



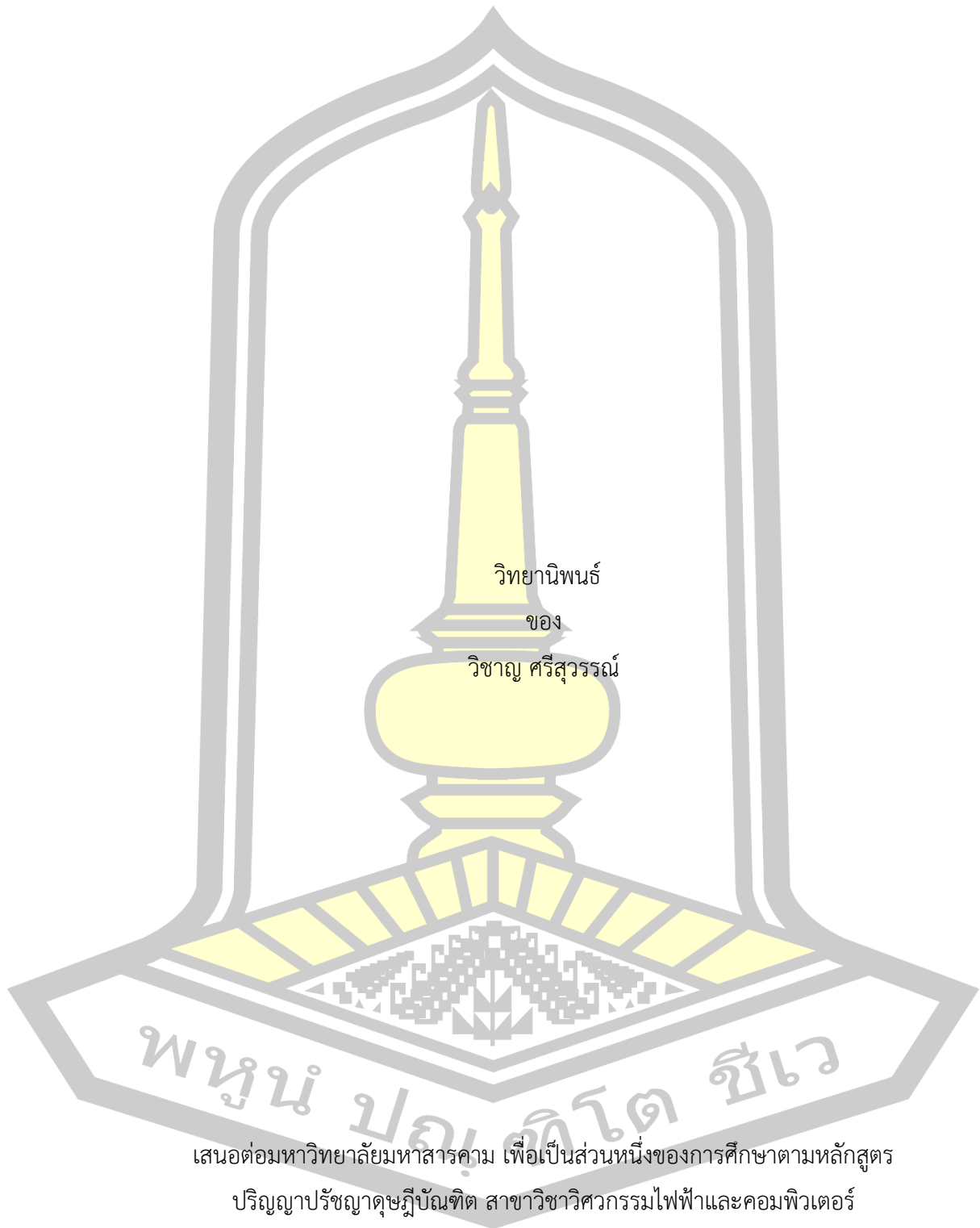
การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyโลจิกพีเอ็ดโดยวิธีฝูงผึ้งสำหรับระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

วิทยานิพนธ์  
ของ  
วิชาญ ศรีสุวรรณ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
กรกฎาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดีโดยวิธีฝูงผึ้งสำหรับระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

