

การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นและการตรวจสอบเสถียรภาพ  
ของระบบสองมวลความเฉื่อยที่ปรากฏการก้ำทอนเชิงกล

นาย กองพัน อารีรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2544  
ISBN 974-533-012-4

**NONLINEAR IDENTIFICATION AND STABILITY TEST  
FOR A TWO-INERTIA SYSTEM WITH MECHANICAL RESONANCE**

**Mr. Kongpan Areerak**

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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2001**

**ISBN 974-533-012-4**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นและการตรวจสอบเสถียรภาพ  
ของระบบสองมวลความเฉื่อยที่ปรากฏการก้ำก๋อเชิงกล

(Nonlinear Identification and Stability Test for a Two-Inertia System with Mechanical Resonance)

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)  
ประธานกรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ สุจิตกร)  
อาจารย์ที่ปรึกษา/กรรมการ

.....  
(อาจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)  
กรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วราพงษ์ ชำหิศ)  
คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กองพัน อารีรักษ์ : การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบสองมวลความเฉื่อยที่ปรากฏการก้ำทอนเชิงกล

(Nonlinear Identification and Stability Test for a Two-Inertia System with Mechanical Resonance) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สราวุฒ สุจิตจร, 101 หน้า.

ISBN 974-533-012-4

งานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการขยายงานปฏิบัติงานของระบบสองมวลความเฉื่อย ที่มีการปรับแก้รีโซแนนซ์การบิดไว้แล้ว การขยายงานปฏิบัติงานช่วยให้สามารถใช้งานระบบให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด เนื่องจากระบบเดิมมีสมรรถนะที่จำกัดด้วยความไม่เป็นเชิงเส้น การระบุเอกลักษณ์ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น และได้ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอด ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาแบบเพิ่มสุ่มชนิดหนึ่งที่ทรงประสิทธิภาพ วิทยานิพนธ์นี้ได้ให้การทบทวนวิธีดำเนินงานตามหลักการค้นหาแบบตาบอด และนำเสนอวิธีการใหม่เพื่อให้สามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็วและหลุดออกจากการล่อคของคำตอบเฉพาะถิ่นได้ดี เพื่อให้มั่นใจในเสถียรภาพของระบบขยายงาน จึงได้ตรวจสอบเสถียรภาพและเปรียบเทียบผลด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม เกลนซ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม

ผลการระบุเอกลักษณ์ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอด ได้ผลเป็นกลุ่มของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัวปรากฏเป็นตระกูลในส่วนของวิถีป้อนกลับ เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงกำหนดขอบเขตล้อมรอบกลุ่มของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น เป็นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง การตรวจสอบเสถียรภาพ พบว่า ระบบขยายงานสามารถปฏิบัติงานได้ด้วยย่านที่กว้างขึ้น โดยควบคุมความเร็วได้เพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 55.94 ขณะที่มีการประกันเสถียรภาพของระบบได้เป็นอย่างดี

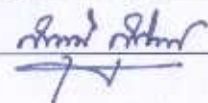
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา



ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา





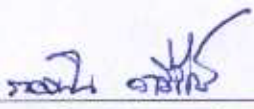
KONGPAN AREERAK : NONLINEAR IDENTIFICATION AND STABILITY TEST  
FOR A TWO-INERTIA SYSTEM WITH MECHANICAL RESONANCE THESIS  
ADVISOR : ASSOC. PROF. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D. 101 PP.  
ISBN 974-533-012-4

NONLINEAR IDENTIFICATION/STABILITY/TABU SEARCH/TWO-INERTIA SYSTEM

This research attempts to extend the operational range of a two-inertia system which is precompensated for torsional resonance. Its objective is to maximally utilize the system of which performance is limited by nonlinearity therein. Tabu Search (TS) plays an important role on the identification of such nonlinear characteristics. The thesis reviews the TS method, a kind of efficient stochastic search ones. The work proposes a new technique incorporated into the conventional TS for faster search performance and better avoidance of being trapped by local optimum solutions. The stability of the extended system is investigated using the describing function, the Popov's criterion, and the circle criterion methods, respectively.

The modified TS results in a family of nonlinear saturation characteristics in the feedback path of the control loop. The upper and lower limits of these nonlinear characteristics are employed for the stability test. The speed output of the extended system can be increased by 55.94 % and the system's stability is guaranteed.

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ล่วงหน้าด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ เป็นอย่างดี กล่าวคือ

- รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก ได้สอนให้ข้าพเจ้าได้รู้จักความรับผิดชอบ ความเข้มแข็งในการทำวิจัย ด้วยความเมตตาเสมอมา และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

- อาจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว และอาจารย์ณรงค์ชัย กุลวรรณิษพงษ์ ที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับวิธีการค้นหาแบบตาม ตลอดจนคำแนะนำในการพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

- คุณประพล จาระตะคุ ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เดชา พวงดาวเรือง ที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้น

- เพื่อนร่วมเรียนระดับปริญญาโทที่ทำให้กำลังใจ ในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด  
ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

กองพัน อารีรักษ์

26 กรกฎาคม 2544

## สารบัญ

### หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
<b>2 การทดสอบระบบสองมวล.....</b>	<b>6</b>
2.1 บทนำ.....	6
2.2 การทดสอบระบบสองมวล.....	8
2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์.....	11
2.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	11
2.3.2 ผลการเปรียบเทียบ.....	12
2.4 สรุป.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

<b>3</b>	<b>การค้นหาแบบตามู.....</b>	<b>16</b>
3.1	บทนำ.....	16
3.2	องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตามู.....	16
3.3	อธิบายกลไกการทำงาน ของวิธีการค้นหาแบบตามูที่สร้างขึ้น.....	17
3.3.1	ความหมายของศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน.....	17
3.3.2	หลักการทำงาน.....	17
3.4	การทดสอบอัลกอริทึม.....	22
3.5	บทสรุป.....	26
<b>4</b>	<b>การหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น.....</b>	<b>27</b>
4.1	บทนำ.....	27
4.2	การจำลองสถานการณ์ระบบ.....	27
4.2.1	วิธีดำเนินงาน.....	28
4.2.2	ผลการจำลองสถานการณ์.....	32
4.3	วิธีการค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู.....	35
4.4	ผลการจำลองสถานการณ์.....	41
4.5	บทสรุป.....	46
<b>5</b>	<b>การตรวจสอบเสถียรภาพ.....</b>	<b>47</b>
5.1	บทนำ.....	47
5.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม.....	48
5.2.1	ทบทวนวิธีฟังก์ชันพหุนาม.....	48
5.2.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ปรากฏรีโซแนนซ์การบิด ด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม.....	51
5.3	การวิเคราะห์ด้วยเกณฑ์ของโพพอฟ.....	53
5.3.1	ทบทวนเกณฑ์ของโพพอฟ.....	53

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ปรากฏรีโซแนนซ์การบิด ด้วยเกณฑ์ของโพพอฟ.....	57
5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์วงกลม.....	59
5.4.1 ทบทวนเกณฑ์วงกลม.....	59
5.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ปรากฏรีโซแนนซ์การบิด ด้วยเกณฑ์วงกลม.....	61
5.5 สรุป.....	62
<b>6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>63</b>
6.1 บทนำ.....	63
6.2 สรุป.....	63
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>65</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมวิธีการค้นหาแบบตาบ.....	70
ภาคผนวก ข. โปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	73
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการจำลองสถานการณ์ในโดเมนเวลา ด้วยเทคนิคไบลิ เนียร์.....	75
ภาคผนวก ง. ฟังก์ชันพรรณนาของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมตัว.....	78
ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	87
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>101</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้าที่
2.1	ความเร็วที่วัดได้จากการทดสอบ.....	9
2.2	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการจำลองสถานการณ์ ด้วยคอมพิวเตอร์ที่แรงดันอินพุตระดับต่างๆ.....	15
3.1	ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน.....	17
3.2	การเก็บค่าต่างๆไว้ใน neighbor_list .....	20
3.3	แสดงผลการทดสอบอัลกอริทึมกรณีต่างๆ.....	26
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตามู.....	44
4.2	เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างระบบเชิงเส้นกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	45
4.3	ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดขอบเขตของลักษณะเฉพาะไม่เชิงเส้น.....	46
5.1	ตารางผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบเสถียรภาพทั้ง 3 วิธี.....	62



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้าที่
1.1 ผลการทดลองที่เกิดรีโซแนนซ์การบิดในระบบสองมวล (1V=143 rpm) (ซัชชัช อุทัยวสิน, 2543).....	2
1.2 ผลการทดลองเมื่อนำตัวชดเชยเชื่อมต่อเข้ากับระบบสองมวล (1V=143 rpm) (ซัชชัช อุทัยวสิน, 2543).....	2
2.1 แผนภาพแสดงระบบทางกายภาพของระบบสองมวล (ซัชชัช อุทัยวสิน, 2543).....	6
2.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบสองมวลที่สร้างขึ้น.....	7
2.3 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นอัตราเร็วจากการทดสอบ.....	8
2.4 แผนภาพแทนระบบที่มีการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบสองมวล (ซัชชัช อุทัยวสิน, 2543) ซึ่งเป็นแผนภาพสั่งการ SIMULINK ให้จำลองสถานการณ์.....	10
2.5 โปรแกรมสำหรับการดำเนินการเปรียบเทียบผลการทดสอบ กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์.....	11
2.6 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์.....	12
2.7 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์.....	12
2.8 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.5 โวลต์.....	13
2.9 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์.....	13
2.10 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.9 โวลต์.....	14
2.11 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 2.1 โวลต์.....	14
3.1 ลักษณะของพื้นที่ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ.....	18
3.2 กระบวนการทำงานของการค้นหาแบบตามู.....	18
3.3 แผนภูมิแสดงการทำงานของอัลกอริทึมที่อาศัยหลักการของวิธีการค้นหาแบบตามู... ..	19
3.4 ภาพแสดงการทำงานในช่วง back_tracking.....	21
3.5 แผนภูมิแสดงการทำงานในส่วนของ back_tracking .....	21
3.6 ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor=15 และ radius=0.10.....	23
3.7 ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor=30 และ radius=0.10.....	23
3.8 ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor=50 และ radius=0.10.....	24

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
3.9	ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor=15 และ radius=0.05.....24
3.10	ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor=15 และ radius=0.20.....25
3.11	ความสามารถของอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบ..... 25
4.1	สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของระบบรวม..... 28
4.2	คำสั่งใช้สำหรับการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยในวิถีไปหน้า จากโดเมนเอสไปเป็น โดเมนแซด..... 29
4.3	การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1..... 31
4.4	การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2..... 31
4.5	การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 3..... 32
4.6	การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 4..... 32
4.7	การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB กับ SIMULINK....33
4.8	บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วย SIMULINK.....34
4.9	แผนภาพแสดงการดำเนินงานค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น..... 35
4.10	ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีแรก..... 36
4.11	ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีที่สอง..... 36
4.12	ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีที่สาม..... 37
4.13	ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีที่สี่..... 37
4.14	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีแรก เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์.....38
4.15	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สอง เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์..... 39
4.16	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สาม เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์..... 40
4.17	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สาม เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์.....40

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้าที่
4.18 ผลการค้นหาแบบตาบอดที่อินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์ สอดคล้องกับสมมติฐานกรณีที่ดี.....	41
4.19 ผลการค้นหาแบบตาบอดที่อินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์ สอดคล้องกับสมมติฐานกรณีที่ดี.....	42
4.20 ผลการค้นหาแบบตาบอดที่อินพุตเท่ากับ 1.5 โวลต์ สอดคล้องกับสมมติฐานกรณีที่ดี.....	42
4.21 ผลการค้นหาแบบตาบอดที่อินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์ สอดคล้องกับสมมติฐานกรณีที่ดี.....	43
4.22 ผลการค้นหาแบบตาบอดที่อินพุตเท่ากับ 1.9 โวลต์ สอดคล้องกับสมมติฐานกรณีที่ดี.....	43
4.23 ผลการค้นหาแบบตาบอดที่อินพุตเท่ากับ 2.1 โวลต์ สอดคล้องกับสมมติฐานกรณีที่ดี.....	44
4.24 พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ระดับอินพุตต่างๆ.....	45
5.1 การประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นในรูปอัตราขยายสมมูล.....	48
5.2 ระบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	50
5.3 เกณฑ์เสถียรภาพโคเชนเบอร์เกอร์ (Kochenberger stability criterion).....	51
5.4 ระบบสองมวลที่ปรากฏความไม่เป็นเชิงเส้น.....	51
5.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม.....	53
5.6 ระบบป้อนกลับสำหรับเกณฑ์ของโพพอฟและเกณฑ์วงกลม.....	54
5.7 ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่ล้อมรอบด้วยเซกเตอร์ $[0, K]$ .....	54
5.8 แผนภาพในโดเมนความถี่ใช้สำหรับการพิจารณาตามเกณฑ์ของโพพอฟ.....	56
5.9 ขั้นตอนการปรับโครงสร้างของระบบให้สอดคล้องกับวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ.....	58
5.10 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของโพพอฟ.....	59
5.11 ขอบเขตลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่ล้อมรอบด้วยเซกเตอร์ $[\alpha, \beta]$ .....	60
5.12 ความหมายเชิงกราฟฟิกของเกณฑ์วงกลม.....	60
5.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์วงกลม.....	61

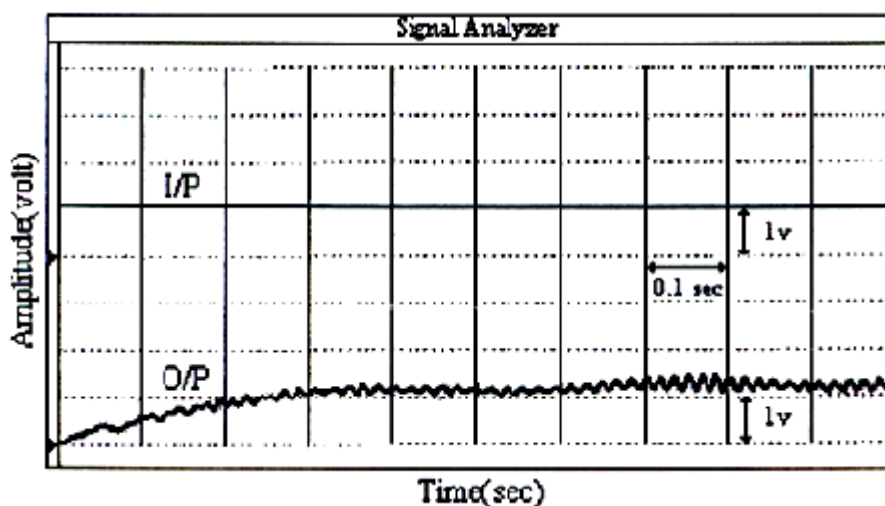
# บทที่ 1

## บทนำ

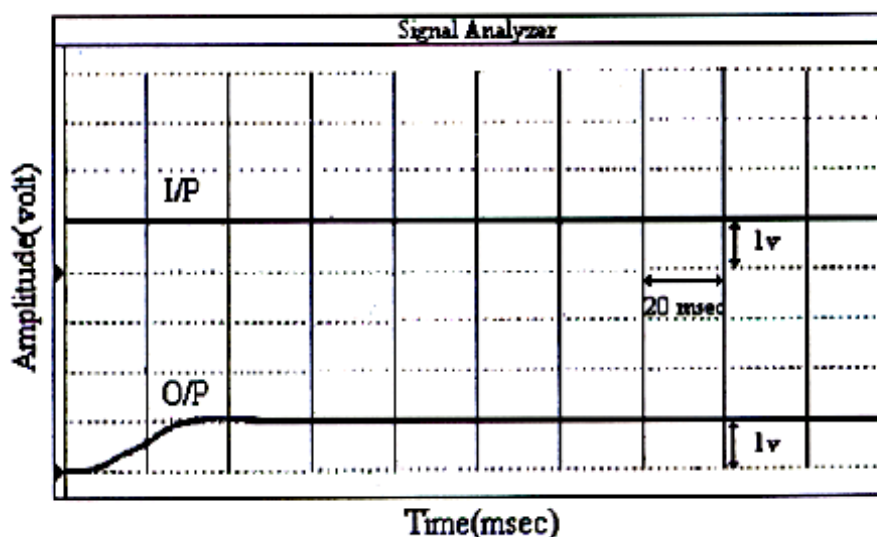
### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมที่ต้องใช้งานระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามักประสบปัญหาเนื่องมาจากรีโซแนนซ์การบิด (torsional resonance) ซึ่งเป็นการกำทอนเชิงกลในขณะหมุนของมอเตอร์ เพลา และโหลดที่ต่อกัน การที่เพลาบิดตัวทำให้เกิดความแตกต่างของการหมุนในตำแหน่งเชิงมุมตลอดแนวเพลา ตำแหน่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ที่กระตุ้นรวมถึงพารามิเตอร์ทางพลวัตของระบบและบางความถี่อาจส่งผลให้เกิดมุมของการบิดตัวมีเฟสตรงข้ามกัน เป็นผลให้เกิดการเพิ่มขนาดของการบิดตัว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า รีโซแนนซ์การบิด ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางกล ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ เช่น บารองเพลา ตัวคู่ควบฯ มีอายุการใช้งานสั้นลง ระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่าย และมีสมรรถนะที่ด้อยลง คณะวิจัยต่างประเทศ ได้เสนอเทคนิคการแก้ปัญหาการสั่นจากแรงบิดด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การควบคุมความเร็วด้วยตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) และสถานะอันดับสองเชิงเส้น (Ji and Sul, 1995) การใช้ตัวสังเกตตามหลักการป้อนกลับสถานะ (Song, et al., 1993) การเลือกอัตราป้อนกลับสถานะที่เหมาะสม (Fujikawa, et al., 1991) การควบคุมแบบปรับตัวตามหลักการ  $H_\infty$  (Hirata, et al., 1995) การควบคุมความเร็วแบบอัตราขยายอันดับสองเชิงเส้น ด้วยการชดเชยแรงบิดโหลดป้อนไปหน้า (Ji, et al., 1993) คณะผู้วิจัยไทย (Sujitjorn, U-Thaiwasin, and Prempraneerat, 2000) ได้เสนอแนวทางแก้ไขปัญหานี้ ด้วยการชดเชยทางพลวัตบนรากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมคงทน ออกแบบด้วยการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร โครงสร้างของระบบควบคุมเป็นชนิด 2 ระดับความอิสระ ตัวชดเชยให้สมรรถนะในการกำจัดรีโซแนนซ์การบิดและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วน่าพึงพอใจ นั่นคือ ให้ผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่อย่างรวดเร็ว สามารถกำจัดการสั่นจากแรงบิดของผลตอบสนอง และกำจัดสัญญาณรบกวนภายนอกได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่มีค่าผิดพลาดสถานะอยู่ตัว ผลการทดลองระบบสองมวลก่อนมีการชดเชย แสดงได้ในภาพที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบช้าและเกิดการสั่นไกวอันเนื่องมาจากรีโซแนนซ์การบิด เมื่อนำตัวชดเชยที่ได้จากงานวิจัยข้างต้นเชื่อมต่อเข้ากับระบบสองมวล เพื่อชดเชยการตอบสนอง โดยการทดสอบผลตอบสนองใน

โดเมนเวลา เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดขนาด 1 โวลต์และเอาต์พุตของระบบที่เป็นความเร็วของโพลวัตได้จากเซนเซอร์ แสดงได้ดังภาพที่ 1.2 แต่การใช้งานของระบบดังกล่าวจำกัดไว้ที่อัตราเร็วรอบ 143 rpm ซึ่งเป็นระดับอัตราเร็วรอบต่ำสุดที่ระบบก่อนชดเชยยังคงความเป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 1.1 ผลการทดลองที่เกิดรีโซแนนซ์การบิดในระบบสองมวล (1V=143 rpm)  
(ชัชชัย อุทัยวสิน, 2543)



ภาพที่ 1.2 ผลการทดลองเมื่อนำตัวชดเชยเชื่อมต่อเข้ากับระบบสองมวล (1V=143 rpm)  
(ชัชชัย อุทัยวสิน, 2543)

แม้ว่าการชดเชยเพื่อแก้ไขปัญหารีโซแนนซ์การบิดพิจารณาที่จุดปฏิบัติงานเดียว คือที่ 143 rpm หากเราสามารถขยายย่านการทำงานของระบบโดยยังคงใช้ชุดการชดเชยเดิม ก็จะเป็นการใช้งานระบบอย่างคุ้มค่า ความพยายามขยายย่านการทำงานดังกล่าวจำเป็นต้องมีหลักประกันด้านสมรรถนะและเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอผลงานวิจัย ที่แสดงการทดสอบสมรรถนะของระบบที่มีการปรับแก้รีโซแนนซ์การบิด เมื่อขยายย่านการทำงานโดยรอบจุดปฏิบัติงานเดิม จึงปรากฏลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น และนำเสนอการตรวจสอบเสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบควบคุมชุดนี้ เพื่อให้มั่นใจในเสถียรภาพของระบบที่ขยายย่านการทำงาน

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อระบุเอกลักษณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบสองมวล
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อขยายย่านการทำงาน
3. เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการต่างๆ

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวชดเชยและระบบสองมวลที่ใช้ในการทดสอบได้จากงานวิจัยที่ได้เคยเผยแพร่มาก่อนแล้ว (Sujitjorn, U-Thaiwasin, and Prempraneerat, 2000)
2. การหาแบบจำลองของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบอด (Bland and Dawson, 1991 )

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดสอบระบบสองมวลความถี่ที่มีการชดเชยแล้ว เพื่อเก็บข้อมูลสมรรถนะไม่เป็นเชิงเส้น
2. การค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์
3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะทำการวิเคราะห์ด้วย 3 วิธี เพื่อเปรียบเทียบผล



## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ดำเนินการทดสอบระบบสองมวลความเฉื่อย เมื่อปรับอินพุตเป็นขั้นบันไดมีขนาด 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 โวลต์ตามลำดับ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบสมรรถนะและเสถียรภาพของระบบในกรณีที่มีย่านการทำงานที่กว้างขึ้น
2. ดำเนินการจำลองสถานการณ์ระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB<sup>TM</sup> และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริง
3. ศึกษาวิธีการค้นหาแบบตาบู่
4. ดำเนินการวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองของระบบและทำการค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ว่ามีลักษณะและตำแหน่งอยู่ส่วนใดในระบบ โดยอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบตาบู่
5. ดำเนินการสร้างแบบจำลองของระบบเพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน โดยการจำลองสถานการณ์ในโดเมนเวลาด้วยสมการดิฟเฟอเรนซ์ ที่ได้จากการแปลงแบบจำลองต่อเนื่องด้วยเทคนิคไบลิเนียร์
6. ดำเนินการทดสอบอัลกอริทึมที่ได้สร้างขึ้น เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง
7. นำแบบจำลองของระบบที่ถูกต้องแล้ว มาดำเนินการทดสอบสมรรถนะของระบบที่ประกอบด้วยลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น
8. ศึกษาเทคนิคต่างๆ สำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้น
9. ดำเนินการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา (describing function) เกณฑ์ของโปพอฟ (Popov's criterion) และเกณฑ์วงกลม (circle criterion) เพื่อเปรียบเทียบผล

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองของระบบที่สมจริง ปรากฏความไม่เป็นเชิงเส้น
2. สามารถนำวิธีการทางด้านปัญญาประดิษฐ์มาใช้ประโยชน์ทางการระบุเอกลักษณ์ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถทราบข้อจำกัดทางสมรรถนะของระบบที่ปรากฏการกำทอนเชิงกลชนิดที่เป็นรีโซแนนซ์การบิดที่ได้รับการปรับแก้แล้ว
4. สามารถทราบขอบเขตขยายย่านการทำงานของระบบที่ยังคงให้สมรรถนะที่น่าพอใจ

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 5 ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการทดสอบระบบสองมวลของงานวิจัยที่ได้ทำไว้แล้ว (ซัชชัย อุทัยสิน, 2543) โดยจะกล่าวถึงวิธีดำเนินการทดสอบ ผลการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการพิจารณาหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการค้นหาแบบตาบู่ในรูปดั้งเดิม รวมทั้งอธิบายการทำงานของอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการของวิธีการดังกล่าว และแสดงผลการทดสอบอัลกอริทึม

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ วิธีการทดลอง โครงสร้างของการจำลองสถานการณ์และผลการค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ พร้อมทั้งสรุปผลที่ได้ทั้งหมด

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ ที่อาศัยวิธีฟังก์ชันพหุนาม เหน้ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม ทั้ง 3 วิธีกระทำในโดเมนความถี่ พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 6 เป็นบทสรุป และข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. โปรแกรมวิธีการค้นหาแบบตาบู่

ภาคผนวก ข. โปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ภาคผนวก ค. โปรแกรมการจำลองสถานการณ์ในโดเมนเวลาด้วยเทคนิคไบลิเนียร์

ภาคผนวก ง. ฟังก์ชันพหุนามของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัว

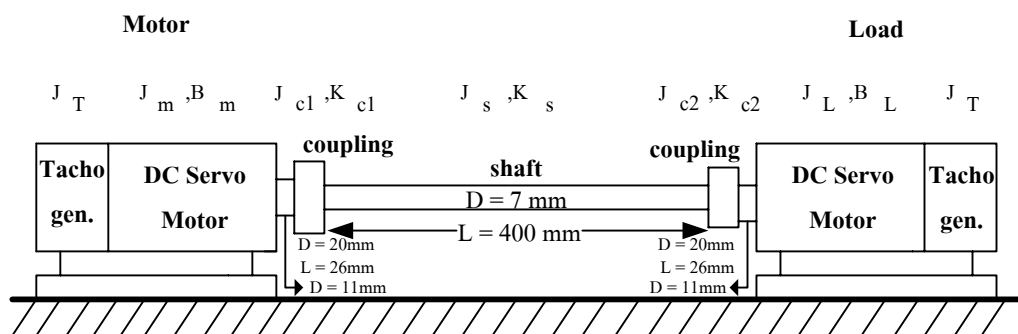
ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

## บทที่ 2

### การทดสอบระบบสองมวล

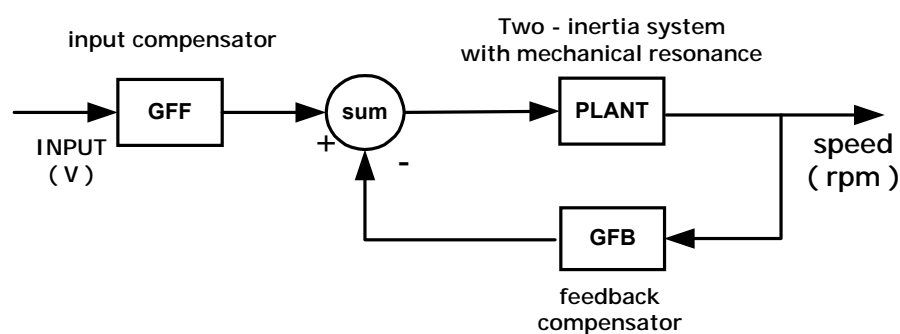
#### 2.1 บทนำ

การพิจารณาระบบที่ (Sujitjorn, et al., 2000) ได้เสนอแนวทางแก้ไขปัญหาเพื่อกำจัดริโซแนนซ์การบิดในระบบสองมวลความถี่ต่ำ ด้วยการชดเชยทางพลวัตบนรากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมคงทน ออกแบบด้วยการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร ตัวชดเชยให้สมรรถนะในการกำจัดการกำทอนและให้การตอบสนองที่รวดเร็วน่าพึงพอใจ แต่การใช้งานของระบบดังกล่าวจำกัดไว้ที่ความเร็วรอบ 143 rpm เนื่องจากถูกจำกัดด้วยความอึดตัวแบบไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถยายกำลังสำหรับขับเคลื่อน งานวิจัยดังกล่าวพิจารณาเฉพาะย่านที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาย่านการทำงานที่กว้างขึ้น เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับการใช้งานจริงอย่างคุ้มค่า งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาย่านการทำงานของระบบที่กว้างขึ้น โดยอาศัยตัวชดเชยชุดเดิมจากงานวิจัยข้างต้น เพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจในการขยายย่านการทำงานของระบบควบคุมชุดนี้ ให้ใช้งานในย่านที่กว้างที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ เสถียรภาพและผลการตอบสนองของระบบ



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงระบบทางกายภาพของระบบสองมวล (ชัชชัย อุทัยวสิน, 2543)

การพิจารณาระบบในย่านการทำงานที่กว้างขึ้น สิ่งแรกที่ต้องกระทำ คือ การค้นหา ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบว่ามีลักษณะอย่างไร และปรากฏที่ตำแหน่งใดบ้าง ดังนั้นใน ส่วนแรกของงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบ ตามู ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระบบดังภาพที่ 2.1 (รายละเอียดในการทดสอบ รวบรวมไว้ในบทนี้) ระบบที่ทำการทดสอบประกอบด้วย ตัวขับเคลื่อนโรตอร์ ทำหน้าที่จ่าย กำลังให้มอเตอร์ และคอยตัดสัญญาณอินพุตไม่ให้เกินระดับใดระดับหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้ มอเตอร์เกิดความเสียหาย ตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับ (feedback compensator) ทำหน้าที่กำจัดการรบกวนและรักษาเสถียรภาพของระบบ ตัวชดเชยในวิถีไปหน้า(forward compensator)หรือตัวชดเชย อินพุต (input compensator) หรือ พรีฟิลเตอร์ (prefilter) มีผลต่อการปรับปรุงสมรรถนะและผล ตอบสนองของระบบให้ได้ตามต้องการ



ภาพที่ 2.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบสองมวลที่สร้างขึ้น

แบบจำลองของระบบสองมวล  $G_p(s)$  ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ ARX (autoregressive with exogenous variables) ส่วนการออกแบบตัวชดเชยในวิถีไปหน้า  $G_{FF}(s)$  และตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับ  $G_{FB}(s)$  อาศัยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร แบบคงทนที่มีโครงสร้างแบบ 2 ระดับความเสรี (2-degree-of-freedom: 2-DOF) โดยใช้เทคนิคที่ขจัดชนิดเชิงเส้น (ซัชชัย อุทัยวสิน, 2543) องค์กร ประกอบทั้ง 3 มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงด้วยสมการ (2-1) ถึง (2-3)

$$G_p(s) = \frac{1.325 \times 10^6}{s^3 + 13.388s^2 + 16.297 \times 10^4 s + 73.117 \times 10^4} \quad (2-1)$$

$$G_{FF}(s) = 15.093 \frac{s^3 + 6 \times 10^3 s^2 + 1.2 \times 10^7 s + 8 \times 10^9}{s^3 + 7.186 \times 10^3 s^2 + 19.160 \times 10^6 s} \quad (2-2)$$

$$G_{FB}(s) = \frac{16.84 \times 10^3 s^3 + 69.67 \times 10^5 s^2 + 14.98 \times 10^8 s + 12.07 \times 10^{10}}{s^3 + 7.18 \times 10^3 s^2 + 19.16 \times 10^6 s} \quad (2-3)$$

## 2.2 การทดสอบระบบสองมวล

การทดสอบระบบสองมวล เป็นขั้นตอนที่สำคัญและเป็นจุดเริ่มต้นของการทำงานวิจัยนี้ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ จะเป็นประโยชน์อย่างมากเพื่อนำไปใช้ค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น และยังนำไปประกอบการตัดสินใจในการตั้งสมมุติฐานลักษณะรูปร่างของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นภายในระบบอีกด้วย ดังนั้นการทดสอบระบบสองมวลถือเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย การดำเนินการทดสอบระบบสองมวลมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบระบบที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1 โวลต์ (จุดปฏิบัติการ) โดยใช้อุปกรณ์การทดสอบตามภาพที่ 2.1

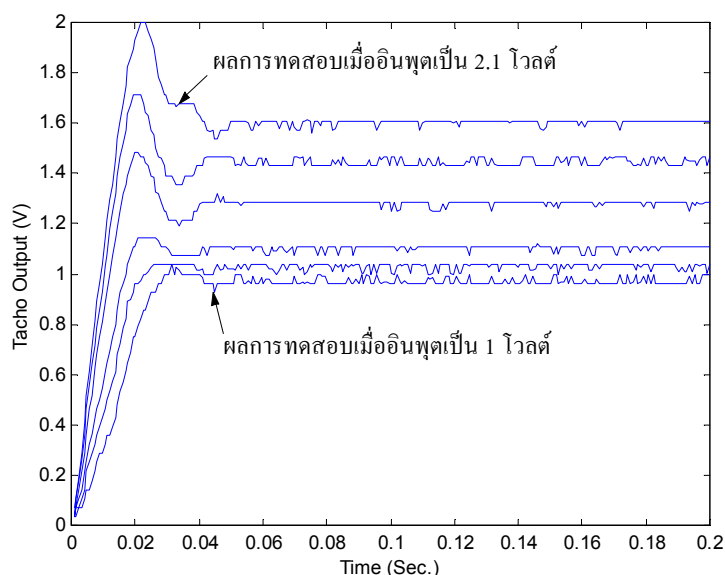
ขั้นตอนที่ 2 วัดอัตราเร็วที่โหลด (ถือเป็นเอาต์พุตของระบบ) และบันทึกรูปคลื่น

ขั้นตอนที่ 3 จัดเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-3 โดยเปลี่ยนแรงดันอินพุตเป็น 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 โวลต์ ตามลำดับ

จากขั้นตอนการทดสอบดังกล่าว ผลที่ได้จากการทดสอบระบบสองมวล แสดงไว้ดังภาพที่ 2.3

ผลการทดสอบระบบสองมวล



ภาพที่ 2.3 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นอัตราเร็วจากการทดสอบ

ผลการทดสอบระบบสองมวลความเฉื่อย ดังที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอนข้างต้น ได้รับการแสดงไว้ดังภาพที่ 2.3 และอัตราเร็วคงตัวที่วัดได้จากการทดสอบ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 สังเกต

