MA จะมีผลการกรองดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเห็นว่าสัญญาณที่ผ่านการทำ MA จะมีค่าข้อมูลที่ราบเรียบมากขึ้นเมื่อขนาดของหน้าต่างในการทำ MA มีค่าเพิ่มขึ้น

$$Out_i = \frac{\sum_{j=i-n}^{i-1} In_j}{\sigma} \tag{2.20}$$

- เมื่อ  $In_j$  คือ สัญญาณอินพุต ณ ตำแหน่งที่  $j$
- $Out_i$  คือ สัญญาณที่ผ่านการกรอง ณ ตำแหน่งที่  $i$
- $\sigma$  คือ ขนาดของหน้าต่างในการทำ MA



รูปที่ 2.10 สัญญาณที่ผ่านการทำ MA

### 2.3 ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth Low Pass Filter)

ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth Filter) เป็นตัวกรองแบบดิจิทัลชนิดหนึ่งที่สามารถกรองความถี่ในช่วงที่ต้องการ ได้ทั้ง เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ตัวกรองความถี่สูงผ่าน หรือตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ในที่นี้จะกล่าวถึงตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth Low Pass Filter) เป็นตัวกรองดิจิทัลในโดเมนความถี่ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีความซับซ้อนไม่มากนัก และมีประสิทธิภาพสูง

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน-แซท (Z-transform) ของตัวกรองแบบดิจิทัลเป็นไปดังสมการ (2.21)

$$H(z) = \frac{\sum_{p=0}^N E_p z^{-p}}{\sum_{p=0}^N F_p z^{-p}} \quad (2.21)$$



เมื่อ  $E_0, E_1, \dots, E_n$  และ  $F_0, F_1, \dots, F_n$  คือสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง และ  $n$  คือลำดับขั้นของตัวกรอง

ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ทซ์เมื่อผ่านประยุกต์ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนไบลิเนียร์จะได้ดังสมการ (2.22)

$$H(z) = \frac{1}{\sum_{p=0}^N a_p \left[ \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \right]^p} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $a_p$  คือ  $\Omega_c^{-p} \prod_{m=1}^p \left\{ \frac{\cos[(m-1)\pi/2N]}{\sin(m\pi/2N)} \right\}$   
 $p$  คือ  $1, 2, \dots, N$   
 $a_0$  คือ  $1$

เมื่อคาบเวลา  $T$  ในการสุ่มสัญญาณ และ  $\Omega_c$  คือความถี่ตัดออกในหน่วย rad/s เมื่อใช้ทฤษฎีทวินามเพื่ออธิบายกำลังของ  $1+Z^{-1}$  และ  $1-Z^{-1}$  จะได้ดังสมการ (2.23)

$$H(z) = \frac{\sum_{p=0}^N z^{-p} C_p^N}{\sum_{r=0}^N \left\{ a_r (2/T)^r \sum_{p=0}^N [(-1)^p z^{-p} C_p^N \sum_{q=0}^{N-r} [z^{-q} C_q^{N-r}] \right\}} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $C_p^N$  คือ  $\begin{cases} \frac{N!}{(N-p)! p!} , 0 \leq p \leq N \\ 0 , otherwise \end{cases}$

พิจารณาผลรวมของตัวแปรในส่วนของตัวหารของสมการ (2.23) และทำการจัดรูปใหม่ในรูปแบบของสมการ  $H(z)$  กับผลรวมทั้งหมดของตัวแปร  $p$  เมื่อกำหนดให้  $A_p(r) = (-1)^p C_p^r$  และ  $B_q(r) = C_q^{N-r}$

เมื่อแทนค่าในเทอมของตัวหารในสมการ (2.23) จะได้ดังสมการ (2.24)

$$\sum_{p=0}^r [(-1)^p z^{-p} C_p^r] \sum_{q=0}^{N-r} [z^{-q} C_q^{N-r}] = \sum_{p=0}^N z^{-p} D_p(r) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $D_p(r)$  คือ  $\sum_{q=0}^p A_q(r) B_{p-q}(r)$   
 $B_n(r)$  คือ 0 ถ้า  $r > 0$

เมื่อพิจารณาจากเทอมของตัวหารที่เหลืออยู่ในสมการ (2.23) จะได้ดังสมการ (2.25)

$$\sum_{r=0}^N \left\{ a_r \left(\frac{2}{T}\right)^r \sum_{p=0}^N z^{-p} D_p(r) \right\} = \sum_{p=0}^N \left\{ z^{-p} \sum_{r=0}^N a_r \left(\frac{2}{T}\right)^r D_p(r) \right\} \quad (2.25)$$

เมื่อเขียนสมการ (2.23) ใหม่จะได้ดังสมการ (2.26)

$$H(z) = \frac{\sum_{p=0}^N z^{-p} C_p^N}{\sum_{p=0}^N \left\{ z^{-p} \sum_{r=0}^N a_r \left(\frac{2}{T}\right)^r D_p(r) \right\}} \quad (2.26)$$

เมื่อเขียนสมการ (2.24) ให้อยู่ในรูปของสมการ (2.21) จะได้ว่า

$$E_p = C_p^N$$

$$F_p = \sum_{r=0}^N a_r \left(\frac{2}{T}\right)^r D_p(r)$$

จากสมการ (2.21) เมื่อแทนสัมประสิทธิ์  $E_p$  และ  $F_p$  จะสามารถนำมาเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเพื่อกรองความถี่ต่ำผ่านตามความถี่ตัดออกและลำดับการกรองที่กำหนดได้

## 2.4 การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม (Polynomial curve fitting)

การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม หรือ Polynomial curve fitting เป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าอินพุตและเอาต์พุตในรูปแบบของสมการพหุนามซึ่งมีระดับชั้นต่าง ๆ ซึ่งนำวิธี Polynomial curve fitting มาหาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามซึ่งมี  $R^2$  เป็นค่าความผิดพลาด

$$y(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k \quad (2.27)$$

$$R^2 \equiv \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)]^2 \quad (2.28)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของสมการ (2.28) จะได้ตั้งสมการ (2.29)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(R^2)}{\partial a_0} &= -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)] = 0 \\ \frac{\partial(R^2)}{\partial a_1} &= -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)]x_i = 0 \\ \frac{\partial(R^2)}{\partial a_k} &= -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)]x_i^k = 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

เมื่อปรับรูปสมการ (2.29) จะได้ตั้งสมการ (2.30)

$$\begin{aligned} a_0n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^k &= \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{2k} &= \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{aligned} \quad (2.30)$$

เมื่อจัดสมการ (2.30) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์จะได้ดังสมการ (2.31)

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.31) สามารถจัดรูปใหม่โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least squares) ได้ดังสมการ (2.32)

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

เมื่อกูมทั้งสองข้างของเมตริกซ์ (2.32) ด้วยทรานสโพสของเมตริกซ์แรกของสมการที่ (2.32) จะได้

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^k & x_2^k & \cdots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^k & x_2^k & \cdots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

เมื่อให้ค่า  $n$  จุด และทำการแทนค่ากับสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงพหุนาม  $a_0, a_1, \dots, a_k$  จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

เมื่อเขียนเมทริกซ์ (2.34) ในรูปของสมการเชิงเส้นจะได้ดังสมการ (2.35)

$$y = Xa \quad (2.35)$$

เมื่อคูณสมการ (2.35) ด้วย  $X^T$  ทั้งสองข้างของสมการจะได้ดังสมการ (2.36)

$$X^T y = X^T Xa \quad (2.36)$$

เมื่อจัดรูปสมการ (2.36) ใหม่จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการเชิงพหุนามที่ต้องการดังสมการ (2.37) ซึ่งสามารถนำไปประมาณสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงพหุนามได้

$$a = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.37)$$

## 2.5 จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm)

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm หรือเรียกโดยย่อว่า “GA”) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ จินเนติกอัลกอริทึมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามี “วิวัฒนาการ” อยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary computing) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด

GA เป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบให้กับระบบวัฏจักรของ GA โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญได้แก่

1. การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) คือขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป

2. ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation) คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลาน ซึ่งได้จากการรวมพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีส่วนผสมผสานมาจากพ่อแม่ หรือได้จากการแปรผันยีนของพ่อแม่เพื่อให้ได้ลูกหลานสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น

3. การแทนที่ (Replacement) คือขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน เป็นขบวนการในการคัดเลือกกว่าควรเอาลูกหลานในกลุ่มใด จำนวนเท่าไรไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด

กระบวนการภายในของ GA ทำให้คำตอบของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเอง อันจะนำไปสู่การปรับตัวที่ทำให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่า และดีที่สุดได้ รายละเอียดต่าง ๆ ขององค์ประกอบในวัฏจักร GA มีดังนี้

1. ประชากร (Population) ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (Chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนของคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา

2. ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (Parents) กลุ่มของประชากรที่ได้ถูกคัดเลือกเพื่อไปเป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป (Next generation) ประชากรกลุ่มนี้จะเปรียบเสมือนกับเป็น“พ่อแม่” สำหรับใช้ในการสืบทอดสายพันธุ์ให้ลูกหลานต่อไป

3. สายพันธุ์ใหม่ (Offspring) หรือ “ลูกหลาน” เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อ ๆ กันในประชากรรุ่นถัดไป

## 2.6 ปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยทั่วไปนิยมใช้ HES ในการประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชัน เพื่อนำมาใช้ในการควบคุม และคำนวณความเร็วของมอเตอร์ อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปคือการประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชันโดยอ้างอิงจากจุดผ่านศูนย์กลางของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ โดยใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดัน หรือวงจรหาจุดผ่านศูนย์กลางของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับซึ่งจะต้องใช้วงจรเพิ่มเติมในการทำงาน และมีความยืดหยุ่นในช่วงการใช้งานของมอเตอร์ไม่มากนัก จึงมีแนวคิดในการใช้ซอฟต์แวร์ในการประมวลผลสัญญาณ โดยแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และใช้หลักการต่าง ๆ เพื่อประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ หรือใช้ตัวตั้งเกตุประมาณ

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับจากการวัดกระแสที่ไหลผ่านแต่ละเฟสของมอเตอร์โดยใช้วิธีการต่าง ๆ รวมถึงการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่สามารถนำแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วแต่ละเฟสของมอเตอร์โดยตรงในการประมาณค่าความเร็วโดยใช้ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นและนำมาหาความสัมพันธ์ของแต่ละฟังก์ชันเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างยืดหยุ่นในช่วงความเร็วต่าง ๆ ซึ่งมีผู้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Jianwen Shao, Dennis Nolan, and Thomas Hopkins (2002) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยตรงจากขั้วของมอเตอร์ทั้ง 3 ขั้ว โดยใช้ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสผ่านวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์โดยตรงในช่วงเวลาของเฟสที่ไม่ถูกเหนี่ยวนำแทนที่จะใช้วงจรรองความถี่ หลักการของกราวด์เสมือนนี้ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรรองความถี่รับทวนออก และสามารถใช้ได้กับช่วงความเร็วที่กว้างขึ้น

Malik E. Elbuluk, Liu Tong, and Iqbal Husain (2002) นำเสนอการประมาณตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ permanent-magnet synchronous ในชุดควบคุมของมอเตอร์ โดยใช้วิธีสร้างโมเดลอ้างอิงแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงการทำงานของมอเตอร์ที่กว้างขึ้น

Yoko Amano, Toshi Tsuji, Atsushi Takahashi, Shigeo Ouchi, Kyoji Hamatsu, and Masahiko Iijima (2003) นำเสนอวิธีการหาคอมมิเตชันฟังก์ชันเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้วงจรดิจิทัลเฟสล็อกกลุ๊ป สามารถใช้งานในช่วงความเร็วที่สูงขึ้น สามารถลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กได้ และสามารถประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชันขณะมอเตอร์หยุดหมุนได้ ทำให้ไม่เกิดการกระชากเมื่อมอเตอร์เริ่มทำงาน

Tae-Hyung Kim, Byung-Kuk Lee, and Mehrdad Ehsani (2003) นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่ใช้ตัวรับรู้ในช่วงความเร็วต่ำถึงความเร็วสูง โดยการหาฟังก์ชัน “Speed-independent Position” ซึ่งเรียกว่า  $G(\theta)$  ฟังก์ชัน เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดัน line-line ของมอเตอร์ ซึ่งมีทั้งหมด 6 โหมด เมื่อผ่านแรงดัน line-line และกระแสไฟฟ้าของเฟสเข้าสู่  $G(\theta)$  ฟังก์ชัน จะสามารถประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชันได้

Chang-Liang Xia and Wei Chen (2005) นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ความเร็วต่ำด้วยเครือข่ายประสาทเทียม ในงานวิจัยนี้ใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับจากกระแส และแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟส ซึ่งในความเร็วต่ำไม่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับได้โดยตรง และนำมาหาจุดผ่านศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับจะสามารถนำมาประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชัน และนำไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้

Tae-Sung Kim, Ji-Su Ryu, and Dong-Seok Hyun (2005) นำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยตัวสังเกตที่ไม่ทราบค่า โดยใช้ตัวสังเกต (observer) ในการประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับจากกระแส และแรงดันของแต่ละเฟสเพื่อนำมาประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชัน ซึ่งสามารถประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับในความเร็วต่ำได้

Jung-Sheng Wen, Chi-Hsu Wang, Ying-De Chang, and Ching-Cheng Teng (2008) นำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้ในความเร็วที่สูงกว่า 10,000 รอบต่อนาที โดยใช้พีชชีลลอจิก ควบคุมด้วยการอ่านแรงดันเฟสในขณะที่เฟสนั้นไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำโดยผ่านวงจร แบ่งแรงดันเข้ามาเป็นอินพุตของตัวควบคุมพีชชีลลอจิกในการควบคุมความเร็ว

YAN Wei-Sheng, LIN Hai, LI Hong, and Yan Wei (2009) นำเสนอวิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้ตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ และความเร็วของมอเตอร์จากกระแส และแรงดันแต่ละเฟส เมื่อประมาณความเร็วและทราบกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสสามารถนำไปประมาณแรงบิดของมอเตอร์ และนำแรงบิดที่ประมาณได้ไปควบคุมแรงบิดของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลลอจิก

## 2.7 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ใช้วงจรในการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับหรือสร้างซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการประมาณ ทำให้การประมาณมีความยืดหยุ่นในช่วงการทำงานกว้างมากขึ้น และสามารถลดวงจรที่ต้องเพิ่มเข้ามาได้อีกด้วย

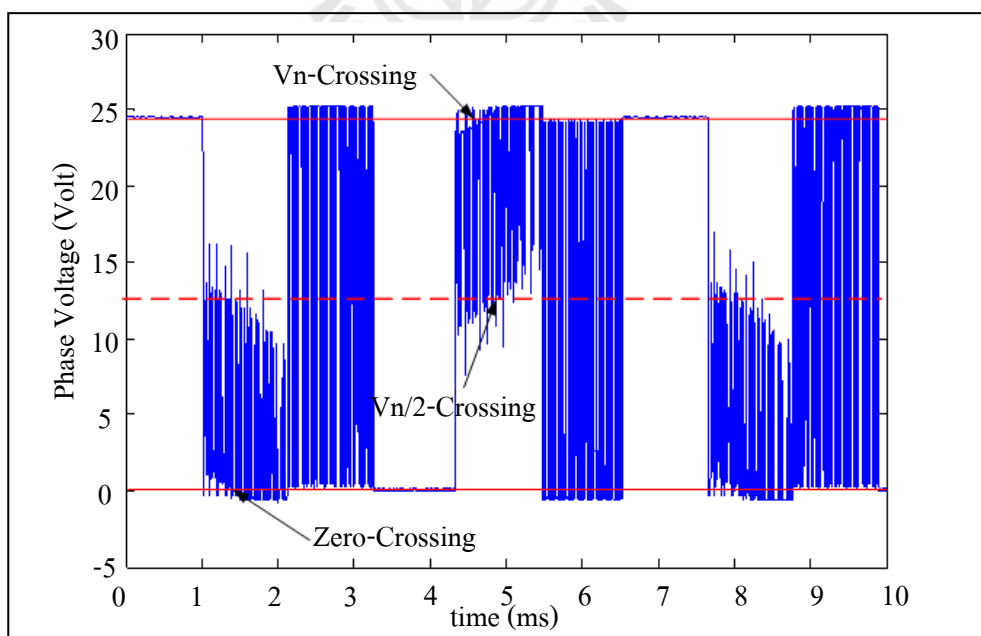


### บทที่ 3

## วิธีการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส แบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้

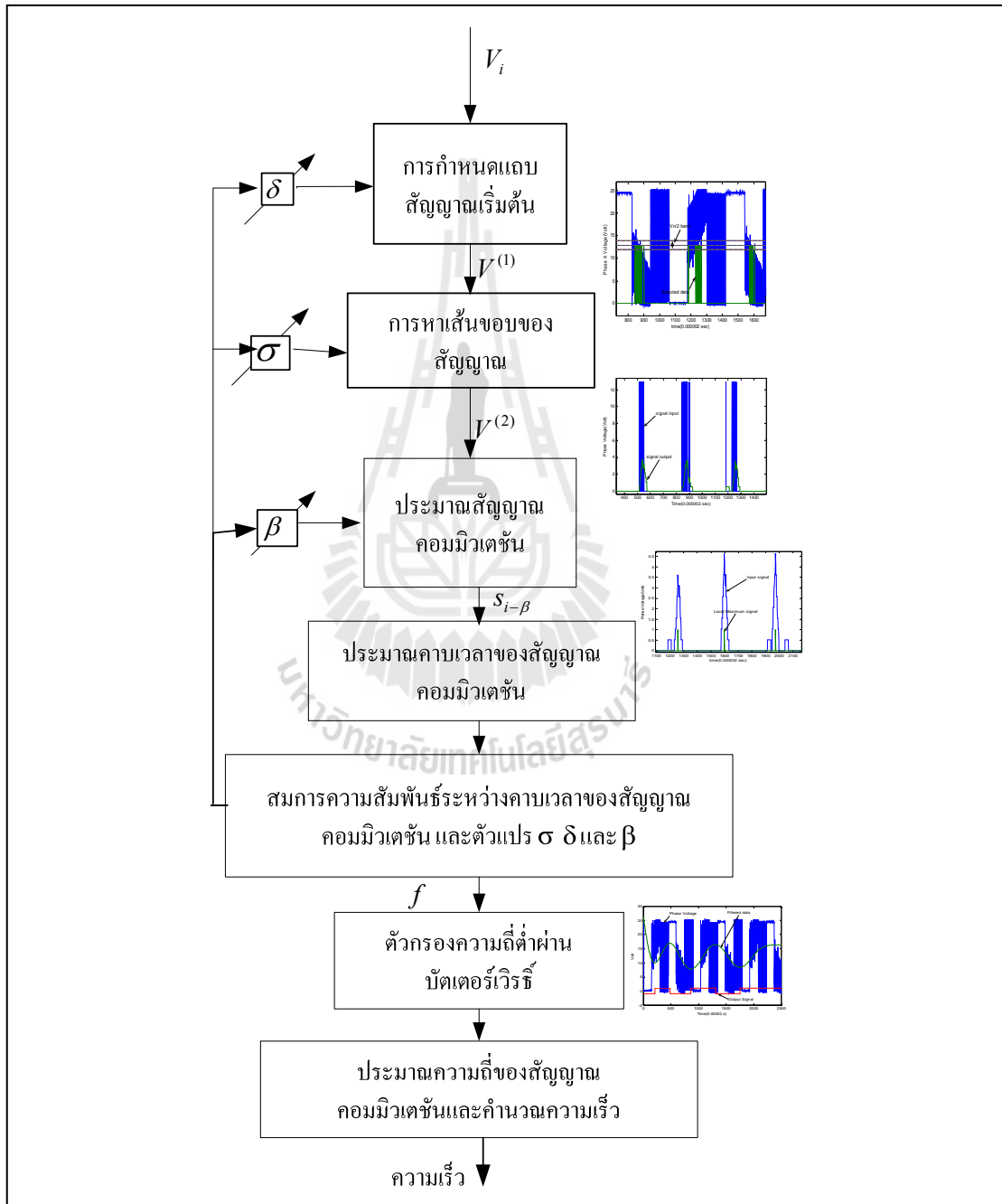
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีในการประมาณความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้ ซึ่งจะอธิบายการทำงานและหลักการในแต่ละขั้นตอนของการประมาณความเร็วของมอเตอร์โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอนคือ การประมาณความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชัน โดยประมาณตามขั้นตอนที่กำหนดขึ้น และนำช่วงความถี่ที่ประมาณได้มาเป็นความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อประมาณความเร็วที่ถูกต้องขึ้นอีกรอบหนึ่ง

เมื่อทราบว่าจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับในแต่ละเฟสสำหรับสัญญาณ HES อยู่ 30 องศาเมื่อพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 3.1 สามารถสร้างฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาตำแหน่งของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับซึ่งมีตำแหน่งเดียวกับจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ได้



รูปที่ 3.1 จุดผ่านศูนย์ จุดผ่านกึ่งหนึ่งแรงของดันที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ และจุดผ่านแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แต่ละเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

กระบวนการในการหาจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อทราบตำแหน่งของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ จะสามารถนำมาประมาณความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันเพื่อนำไปประมาณความเร็วของมอเตอร์ต่อไปได้