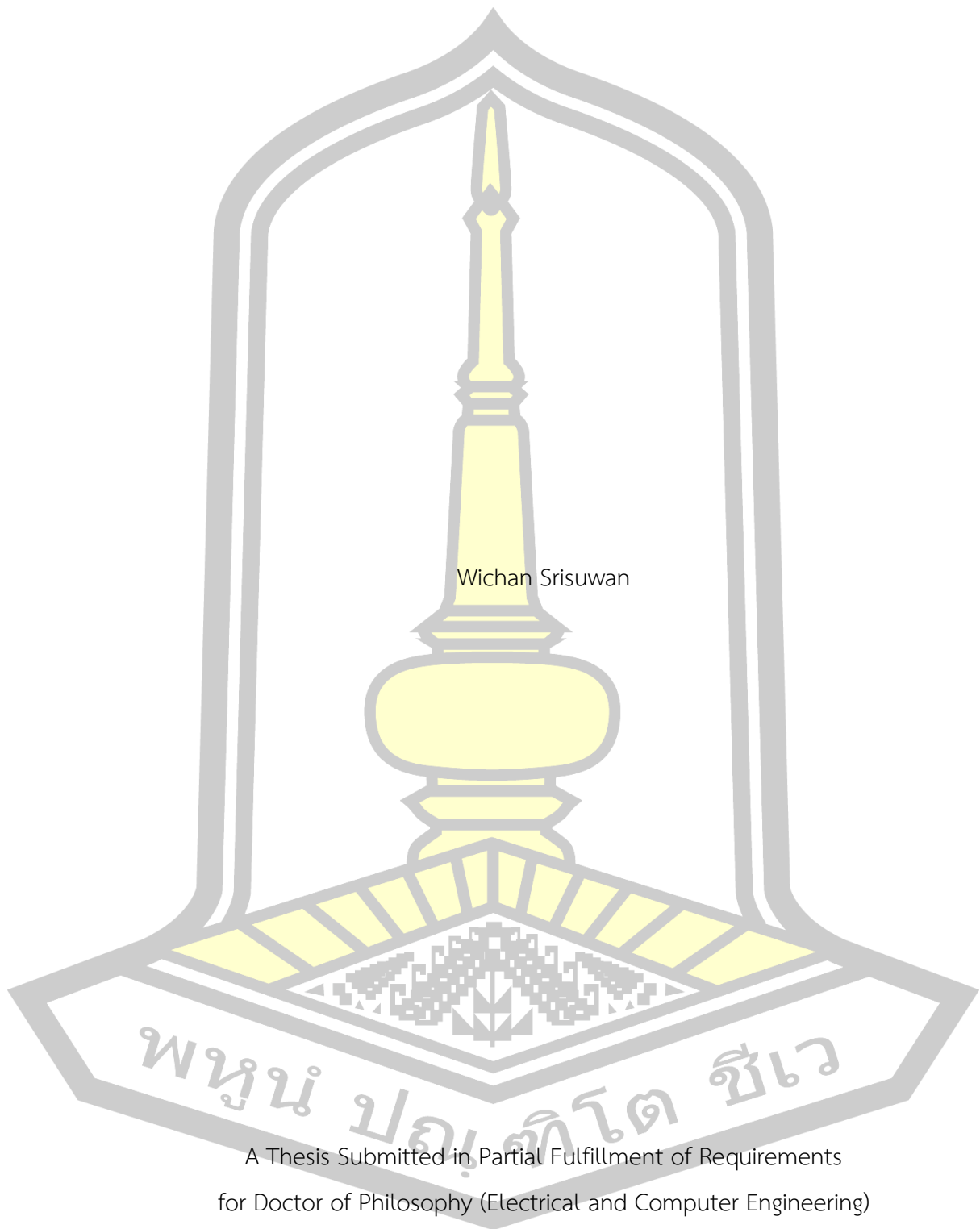


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Fuzzy logic PID controller design by Bee Algorithm for Wind-Diesel power system



Wichan Srisuwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

July 2019

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายวิชาญ ศรีสุวรรณ แล้ว  
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล )

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ )

กรรมการ

(ผศ. ดร. ญัฐฉิ สุวรรณทา )

กรรมการ

(ผศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กฤษณ์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดีโดยวิธีฟuzzyสำหรับระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล		
ผู้วิจัย	วิชาญ ศรีสุวรรณ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด อาทิเช่น ตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด สำหรับการควบคุมความถี่โหลดของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล โดยทั่วไปแล้ว อัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี อีกทั้งแพคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก กฎการควบคุม และ อัตราขยายพีไอดีของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดี พร้อมทั้งอัตราขยายของตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด มักใช้วิธีการลองผิดลองถูกหรือใช้ประสบการณ์ของผู้ออกแบบ เพื่อที่จะแก้ปัญหาได้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีฟuzzyในการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อที่จะให้การเปลี่ยนแปลงความถี่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดและการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของระบบ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการฟuzzyมีสมรรถนะที่ดีในการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 แบบ

คำสำคัญ : วิธีฟuzzy, การควบคุมความถี่โหลด, ตัวควบคุมพีไอดี, ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก, ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดี, ตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด, การหาค่าที่เหมาะสม, ระบบไฟฟ้ากำลัง

พจนัน ปณฺ ทิโต ชีเว

<b>TITLE</b>	Fuzzy logic PID controller design by Bee Algorithm for Wind-Diesel power system		
<b>AUTHOR</b>	Wichan Srisuwan		
<b>ADVISORS</b>	Associate Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Doctor of Philosophy	<b>MAJOR</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2019

### ABSTRACT

This thesis proposes an application of the bee algorithm (BA) to design optimal controllers i.e. proportional-integral-derivative (PID), fuzzy logic-PID (FLPID) and superconducting magnetic energy storage (SMES) controllers for load frequency control (LFC) of an isolated hybrid wind-diesel (IHWD) power system. Conventionally, the gains of PID controller; scaling factor, membership functions (MF), control rules (CR) and PID gains of FLPID controller and the gains of SMES controller are obtained by trial and error method or experiences of designers. To overcome this problem, the BA is applied to simultaneously tune these parameters in order to minimize frequency deviations of the system against load disturbances and system parameters variation. Simulation results explicitly show that the BA approach is capable of obtaining high performance of the optimal PID, FLPID and SMES controllers.

Keyword : Bee Algorithm, Load Frequency Control, Proportional Integral Derivative Controller, Fuzzy Logic Controller, Superconducting Magnetic Energy Storage, Optimization, Power System

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัดน์ เสี่ยงมวิบูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำการในการ แก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ ขอ กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกๆ ท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ และให้ความอนุเคราะห์ใน ด้านสถานที่ เอกสารทางด้านวิชาการต่างๆ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ คอมพิวเตอร์ ระดับปริญญาโท และปริญญาเอก มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกๆ ท่านที่คอยให้ความ ช่วยเหลือในด้านเอกสารต่างๆ และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่มอบทุนและสนับสนุนในการศึกษาต่อ ระดับปริญญาเอก เป็นระยะเวลา 3 ปี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ภรรยา ลูกชาย ดร.ศราวุธ โพธิยา และพี่ น้องทุกๆ ท่าน ที่คอยให้การสนับสนุน และช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน พร้อมทั้งเป็นกำลังใจ สามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี สำหรับคุณค่า และประโยชน์อันใด ที่ได้มาจากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