ตารางที่ 2.1 ความเร็วที่วัดได้จากการทดสอบ

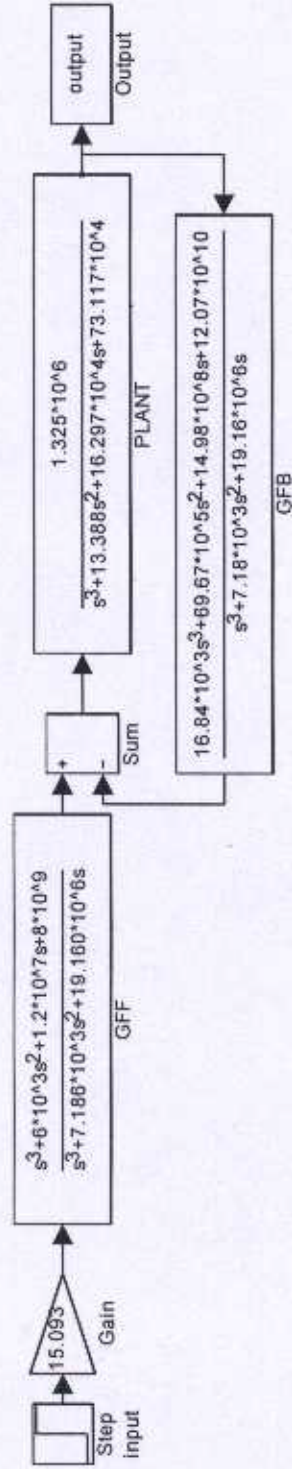
อินพุต (โวลต์)	ความเร็ว (rpm)	เอาต์พุตของทาโคมิเตอร์ (V)
1.0	143	0.95
1.1	144	0.98
1.3	146	1.04
1.5	150	1.10
1.7	179	1.30
1.9	201	1.42
2.1	223	1.60

จากผลการทดสอบได้ว่าเมื่อมีการขยายงานการทำงานของระบบดังกล่าว ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง สาเหตุหลักที่ทำให้ระบบมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นนั้น อาจเกิดได้จาก

- การอิมิตัวของออปแอมป์ในส่วนของตัวชดเชยไปหน้าและตัวชดเชยป้อนกลับ (Atherton, 1982)
- การอิมิตัวของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ (Hassul, 1993)
- เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็น ดีซี เซอร์โวมอเตอร์ 2 ตัวของบริษัท ซันโย เดนกิ (Sanyo Denki Co., Ltd) รุ่น U178T ซึ่งมีทาโคมิเตอร์ต่อคู่ควบอยู่ด้วย ผนวกกับตัวขับ (driver) รุ่น PDT-203-30 ของบริษัทเดียวกัน วงจรขยายกำลังของอุปกรณ์ดังกล่าวมีระบบนิรภัย คอยตัดทอนสัญญาณอินพุตไม่ให้เกินระดับใดระดับหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย

จากผลการทดสอบและสมมุติฐานข้างต้น แสดงว่า การขยายงานการทำงานของระบบสองมวลความเฉื่อยของงานวิจัยที่ได้ทำไว้แล้ว ระบบดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อเป็นการยืนยันสมมุติฐานดังกล่าว จึงทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบในภาพที่ 2.3 กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์อาศัยแบบจำลองเชิงความสัมพันธ์ตามสมการ (2-1) (2-2) และ (2-3) นำมาสร้างเป็นแบบจำลองของระบบรวมทั้งมีโครงสร้างดังภาพที่ 2.2 รายละเอียดวิธีการดำเนินงานและผลการเปรียบเทียบจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.3





ภาพที่ 2.4 แผนภาพแทนระบบที่มีการกำจัดรีโชนแชนซ์การบิดไซในระบบสองมวล (รัชชัย อุทัยวสิน, 2543)

ซึ่งเป็นแผนภาพสั่งการ SIMULINK ให้จำลองสถานการณ์

## 2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

### 2.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ดำเนินการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบที่สนใจในขณะนี้อาจแทนด้วยแผนภาพที่ 2.4 โดยใช้ SIMULINK ใน MATLAB

ขั้นตอนที่ 2 เปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์กับผลการทดสอบระบบสองมวลที่ได้ทำการทดสอบจริง โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงรายละเอียดคังภาพที่ 2.5

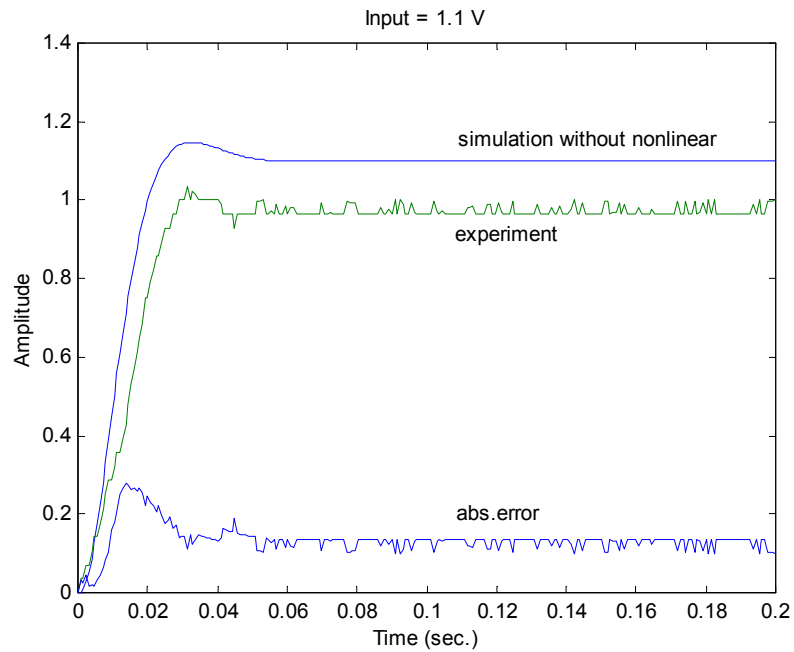
ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนชนิดผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (sum square error: sse) เพื่อแสดงว่าการขยายงานการทำงานของระบบสองมวลความเฉื่อย จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ที่เกิดขึ้นภายในระบบ

```
%This program loads DATA obtained from
experiments conducted, calculates absolute
errors, and displays relevant data
graphically.
load data11
%set time
%t1 : time for response from SIMULINK
%tt : time for response from experiment
t1=0:0.2/2000:0.2;
tt=0:0.2/249:0.2;
%set number of DATA from experiment(data11)
%and simulation(y11) equal to 250 points
%By function 'selectx' written by Kongpan
%Areerak to perform data conversion necessary
[xsim,xsc,t_def]=selectx(y11,t1,data11,tt,250);
%plot graph compare between output from
%experiment and SIMULINK
plot(t_def,xsim,t_def,xsc)
hold on
plot(t_def,abs(xsim-xsc))
gtext('experiment')
gtext('simulation without nonlinear')
gtext('abs.error')
title('Input = 1.1 V')
xlabel('Time (sec.)')
ylabel('Amplitude')
hold off
```

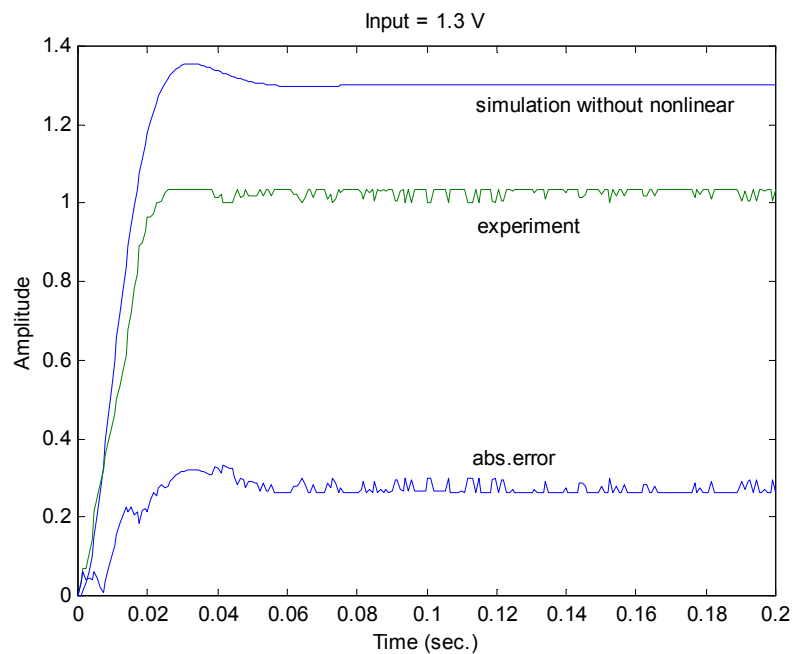
ภาพที่ 2.5 โปรแกรมสำหรับการดำเนินการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

### 2.3.2 ผลการเปรียบเทียบ

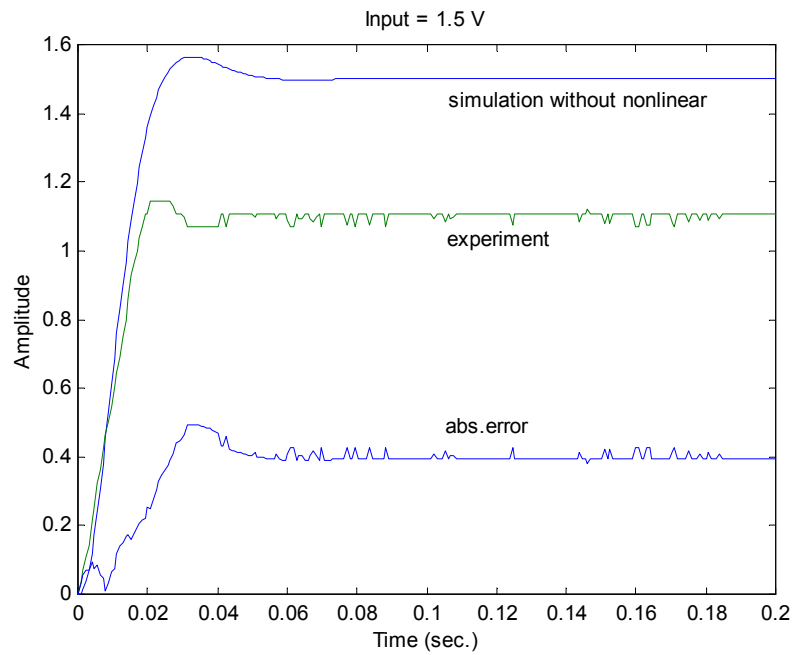
จากการดำเนินงานตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.3.1 ผลที่ได้เป็นดังนี้



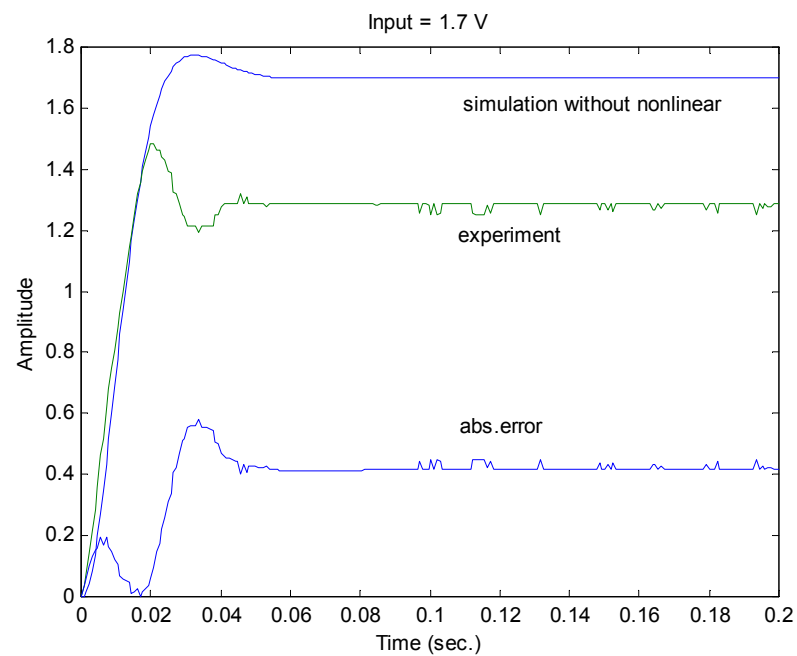
ภาพที่ 2.6 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์



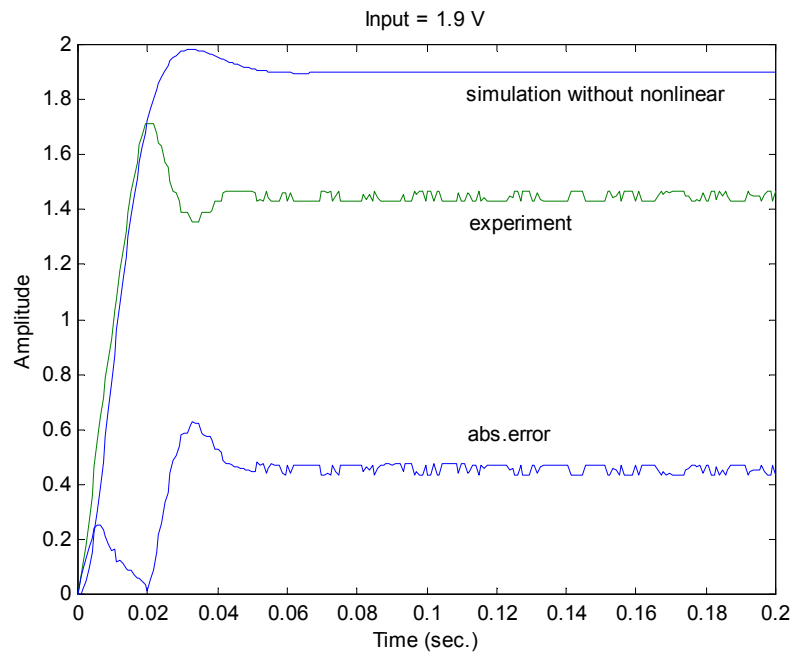
ภาพที่ 2.7 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์



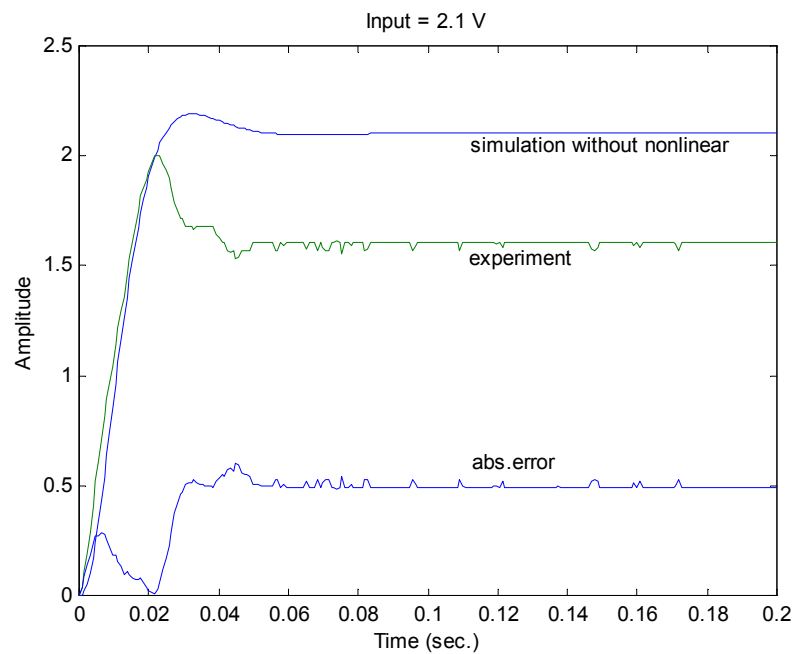
ภาพที่ 2.8 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.5 โวลต์



ภาพที่ 2.9 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์



ภาพที่ 2.10 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.9 โวลต์



ภาพที่ 2.11 การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 2.1 โวลต์

จากผลการเปรียบเทียบดังภาพที่ 2.6 ถึง 2.11 พบว่าผลการทดสอบจริงกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนที่แรงดันอินพุตต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.2** แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่แรงดันอินพุตระดับต่างๆ

อินพุต (โวลต์)	ความคลาดเคลื่อน (sum square error)
1.1	4.9457
1.3	17.8222
1.5	36.8377
1.7	40.5674
1.9	48.6716
2.1	54.9896

## 2.4 สรุป

จากผลการเปรียบเทียบในหัวข้อ 2.3 พบว่าผลการทดสอบจริงกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อทำการขยายงานการทำงาน ผลจากการอิมิตัวของออปแอมป์ในส่วนของตัวชดเชย การอิมิตัวของสนามแม่เหล็กในตัวมอเตอร์ และ วงจรขยายกำลังของอุปกรณ์ดังกล่าวมีระบบนิรภัยคอยตัดทอนสัญญาณอินพุตไม่ให้เกินระดับใดระดับหนึ่งไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการขยายงานการทำงานระบบสองมวลความเฉื่อยของงานวิจัยที่ได้ทำไว้แล้ว ระบบดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้น ในบทที่ 3 และ 4 จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู ซึ่งเป็นวิธีการที่ค้นหาคำตอบได้รวดเร็วและให้คำตอบที่ใกล้กับจุดคำตอบที่ดีที่สุด (near global) ถ้าเทียบกับวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ (Sujitjorn and Kulworawanichpong, 2001)



## บทที่ 3

### การค้นหาแบบตาบ

#### 3.1 บทนำ

วิธีการค้นหาแบบตาบ เป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Glover F. เป็นผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดวิธีการค้นหาแบบตาบไว้เมื่อปี ค.ศ. 1977 ซึ่งได้รับการอธิบายไว้ใน (Bland and Dawson, 1991) และหลังจากนั้นก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นวงกว้าง (near global optimum) (Mantawy et al., 1998; Kaplan et al., 1998; Bland, and Dawson, 1991) นอกจากนี้เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการค้นหาแบบการโปรแกรมกำลังสองตามลำดับ (sequential quadratic programming), การโปรแกรมวิวัฒนาการ (evolutionary programming) และการค้นหาแบบตาบ (tabu search) (Sujitjorn and Kulworawanichpong, 2001) กับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าวิธีการค้นหาแบบตาบมีสมรรถนะที่ดีที่สุด ทั้งด้านความแม่นยำในคำตอบและความเร็วในการค้นหา รวมถึงผู้ใช้สามารถออกแบบการเคลื่อนย้ายและเงื่อนไขต่างๆของตาบ ให้มีความเหมาะสมกับระบบที่สุด ดังนั้นในบทนี้จึงอธิบายถึงการทำงานของอัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับงานวิจัยนี้

#### 3.2 องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบ

การค้นหาแบบตาบเป็นขั้นตอนวิธีการคิดที่นำมาประยุกต์ใช้กับการหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบที่แตกต่างจากวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ คือ มีเกณฑ์ความเป็นตาบ (tabu list criteria) และมีเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criteria) ซึ่ง

- “เกณฑ์ความเป็นตาบ” เป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหาอื่นๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด หลักการออกแบบเกณฑ์ความเป็นตาบ จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิด

- “เกณฑ์ความปรารถนา” เป็นเงื่อนไขที่จะใช้ในบางครั้งที่เป็นจำเป็นต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นตาบู่ งานบางชนิดที่ปัญหาไม่ซับซ้อนไม่จำเป็นต้องฟังส่วนนี้ก็ได้ เกณฑ์ความเป็นตาบู่อย่างเดียวกันก็เพียงพอที่จะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

### 3.3 อธิบายกลไกการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบู่ที่สร้างขึ้น

#### 3.3.1 ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน

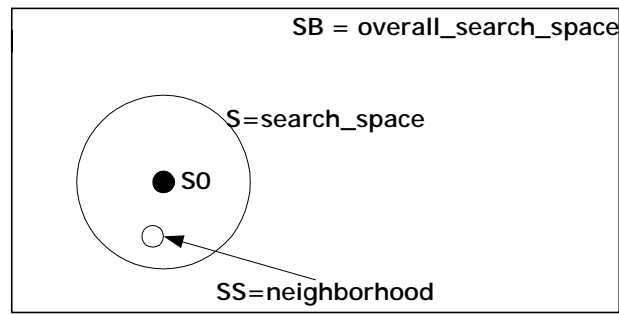
ตารางที่ 3.1 ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน

คำศัพท์	ความหมาย
<i>radius</i>	ขอบเขตของการสุ่มในแต่ละรอบของการทำงาน
<i>number_neighbor</i>	จำนวนค่าใกล้เคียง (neighborhood) ที่ต้องการสุ่มในแต่ละพื้นที่การค้นหา
<i>neighbor_list</i>	ส่วนที่เก็บค่าใกล้เคียงตามจำนวนที่กำหนด (tabu list)
<i>best_neighbor</i>	ค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น
<i>best_error</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นได้จากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น
<i>overall_neighbor</i>	ค่าใกล้เคียงที่เป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่เป็นวงกว้าง
<i>overall_best_error</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่เป็นวงกว้าง
<i>n</i>	จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ
<i>xlimit</i>	ขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว
$S_0$	ค่าเริ่มต้นในแต่ละพื้นที่การค้นหา
$S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$	ค่าที่เก็บไว้ใน <i>neighbor_list</i>
<i>cost</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

#### 3.3.2 หลักการทำงาน

ขั้นตอนที่ 1 โหลดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริง (รายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2) ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังภาพที่ 3.3 ในส่วนของขั้นตอนนี้ใช้คำสั่ง load data

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าเริ่มต้นของการค้นหาคำตอบ  $S_0$  ซึ่งเป็นสมาชิกของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่อยู่ใน overall\_search\_space (ลักษณะของพื้นที่การค้นหาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบแสดงดังภาพที่ 3.1) โดยทำการหาค่า  $S_0$  จากการสุ่มคำตอบ



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของพื้นที่ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มต้นจากคำตอบที่มีอยู่ โดยกำหนดให้คำตอบที่มีอยู่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด คำสั่งที่ใช้ สามารถดูภาพรวมประกอบคำอธิบายได้ในแผนภูมิดังภาพที่ 3.3 ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดค่าดังนี้

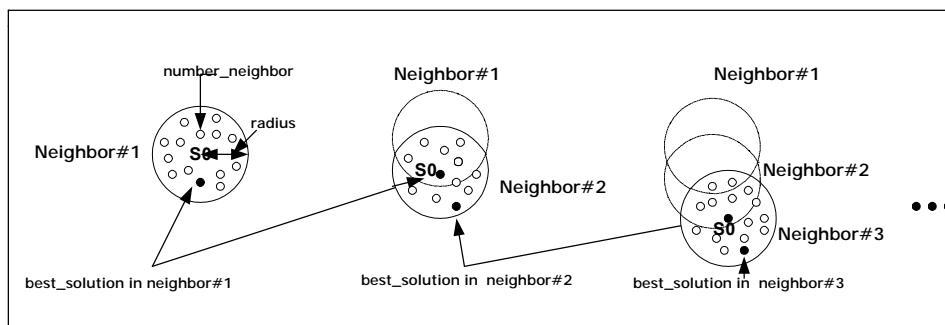
$$\text{best\_neighbor} = S_0$$

ในตอนแรกยังไม่ได้ทำการค้นหาคำตอบ ดังนั้นค่า cost ของ best\_neighbor ซึ่งในที่นี้ก็คือ best\_error จะกำหนดให้เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{overall\_best\_error} &= \text{best\_error} \\ \text{overall\_neighbor} &= \text{best\_neighbor} \end{aligned}$$

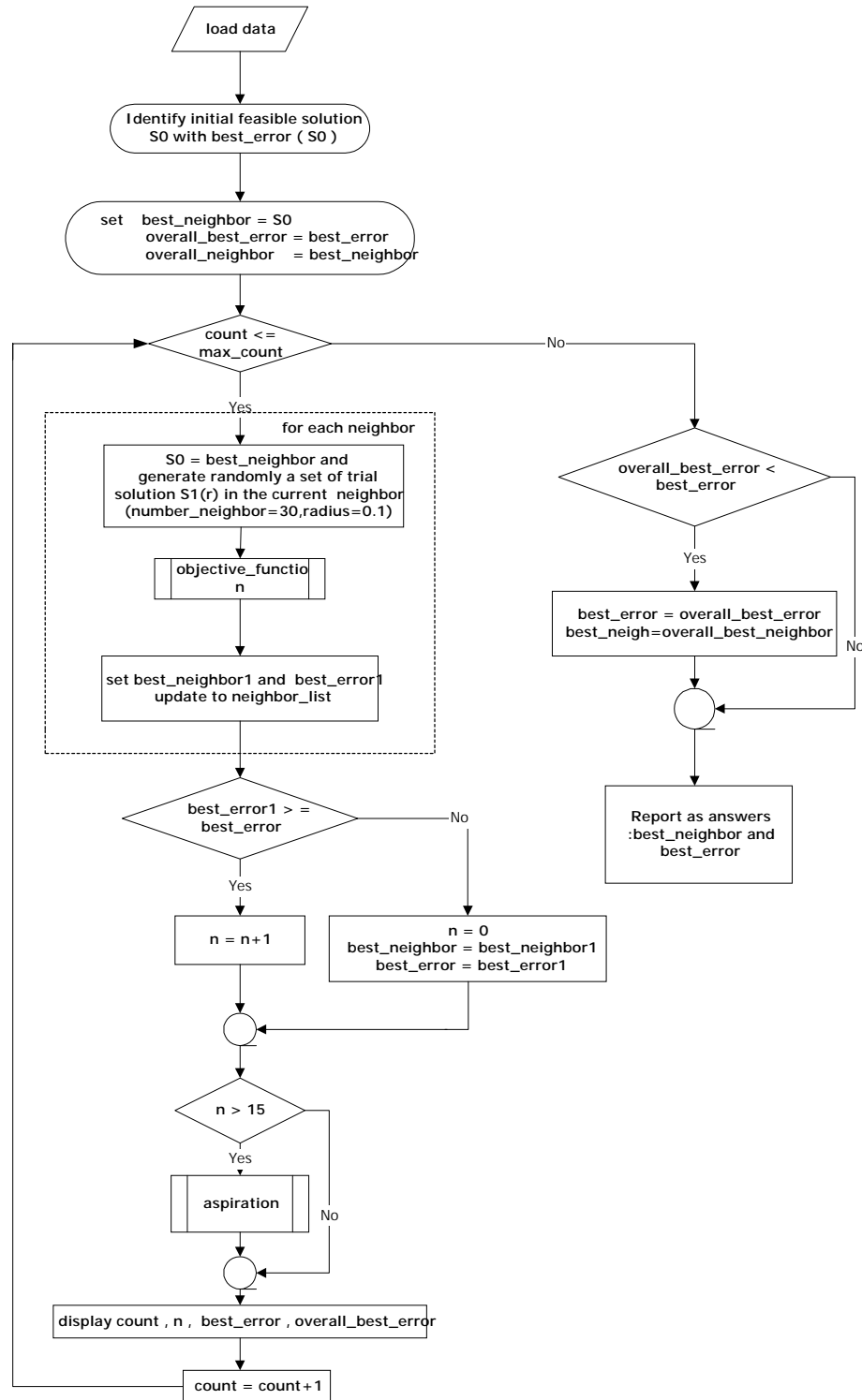
ค่า best\_error โดยปกติแล้วจะคำนวณได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เพื่อตรวจสอบว่าคำตอบที่มีอยู่ดีหรือไม่ ตัวอย่างเช่น ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองที่กำลังค้นหา ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น รายละเอียดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะกล่าวไว้ในบทที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 จาก  $S_0$  ดำเนินการเคลื่อนย้ายในลักษณะสุ่ม ในขั้นตอนนี้จะทำการเคลื่อนย้ายในส่วนในพื้นที่การค้นหา ดังแสดงในภาพที่ 3.1 จนได้จำนวนค่าใกล้เคียงของ  $S_0$  มีจำนวนเท่ากับ number\_neighbor ดังที่อธิบายไว้ในภาพที่ 3.2 ให้สมาชิกของคำตอบที่อยู่ในค่าใกล้เคียงของ  $S_0$  นี้คือ  $S_1(r)$



ภาพที่ 3.2 กระบวนการทำงานของการค้นหาแบบตาม

แผนภูมิแสดงการทำงานสำหรับวิธีการค้นหาแบบตาบอด



ภาพที่ 3.3 แผนภูมิแสดงการทำงานของอัลกอริทึมที่อาศัยหลักการของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า  $cost$  ของสมาชิกแต่ละตัวที่อยู่ใน  $S_1(r)$  และเลือกค่า  $cost$  ที่ดีที่สุดซึ่งในที่นี้ก็คือ  $best\_error1$  และสมาชิกของ  $S_1(r)$  ที่ทำให้เกิดค่า  $best\_error1$  จะกำหนดให้เป็น  $best\_neighbor1$  จากนั้นจึงกำหนดค่าดังกล่าวดังนี้

$$\begin{aligned} best\_error &= best\_error1 \\ best\_neighbor &= best\_neighbor1 \end{aligned}$$

จากขั้นตอนที่ 5 ค่า  $cost$  ของ  $best\_neighbor$  จะต้องมีค่าที่ดีกว่าค่า  $cost$  ของ  $S_0$  นอกจากนี้ในขั้นตอนนี้จะทำการเก็บค่า  $S_1$  ที่ทำการเคลื่อนย้าย 5 ครั้งล่าสุดไว้ใน  $neighbor\_list$  เพื่อนำไปใช้ในส่วนของการทำงานย้อนรอยการค้นหา ( $back\_tracking$ ) ต่อไป ซึ่งเป็นส่วนที่ได้พัฒนาปรับปรุงให้การค้นหาแบบดั้งเดิม ทำงานได้ดีขึ้นในการหาคำตอบและเร็วขึ้น (ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอเรียก  $back\_tracking$  ต่อจากนี้ไป รายละเอียดอยู่ในขั้นตอนที่ 7)

ขั้นตอนที่ 6 จากขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้

$$S_0 = best\_neighbor$$

แล้วเริ่มทำในขั้นตอนที่ 3 ใหม่

ขั้นตอนที่ 7 จากขั้นตอนที่ 5 ถ้าไม่มีสมาชิกใดๆใน  $S_1(r)$  ที่ให้ค่า  $cost$  ดีกว่าค่า  $cost$  ของ  $S_0$  ให้ทำการกำหนดค่า

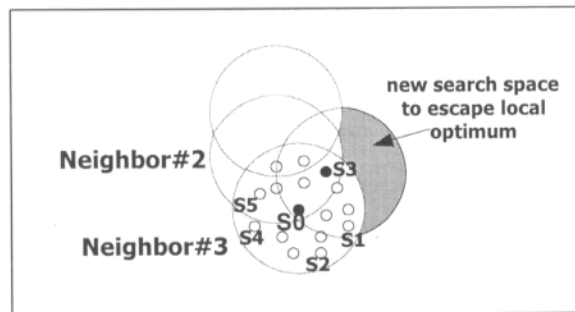
$$S_0 = S_1(3, :)$$

ค่าของ  $S_1(3, :)$  จะอยู่ใน  $neighbor\_list$  ตามตารางที่ 3.1 จากนั้นกลับไปทำในขั้นตอนที่ 3 ใหม่ (ขั้นตอนที่ 7 เป็นส่วนในการทำงานของ  $back\_tracking$  ในส่วนของการกำหนดค่า  $S_0 = S_1(3, :)$  ไม่จำเป็นต้องกำหนดค่าตามนี้เสมอไป อาจจะมีการกำหนดค่า  $S_0$  ให้มีค่าเท่ากับตำแหน่งอื่นที่เก็บอยู่ใน  $neighbor\_list$  ก็ได้)

ตารางที่ 3.2 การเก็บค่าต่างๆไว้ใน  $neighbor\_list$

ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการเก็บจำนวน $n$ ตัว								ค่าความคลาดเคลื่อน
$S_1(1,1)$	$S_1(1,2)$	$S_1(1,3)$	$S_1(1,4)$	$S_1(1,5)$	$S_1(1,6)$	$S_1(1,7)$	$\dots S_1(1,n)$	$S_1(1,n+1)$
$S_1(2,1)$	$S_1(2,2)$	$S_1(2,3)$	$S_1(2,4)$	$S_1(2,5)$	$S_1(2,6)$	$S_1(2,7)$	$\dots S_1(2,n)$	$S_1(2,n+1)$
$S_1(3,1)$	$S_1(3,2)$	$S_1(3,3)$	$S_1(3,4)$	$S_1(3,5)$	$S_1(3,6)$	$S_1(3,7)$	$\dots S_1(3,n)$	$S_1(3,n+1)$
$S_1(4,1)$	$S_1(4,2)$	$S_1(4,3)$	$S_1(4,4)$	$S_1(4,5)$	$S_1(4,6)$	$S_1(4,7)$	$\dots S_1(4,n)$	$S_1(4,n+1)$
$S_1(5,1)$	$S_1(5,2)$	$S_1(5,3)$	$S_1(5,4)$	$S_1(5,5)$	$S_1(5,6)$	$S_1(5,7)$	$\dots S_1(5,n)$	$S_1(5,n+1)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$S(m,1)$	$S(m,2)$	$S(m,3)$	$S(m,4)$	$S(m,5)$	$S(m,6)$	$S(m,7)$	$\dots S(m,n)$	$S(m,n+1)$