รูปที่ 3.2 ลำดับวิธีในการประมาณความเร็วของมอเตอร์

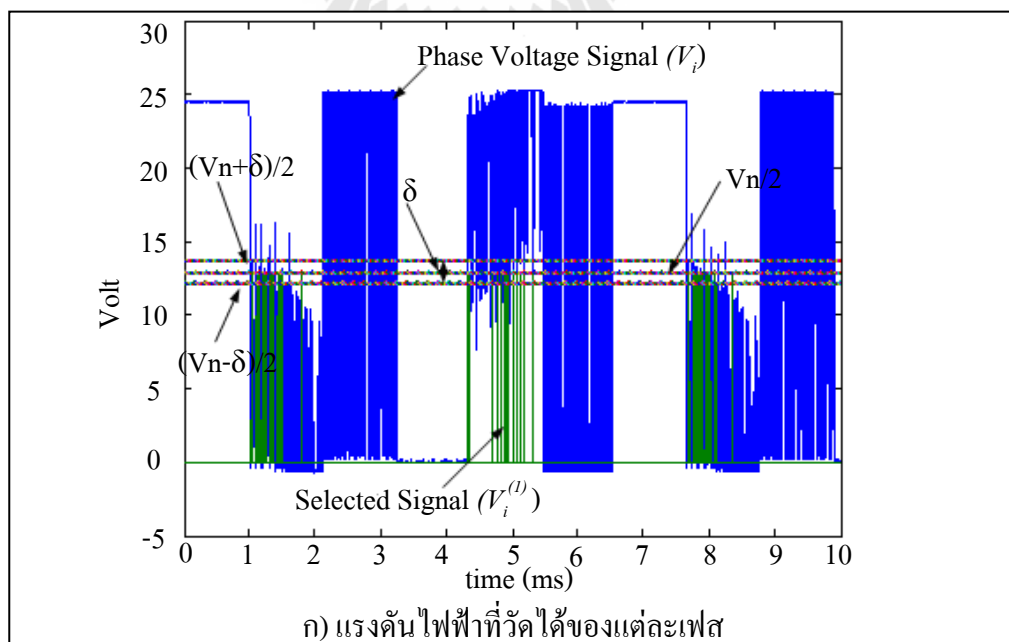
### 3.1 การกำหนดแถบสัญญาณเริ่มต้น

เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ อยู่ในช่วงกึ่งหนึ่งของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ ดังนั้นในการประมาณค่าจึงต้องกำหนดแถบสัญญาณเริ่มต้น เพื่อเลือกข้อมูลที่ต้องการในการประมาณความเร็ว ด้วยสมการ (3.1)

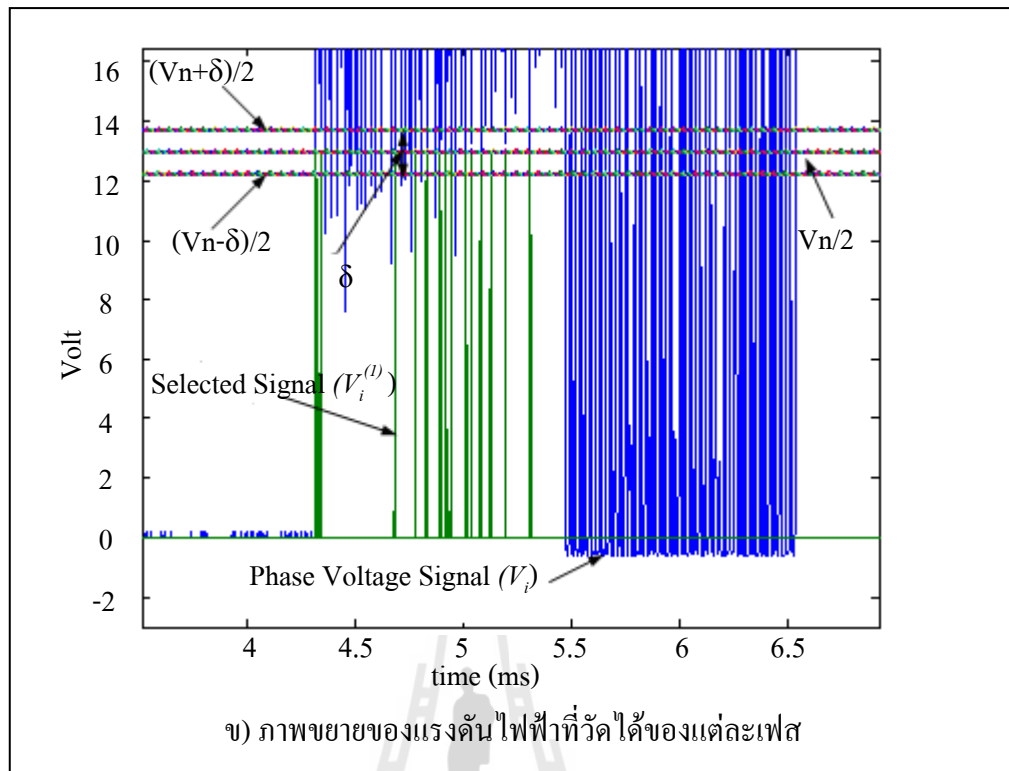
$$V_i^{(1)} = \begin{cases} \frac{V_n}{2}, & \frac{V_n}{2} - \frac{\delta}{2} \leq V_i \leq \frac{V_n}{2} + \frac{\delta}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.1)$$

เมื่อ $\delta$	คือ ความกว้างของขอบเขตข้อมูลที่ต้องการเลือก
$V_i$	คือ แรงดันเฟส ณ ตำแหน่งที่ $i$
$V_n$	คือ แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์
$V_i^{(1)}$	คือ แรงดันเฟสที่ผ่านการเลือก ณ ตำแหน่งที่ $i$

เมื่อเลือกข้อมูลในช่วงที่กำหนดแถบสัญญาณเริ่มต้นแล้ว จะได้ข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยจำนวนสัญญาณที่ผ่านการเลือกจะขึ้นอยู่กับความกว้างของขอบเขตข้อมูล ( $\delta$ ) ที่กำหนดเริ่มต้น



รูปที่ 3.3 แรงดันที่วัดได้ของแต่ละเฟส และข้อมูลที่ผ่านการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้น



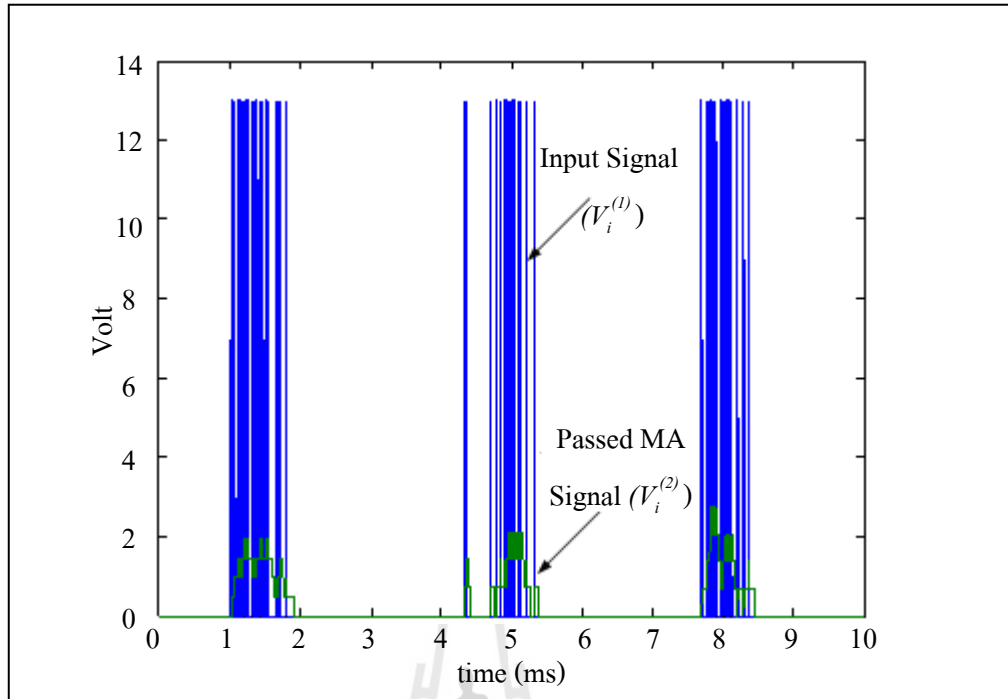
รูปที่ 3.3 แรงดันที่วัดได้ของแต่ละเฟส และข้อมูลที่ผ่านการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้น (ต่อ)

### 3.2 การคำนวณหาเส้นขอบของสัญญาณที่ผ่านการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้น

เมื่อได้สัญญาณที่ผ่านการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้นแล้ว นำมาคำนวณหาเส้นขอบโดยใช้วิธี Moving Average หรือ MA ดังแสดงในสมการที่ (3.2) ทำให้ทราบถึงเส้นขอบของสัญญาณที่ผ่านการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้น ส่วนที่มีข้อมูลอยู่นานจะปรากฏเด่นชัดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.4

$$V_i^{(2)} = \frac{\sum_{j=i-\sigma}^{i-1} V_j^{(1)}}{\sigma} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $V_j^{(1)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสที่ผ่านการเลือก ณ ตำแหน่งที่  $j$   
 $V_i^{(2)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสที่ผ่านการกรอง ณ ตำแหน่งที่  $i$   
 $\sigma$  คือ ขนาดของหน้าต่างในการทำ MA



รูปที่ 3.4 ข้อมูลที่ผ่านการเลือกด้วยแถบสัญญาณเริ่มต้นและสัญญาณที่ผ่านการทำ MA

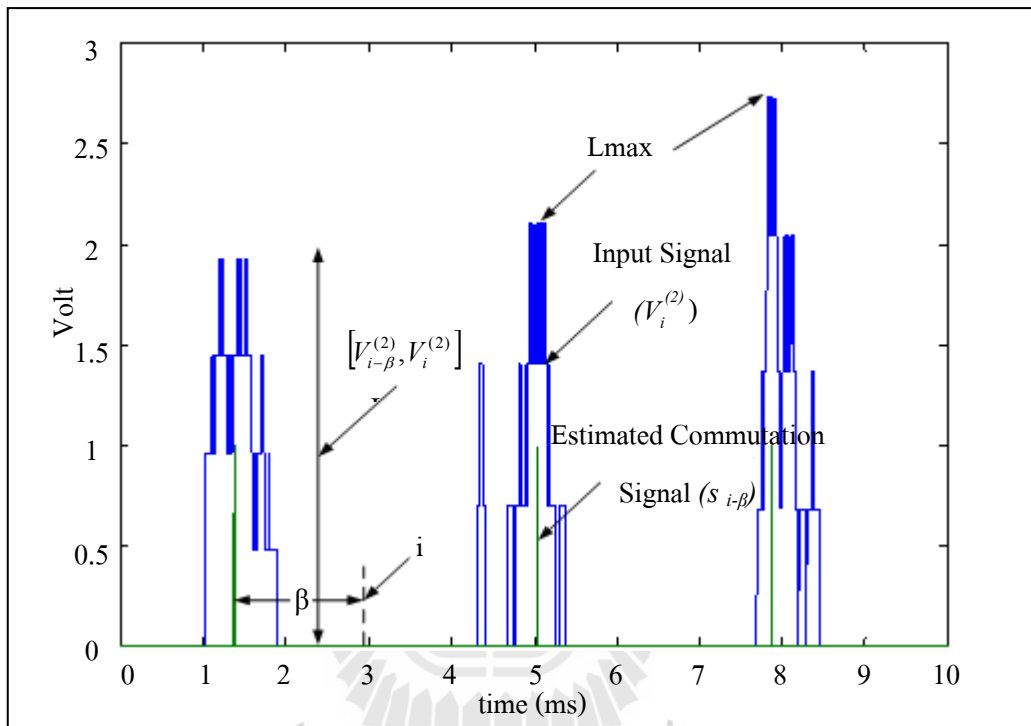
### 3.3 การประมาณสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส

เมื่อได้ข้อมูลที่อยู่ในช่วงแถบสัญญาณเริ่มต้นและผ่านการทำ MA แล้วจะทำให้บริเวณที่มีความหนาแน่นของข้อมูลที่ผ่านจุดกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสเด่นชัด ดังนั้นเมื่อทำการหาค่าสูงสุดในบริเวณดังกล่าว จะสามารถหาตำแหน่งจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ หรือค่าโดยประมาณของสัญญาณคอมมิวเตชันได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยสมการ (3.3) และ (3.4)

$$L \max_i = \begin{cases} V_i^{(2)} & , V_i^{(2)} > L \max_{i-1} \\ L \max_i & , otherwise \end{cases} \quad (3.3)$$

$$s_{i-\beta} = \begin{cases} 1 & , L \max_i \in [V_{i-\beta}^{(2)}, V_i^{(2)}] \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (3.4)$$

เมื่อ	$Lmax_i$	คือ ค่าสูงสุดในแต่ละบริเวณที่ต้องการค้นหา
	$s_{i-\beta}$	คือ ตำแหน่งจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ตำแหน่งที่ $i-\beta$
	$V_i^{(2)}$	คือ แรงดันเฟสที่ผ่านการทำ MA ณ ตำแหน่งที่ $i$
	$\beta$	คือ ช่วงเวลาซ้อนหลังจากตำแหน่งที่ $i$



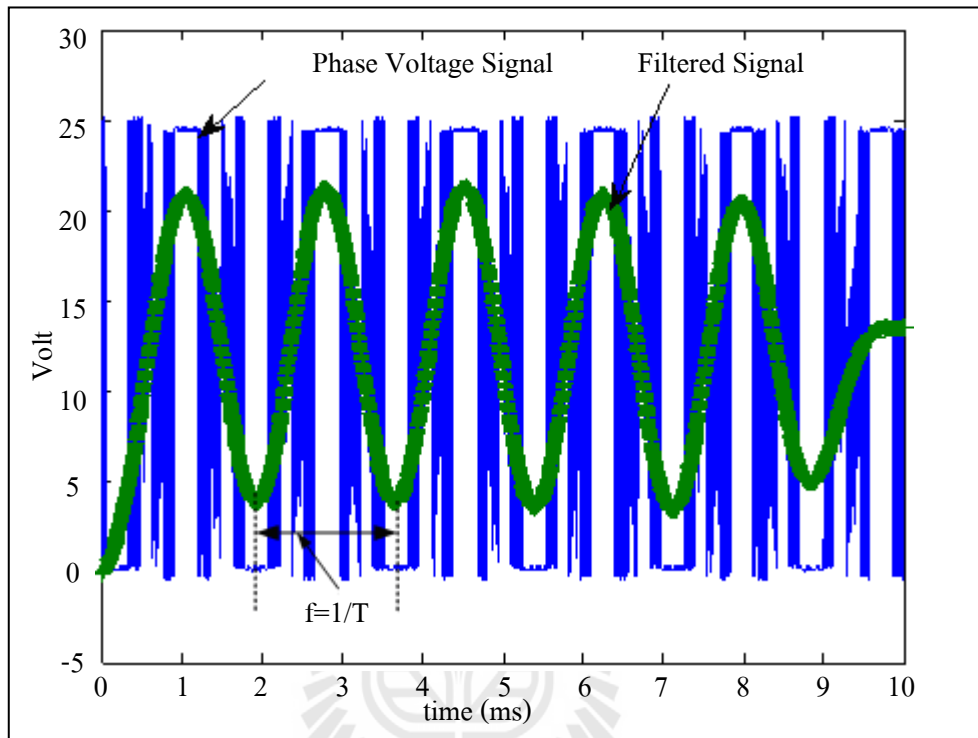
รูปที่ 3.5 ข้อมูลที่ผ่านการทำ MA และสัญญาณคอมมิวเตชันจากการประมาณ

เมื่อประมาณหาตำแหน่งจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์แต่ละเฟสได้แล้ว เราสามารถนำมาคำนวณความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันได้ และสามารถนำความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันมาคำนวณความเร็วของมอเตอร์ต่อไปได้

### 3.4 การประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

เนื่องจากแรงดันเฟสที่อ่านเข้ามาจากขั้วของมอเตอร์มีย่านความถี่ที่ไม่ต้องการเข้ามาในระบบ ทำให้การประมาณความเร็วไม่แม่นยำ ดังนั้นจึงใช้ความถี่ของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ หรือค่าประมาณความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตเตอร์ที่ประมาณได้มา เป็นความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท

เพื่อหาความถี่ของแรงดันเหนี่ยวนำกลับและนำมาประมาณความเร็วของมอเตอร์ที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านจะให้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ก่อนและหลังผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

### 3.5 การคำนวณความเร็ว

เมื่อประมาณความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันในแต่ละเฟสแล้วสามารถนำความถี่มาคำนวณเพื่อประมาณความเร็วของมอเตอร์ได้ตามสมการ (3.5)

$$n = \frac{f \times 120}{Z_{Pol}} \quad (3.5)$$

เมื่อ	$n$	คือ ความเร็วของมอเตอร์ (รอบต่อวินาที)
	$f$	คือ ความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันในแต่ละเฟส (Hz)
	$Z_{Pol}$	คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (poles)

### 3.6 การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชัน

ในการทดลองแต่ละย่านความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชัน หรือย่านความเร็วของมอเตอร์ มีค่าของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ในแต่ละขั้นตอนที่ต่างกันไปดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ของแต่ละระดับความเร็วเพื่อใช้ในการประมาณค่าในช่วงความเร็วที่ต้องการ

#### 3.6.1 การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาโดยประมาณของสัญญาณคอมมิวเตชันด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม

การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม (Polynomial curve fitting) เป็นการหาความสัมพันธ์ของอินพุต และเอาต์พุตในรูปแบบของสมการพหุนามซึ่งมีระดับชั้นต่าง ๆ ซึ่งนำการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนามมาหาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันในแต่ละเฟส ในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชัน “polyfit” ของ MATLAB ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม

$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} \dots + p_nx + p_{n+1} \quad (3.6)$$

ดังนั้นเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันในแต่ละเฟส จะได้สมการพหุนามความสัมพันธ์ 3 สมการ สำหรับใช้ในการประมาณความเร็วของมอเตอร์ในช่วงความเร็วที่ต้องการ

#### 3.6.2 การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ คาบเวลาโดยประมาณของสัญญาณคอมมิวเตชันด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) หรือ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ

ในงานวิจัยใช้ GA มาประมาณ สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันในแต่ละเฟสโดยใช้ GATool ในโปรแกรม MATLAB ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม (3.6) ทั้ง 3 สมการ



### 3.7 สรุป

ในการประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่ใช้ตัวรับรู้ วิธีที่กำหนดขึ้นมาตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวถึงในบทนี้ ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ คือการประมาณความเร็ว หรือความถี่ของสัญญาณที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ด้วยขั้นตอนที่กำหนดขึ้นเพื่อประมาณสัญญาณคอมมิวเตชันในแต่ละเฟส แล้วนำความถี่ของสัญญาณที่ได้มาเป็นช่วงความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ทซ์ เพื่อกรองเอาความถี่ของสัญญาณแรงดันเหนี่ยวนำกลับออกมาทำการประมาณสัญญาณคอมมิวเตชันอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งทำให้มีความถูกต้องของความถี่ของสัญญาณมากยิ่งขึ้น และการประมาณความเร็วจะมีความผิดพลาดน้อยลง



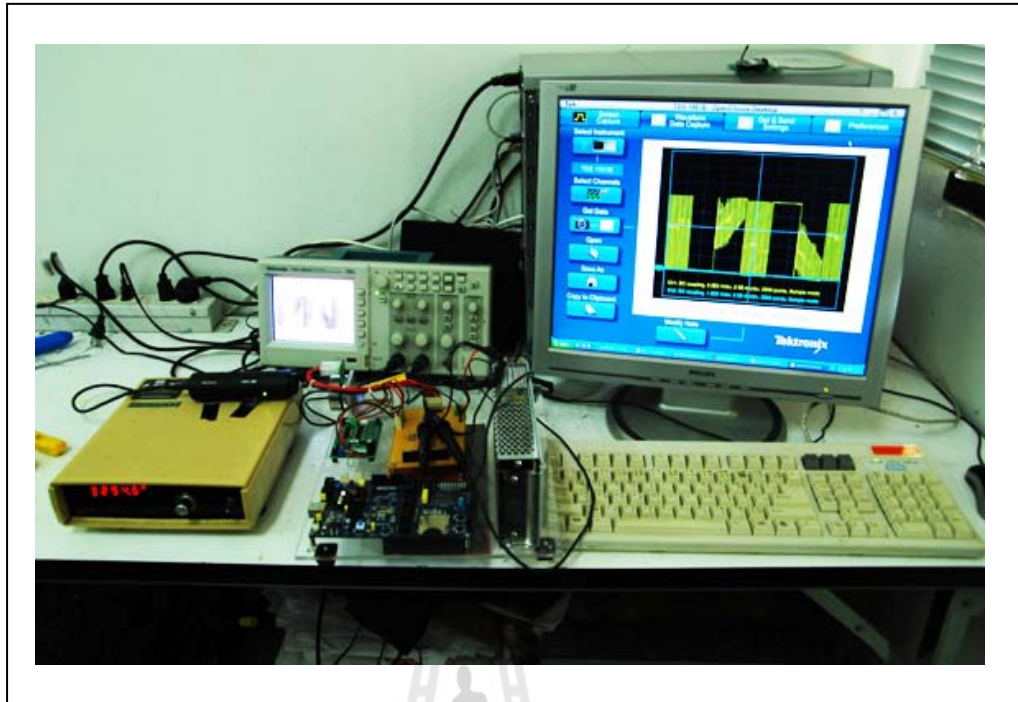
## บทที่ 4

### การทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเพื่อประมาณความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เครื่องมือในการวัดความเร็ว การวัดแรงดันไฟฟ้าจากขั้วของมอเตอร์ การแปลงสัญญาณที่อ่านได้จากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ การจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการทดลอง การวัดและประมวลผลในขั้นตอนต่าง ๆ ผลของการทดลองในแต่ละขั้นตอนของแต่ละช่วงความเร็ว ความผิดพลาดในการประมาณความเร็ว รวมไปถึงการสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองในการประมาณความเร็วของมอเตอร์