วิชาญ ศรีสุวรรณ

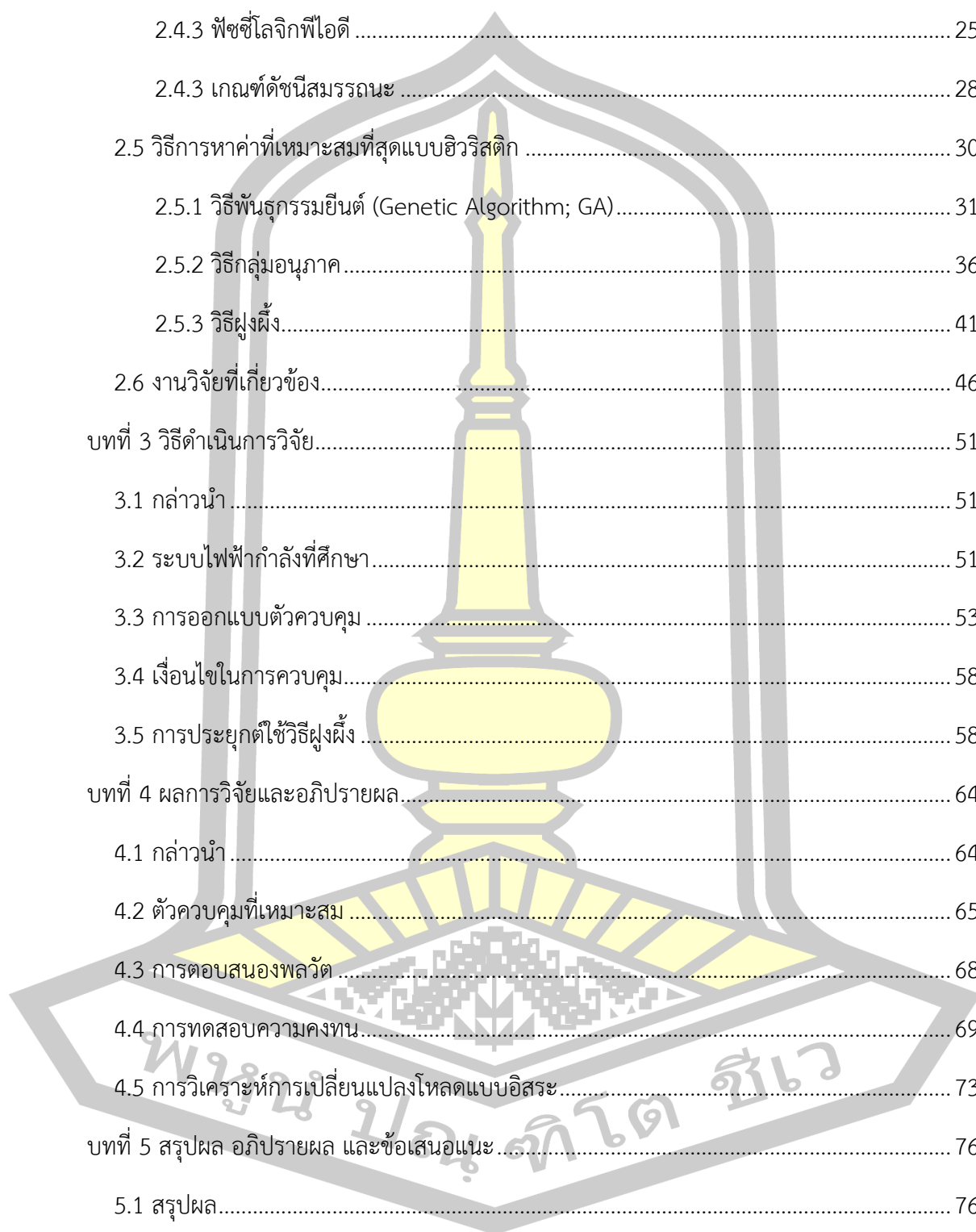
พนุน ปณฺ ทิโต ชีเว

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	5
2.2.1 โรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล.....	7
2.2.2 โรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ร่วมกับ SMES.....	10
2.3 การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง.....	13
2.3.1 การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ.....	15
2.3.1.1 การควบคุมความถี่.....	17
2.3.1.2 หลักการควบคุมความถี่.....	18
2.4 ตัวควบคุม (Controller).....	19
2.4.1 ตัวควบคุมพีไอดี.....	20

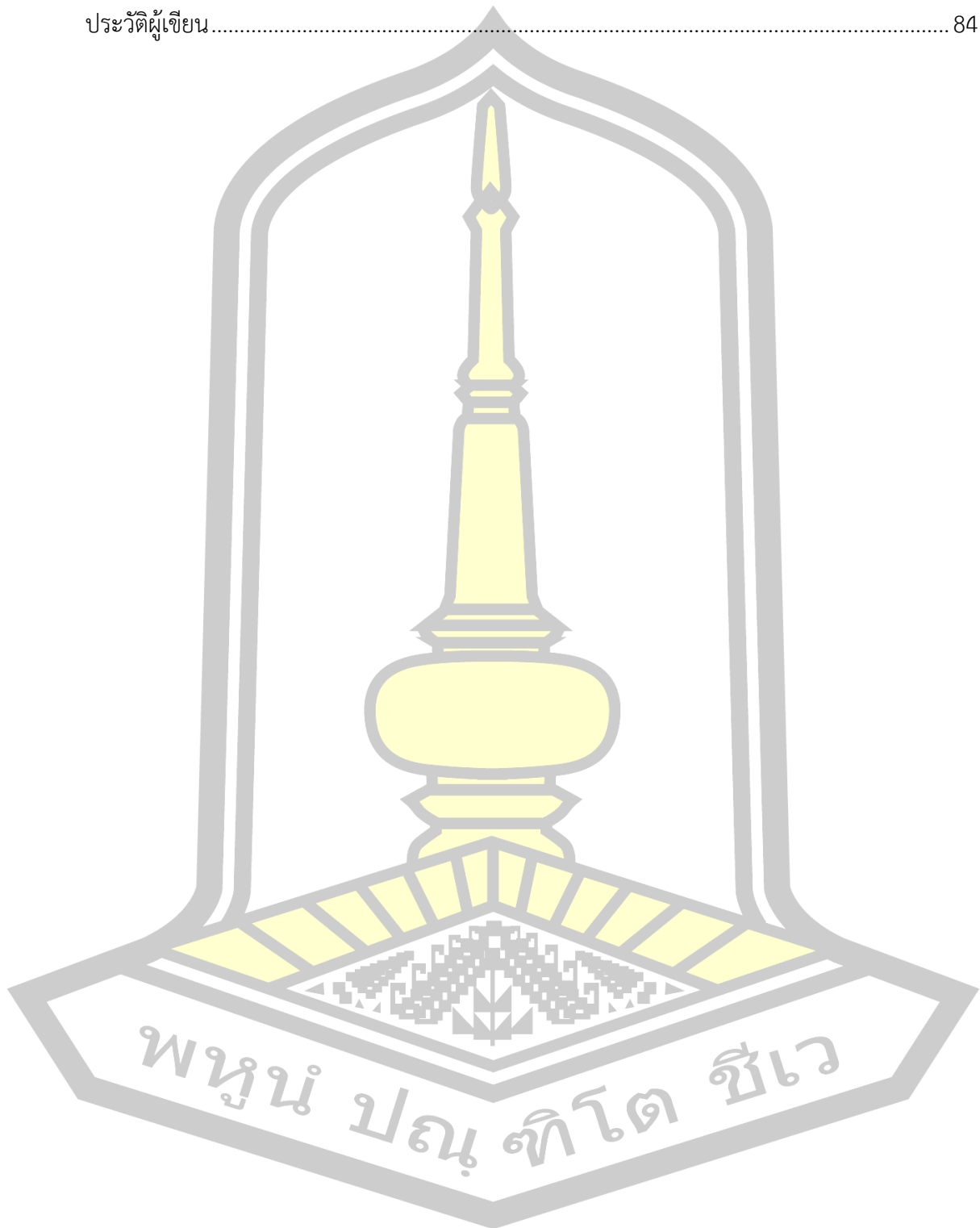


2.4.2	ฟuzzy logic	22
2.4.3	ฟuzzy logic ฟuzzy	25
2.4.3	เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ	28
2.5	วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฮิวริสติก	30
2.5.1	วิธีพันธุกรรมยีนต์ (Genetic Algorithm; GA)	31
2.5.2	วิธีกลุ่มอนุภาค	36
2.5.3	วิธีฝูงผึ้ง	41
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	51
3.1	กล่าวนำ	51
3.2	ระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษา	51
3.3	การออกแบบตัวควบคุม	53
3.4	เงื่อนไขในการควบคุม	58
3.5	การประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง	58
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	64
4.1	กล่าวนำ	64
4.2	ตัวควบคุมที่เหมาะสม	65
4.3	การตอบสนองพลวัต	68
4.4	การทดสอบความคงทน	69
4.5	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระ	73
บทที่ 5	สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	76
5.1	สรุปผล	76
5.2	อภิปรายผล	76
5.3	ข้อเสนอแนะ	76