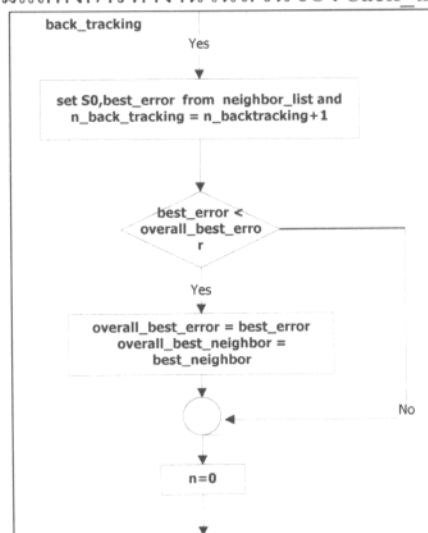
จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าในส่วนของ neighbor\_list จะทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำการค้นหาไว้เป็นจำนวนเท่ากับ  $n$  จำนวนของค่าใกล้เคียงที่ทำการเก็บไว้จะมีจำนวนเท่ากับ  $m$  ซึ่งจากขั้นตอนที่ 5 จะกำหนดให้  $m$  มีค่าเท่ากับ 5 ในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของคุณค่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นตัวกำหนดว่าในการทำ back\_tracking จะทำที่ตำแหน่งใดของ neighbor\_list ซึ่งการทำงานในส่วนนี้สามารถอธิบายได้ดังแสดงในภาพที่ 3.4 และแผนภูมิที่อธิบายคำสั่งในส่วนของการทำ back\_tracking จะแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงการทำงานในช่วง back\_tracking

จากภาพที่ 3.4 จะเห็นว่าเมื่อมีการทำ back\_tracking จะเกิดพื้นที่ใหม่เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบในส่วนนี้เองที่จะทำให้การค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม สามารถให้คำตอบที่หลุดจากการลอคของคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นได้ การทำงานในส่วนนี้ปรากฏอยู่ในแผนภูมิดังภาพที่ 3.3 ในบล็อคของ aspiration รายละเอียดการทำงานอธิบายได้ดังภาพที่ 3.5

แผนภูมิแสดงการทำงานในส่วนของ back\_tracking



ภาพที่ 3.5 แผนภูมิแสดงการทำงานในส่วนของ back\_tracking

จากการทำงานดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ว่ามีลักษณะการค้นหาคำตอบคล้ายกับวิธีการค้นหาค่าใกล้เคียง (neighborhood search) แต่การค้นหาคำตอบด้วยวิธีการดังกล่าวจะให้คำตอบที่เป็นคำตอบ วงแคบเฉพาะถิ่น ไม่สามารถหลุดออกจากการล้อมของคำตอบได้ แต่วิธีการค้นหาคำตอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการปรับปรุงวิธีการค้นหาโดยอาศัยหลักการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู และได้เพิ่มส่วนของ brack\_tracking เข้าไป เพราะฉะนั้นเมื่อทำการค้นหาคำตอบจึงสามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็วและหลุดออกจากการล้อมของคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ดี จนกระทั่งทำการค้นหาคำตอบไปเรื่อยๆ จะได้คำตอบที่ใกล้ความเป็นวงกว้างมากขึ้น (near global) ได้

หมายเหตุ ขนาดของ neighbor\_list = m, ตำแหน่งของ  $S_i$  ใน neighbor\_list ที่นำมาใช้ในการกำหนดค่าเริ่มต้นในช่วงการทำงาน back\_tracking, ค่า number\_neighbor และค่า radius อาจจะมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะนำไปใช้วิธีการหาค่า number\_neighbor และ ค่า radius ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

### 3.4 การทดสอบอัลกอริทึม

การนำอัลกอริทึมไปใช้งานเพื่อค้นหาคำตอบให้กับปัญหา จำเป็นต้องทดสอบเพื่อหาค่า number\_neighbor และค่า radius ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบว่าควรกำหนดให้มีค่าเท่าไร จึงจะทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เวลาที่เร็วที่สุด เนื่องจากบางปัญหาต้องการความละเอียดสูงในการค้นหาคำตอบ จึงควรกำหนดให้ค่า radius มีค่าน้อยๆ เพื่อความละเอียดในการค้นหา ส่วนค่า number\_neighbor ควรมีค่ามากๆ เพื่อที่จะทำให้การเคลื่อนย้ายแต่ละครั้งมีความครอบคลุม search space มากขึ้น แต่เป็นที่แน่นอนว่าเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบจะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการทดสอบอัลกอริทึมเพื่อที่จะหาค่า number\_neighbor และค่า radius ให้เหมาะสมกับงานวิจัย จึงเป็นสิ่งจำเป็น ขั้นตอนการทดสอบจะกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว ดังต่อไปนี้

$$(1) \text{ number\_neighbor} = 15 \text{ และ } \text{radius} = 0.10$$

$$(2) \text{ number\_neighbor} = 30 \text{ และ } \text{radius} = 0.10$$

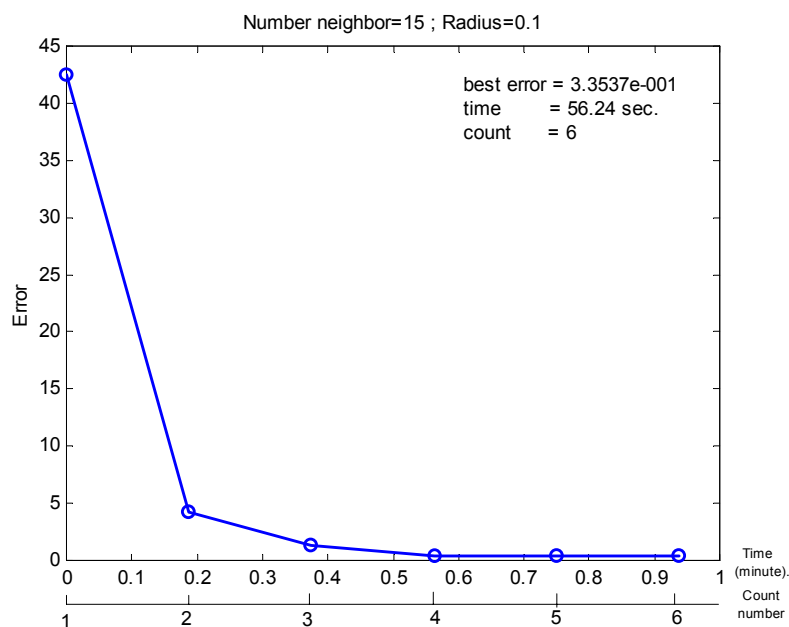
$$(3) \text{ number\_neighbor} = 50 \text{ และ } \text{radius} = 0.10$$

$$(4) \text{ number\_neighbor} = 15 \text{ และ } \text{radius} = 0.05$$

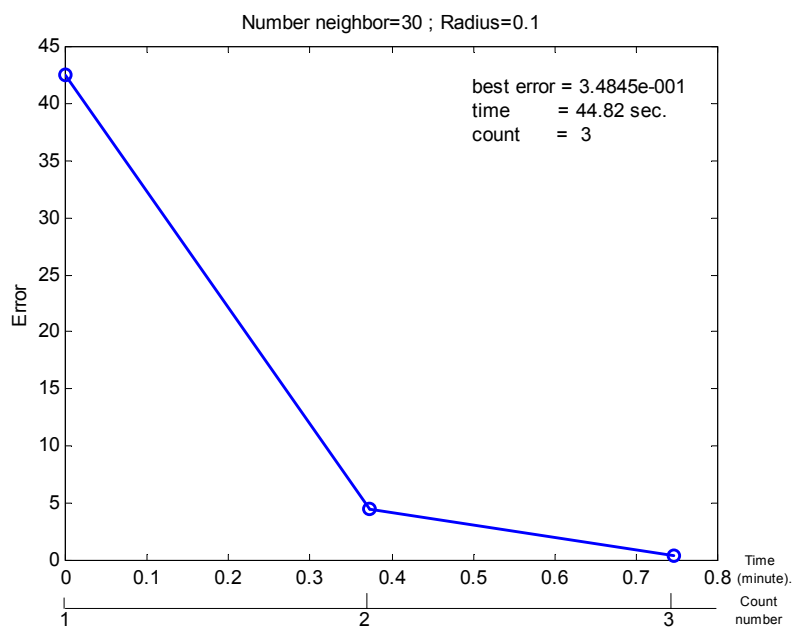
$$(5) \text{ number\_neighbor} = 15 \text{ และ } \text{radius} = 0.20$$

การทดสอบในแต่ละกรณีจะกำหนดจุดเริ่มต้น ( $S_0$ ) ที่จุดเดียวกันและจะทำการค้นหาคำตอบไปเรื่อยๆจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะลดลงมาอยู่ที่ค่าน้อยกว่า 0.375 จึงจะหยุดการค้นหาคำตอบ แต่คำตอบที่ได้จะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด เพราะจุดประสงค์ของการทดสอบนี้เพียงเพื่อหาค่า number\_neighbor และ radius ที่เหมาะสมกับงานวิจัย ในระหว่างการค้นหาคำตอบจะทำการบันทึก

ผลและทำการวาดกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 3.6 ถึง 3.10

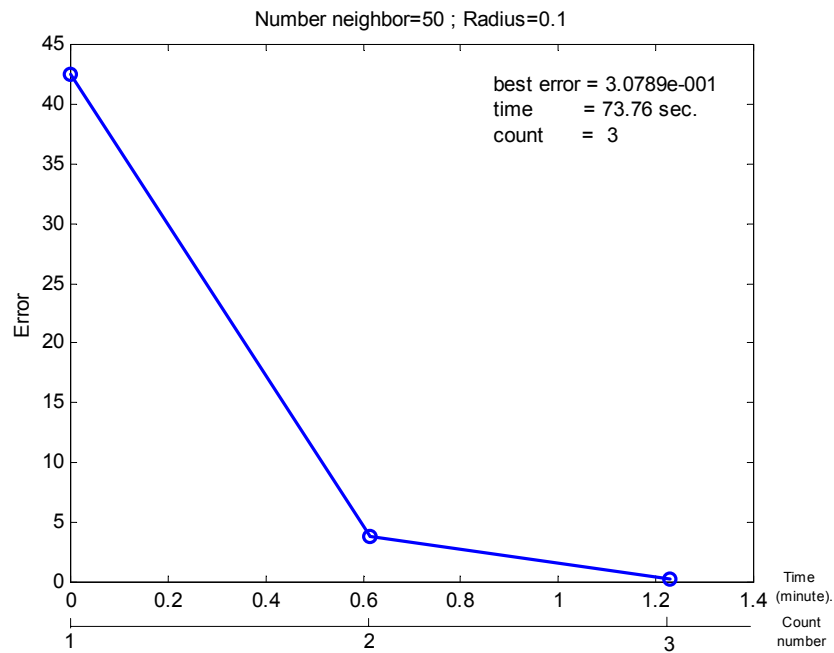


ภาพที่ 3.6 ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 15 และ radius = 0.10

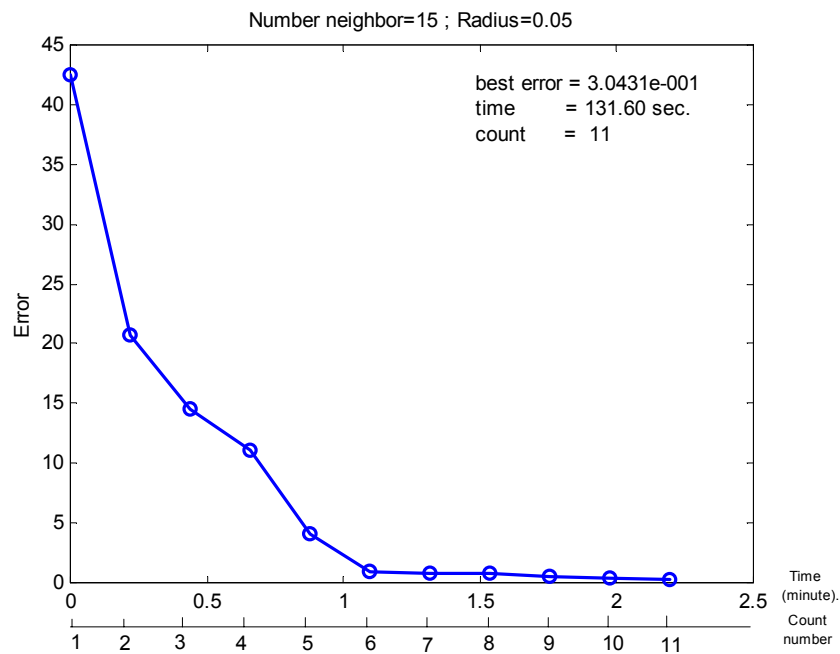


ภาพที่ 3.7 ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 30 และ radius = 0.10

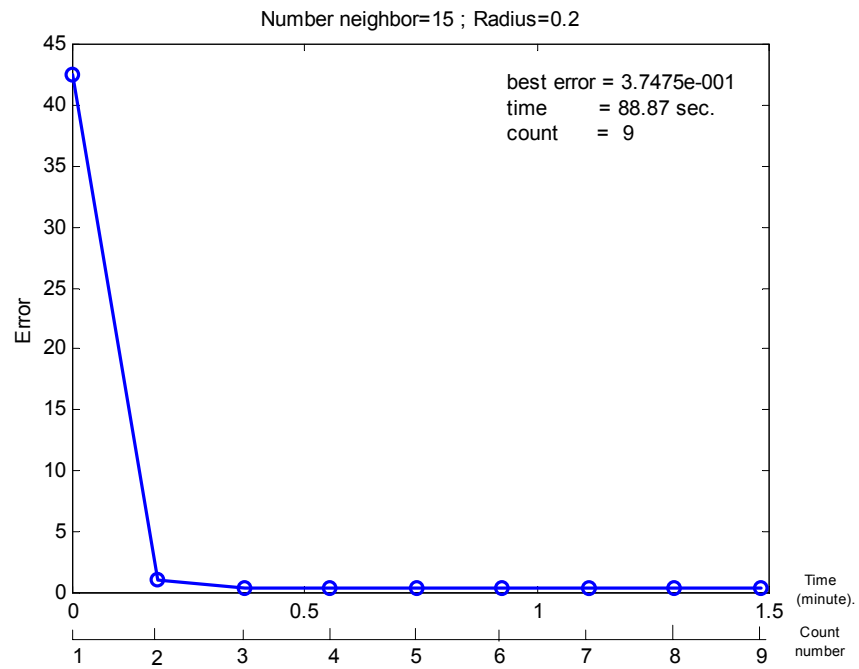




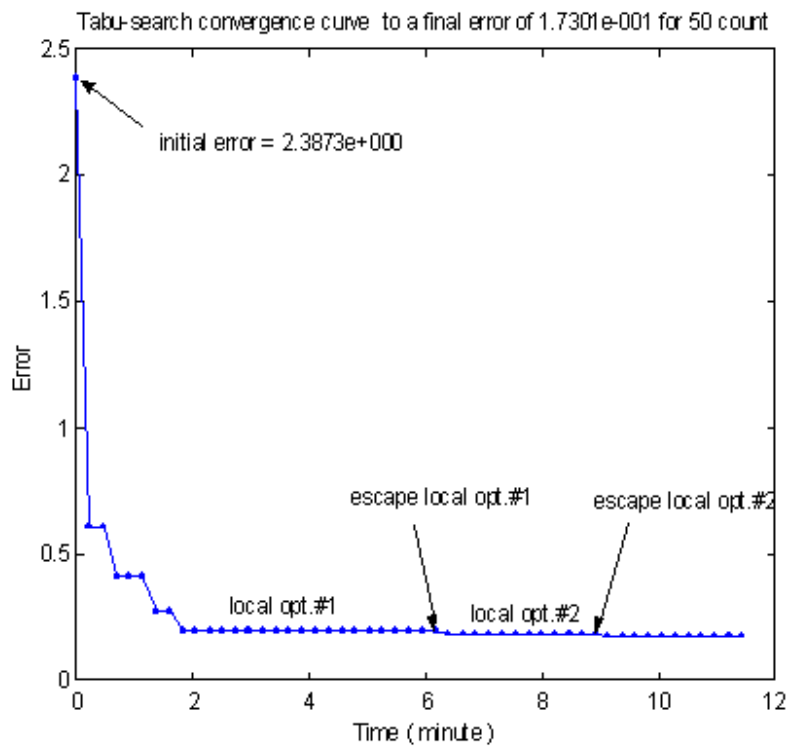
ภาพที่ 3.8 ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 50 และ radius = 0.10



ภาพที่ 3.9 ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 15 และ radius = 0.05



ภาพที่ 3.10 ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 15 และ radius = 0.20



ภาพที่ 3.11 ความสามารถของอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบ

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบอัลกอริทึมกรณีต่างๆ

Count	N=15, R=0.05	N=15, R=0.10	N=15, R=0.20	N=30, R=0.10	N=50, R=0.10
0	4.2555e+001	4.2555e+001	4.2555e+001	4.2555e+001	4.2555e+001
1	2.0674e+001	4.2861e+000	1.1148e+000	4.4967e+000	3.3186e+000
2	1.4575e+001	1.3020e+000	4.3803e-001	3.4845e-001	3.0789e-001
3	1.1119e+001	4.3888e-001	#1	-	-
4	4.0259e+000	#1	#2	-	-
5	9.7949e-001	3.3537e-001	4.1335e-001	-	-
6	7.9695e-001	-	#1	-	-
7	#1	-	#2	-	-
8	4.6597e-001	-	3.7475e-001	-	-
9	3.9030e-001	-	-	-	-
10	3.0431e-001	-	-	-	-
Time (sec.)	131.60	56.24	88.87	44.82	73.76

### 3.5 บทสรุป

จากภาพที่ 3.6 ถึง 3.10 และตารางที่ 3.2 สรุปได้ว่าค่า `number_neigh = 30` และค่า `radius = 0.1` จะให้คำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เวลา 44.82 วินาที หรือทำการค้นหาคำตอบ 3 รอบ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดได้ใช้ PentiumIII 733MHz RAM 64 Mbytes HD 20 Gbytes ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าดังกล่าวในการนำไปค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นต่อไปในบทที่ 4 อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันว่าอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการของวิธีการค้นหาแบบตามูสามารถค้นหาคำตอบใกล้เคียงความเป็นวงกว้างได้ จึงทำการทดสอบโดยเลือกค่า `number_neighbor` และค่า `radius` ที่ได้จากการทดสอบ ทำการค้นหาคำตอบเป็นจำนวน 50 รอบและทำการบันทึกแนวโน้มการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา ผลของการทดสอบดังภาพที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นวงกว้างได้ เนื่องจากผลการทดสอบสามารถหลุดจากจุดคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ถึง 2 ครั้งในช่วงการค้นหาคำตอบเพียง 50 รอบ จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 3 ได้เน้นไปที่การทดสอบอัลกอริทึมเป็นสำคัญในการที่จะนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการหาคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อเป็นการตรวจสอบอัลกอริทึมให้เกิดความมั่นใจได้ว่าคำตอบที่ได้จากการค้นหาจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ก่อนที่จะนำอัลกอริทึมดังกล่าวไปใช้งานจริง

## บทที่ 4

### การหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น

#### 4.1 บทนำ

การหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอด จำเป็นต้องมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อที่จะคอยตรวจสอบว่าเมื่อมีการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหา มีความถูกต้องเพียงใด ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยนำค่าเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะเป็นเงื่อนไขในการกำหนดทิศทางการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวควรจะมีการเคลื่อนย้ายไปตามทิศทางใด การเคลื่อนย้ายของพารามิเตอร์ต้องทำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะยอมรับได้ จึงจะถือว่าแบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายระบบได้สมจริง

บทนี้บรรยายเกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์ของระบบในโดเมนเวลา ด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้จากการแปลงแบบจำลองต่อเนื่องด้วยเทคนิคไบลิเนียร์ โปรแกรมจำลองสถานการณ์สร้างขึ้นด้วย MATLAB การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของระบบที่สร้างขึ้น จะทำโดยการนำผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จาก SIMULINK รายละเอียดจะอธิบายอยู่ในหัวข้อที่ 4.2 โดยจะเริ่มจากการเปลี่ยนแบบจำลองของระบบสองมวล ตัวชดเชยในวิถีไปหน้า และตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับจากโดเมนเอส (s-domain) ให้อยู่ในโดเมนแซด (z-domain) ซึ่งระบบดังกล่าวมีลักษณะเป็นเชิงเส้น จากนั้นจึงทำการสร้างโปรแกรมจำลองสถานการณ์ของระบบ ในหัวข้อที่ 4.3 แสดงวิธีการระบุเอกลักษณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอด และในหัวข้อที่ 4.4 จะแสดงผลของการค้นหาแบบตาบอด ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบอดจะต้องทำให้ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากที่สุด

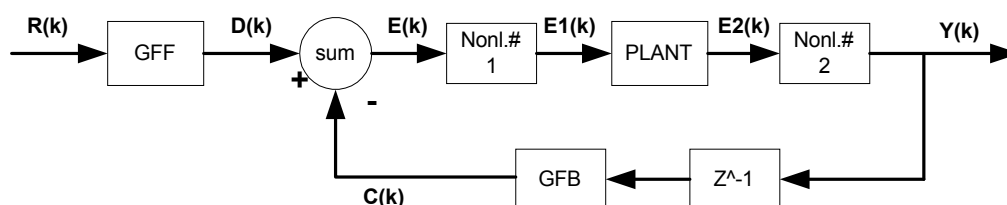
#### 4.2 การจำลองสถานการณ์ของระบบ

ระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จะแตกต่างจากระบบที่ได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 2 เนื่องจากระบบดังกล่าวประกอบด้วยลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นใน

บทนี้จึงนำเสนอการดำเนินงานหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นว่ามีรูปลักษณะอย่างไรและอยู่ที่ตำแหน่งใดของระบบ การค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมพัลส์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามจำเป็นต้องมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การจำลองสถานการณ์ของระบบขณะทำการค้นหาคำตอบ โดยนำไปเป็นเงื่อนไขในการกำหนดทิศทาง การเคลื่อนย้ายของพารามิเตอร์ในการค้นหาคำตอบ วิธีการจำลองสถานการณ์ของระบบทำได้สองวิธีคือ วิธีแรกทำด้วย MATLAB โดยการเขียนโปรแกรมเป็น m-file ส่วนวิธีที่สองทำด้วย SIMULINK แต่เนื่องจากวิธีที่สองไม่สามารถที่จะปรับพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นได้มากนักในขณะที่ทำการค้นหาคำตอบ เช่น ไม่สามารถปรับความชันของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมพัลส์ได้ ซึ่งค่าดังกล่าวใน SIMULINK ได้ตั้งค่าไว้เท่ากับ 1 (หมายเหตุ งานวิจัยนี้ใช้ MATLAB และ SIMULINK Version 5.2) จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้การค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเป็นไปได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงเลือกการจำลองระบบด้วยวิธีแรก ซึ่งสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ตามที่ต้องการ รายละเอียดของการดำเนินงานจำลองสถานการณ์ของระบบจะกล่าวในหัวข้อนี้ จากนั้นจะกล่าวถึงการนำวิธีการค้นหาแบบตามจำเป็นการค้นหาคำตอบ โดยรายละเอียดจะอยู่ในหัวข้อ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

#### 4.2.1 วิธีดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ดำเนินการตั้งสมมุติฐานลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นว่ามีลักษณะอย่างไร และอยู่ตรงส่วนใดของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของระบบรวม

จากภาพที่ 4.1 สมมุติฐานกำหนดให้ตำแหน่งของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในตำแหน่งที่รับเอาต์พุตของจุดรวมสัญญาณกับตำแหน่งที่รับเอาต์พุตของพลานต์ (plant) ซึ่งก็คือแบบจำลองระบบสองมวลนั่นเอง

ขั้นตอนที่ 2 จากภาพที่ 4.1 จะเห็นว่าระบบประกอบด้วยบล็อกโคแอดแกรมของส่วนย่อยๆ อยู่หลายส่วน คือ ตัวชดเชยในวิถีไปหน้า ตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับ ระบบสองมวล และลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์ในขั้นตอนนี้จะดำเนินการเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยในวิถีไปหน้า ตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับและระบบสองมวลจากโดเมนเอสไอให้เป็น

โดเมนแซด โดยอาศัยเทคนิคการแปลงแบบจำลองต่อเนื่องด้วยวิธีไบลิเนียร์ คำสั่งที่ใช้ใน MATLAB คือ

```
[NUMd,DENd] = C2DM(NUM, DEN, Ts, 'tustin')
```

ในที่นี้จะแสดงวิธีการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากโดเมนเอสไปเป็นโดเมนแซดของตัวชดเชยในวิถีไปหน้าเป็นตัวอย่าง ส่วนตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับและระบบสองมวล มีวิธีการแปลงโดยใช้หลักการเดียวกัน

ตัวชดเชยในวิถีไปหน้า

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยในวิถีไปหน้าแสดงดังสมการที่ (4-1)

$$\frac{D(s)}{R(s)} = \frac{15.09s^3 + 9.0558s^2 + 1.811e008s + 1.207e001}{s^3 + 7186s^2 + 1.916e007s} \quad (4-1)$$

ดำเนินการแปลงสมการที่ (4-1) โดยใช้คำสั่งดังแสดงในภาพที่ 4.2

```
%GFF
n1=15.093*[1 6*10^3 1.2*10^7 8*10^9];
d1=[1 7.186*10^3 19.160*10^6 0];
format long
[n1d,d1d]=c2dm(n1,d1,0.0001,'tustin')
```

ภาพที่ 4.2 คำสั่งใช้สำหรับการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยในวิถีไปหน้า จากโดเมนเอสไปเป็นโดเมนแซด

ผลที่ได้จากคำสั่งในภาพที่ 4.2 เป็นดังนี้

```
n1d=14.27571276293349 -35.04038587265492 28.66940662308130 -7.81892907902217
```

```
d1d= 1.000000000000000 -2.35318362706083 1.84252416145537 -0.48934053439454
```

จากคำสั่งในภาพที่ 4.2 ทำการเปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอน [n1, d1] มาเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับและระบบสองมวลแทน (รายละเอียดอยู่ในสมการที่ (2-2) และ (2-3)) ในขั้นตอนนี้จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่อยู่ในรูปของโดเมนแซด ซึ่งได้ผลแสดงดังนี้

ตัวเศษในวิธีไปหน้า

$$\frac{D(z)}{R(z)} = \frac{14.28z^3 - 35.04z^2 + 28.67z - 7.819}{z^3 - 2.355z^2 + 1.843z - 0.4893} \quad (4-2)$$

ระบบสองมวล

$$\frac{E_2(z)}{E_1(z)} = \frac{1e - 006(0.1654z^3 + 0.4934z^2 + 0.4963z + 0.1654)}{z^3 - 2.997z^2 + 2.9957z - 0.9987} \quad (4-3)$$

ตัวเศษในวิธีป้อนกลับ

$$\frac{C(z)}{Y(z)} = \frac{1e + 004(1.222z^3 - 3.6153z^2 + 3.5659z + 1.1725)}{z^3 - 2.3534z^2 + 1.8431z - 0.4897} \quad (4-4)$$

(หมายเหตุ: สมการที่ (4-4) ยังมีได้มีการห้วงสัญญาณ 1 หน่วยในส่วนของวิธีป้อนกลับ)

ขั้นตอนที่ 3 ดำเนินการจัดรูปสมการ (4-2) (4-3) และ (4-4) โดยใช้เทคนิคทางพีชคณิต เพื่อให้ได้สมการดิฟเฟอเรนซ์ที่อธิบายพฤติกรรมของระบบอยู่ในโดเมนเวลา ผลที่ได้จากการแปลงแสดงได้ดังนี้

$$D(k) = 14.28R(k) - 5.04R(k-1) + 28.67R(k-2) - 7.819R(k-3) + 2.353D(k-1) - 1.843D(k-2) + 0.4893D(k-3) \quad (4-5)$$

$$E_2(k) = 1e - 006(0.1654E_1(k) + 0.4934E_1(k-1) + 0.4963E_1(k-2) + 0.1654E_1(k-3)) + 2.9970E_2(k-1) - 2.9957E_2(k-2) + 0.9987E_2(k-3) \quad (4-6)$$

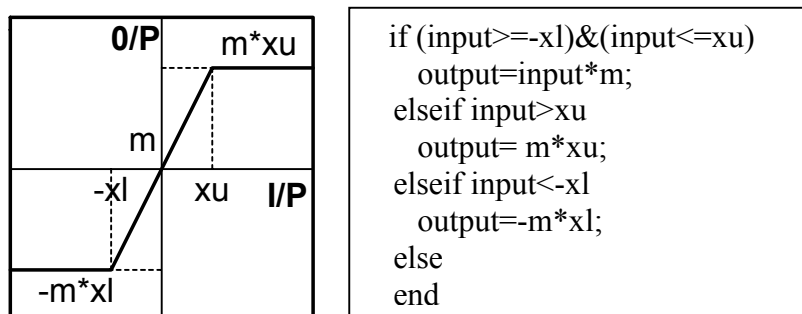
$$C(k) = 1e + 004(1.2220Y(k-1) - 3.6153Y(k-2) + 3.5659Y(k-3) + 1.1725Y(k-4)) + 2.3534C(k-1) - 1.8431C(k-2) + 0.4897C(k-3) \quad (4-7)$$

สมการที่ (4-5) (4-6) และ (4-7) เป็นผลการแปลงมาจากสมการ (4-2) (4-3) และ (4-4) ตามลำดับ จากขั้นตอนการดำเนินงานในขั้นตอนที่ 2 และ 3 สามารถที่จะจำลองสถานการณ์ดำเนิน

การในโดเมนเวลา ด้วยสมการดิฟเฟอเรนซ์ที่ได้จากการแปลงแบบจำลองต่อเนื่อง ด้วยเทคนิค ไลปลิเนียร์ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถที่จะจำลองสถานการณ์ของระบบรวมดังภาพที่ 4.1 ได้ เนื่องจากยังไม่สามารถจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งรายละเอียดจะ อธิบายไว้ในขั้นตอนที่ 4

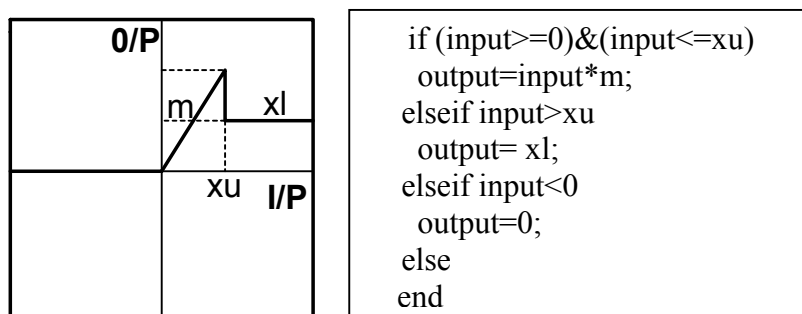
ขั้นตอนที่ 4 การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นในลักษณะต่างๆ แสดงไว้ดังภาพที่ 4.3 ถึง 4.6 (กรณีที่สมมติฐานรูปร่างของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็น ลักษณะอื่น สามารถที่จะจำลองสถานการณ์ได้เช่นเดียวกัน โดยอาศัยหลักการจำลองสถานการณ์ ตามเงื่อนไขเหมือนดังภาพที่ 4.3 ถึง 4.6)

แบบที่ 1



ภาพที่ 4.3 การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1

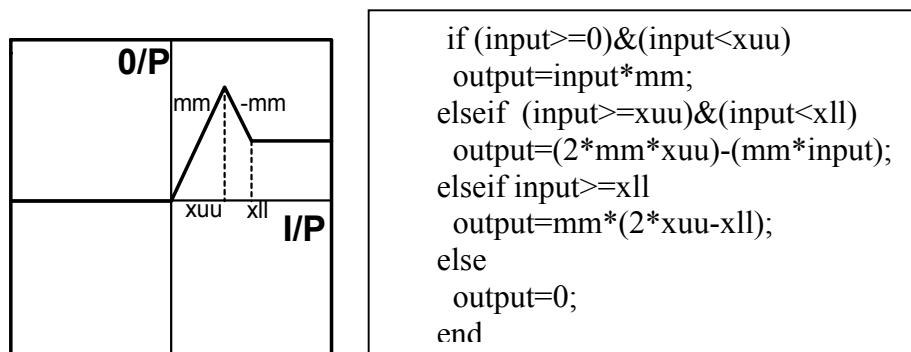
แบบที่ 2



ภาพที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2

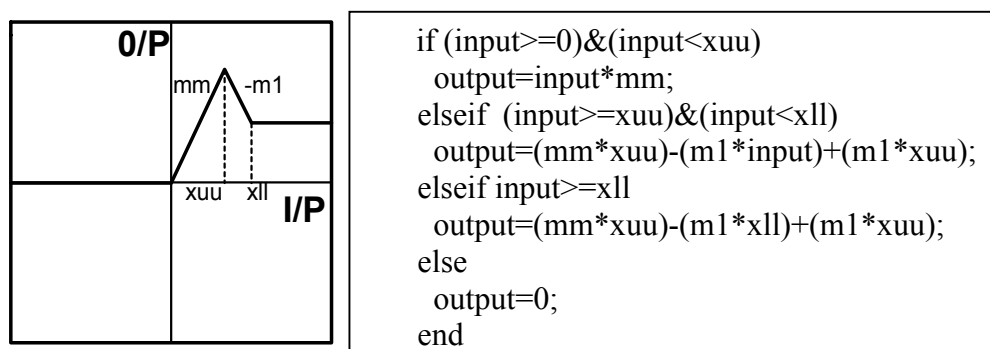


## แบบที่ 3



ภาพที่ 4.5 การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 3

## แบบที่ 4



ภาพที่ 4.6 การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 4

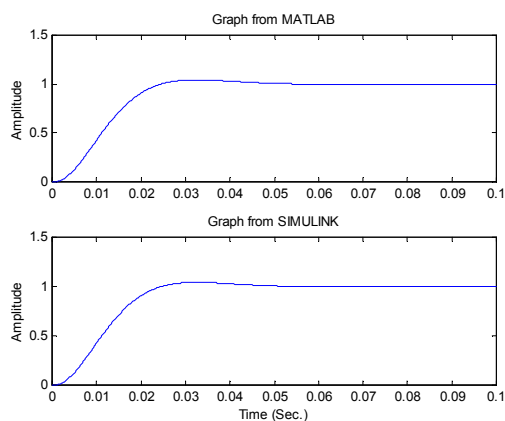
ขั้นตอนที่ 5 นำสมการที่ (4-5) ถึง (4-7) และ การจำลองสถานการณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ดังภาพที่ 4.3 ถึง 4.6 ในแบบต่างๆ มาสร้างเป็น โปรแกรมเพื่อจำลองสถานการณ์ของระบบ ตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ (รายละเอียดโปรแกรมดูได้จากภาคผนวก ก.)