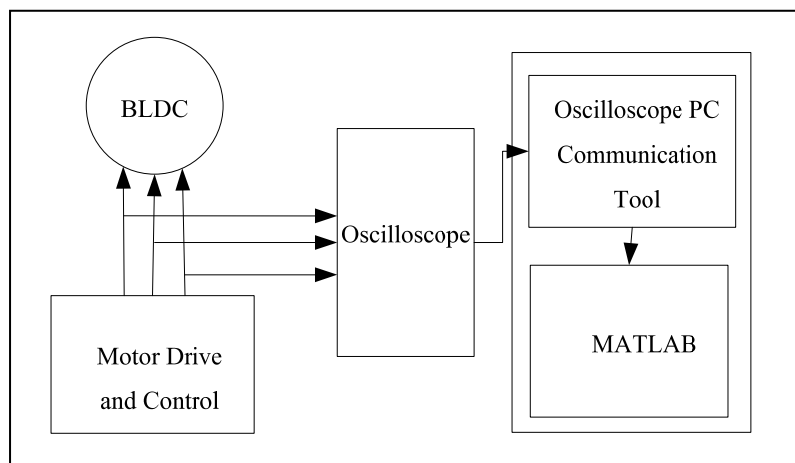
#### 4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านรุ่น EC 45 Flat motor 50 วัตต์ ของบริษัท MAXON ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มี 16 โพล 3 เฟส ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ มีความเร็วรอบโดยไม่มีแรงบิดภายนอกประมาณ 6,800 รอบต่อนาที ใช้วงจรขับมอเตอร์ 1-Q-EC Amplifier AECS 35/3 ของบริษัท MAXON รองรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 โวลต์ และทนกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องได้ 5 แอมป์ การวัดความเร็วของมอเตอร์นั้นใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบแบบดิจิทัลรุ่น MANCHESTER M7 9RH ENGLAND ของบริษัท CUSSONS TECHNOLOGY โดยทำการวัดแรงดันไฟฟ้าจากขั้วของแต่ละเฟสของมอเตอร์ด้วยดิจิทัลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope) รุ่น Tektronix TDS 1001B 40 MHz เพื่อเก็บข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าจากแต่ละเฟสของมอเตอร์ และแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมาณความเร็วด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประมาณความเร็ว

เพื่อให้การประมาณค่าเป็นไปโดยไม่มีตัวรับรู้ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ได้จึงเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟส ซึ่งสามารถวัดค่าได้โดยตรงจากขั้วของมอเตอร์ เนื่องจากในการทดลองประมาณความเร็วนั้น ต้องเก็บข้อมูลเพื่อนำมาทำการทดลอง ดังนั้นจึงใช้ฮอสซิลโลสโคปมาเป็นเครื่องมือในการวัดแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เพื่อแปลงข้อมูลและส่งไปเก็บยังคอมพิวเตอร์ ผ่านทางโปรแกรม Open Choice Oscilloscope PC Communication Tool ต่อจากนั้นทำการทดสอบการประมาณความเร็วโดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยทำการอ่านข้อมูลของแต่ละไฟล์และนำมาประมาณความเร็วดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพการอ่านแรงดันไฟฟ้าจากแต่ละเฟสของมอเตอร์และการประมาณความเร็ว

#### 4.2 การวัดความเร็วของมอเตอร์

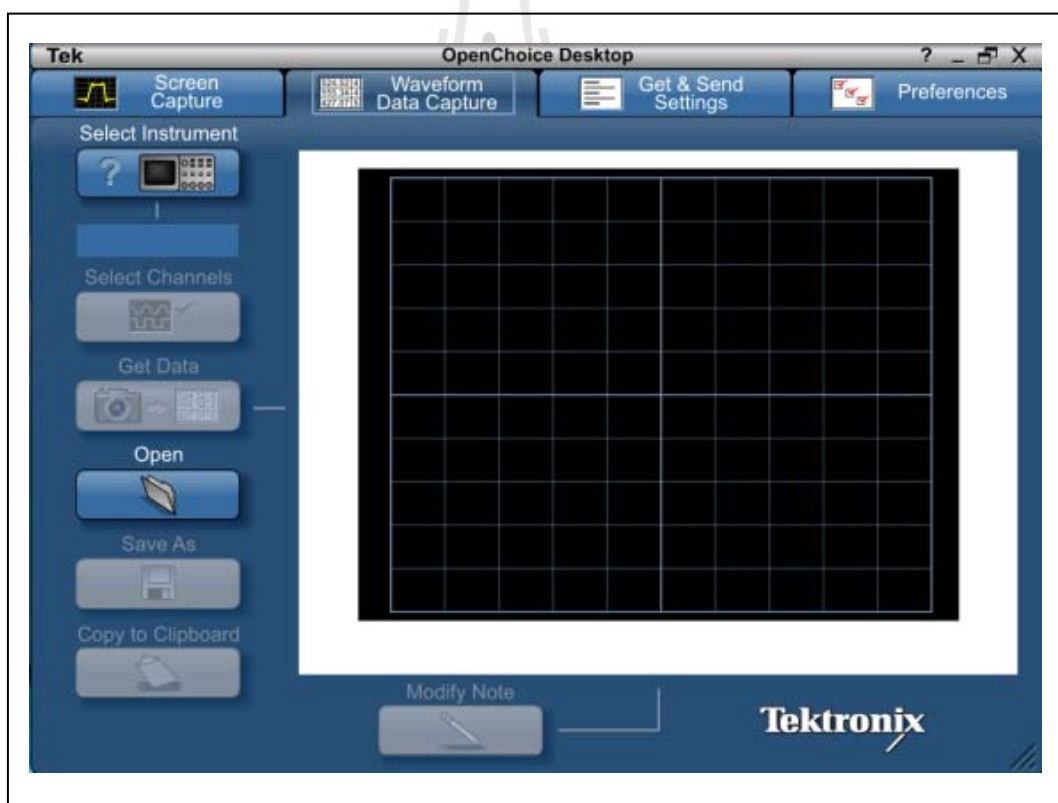
ในการวัดความเร็วของมอเตอร์นั้นใช้เครื่องมือรุ่น MANCHESTER M7 9RH ENGLAND ของบริษัท CUSSONS TECHNOLOGY ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดความเร็วแบบดิจิทัล โดยติดตั้งแถบสะท้อนแสงที่โรเตอร์ของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนส่วนที่ติดแถบสะท้อนแสงผ่านแสงที่เครื่องวัดความเร็วส่งออกไป แสงจะสะท้อนกลับมายังเซ็นเซอร์ของเครื่องวัดความเร็ว เครื่องวัดความเร็วจะอ่านและแปลงเป็นความเร็วของมอเตอร์ เครื่องวัดความเร็วมอเตอร์ที่นำมาใช้สามารถอ่านความเร็วได้เมื่อสถานะคงตัว (Steady State) เท่านั้น



รูปที่ 4.3 เครื่องวัดความเร็วรุ่น MANCHESTER M7 9RH ENGLAND

### 4.3 การวัดแรงดันไฟฟ้าจากแต่ละเฟสของมอเตอร์และการแปลงสัญญาณ

การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์แต่ละเฟสนั้น ทำการวัดโดยอ้างอิงกับกราวด์ของระบบโดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) วัดข้อมูลแล้วอ่านเข้ามาทางพอร์ต USB ด้วยโปรแกรม Open Choice Oscilloscope PC Communication Tool ของออสซิลโลสโคป ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่วัดเข้ามายังออสซิลโลสโคปจะถูกแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ที่ความถี่ในการแปลงสัญญาณ 250 kHz เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียด และจำนวนข้อมูลที่มีมากพอในการนำไปประมาณความเร็ว ในช่วงความเร็วที่ต้องการ ข้อมูลทั้งหมดในการวัดแต่ละครั้งจะถูกจัดเก็บอยู่ในรูปแบบไฟล์ “.csv” ซึ่งเป็นไฟล์ข้อมูลที่ขึ้นด้วยเครื่องหมาย “;” ดังนั้นในการประมวลผลสัญญาณจะอ่านค่าจากไฟล์ที่เก็บข้อมูลของสัญญาณเอาไว้ขึ้นมาประมวลผล



รูปที่ 4.4 โปรแกรม Open Choice Oscilloscope PC Communication Tool

#### 4.4 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในแต่ละฟังก์ชันกับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ของแต่ละฟังก์ชันกับความถี่โดยประมาณของสัญญาณคอมมิวเตชันในแต่ละระดับความเร็วได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการทดลองในแต่ละย่านความถี่ หรือย่านความเร็วจะมีค่าตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ของแต่ละช่วงความเร็วที่ต่างกัน ดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ของแต่ละระดับความเร็ว เพื่อใช้ในการประมาณความเร็วตลอดช่วงการทำงานของมอเตอร์

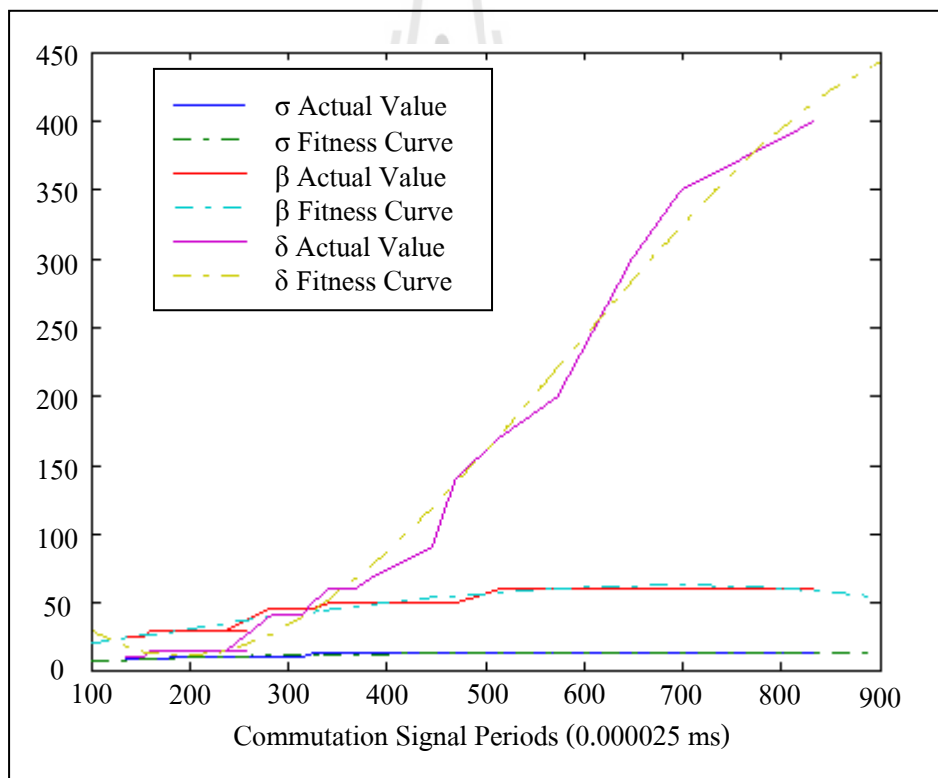
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างค่าตัวแปรของแต่ละฟังก์ชันในการประมาณความเร็ว คาบเวลา

โดยประมาณของสัญญาณคอมมิวเตชัน ความเร็วของมอเตอร์  
และความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

คาบของสัญญาณคอมมิวเตชัน (x 0.000025 ms)	$\sigma$	$\delta$	$\beta$	ความเร็ว (rpm)	ความถี่ตัดออก (Hz)
391	12	50	70	2,386	500
368	12	50	60	2,523	550
324	12	45	50	2,874	550
303	10	45	40	3,121	600
282	10	45	40	3,294	600
268	10	30	15	3,464	650
222	10	30	15	4,169	700
218	10	30	15	4,249	750
215	10	30	15	4,333	750
201	10	30	15	4,600	750
193	10	30	15	4,836	850
185	10	30	15	4,975	900
181	10	30	15	5,145	900
169	8	30	15	5,486	1,000
152	8	25	10	6,040	1,150
143	8	25	10	6,454	1,250

#### 4.4.1 การประมาณสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส ด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม

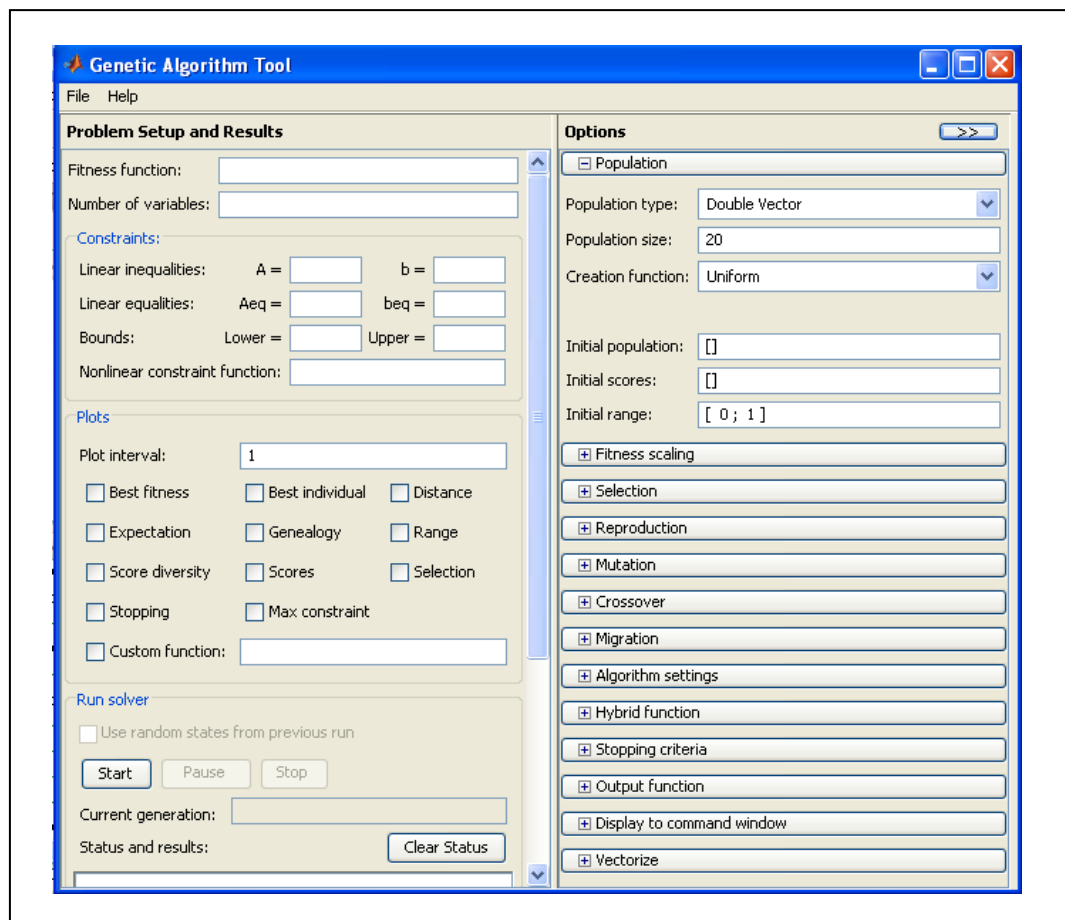
ในการประมาณสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชัน ด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม (Polynomial curve fitting) จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการเชิงพหุนามของความสัมพันธ์ 3 สมการ ในการนำไปประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์ในช่วงความเร็วที่ต้องการโดยใช้ฟังก์ชัน “polyfit” ของโปรแกรม MATLAB เพื่อค้นหาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามทั้ง 3 สมการ โดยใช้ข้อมูลความสัมพันธ์จากตารางที่ 4.1 ซึ่งจะได้เส้นโค้งค่าความเหมาะสม (Fitness curve) ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส ด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม

#### 4.4.2 การประมาณสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $\sigma$ $\delta$ และ $\beta$ กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส ด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม

เงินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) หรือ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ

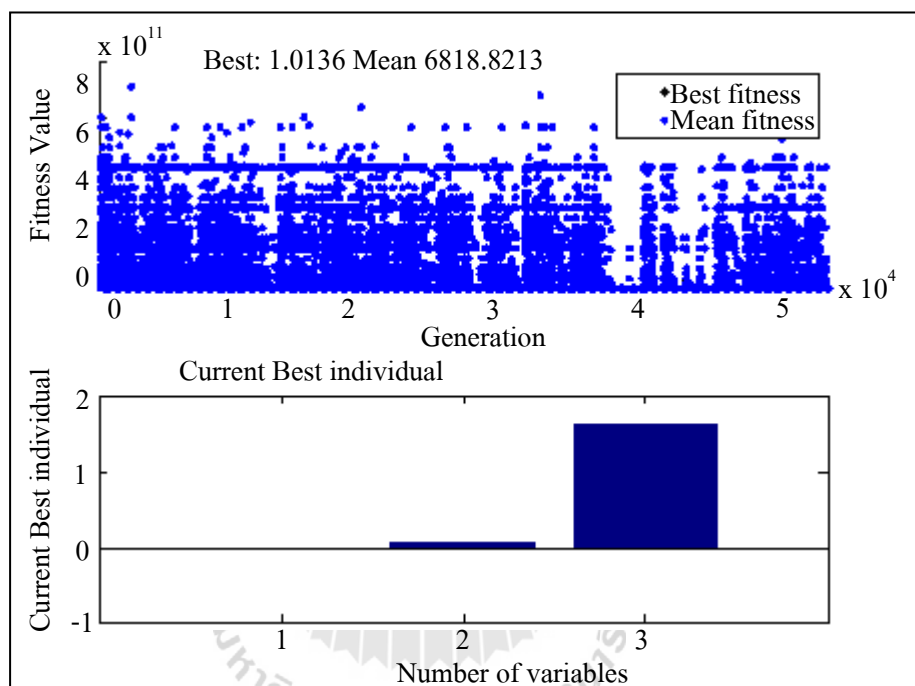


รูปที่ 4.6 GA Tool ของโปรแกรม MATLAB

ในงานวิจัยนี้ใช้ GA มาประมาณสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันโดยใช้ GATool ของโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.6 ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามทั้ง 3 สมการ โดยใช้ข้อมูลความสัมพันธ์จากตารางที่ 4.1 ฟังก์ชันจุดมุ่งหมายของแต่ละตัวแปรในการค้นหา

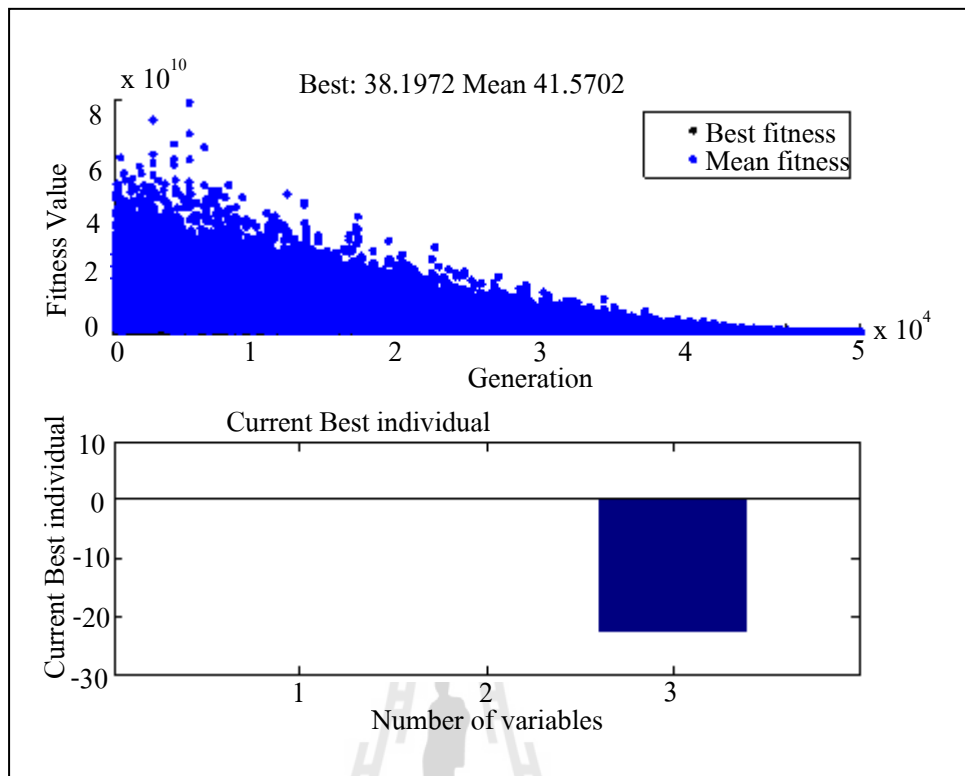


โดยใช้การคำนวณค่าผิดพลาดด้วยวิธีค่ากำลังสองเฉลี่ย และกำหนดจำนวนประชากรของแต่ละรุ่นเป็น 100 ประชากร ขอบในการค้นหากำหนดเป็น  $[-20 \ -20 \ -20]$  ถึง  $[20 \ 20 \ 80]$  โดยทำการค้นหาประมาณ 50,000 รุ่นเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้ค่าที่ได้ตอบสนองฟังก์ชันจุดมุ่งหมายมากที่สุด หรือค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์ดังรูปที่ 4.7 4.8 และ 4.9 เส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 4.10