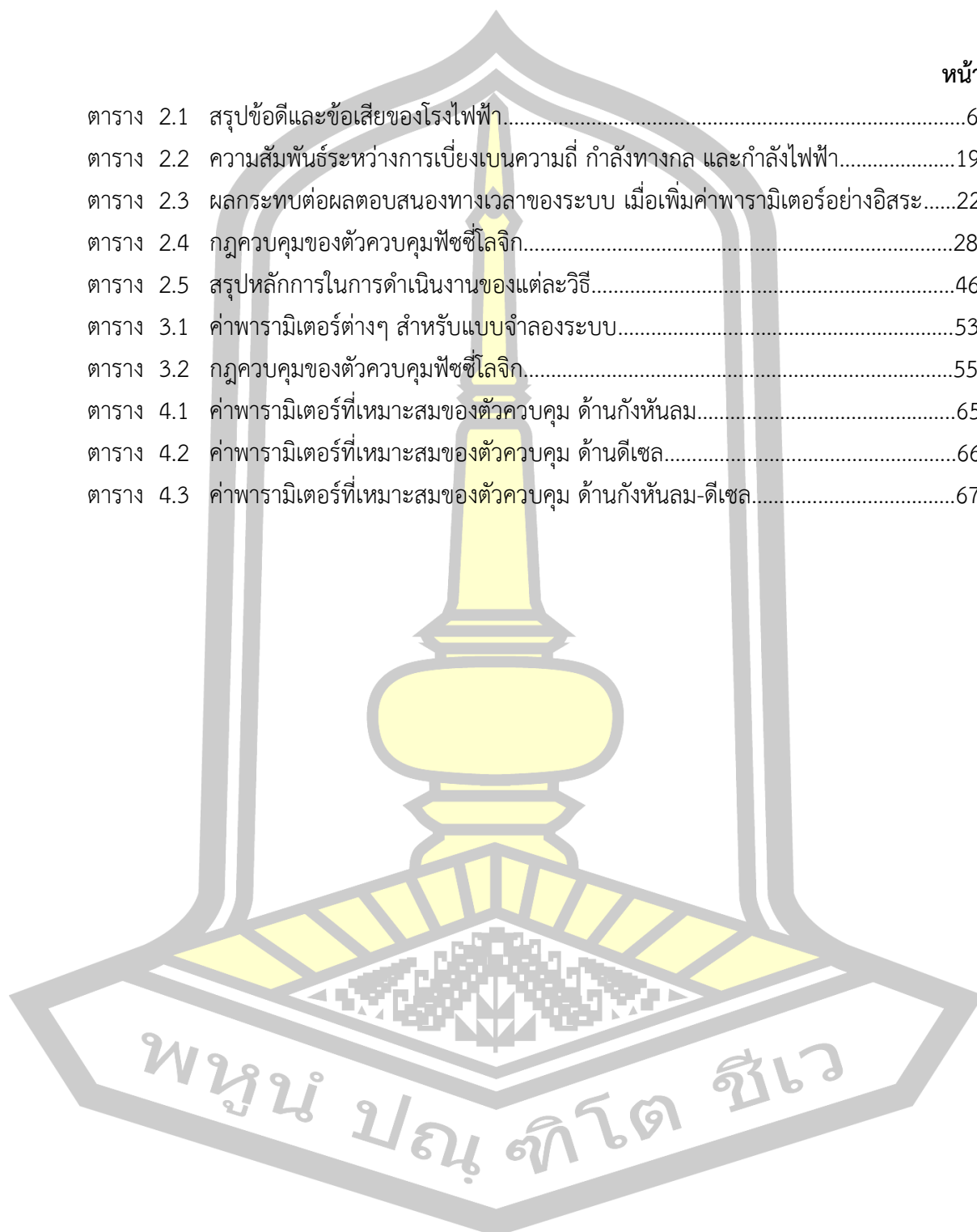
บรรณานุกรม..... 77

ประวัติผู้เขียน..... 84



## สารบัญตาราง

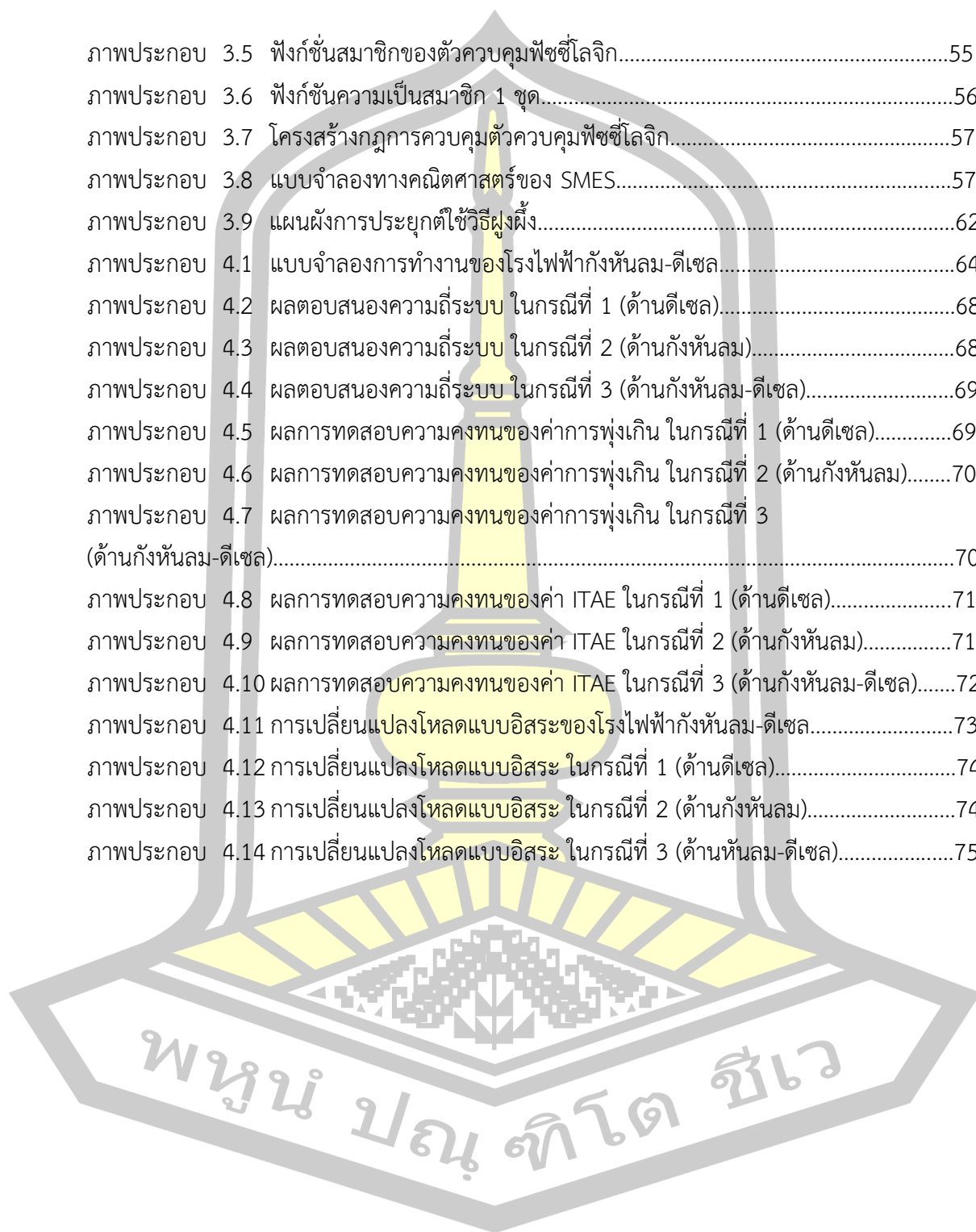
	หน้า
ตาราง 2.1	สรุปข้อดีและข้อเสียของโรงไฟฟ้า.....6
ตาราง 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการเบี่ยงเบนความถี่ กำลังทางกล และกำลังไฟฟ้า.....19
ตาราง 2.3	ผลกระทบต่อผลตอบแทนของเวลาของระบบ เมื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์อย่างอิสระ.....22
ตาราง 2.4	กฎควบคุมของตัวควบคุมฟuzzyโลจิก.....28
ตาราง 2.5	สรุปหลักการในการดำเนินงานของแต่ละวิธี.....46
ตาราง 3.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับแบบจำลองระบบ.....53
ตาราง 3.2	กฎควบคุมของตัวควบคุมฟuzzyโลจิก.....55
ตาราง 4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม ด้านกักหน้ลม.....65
ตาราง 4.2	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม ด้านดีเซล.....66
ตาราง 4.3	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม ด้านกักหน้ลม-ดีเซล.....67



## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 โรงไฟฟ้าระบบกังหันลม-ดีเซล.....	7
ภาพประกอบ 2.2 แบบจำลองของเครื่องยนต์ดีเซลและตัวบังคับ.....	8
ภาพประกอบ 2.3 แบบจำลองของโรงไฟฟ้ากังหันลม.....	9
ภาพประกอบ 2.4 แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล.....	10
ภาพประกอบ 2.5 แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ร่วมกับ SMES.....	10
ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างของ SMES.....	11
ภาพประกอบ 2.7 ลักษณะการทำงานของการสะสมพลังงานแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด.....	12
ภาพประกอบ 2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES.....	12
ภาพประกอบ 2.9 ไดอะแกรมการควบคุมความถี่โหลด และการควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	14
ภาพประกอบ 2.10 วงรอบการควบคุมในวงกว้าง.....	15
ภาพประกอบ 2.11 การทำงานของตัวปรับความเร็ว.....	16
ภาพประกอบ 2.12 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย.....	18
ภาพประกอบ 2.13 ไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอดี.....	20
ภาพประกอบ 2.14 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟัซซี.....	23
ภาพประกอบ 2.15 การนิยามความเร็วในรูปแบบของฟัซซีเซต และเซตแบบดั้งเดิม.....	23
ภาพประกอบ 2.16 การทับซ้อนกันของฟัซซีเซต.....	24
ภาพประกอบ 2.17 โครงสร้างการทำงานของฟัซซีโลจิก.....	24
ภาพประกอบ 2.18 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีโลจิกพีไอดี.....	25
ภาพประกอบ 2.19 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีโลจิก.....	27