#### 4.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์

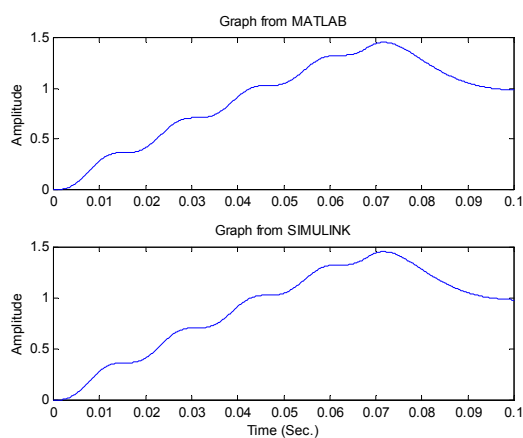
เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้อง จึงนำผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดย MATLAB มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วย SIMULINK โดยเลือกระบบที่มีรูปร่าง และตำแหน่งของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ตามภาพที่ 4.3 และตาม

สมมุติฐานในภาพที่ 4.1 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $m$ ,  $x_u$  และ  $x_l$  เป็นพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นในส่วนแรก (ตำแหน่งหลังจตุรรวมสัญญาณ) และค่าพารามิเตอร์  $mm$ ,  $x_{uu}$  และ  $x_{ll}$  เป็นพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นในส่วนที่สอง (ตำแหน่งหลังระบบสองมวล) อย่างไรก็ตามในการดำเนินการตรวจสอบต้องกำหนดให้ค่าความชันของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1 เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลกับผลที่ได้จากการจำลองด้วย SIMULINK ได้ (การจำลองสถานการณ์ของระบบรวมด้วย SIMULINK ซึ่งมีแผนภาพลั้่งดำเนินการแสดงดังภาพที่ 4.8) ผลการเปรียบเทียบมีดังต่อไปนี้

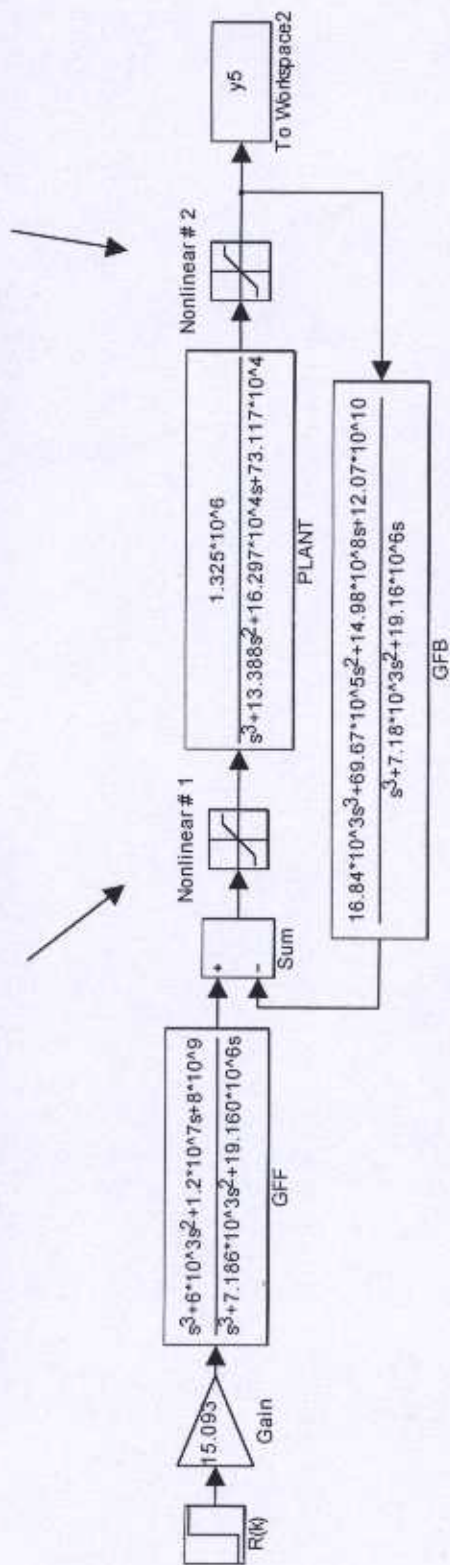
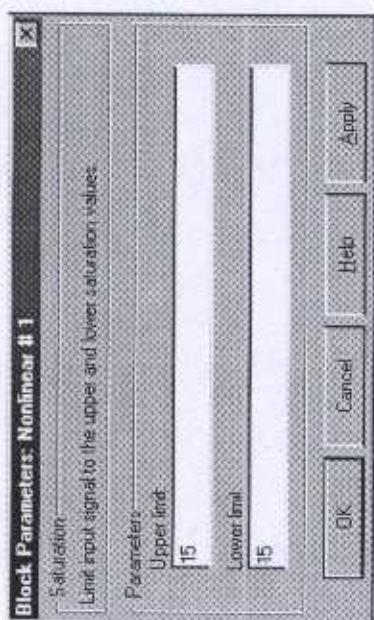
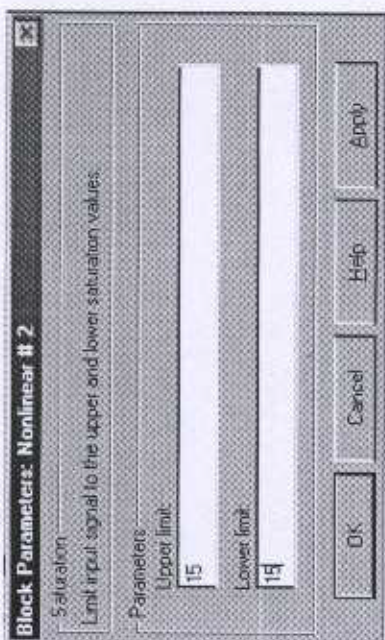
กรณีที่ 1 เลือกค่าพารามิเตอร์  $m=1, x_u=15, x_l=15, mm=1, x_{uu}=15, x_{ll}=15$  ได้ผลดังนี้



กรณีที่ 2 เลือกค่าพารามิเตอร์  $m=1, x_u=3, x_l=3, mm=1, x_{uu}=3, x_{ll}=3$  ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB กับ SIMULINK

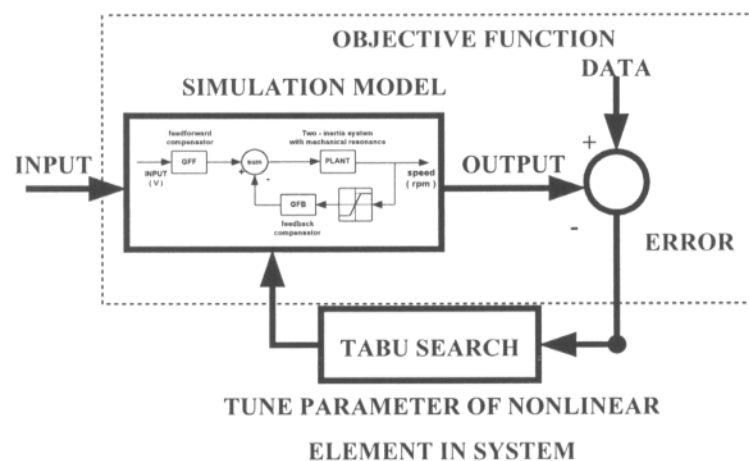


ภาพที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วย SIMULINK

จากผลการเปรียบเทียบในภาพที่ 4.7 สรุปได้ว่าโปรแกรมที่สร้างขึ้น เพื่อจำลองสถานการณ์ของระบบตามสมมุติฐานดังภาพที่ 4.1 ให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จาก SIMULINK จากผลดังกล่าวแสดงว่าการจำลองสถานการณ์ของระบบที่ประกอบด้วยลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นสามารถดำเนินการโดยอาศัยหลักการตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้จะนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามต่อไป ในหัวข้อที่ 4.3

### 4.3 วิธีการค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม

วิธีการค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม สามารถอธิบายหลักการทำงานได้ตามภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 แผนภาพแสดงการดำเนินงานค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น

จากภาพที่ 4.9 ใช้อธิบายการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ คือ เริ่มจากป้อนอินพุตขั้นบันไดให้กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีขนาด 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 โวลต์ตามลำดับ จากนั้นนำผลที่เป็นค่าเชิงเลขที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ (simulation model ในภาพ) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้บันทึกไว้ และประเมินค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจแสดงได้ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ (4-8)

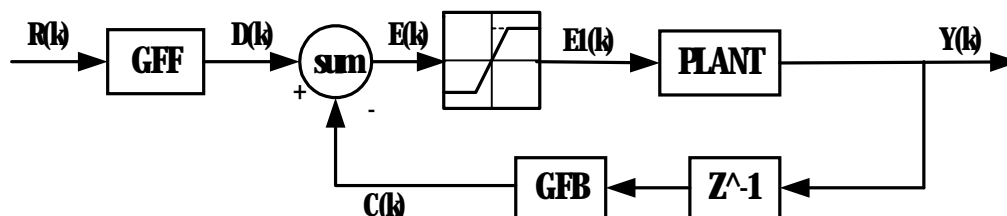
$$J = \sum e^2(kT) \quad , \quad kT = 0, 1, 2, \dots \quad (4-8)$$

ซึ่ง  $e(kT)$  เป็นผลต่างระหว่างความเร็วรอบที่วัดได้โดยทาโคมิเตอร์มีหน่วยเป็นโวลต์กับความเร็วรอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มาเป็นตัวกำหนดทิศทางการค้นหาแบบตามูว่าจะมีทิศทางไปทางใด เราจะยอมรับผลการค้นหาว่าแม่นยำพอและยุติการค้นหาที่ต่อเมื่อ  $J_{\text{MIN}} \leq \mu$  ค่า  $\mu$  ในที่นี้เท่ากับ 0.5 ซึ่งได้มาจากการคำนวณซ้ำๆ เพื่อศึกษาพลวัตของระบบ การจำลองสถานการณ์ในภาพที่ 4.9 ดำเนินการในโดเมนเวลาด้วยสมการดิฟเฟอเรนซ์ ที่ได้จากการแปลงแบบจำลองต่อเนื่องด้วยเทคนิคไบลิเนียร์ โปรแกรมจำลองสถานการณ์สร้างขึ้นด้วย MATLAB

จากที่กล่าวมาข้างต้น สังเกตได้ว่าการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู เป็นวิธีการค้นหาที่ต้องการสมมุติฐานแบบจำลองของระบบรวมก่อนดำเนินการค้นหาคำตอบทุกครั้ง ถ้าตั้งสมมุติฐานไม่เหมาะสม โอกาสที่โปรแกรมจะทำการค้นหาคำตอบให้ได้ค่าที่ยอมรับได้ก็ไม่เกิดขึ้น ดังนั้นการตั้งสมมุติฐานก่อนดำเนินการค้นหาจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

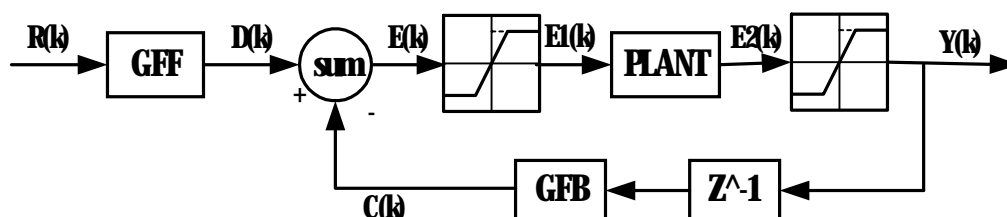
วิธีการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นในงานวิจัยนี้ ได้ตั้งสมมุติฐานไว้ดังนี้

*สมมุติฐานกรณีแรก* ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเป็นแบบอิมตัว อยู่ที่ตำแหน่งหลังจุดรวมสัญญาณมีลักษณะตามภาพที่ 4.10



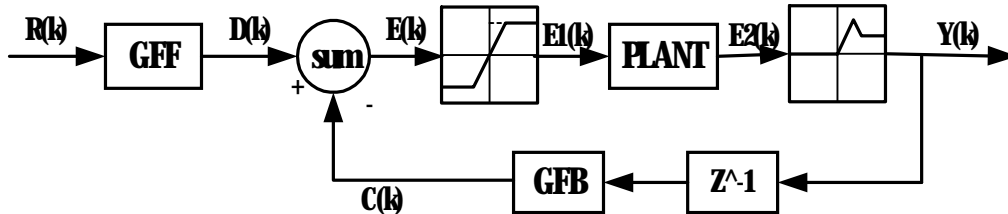
ภาพที่ 4.10 ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีแรก

*สมมุติฐานกรณีที่สอง* ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเป็นแบบอิมตัว อยู่ที่ตำแหน่งหลังจุดรวมสัญญาณและหลังระบบสองมวล มีลักษณะตามภาพที่ 4.11



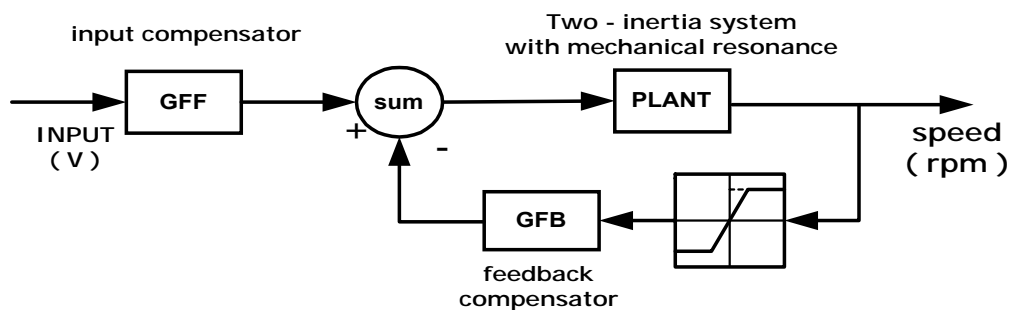
ภาพที่ 4.11 ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีที่สอง

**สมมุติฐานกรณีที่สาม** ความไม่เป็นเชิงเส้นมีอยู่สองส่วน คือ ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิมิตัวอยู่ที่ตำแหน่งหลังจตุรวมสัญญาณ และ ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 3 ตามภาพที่ 4.5 ในหัวข้อที่ 4.2 อยู่ที่ตำแหน่งหลังระบบสองมวล สมมุติฐานกรณีที่สามแทนได้ด้วยภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีที่สาม

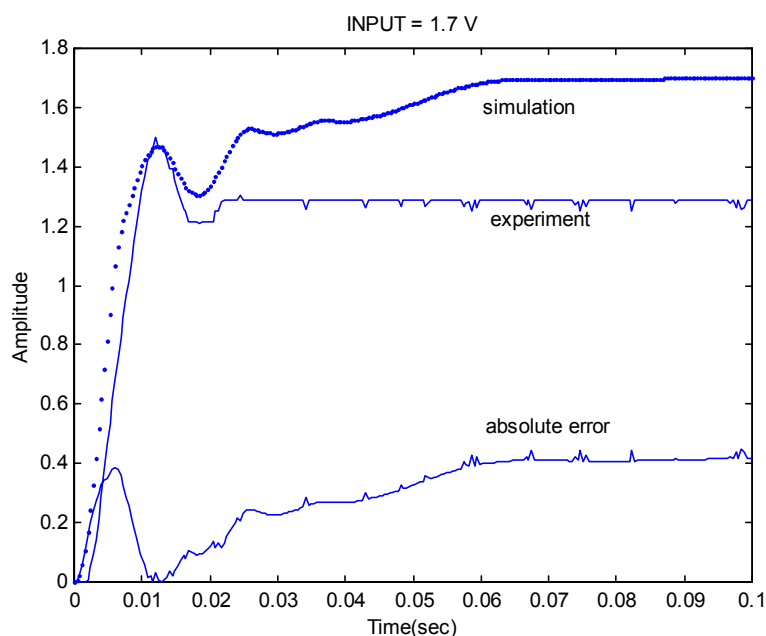
**สมมุติฐานกรณีที่สอง** ความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแบบอิมิตัว โดยถือว่าตำแหน่งของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ที่ส่วนของสัญญาณป้อนกลับเพียงแก่จุดเดียว หมายความว่าได้สมมุติให้เป็นลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นสมมูล (equivalent nonlinearity) ซึ่งแทนความหมายไม่เป็นเชิงเส้นของระบบทั้งหมดไว้ที่ตำแหน่งนี้ตำแหน่งเดียว ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามสมมุติฐานกรณีที่สอง

จากสมมุติฐานข้างต้น ดำเนินการนำเทคนิคที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 ทำการจำลองสถานการณ์ของระบบ ตามภาพที่ 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการค้นหาแบบตาบอด โดยเริ่มทำการทดลองจากสมมุติฐานกรณีแรก ผลที่ได้เป็นดังนี้ พารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตามภาพที่ 4.10 มีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ คือ ความชัน (m), ช่วงอินพุตสูงสุดที่ทำให้เกิดการอิมิตัว (xu) และ ช่วงอินพุตต่ำสุดที่ทำให้เกิดการอิมิตัว (xl)

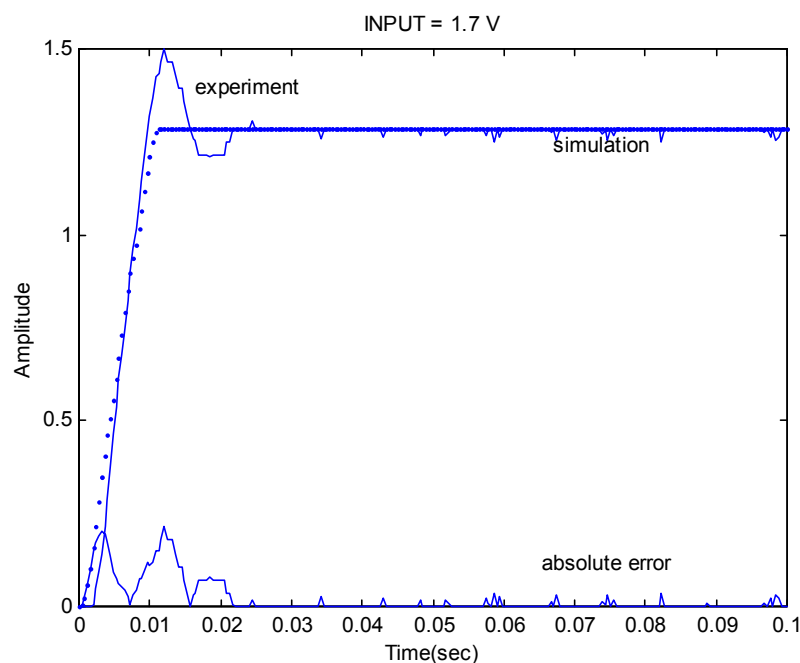
การค้นหาคำตอบสำหรับสมมุติฐานนี้ จะทำการค้นหาที่อินพุตมีค่าเท่ากับ 1.7 โวลต์ ซึ่งได้ผลการค้นหาคำตอบดังนี้



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีแรก เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์

จากผลการค้นหาตามภาพที่ 4.14 ปรากฏว่าพารามิเตอร์ที่ค้นหาโดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตามู ได้ค่าดังนี้ คือ ความชันเท่ากับ 13.9625, ช่วงอินพุตสูงสุดที่ทำให้เกิดการอิมพัลส์เท่ากับ 14.756 และช่วงอินพุตต่ำสุดที่ทำให้เกิดการอิมพัลส์มีค่าเท่ากับ  $-0.0574$  เมื่อนำเอาต์พุตที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่ได้จากผลการทดสอบจริง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน (sum square error) เท่ากับ 27.1703 ซึ่งมีค่ามาก แสดงว่าสมมุติฐานของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นในกรณีแรกผิดจากความเป็นจริง (แต่การสรุปได้ว่าสมมุติฐานที่ตั้งไว้ผิดจากความเป็นจริงต้องแน่ใจก่อนว่าอัลกอริทึมที่ใช้ค้นหาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบสามารถที่จะหาคำตอบได้ใกล้กับคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3)

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพที่ 4.14 พบว่าในสถานะเริ่มต้นผลที่ได้จากการค้นหาแบบตามู กับผลที่ได้จากการทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงสถานะคงตัวมีค่าต่างกันมาก ดังนั้นจึงทำการเพิ่มแบบลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิมพัลส์ขึ้นอีกหนึ่งส่วน ซึ่งมีลักษณะของระบบรวมดังสมมุติฐานกรณีที่สอง ตามภาพที่ 4.11 การค้นหาคำตอบของสมมุติฐานกรณีนี้จะทำการค้นหาที่อินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์เหมือนกับกรณีแรก ซึ่งได้ผลการค้นหาดังนี้

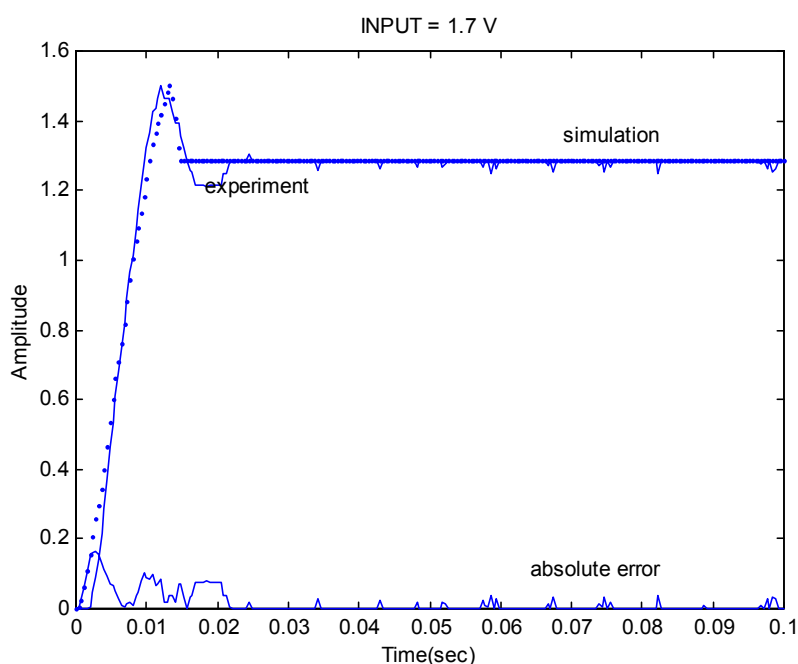


ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สอง เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์

จากผลที่ได้ดังภาพที่ 4.15 ค่าความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าสมมุติฐานกรณีแรก คือมีค่าเท่ากับ 0.6536 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนในกรณีนี้ไม่สามารถสรุปได้ว่าเอาต์พุตที่ได้กรณีที่สองจะดีกว่ากรณีแรก สังเกตได้จากเอาต์พุตผลที่แสดงดังภาพที่ 4.15 ไม่มีการกระเพื่อมของสัญญาณ แต่สัญญาณถูกจำกัดไว้ที่ค่าๆหนึ่ง ซึ่งในความเป็นจริงเป็นไปได้เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงมีการกระเพื่อมของสัญญาณ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนสมมุติฐานของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมมุติฐานกรณีที่สาม ดังแสดงในภาพที่ 4.12

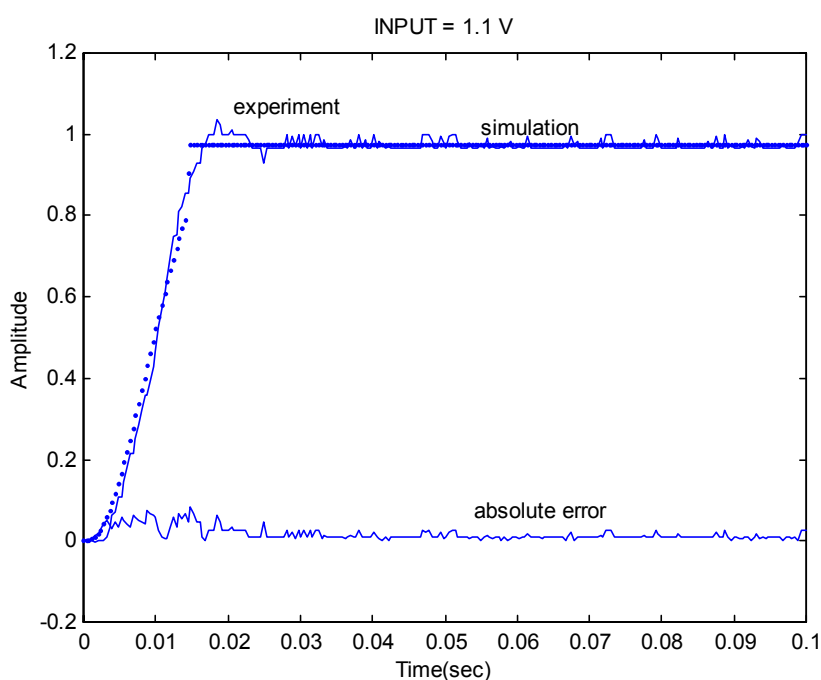
การทดลองสำหรับสมมุติฐานในกรณีที่สาม จะทำการค้นหาค่าตอบที่อินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์เหมือนสองกรณีที่ผ่านมา ผลการทดสอบเป็นดังภาพที่ 4.16 จากภาพสังเกตได้ว่าค่าเอาต์พุตที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามมีค่าใกล้เคียงกับค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบจริงมากโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าสมมุติฐานของสองกรณีแรก คือมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.3186 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ทำการค้นหาได้มีค่าดังนี้ คือ ในส่วนของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นใน ส่วนแรก ค่า  $m$  เท่ากับ 16.8230, ค่า  $x_u$  เท่ากับ 10.0384 และค่า  $x_l$  เท่ากับ 1.7445 ในส่วนของ ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นในส่วนที่สองซึ่งมีลักษณะตามภาพที่ 4.5 ค่า  $m_m$  เท่ากับ 1.3446, ค่า  $x_{uu}$  เท่ากับ 1.1252 และค่า  $x_{ll}$  เท่ากับ 1.2926





ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์  
สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สาม เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์

จากผลการทดลองในสมมุติฐานกรณีที่สาม ยังสรุปไม่ได้ว่าสมมุติฐานกรณีนี้ถูกต้อง เพราะข้อมูลที่มียังมีค่าอินพุตอีกหลายค่า ดังนั้นจึงได้ทำการค้นหาพารามิเตอร์ที่ค่าอินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์ เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานกรณีที่สามว่าสามารถที่จะใช้อธิบายระบบได้ทุกระดับอินพุต ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.17



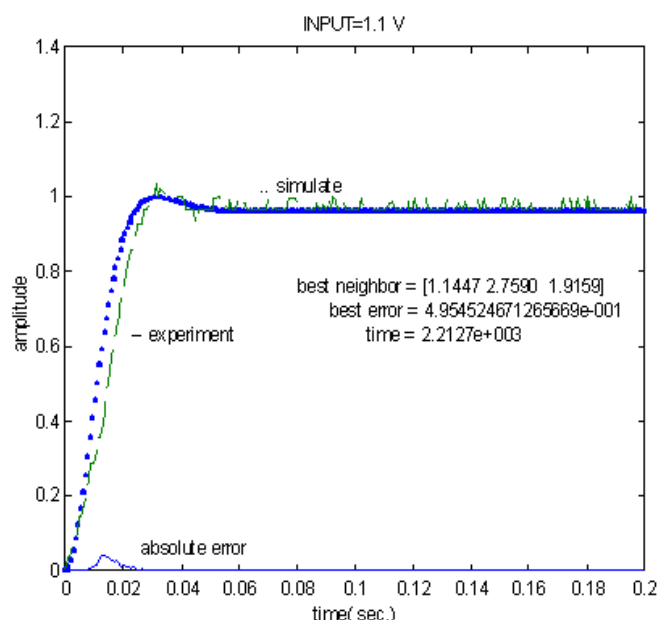
ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองสถานการณ์  
สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สาม เมื่ออินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.17 จะพบว่าสมมุติฐานกรณีที่ใช้ไม่ได้กับค่าอินพุตต่างๆ เนื่องจากค่าเอาต์พุตที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามูไม่มีการกระเพื่อม ซึ่งผิดจากค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบจริง ถึงแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับ 0.1350 ก็ตาม

จากผลการทดลองข้างต้นทั้งสามกรณีไม่สามารถที่จะหาคำตอบที่อธิบายพฤติกรรมของระบบที่ประกอบด้วยลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นได้เสมือนจริง ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงทำการตั้งสมมุติฐานกรณีที่สูงขึ้น ซึ่งแตกต่างจากสมมุติฐานทั้งสามกรณีที่ได้เสนอมานี้ คือ สมมุติให้ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแบบอิมพัล โดยอยู่ที่ส่วนของสัญญาณป้อนกลับเพียงแก่จุดเดียว หมายความว่าได้สมมุติให้เป็นลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นสมมูล ซึ่งแทนความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบทั้งหมดไว้ที่ตำแหน่งนี้ตำแหน่งเดียว ดังภาพที่ 4.13 ผลที่ได้เป็นที่น่าพึงพอใจ ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย และผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความเป็นธรรมชาติมากกว่าทั้งสามกรณีแรกที่ได้ทดลองมา รายละเอียดของผลการทดลองแสดงได้ในหัวข้อที่ 4.4

#### 4.4 ผลการจำลองสถานการณ์

กรณีอินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์



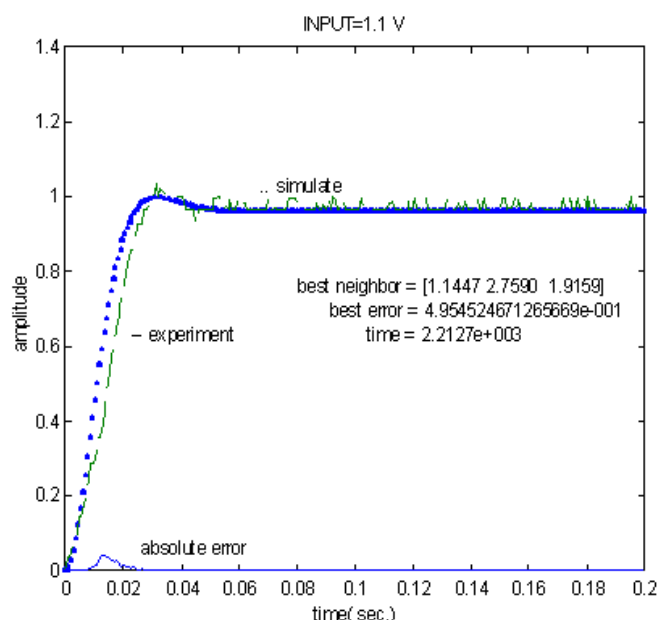
ภาพที่ 4.18 ผลของการค้นหาแบบตามูที่อินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สูง

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.17 จะพบว่าสมมุติฐานกรณีที่ใช้ไม่ได้กับค่าอินพุตต่างๆ เนื่องจากค่าเอาต์พุตที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามูไม่มีการกระเพื่อม ซึ่งผิดจากค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบจริง ถึงแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับ 0.1350 ก็ตาม

จากผลการทดลองข้างต้นทั้งสามกรณีไม่สามารถที่จะหาคำตอบที่อธิบายพฤติกรรมของระบบที่ประกอบด้วยลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นได้เสมือนจริง ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงทำการตั้งสมมุติฐานกรณีที่สูงขึ้น ซึ่งแตกต่างจากสมมุติฐานทั้งสามกรณีที่ได้เสนอมานี้ คือ สมมุติให้ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแบบอิมพัล โดยอยู่ที่ส่วนของสัญญาณป้อนกลับเพียงแก่จุดเดียว หมายความว่าได้สมมุติให้เป็นลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นสมมูล ซึ่งแทนความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบทั้งหมดไว้ที่ตำแหน่งนี้ตำแหน่งเดียว ดังภาพที่ 4.13 ผลที่ได้เป็นที่น่าพึงพอใจ ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย และผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความเป็นธรรมชาติมากกว่าทั้งสามกรณีแรกที่ได้ทดลองมา รายละเอียดของผลการทดลองแสดงได้ในหัวข้อที่ 4.4