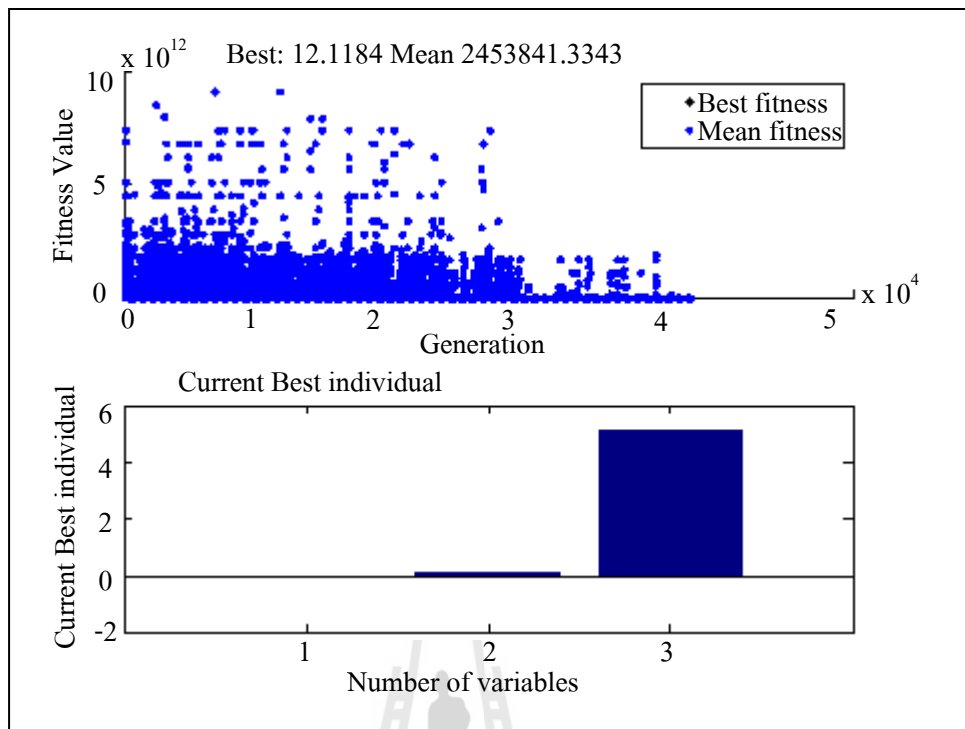
รูปที่ 4.7 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย และค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool

จากรูปที่ 4.7 กราฟบนแสดงค่าที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยของผลของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\sigma$  ในการค้นหาคำตอบของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$  กับคาบของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้นค่าที่ได้จะเข้าสู่ศูนย์ ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่ต้องการหาเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องที่สุด ซึ่งแสดงอยู่ในกราฟล่างของรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\delta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool

จากรูปที่ 4.8 กราฟบนแสดงค่าที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยของผลของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\delta$  ในการค้นหาคำตอบของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\delta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อจำนวนรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้นค่าที่ได้จะลู่เข้าสู่ศูนย์ ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่ต้องการหาเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องที่สุดซึ่งแสดงอยู่ในกราฟล่างของรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.9 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool

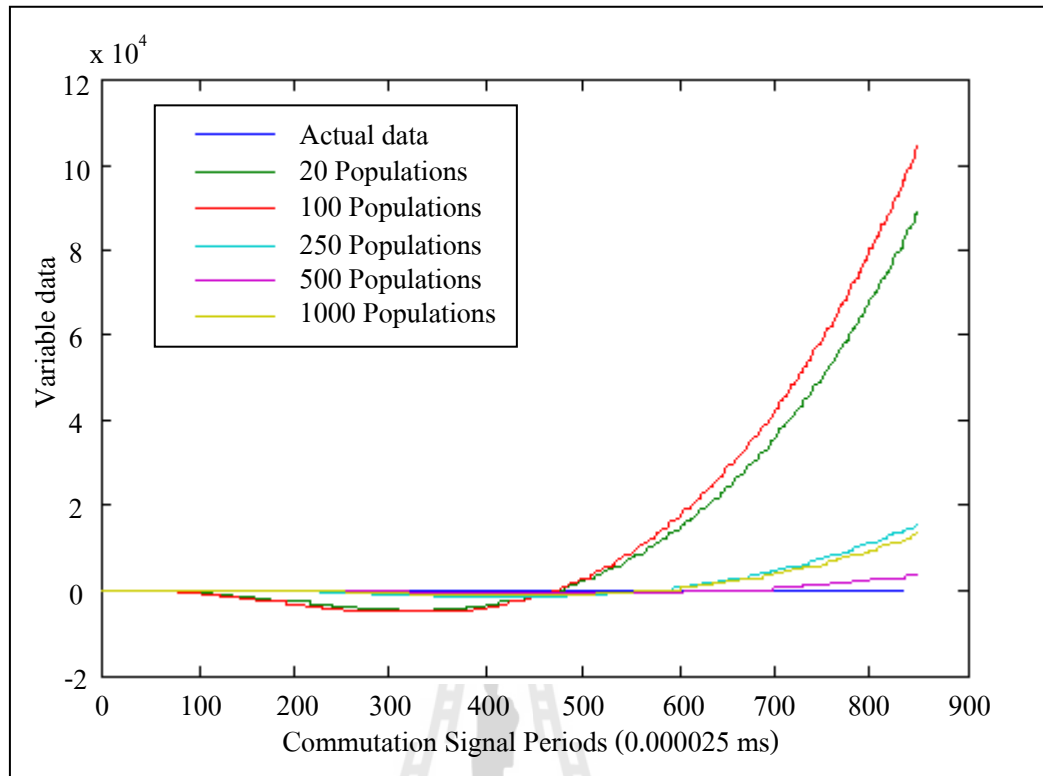
จากรูปที่ 4.9 กราฟบนแสดงค่าที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยของผลของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\beta$  ในการค้นหาคำตอบของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\beta$  กับคาบของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATool ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนรุ่นของประชากรเพิ่มขึ้น ค่าที่ได้จะเข้าสู่สู่ศูนย์ ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่ต้องการหา เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องที่สุดซึ่งแสดงอยู่ในกราฟล่างของรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรในแต่ละรุ่นของ GA ต่อค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ในการค้นหาคำตอบของของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟส

จำนวนประชากร	$e_{\sigma}$	$e_{\delta}$	$e_{\beta}$
20	1,984	6,360	13,397
100	337	7,536	1,803
250	1,593	998	762
500	654	303	859
1,000	659	829	711

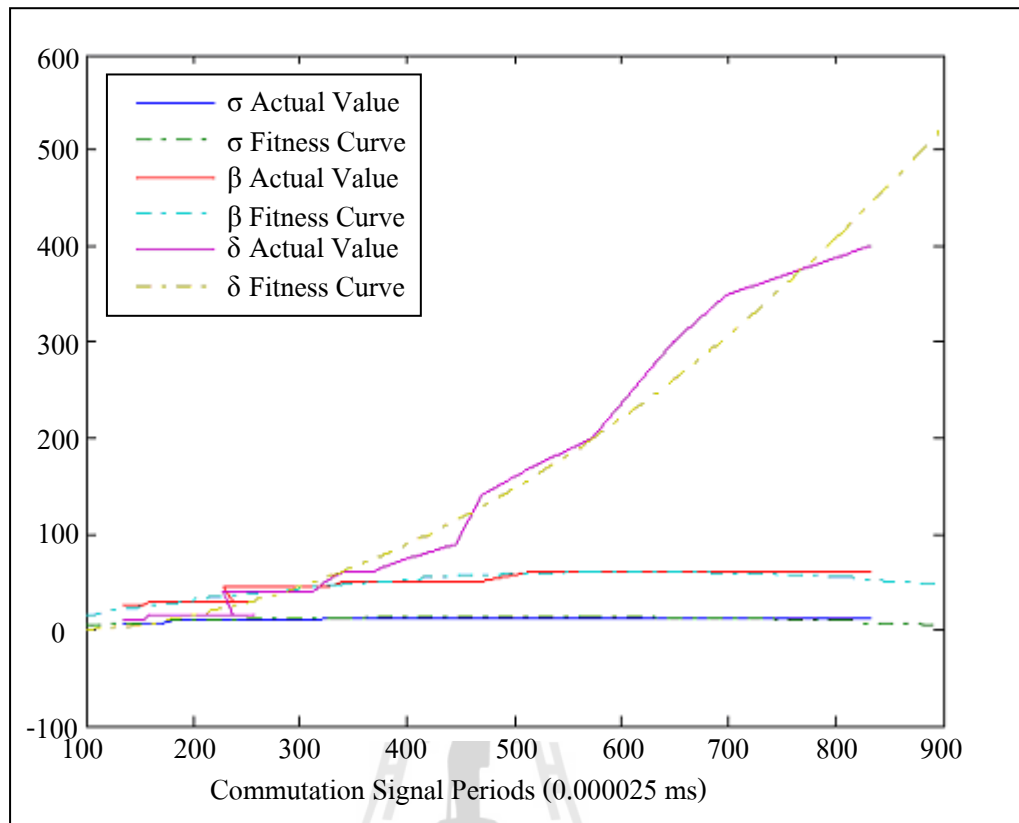
เมื่อ  $e_{\sigma}$  คือ ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\sigma$   
 $e_{\delta}$  คือ ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\delta$   
 $e_{\beta}$  คือ ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\beta$

ในการค้นหาคำตอบของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GATOOL นั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากร และจำนวนรุ่นของประชากรส่งผลให้ความเร็วในการค้นหาคำตอบ และค่าความเหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  นั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าเมื่อจำนวนประชากรในแต่ละรุ่นเพิ่มขึ้นค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยจะมีขนาดลดลง แต่เวลาในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้น ดังตัวอย่างเส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันดังแสดงในรูปที่ 4.10 ในการใช้งานเพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสมีความถูกต้องมากที่สุดจึงเลือกจำนวนประชากรของแต่ละรุ่น และจำนวนรุ่นที่มีค่ามาก ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลดลง



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างเส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรของ GA

เมื่อนำเส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันที่ประมาณได้ของแต่ละเฟส มาเปรียบเทียบกับค่าจริงดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเห็นได้ว่าคุณสมบัติของสมการพหุนามที่ประมาณได้นั้นมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าจริงของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชัน



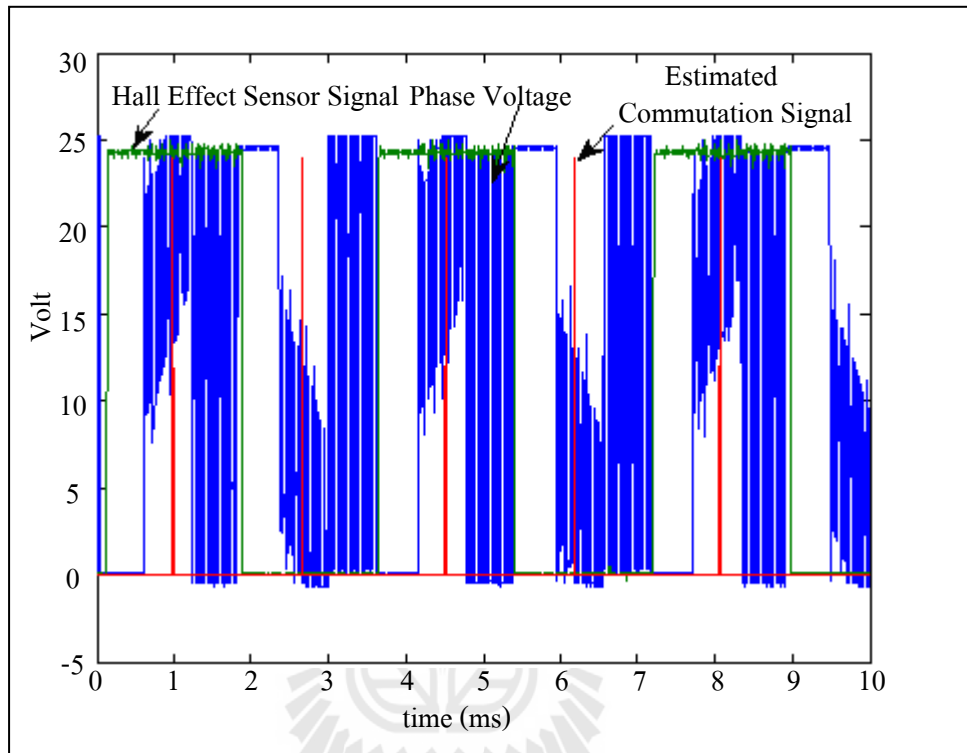
รูปที่ 4.11 เส้นโค้งค่าความเหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมมิวเตชันของแต่ละเฟสด้วย GA

สมการความสัมพันธ์ของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณก่อนหน้า  $T_{i-1}$  เป็นไปดังสมการ (4.1)

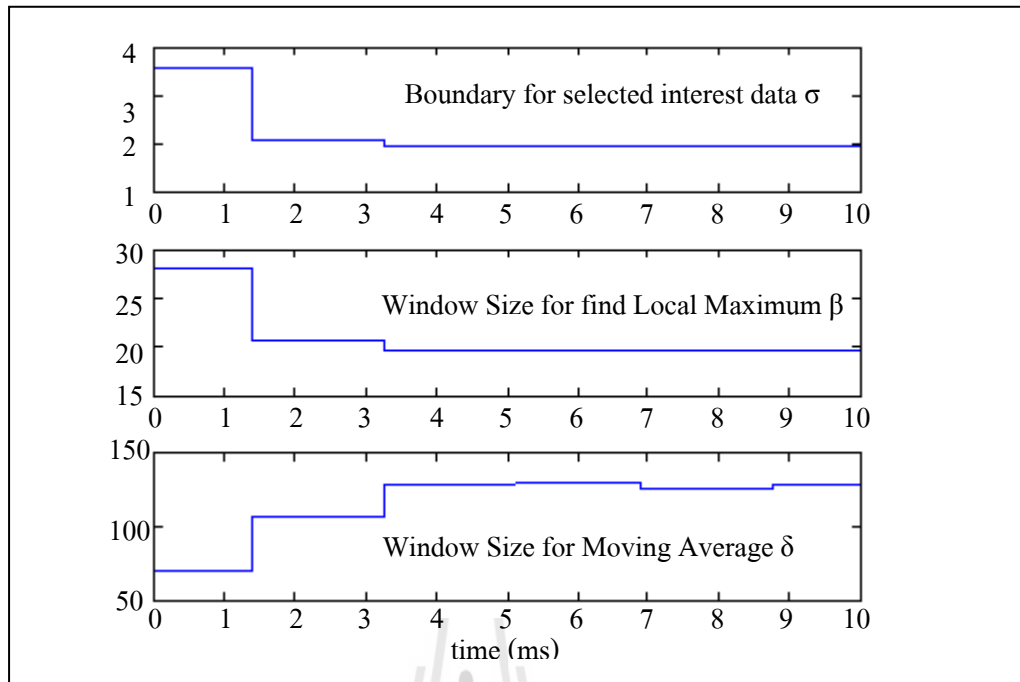
$$\begin{bmatrix} \sigma \\ \delta \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0192 & 5.0974 \\ 0.0002 & -0.0894 & 35.2124 \\ 0.0004 & 0.0802 & 58.6711 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i-1}^2 \\ T_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

#### 4.5 การทดสอบการประมาณความเร็วของมอเตอร์

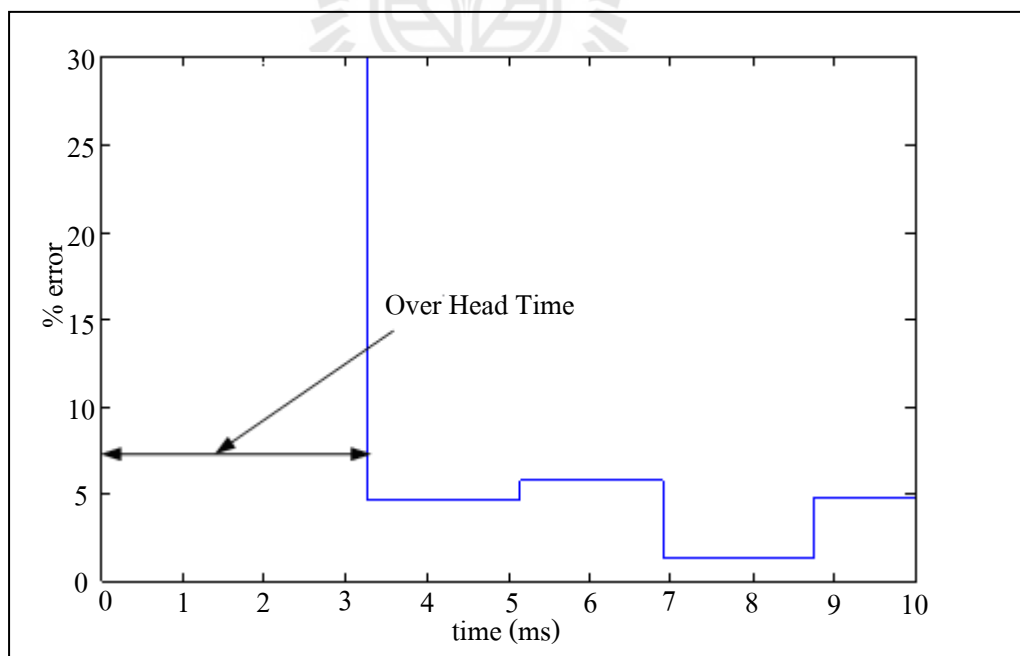
เมื่อทำการทดสอบการประมาณความเร็วของมอเตอร์ด้วยวิธีการตามขั้นตอนที่กล่าวมานั้น ผลที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 4.12 สัญญาณ HES แรงดันเฟสและสัญญาณที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที



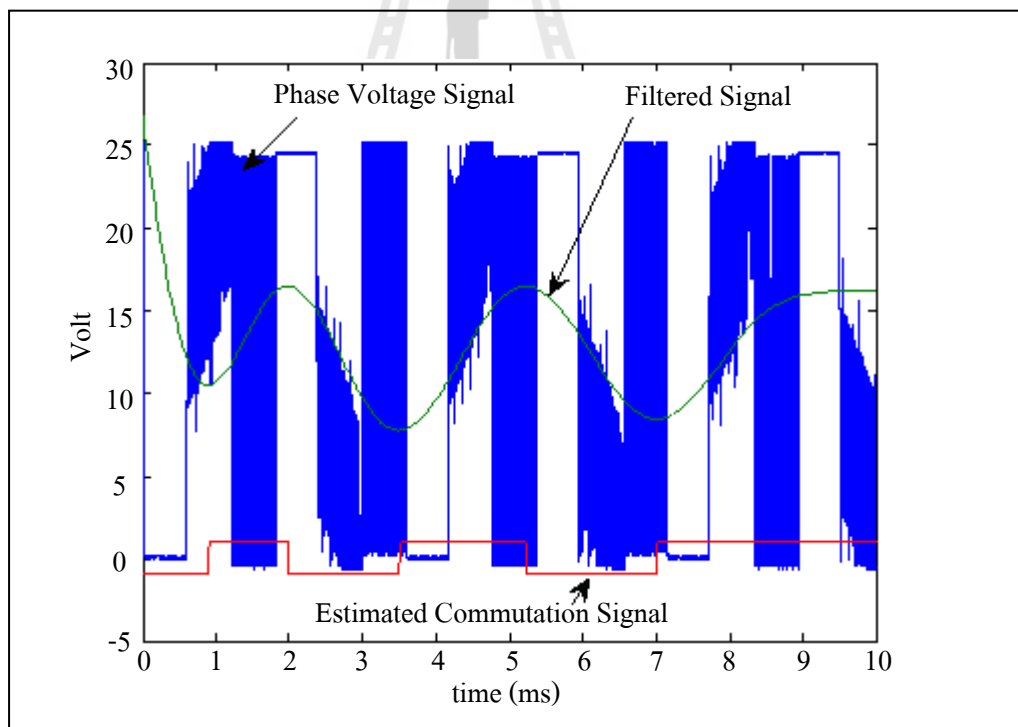
รูปที่ 4.13 การปรับตัวของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที



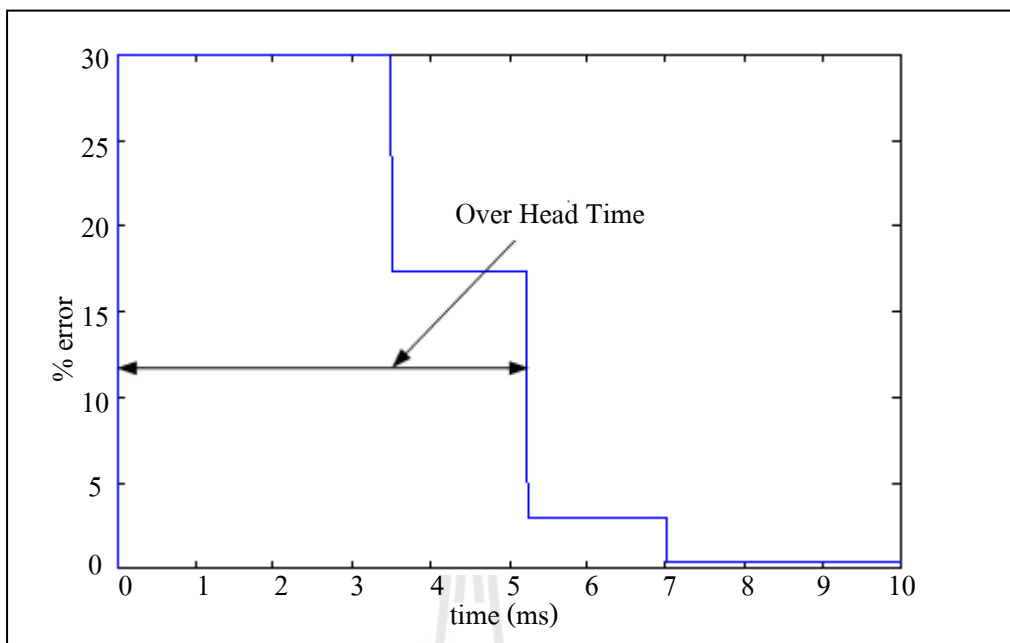
รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้โดยไม่ผ่าน  
ตัวกรองความถี่ต่ำที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที



ผลการทดลองที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที เห็นได้ว่าความถี่หรือคาบของสัญญาณของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์ หรือสัญญาณคอมมิวเตชันของเฟสที่ประมาณได้ มีความสัมพันธ์กับ HES ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยระหว่างการประมาณสัญญาณของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์นั้น ตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ของฟังก์ชันก็จะทำการปรับตัวดังรูปที่ 4.13 ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 จะถูกรู้ค่าหนึ่งและจะปรับตัวน้อยลง เนื่องจากสามารถหาความเร็วได้แล้ว เมื่อนำความถี่ของสัญญาณของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์ที่ประมาณได้ มาคำนวณความเร็ว จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความผิดพลาดอยู่ โดยช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวนั้นใช้เวลาประมาณ 3.2 ms เมื่อความเร็วในการประมาณคงตัวแล้วจะเริ่มทำการประมาณความเร็วโดยละเอียดอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้ความถี่ของสัญญาณของจุดผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์ที่ประมาณได้มาเป็นช่วงความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านดังแสดงในรูปที่ 4.15

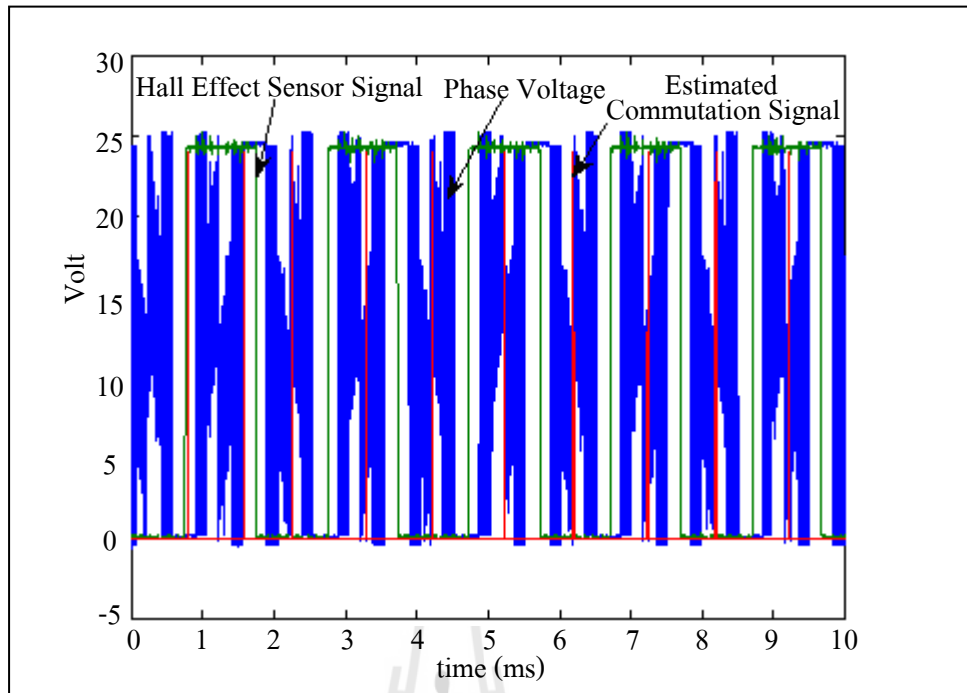


รูปที่ 4.15 แรงดันเฟส สัญญาณหลังจากผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและสัญญาณที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที

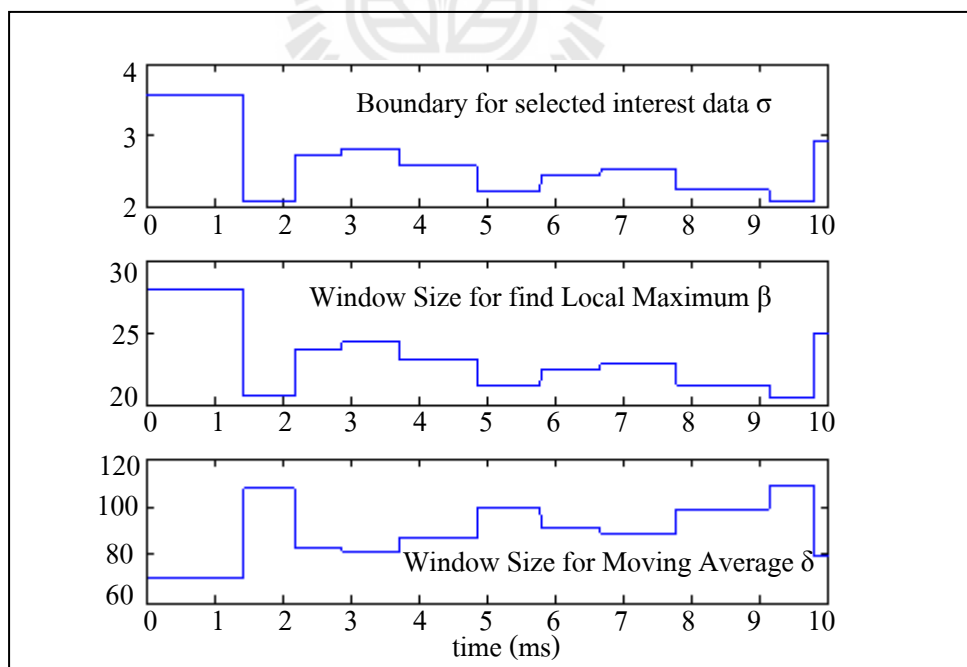


รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที

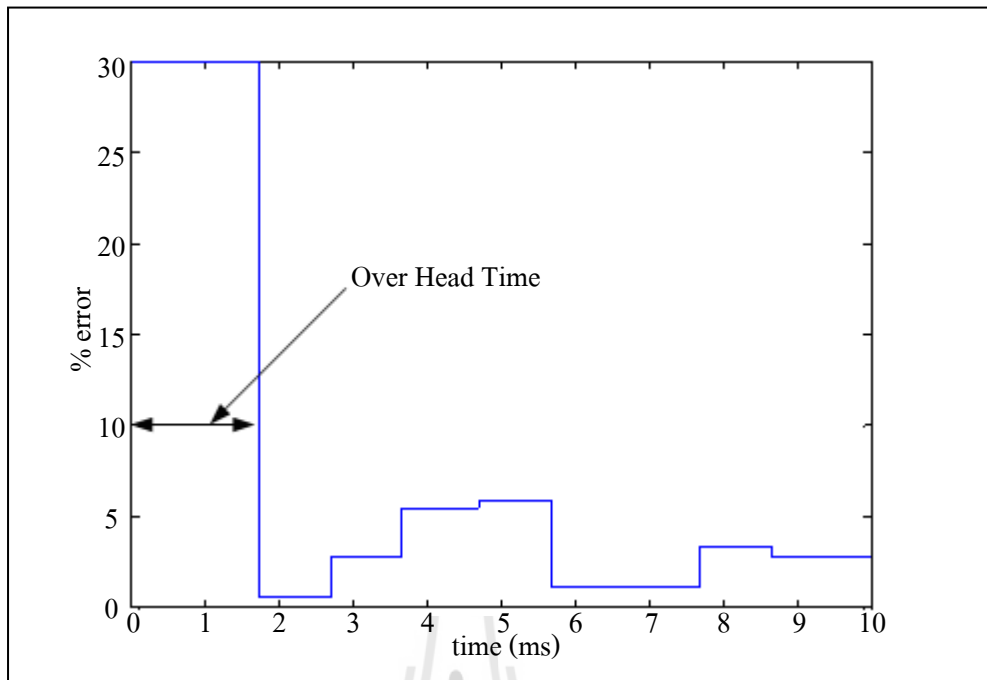
เมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากหัวของมอเตอร์แต่ละเฟสที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาทีมาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ทซ์จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งเห็นได้ว่าตัวกรองความถี่ต่ำสามารถแยกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับออกจากสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากหัวของมอเตอร์แต่ละเฟสได้ ซึ่งสามารถนำมาประมาณสัญญาณคอมมิวเตชันได้ เมื่อนำความถี่ของสัญญาณดังกล่าวมาคำนวณความเร็วจะได้ความเร็วที่ถูกต้องมากขึ้น ในขั้นตอนนี้จะมีช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวเวลา (Over head Time) ประมาณ 5.1 ms เมื่อรวมเวลาในการประมาณความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 2 ขั้นตอนแล้ว ช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวจะใช้เวลาประมาณ 8.3 ms เมื่อช่วงความเร็วคงตัวคือช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงช่วงเวลาที่มียาค่าความผิดพลาดของความเร็วน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.17 สัญญาณ HES แรงดันเฟส และสัญญาณที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาที

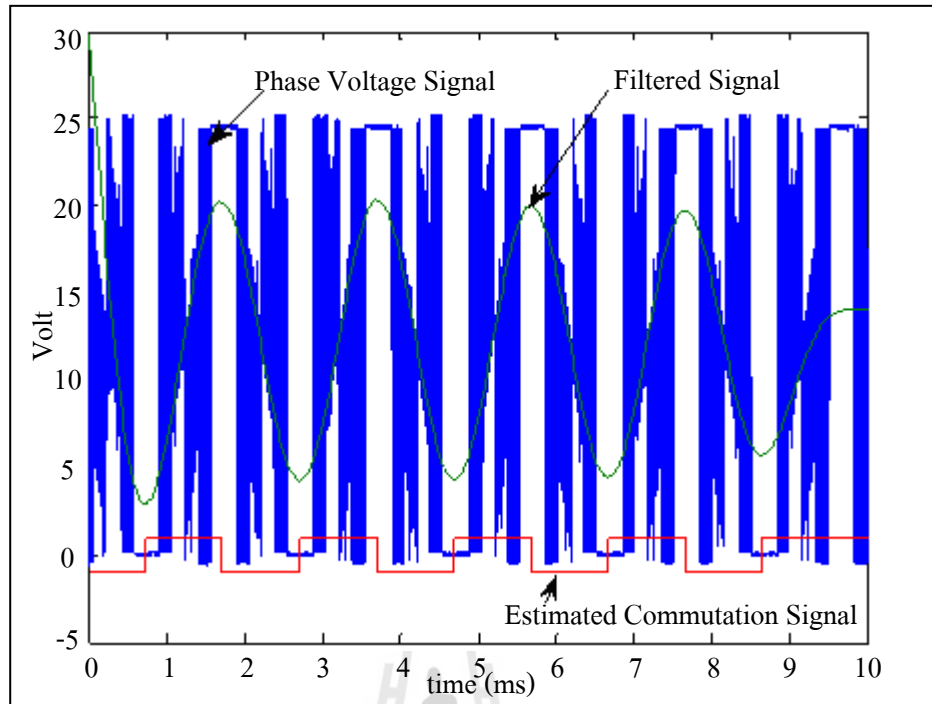


รูปที่ 4.18 การปรับตัวของ ตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาที

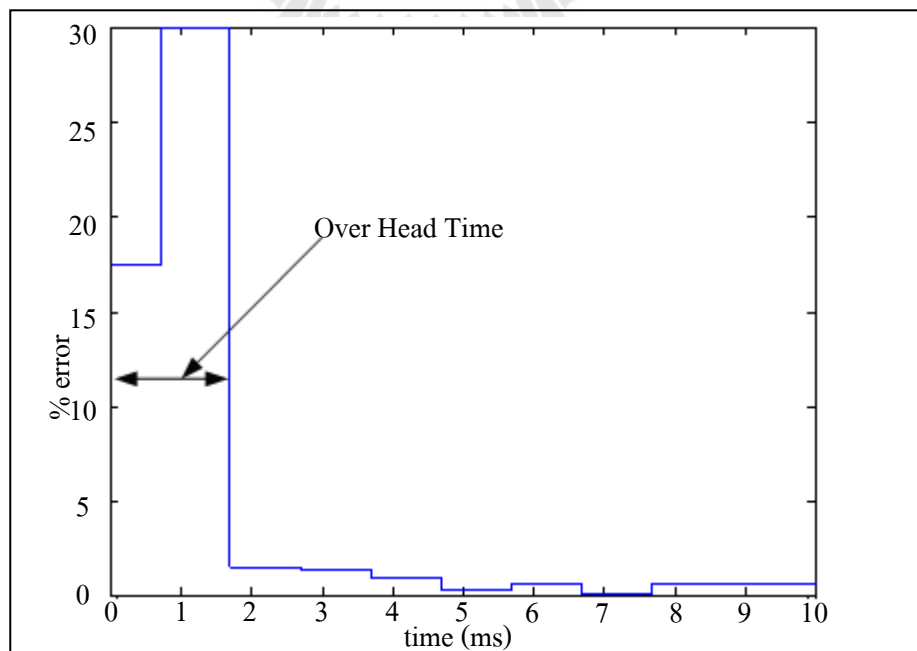


รูปที่ 4.19 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้โดยไม่ผ่าน  
ตัวกรองความถี่ต่ำที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาที

เมื่อทดลองวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากขั้วของมอเตอร์แต่ละเฟสที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาทีดังรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากขั้วของมอเตอร์ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาทีที่มีความเด่นชัดของสัญญาณที่ผ่านจุดกึ่งหนึ่งของแรงดันที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์แต่ละเฟสมากกว่าที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาที เนื่องจากเมื่อมอเตอร์มีความเร็วมากขึ้น ขดลวดภายในมอเตอร์ตัดกับสนามแม่เหล็กเร็วขึ้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับปรากฏเด่นชัดขึ้น เมื่อสังเกตจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์แต่ละเฟสทำให้การประมาณความถี่ของสัญญาณที่ผ่านกึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสนั้นมีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันสูงขึ้นทำให้ช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวมีค่าน้อยลง หรือความสามารถในการประมาณความเร็วของมอเตอร์เร็วขึ้นนั่นเองการปรับตัวของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ก็จะปรับตัวเร็วขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้แสดงดังรูปที่ 4.19 เห็นได้ว่าช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวมีค่าลดลงเหลือประมาณ 1.3 ms

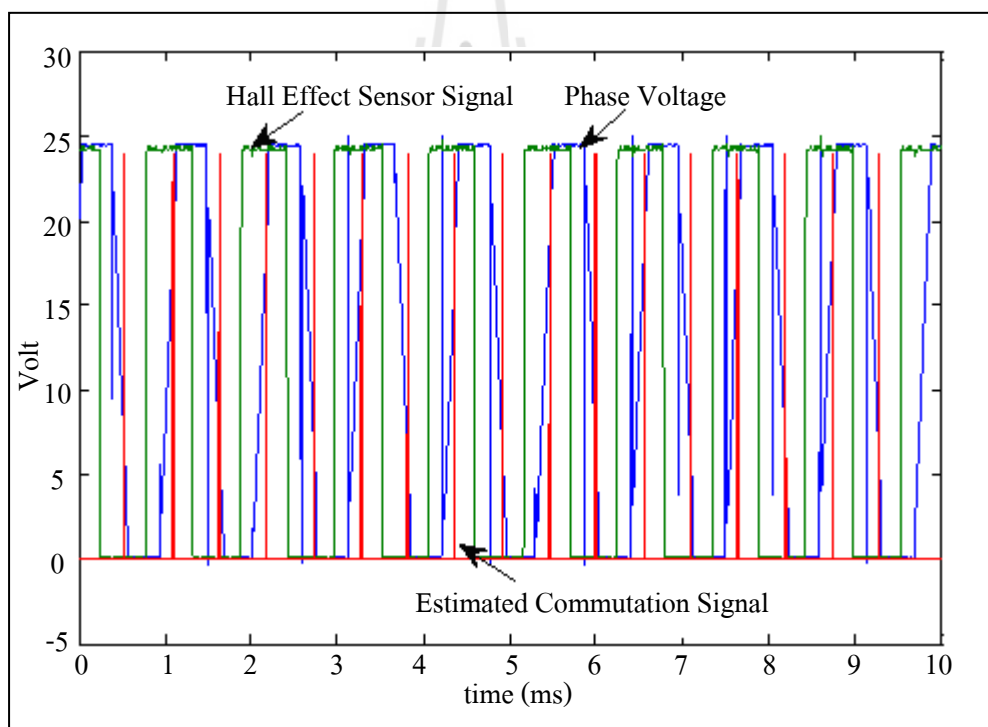


รูปที่ 4.20 แรงดันเฟส สัญญาณหลังจากผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและสัญญาณที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาที

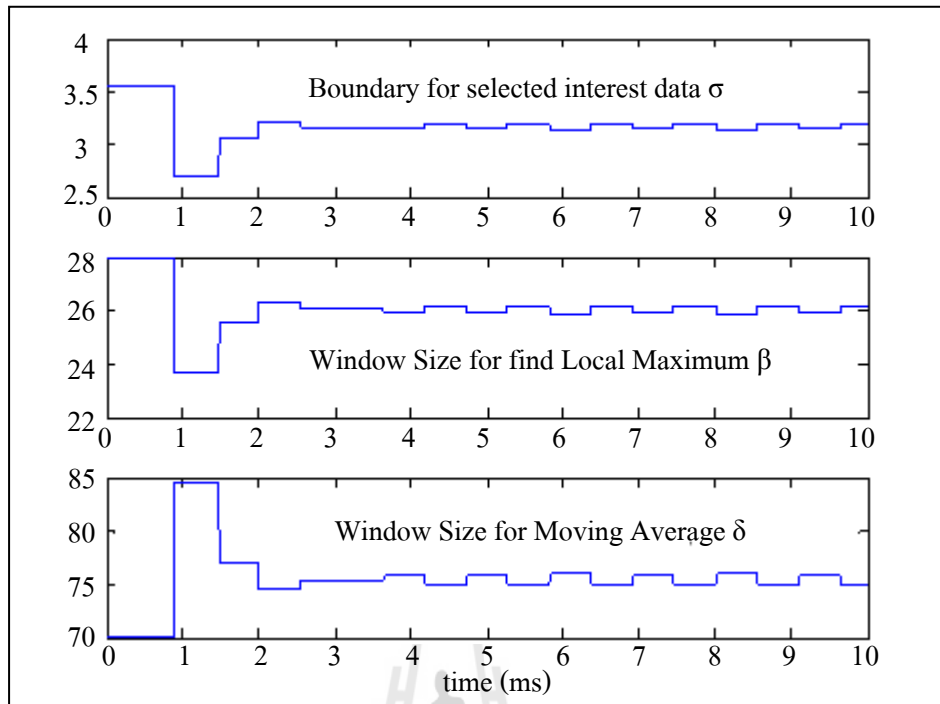


รูปที่ 4.21 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาที

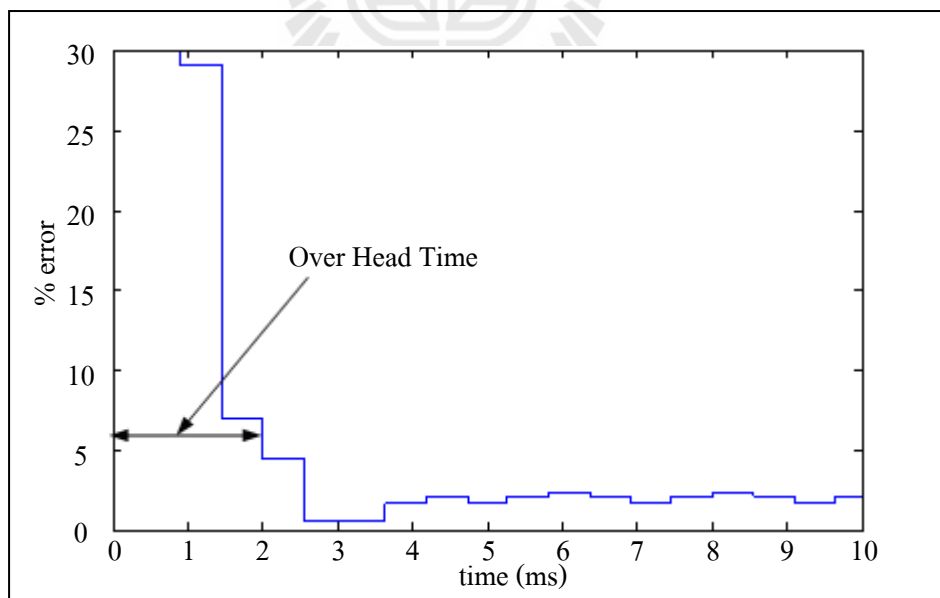
เมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์แต่ละเฟสที่ความเร็ว 3,785 รอบต่อนาทีผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ทซ์จะได้ผลดังรูปที่ 4.19 โดยความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันที่ประมาณได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันที่ประมาณได้ที่ความเร็วประมาณ 2,108 รอบต่อนาที เมื่อทำการคำนวณความเร็วจากความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชันที่ประมาณได้ ความผิดพลาดของความเร็วในการประมาณได้แสดงดังรูปที่ 4.21 เห็นได้ว่าช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวมีค่าลดลงเหลือประมาณ 1.7 ms เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว ของการประมาณความเร็วของมอเตอร์ที่ความเร็ว 2,108 รอบต่อนาทีเมื่อรวมเวลาในการประมาณทั้ง 2 ขั้นตอนแล้วจะใช้เวลาประมาณ 3 ms ในการเริ่มต้นประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว



รูปที่ 4.22 สัญญาณ HES แรงดันเฟสและสัญญาณที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 6,885 รอบต่อนาที

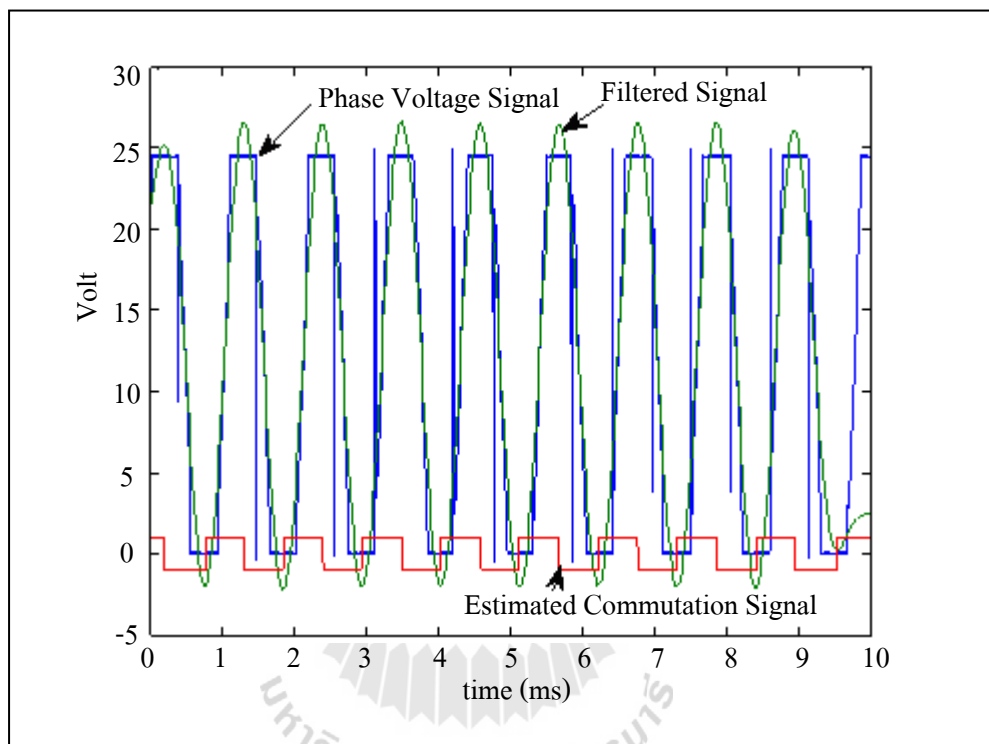


รูปที่ 4.23 การปรับตัวของ ตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ที่ความเร็ว 6,885 รอบต่อนาที



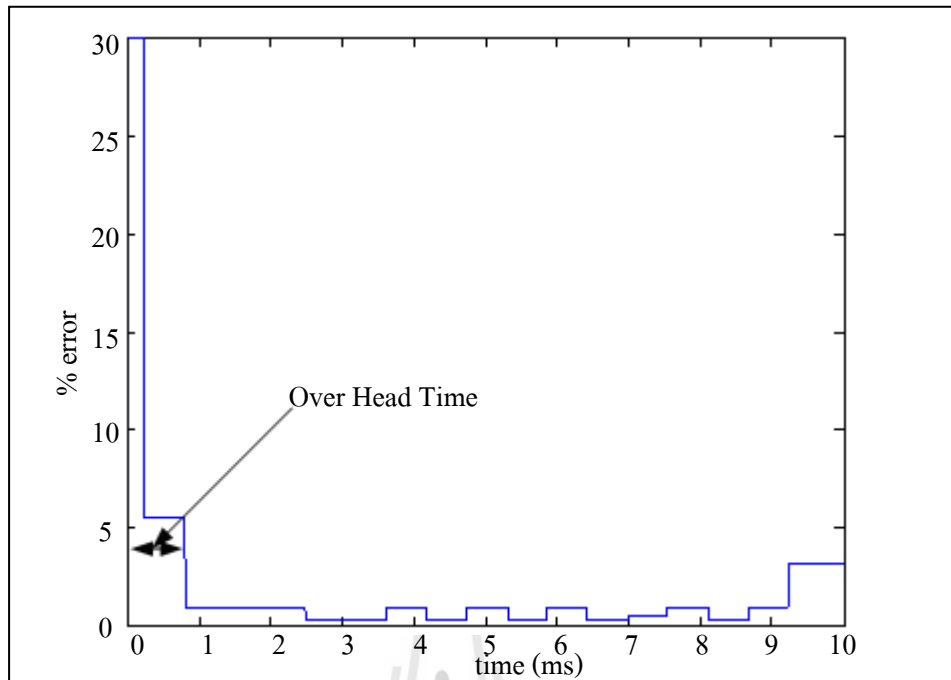
รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้โดยไม่ผ่าน  
ตัวกรองความถี่ต่ำที่ความเร็ว 6,885 รอบต่อนาที

เมื่อทดลองวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากขั้วของมอเตอร์แต่ละเฟสที่ความเร็ว 6,885 รอบต่อนาทีดังแสดงในรูปที่ 4.22 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากขั้วของมอเตอร์ที่วัดได้ มีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับที่ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งง่ายต่อการประมาณความเร็วของมอเตอร์ หรือการประมาณสัญญาณคอมมิวเตชัน การปรับตัวของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  เป็นไปได้เร็วขึ้น ทำให้ค่าของตัวแปรปรับตัวคู่เข้าสู่ค่าคงตัวได้เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23

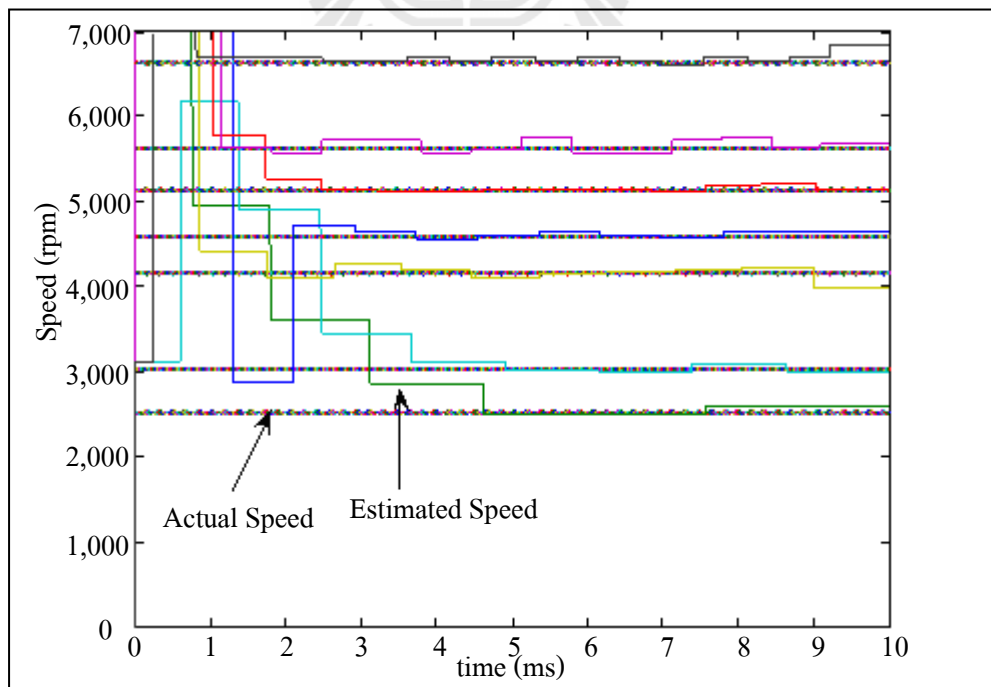


รูปที่ 4.25 แรงดันเฟส สัญญาณหลังจากผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและสัญญาณที่ประมาณได้ที่ความเร็ว 6,885 รอบต่อนาที





รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้หลังจากผ่านตัวกรองความถี่ต่ำที่ความเร็ว 6,885 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.27 ความเร็วของมอเตอร์และความเร็วที่ประมาณได้ในช่วงความเร็วต่าง ๆ

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าสามารถประมาณความเร็วของมอเตอร์ได้ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ HES กับสัญญาณคอมมิวเตชันที่ประมาณได้ จะมีขนาดคาบเวลาที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 4.17 และ 4.22 โดยมีการปรับตัวของตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ตามค่าความถี่ของสัญญาณก่อนหน้า เมื่อนำความถี่ที่ประมาณได้จากสัญญาณข้างต้นมาหาความเร็วของมอเตอร์ จะมีความผิดพลาดที่ค่อนข้างสูงดังแสดงในรูปที่ 4.13 4.18 และ 4.23 เมื่อนำความถี่ที่ประมาณได้ มาเป็นค่าความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จะทำให้ทราบความถี่โดยประมาณของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ ซึ่งเมื่อนำความถี่โดยประมาณของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ มาประมาณความเร็ว จะได้ความเร็วที่มีความผิดพลาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 4.21 และ 4.26

ตารางที่ 4.3 ความเร็ว ความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็วเมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว และเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว

ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณ ความเร็วเมื่อความเร็วอยู่ในสถานะ คงตัว (%)	เวลาเริ่มต้นในการประมาณ ความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็ว อยู่ในสถานะคงตัว (ms)
2,108	1.28	8.23
2,523	2.11	7.62
3,038	1.26	6.68
3,605	1.3	4.81
3,994	2.1	4.4
4,600	0.87	4.2
5,145	0.54	3.8
5,649	1.01	3.14
6,040	0.52	3.17
6,637	0.79	2.8

จากรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วสูงขึ้นเวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็วจนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวลดลง เนื่องจากความถี่ของสัญญาณที่ประมาณได้สูงขึ้น และความผิดพลาดของความเร็วที่ประมาณได้น้อยลง เนื่องจากเมื่อความเร็วสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับมีค่ามากขึ้น ทำให้การประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับมีความถูกต้องมากขึ้น

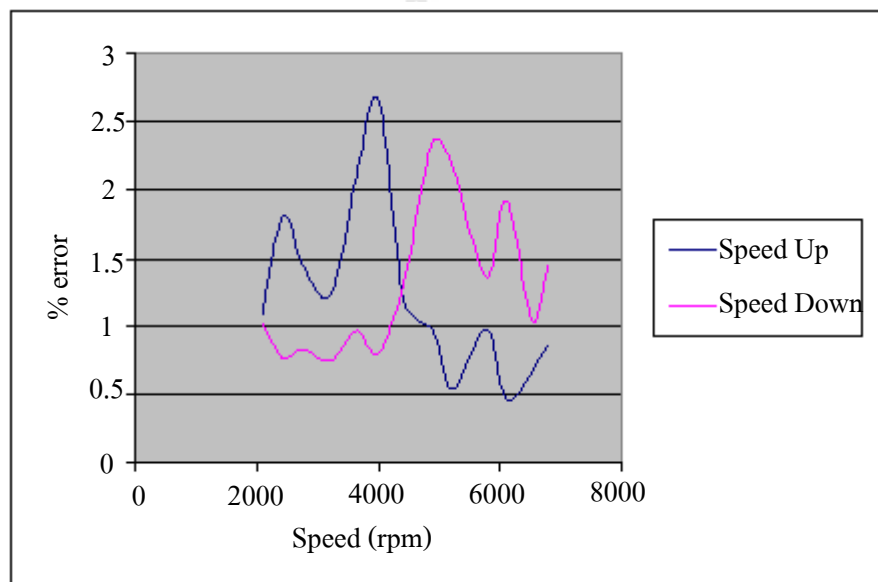
ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างข้อมูลค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็วเมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวของแต่ละช่วงความเร็ว เมื่อเพิ่มความเร็วขึ้น

ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็ว เมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว (%)
2,089	1.08
2,425	1.81
2,738	1.45
3,214	1.23
3,989	2.65
4,423	1.17
5,215	0.54
5,769	0.98
6,106	0.47
6,781	0.87

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างข้อมูลค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็วเมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวของแต่ละช่วงความเร็ว เมื่อลดความเร็วลง

ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็ว เมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัว (%)
6,813	1.02
6,431	0.76
5,897	0.74
5,387	0.96
4,989	0.81
4,516	1.34
3,887	2.17
3,342	1.36
2,758	1.04
2,104	1.45

จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการประมาณความเร็วในช่วงความเร็วเพิ่มขึ้นและช่วงความเร็วลงของความเร็วของมอเตอร์ความผิดพลาดเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ความผิดพลาดเฉลี่ยของการประมาณความเร็วที่อยู่ในสถานะคงตัวในแต่ละช่วงความเร็ว นั้นไม่แตกต่างกันมาก และมีความสัมพันธ์ของความผิดพลาดโดยเฉลี่ยไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นความผิดพลาดเฉลี่ยเมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวลดลง แต่ช่วงความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที ถึง 4,500 รอบต่อนาที จะมีความผิดพลาดเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์ เปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรวดเร็ว ทำให้การประมาณในขั้นตอนแรกเกิดความผิดพลาดขึ้น



รูปที่ 4.28 กราฟฮิสเทอรีซิสของความผิดพลาดเฉลี่ยของความเร็วที่ประมาณได้

#### 4.6 สรุป

จากผลการทดลองประมาณความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยไม่มีตัวรับรู้ด้วยวิธีการที่น่าเสนอนั้น สามารถประมาณความเร็วได้โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยเมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็ว จนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวไม่เกิน 9 ms

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

การประมาณความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้ ด้วยวิธีการที่นำเสนอมานั้นได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปผลของการดำเนินงานวิจัยของแต่ละบทได้ดังนี้

#### 5.1 สรุป

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย และกำหนดขอบเขต ข้อตกลง และวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อประมาณความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยไม่ใช้ตัวรับรู้ ซึ่งช่วงความเร็วที่ประมาณได้จะอยู่ในช่วง 2,000 – 7,000 รอบต่อนาที

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน การควบคุม การใช้งาน ระบบปัญญาประดิษฐ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่ใช้ตัวรับรู้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาการประมาณความเร็ว และตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ใช้วงจรในการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ หรือใช้ซอฟต์แวร์ในการประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ในการประมาณความเร็วทำให้การประมาณความเร็วมีความยืดหยุ่นในช่วงการทำงานที่กว้างมากขึ้น และสามารถตรวจจับที่ต้องเพิ่มได้

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการประมาณความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยไม่มีตัวรับรู้ ซึ่งแบ่งวิธีการประมาณออกเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการประมาณความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชัน โดยใช้ฟังก์ชันที่กำหนดขึ้นในการประมาณความเร็ว ซึ่งความเร็วที่ประมาณได้มีความคลื่อนก่อนข้างสูง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแต่ละเฟสของมอเตอร์ที่นำมาประมาณความเร็วมีสัญญาณรบกวนรวมมาด้วย ดังนั้นเมื่อทราบความถี่ของสัญญาณคอมมิวเตชัน โดยประมาณแล้ว จึงนำช่วงความถี่ดังกล่าวมาเป็นความถี่ตัดออกของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ทซ์ เพื่อกรองความถี่ต่ำผ่านและหาความถี่ของสัญญาณที่ผ่านการกรองไปประมาณความเร็ว จะทำให้การประมาณความเร็วมีความถูกต้องมากขึ้น

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และผลของการทดลอง ซึ่งผลการทดลองขึ้นจะอยู่กับการปรับตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ก่อนที่จะนำไปหาสมการความสัมพันธ์ โดยการปรับตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  ให้ได้ค่าที่ทำให้ความเร็วถูกต้องสูงสุด และความแตกต่างของตัวแปรในแต่ละช่วงความเร็วที่ไม่มากนัก จะทำให้ความเร็วผู้เข้าสู่ความเร็วจริงได้เร็วขึ้น นำไปสู่การประมาณความเร็วที่ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยใช้เวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็ว จนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวน้อยที่สุด จากการทดลองประมาณความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่มีตัวรับรู้ด้วยวิธีการที่น่าเสนอนั้น สามารถประมาณความเร็วได้โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยในการประมาณความเร็วเมื่อความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาเริ่มต้นในการประมาณความเร็ว จนถึงเวลาที่ความเร็วอยู่ในสถานะคงตัวไม่เกิน 9 ms

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้ ดิจิทัลออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดสัญญาณ เพื่อให้ได้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณที่สูง แต่สามารถเก็บข้อมูลได้เพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นในการทดลองควรหาเครื่องมือที่สามารถวัดสัญญาณได้ตามเวลาจริง เนื่องจากเครื่องมือวัดความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถอ่านความเร็วได้เฉพาะเวลาที่ความเร็วคงตัวเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถทดลองประมาณความเร็ว เมื่อมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบต่อเนื่องได้ ซึ่งถ้าเครื่องมือวัดสามารถวัดความเร็วขณะที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงได้จะทำให้ประสิทธิภาพของการประมาณความเร็วสูงขึ้นด้วย

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลงานวิจัยไปใช้งาน

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้ดิจิทัลออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดสัญญาณเพื่อให้ได้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณที่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อจะนำวิธีการประมาณความเร็ว หรือวิธีการประมาณสัญญาณคอมมิวเตชันของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจากงานวิจัยนี้ ไปใช้ สามารถลดความถี่ในการสุ่มสัญญาณ และการประมวลผลได้ แต่ความผิดพลาดของข้อมูล จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- อาทิตย์ ศรีแก้ว.(2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Anand Sathyan, Mahesh Krishnamurthy, Nikola Milivojevic, and Ali Emadi, 2009. A Low-Cost Digital Control Scheme for Brushless DC Motor Drives in Domestic Applications. **Proceeding of IEEE- 2009 International Electric Machines and Drives Conference**, pp. 76-82.
- Chang-Liang Xia and Wei Chen, 2005. Sensorless Control of Brushless DC Motors at low speed using neural networks. **Proceeding of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, pp.1099-1103.
- Haifeng Lu, Lei Zhang, and Wenlong Qu, MARCH 2008. A New Torque Control Method for Torque Ripple Minimization of BLDC Motors With Un-Ideal Back EMF. **IEEE transactions on power electronics**, Vol. 23, No. 2, pp. 950-958.
- Jianwen Shao, 2006. An Improved Microcontroller-Based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Applications. **IEEE transactions on industry applications**, Vol. 42, No. 5, pp. 1216-1221.
- Jianwen Shao, Dennis Nolan, and Thomas Hopkins, 2003. Improved Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives. **Proceeding of IEEE APEC-2003**, pp.300-305
- Jung-Sheng Wen, Chi-Hsu Wang, Ying-De Chang, and Ching-Cheng Teng, 2008. Intelligent Control of High-Speed Sensorless Brushless DC Motor for Intelligent Automobiles. **Proceeding of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, pp.3394-3398
- Malik E. Elbuluk, Liu Tong, and Iqbal Husain, 2002. Neural-Network-Based Model Reference Adaptive Systems for High-Performance Motor Drives and Motion Controls. **IEEE transactions on industry applications**, Vol. 38, No. 3, pp.879-886

- S. M.M.Mirtalaei, J.S.Moghani, K.Malekian, and B.Abdi., 2008. A Novel Sensorless Control Strategy for BLDC Motor Drives Using a Fuzzy Logic-based Neural Network Observer. **Proceeding of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**, pp. 1491-1496.
- S. Poonsawat and T. Kulworawanichpong, 2008. Speed Regulation of a Small BLDC Motor using Genetic-Based Proportional Control. **International Journal of Intelligent Systems and Technologies**, Vol. 30, No. 4, pp. 220-225.
- Seung-gun Lee, Dae-kyong Kim, Duck-shick Shin, Byung-taek Kim, Byung-il Kwon, and Young-cheol Lim, 2007. A Study on Low-Cost Sensorless Drive of Brushless DC Motor for Compressor Using Random PWM. **Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea**, pp. 920-925.
- Tae-Hyung Kim, Byung-Kuk Lee, and Mehrdad Ehsani, 2003. Sensorless Control of the BLDC Motors From Near Zero to High Speed. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 19, No. 6, pp.306-312
- Tae-Sung Kim, Ji-Su Ryu, and Dong-Seok Hyun, 2005. Sensorless Drive of Brushless DC Motors Using an Unknown Input Observer. **Proceeding of Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, pp. 1413-1418.
- YAN Wei-Sheng, LIN Hai, LI Hong, and Yan Wei, 2009. Sensorless Direct Torque Controlled Drive of Brushless DC Motor based on Fuzzy Logic. **Proceeding of IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**, pp. 3411-3416.