ภาพประกอบ 2.20 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีพันธุกรรมยีนต์.....	33
ภาพประกอบ 2.21 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้น จำนวน 4 โครโมโซม.....	34
ภาพประกอบ 2.22 แสดงสัดส่วนของค่าฟังก์ชันความเหมาะสมในวงล้อรูเล็ต.....	35
ภาพประกอบ 2.23 การข้ามสายพันธุ์.....	36
ภาพประกอบ 2.24 การกลายพันธุ์.....	36
ภาพประกอบ 2.25 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีกลุ่มอนุภาค.....	41
ภาพประกอบ 2.26 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้ง.....	45
ภาพประกอบ 3.1 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล.....	51
ภาพประกอบ 3.2 แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล.....	52
ภาพประกอบ 3.3 ตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล.....	53
ภาพประกอบ 3.4 ตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกังหันลม.....	54

ภาพประกอบ 3.5	ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีซีซีโลจิก.....	55
ภาพประกอบ 3.6	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 1 ชุด.....	56
ภาพประกอบ 3.7	โครงสร้างกฎการควบคุมตัวควบคุมพีซีซีโลจิก.....	57
ภาพประกอบ 3.8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES.....	57
ภาพประกอบ 3.9	แผนผังการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy.....	62
ภาพประกอบ 4.1	แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล.....	64
ภาพประกอบ 4.2	ผลตอบสนองความถี่ระบบ ในกรณีที่ 1 (ด้านดีเซล).....	68
ภาพประกอบ 4.3	ผลตอบสนองความถี่ระบบ ในกรณีที่ 2 (ด้านกังหันลม).....	68
ภาพประกอบ 4.4	ผลตอบสนองความถี่ระบบ ในกรณีที่ 3 (ด้านกังหันลม-ดีเซล).....	69
ภาพประกอบ 4.5	ผลการทดสอบความคงทนของค่าการพุงเกิน ในกรณีที่ 1 (ด้านดีเซล).....	69
ภาพประกอบ 4.6	ผลการทดสอบความคงทนของค่าการพุงเกิน ในกรณีที่ 2 (ด้านกังหันลม).....	70
ภาพประกอบ 4.7	ผลการทดสอบความคงทนของค่าการพุงเกิน ในกรณีที่ 3 (ด้านกังหันลม-ดีเซล).....	70
ภาพประกอบ 4.8	ผลการทดสอบความคงทนของค่า ITAE ในกรณีที่ 1 (ด้านดีเซล).....	71
ภาพประกอบ 4.9	ผลการทดสอบความคงทนของค่า ITAE ในกรณีที่ 2 (ด้านกังหันลม).....	71
ภาพประกอบ 4.10	ผลการทดสอบความคงทนของค่า ITAE ในกรณีที่ 3 (ด้านกังหันลม-ดีเซล).....	72
ภาพประกอบ 4.11	การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล.....	73
ภาพประกอบ 4.12	การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระ ในกรณีที่ 1 (ด้านดีเซล).....	74
ภาพประกอบ 4.13	การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระ ในกรณีที่ 2 (ด้านกังหันลม).....	74
ภาพประกอบ 4.14	การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระ ในกรณีที่ 3 (ด้านกังหันลม-ดีเซล).....	75