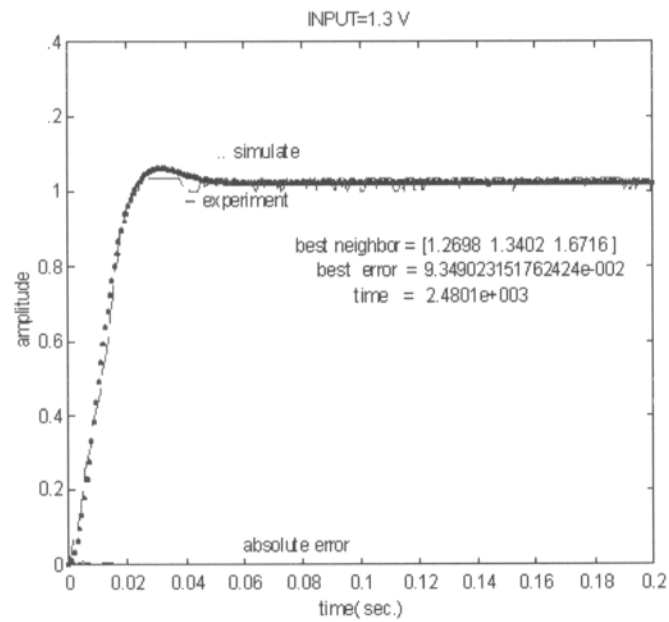
#### 4.4 ผลการจำลองสถานการณ์

กรณีอินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์



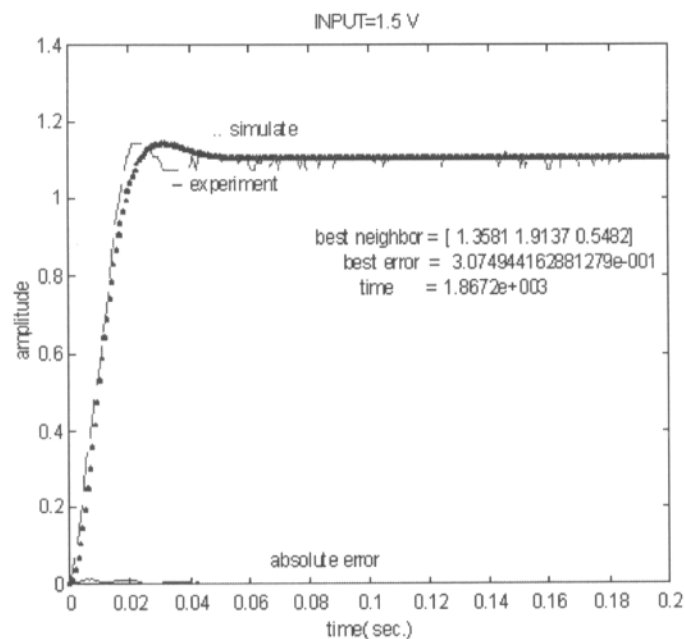
ภาพที่ 4.18 ผลของการค้นหาแบบตามูที่อินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่สูง

กรณีอินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์



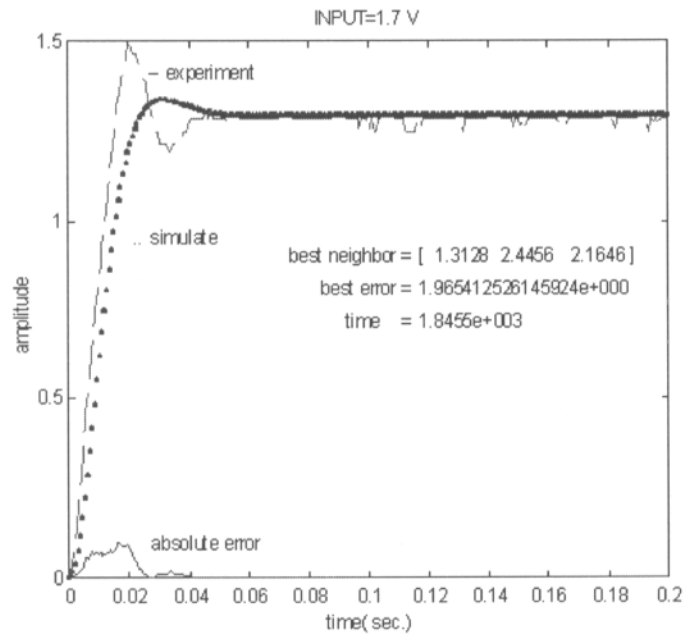
ภาพที่ 4.19 ผลของการค้นหาแบบตามูที่อินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์  
สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่ดีที่สุด

กรณีอินพุตเท่ากับ 1.5 โวลต์



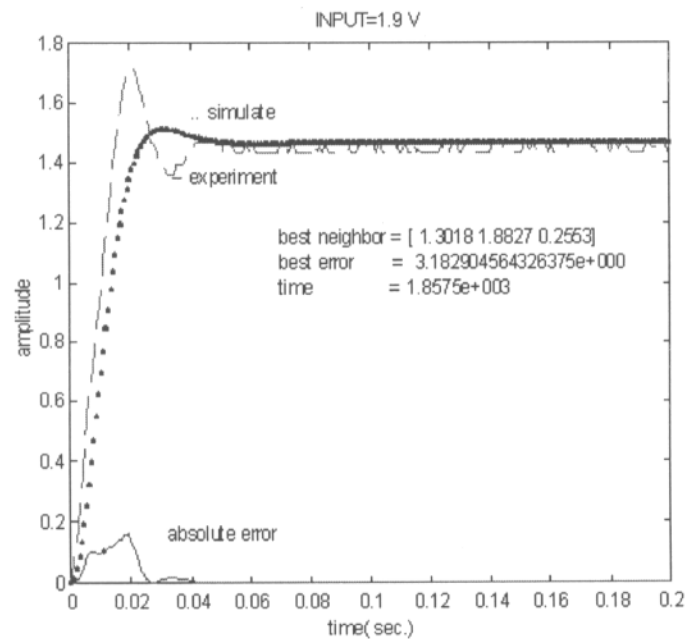
ภาพที่ 4.20 ผลของการค้นหาแบบตามูที่อินพุตเท่ากับ 1.5 โวลต์  
สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่ดีที่สุด

กรณีอินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์



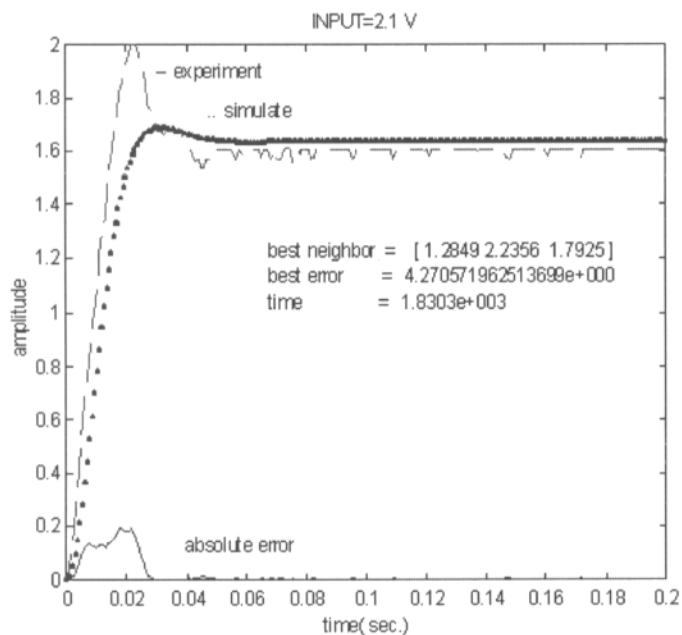
ภาพที่ 4.21 ผลของการค้นหาแบบตาบู่ที่อินพุตเท่ากับ 1.7 โวลต์  
สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่ดี

กรณีอินพุตเท่ากับ 1.9 โวลต์



ภาพที่ 4.22 ผลของการค้นหาแบบตาบู่ที่อินพุตเท่ากับ 1.9 โวลต์  
สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่ดี

### กรณีอินพุตเท่ากับ 2.1 โวลต์



ภาพที่ 4.23 ผลของการค้นหาแบบตาบอดที่อินพุตเท่ากับ 2.1 โวลต์ สอดคล้องกับสมมุติฐานกรณีที่ดี

### ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบอด

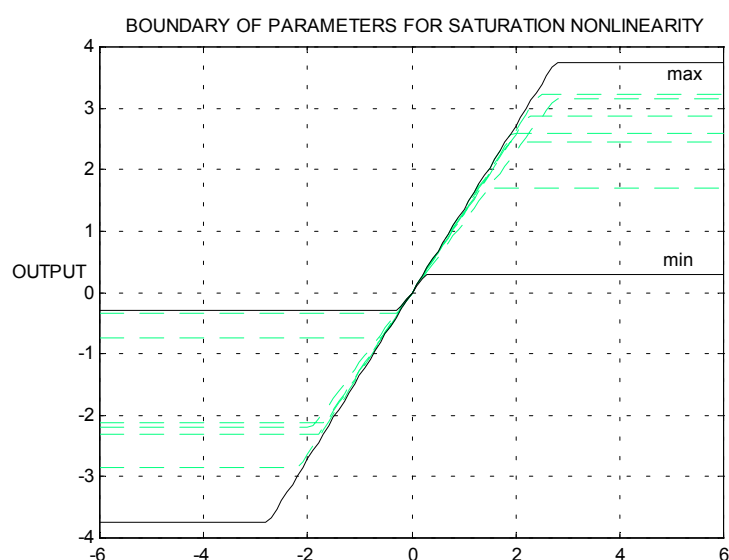
อินพุต ( โวลต์ )	ค่าพารามิเตอร์		
	m	xu	xl
1.1	1.1447	2.7590	1.9159
1.3	1.2698	1.3402	1.6716
1.5	1.3581	1.9137	0.5482
1.7	1.3128	2.4456	2.1646
1.9	1.3018	1.8827	0.2553
2.1	1.2849	2.2356	1.7925

ผลการค้นหาในภาพที่ 4.18 ถึง 4.23 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมพัลส์ได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งอาจทำความเข้าใจได้โดยดูภาพที่ 4.3 ประกอบ

ผลการทดลองที่ได้จากการค้นหาแบบตามู มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก เมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนกรณีที่ยังไม่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นมาเปรียบเทียบกับระบบที่มีลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลงประมาณ 89-99 % ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.2 (ดูเปรียบเทียบได้กับตารางที่ 2.1 ในบทที่ 2)

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างระบบเชิงเส้นกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

อินพุต (โวลต์)	ระบบเชิงเส้น	ระบบไม่เชิงเส้น	%ลดลงของค่า ความคลาดเคลื่อน
1.1	4.9457	0.4955	89.9822
1.3	17.8222	0.0935	99.4800
1.5	36.8377	0.3075	99.1653
1.7	40.5674	1.9654	95.1552
1.9	48.4605	3.1829	93.4605
2.1	54.9896	4.2706	92.2339



ภาพที่ 4.24 พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามูที่ระดับอินพุตต่างๆ

## 4.5 บทสรุป

จากผลการวิจัยที่ได้นำเสนอ พบว่าวิธีการค้นหาแบบตามูให้ผลที่มีความถูกต้องสูงและใช้เวลาในการค้นหาคำตอบรวดเร็ว เมื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนลดลงเป็นอย่างมาก ดังตารางที่ 4.2 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการขยายงานการทำงานของระบบสองมวลความถี่จะต้องพิจารณาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะปรากฏอยู่ในรูปลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นอิมิตัว ตรงส่วนของระบบวิถีป้อนกลับดังภาพที่ 4.13 เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่สอดคล้องกับแต่ละอินพุตไม่สามารถที่จะรวมเป็นพารามิเตอร์ชุดเดียวได้ เนื่องจากระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงอาจแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$1.1447 \leq K_{SAT} \leq 1.3581 \quad (4-9)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดขอบเขตของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น

ขอบเขต	m	Xu = XI
ขอบเขตบน	1.3581	2.7590
ขอบเขตล่าง	1.1447	0.2553

เนื่องจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏเป็นตระกูล เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงกำหนดขอบเขตล้อมรอบกลุ่มของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น เป็นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ดังภาพที่ 4.24 และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 5 จึงพิจารณาช่วงของค่าความชันลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัว ( $K_{SAT}$ ) ดังสมการที่ (4-9)



## บทที่ 5

### การตรวจสอบเสถียรภาพ

#### 5.1 บทนำ

เนื้อหาที่ปรากฏในบทที่ 4 ส่วนหนึ่งได้กล่าวถึงผลการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบขยายย่าน ปรากฏแบบจำลองความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นตระกูล การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงกำหนดขอบเขตล้อมรอบกลุ่มของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้นมีหลายวิธี ดังเช่น

วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) เป็นวิธีการที่ง่ายเมื่อเทียบกับอีกหลายๆวิธี วิธีการนี้ดำเนินการโดยสร้างการโคจรของคำตอบสมการดิฟเฟอเรนเชียล การคำนวณไม่ซับซ้อน และได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ แต่วิธีการดังกล่าวเหมาะกับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 ถ้าอันดับของระบบเกิน 2 ก็อาจทำการแปลงรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับ 2 แต่ความยุ่งยากซับซ้อนจะเกิดขึ้นกับการจำลองสถานการณ์และการตีความผล ซึ่งล่อแหลมต่อการตีความผิดพลาด

วิธีฟังก์ชันพรรณนา (describing function) เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับระบบอันดับสูง (มากกว่าอันดับ 2 ขึ้นไป) การวิเคราะห์ระบบให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำเมื่อเทียบกับระบบที่มีอันดับต่ำกว่า วิธีการนี้จะพิจารณาถึงรูปร่างของความไม่เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาเป็นอัตราขยายสมมูล คำนวณได้โดยอาศัยอนุกรมฟูรีเยร์ แต่อย่างไรก็ตามวิธีฟังก์ชันพรรณนาเป็นวิธีการประมาณค่า การนำไปใช้งานต้องคำนึงถึงข้อจำกัดหรือสมมุติฐานเป็นอย่างดี จึงจะได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ

วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov direct method) เป็นวิธีการที่นิยมพิจารณาระบบที่ไม่มีสัญญาณอินพุต (unforced system) ดำเนินการในโดเมนเวลา ให้ผลที่แม่นยำและเป็นที่ยอมรับมากกับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบที่เป็นเชิงเส้น แต่มีข้อเสียคือ การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ ( $v(x)$ ) สำหรับระบบไม่เป็นเชิงเส้นมีความยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไม่เป็นเชิงเส้น จึงเลือกใช้ เกณฑ์ของโปพอฟ (Popov's criterion) และเกณฑ์วงกลม (circle criterion) แทน ซึ่งทั้งสองเกณฑ์นี้มีที่มาจากวิธีการของเลียปูนอฟ ทั้งสิ้น

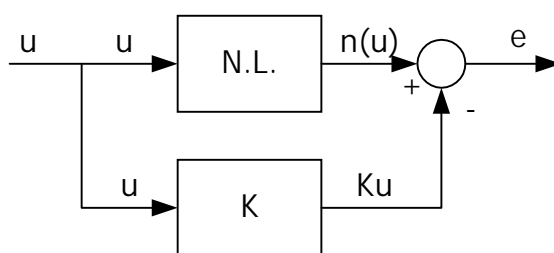
เกณฑ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม เป็นวิธีการที่วิเคราะห์ในโดเมนความถี่ โดยทำการกำหนดเซกเตอร์ล้อมรอบความไม่เป็นเชิงเส้น (sector nonlinearity) รากฐานของทฤษฎีได้รับการพัฒนามาจาก วิธีโดยตรงของเลียปูนอฟ ใช้ได้กับระบบทุกอันดับ ให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ

จากที่กล่าวมาข้างต้น สังเกตได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้นมีหลายวิธี ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้จึงเลือกการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ทำการขยายย่านการทำงานด้วยวิธี ฟังก์ชันพหุนาม เกณฑ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม เพื่อนำมาเปรียบเทียบผล และให้เกิดความมั่นใจที่จะใช้งานระบบในย่านการทำงานที่กว้างขึ้น รายละเอียดดังกล่าวได้รับการรวบรวมไว้ในบทนี้

## 5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม

### 5.2.1 ทบทวนวิธีฟังก์ชันพหุนาม

วิธีฟังก์ชันพหุนามเป็นวิธีที่ดำเนินการในโดเมนความถี่ นำมาใช้ประมาณและคาดเดาถึงพฤติกรรมของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยกำหนดให้ความไม่เป็นเชิงเส้นเปรียบเสมือนอัตราขยายสมมูล แสดงได้ดังภาพที่ 5.1 จากภาพ N.L. คือส่วนของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น  $n(u)$  เป็นเอาต์พุตที่ได้จากลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเมื่ออินพุตเท่ากับ  $u$  อัตราขยาย  $K$  เปรียบเสมือนอัตราขยายสมมูล การที่อัตราขยายดังกล่าวจะอธิบายพฤติกรรมของความไม่เป็นเชิงเส้นได้สมจริง จะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อน ( $e$ ) น้อยมาก ค่าอัตราขยายสมมูลในที่นี้จะเรียกว่า ฟังก์ชันพหุนาม



ภาพที่ 5.1 การประมาณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นในรูปอัตราขยายสมมูล

ข้อสมมุติเบื้องต้นของวิธีการฟังก์ชันพหุนาม ระบบจะต้องมีพฤติกรรมตามเงื่อนไขดังนี้

1. ระบบจะต้องประกอบด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นเพียงแค่ส่วนเดียว
2. ความไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องไม่ขึ้นอยู่กับเวลา

3. เมื่อกำหนดให้อินพุตที่เข้าสู่ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสัญญาณไซน์ จะพิจารณาเอาต์พุตที่ฮาร์มอนิกพื้นฐาน โดยไม่สนใจเอาต์พุตที่ความถี่อื่นๆ
4. ความไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องมีลักษณะสมมาตรรอบจุดกำเนิด
5. ความไม่เป็นเชิงเส้น ไม่มีความสามารถในการจดจำข้อมูล (ไม่มีหน่วยความจำ)

การคำนวณหาฟังก์ชันพหุนาม ( $N(a)$ )

นิยามของฟังก์ชันพหุนาม คือ อัตราส่วนระหว่างส่วนประกอบของสัญญาณฮาร์มอนิกพื้นฐานของเอาต์พุต ต่อสัญญาณอินพุต อธิบายได้ดังสมการที่ (5-1)

$$N = \frac{Y_1}{X} \angle \phi_1 \quad (5-1)$$

เมื่อ

$N$  = ฟังก์ชันพหุนาม

$X$  = ขนาดของสัญญาณอินพุตไซน์

$Y_1$  = ขนาดของสัญญาณฮาร์มอนิกพื้นฐาน

$\phi_1$  = การเลื่อนเฟส (phase shift) ของสัญญาณฮาร์มอนิกพื้นฐาน

วิธีการคำนวณเพื่อหาฟังก์ชันพหุนามของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น สิ่งสำคัญคือสัญญาณฮาร์มอนิกพื้นฐานของเอาต์พุต เมื่อมีสัญญาณอินพุต  $x(t) = X\sin(\omega t)$  ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุต  $y(t)$  เขียนโดยอาศัยทฤษฎีอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} y(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \\ &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sin(n\omega t + \phi_n) \end{aligned} \quad (5-2)$$

เมื่อ

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (5-3)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (5-4)$$

$$Y_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (5-5)$$

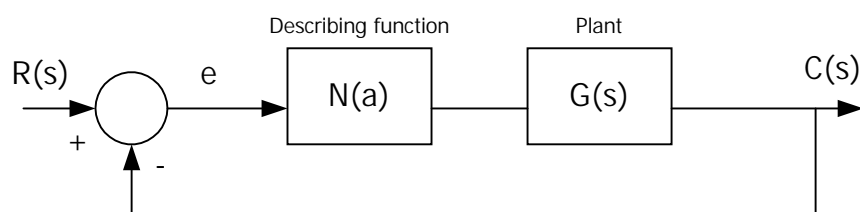
$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{A_n}{B_n}\right) \quad (5-6)$$

จากสมการที่ (5-2) ถึง (5-6) นำไปแทนค่าในสมการที่ (5-1) จะได้

$$N = \frac{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}{X} \angle \tan^{-1}\left(\frac{A_1}{B_1}\right) \quad (5-7)$$

(รายละเอียดการคำนวณฟังก์ชันพหุนามของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ แสดงไว้ในภาคผนวก ง.)

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม



ภาพที่ 5.2 ระบบไม่เป็นเชิงเส้น

พิจารณาระบบดังภาพที่ 5.2 กำหนดให้  $N(a)$  คือฟังก์ชันพหุนามของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ผลการตอบสนองในโดเมนความถี่ของระบบวงรอบปิด คือ

$$\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{N(a) G(j\omega)}{1 + N(a) G(j\omega)} \quad (5-8)$$

สมการลักษณะเฉพาะ (characteristic equation) คือ

$$1 + N(a) G(j\omega) = 0$$

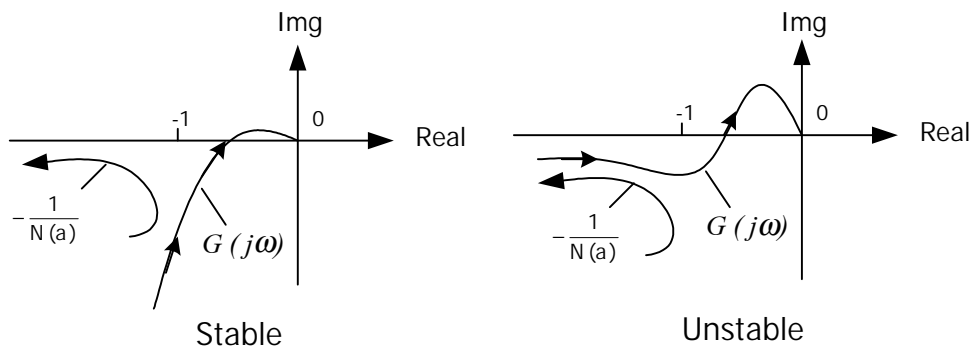
หรือ

$$G(j\omega) = -\frac{1}{N(a)} \quad (5-9)$$

จากสมการที่ (5-9) พบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม มีเงื่อนไขคล้ายกับเกณฑ์เสถียรภาพไนควิสต์ (Nyquist stability criterion) โดยเปลี่ยนจากจุดวิกฤต  $-1+j0$  ไปเป็น  $-\frac{1}{N(a)}$  แทน ดังนั้นการดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีนี้ จะเริ่มจากการวาดกราฟระบบเชิงเส้น  $G(j\omega)$  บนระนาบเชิงซ้อนในทิศทางที่  $\omega$  มีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นดำเนินการวาดกราฟของฟังก์ชัน  $-\frac{1}{N(a)}$  ในทิศทางที่  $a$  มีค่าเพิ่มขึ้นไว้บนระนาบเดียวกัน ( $a$  คือขนาดของสัญญาณอินพุตชานน์) เมื่อดำเนินการวาดกราฟแล้วเสร็จ จะพิจารณาเสถียรภาพโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพโคเชนเบอร์เกอร์ (Eronini, 1999) ดังนี้

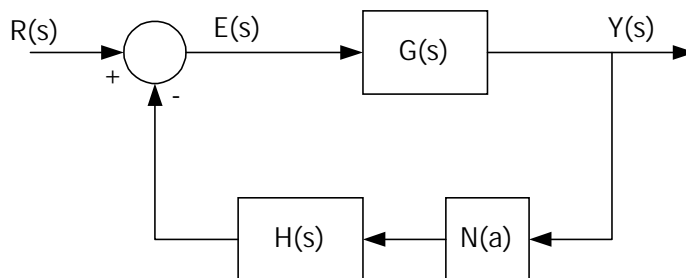
“ ระบบจะเสถียรเมื่อเส้นกราฟ  $-\frac{1}{N(a)}$  ปรากฏอยู่ทางซ้ายมือของกราฟ  $G(j\omega)$  ในทิศทางที่  $\omega$  เพิ่มขึ้น ”

เสถียรภาพโคเชนเบอร์เกอร์อาจทำความเข้าใจได้ง่ายโดยดูได้จากภาพที่ 5.3



ภาพที่ 5.3 เกณฑ์เสถียรภาพโคเชนเบอร์เกอร์ (Kochenberger stability criterion )

5.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ปรากฏรีโซแนนซ์การบิดด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม



ภาพที่ 5.4 ระบบสองมวลที่ปรากฏความไม่เป็นเชิงเส้น

จากผลการดำเนินงานที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 พบว่า เมื่อมีการขยายงานการทำงานของระบบสมรรถนะของระบบถูกจำกัดด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นภายใน การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะในวงรอบปิดของระบบ หมายความว่าตัวชดเชยในวิถีไปหน้าจะไม่นำมาใช้ในการพิจารณา เพราะทราบเป็นที่แน่นอนว่าตัวชดเชยดังกล่าวเสถียรและตายตัว (fixed) จึงไม่กระทบต่อเสถียรภาพของระบบวงรอบปิด ระบบรวมจึงปรากฏเป็นดังภาพที่ 5.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบปิดตามภาพที่ 5.4 อาจเขียนแสดงได้ว่า

$$\frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{G(j\omega)}{1 + N(a)GH(j\omega)} \quad (5-10)$$

ซึ่งมีสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$1 + N(a)GH(j\omega) = 0$$

หรือ

$$GH(j\omega) = -\frac{1}{N(a)} \quad (5-11)$$

จากสมการที่ (5-11) เมื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม จะดำเนินการโดยทำการวาดกราฟของระบบวงรอบเปิด  $GH(j\omega)$  บนระนาบเชิงซ้อน ในทิศทางที่  $\omega$  มีค่าเพิ่มขึ้น และวาดกราฟของ  $-\frac{1}{N(a)}$  ในทิศทางที่  $a$  มีขนาดเพิ่มขึ้นไว้บนระนาบเดียวกัน เมื่อ  $N(a)$  คือฟังก์ชันพหุนามของความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิมิตัว แสดงได้ดังสมการที่ (5-12) และผลการคำนวณที่กล่าวถึงแสดงได้ดังภาพที่ 5.5

$$N(a) = \frac{2K}{\pi} \left[ \sin^{-1}\left(\frac{\delta}{a}\right) + \left(\frac{\delta}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{a}\right)^2} \right] \quad (5-12)$$

เมื่อ

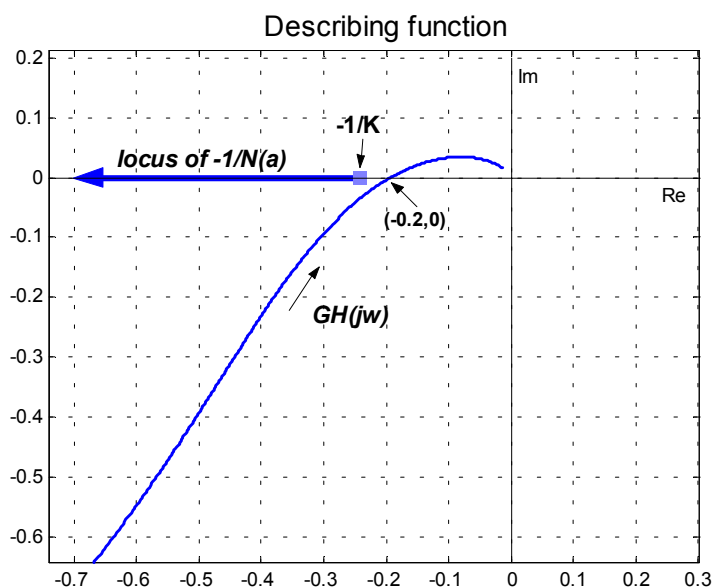
$N(a)$  คือ ฟังก์ชันพหุนามของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิมิตัว

(รายละเอียดดูได้ใน ภาคผนวก ง.)

$K$  คือ ความชันของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิมิตัว

$a$  คือ ขนาดอินพุตชานน์

$\delta$  คือ จุดที่เริ่มเกิดการอิมิตัวของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิมิตัว



ภาพที่ 5.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา

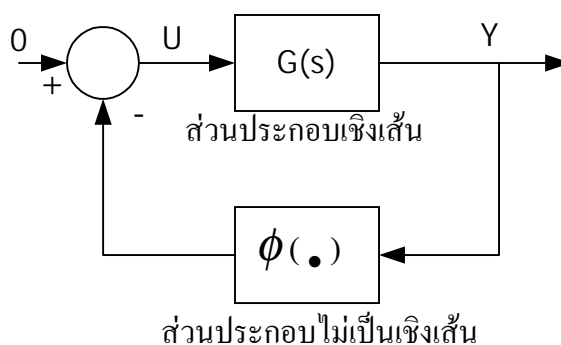
จากภาพที่ 5.5 สังเกตได้ว่ากราฟของ  $-\frac{1}{N(a)}$  จะเริ่มที่จุด  $-1/K$  ไปจนถึงอนันต์ ส่วนกราฟของระบบวงรอบเปิด  $GH(j\omega)$  จะตัดแกน x ที่จุด  $(-0.2, 0)$  การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของโคเชนเบอเกอร์ จะต้องมีเงื่อนไขคือ  $-1/K > -0.2$  หรือ  $K < 5$  ดังนั้นจากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถที่จะกำหนดช่วงของค่าความชัน  $K$  ที่ทำให้ระบบเสถียรได้คือ  $0 < K < 5$

ดังนั้นเมื่อนำค่าความชันลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบขยายย่าน ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามตามสมการที่ (4-9) กล่าวคือ  $1.1447 \leq K_{SAT} \leq 1.3581$  มาพิจารณาตามเงื่อนไขที่ได้จากวิธีฟังก์ชันพรรณนา พบว่า สมการที่ (4-9) สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าระบบขยายย่านที่ทำการพิจารณามีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา

### 5.3 การวิเคราะห์ด้วยเกณฑ์ของโพพอฟ

#### 5.3.1 ทบทวนเกณฑ์ของโพพอฟ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเกณฑ์การตรวจสอบเสถียรภาพอีกแบบหนึ่ง ที่ดำเนินการในโดเมนความถี่ เป็นเกณฑ์ที่มีเงื่อนไขเพียงพอสำหรับเสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้น โครงสร้างของระบบไม่เป็นเชิงเส้นอธิบายได้ดังภาพที่ 5.6

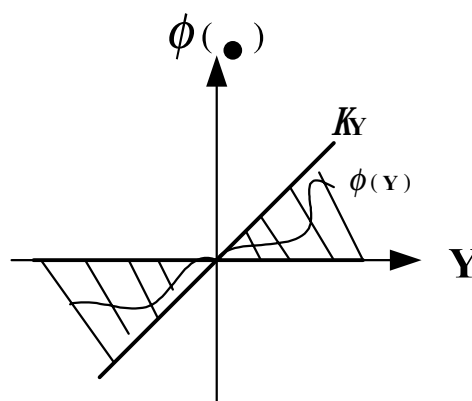


ภาพที่ 5.6 ระบบป้อนกลับสำหรับเกณฑ์ของโพพอฟและเกณฑ์วงกลม

จากภาพที่ 5.6 ในส่วนของวิธีไปหน้าประกอบด้วยระบบที่มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นและเป็นอิสระต่อเวลา (LTI system) ในส่วนของวิธีป้อนกลับประกอบไปด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นอิสระต่อเวลาหรืออาจขึ้นอยู่กับเวลาก็ได้

ระบบป้อนกลับสำหรับเกณฑ์ของโพพอฟ จะต้องมีความสมบัติดังนี้

1.  $G(s)$  ต้องเป็นเชิงเส้น, อิสระต่อเวลา, โพลอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส (อยู่ที่แกน  $j\omega$  ก็ได้)
2. ระบบป้อนกลับที่พิจารณาเป็นระบบที่ไม่มีสัญญาณอินพุต
3. ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็นอิสระต่อเวลา มีพฤติกรรมอยู่ภายใต้เซกเตอร์  $[0, K]$  แสดงได้ดังภาพที่ 5.7



ภาพที่ 5.7 ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่ล้อมรอบด้วยเซกเตอร์  $[0, K]$



จากภาพที่ 5.7 อธิบายได้ด้วยสมการ (5-13)

$$0 \leq \frac{\phi(y)}{y} \leq K \quad (5-13)$$

เมื่อ  $y \neq 0$  และ  $0 < K < \infty$

4.  $\phi(0) = 0$  หมายความว่า ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องมีค่าเท่ากับ 0 ที่จุดกำเนิด

จากสมการที่ (5-13) ที่อธิบายได้ดังภาพที่ 5.7 สังเกตได้ว่าลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น กำหนดเขตล้อมรอบด้วยเซกเตอร์  $[0, K]$  เซกเตอร์นี้ได้หมายถึงฟังก์ชันหรือสมการใดๆที่อธิบายความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะ ซึ่งแตกต่างจากวิธีฟังก์ชันพหุนาม

**ทฤษฎีบท (เกณฑ์ของโพพอฟ)** ระบบป้อนกลับดังภาพที่ 5.6 จะมีเสถียรภาพในเซกเตอร์  $[0, K]$  ก็ต่อเมื่อสามารถหาค่า  $q$  ที่ทำให้สมการนี้เป็นจริง

$$\text{Re}[(1 + j\omega q)G(j\omega)] + \frac{1}{K} > 0 \quad (5-14)$$

[ การพิสูจน์ทฤษฎีบท (เกณฑ์ของโพพอฟ) ดูได้จาก (Vidyasagar, 1993, pp. 231-234)]

*ความหมายเชิงกราฟิกของเงื่อนไขโพพอฟ*

เมื่อ  $G(j\omega) = x + jy$  อสมการ (5-14) เขียนได้ใหม่เป็น

$$= \text{Re}[(1 + j\omega q)(x + jy)] + \frac{1}{K} \geq \delta > 0 \quad (5-15)$$

$$= \text{Re}[x + j\omega qx + jy - \omega qy] + \frac{1}{K} \geq \delta > 0$$

$$= x - \omega qy + \frac{1}{K} \geq \delta > 0$$

$$= \text{Re}[G(j\omega)] - \omega q \text{Im}[G(j\omega)] + \frac{1}{K} \geq \delta > 0 \quad (5-16)$$

จากสมการที่ (5-16) กำหนดให้โลกัสมิทโพพอฟ คือ

$$G^*(j\omega) = X^*(j\omega) + jY^*(j\omega)$$

เมื่อ

$$X^*(j\omega) = \text{Re}[G(j\omega)] \quad \text{และ} \quad Y^*(j\omega) = \omega \text{Im}[G(j\omega)]$$