ภาคผนวก ก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ก.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดสอบ

Motor Data		
1	Assigned power rating	W 50
2	Nominal voltage	Volt 24.0
3	No load speed	rpm 6800
4	Stall torque	mNm 780
5	Speed / torque gradient	rpm / mNm 8.8
6	No load current	mA 200
7	Terminal resistance phase to phase	Ohm 1.03
8	Max. permissible speed	rpm 10000
9	Max. continuous current at 5000 rpm	A 2.58
10	Max. continuous torque at 5000 rpm	mNm 81.4
11	Max. efficiency	% 82.7
12	Torque constant	mNm / A 33.5
13	Speed constant	rpm / V 285
14	Mechanical time constant	ms 12
15	Rotor inertia	gcm <sup>2</sup> 135
16	Terminal inductance phase to phase	mH 0.450
17	Thermal resistance housing-ambient	K / W 3.9
18	Thermal resistance winding-housing	K / W 5.3
19	Thermal time constant windings	s 11.7
20	Thermal time constant stator	s 82.6

Specifications	
• Axial preload	> 4 N
• Max. <b>ball bearing</b> loads	
axial (dynamic)	2.8 N
radial (7.5 mm from flange)	5.5 N
Force for press fits (static)	50 N
(static, shaft supported)	1000 N
• Ambient temperature range	-40 ... +100°C
• Max. permissible winding temperature	+125°C
• Weight of motor	110 g
• 16 pole permanent magnet	
• 3 phased coil stator with 4 pole shoes each	
• Values listed in the table are nominal.	
• <b>Connection with Hall sensors</b>	
Pin 1	Hall sensor 1*
Pin 2	Hall sensor 2*
Pin 3	4.5 ... 24 VDC
Pin 4	Motor winding 3
Pin 5	Hall sensor 3*
Pin 6	GND
Pin 7	Motor winding 1
Pin 8	Motor winding 2
*Internal pull-up (7 ... 13 kΩ) on pin 3	
• For wiring diagram for Hall sensors, see p. 26	

รูป ก.1 ข้อมูลและคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับการทดลอง



ภาคผนวก ข

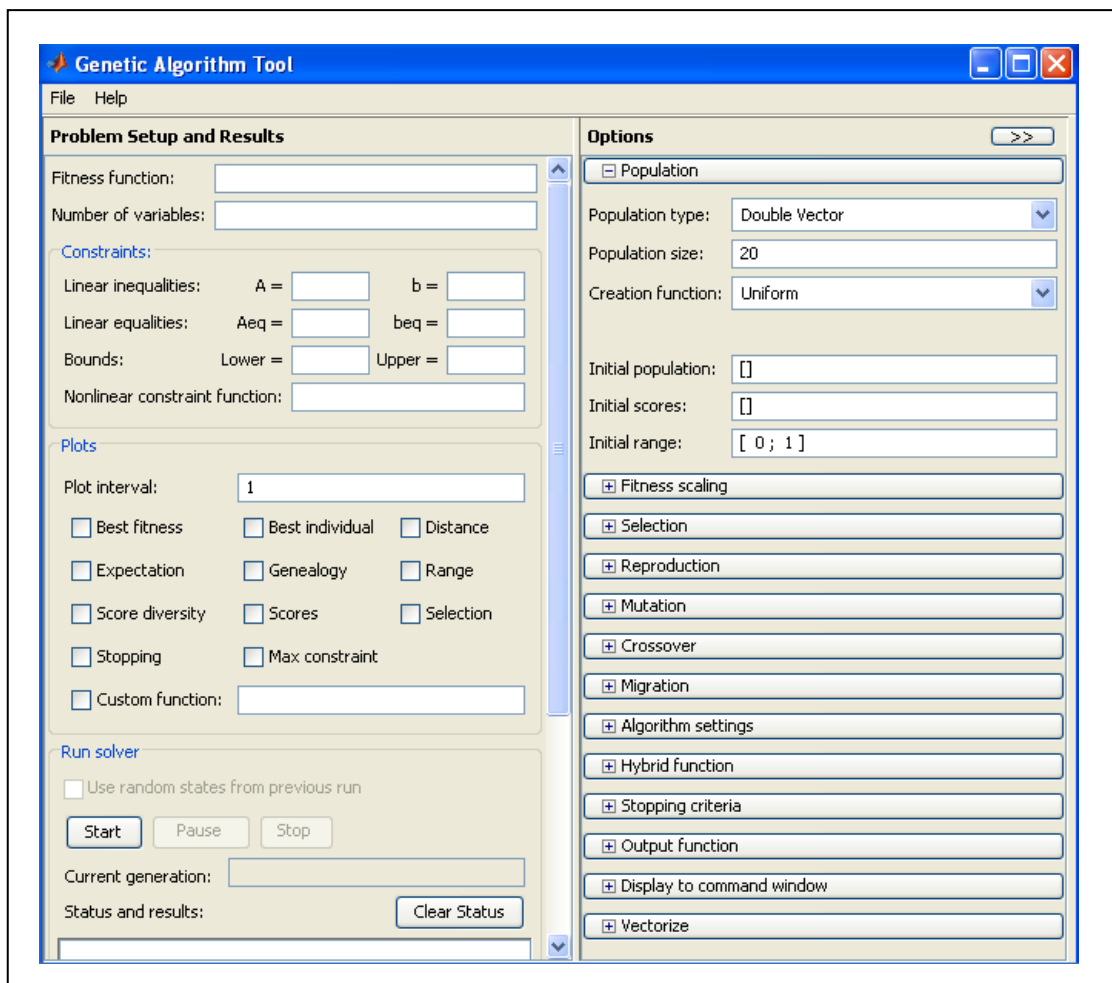
การใช้งาน GATool ของโปรแกรม MATLAB และฟังก์ชันวัตถุประสงค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ข.1 การใช้งาน GATool ของโปรแกรม MATLAB และฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เนื่องจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\sigma$   $\delta$  และ  $\beta$  กับคาบเวลาของสัญญาณคอมพิวเตอร์ชันโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมซึ่งใช้กล่องเครื่องมือของโปรแกรม MATLAB ที่ชื่อว่า GATool มีวิธีการใช้งานเบื้องต้นดังนี้

1. พิมพ์คำสั่ง “GATool” ลงในหน้าต่าง “command line” ของโปรแกรม MATLAB จะปรากฏหน้าต่างของ GATool ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 หน้าต่างของ GATool

2. เขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสมการที่เราต้องการหาโดยให้อินพุตเป็นอาร์เรย์ของฟังก์ชัน เช่น  $x(1), x(2), \dots, x(n)$  เป็นต้น โดยฟังก์ชันจะรีเทินค่าความผิดพลาดโดยในที่นี้ให้ค่าความผิดพลาดเป็นความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ฟังก์ชันจะทำการวนรอบเพื่อทดสอบค่าที่

GATool ป้อนมาให้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงของข้อมูล In และ Out1 ซึ่งตัวอย่างการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใน m-file เป็นดังแสดงในรูปที่ ข.2

```
function error=F_function(x)

In = [833 699 648 572 516 470 446 391 368 355 341 324 312 303 282 238 258 246 239 232 222 218 215
      208 201 196 193 185 181 173 169 164 160 152 150 148 143 139 134];

Out1= [12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 8 8 8
       8 8 8 8 8 8];

error = 0;

for i = 1:length(In)
    y(i) = (x(1)*(In(i)^3)) + (x(2)*(In(i)^2)) + (x(3)*In(i)) +x(4);
    error = error+ sqrt((y(i)-Out1(i))^2);
end

error = error/ length(In);

return
```

รูปที่ ข.2 ตัวอย่างการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใน m-file

3. เพิ่มตำแหน่งของไฟล์เตอร์ที่เก็บ m-file มาในวิกิเสปซของโปรแกรม MATLAB
4. ตั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้อักษร @ นำหน้าชื่อของฟังก์ชัน และเติมจำนวนของตัวแปร  $x(1), x(2), \dots, x(n)$  ลงไปดังแสดงในรูปที่ ข.3

Problem Setup and Results	
Fitness function:	<input type="text" value="@F_function"/>
Number of variables:	<input type="text" value="4"/>

รูปที่ ข.3 การตั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร

5. กำหนดค่าขอบของตัวแปรทั้งหมดที่ต้องการค้นหาโดยกำหนดเป็นชนิดอาร์เรย์ เช่น [-10 -10 -10 -10] ถึง [10 10 10 10] ดังแสดงในรูปที่ ข.4

Constraints:

Linear inequalities: A =  b =

Linear equalities: Aeq =  beq =

Bounds: Lower =  Upper =

Nonlinear constraint function:

รูปที่ ข.4 การกำหนดค่าขอบของตัวแปรทั้งหมดที่ต้องการค้นหา

6. กำหนดหน้าต่างแสดงผลระหว่างการค้นหาในที่นี่กำหนดให้แสดงค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชัน และค่าตัวแปรที่ดีที่สุดในการค้นหาดังแสดงในรูปที่ ข.5

Plots

Plot interval:

Best fitness  Best individual  Distance

Expectation  Genealogy  Range

Score diversity  Scores  Selection

Stopping  Max constraint

Custom function:

รูปที่ ข.5 การกำหนดหน้าต่างแสดงผลระหว่างการค้นหา

7. กำหนดชนิดและขนาดของจำนวนประชากร รวมถึงกำหนดค่าเริ่มต้นของประชากร ในแต่ละรุ่นดังแสดงในรูปที่ ข.6

Population	
Population type:	Double Vector
Population size:	20
Creation function:	Uniform
Initial population:	[ ]
Initial scores:	[ ]
Initial range:	[ 0 ; 1 ]

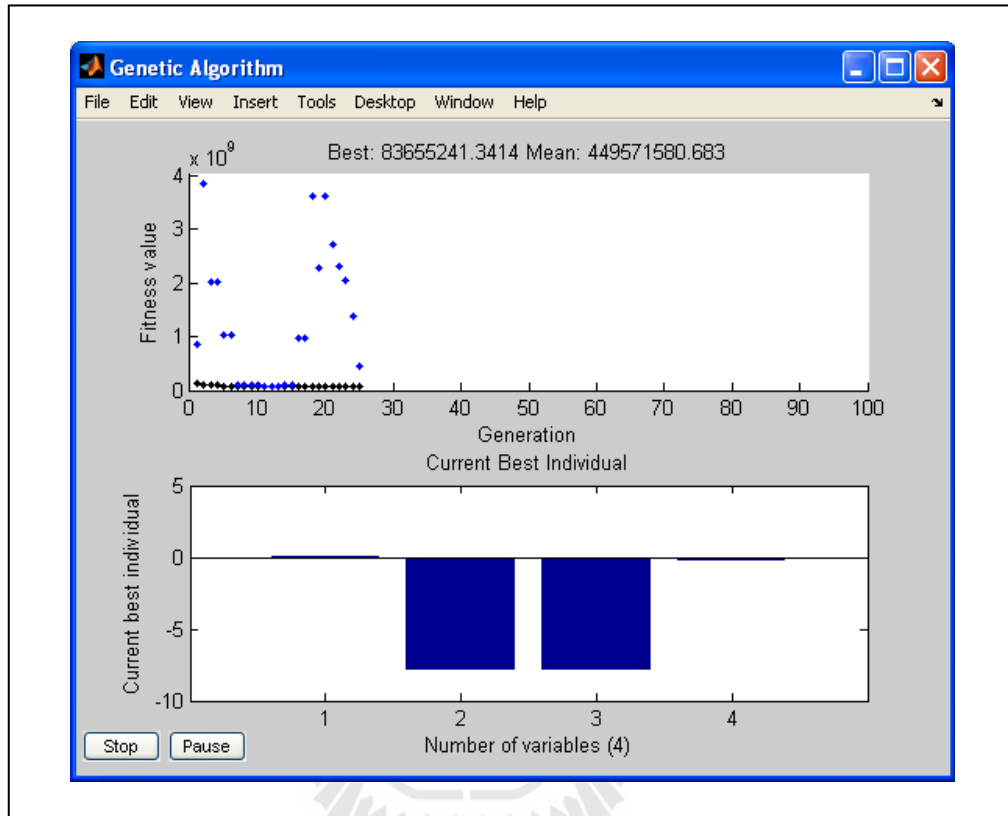
รูปที่ ข.6 การกำหนดชนิดและขนาดของประชากร

8. กำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจในการหยุดการค้นหาดังแสดงในรูปที่ ข.7

Stopping criteria	
Generations:	100
Time limit:	Inf
Fitness limit:	-Inf
Stall generations:	50
Stall time limit:	20
Function tolerance:	1e-006
Nonlinear constraint tolerance:	1e-006

รูปที่ ข.7 การกำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจในการหยุดการค้นหา

9. เริ่มทำการค้นหาโดยกดปุ่ม “start” เมื่อกดปุ่มจะมีหน้าต่างแสดงผลการค้นหาขึ้นมา ตามที่เราตั้งค่าไว้ดังแสดงในรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 หน้าต่างแสดงผลการค้นหา





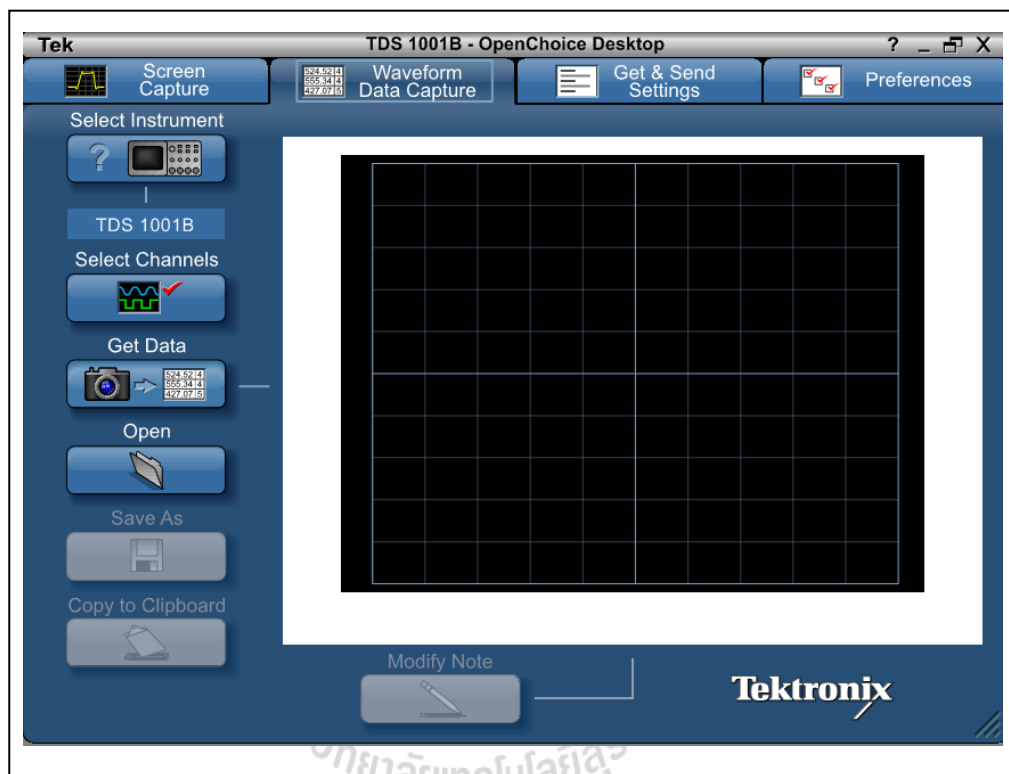
ภาคผนวก ค

การใช้งานโปรแกรม Open Choice Desktop

### ค.1 การใช้งานโปรแกรม Open Choice Desktop

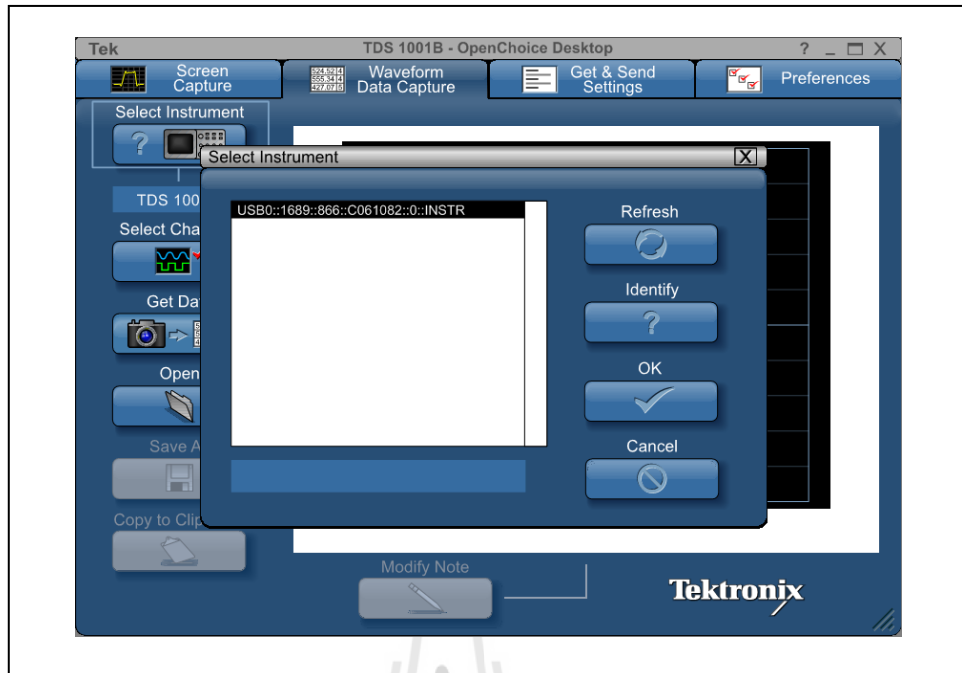
ในการเก็บค่าของสัญญาณที่จะนำมาประมวลผลจาก Oscilloscope นั้นใช้โปรแกรม Open Choice Desktop เป็นเครื่องมือในการเก็บ และบันทึกข้อมูลซึ่งมีวิธีการใช้งานดังนี้

1. เปิดเครื่อง Oscilloscope ต่อช่องสัญญาณ USB เข้ากับคอมพิวเตอร์ และเปิดโปรแกรม Open Choice Desktop เลือกที่ “Waveform Data Capture” จะปรากฏหน้าต่างดังแสดงในรูปที่ ค.1



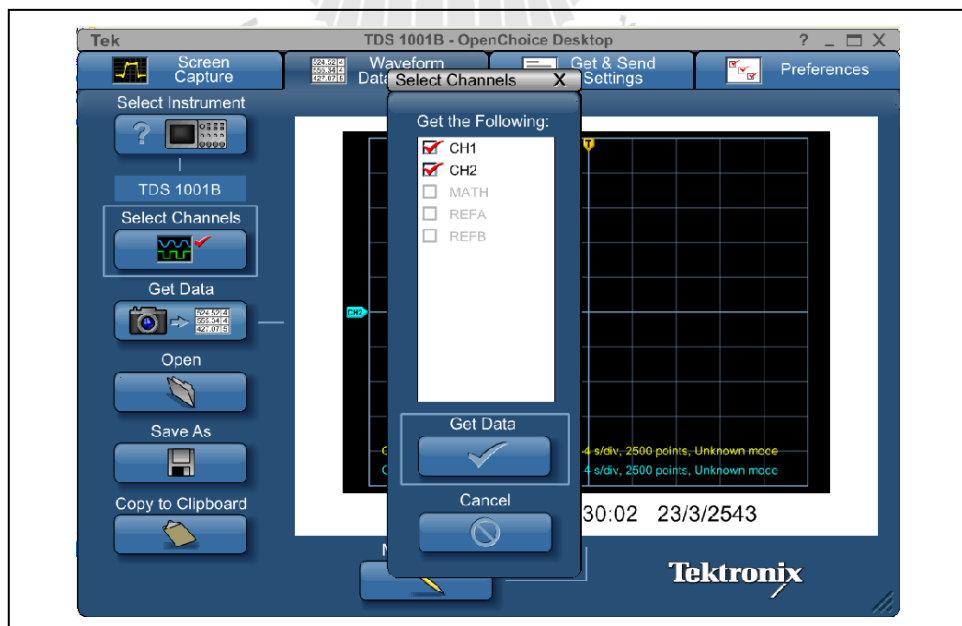
รูปที่ ค.1 หน้าต่างของ โปรแกรม Open Choice Desktop

2. เลือก Oscilloscope ด้วยการกดปุ่ม “Select Instrument” โปรแกรมจะแสดงเครื่องมือที่ต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ เลือกรุ่น Oscilloscope และกด “Ok” ดังแสดงในรูปที่ ค.2



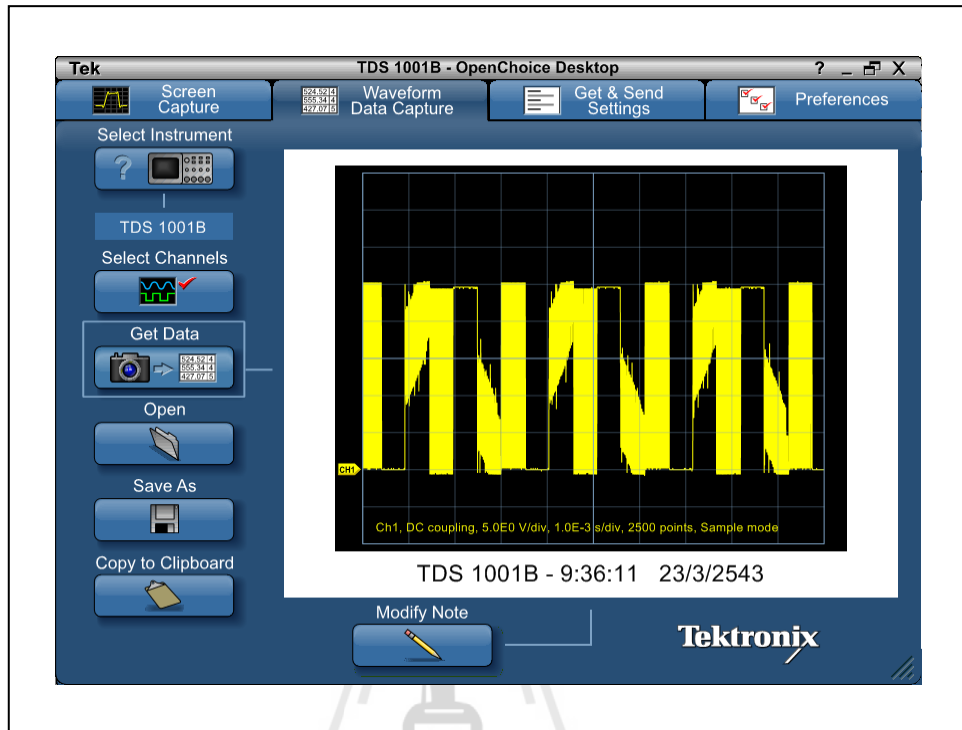
รูปที่ ก.2 หน้าต่างแสดงเครื่องมือที่ต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์