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ภูมิหลัง

พลังงานไฟฟ้า มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และยังเป็นปัจจัยหลักต่อการพัฒนาประเทศ ปัจจุบันจำนวนประชากรมีอัตราที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้การผลิตกำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการ ระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องผลิตกำลังไฟฟ้าออกเป็นพื้นที่ย่อยหลายพื้นที่ หรือแบ่งพื้นที่การเชื่อมต่อออกเป็นกลุ่มตามประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมีการต่อเชื่อมถึงกันด้วยสายส่งเชื่อมต่อ (Tie-Line) การเชื่อมโยงระบบกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ (Interconnected power system) [1] ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย [2-5] ด้วยเหตุผลที่ว่า ระบบจะช่วยกันจัดส่งกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลดและยังเพิ่มความน่าเชื่อถือทางด้านเศรษฐศาสตร์อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากำลังทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ก่อให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ (Inter-area oscillation) ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพ (Stability) ของระบบหากเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด หรือเกิดความผิดปกติ (Fault) ทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ ส่งผลให้ไฟฟ้าดับได้ นอกจากนี้ วิกฤตการณ์ด้านพลังงานในการนำมาผลิตไฟฟ้า ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม หรือแม้กระทั่งการลงทุนติดตั้งระบบจำหน่ายไปยังหมู่เกาะ หรือชุมชนที่อยู่ห่างไกล จากระบบที่กล่าวมานั้น แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed generator) [6] เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากสามารถลดปริมาณการสูญเสียพลังงานในการส่งกำลังไฟฟ้า โดยให้แหล่งผลิตไฟฟ้าอยู่ใกล้กับแหล่งที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้า นอกจากนั้นยังสามารถที่จะลดขนาดและจำนวนการสร้างสายส่งไฟฟ้าได้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้วแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลายๆ ชนิด เช่น กังหันลม (Wind turbine) กังหันก๊าซ (Gas turbine) กังหันขนาดเล็ก (Micro-turbine) การผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel generator) เป็นต้น เพื่อช่วยกันจ่ายโหลดในระบบเล็กๆ ระบบไฟฟ้ากำลังแบบนี้เรียกว่า ระบบไมโครกริด [7-10]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา พลังงานทดแทน (Alternative Energy) [11] ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น ลดมลพิษที่เกิดจากแหล่งพลังงานหลัก ลดการใช้พลังงานหลักซึ่งมีราคาสูง และมีแนวโน้มไม่เพียงพอ และเพิ่มการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ เป็นต้น [12-13] โดยส่วนใหญ่พลังงานทดแทนนี้เป็นพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เช่น พลังงานลม (Wind) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar) และพลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen) ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด และมีอยู่ในธรรมชาติ [14-16] กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power: WP) ก็เป็น

กำลังไฟฟ้าอีกประเภทหนึ่งที่มีบทบาทในการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันเนื่องจากลมเป็นพลังงานที่สะอาด และมีต้นทุนการผลิตต่ำ เหมาะสมที่จะใช้ในสถานที่ห่างไกลและมีลมแรง อย่างเช่น ตามหมู่เกาะหรือภูเขาสูง แต่อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมไม่มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของลมในธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ทั้งในส่วนของกาแวงของกำลังไฟฟ้า และความถี่ [17-18] ดังนั้นจึงได้นิยมทำการชดเชยร่วมกับพลังงานอื่น เช่น พลังงานดีเซล เป็นต้น เรียกโรงไฟฟ้าแบบนี้ว่า โรงไฟฟ้ากังหันลมดีเซล (Wind-Diesel Power Plant) เพื่อให้การผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ และเกิดการแกว่งของความถี่น้อยที่สุดจึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมเพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพ คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังในการกลับคืนสู่จุดทำงานที่สมดุลหลังเกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลัง การควบคุมการผลิตของระบบไฟฟ้ากำลังให้มีเสถียรภาพสูงจะใช้การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control : AGC) เพื่อช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น การควบคุมการผลิตไฟฟ้ากำลังจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมความถี่-โหลด (Load-Frequency Control : LFC) การควบคุมนี้เป็นการควบคุมให้การจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความเพียงพอต่อความต้องการโหลด พร้อมทั้งให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) และมีคุณภาพที่ดี คุณลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ เช่น กรณีเกิดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด หรือมีสภาวะที่ผิดปกติอันเนื่องมาจากความล้มเหลวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของระบบไฟฟ้ากำลัง สิ่งเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่อาจจะคาดเดา ปัญหาเหล่านี้จะถูกดำเนินการแก้ไขโดยการควบคุมความถี่ด้วยการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ที่ถูกกำหนด [19] วัตถุประสงค์หลักของการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติก็เพื่อต้องการบรรลุผลตามที่ต้องการ [20-21] ดังนี้ 1) ค่าความคาดเคลื่อนสถานะอยู่ตัว (Steady state error) ของระบบมีค่าเท่ากับศูนย์ในสายส่งเชื่อมต่อขณะที่ความถี่เบี่ยงเบน 2) มีการควบคุมพฤติกรรมของระบบชั่วคราว (Transient) ให้เหมาะสม 3) ในสถานะอยู่ตัวระดับการดำเนินงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกกำหนดให้เหมาะสมตามเงื่อนไขของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ในอดีตที่ผ่านมาตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนใหญ่จะเป็นแบบ ตัวควบคุมพีไอ (Proportional integral : PI) [22-23] และตัวควบคุมพีไอดี (Proportional integral derivative : PID) [24-25] เนื่องจากการออกแบบง่าย ราคาถูก อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมเหล่านี้ไม่เหมาะกับระบบที่มีอันดับสูงๆ (High-order) ระบบที่มีเวลาหน่วง (Time-delay) ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ (High-nonlinear system) และระบบที่มีความซับซ้อนมากๆ