จะได้สมการใหม่เป็น

$$X^*(j\omega) - qY^*(j\omega) + \frac{1}{K} \geq \delta > 0 \quad (5-17)$$

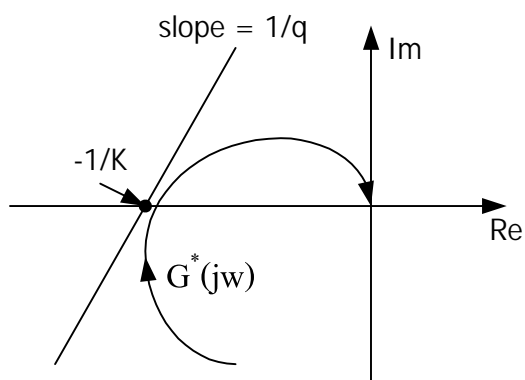
สมการ (5-17) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ โดยอธิบายได้ดังนี้

“ โลกัสมิทโพพอฟ  $G^*(j\omega)$  จะต้องอยู่ทางขวามือของเส้นตรงโพพอฟที่ตัดแกน  $X$  ณ จุด  $-1/K$  และมีความชันเท่ากับ  $1/q$  ”

เส้นตรงของโพพอฟเขียนได้ดังสมการที่ (5-18)

$$X^*(j\omega) - qY^*(j\omega) + \frac{1}{K} = 0 \quad (5-18)$$

จากเงื่อนไขของโพพอฟอาจทำความเข้าใจได้ง่าย โดยดูภาพที่ 5.8 ประกอบคำอธิบาย



ภาพที่ 5.8 แผนภาพในโดเมนความถี่ใช้สำหรับการพิจารณาตามเกณฑ์ของโพพอฟ

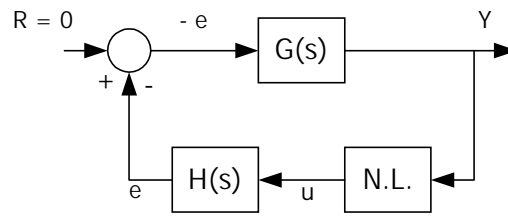
จากที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้นตามภาพที่ 5.6 ด้วยวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ ดำเนินการตามนี้

1. วาดกราฟ  $G^*(j\omega)$  บนระนาบเชิงซ้อน
2. หาเส้นตรงโพพอฟตามสมการที่ (5-18) โดยที่กราฟของ  $G^*(j\omega)$  อยู่ทางขวาของเส้นตรงเส้นนี้ และหาค่า  $-1/K$  ที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้
3. เมื่อได้จุด  $-1/K$  แล้ว กำหนดเซกเตอร์  $[0, K]$  เป็นเซกเตอร์ที่ครอบคลุมลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้ระบบเสถียร

### 5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ปรากฏรีโซแนนซ์การบิดด้วยเกณฑ์ของโพพอฟ

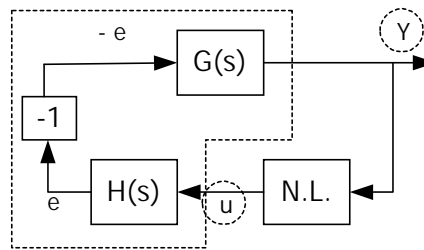
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบตามภาพที่ 5.4 สังเกตได้ว่าระบบป้อนกลับดังกล่าว มีโครงสร้างแตกต่างจากระบบป้อนกลับสำหรับเกณฑ์ของโพพอฟดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ จำเป็นต้องทำการปรับโครงสร้างของระบบตามภาพที่ 5.4 ให้อยู่ในรูปแบบตามภาพที่ 5.6 ก่อน รายละเอียดการดำเนินการในขั้นตอนนี้อธิบายได้จากภาพที่ 5.9 ภาพที่ 5.9 ก) แสดงถึงระบบสองมวลที่ปรากฏลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาระบบ ในกรณีที่ไม่มียืดหยุ่น  $R=0$  ดังนั้นภาพที่ 5.9 ก) สามารถเปลี่ยนส่วนของจุดรวมสัญญาณไปเป็นอัตราขยายเท่ากับ  $-1$  ได้ ดังภาพที่ 5.9 ข) ในส่วนของเส้นประที่ติกรอบล้อมรอบไว้ แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของระบบในส่วนที่เป็นเชิงเส้น ภายในกรอบสามารถสลับที่บล็อกต่างๆแล้วจัดให้อยู่ในรูปที่ต้องการ โดยอาศัยคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น การจัดโครงสร้างดูได้ตามภาพที่ 5.9 ค) และ ง) ตามลำดับ ผลสุดท้ายจะได้ระบบที่สอดคล้องเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ ดังภาพที่ 5.9 จ) จะเห็นว่าส่วนที่เป็นเชิงเส้นนั้นหมายถึงฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดของระบบสองมวล ( $GH(s)$ ) และ ในส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีนี้ จะถือว่าลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบอยู่ในเซกเตอร์  $[0, K]$  จากนั้นดำเนินการวาดล็อกสโพพอฟของระบบสองมวลในระนาบเชิงซ้อน กราฟที่ได้ปรากฏดังภาพที่ 5.10 จากภาพพบว่าล็อกสโพพอฟตัดแกน  $x$  ที่จุด  $(-0.18, 0)$  ถ้าพิจารณาเสถียรภาพตามเงื่อนไขของวิธีการนี้ ค่า  $K$  ควรมีค่าไม่เกิน  $1/0.18 = 5.56$  ซึ่งหมายความว่าค่าความชันของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องอยู่ในช่วงของเซกเตอร์  $[0, 5.56]$  หรือ  $0 < K < 5.56$  ระบบจึงจะรักษาเสถียรภาพไว้ได้

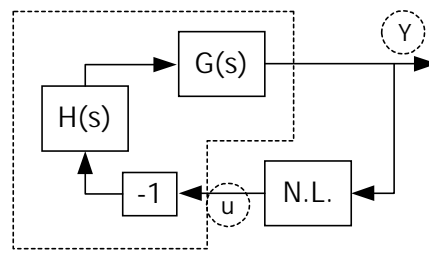


Two-Inertia System

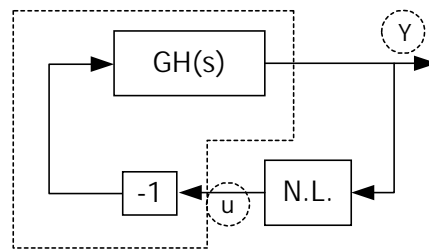
ก)



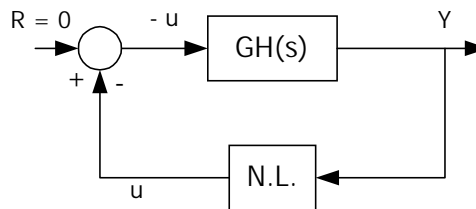
ข)



ค)



ง)

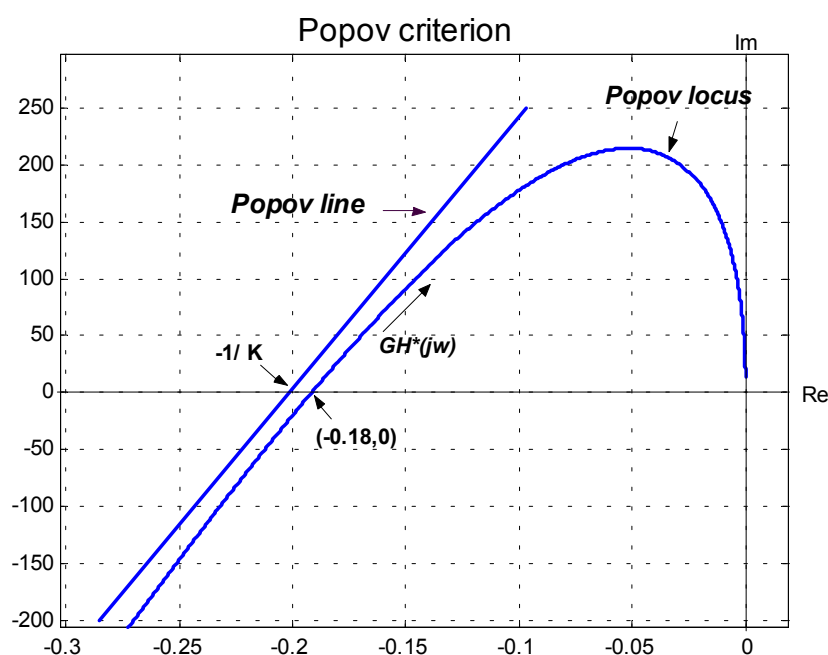


Popov's System

จ)

ภาพที่ 5.9 ขั้นตอนการปรับโครงสร้างของระบบให้สอดคล้องกับวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ

ในทำนองเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม เมื่อนำค่าความชันลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นของระบบขยายย่าน ตามสมการที่ (4-9) มาพิจารณาตามเงื่อนไขที่ได้จากเกณฑ์ของโพพอฟ พบว่า สมการที่ (4-9) สอดคล้องกับเงื่อนไขของวิธีการนี้ จึงสรุปได้ว่าระบบขยายย่านที่ทำการพิจารณามีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาด้วยเกณฑ์ของโพพอฟ



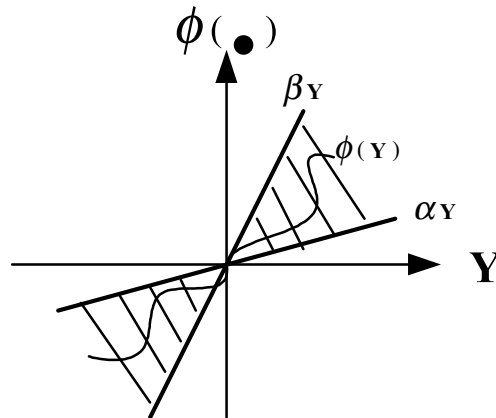
ภาพที่ 5.10 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของโพพอฟ

## 5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์วงกลม

### 5.4.1 ทบทวนเกณฑ์วงกลม

วิธีเกณฑ์วงกลมเป็นวิธีในโดเมนความถี่ เช่นเดียวกับวิธีฟังก์ชันพหุนามและวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ โครงสร้างระบบสำหรับวิธีเกณฑ์วงกลมจะมีโครงสร้างเหมือนกับวิธีเกณฑ์ของโพพอฟดังภาพที่ 5.6 การดำเนินการสำหรับวิธีนี้จะคล้ายกับวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ แตกต่างกันที่วิธีเกณฑ์ของวงกลมจะพิจารณาลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในเซกเตอร์  $[\alpha, \beta]$  เขียนได้ดังสมการที่ (5-19) และภาพที่ 5.11

$$\alpha \leq \frac{\varphi(y)}{y} \leq \beta \quad (5-19)$$

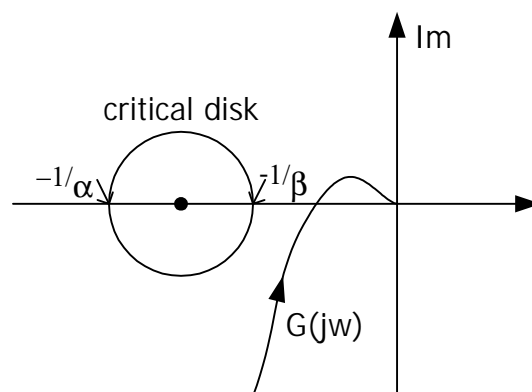


ภาพที่ 5.11 ขอบเขตลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่ล้อมรอบด้วยเซกเตอร์  $[\alpha, \beta]$

**ทฤษฎีบท (เกณฑ์วงกลม)** ระบบป้อนกลับดังภาพที่ 5.6 จะมีเสถียรภาพในเซกเตอร์  $[\alpha, \beta]$  ก็ต่อเมื่อกราฟของ  $G(j\omega)$  ไม่สัมผัสหรืออยู่ในวงวิกฤต (critical disk) ซึ่งตัดแกน  $x$  ในระนาบเชิงซ้อนที่จุด  $-1/\alpha$  และ  $-1/\beta$  จุดศูนย์กลางอยู่ที่  $-(\alpha+\beta)/2\alpha\beta$  และมีรัศมีเท่ากับ  $(\beta-\alpha)/2\alpha\beta$  ดังแสดงในภาพที่ 5.12

ทฤษฎีบทที่ได้นำเสนอใช้ได้กับลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่อยู่ในเซกเตอร์  $[\alpha, \beta]$  และค่า  $0 < \alpha < \beta$

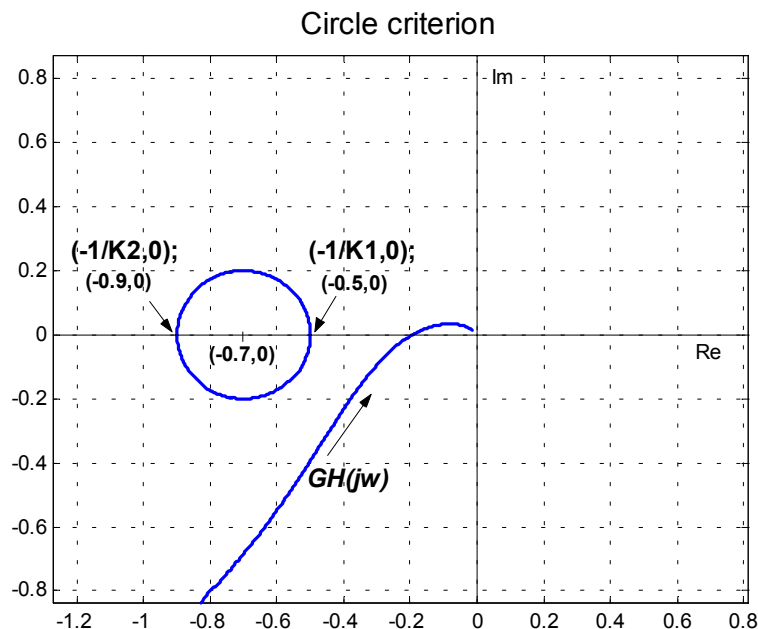
[ การพิสูจน์ทฤษฎีบท (เกณฑ์วงกลม) ดูได้จาก (Vidyasagar, 1993, pp. 223-231)]



ภาพที่ 5.12 ความหมายเชิงกราฟิกของเกณฑ์วงกลม

#### 5.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ปรากฏวิธีโซ่เนนซ์การปิดด้วยเกณฑ์วงกลม

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีเกณฑ์วงกลม จะกำหนดเซกเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นเป็น  $[K_1, K_2]$  ทำการปรับโครงสร้างระบบสองมวลให้สอดคล้องกับวิธีเกณฑ์วงกลมซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการเช่นเดียวกับวิธีเกณฑ์ของโพพอฟ ดังภาพที่ 5.9 จากนั้นดำเนินการวาดกราฟของระบบวงรอบเปิด  $GH(j\omega)$  ลงบนระนาบเชิงซ้อน เช่นเดียวกับวิธีฟังก์ชันพหุนามแตกต่างกันตรงที่วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องวาดกราฟ  $-1/N(s)$  แต่ทำการกำหนดวงวิกฤตแทนซึ่งมีเงื่อนไขการพิจารณาดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 5.13 สังเกตได้ว่าวงวิกฤต



ภาพที่ 5.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์วงกลม

ตัดแกน  $x$  ที่จุด  $(-0.9, 0)$  และ  $(-0.5, 0)$  ดังนั้นค่า  $K$  ควรจะมีค่าอยู่ในช่วง  $1/0.9$  ถึง  $1/0.5$  ซึ่งหมายความว่า ความชันของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่ระบบยังคงเสถียร จะต้องอยู่ในช่วงของเซกเตอร์  $[1.11, 2]$  หรือ  $1.11 < K < 2$

ดังนั้น เมื่อดำเนินการทำนองเดียวกับสองวิธีแรก ก็พบว่า สมการที่ (4-9) สอดคล้องกับเงื่อนไขของวิธีการนี้ จึงสรุปได้ว่าระบบขยายยานที่ทำการพิจารณามีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาด้วยเกณฑ์วงกลม

## 5.5 สรุป

จากผลการทดสอบเสถียรภาพทั้ง 3 วิธี สามารถกำหนดช่วงค่าความชื้นของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นแบบอิมิตัวที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัวที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามูดังสมการที่ (4-9) นั้นคือ  $1.1447 \leq K_{SAT} \leq 1.3581$  พบว่าค่าความชื้นของระบบดังกล่าวสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ได้จากวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพทั้ง 3 วิธี แสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 5.1 ตารางผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบเสถียรภาพทั้ง 3 วิธี

วิธีการตรวจสอบเสถียรภาพ	ค่าความชื้น	
	จากการตรวจสอบเสถียรภาพ	จากวิธีการค้นหาแบบตามู
ฟังก์ชันพหุนาม	$0.00 < K < 5.00$	
เกณฑ์ของโพพอฟ	$0.00 < K < 5.56$	$1.1447 \leq K_{SAT} \leq 1.3581$
เกณฑ์วงกลม	$1.11 < K < 2.00$	

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบสามารถขยายงานการทำงานให้กว้างขึ้นได้โดยมีระดับของสัญญาณอินพุตเพิ่มขึ้นเป็น 2.1 โวลต์หรืออีกนัยหนึ่งคือสามารถควบคุมระบบในย่านของความเร็วได้เพิ่มขึ้นจากเดิม 143 rpm ไปเป็น 223 rpm ขณะที่มีการประกันเสถียรภาพของระบบได้เป็นอย่างดี

นอกจากนั้น หากพิจารณาถึงผลตอบสนองต่ออินพุต ที่ได้รับการแสดงไว้ในภาพที่ 2.3 ของบทที่ 2 (หน้าที่ 8) พบว่า ระบบเมื่อทำการขยายงานการทำงานยังสามารถตอบสนองต่ออินพุตและใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว สำหรับเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเมื่ออินพุตเท่ากับ 1.7-2.1 โวลต์มีค่าค่อนข้างสูง แต่ก็ยังเป็นค่าที่พอยอมรับได้ในการใช้งานจริง



## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการขยายย่านการทำงานของระบบสองมวลความถี่ที่มีการปรับแก้รีโซแนนซ์การบิดไว้แล้ว (Sujitjorn, U-Thaiwasin, and Prempraneerat, 2000) ผลการขยายย่านการทำงานทำให้ปรากฏลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจเกิดได้จาก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาสร้างเป็นตัวชดเชย วงจรขับมอเตอร์ การระบุเอกลักษณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ได้แบบจำลองที่สมจริง สามารถทราบขอบเขตขยายย่านการทำงานของระบบที่ยังคงให้สมรรถนะที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิดความมั่นใจที่จะใช้ระบบในย่านการทำงานที่กว้างขึ้น จึงทำการตรวจสอบเสถียรภาพระบบไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีในโดเมนความถี่ 3 วิธี เพื่อเปรียบเทียบผล ผลที่ได้สรุปได้ว่า ระบบสามารถขยายย่านการทำงานให้กว้างขึ้นได้ โดยมีระดับของสัญญาณอินพุตสูงสุดในทางปฏิบัติเป็น 2.1 โวลต์ อีกนัยหนึ่งคือสามารถควบคุมระบบในย่านของความเร็วได้เพิ่มขึ้นจากเดิม 143 rpm ไปเป็น 223 rpm ขณะที่มีการประกันเสถียรภาพของระบบได้อย่างดี และระบบตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตได้อย่างรวดเร็ว

#### 6.2 สรุป

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้บรรลุวัตถุประสงค์ ตามที่ตั้งไว้ทุกประการ มีผลการวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรม ดังนี้ เมื่อนำผลการทดสอบสมรรถนะของระบบสองมวลในกรณีขยายย่านการทำงาน มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง สาเหตุเนื่องมาจาก การอ้อมตัวของออปแอมป์ที่นำมาสร้างเป็นตัวชดเชย และวงจรขับมอเตอร์มีระบบนิรภัยคอยป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย จากเหตุผลดังกล่าว สรุปได้ว่า การขยายย่านการทำงานของระบบที่ได้รับการปรับแก้รีโซแนนซ์การบิดไว้แล้ว ต้องคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นภายในของระบบ งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการค้นหาแบบตามู มาใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น และยังแสดงผลการทดสอบในการหาพารามิเตอร์กำหนดแก่อัลกอริทึมการค้นหาที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อส่งผลให้สามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็ว

และหลุดออกจากการลือคของคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ดี ผลการค้นหาลักษณะเฉพาะเป็นกลุ่มของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นตรงส่วนของระบบวิถีป้อนกลับ ดังนั้นเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงกำหนดขอบเขตล้อมรอบกลุ่มของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น เป็นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ทำให้ได้ช่วงค่าความชันของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นที่นำมาใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ จากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม เกณฑ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้ ในขณะที่ทำการขยายงานการทำงาน จึงสรุปได้ว่า ระบบสองมวลที่มีการปรับแก้รีโซแนนซ์การบิดไว้แล้วสามารถขยายงานการทำงานได้กว้างขึ้นจากเดิม 55.94 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่มีการประกันเสถียรภาพของระบบได้เป็นอย่างดี

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

1. การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับงานวิจัยนี้ จะพิจารณาเฉพาะในวงรอบของระบบ หมายความว่าตัวชดเชยในวิถีไปหน้าจะไม่นำมาใช้ในการพิจารณา เพราะทราบเป็นที่แน่นอนว่าตัวชดเชยเสถียรและตายตัว (fixed) จึงไม่กระทบต่อเสถียรภาพวงรอบปิด ดังนั้นระบบรวมที่ทำการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วยระบบสองมวลปรากฏในส่วนของวิถีไปหน้า ตัวชดเชยป้อนกลับและความไม่เป็นเชิงเส้น จะปรากฏอยู่ในส่วนวิถีป้อนกลับ การวิเคราะห์ดังกล่าวดำเนินไปโดยเชื่อว่าระบบสองมวลมีพารามิเตอร์ที่ตายตัว แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสองมวลอาจเกิดความคลาดเคลื่อนซึ่งอาจเกิดจากความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ความคงทน (robustness) ต่อความไม่แน่นอน (uncertainty) ในแบบจำลองของระบบสองมวลเป็นสิ่งสำคัญยิ่งต่อระบบควบคุม การวิเคราะห์ความคงทนในสมรรถนะและในเสถียรภาพของระบบจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ทฤษฎีการวิเคราะห์ความคงทนมีรากฐานมาจากทฤษฎีบทคาริโทนอฟ (Kharitonov) เหมาะกับการใช้งานเมื่อแบบจำลองของระบบมีลักษณะเป็นช่วง (interval plant model) หมายความว่าพารามิเตอร์ของระบบเกิดความไม่แน่นอนในลักษณะเป็นช่วง

2. การพิจารณาความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ตามทฤษฎีบทคาริโทนอฟ จะพิจารณาที่ขอบของช่วงเป็นสิ่งสำคัญ คำถามที่สำคัญคือ ความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนเหล่านี้เกิดขึ้นได้อย่างไร และส่งผลต่อความคงทนของระบบโดยรวมอย่างไร การหาคำตอบให้กับคำถามดังกล่าวอาจทำการพิจารณาการผันแปรของพารามิเตอร์ในแบบจำลองของระบบเป็นแบบสุ่ม (random variation) มีการกระจายแบบนอร์มัลเกาส์เซียน (normal Gaussian distribution) จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

รายการอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

ซัชชัย อุทัยสิน. (2543). การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวล โดยใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Atherton, D.P. (1982). **Nonlinear Control Engineering**. New York: Van Nostrand Reinhold.

Basar, T. (2001). **Control Theory: Twenty-Five Seminal Papers**. New York: IEEE Press.

Bland, J.A., and Dawson, G.P. (1991). Tabu search and design optimization. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 23 (3): 195-201.

Brogan, W.L. (1991). **Modern Control Theory**. London: Prentice-Hall.

Drof, R.C., and Bishop, R.H. (1998). **Modern Control Systems**. New York: Addison-Wesley.

Eronini, U.E. (1999). **System Dynamic & Control**. Pacific Grove: PWS Publishing Company.

Fujikawa, K., et al. (1991). Robust and fast speed control for torsional system based on state- space method. **Proc. IEEE IECON'91** (pp. 687-692).

Glad, T., and Ljung, L. (2000). **Control Theory: Multivariable and Nonlinear Methods**. London: Taylor & Francis.

Haddad, W.M., Collins, E.G., and Bernstein, D.S. (1993). Robust stability analysis using the small gain, circle, positivity, and Popov theorems: a comparative study. **IEEE Trans. Control Systems Technology**. 1 (4): 290-293.

Hagiwara, T., Miyake, Y., Furutani, E., and Araki, M. (1991). Stability condition of a class of nonlinear feedback system. **IEEE Trans. Automatic Control**. 44 (8): 1573-1577.

Hassul, M. (1993). **Control System Design Using MATLAB**. London: Prentice-Hall.

- Hirata, H., et al. (1995). Speed control of dc motor with torsional oscillation and load fluctuation. **Proc. of Sch. Eng, Tokai University**. 35 (3): 31-41.
- Houpis, C.H., and Lamont, G.B. (1985). **Digital Control System**. New York: McGraw–Hill.
- Ji, J.K., and Sul, S.K. (1995). Kalman filter and LQ based speed controller for torsional vibration suppression in a 2-mass motor drive system. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 42 (6): 564-571.
- Ji, J.K., et al. (1993). LQG based speed controller for torsional vibration suppression in 2-mass system. **Proc. IEEE IECON'93** (pp. 1157-1162).
- Kaplan, A., Ozer, S., and Sagiroglu, S. (1998). Membership function optimization of a fuzzy controller using modified tabu search algorithm. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 98 (7): 64-67.
- Khalil, H.K. (1996). **Nonlinear System**. London: Prentice Hall.
- Lefschetz, S. (1965). **Stability of Nonlinear Control Systems**. New York: Academic Press.
- Letov, A.M. (1996). **Stability in Nonlinear Control Systems**. New York: Princeton University Press.
- Lenov, and Alekseevich, G. (1991). **Frequency Domain Method for Nonlinear Analysis: Theory and Application**. NJ: World Scientific.
- Mantawy, A.H., Abdel-Magid, Y.L., and Selim, S.Z. (1998). Unit commitment by tabu search. **Proc. IEE Generation, Transmission, and Distribution**. 145 (1): 56-64.
- Ngamwiwit, J., U-thaiwasin, C., Prempraneerach, Y., and Sujitjorn, S. (2000). Torsional resonance suppression via PIDA controller. **Proc. IEEE Conf. Artificial Intelligence & Robotics–TENCON 2000**. Kuala Lumpur: Malaysia.
- Ogata, K. (1990). **Modern Control Engineering**. London: Prentice-Hall.
- Ondrejkorá, R. (1999). **Describing Function Method**. [On-line]. Available: <http://www.kar.elf.stuba.sk/~ondrejkr/english/captions.html>.
- Phillips, C.L., and Harbor, R.D. (2000). **Feedback Control System**. NJ: Prentice-Hall.

- Song, S.H., et al. (1993). Torsional vibration suppression control in 2-mass system by state feedback speed controller. **Proc. IEEE CCA'93** (pp. 129-134).
- Sujitjorn, S., U-Thaiwasin, C., and Prempraneerat, Y. (2000). Torsional resonance suppression via pole-zero assignment. **Proc. 19th IASTED Int. Conf. Modelling, Identification, and Control** (pp. 288-292). Innsbruck: Austria.
- Sujitjorn, S., and Kulworawanichpong, T. (2001). Optimal power flow using tabu search. **IEEE Power Engineering Review**. (in print)
- Teel, A.R. (1996). On graphs, conic relations, and input-output stability of nonlinear feedback systems. **IEEE Trans. Automatic Control**. 41 (5): 702-709.
- Vidyasagar, M. (1993). **Nonlinear Systems Analysis**. London: Prentice-Hall.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

### โปรแกรมวิธีการค้นหาแบบตาบ

```
function [best_neighbor,best_error,time,S0]=tabusearch(N)
%N=numbers of parameter of nonlinear element
%randomly selecting initial solution
tic;
%row1 of xlimit=upper limit
%row2 of xlimit=lower limit
xlimit=[10 5 5;0 0 0];
#####
%find feasible solution for initial solution
for r=1:5
    S(r,:)=(xlimit(1,:)-xlimit(2,:)).*rand(1,N))+xlimit(2,:);
end
%for input 1.7 volt
load data17;
tsim=0:0.2/2000:0.2;

for k=1:size(S,1)
    ysim=simulation_system(1.7,2000,S(k,1),S(k,2),S(k,3));
    [ysim_interp,t_def]=selectxsim(ysim,tsim);
    errorvalue(k,1)=sum((ysim_interp-data17).^2);
end

[best_error,index]=min(errorvalue);
S0=S(index,:);
#####
max_count=50;
best_neighbor=S0;
neighbor_list=zeros(5,N);
radius=0.1;
Number_neighb=30;
overall_best_error=best_error;
overall_neighbor=best_neighbor;
n=0;
n_back_tracking=0;
%start program : Tabu search

for count=1:max_count
    S1=random_neigh(Number_neighb,radius,xlimit,S0);

[best_error1,best_neighbor1,best_error,best_neighbor]=Object
ive_function
(S1,best_error,S0);
```



```

m=mod(count,5);
    if m==0
        k=5;
        best_neighbor
    else
        k=m;
    end

    neighbor_list(k,1:size(S0,2))=[best_neighbor1];
    neighbor_list(k,size(S0,2)+1)=best_error1;

    if (best_error1-best_error)>1e-18
        n=n+1;
    else
        n=0;
    end

    %back_tracking
    if n>15
        n_back_tracking=n_back_tracking+1;
        neighbor=neighbor_list(3,1:size(neighbor_list,2)-1);
        S0=neighbor;
        if best_error<overall_best_error
            overall_best_error=best_error;
            overall_best_neighbor=best_neighbor;
            n_back_tracking=0;
        end
        n=0;
        best_error=neighbor_list(3,size(neighbor_list,2));
    else
        S0=best_neighbor;
        best_error=best_error;
    end
    %end back_tracking
    disp([count n])
    format long e
    disp([best_error overall_best_error])
    disp(' ');
    format
    if n_back_tracking>15
        break
    end
    %if best_error<=3.75e-001
    %break;
    %end
end

%set overall

```

```
if overall_best_error<best_error
    best_error=overall_best_error;
    best_neighbor=overall_best_neighbor;
end
time=toc;
return
```

## ภาคผนวก ข.

### โปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชัน Objective\_function.m

```
function
[best_error1,best_neighbor1,best_error,best_neighbor]=Objective_function(S1,best_error,S0)
tsim=0:0.2/2000:0.2;
error=[];
load data17;

for k=1:size(S1,1)
    ysim=simulation_system(1.7,2000,S1(k,1),S1(k,2),S1(k,3));
    [ysim_interp,t_def]=selectxsim(ysim,tsim);
    error(k,1)=sum((ysim_interp-data17).^2);
end

[best_error1,index]=min(error);
best_neighbor1=S1(index,:);

if best_error1<best_error
    best_error=best_error1;
    best_neighbor=S1(index,:);
else
    best_neighbor=S0;
end
return
```

ฟังก์ชัน random\_neigh.m

```
function S1=random_neigh(Number_neighb,radius,xlimit,S0)
for u=1:Number_neighb
    for k=1:size(xlimit,2)
        S1(u,k)=S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
    end
end
return
```

ฟังก์ชัน rand1.m

```
function x=rand1(a,b)
% a uniform distribution on the interval (a,b).
% a < b.
```

```
x=a+rand*(b-a);
```

ฟังก์ชัน selectxsim.m

```
function [ysim_interp,t_def]=selectxsim(ysim,tsim)
nsim=length(tsim);
last_sim=tsim(nsim);
t_def=0:last_sim/(250-1):last_sim;
ysim_interp(1)=0;
for u=2:250
    ysim_interp(u)=interp1(tsim',ysim',t_def(u));
end
return
```

## ภาคผนวก ค.

### โปรแกรมการจำลองสถานการณ์ในโดเมนเวลาด้วยเทคนิคไบลิเนียร์

```
%function model plant with nonlinear element
%xl=lower input of nonlinear
%xu=upper inper of nonlinear
%m=slope of nonlinear

function y=simulation_system(A,N,m,xu,xl)

%initial value

y=0;
e=0;
d=0;
c=0;
rk=A;
e1=0;
e2=0;

%start program

for k=1:N+1
    if k>1
        yk1=y(k-1);
        ck1=c(k-1);
        dk1=d(k-1);
        ek1=e(k-1);
        e1k1=e1(k-1);
        e2k1=e2(k-1);
        rk1=A;
    else
        yk1=0;
        ck1=0;
        dk1=0;
        ek1=0;
        rk1=0;
        e1k1=0;
```

```

e2k1=0;
end
if k>2
yk2=y(k-2);
ck2=c(k-2);
dk2=d(k-2);
    ek2=e(k-2);
    e1k2=e1(k-2);
    e2k2=e2(k-2);
    rk2=A;
else
yk2=0;
    ck2=0;
dk2=0;
    ek2=0;
    e1k2=0;
    rk2=0;
    e2k2=0;
end
if k>3
yk3=y(k-3);
ck3=c(k-3);
dk3=d(k-3);
    ek3=e(k-3);
    e1k3=e1(k-3);
    e2k3=e2(k-3);
    rk3=A;
else
yk3=0;
    ck3=0;
dk3=0;
    ek3=0;
    e1k3=0;
    e2k3=0;
    rk3=0;
end
if k>4
yk4=y(k-4);
ek4=e(k-4);
else
yk4=0;
ek4=0;
end
end
d(k) = 2.35318362706083*dk1 - 1.84252416145537*dk2 +
0.48934053439454*dk3 + 14.27571276293349*rk -
35.04038587265492*rk1+ 28.66940662308130*rk2-
7.81892907902217*rk3;
c(k) = (1.0e+004*(1.22198522194186*ek1-
3.61536425740991*ek2 + 3.56585047000498*ek3 -
1.17246285539129*ek4)+ 2.35347217286232*ck1 -
1.84313028644538*ck2 + 0.48965811358305*ck3);
e1(k) = d(k)-c(k);