- กดปุ่ม “Select Channels” เพื่อเลือกช่องของสัญญาณที่ต้องการวัดดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 หน้าต่างการเลือกช่องของสัญญาณที่ต้องการวัด

4. กดปุ่ม “Get Data” เพื่ออ่านค่าข้อมูลเข้ามาในโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ข้อมูลที่อ่านเข้ามาในโปรแกรม

5. กดปุ่ม “Save As” เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลไว้ในรูปแบบ ไฟล์ “.csv”

## ค.2 รูปแบบของข้อมูลที่บันทึกโดยโปรแกรม Open Choice Desktop

เมื่ออ่านสัญญาณ แปลงสัญญาณ และบันทึกข้อมูลของสัญญาณเรียบร้อยแล้ว เมื่อต้องการนำสัญญาณมาประมวลผล ต้องเขียนโปรแกรมเพื่อประมวลผลข้อมูลเหล่านั้น ตามรูปแบบ หรือโครงสร้างในการเก็บข้อมูลที่ทำการบันทึกไว้ ซึ่งไฟล์ที่บันทึกไว้มีโครงสร้างของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ ข.5

	A	1	B	C	3	4	F	G	1	I	3	4
1	Record Len	2500	Points		7.84E-03	2.00E-01		Record Len	2500	Points	7.84E-03	24.2
2	Sample Int	4.00E-06	s		7.84E-03	2.00E-01		Sample Int	4.00E-06	s	7.84E-03	24.2
3	Trigger Poi	#####	Samples		7.85E-03	0		Trigger Poi	#####	Samples	7.85E-03	24.2
4					7.85E-03	0					7.85E-03	24.4
5					7.86E-03	0					7.86E-03	24.2
6					7.86E-03	0					7.86E-03	24.2
7	Source	CH1			7.86E-03	2.00E-01		Source	CH2		7.86E-03	24.2
8	Vertical Ur	Volts			7.87E-03	0		Vertical Ur	Volts		7.87E-03	24.2
9	Vertical Sc	5			7.87E-03	0		Vertical Sc	5		7.87E-03	24.2
10	Vertical Of	0			7.88E-03	2.00E-01		Vertical Of	0		7.88E-03	24.4
11	Horizontal s				7.88E-03	2.00E-01		Horizontal s			7.88E-03	24.2
12	Horizontal	1.00E-03			7.88E-03	2.00E-01		Horizontal	1.00E-03		7.88E-03	24.4
13	Pt Fmt	Y			7.89E-03	2.00E-01		Pt Fmt	Y		7.89E-03	24.2
14	Yzero	-3			7.89E-03	2.00E-01		Yzero	-3		7.89E-03	24.4
15	Probe Atte	10			7.90E-03	0		Probe Atte	10		7.90E-03	24.4
16					7.90E-03	2.00E-01					7.90E-03	24.2
17	Note	TDS 1001B - 10:39:00			7.90E-03	2.00E-01		Note	TDS 1001B - 10:39:00		7.90E-03	24.4
18					7.91E-03	2.00E-01					7.91E-03	24.2
19					7.91E-03	0					7.91E-03	24.4

รูปที่ ค.5 โครงสร้างในการเก็บข้อมูลของสัญญาณที่วัดได้

จากรูปที่ ค.5 แสดงรูปแบบโครงสร้างของข้อมูลที่บันทึกไว้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. จำนวนข้อมูลที่เก็บบันทึก และเวลาในแต่ละรอบการเก็บบันทึก
2. หมายเลขช่องสัญญาณ
3. เวลาในการบันทึกของแต่ละข้อมูล
4. ข้อมูลของสัญญาณที่อ่านได้



ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

# PID Closed-loop Identification and Design for an Infrared Oven

Jiraphon Srisertpol, Supot Phungphimai, Pawin Jawayon  
 School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering  
 Suranaree University of Technology  
 Nakhon Ratchasima, Thailand 30000  
 E-mail: jiraphon@sut.ac.th

**Abstract**— This paper proposes a controller design and identification technique for an infrared oven in hard disk drive (HDD) manufacturing process. An infrared oven temperature is controlled by using PID controller. However, this type of controller often made temperature over rising and lead in product damaging. The over temperature problem is suspect to be taken from physical changing of infrared oven. Because of this reason, PID controller parameters are not appropriate for a new condition. Therefore the infrared oven control system will have low efficiency. An approximated transfer function for an infrared oven obtained from closed-loop data by using nonlinear least squares method and the optimization of PID controller design is demonstrated via gradient descent method. The experimental and simulation results showed good performance in actual operations.

**Key Words:** Heat Transfer, Parameter Estimation, Industrial Control

## I. INTRODUCTION

In the components assembly process of hard disk drive manufacturing has the process which uses the adhesive for components attachment. The adhesive process needs to be cured by using the infrared lamp oven which its curing temperature is controlled to be between  $T_1$  and  $T_2$  for time  $t_s$  second. It is found that an inefficiency to control the temperature to be within the requirement and effects to the production damage. From the temperature response of infrared ovens in production line is presented in Figure 1, their temperature responses are out of the temperature requirement. This problem is caused from the unsuitable PID parameters that are using in the system which effects to the efficiency of temperature control. Therefore, this article is introduced the PID closed-loop identification of infrared oven process to find the coefficients of parameters in the mathematical model of the infrared oven process.

Choi J.Y. and Do, H.M.[1] study and analyze both structure and component of the operating process of oven which uses Tungsten-Halogen lamp for its heating source. Lord, H. A. [2] analyzes the heat transfer study with heat conduction, heat convection and heat radiation that occur inside the oven. The research of Wonhui Cho.[3] study the heat response of system and mathematical model for using in controller system design of oven process. Cho Wonhui Cho, Thomas F. Edgar and Jietae Lee.[4] introduced the closed-loop identification of

wafer heat response by using nonlinear least squares method to find the coefficients of parameters in the mathematical model of the infrared oven process with Tungsten-Halogen lamp and use the close loop identification method from the research of Yeo, Y K., Kwon, T. I., Lee, K. W. [5] and Pramod, S.,Chidambaram, M [6]. For the research of Lin, C. A. and Jan, Y. K [7] introduced means of design the controller system for oven process.

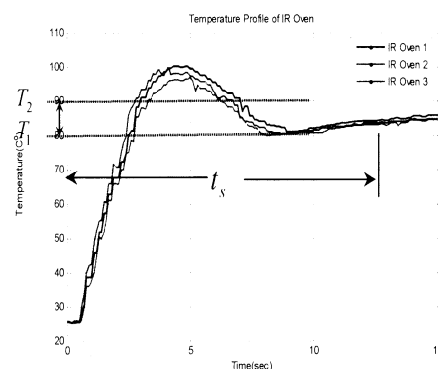


Figure 1. The temperature response of three infrared ovens

## II. MATHEMETICAL MODEL OF INFRARED OVEN

The size of infrared oven is 30 x 19.6 x 62.5 inch. It has the electrical current controller for infrared lamp. Inside the oven, there are thermocouples for perform temperature measurement. The controller system of infrared oven is presented in Figure 2.

We apply the conservation of energy and heat transfer to examine the product to construct the mathematical model as shown in Figure 3. When heating rate of product temperature is increased, it causes the total heat to be transfer into the product.

From the heat transfer diagram in figure 3, we obtain

$$mC_p \frac{dT}{dt} = q^{rad} + q^{conv} + q^{ab} + q^{dist} \quad (1)$$

where  $m$  - product mass,  $t$  - time

$C_p$  - specific heat value of product

$T$  - product temperature

$q^{rad}$  - radiation of heat flow

$q^{conv}$  - convection of heat flow

$q^{ab}$  - radiation absorbed of heat flow

$q^{dist}$  - disturbance of heat flow

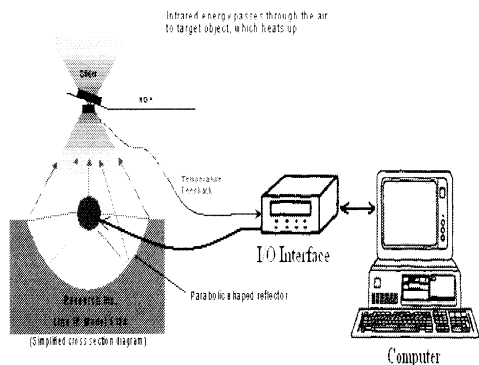


Figure 2. Infrared oven diagram

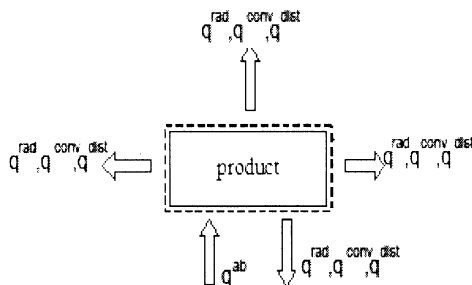


Figure 3. The heat transfer diagram of product

For heat radiation mode is assumed that heat radiation generates heat continuously from all product surfaces and heat flux is constant. Thus the heat loss from radiation is

$$q^{rad} = -\varepsilon\sigma A_r T^4 \quad (2)$$

where  $\sigma$  - Stefan-Boltzmann constant

$\varepsilon$  - emissivity

$A_r$  - radiation surface of product

The heat convection between contacting surface of product and air is given by relation

$$q^{conv} = -hA_a(T - T_a) \quad (3)$$

where  $h$  - convection heat transfer coefficient

$A_a$  - air contacting surface

$T_a$  - air temperature

Heat energy that receive from infrared lamp ( $P$ ) and oven chamber wall  $q^{wall}$ ,

$$q^{ab} = FP + q^{wall} \quad (4)$$

where  $F$  - view factor

$P$  - power input (lamp)

from equation (1) may be rewritten

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -\varepsilon\sigma A_r T^4 - hA_a(T - T_a) + FP + q^{wall} + q^{dist} \quad (5)$$

The equation (5) is nonlinear equation which has nonlinear term is  $\varepsilon\sigma A_r T^4$ . The linearization technique applied to this

case, the equation is linearized at the point  $T = \bar{T}$

The nonlinear term ( $\varepsilon\sigma A_r T^4$ ) may be written as

$$\begin{aligned} \varepsilon\sigma A_r T^4 &\cong \varepsilon\sigma A_r \left( \bar{T}^4 + \frac{dT^4}{dT} \Big|_{T=\bar{T}} (T - \bar{T}) \right) \\ &\cong \varepsilon\sigma A_r (\bar{T}^4 + 4\bar{T}^3(T - \bar{T})) \\ &\cong \varepsilon\sigma A_r (4\bar{T}^3 T - 3\bar{T}^4) \end{aligned}$$

Therefore from equation (5) can be obtained as

$$\begin{aligned} mC_p \frac{dT}{dt} &= -(4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a)T + FP + 3\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^4 \\ &\quad + hA_a T_a + q^{wall} + q^{dist} \end{aligned} \quad (6)$$

Equation (6) is divided by  $(\varepsilon\sigma A_r 4\bar{T}^3 + hA_a)$ , we obtain

$$\begin{aligned} \left( \frac{mC_p}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} \right) \frac{dT}{dt} &= -T + \frac{FP}{(4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a)} \\ &\quad + \frac{3\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^4 + hA_a T_a + q^{wall} + q^{dist}}{(4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a)} \end{aligned} \quad (7)$$

from equation (7), we get

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} = -T(t) + KP(t) + \frac{K}{F} \eta(t) \quad (8)$$

where  $\eta(t) = 3\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^4 + hA_a T_a + q^{wall} + q^{dist}$  and  $P = P(t)$

$$\tau = \left( \frac{mC_p}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} \right), K = \frac{F}{(4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a)}$$

Taking the Laplace transform of the equation (8), assuming zero initial conditions, we obtain



$$T(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)} P(s) + \frac{K}{F(\tau s + 1)} \eta(s) \quad (9)$$

By defining  $G(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)}$  (10)

$$G_d(s) = \frac{K}{F(\tau s + 1)} \quad (11)$$

The oven process has the delay time so we can estimate as

$$G_p(s) = G(s)e^{-ds} = \frac{Ke^{-ds}}{(\tau s + 1)} \quad (12)$$

where  $d$  - delay time

Hence the equation (9) is given by

$$T(s) = G_p(s)P(s) + G_d(s)\eta(s) \quad (13)$$

The temperature response of step input with initial temperature of product surface ( $35^\circ\text{C}$ ) is presented in Figure 4. From characteristic of temperature response, we assume its step input response to be linear when we perform the parameter estimation.

$$T(t) = T_p(t) + T_r(t) \quad (14)$$

where  $T(t)$  - product temperature

$T_p(t)$  - heat temperature from infrared lamp

$T_r(t)$  - ambient temperature

By writing the Laplace transform of equation (14) and consider the relation between transfer function of equation (13) and (14), we obtain

$$T(s) = G_p(s)P(s) + T_r(s) \quad (15)$$

where  $T_r(s) = G_d(s)\eta(s)$ ,  $T_p(s) = G_p(s)P(s)$

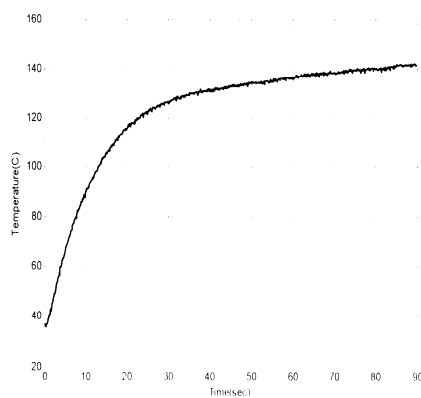


Figure 4. Temperature response of step input

### III. CLOSED-LOOP IDENTIFICATION OF INFRARED OVEN

For the system identification of infrared oven process, it applies the closed-loop system with PID controller is presented in Figure 5.

$$\text{PID controller } G_c(s) = \left( \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \right)$$

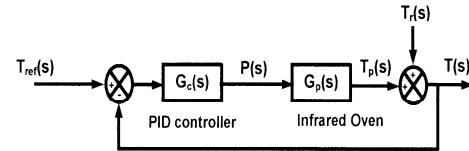


Figure 5. The closed-loop system with PID controller diagram of Infrared oven process

Parameters estimation of the closed-loop control system with PID controller is perform via nonlinear least squares method and optimized parameters of the mathematical model.

$$T(t) = L^{-1} \left( \left( \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \right) T_{ref}(s) + \left( \frac{1}{1 + G_c G_p} \right) T_r(s) \right) \quad (16)$$

where  $\hat{T}(t)$  - the temperature measurement data

The mathematical model of equation (16) is investigated by nonlinear least square method and estimated the parameters  $K$ ,  $\tau$  and  $d$ . We consider the least square error (LSE) function

$$LSE = \sum_{i=1}^n \left( T(t_i) - \hat{T}(t_i) \right)^2 \quad (17)$$

where  $n$  is the number of temperature measurement data

From equation (17), we obtain

$$\text{Minimize } f(K, \tau, d) = \sum_{i=1}^n \left( T_i - \hat{T}_i \right)^2$$

By defining  $z = [K \ \tau \ d]^T$  to minimize  $f(z)$

$$z_k = [K_k \ \tau_k \ d_k]^T$$

where  $k$  - the number of calculation cycle

at  $k = 0$ , we obtain  $z_0 = [K_0 \ \tau_0 \ d_0]^T$  and  $B_0 = I$

The experimental identification of the closed-loop system with the PID controller at  $85^\circ\text{C}$  can be adjusting via difference PID controllers. The identification results of parameter estimation and average model parameters for closed-loop

system with PID controller temperature response at 85 °C are shown in Tables 1. The temperature response of experiment and model are presented in Figure 6.

Table1. Identification results at 85 °C

Test number	PID control parameters			Parameters of Identification Model		
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$K$	$\tau$	$d$
Run 1	0.25	0.04	0.015	10.049	5.3149	1.05
Run 2	0.3	0.06	0.02	9.914	5.9888	1.15
Average				9.982	5.6519	1.10

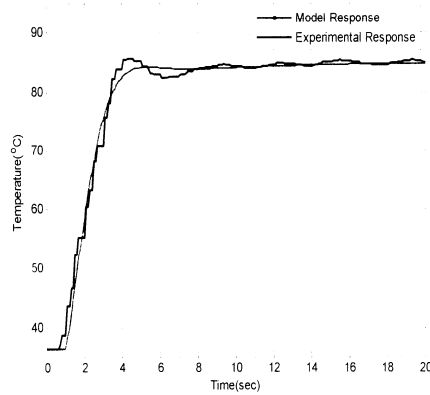


Figure 6. Response of the closed-loop system with the PID controller (Run1) at 85 °C

#### IV. PID CONTROLLER DESIGN

This paper is used response optimization for design PID controller parameters by output signal constrain for unit step input as percent overshoot least than 8 %, rise time least than 4 sec and settling time least than 5.5 sec. The optimization of PID controller with gradient descent method by using output constraint, we obtain  $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$  presented in Table 2.

The optimization problem to determine optimal tuning parameters ( $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$ ) can be represented as

$$f(x_k) = \sum_{i=1}^n (T_i - (T_c))_i^2$$

where  $x_k$  is  $K_p, K_i, K_d$

$T_i$  - model temperature response

$T_c$  - Temperature of output constraint

Table2. PID controller optimize results

PID Controller	
$K_p$	0.36
$K_i$	0.048
$K_d$	0.02

The results of temperature response at 85 °C for closed-loop system with PID controller are presented in Table 3 and Figure 7.

Table3. Model and Experimental response

Model Response				
Set point (°C)	Maximum Overshoot (°C)	Percent Overshoot (%)	Rise time (second)	Settling time (5%) (second)
85	90.23	6.15	3.70	5.44
Experimental Response				
Set point (°C)	Maximum Overshoot (°C)	Percent Overshoot (%)	Rise time (second)	Settling time (5%) (second)
85	91.36	7.48	3.85	5.50

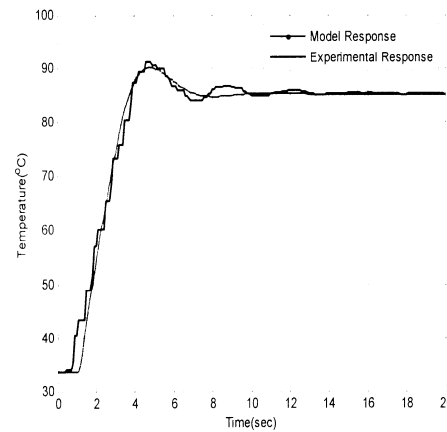


Figure 7. Response of the closed-loop system with PID controller (unit step input at 85 °C)

#### V. CONCLUSION

In the present work, the identification and design PID controller of infrared oven process is considered. The infrared oven process model is identified based on the operation temperature of 85 °C. The nonlinear least squares method can be used to obtain and investigated better reasonable model parameters by using off-line calculations. The gradient descent method can be applied easily to design PID controller.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thankfully acknowledge the research grant from National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC).

#### REFERENCES

- [1] Choi, J.Y. and Do, H.M., 2001. A leaning approach of wafer temperature control in a rapid thermal processing system. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.14, No. 1, pp. 1-10.

- [2] Lord, H. A., 1988. Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.1, No.3, pp.105-114.
- [3] Wonhui Cho., 2005. Temperature control and modeling of the rapid thermal processing chamber. PhD Dissertation, University of Texas at Austin, pp.1-264.
- [4] Wonhui Cho., Thomas F. Edgar and Jietae Lee., 2006. Closed loop identification of wafer temperature dynamics in a rapid thermal process. Korean J.Chem.Eng., Vol.23, No. 2.
- [5] Yeo, Y.K., Kwon, T. I. and Lee, K. W., 2004. An energy effective PID tuning method for the control of polybutadiene latex reactor based on closed-loop identification. Korean J.
- [6] Pramod, S. and Chidambaram, M., 2000. Closed Loop Identification of Transfer Function Model for Unstable Bioreactors for Tuning PID Controllers. Bioprocess Eng., Vol. 22, No. 2, pp.185-188.
- [7] Lin, C. A. and Jan, Y. K., 2001. Control system design for a rapid thermal processing system. IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 9, pp.122-129.

## ประวัติผู้เขียน

นายภาวินทร์ จาวยญ เกิดเมื่อวันที่ 10 กันยายน 2528 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนสวนศรีวิทยา จังหวัดชุมพร ปีการศึกษา 2545 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ปีการศึกษา 2549 ขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนรายวิชาปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จำนวน 2 รายวิชา ได้แก่ วิชาปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ 3 และ 4 ในปี 2549 ได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับสอง จากการแข่งขันหุ่นยนต์เตะฟุตบอลชิงแชมป์ประเทศไทย และในปี 2550 ได้รับรางวัลรองชนะเลิศจากการแข่งขันในรายการเดียวกัน หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรซอฟต์แวร์ สังกัดหน่วยงานการออกแบบ และปรับปรุงพัฒนาเครื่องจักรของบริษัทซีเคท เทคโนโลยี สาขาจังหวัดนครราชสีมา โดยมีประสบการณ์การทำงานเป็นระยะเวลา 2 ปี ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับมหาบัณฑิต สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนรายวิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 ระหว่างการศึกษามีการนำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง “**PID Closed-loop Identification and Design for an Infrared Oven**” ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ “The 2<sup>nd</sup> International Data Storage Technology Conference 2009” ณ ศูนย์ประชุมอูทยานวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 13-15 พฤษภาคม 2552 ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ง.