```

```
e2(k) = 1.0e-006*(0.16544682759865*e1(k)+
    0.49634048279595*e1k1 + 0.49634048279595*e1k2 +
    0.16544682759865*e1k3)+ (2.99703414559973*e2k1-
    2.99569733361198*e2k2 + 0.99866245762881*e2k3);
y(k)=e2(k);

%nonlinear element ( saturation )

    if (y(k)>=-xl)&(y(k)<=xu)
        e(k)=y(k)*m;
    elseif y(k)>xu
        e(k)= m*xu;
    elseif y(k)<-xl
        e(k)=-m*xl;
    else
    end
end
return
%end program
```

## ภาคผนวก ง.

### ฟังก์ชันพหุนามของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมพัลส์

การวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นต้องทำการสมมติพฤติกรรมต่างๆของระบบดังต่อไปนี้

ง.1 สัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์มีลักษณะเป็นสัญญาณชายน

ง.2 สัญญาณเอาต์พุตของฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ มีคาบเวลาและลักษณะของรูปสัญญาณเหมือนกับสัญญาณอินพุต (ปราศจากสัญญาณรบกวน)

ง.3 ส่วนของสัญญาณฮาร์โมนิกพื้นฐาน (fundamental harmonic) ของสัญญาณเอาต์พุตจะนำมาวิเคราะห์ โดยไม่สนใจสัญญาณที่ความถี่อื่นๆ เนื่องจากมีขนาดน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของสัญญาณฮาร์โมนิกพื้นฐาน ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบควบคุมส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นตัวกรองแบบต่ำผ่าน ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่สูงจะมีขนาดหรือความสำคัญน้อยลงเมื่อเทียบกับสัญญาณฮาร์โมนิกพื้นฐาน

ฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น นิยามว่า อัตราส่วนระหว่างส่วนประกอบของสัญญาณฮาร์โมนิกพื้นฐานของเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต อธิบายได้ดังสมการที่ (ง-1)

$$N = \frac{Y_1}{X} \phi_1 \quad (\text{ง-1})$$

เมื่อ

$N$  = ฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์

$X$  = ขนาดของสัญญาณอินพุตชายน

$Y_1$  = ขนาดของสัญญาณฮาร์โมนิกพื้นฐาน

$\phi_1$  = การเลื่อนเฟส (phase shift) ของสัญญาณฮาร์โมนิกพื้นฐานของเอาต์พุต

วิธีการคำนวณเพื่อหาฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น สิ่งสำคัญคือต้องหาสัญญาณฮาร์โมนิกพื้นฐานของเอาต์พุต เมื่อมีสัญญาณอินพุต  $x(t) = X\sin(\omega t)$  ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุต  $y(t)$  สามารถเขียน โดยอาศัยทฤษฎีอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังนี้



$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

$$= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3-2)$$

เมื่อ

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (3-3)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (3-4)$$

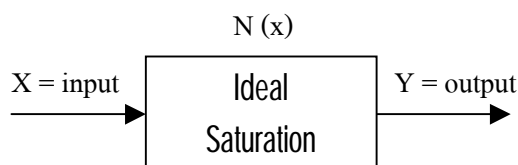
$$Y_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (3-5)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{A_n}{B_n} \right) \quad (3-6)$$

ดังนั้นจากสมการ (3-2) ถึง (3-6) นำไปแทนค่าในสมการที่ (3-1) จะได้

$$N = \frac{Y_1}{X} \phi_1 = \frac{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}{X} \tan^{-1} \left( \frac{A_1}{B_1} \right) \quad (3-7)$$

การดำเนินการหาฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 3.1 แผนภาพสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์

กำหนดให้

$$X = a \cos \theta \quad ; \theta = \omega t \quad (3-8)$$

$$N(x) = \begin{cases} mx & ; -\delta < x < \delta \\ m\delta & ; x \geq \delta \\ -m\delta & ; x \leq -\delta \end{cases} \quad (ง-9)$$

การวิเคราะห์หาฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ของลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัว จะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาเงื่อนไข 2 กรณี คือ

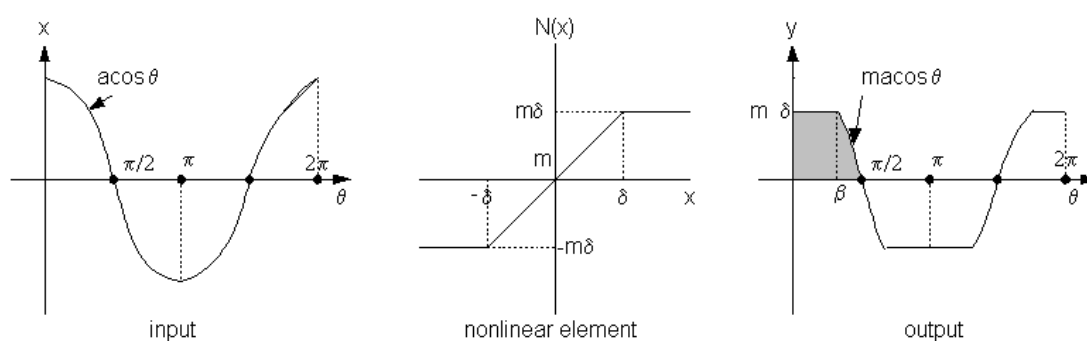
- กรณี  $a > \delta$

- กรณี  $a < \delta$

กรณี  $a > \delta$

$$y(\theta) = \begin{cases} m\delta & ; 0 \leq \theta < \beta \\ ma \cos \theta & ; \beta \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (ง-10)$$

จากสมการที่ (ง-10) เขียนรูปกราฟอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตได้ดังแสดงดังภาพที่ ง.2



ภาพที่ ง.2 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตกรณี  $a > \delta$

จากภาพที่ ง.2 เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟของเอาต์พุต จะพบว่า เอาต์พุตเป็นฟังก์ชันคู่ ดังนั้นเมื่อนำทฤษฎีอนุกรมฟูรีเยร์มาใช้ พจน์ของ  $b_n = 0$  (มงคล เดชนครินทร์, 2538) และ

$$\begin{aligned} m\delta &= m a \cos \beta \\ \delta &= a \cos \beta \\ \therefore \beta &= \cos^{-1}\left(\frac{\delta}{a}\right) \end{aligned} \tag{ง-11}$$

จากสมการที่ (ง-3) จะได้

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(\theta) \cos n\theta \, d\theta \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} y(\theta) \cos n\theta \, d\theta \\ &= \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\beta} m\delta \cos n\theta \, d\theta + \int_{\beta}^{\pi/2} m a \cos \theta \cos n\theta \, d\theta \right] \\ &= \frac{4m}{\pi} \left[ \int_0^{\beta} \delta \cos n\theta \, d\theta + \int_{\beta}^{\pi/2} a \cos \theta \cos n\theta \, d\theta \right] \\ &= \frac{4m}{\pi} \left[ \frac{\delta \sin n\beta}{n} - \frac{a \sin(n+1)\beta}{2(n+1)} - \frac{a \sin(n-1)\beta}{2(n-1)} \right] * \end{aligned}$$

สมการ (\*) ได้มาจากการใช้สูตรอินทิเกรต (Poularikas, 1999) ตามสมการที่ (ง-12)

$$\int \cos ax \cos bx \, dx = \frac{\sin(a-b)x}{2(a-b)} + \frac{\sin(a+b)x}{2(a+b)} \quad (9-12)$$

จากนั้นแทนค่า  $\delta = a \cos \beta$  จะได้ค่า  $a_n$  ดังนี้

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{4m}{\pi} \left[ \frac{a \cos \beta \sin n\beta}{n} - \frac{a(\sin n\beta \cos \beta + \cos n\beta \sin \beta)}{2(n+1)} - \frac{a(\sin n\beta \cos \beta - \cos n\beta \sin \beta)}{2(n-1)} \right] \\ &= \frac{4m}{\pi} * \frac{a}{2n} \left[ \frac{2 \cos \beta \sin n\beta}{1} - \frac{n(\sin n\beta \cos \beta + \cos n\beta \sin \beta)}{(n+1)} - \frac{n(\sin n\beta \cos \beta - \cos n\beta \sin \beta)}{(n-1)} \right] \\ &= \frac{2am}{\pi n} \frac{[C1 + C2 + C3]}{(n+1)(n-1)} \end{aligned}$$

เมื่อ  $C1$ ,  $C2$  และ  $C3$  มีค่าดังนี้

$$C1 = 2(n^2 - 1) \cos \beta \sin n\beta$$

$$C2 = -n(n-1)(\sin n\beta \cos \beta + \cos n\beta \sin \beta)$$

$$C3 = -n(n+1)(\sin n\beta \cos \beta - \cos n\beta \sin \beta)$$

แทนค่า  $C1$ ,  $C2$  และ  $C3$  จะได้

$$a_n = \frac{2am}{\pi n} \left[ \frac{2n \cos n\beta \sin \beta - 2 \cos \beta \sin n\beta}{(n+1)(n-1)} \right]$$

ทำการแยกเศษส่วนย่อย โดยใช้ทฤษฎีของเฮวีไซด์

$$a_n = \frac{K1}{(n+1)} + \frac{K2}{(n-1)}$$

โดยค่า  $K1$  และ  $K2$  มีค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
K1 &= \lim_{n \rightarrow -1} \frac{2n \cos n\beta \sin \beta - 2\cos \beta \sin n\beta}{(n-1)} = \frac{-2 \cos n\beta \sin \beta - 2\cos \beta \sin n\beta}{-2} \\
&= \cos n\beta \sin \beta + \cos \beta \sin n\beta \\
&= \sin (n+1)\beta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K2 &= \lim_{n \rightarrow 1} \frac{2n \cos n\beta \sin \beta - 2\cos \beta \sin n\beta}{(n+1)} = \frac{2 \cos n\beta \sin \beta - 2\cos \beta \sin n\beta}{2} \\
&= \cos n\beta \sin \beta - \cos \beta \sin n\beta \\
&= -\sin (n-1)\beta
\end{aligned}$$

แทนค่า K1 และ K2 สำหรับพจน์ จะได้

$$a_n = \frac{2am}{\pi n} \left[ \frac{\sin(n+1)\beta}{(n+1)} - \frac{\sin(n-1)\beta}{(n-1)} \right] \quad (\text{ง-13})$$

จากสมการที่ (ง-13) ค่า  $a_n$  เป็นค่าที่ได้จากกรณีอินพุตเป็นสัญญาณโคไซน์ ในกรณีที่อินพุตเป็นสัญญาณซายน์ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$m\delta = m\sin\alpha$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\delta}{a}\right) = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{\delta}{a}\right) = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (\text{ง-14})$$

แทนค่าสมการที่ (ง-14) ลงในสมการที่ (ง-13) จะได้

$$a_n = \frac{2am}{\pi n} \left[ \frac{\sin(n+1)\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{(n+1)} - \frac{\sin(n-1)\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{(n-1)} \right]$$

$$a_n = \frac{2am}{\pi n} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{(n-1)} \right]$$

จากนั้นทำการหา Fundamental harmonic component จากค่า  $a_n$  เมื่อพิจารณา  $n$  เป็นจำนวนจริงดังนี้

$$\begin{aligned} a_1 &= \lim_{n \rightarrow 1} a_n = \lim_{n \rightarrow 1} \left( \frac{2am}{\pi n} * \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \right) + \lim_{n \rightarrow 1} \left( \frac{2am}{\pi n} * \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right) \\ &= \frac{2am}{\pi} \left( \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) + \frac{2am}{\pi} \lim_{n \rightarrow 1} \left( \frac{\alpha \cdot \cos(n-1)\alpha}{2n-1} \right) \\ &= \frac{2am}{\pi} \left( \frac{\sin 2\alpha}{2} + \alpha \right) \\ &= \frac{am}{\pi} (\sin 2\alpha + 2\alpha) = \frac{am}{\pi} (2\alpha + \sin 2\alpha) \end{aligned} \quad (จ-15)$$

จากสมการที่ (จ-7) จะได้

$$N(x) = \frac{a^1}{a} = \frac{m}{\pi} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (จ-16)$$

แทนค่า  $\alpha = \sin^{-1}(\delta/a)$  ลงในสมการที่ (จ-16) ได้

$$N(x) = \frac{m}{\pi} \left[ 2 \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) + 2 \sin \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) \right\} \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) \right\} \right]$$

$$N(x) = \frac{2m}{\pi} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) + \frac{\delta}{a} \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) \right\} \right]$$

จากสูตรตรีโกณมิติ (Poularikas, 1999) ตามสมการที่ (ง-17)

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} \quad (\text{ง-17})$$

จากสมการที่ (ง-17) จะได้ค่า  $N(x)$  ดังนี้

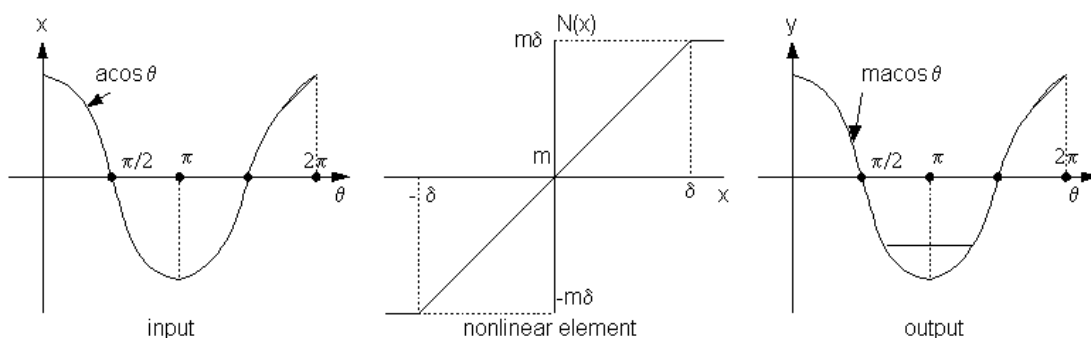
$$\begin{aligned} N(x) &= \frac{2m}{\pi} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) + \frac{\delta}{a} \sqrt{1 - \sin^2 \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) \right\}} \right] \\ &= \frac{2m}{\pi} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) + \frac{\delta}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{\delta}{a} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (\text{ง-18})$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2m}{\pi} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) + \frac{\delta}{a} \sqrt{\frac{a^2 - \delta^2}{a^2}} \right] \\ &= \frac{2m}{\pi} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) + \frac{\delta}{a^2} \sqrt{a^2 - \delta^2} \right] \end{aligned} \quad (\text{ง-19})$$

กรณี  $a < \delta$

$$y(\theta) = ma \cos \theta \quad (\text{ง-20})$$

จากสมการที่ (ง-20) เขียนรูปกราฟอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตได้ดังแสดงในภาพที่ ง.3



ภาพที่ ๓.3 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต กรณี  $a < \delta$

จากภาพที่ ๓.3 แสดงว่า

$$N(x) = m \quad ; a < \delta \quad (๓-21)$$

จากการพิสูจน์จะได้ฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ ของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมตัว ดังต่อไปนี้

$$N(x) = \begin{cases} m & ; a < \delta \\ \frac{2m}{\pi} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{a} \right) + \left( \frac{\delta}{a} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{\delta}{a} \right)^2} \right] & ; a > \delta \end{cases} \quad (๓-22)$$

สมการที่ (๓-22) เป็นสมการที่แสดงถึง ฟังก์ชันระบุเอกลักษณ์ของลักษณะสมบัติสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมตัว ซึ่งได้นำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพดังรายละเอียดปรากฏในบทที่ 5



## ภาคผนวก จ.

### บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

- 1) “การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดสำหรับระบบสองมวลความถี่” ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเนคเทค ( ตามหนังสือตอบรับที่ วว 5204/2810 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2544 จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ )

การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดสำหรับระบบสองมวลความเฉื่อย  
 Nonlinear Identification Using Tabu Search for a Two-Inertia System

ทองหัน อารีรัตน์<sup>1</sup> สราวุธ สุจิตจร<sup>2</sup> อาทิตย์ ศรีแก้ว<sup>3</sup> โยธิน เปรมปราณีรัชต์<sup>4</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษามัธยมศึกษา <sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ <sup>3</sup> อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>4</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ABSTRACT** – Tabu search technique is one of artificial intelligent methods appropriate for system identification purposes. This article presents the research results of applying the technique to nonlinear identification problem found in a two-inertia system. The search yields a set of saturation nonlinearity. Review of the search method is given. The test results to find satisfactory search parameters are also presented. These parameters lead to fast and efficient searches in such a way that local optimum can be escaped effectively.

**KEY WORDS** – Tabu search, nonlinear identification

**บทคัดย่อ** – วิธีการค้นหาแบบตาบอดเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการระบุเอกลักษณ์ระบบ บทความนี้ นำเสนอผลงานวิจัยที่ใช้วิธีการดังกล่าวระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ปรากฏในระบบสองมวลความเฉื่อย ได้ผลเป็นกลุ่มของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอื่นด้วย บทความได้ให้การทบทวนวิธีดำเนินการค้นหาแบบตาบอด และแสดงผลทดสอบในการหาพารามิเตอร์กำหนดเอกลักษณ์วิธีการค้นหา เพื่อส่งผลให้สามารถค้นหาค่าตอบได้รวดเร็วและหลุดออกจากการติดของค่าตอบเฉพาะถิ่นได้ดี

**คำสำคัญ** – วิธีการค้นหาแบบตาบอด, การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้น

## 1. คำนำ

อุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องกันระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามักประสบปัญหาเนื่องมาจากรีโซแนนซ์การบิด (torsional resonance) ซึ่งเป็น การก่อกวนเชิงกลในขณะหมุนของมอเตอร์ เพลา และโหลดที่ติดคู่ ควบกัน การบิดตัวของเพลาทำให้เกิดความแตกต่างของการหมุนใน ตำแหน่งจึงมุดตลอดแนวเพลา ค่าแรงแง่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับ ความถี่ที่กระทำรวมถึงพารามิเตอร์ทางพลวัตของระบบ และบาง ความถี่อาจส่งผลให้เกิดมุมของการบิดตัวมีเฟสตรงข้ามกันเป็นผลให้ เพิ่มขนาดของการบิดตัว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า รีโซแนนซ์การบิด ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ทางกล ระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่ายและมีสมรรถนะที่

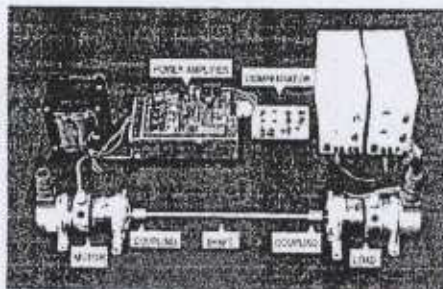
ด้อยลง คณะวิจัยต่างประเทศได้เสนอเทคนิคการแก้ปัญหาการสั่นจาก แรงบิดตัววิธีการต่างๆ เช่น การควบคุมความเร็วด้วยตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) และสถานะชั้นต้นสองเชิงเส้น [9] การใช้ตัว สังเกตบนพื้นฐานการเบี่ยงกลับสถานะ [14] การเลือกอัตราขยายเบี่ยง กลับสถานะที่เหมาะสม [12] การควบคุมแบบปรับตัวโดยใช้  $H_{\infty}$  [6] การควบคุมความเร็วแบบอัตราขยายอินทิเกรตเชิงเส้นด้วยการขยาย แรงบิดโหลดไปข้างหน้า [10] สำหรับคณะผู้วิจัยไทย [15] ได้เสนอ แนวทางแก้ไขปัญหา ด้วยการใช้การขยายทางพลวัตบนรากฐานของทฤษฎี ระบบควบคุมคงทน ออกแบบด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร เพื่อ กำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวลความเฉื่อย โครงสร้างของ ระบบควบคุมเป็นชนิด 2 ระดับความอิสระ ด้วยขยายที่สมรรถนะใน



การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และให้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่รวดเร็วเพียงพอ แต่ในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้สมมติฐานปฏิบัติงานอยู่ที่ระดับที่ต่ำ ดังนั้นระบบจึงนิยามให้เป็นเชิงเส้นได้ แต่การใช้งานจริงมีอำนาจใช้งานกว้างและวงจรรายค่าถึงมีระบบนิเวศที่คอยตัดทอนสัญญาณอินพุต ไม่ใช่ถึงระดับใดระดับหนึ่งที่จะก่อกระแสของสัญญาณแรงเกินไปจนเกิดความเสียหาย ความความเป็นจริงระบบดังกล่าวจึงไม่เป็นเชิงเส้น งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาอำนาจการทำงานจากระบบที่กว้างขึ้น โดยตรวจสอบดูว่ามีข้อจำกัดในทางสมรรถนะและเสถียรภาพต่อระบบอย่างไร เพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจในการขยายอำนาจทำงานของระบบควบคุมจุดนี้ ให้ใช้งานในย่านที่กว้างขึ้น ซึ่งจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของระบบดังกล่าวด้วยวิธีการค้นหาแบบคาบ เพราะลักษณะสมบัตินี้จะแปรผันตามการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบต่อไป โดยแบ่งหัวข้อบทความดังนี้ หัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึง วิธีการทดสอบระบบสองมวลความถี่สอง หัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงหลักการของวิธีการค้นหาแบบคาบ หัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดสอบกับกรณีที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการของวิธีการค้นหาแบบคาบ หัวข้อที่ 5 จะแสดงผลการนำอัลกอริทึมที่คำนวณการทดสอบแล้วไปทำการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ หัวข้อที่ 6 จะสรุปปัญหา ข้อเสนอแนะและงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไปในอนาคต รวมถึงสรุปเนื้อหาของบทความนี้

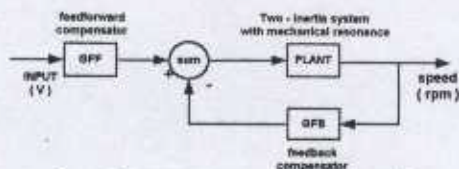
**2. การทดสอบระบบสองมวล**

การพิจารณาในระบบ [15] ที่ได้เสนอแนวทางแก้ไขปัญหาคำสั่งวิโยคแนวทางการบิดในระบบ 2 มวลความถี่สอง หัวข้อการค้นหาทางทวิคูณรากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมทรงกลม ออกแบบด้วยการกำหนดค่าเกนนำโพส-ซีโร ตัวชดเชยให้สมรรถนะในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และให้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่รวดเร็วเพียงพอ แต่การใช้งานของระบบดังกล่าวจำกัดไว้ที่ความเร็วรอบ 143 rpm เนื่องจากถูกจำกัดด้วยความถี่ตามแบบไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรรายค่าถึงสำหรับขับเคลื่อน งานวิจัยดังกล่าวพิจารณาเฉพาะด้านที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาในระบบดังกล่าวในอำนาจการทำงานที่กว้างขึ้น เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากการใช้งานจริงมีอำนาจใช้งานที่กว้าง บทความนี้จึงสนใจที่จะศึกษาอำนาจการทำงานจากระบบที่กว้างขึ้น โดยอาศัยตัวชดเชยจุดเดิมจากงานวิจัยที่ได้ทำไว้แล้ว [15] เพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจในการขยายอำนาจการทำงานจากระบบควบคุมจุดนี้ ให้ใช้งานในย่านที่กว้างที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ เสถียรภาพและผลการตอบสนองของระบบ



รูปที่ 1. ระบบสองมวลที่จัดสร้างขึ้นและส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในการทดสอบของงานวิจัยที่ได้ทำไว้แล้ว [1]

การพิจารณาในระบบในอำนาจการทำงานที่กว้างขึ้น สิ่งแรกที่ควรกระทำคือ การค้นหาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของระบบว่ามีลักษณะอย่างไร และปรากฏที่ตำแหน่งใดบ้าง ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบคาบ ซึ่งจำเป็นจะต้องอาศัยข้อมูลที่ได้ออกจากการทดสอบระบบ ดังรูปที่ 1 จากรูปพบว่าระบบที่ทำการทดสอบประกอบด้วย ตัวขับเคลื่อน ซีโรไวบรเคเตอร์ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์ และคอลลิดสัญญาณอินพุตไม่ให้เกินระดับใดระดับหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย, ชุดควบคุมที่ประกอบด้วยตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับ (feedback compensator) มีผลในการกำหนดค่าเกนนำโพสและเสถียรภาพของระบบ และตัวชดเชยในวิถีไปหน้าหรือตัวชดเชยอินพุต (input compensator) หรือ พรีฟีดเดอร์ (prefiler) มีผลต่อการปรับปรุงสมรรถนะและลดผลกระทบของระบบตามต้องการ



รูปที่ 2. บล็อกไดอะแกรมของระบบสองมวลที่สร้างขึ้น

แบบจำลองของระบบสองมวล  $G_p(s)$  ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ ARX ส่วนการออกแบบตัวชดเชยในวิถีไปหน้า  $G_{ff}(s)$  และตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับ  $G_{fb}(s)$  อาศัยวิธีการกำหนดค่าเกนนำโพส-ซีโร แบบคงทนที่มีโครงสร้างแบบ 2 ระดับขึ้นเสรี (2 - degree-of-freedom : 2 - DOF) โดยใช้เทคนิคที่ขงคณิศร [1] จากรูปที่ 2 พึงสังเกตุว่าโหนดของระบบสองมวล, ตัวชดเชยไปหน้าและตัวชดเชยป้อนกลับใช้ค่าต่างๆดังนี้



$$G_p(s) = \frac{1.325 * 10^6}{s^3 + 13.388s^2 + 16.297 * 10^4s + 73.117 * 10^4} \quad (1)$$

$$G_{ff}(s) = 15.093 \frac{s^3 + 6 * 10^3s^2 + 1.2 * 10^7s + 8 * 10^9}{s^3 + 7.186 * 10^3s^2 + 19.160 * 10^6s} \quad (2)$$

$$G_{fb}(s) = \frac{16.84 * 10^3s^3 + 69.67 * 10^5s^2 + 14.98 * 10^8s + 12.07 * 10^{10}}{s^3 + 7.18 * 10^3s^2 + 19.16 * 10^6s} \quad (3)$$

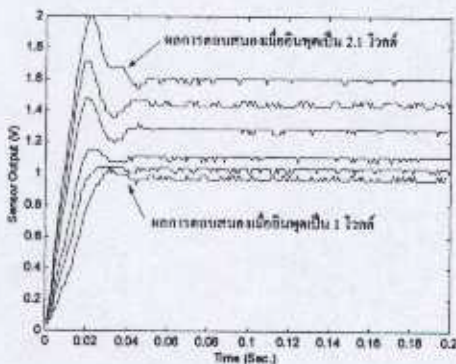
2.1 ขั้นตอนการทดสอบระบบของมวด

- ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบระบบที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1 โวลต์ (จุดปฏิบัติการงาน) โดยใช้สูตรคำนวณรูปที่ 1
- ขั้นตอนที่ 2 วัดความเร็วและจับสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุต
- ขั้นตอนที่ 3 จัดเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์
- ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-3 โดยเปลี่ยนแรงดันอินพุตเป็น 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 โวลต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 1. ความเร็วที่วัดได้จากผลการทดสอบ

อินพุต (โวลต์)	ความเร็ว (rpm)	เอาต์พุตของเซนเซอร์ (V)
1.0	143	0.95
1.1	144	0.98
1.3	146	1.04
1.5	150	1.10
1.7	179	1.30
1.9	201	1.42
2.1	223	1.60

2.2 ผลการทดสอบระบบของมวด

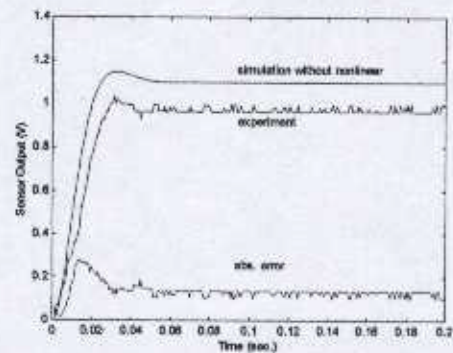


รูปที่ 3. รูปสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์วัดความเร็วที่ได้จากการทดสอบ

ผลการทดสอบระบบของมวดความถี่คือ ดังที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอนที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1 ได้รับผลการแสดงไว้ในรูปที่ 3 และอัตราเร็วคงตัวที่วัดได้จากการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 1 อาจสังเกตจากผลการทดสอบได้ว่า เมื่อมีการขยายอำนาจการทำงานของระบบดังกล่าว

ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง เกิดเป็นการขึ้นต้นสมมูลฐาน ดังกล่าวจึงทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปที่ 3 กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์อาศัยแบบจำลองเชิงความถี่สัมพันธ์ (1) (2) และ (3) นำมาสร้างเป็นแบบจำลองของระบบรวมทั้งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้ดังนี้

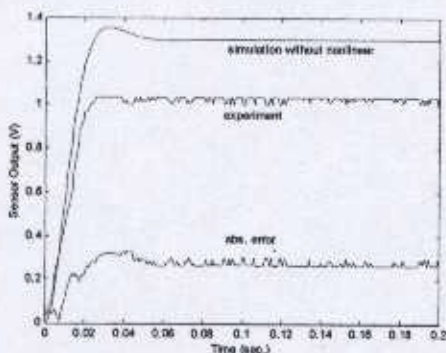
อินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์



รูปที่ 4. การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์



อินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์



รูปที่ 5. การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์

ผลการทดลองดังรูปที่ 4 และ 5 พบว่าผลการทดลองจริงกับการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนที่แรงดันอินพุตต่างๆสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองจริงกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

อินพุต (โวลต์)	ความคลาดเคลื่อน (sum square error)
1.1	4.9457
1.3	17.8222
1.5	36.8377
1.7	40.5674
1.9	48.6716
2.1	54.9896

จากตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าค่อนข้างสูง สาเหตุเนื่องมาจากแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เป็นเชิงเส้นไม่ได้คำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบซึ่งอาจเกิดได้จาก

- การอิมิตัวของออปแอมป์ในส่วนของตัวขยายไปหน้าและตัวขยายป้อนกลับ [5]
- การอิมิตัวของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ [13]
- เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็น ดีซี เซอร์โวมอเตอร์ 2 ตัวของบริษัท ซันโย เดมกิ ( Sanyo Denki Co., Ltd ) รุ่น U17SR ซึ่งมีพิกัดมอเตอร์คู่ควบคุมหับคู่ ผนวกกับตัวขับ (driver) รุ่น PDT-203-30 ของบริษัทเฟอิกัน วงจรขยายกำลังของอุปกรณ์ดังกล่าวมีระบบนิรภัย

คอยตัดทอนสัญญาณอินพุตไม่ให้เกินระดับโวลต์ที่กำหนด เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย

จากผลการทดลองและสมมุติฐานข้างต้น สรุปได้ว่า การขยายอำนาจการทำงานของระบบสองขนาดความถี่ของงานวิจัยที่ได้ทำมาแล้วระบบดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้น ดังเก็บบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของระบบด้วยวิธีการค้นหาแบบคานู ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ความสำคัญกับการค้นหาค่าตอบได้รวดเร็วและให้ค่าตอบที่ได้ใกล้เคียงกับจุดค่าตอบที่ดีที่สุด ( near global ) ถ้าเทียบกับวิธีการค้นหาอื่นๆ [16] ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนี้ถ้าหากมาได้ ก็จะได้รับนำไปวิเคราะห์สมรรถนะและเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมจนถึงนำไปประกอบกาพิจารณาปรับปรุงสมรรถนะหากต้องการอีกด้วย

3. หลักการของวิธีการค้นหาแบบคานู

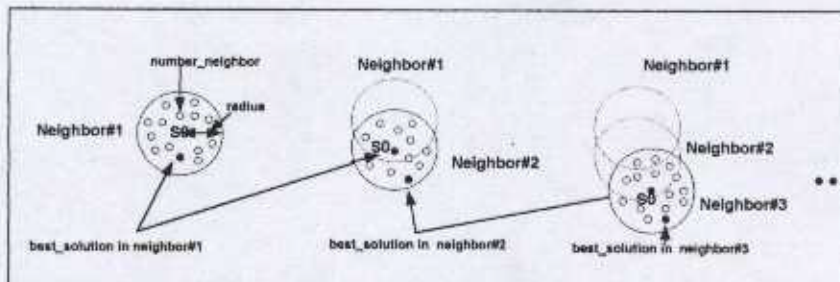
วิธีการค้นหาแบบคานู เป็นวิธีการที่นำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการหาค่าตอบที่ดีที่สุด (Optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Glover เป็นผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดวิธีการค้นหาแบบคานูไว้เมื่อปี ค.ศ. 1977 ซึ่งได้รับคำอธิบายไว้ใน [8] และหลังจากนั้นก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงค่าตอบวงแคบเฉพาะอื่น ( local optimum ) และดำเนินการค้นหาค่าตอบต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ค่าตอบที่ใกล้เคียงความเป็นวงกว้าง ( near global optimum ) [2, 3, 8] นอกจากนี้เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการค้นหาแบบ Sequential Quadratic Programming (SQP), Evolutionary Programming (EP) และ Tabu Search (TS) [16] พบปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าวิธีการค้นหาแบบคานูมีสมรรถนะที่ดีที่สุด ทั้งด้านความแม่นยำในค่าตอบและความเร็วในการค้นหา ปัญหาที่ [16] พิจารณานั้น เป็นการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับไม่เป็นเชิงเส้น EP ใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบมากที่สุด ส่วน SQP และ TS ใช้เวลา 62.3% และ 18.6% ของเวลาที่ EP ใช้ตามลำดับ

3.1 องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบคานู

องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบคานูที่แตกต่างจากวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ คือ มีเกณฑ์ความเป็นคานู (tabu list criteria) และ มีเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criteria) ซึ่ง

- "เกณฑ์ความเป็นคานู" เป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของค่าตอบในอดีตของกระบวนการค้นหาอื่นๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาค่าตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด หลักการออกแบบเกณฑ์ความเป็นคานู จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิด





รูปที่ 6. ภาพอธิบายการทำงาน

• “เกณฑ์ความปรารถนา” เป็นเงื่อนไขที่จะใช้ในบางครั้งถ้าจำเป็นจะต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นค่า งานบางชนิดที่มีปัญหาไม่ซับซ้อน ไม่จำเป็นต้องพึ่งส่วนนี้ก็ได้ เกณฑ์ความเป็นค่าก็เหมือนพหุที่จะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

3.2 อธิบายกลไกการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

ความหมายของค่าศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน

radius = ขอบเขตของการค้นหาในแต่ละรอบของการทำงาน

number\_neighbor = จำนวน neighborhood ที่ต้องการค้นหาในแต่ละ search\_space

neighbor\_list = ส่วนที่เก็บค่า neighborhood ตามจำนวนที่กำหนด ( tabu list )

best\_neighbor = ค่า neighborhood ที่เป็น local optimum

best\_error = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็น local optimum

overall\_neighbor = ค่า neighborhood ที่เป็น near global optimum

overall\_best\_error = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็น near global optimum

n = จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ

xlimit = ขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว

S0 = ค่าเริ่มต้นในแต่ละ search\_space

S1, S2, S3,...Sn = ค่าที่เก็บไว้ใน neighbor\_list

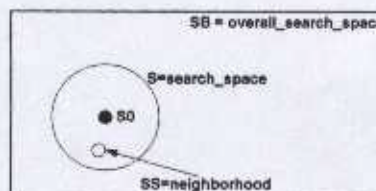
cost = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ( objective function )

หลักการทํางาน

ขั้นตอนที่ 1 โหลดข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่า S0 ซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่อยู่ใน overall\_search\_space ดังรูปที่ 6 และ 7 โดยทำการหาค่า S0 จากการสุ่มคำตอบ

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มต้นจากคำตอบที่มีอยู่ โดยกำหนดให้คำตอบที่มีอยู่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด best\_neighbor = S0 และค่า cost ของคำตอบที่ดีที่สุดที่สุ่มกำหนดให้เป็น best\_error ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากฟังก์ชันตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ( cost หรือ objective function ) ในงานวิจัยนี้ ค่า cost คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงด้วยสมการ ( 4 ) การค้นหาคำตอบจะดำเนินการเรื่อยๆ ได้ค่า cost น้อยที่สุดตามที่ได้จัดตั้งค่า cost ไว้ก่อนล่วงหน้า

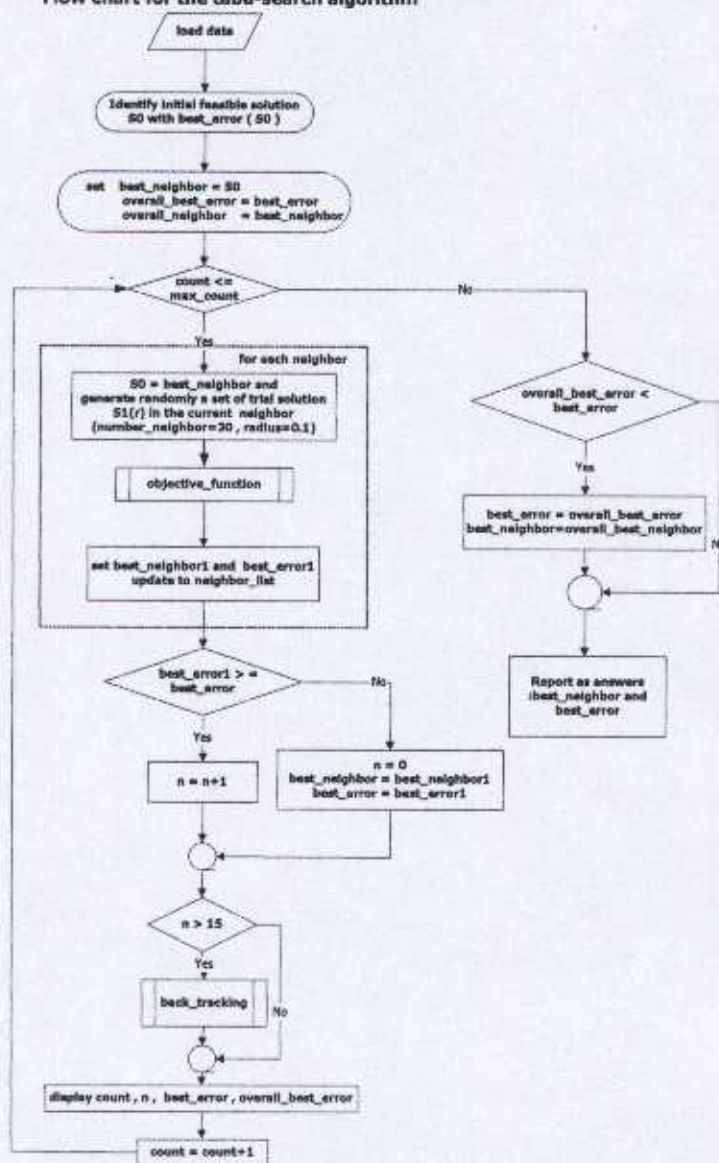


รูปที่ 7. ลักษณะของ space ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 4 จาก S0 ดำเนินการเคลื่อนย้ายในลักษณะสุ่มเท่ากับจำนวน number\_neighbor ในขอบเขตของ search\_space ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่า radius

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่า cost ของสมาชิกแต่ละตัวและเลือกค่า cost ที่ดีที่สุด โดยกำหนดให้ค่า cost ดังกล่าวเท่ากับ best\_error และให้คำตอบนี้เป็น best\_neighbor ค่า cost ในที่นี้ต้องมีค่าน้อยกว่าค่า cost ของ S0 ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้ข้ามไปทำในขั้นตอนที่ 7 เพื่อหลีกเลี่ยง

Flow chart for the tabu-search algorithm

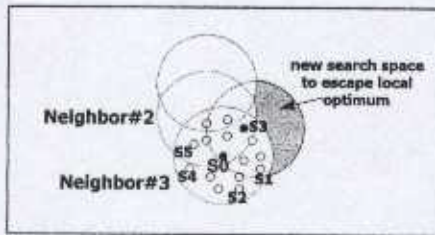


รูปที่ 8. แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมที่อาศัยหลักการห้ามของวิธีการค้นหาแบบตาบ



การถือของค่าตอบเฉพาะถิ่น ถ้าสามารถหาค่าตอบได้ไว้ที่ค่าความขึ้นตอนต่อไป นอกจากนี้ในขั้นตอนที่ 5 จะเก็บค่าที่ได้จากการสุ่ม 5 ครั้ง ถ้าพูดไว้ใน neighbor\_list เพื่อนำไปใช้ในส่วนของการย้อนรอยการค้นหาค่า (back\_tracking) ต่อไป ซึ่งเป็นส่วนที่ได้พัฒนาปรับปรุงขึ้น ให้การค้นหาค่าเดิมที่ทำงานได้ดีขึ้นในการค้นหาค่าตอบ (ในบทความนี้จะขอเรียก back\_tracking ต่อจากนี้ไป) รายละเอียดอยู่ในขั้นตอนที่ 7)

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดให้ SO เท่ากับ best\_neighbor ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 จากนั้นเริ่มทำงานขั้นตอนที่ 3 ใหม่



รูปที่ 9. ภาพแสดงการทำงานในขั้นที่ back\_tracking

ขั้นตอนที่ 7 หากการเห็นกลุ่มในขั้นตอนที่ 5 ถ้าไม่มีสมาชิกใดๆที่ไว้ค่า cost ต่ำกว่าค่า cost ของ SO ให้ทำการกำหนดค่า SO=S3 โดยที่ค่า S3 คือ ค่าที่ได้จากการเห็นกลุ่มในอดีต จัดเก็บอยู่ใน neighbor\_list ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว การดำเนินการในขั้นตอนนี้เป็นการย้อนรอยการค้นหาค่ากลับไปยังค่าที่ค่าดีที่สุดตามในอดีต เพื่อจะเริ่มทำการค้นหาใหม่ในทิศทางที่แตกต่างไปจากเดิม สิ่งที่ได้จากการย้อนรอยการค้นหาค่าทำให้เกิดพื้นที่การค้นหาค่าตอบใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 9 พื้นที่ดังกล่าวทำให้การดำเนินการค้นหาค่าตอบ สามารถหลีกเลี่ยงจากการติดของค่าตอบเฉพาะถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการนี้จะเรียกโดยรวมว่า back\_tracking จากนั้นเมื่อทำงานขั้นตอนนี้เสร็จก็กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3 ใหม่ ภาพรวมของการทำงานค้นหาค่าตอบด้วยวิธีค่าบัพจากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 8

ลักษณะการทำงานของวิธีการค้นหาแบบค่าบัพข้างต้น ยังมีอีกค่าถึงเงื่อนไขการยุติการค้นหาค่าตอบ โดยทั่วไปกระทำทั้งสองแนวทางคือแนวทางแรก กำหนดวงรอบของการค้นหาค่าตอบ (max\_count) เช่น กำหนดว่าให้ค้นหา 3,000 รอบแล้วยุติ หรือแนวทางที่สอง กำหนดค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (J ) ซึ่งได้มาจากการคำนวณซ้ำๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ งานวิจัยนี้เลือกเงื่อนไขการยุติตามแนวทางที่สอง ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 5 ดังนั้นการกำหนดค่า

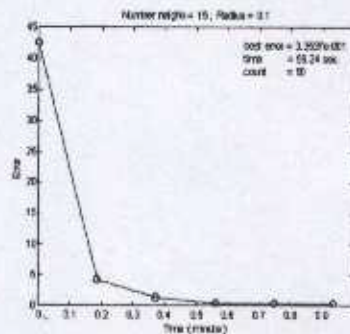
max\_count ในแผนภูมิรูปที่ 8 จะกำหนดค่าไว้มากพอสมควรประมาณ 1,000 รอบ เพื่อให้การค้นหาค่าตอบดำเนินไปเรื่อยๆจนได้ค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดไว้แล้ว อย่างไรก็ตามการพิจารณาเช่นนี้คือยังมีข้อจำกัดคือวิธีที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถพอที่จะหลุดจากการติดของค่าตอบที่เป็นวงเฉพาะถิ่น การทดสอบอัลกอริทึมเพื่อให้เกิดความมั่นใจก่อนนำไปใช้งาน ได้รวบรวมไว้ในหัวข้อที่ 4

4. การทดสอบอัลกอริทึม

จากคำอธิบายหลักการทํางานของอัลกอริทึม แสดงให้เห็นว่าค่า radius และ number\_neighbor เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการเห็นกลุ่มค่าตอบ ดังนั้นก่อนที่จะนำอัลกอริทึมมาใช้งานจำเป็นต้องทำการทดสอบอัลกอริทึม เพื่อให้ได้ค่า radius และ number\_neighbor ที่เหมาะสม ขั้นตอนการทดสอบกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวดังต่อไปนี้

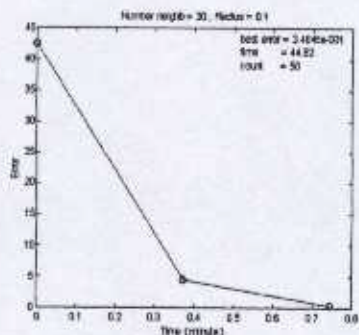
- (1) number\_neighbor = 15 radius = 0.10
- (2) number\_neighbor = 30 radius = 0.10
- (3) number\_neighbor = 50 radius = 0.10
- (4) number\_neighbor = 15 radius = 0.05
- (5) number\_neighbor = 15 radius = 0.20

การทดสอบในแต่ละกรณีจะทำการทดสอบกับระบบที่แสดงดังรูปที่ 16 ซึ่งเป็นรูปแบบ Lure's problem [7, 17] โดยกำหนดจุดเริ่มต้น (S0) ที่จุดเดียวกันและจะทำการค้นหาค่าตอบไปเรื่อยๆจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะลดลงมาอยู่ที่ค่าน้อยกว่า 0.375 จึงจะยุติการค้นหาค่าตอบ ในระหว่างการค้นหาจะทำการบันทึกผลและทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับเวลาที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 10 ถึง 14

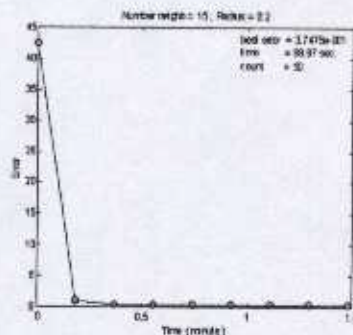


รูปที่ 10. ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 15 radius = 0.10

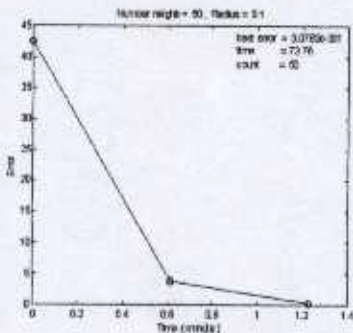




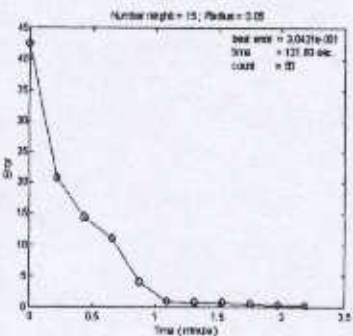
รูปที่ 11. ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 30 radius = 0.10



รูปที่ 14. ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 15 radius = 0.20



รูปที่ 12. ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 50 radius = 0.10

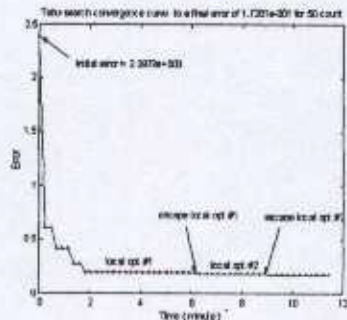


รูปที่ 13. ผลการทดสอบเมื่อ number\_neighbor = 15 radius = 0.05

ตารางที่ 3. แสดงผลการทดสอบอัลกอริทึมกรณิดังๆ

Count	N=15, R=0.05	N=15, R=0.1	N=15, R=0.2	N=50, R=0.1	N=50, R=0.1
0	4.2555e+001	4.2555e+001	4.2555e+001	4.2555e+001	4.2555e+001
1	2.0874e+001	4.2061e+000	1.1148e+000	4.4967e+000	3.6186e+000
2	1.4575e+001	1.3020e+000	4.3800e+001	3.4845e+001	3.0799e+001
3	1.1119e+001	4.3808e+001	#1		
4	4.0259e+000	#1	#2		
5	9.7940e+001	3.5537e+001	4.1335e+001		
6	7.8695e+001		#1		
7	#1		#2		
8	4.6297e+001		3.7475e+001		
9	5.9030e+001				
10	3.0451e+001				
Time (sec)	151.60	56.24	36.87	44.82	73.76
				OK	

จากรูปที่ 10 ถึง 14 และตารางที่ 3 สรุปได้ว่าค่า number\_neighbor = 30 และค่า radius = 0.1 จะให้ค่าคอนฟิเด้นซ์ที่ถูกต้อง โดยใช้เวลา 44.82 วินาทีหรือทำการค้นหาค่าคอน 3 รอบ โดย Pentium III 733 MHz ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าดังกล่าวในการนำไปเห็นคุณค่าคอนต่อไป อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันว่าอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการวิธีการค้นหาแบบตาบอด และ back\_tracking สามารถค้นหาค่าคอนที่ใกล้เคียงความเป็นวงกว้างได้ จึงทำการทดสอบโดยเลือกค่า number\_neighbor และค่า radius ที่ได้จากการทดสอบ ทำการค้นหาค่าคอนเป็นจำนวน 50 รอบ และทำการบันทึกแนวโน้มการลดลงของค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา ผลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15. ความสามารถของอัลกอริทึมในการค้นหาค่าตอบ

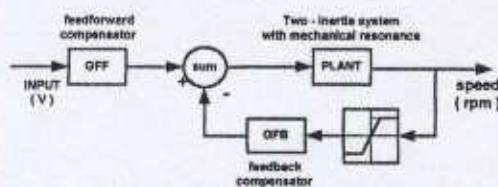
รูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถที่จะค้นหาค่าตอบที่ใกล้ความเป็นวงกว้างได้ เนื่องจากผลการทดสอบสามารถหลุดจากจุดค่าตอบวงแหวนเฉพาะถิ่นได้ถึง 2 ครั้งในช่วงการค้นหาเพียง 50 รอบ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ขั้นตอนการทดสอบอัลกอริทึมถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการที่จะนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการหาค่าตอบที่ดีที่สุด เพื่อเป็นการตรวจสอบอัลกอริทึมให้เกิดความมั่นใจได้ว่า ค่าตอบที่ได้จากการค้นหาจะเป็นค่าตอบที่ดีที่สุดก่อนที่จะนำอัลกอริทึมดังกล่าวไปใช้งานจริง

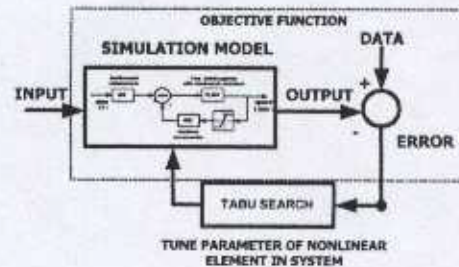
5. การทดลอง

5.1 วิธีการทดลอง

จากผลการทดสอบระบบของมวถในหัวข้อที่ 2 สามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นแบบเชื่อมตัว โดยถือว่าตำแหน่งของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นจะอยู่ที่ส่วนของสัญญาณย้อนกลับเพียงแต่จุดเดียวตามรูปแบบของ Lure's problem หมายความว่า ได้สมมุติให้เป็นลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นสมมูล (equivalent nonlinearity) ซึ่งแทนความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบทั้งหมดไว้ที่ตำแหน่งนี้ตำแหน่งเดียว ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16. สมมุติฐานที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบ



รูปที่ 17. แผนภาพแสดงวิธีการทดลอง

รูปที่ 17 ใช้ชื่อรายการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ คือ เริ่มจากอินพุตอินพุตขึ้นกับ โดไฟท์กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีขนาด 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 โวลต์ตามลำดับ จากนั้นนำผลที่เป็นค่าเชิงเลขที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ (simulation model) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้บันทึกไว้ และประเมินค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจแสดงได้ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ (4)

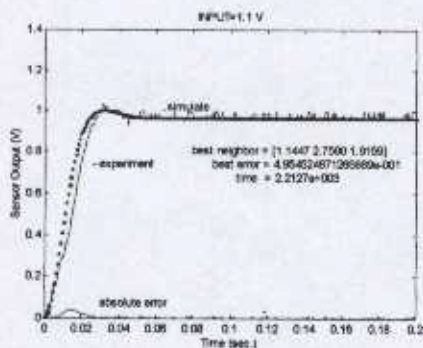
$$J = \sum e^2(kT) , kT = 0,1,2,... \quad (4)$$

ซึ่ง  $e(kT)$  เป็นผลต่างระหว่างความเร็วรอบที่วัดได้โคตเซนเซอร์มีหน่วยเป็นโวลต์กับความเร็วรอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มาเป็นตัวกำหนดทิศทางการค้นหาแบบตาบู่ จะมีการศึกษาไปทางใด เราจะยอมรับผลการค้นหาว่าแม่นยำพอและยุติการค้นหาที่ค่า  $J_{min} \leq \mu$  ค่า  $\mu$  ในที่นี้เท่ากับ 0.5 ซึ่งได้มาจากการค้นพบซ้ำๆ เพื่อศึกษาพลวัตของระบบ การจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 17 ค่าเงินการในโดเมนเวลา ตัวอย่างการคิฟเฟอเรนซ์ ที่ได้จากการแปลงแบบจำลองต่อเนื่องด้วยเทคนิค ไบลิเนียร์ ไปรวมรวมจำลองสถานการณ์สร้างขึ้นด้วย MATLAB™

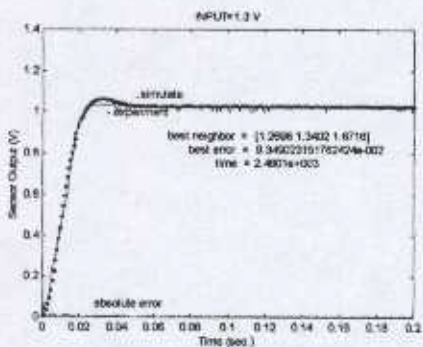
5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่ พบว่าแบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้สมจริง เนื่องจากผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของระบบดังแผนภาพในรูปที่ 16 มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจสังเกตได้ถึงความเร็วใกล้เคียงกันของความเร็วในมวถหมุนที่บันทึกได้กับผลการจำลองสถานการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 18 ถึง 20

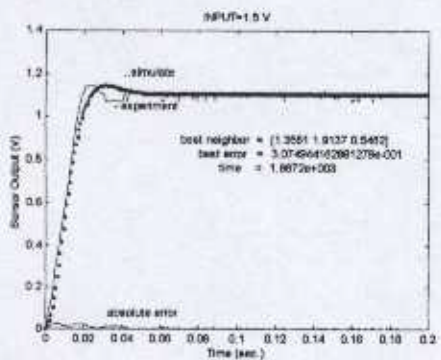




รูปที่ 18. ผลการค้นหามแบบคานูที่อินพุต 1.1 โวลต์



รูปที่ 19. ผลการค้นหามแบบคานูที่อินพุต 1.3 โวลต์

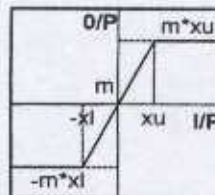


รูปที่ 20. ผลการค้นหามแบบคานูที่อินพุต 1.5 โวลต์

ตารางที่ 4. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหามแบบคานู

อินพุต (โวลต์)	ค่าพารามิเตอร์		
	m	xu	xl
1.1	1.1447	2.7590	1.9159
1.3	1.2698	1.3402	1.6716
1.5	1.3581	1.9137	0.5482
1.7	1.3128	2.4456	2.1646
1.9	1.3018	1.8827	0.2553
2.1	1.2849	2.2356	1.7925

ผลจากการค้นหาในรูป ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัวได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งอาจทำความเข้าใจโดยดูรูปที่ 21 ประกอบได้ดังนี้

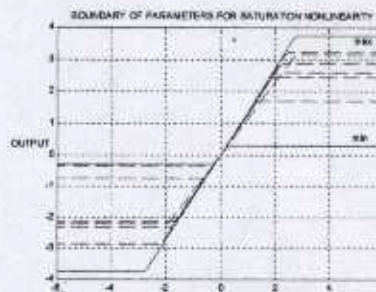


รูปที่ 21. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบ

ค่า m คือค่าความชัน

ค่า xu คือจุดที่เริ่มเกิดการอิมิตัวทางด้านบน

ค่า xl คือจุดที่เริ่มเกิดการอิมิตัวทางด้านบน



รูปที่ 22. พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหามแบบคานูที่ระดับอินพุตต่างๆ

ผลการทดลองที่ได้จากการค้นหาแบบสุ่ม มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก เมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนกรณีที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นมาเปรียบเทียบกับระบบที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลงประมาณ 89-99 % ดังรายละเอียดในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างระบบเชิงเส้นกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

อินพุต (โวลต์)	ระบบเชิงเส้น	ระบบไม่เชิงเส้น	%ลดลงของค่าความคลาดเคลื่อน
1.1	4.9457	0.4955	89.9822
1.3	17.8222	0.0935	99.4800
1.5	36.8377	0.3075	99.1653
1.7	40.5674	1.9654	95.1552
1.9	48.4605	3.1829	93.4605
2.1	54.9896	4.2706	92.2339

## 6. สรุป

จากผลการวิจัยที่ได้นำเสนอ พบว่าวิธีการค้นหาแบบสุ่มให้ผลที่มีความถูกต้องสูงและใช้เวลานานในการค้นหาค่าคอนวูลเร็ว เมื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนลดลงเป็นอย่างมาก ดังตารางที่ 5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การขยายด้านการทำงานของระบบสองมวลความเฉื่อยจะต้องพิจารณาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นอัมพล์ ตรงส่วนของระบบวิจัยที่อื่นกล่าวถึงรูปที่ 16 เป็นไปตามรูปแบบของ Lure's problem เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวในแต่ละต้นทุดไม่สามารถที่จะรวมเป็นพารามิเตอร์ชุดเดียวได้ เนื่องจากระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง

สำหรับงานวิจัยในคนละจะได้ไม่แบบจำลองที่ได้ไว้ใช้เพื่อการวิเคราะห์สมรรถนะและเสถียรภาพของระบบ แบบจำลองความไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏเป็นครูดูด เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงกำหนดขอบเขตล้อมรอบกลุ่มของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นเป็นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ดังรูปที่ 22 โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการค้นหาแบบสุ่ม การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ สามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการทางโคสมอนความถี่ด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา (Describing function) เกณฑ์ของโพพอฟ (Popov's criterion) และ เกณฑ์วงกลม

(Circle criterion) เพื่อเปรียบเทียบผลและให้มั่นใจในเสถียรภาพของระบบขยายด้านการทำงาน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัชชัย อุทัยวสิน. (2543). การกำจัดริซโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวล โดยใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] A. H. Mantawy, Y. L. Abdel-Magid, and S. Z. Selim. (1998). Unit Commitment by Tabu Search. *IEEE Transaction on Distrib.* 145(1):56-64.
- [3] A. Kaplan, S. Ozer, and S. Saginçlı. (1998). Membership Function Optimization of a Fuzzy Controller using Modified Tabu Search Algorithm. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 98(7):64-67.
- [4] C. H. Hoopis, and G. B.Lamont. (1985). *Digital Control System*. New York:McGraw-Hill.
- [5] D. P.Atherton. (1982). *Nonlinear Control Engineering*. Student edition. New York: Van Nostrand Reinhold.
- [6] H.Hirata, et.al. (1995). Speed Control of DC Motor with Torsional Oscillation and Load Fluctuation. *Proc. of Sch. Eng. Tokai University*. 35(3):31-41.
- [7] H. K.Khalil. (1996). *Nonlinear System*. Second edition. London :Prentice Hall.
- [8] J A Bland G P Dawson. (1991). Tabu Search and Design Optimization. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 23(3):195-201.
- [9] J.K. Ji, and S.K.Sul. (1995). Kalman Filter and LQ Based on Controller for Torsional Vibration Suppression in a 2-mass Motor Drive System. *IEEE Trans. On IE*. 42(6):564-571.
- [10] J. K. Ji, et.al. (1993). LQG Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in 2-Mass System. *Proc. IEEE IECON'93*. pp:1157-1162.
- [11] J. Ngumwilit, C. U-thaiwasin, Y. Preemprinceerach and S. Sujitjorn. (2000). Torsional Resonance Suppression via PIDA Controller. *Proc. IEEE Conf. on Artificial Intelligence & Robotics - TENCON 2000*. Kuala Lumpur:



Malaysia.

[12] K. Fujikawa, et.al. (1991). Robust and Fast Speed Control for Torsional System Based on State - Space Method. Proc. IEEE IECON'91, pp:687-692

[13] M. Husul. (1993). Control System Design Using MATLAB. London:Prentice-Hall.

[14] S.H. Song, et.al. (1993). Torsional Vibration Suppression Control in 2 - Mass System by State Feedback Speed Controller. Proc. IEEE CCA'93, pp:129-134.

[15] S. Sujitjorn, C. U-Thaiwasin, and Y.Prempeanerat. (2000). Torsional Resonance Suppression Via Pole - Zero Assignment. Proc. 19th IASTED Int. Conf. on Modelling, Identification, and Control. Innsbruck:Austria.

[16] S. Sujitjorn, and T. Kulworawanichpong. (2001). Optimal Power Flow Using Tabu Search. IEEE Power Engineering Review (submitted )

[17] T. Glad, and L. Ljung. (2000). Control Theory : Multivariable and Nonlinear Methods. London :Taylor & Francis



นายกฤษณ์ อารีรักษ์ สำเร็จปริญญาตรีในสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี เมื่อ พ.ศ.2543 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับ ปริญญาโทที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเป็นผู้ช่วยวิจัยทางด้านระบบควบคุมพลังงาน โดยได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2544 จากสำนักงานคณะกรรมการ วิจัยแห่งชาติ



นาวาอากาศโท ทราวุฒิ ฤทธิเดช สำเร็จปริญญาตรี และปริญญาเอกในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากโรงเรียนนายเรืออากาศ และมหาวิทยาลัย เฮอร์มิ่งแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อ พ.ศ.2527 และ 2530 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ และหัวหน้าสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำแหน่งงานวิจัยทาง ด้านระบบควบคุมเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การคำนวณกระบวนการทาง สัญญาณ การอนุรักษ์พลังงาน และการประมวลผลเทคนิคทางปัญญา ประดิษฐ์ อาจารย์ตราวุฒิเป็นสมาชิกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

ไทย สมาคมเทคโนโลยีที่เหมาะสม และ IEEE อีกทั้งได้รับการ ใจรักชื่อไว้ใน Who's Who in the World (และ Who's Who in Science and Engineering).



ดร.อาธิศ ศรีแก้ว สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญา ตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาโทและปริญญาเอกสาขาวิศวกรรม ไฟฟ้าจาก Vanderbilt University ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อ พ.ศ. 2540 และ 2543 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี สุรนารี มีความสนใจงานวิจัยทางด้าน computer and robot vision, image processing, neural networks, artificial intelligence และ intelligent system



ดร.โลธิน ปรอมปรามณีวัชรต์ สำเร็จการศึกษา ปริญญาเอก ทางวิศวกรรมระบบควบคุม จาก มหาวิทยาลัย Nihon ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรง ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรม ระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเป็นผู้อำนวยการศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ศทอ.) อาจารย์โลธินฯ สอนและวิจัยทาง ด้านระบบควบคุม การควบคุมมอเตอร์แบบต่างๆ มากกว่า 20 ปี

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ  
73/1 ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400  
โทร. (662) 644-8150-80 โทรสาร. (662) 644-8137-8  
ที่ รว 5204/2810

National Science and Technology Development Agency  
73/1 Rama VI rd., Ratchathewi, Bangkok 10400, THAILAND.  
Tel. (662) 644-8150-80 Fax. (662) 644-8137-8

26 มิถุนายน 2544

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเนคเทค  
เรียน รศ.ดร. สุรวุฒิ สุจิตจว

ตามที่ท่านได้จัดส่งบทความเรื่อง "การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาข่ายสำหรับระบบสองมวลความถี่เดียว" เพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเนคเทคนั้น ทางกองบรรณาธิการได้จัดส่งบทความของท่านให้ผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องพิจารณาคุณภาพและความเหมาะสมของบทความ ซึ่งบัดนี้ได้รับผลการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่านเรียบร้อยแล้ว จึงใคร่ขอเรียนให้ทราบว่าบทความของท่านได้รับพิจารณาให้ตีพิมพ์ในวารสารฯ โดยทางผู้ทรงคุณวุฒิมีข้อเสนอแนะดังนี้

- ในบทความมีการกล่าวถึงการทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น โดยไม่ได้อธิบายรายละเอียดว่าแตกต่างหรือประยุคท์จากการค้นหาแบบตาข่ายอย่างไร และนำไปเพิ่มเติมส่วนคำอธิบายในรายละเอียดที่พัฒนาขึ้นเองให้ชัดเจน
- ข้อเสนอแนะให้อธิบายเพิ่มเติมถึงการนำเอาการค้นหาแบบตาข่าย มาประยุกต์ใช้งานโดยแจกแจงว่าส่วนต่างๆ ของงานตรงกับ component ส่วนไหนของการค้นหาแบบตาข่าย รวมถึงการอธิบายในส่วนการนำผลการ simulation ไปใช้งานให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น
- ข้อเสนอแนะให้เปรียบเทียบผลการทดลองในด้านเวลาดำเนินการ (ถ้าเป็นไปได้) เพื่อให้การสรุปผลในแง่ของการค้นหาได้รวดเร็วขึ้น
- แนะนำให้มีการอธิบายถึงลักษณะของข้อมูลที่ใช้ค้นหา และ objective function ของการค้นหาแบบตาข่าย เพื่อให้ผู้อ่านจะได้ทราบถึงการ converge ของการค้นหาแบบตาข่าย และทราบถึง objective function ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อหา best\_error ด้วย
- แนะนำให้อธิบายรายละเอียดของอัลกอริทึมหรือกราฟที่นำเสนอให้ครบถ้วนสมบูรณ์ เช่น ในอัลกอริทึม รูปที่ 8 มีการกล่าวถึง max\_count แต่ในคำอธิบายไม่มี และข้อมูลของ radius และ neighbor ไม่ปรากฏในรูปที่ 8 และข้อมูลของกราฟที่นำเสนอไม่ครบ เช่น amplitude มีหน่วยวัดเป็นอะไร สัญญาณ output คืออะไร ความเร็วและกระแสเป็นอย่างไร เป็นต้น
- แนะนำให้ตรวจสอบและแก้ไขค่าสเกลให้ถูกต้อง เพราะยังมีการสเกลผิดอยู่บ้าง เช่น แอลักษณ์ Flowchat เป็นต้น

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบผลการประเมินบทความ และขอความอนุเคราะห์จากท่านปรับปรุงบทความดังกล่าวขึ้น และจัดส่งบทความในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ให้กองบรรณาธิการที่ [chulak@nectec.or.th](mailto:chulak@nectec.or.th) ภายในวันที่ 10 กรกฎาคม 2544 ด้วย จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ



(นางจุฬารัตน์ ตันประเสริฐ)

บรรณาธิการ

## ประวัติผู้เขียน

นายกองพัน อารีรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2522 สำเร็จปริญญาตรีในสาขา วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2543 เคยสอนวิชาปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยวิจัยทางด้านระบบควบคุมคงทน โดยได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2544 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่ 1 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก จ.