ในระหว่างทศวรรษที่ผ่านมา ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกพีไอดี (Fuzzy logic PID : FLPID) [26] มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบการควบคุมต่างๆ เช่น ระบบการควบคุมความถี่โหลด (Load-Frequency Control : LFC) [27-28] ระบบการควบคุมแรงดันสำหรับเครื่องจักรกำเนิดไฟฟ้า



ซิงโครนัส (Voltage control for a synchronous generator) [29] ระบบการควบคุมกังหันลม [30] จากการประยุกต์ใช้หลักการของฟuzzy logic กับงานด้านวิศวกรรมที่นำเสนอใน [31-34] พบว่าตัวควบคุมฟuzzy logic มีการดำเนินงานที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิม เมื่อหลายปีที่ผ่านมาตัวควบคุมฟuzzy logic ไม่ได้มีการทำงานที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้าง และพารามิเตอร์ของระบบ แต่ถ้ามีการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy logic ที่ดีก็สามารถทำให้บรรลุสำเร็จได้โดยง่ายกับระบบที่มีขนาดใหญ่ ยิ่งกว่านั้นตัวควบคุมฟuzzy logic ยังถูกคาดหวังให้เป็นเทคนิคที่ง่ายในการออกแบบมีการดำเนินงานที่บรรลุสำเร็จได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการเลือกค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership functions : MF) และกฎการควบคุม (Control rules : CR) เป็นสิ่งที่ปฏิบัติได้ยากเพราะไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy logic ได้ เพื่อให้ได้ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมอย่างเป็นที่น่าพอใจนั้น ผู้ออกแบบจะต้องมีความชำนาญ ส่วนมากการออกแบบค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมจะเป็นแบบตรงไปตรงมาไม่ยุ่งยากโดยทำการศึกษาระบบปฏิบัติการหรือตัวควบคุมที่มีอยู่ ดังนั้นวิธีการที่ได้ผลดีสำหรับการปรับค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมเพื่อให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนที่เอาท์พุทมีค่าต่ำที่สุด หรือค่ามากที่สุดของตัวบ่งชี้สมรรถนะโดยไม่ต้องใช้วิธีการแบบลองผิดลองถูกนั้นถือว่าเป็นสิ่งที่ควรปฏิบัติ

ปัญหานี้เป็นที่น่าสนใจของนักวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการ อย่างเช่น คุณสมบัติของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และมีเงื่อนไขบังคับของการทำงานหลายอย่าง ทำให้ปัญหานี้ยากต่อการหาคำตอบที่เหมาะสม ในปัจจุบันจึงได้นำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมอย่างชาญฉลาด (Intelligent Optimization Algorithm) หลายวิธีมาใช้ในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมฟuzzy logic ที่โอดีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างเช่น วิธีพันธุกรรมยีนต์ (Genetic algorithm; GA) [35] วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization; PSO) [36] วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network; ANN) [37] วิธีฮาร์โมนีเซิร์ท (Harmony Search) [38] และวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm; BA) [39]

วิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm; BA) เป็นขบวนการที่ดีสำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่ได้นำเสนอใน [39] ดังนั้นวิธีผึ้งผึ้งจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเลือกค่าที่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ในตัวควบคุมต่างๆ งานวิจัยในสมัยก่อนมีวิธีการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้มนุษย์ในการปฏิบัติการ กรณีที่ความถี่จริงเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยกว่าค่าความถี่ที่กีดกันนั้นจะต้องมีการเพิ่มค่ากำลังการผลิตไฟฟ้า ส่วนกรณีที่ความถี่จริงเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่ามากกว่าค่าความถี่ที่กีดกันนั้นจะต้องมีการลดค่ากำลังการผลิตไฟฟ้า โดยการเพิ่มหรือลดค่ากำลังการผลิตไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับความตั้งใจของผู้ปฏิบัติการ เนื่องจากวิธีการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดในด้านการใช้มนุษย์ในการปฏิบัติงาน ไม่ได้คำนึงถึงจุดต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาจัดการกับปัญหาเหล่านี้ได้ ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบระบบควบคุมการใช้ฟuzzy logic [40] มีประสิทธิภาพสูง และมีความเหมาะสมที่จะนำมาทดแทนการควบคุมแบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถ



ออกแบบกฎการควบคุมให้เลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ได้ งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ได้ใช้ตัวควบคุมฟuzzyโลจิกพีไอดี โดยเป็นการนำตัวควบคุมฟuzzyโลจิกมาต่ออนุกรมกับตัวควบคุมพีไอดี เพื่อให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นส่งผลให้การดำเนินงานของระบบดียิ่งขึ้น และยังสามารถออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงกฎการควบคุมให้เหมาะสมตามแต่ละกรณีได้โดยง่าย ปัจจุบันการควบคุมฟuzzyโลจิกถูกใช้อย่างแพร่หลายกับการควบคุมระบบต่างๆ เนื่องจากสามารถควบคุมระบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี โดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยากต่อการหาผลเฉลย ในการควบคุมส่วนใหญ่จะเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น การจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถกระทำได้โดยง่าย ดังนั้นการควบคุมฟuzzyโลจิกจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถจัดการกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี

จากปัญหาในด้านต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังดังที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของการทำงานร่วมกันระหว่างโรงไฟฟ้ากังหันลมกับโรงไฟฟ้าดีเซล โดยใช้กระบวนการทางฟuzzyโลจิกร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี และได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm; BA) เพื่อออกแบบตัวควบคุมฟuzzyโลจิกพีไอดี ที่ค่าอัตราขยายพีไอดี ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่ากฎการควบคุมให้เหมาะสม เพื่อดำเนินงานที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสอง

## 1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี, ฟuzzyโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด สำหรับการควบคุมความถี่ไหลของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล
2. เพื่อประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้งในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี, ฟuzzyโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด สำหรับการควบคุมความถี่ไหลของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล
3. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะตัวควบคุมควบคุมพีไอดี, ฟuzzyโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด ที่นำเสนอ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีฝูงผึ้ง
2. ประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี, ฟuzzyโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด
3. ทดสอบการควบคุมความถี่ไหลของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล
4. เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมควบคุมพีไอดี, ฟuzzyโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด ที่นำเสนอ

## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึง การดำเนินการวิธีการหาที่เหมาะสมแบบฝูงผึ้ง ในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ของตัวควบคุม พีไอดี พีซีโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด สำหรับระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับหลายหัวข้อ ได้แก่ โรงไฟฟ้ากังหันลมและโรงไฟฟ้าดีเซล ตัวควบคุมพีไอดี พีซีโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็ก โดยใช้ตัวนำยิ่งยวด การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีซีโลจิกพีไอดี เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฮิวริสติก หลักการและลำดับขั้นตอนของวิธีฝูงผึ้ง เป็นต้น ในบทนี้จะแสดงรายละเอียดทั้งหมดดังที่กล่าวมานี้ พร้อมทั้งรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันนี้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศต่างๆ มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการมีระบบไฟฟ้าที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าได้จึงนับได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญมาก การได้มาซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งผ่านกระบวนการอยู่หลายขั้นตอนไม่ว่าจะเป็น การวางแผนการวิเคราะห์ การดำเนินการและการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้ากำลัง ในแต่ละขั้นตอนล้วนแล้วแต่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนับได้ว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่จะบอกได้ว่าระบบไฟฟ้านั้นมีความสามารถในการผลิตส่งจ่ายและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด การวิเคราะห์จะพิจารณาตั้งแต่เรื่องความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าและความสูญเสียทางกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสภาวะการทำงานปกติ ตลอดจนการพิจารณาถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อระบบเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบพลังงานที่นำมาเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้มีหลากหลาย ทั้งพลังงานที่เกิดจาก พลังงานฟอสซิล พลังงานลม พลังงานความร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ ซึ่งพลังงานแต่ละประเภทมีความยากง่าย ในการแปลงรูปพลังงานแตกต่างกัน รวมทั้งยังใช้เทคโนโลยีที่ต่างกันด้วย การผลิตไฟฟ้าจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ โรงผลิตไฟฟ้าก็คืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานชนิดอื่นให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแบ่งได้หลายประเภทตามเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตไฟฟ้า แต่โรงไฟฟ้าที่ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อทำการวิจัยมีดังนี้

1. โรงไฟฟ้าดีเซล คือ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนอีกประเภทหนึ่ง ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสันดาปภายในร่วมกับการอัดของอากาศเกิดความร้อนและจุดระเบิดต่อเนื่องกันทำให้เครื่องยนต์หมุนไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าออกมา

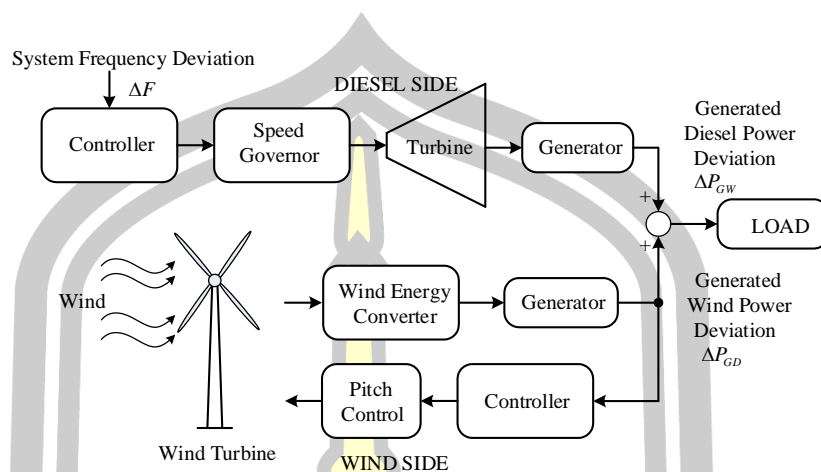
2. โรงไฟฟ้ากังหันลม หลักการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหัน พลังงานจลน์ที่เกิดจากลมจะทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุนและได้เป็นพลังงานกลออกมา พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบควบคุมไฟฟ้า และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบต่อไป โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ความยาวของใบพัด และสถานที่ติดตั้งกังหันลม

ตาราง 2.1 สรุปข้อดีและข้อเสียของโรงไฟฟ้า

แหล่งพลังงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ดีเซล	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต้นทุนในการเดินเครื่องต่ำ</li> <li>2. กำลังผลิตสูง สามารถจ่ายเสริมเข้าระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใกล้เคียง</li> </ol>
ลม	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ราคาถูก</li> <li>2. นำกลับมาใช้ใหม่ได้</li> <li>3. ไม่มีมลภาวะ</li> <li>4. เหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยเฉพาะที่มีลมแรงตลอดเวลา (Wind farm)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สามารถใช้ได้ในพื้นที่เท่านั้น</li> <li>2. ความเร็วลมต้องมากกว่า 21 กิโลเมตรต่อชั่วโมง</li> <li>3. มีความจำเป็นต้องจัดหาระบบสำรองไว้ด้วย</li> <li>4. ทำให้เกิดการรบกวนในการส่งสัญญาณโทรศัพท์และไมโครเวฟ</li> </ol>



## 2.2.1 โรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

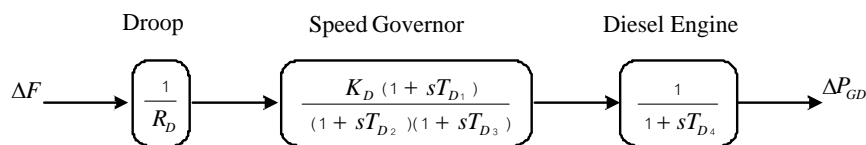


ภาพประกอบ 2.1 โรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

โรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ดังแสดงภาพประกอบ 2.1 ประกอบด้วยโรงไฟฟ้ากังหันลม และโรงไฟฟ้าดีเซลทำงานร่วมกัน หลักการทำงานและแบบจำลองของระบบที่ใช้ในการทดสอบการดำเนินการทั้งในส่วนของโรงไฟฟ้ากังหันลมและโรงไฟฟ้าดีเซลสามารถอธิบายได้ดังนี้

โรงไฟฟ้าดีเซล [41,42] เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้การเผาไหม้ หรือการสันดาปภายในโดยใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โรงไฟฟ้าดีเซลนี้สามารถเดินเครื่องได้รวดเร็วมีประสิทธิภาพสูงในการใช้เป็น โรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับจ่ายไฟฟ้าเข้าเสริมระบบในขณะที่มีการใช้โหลดจำนวนมาก (Peak load) หรือเป็นโรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าหลักในกรณีที่ศูนย์กลางโหลดห่างไกลจากแหล่งโรงไฟฟ้ากำลังชนิด อื่นๆ เช่น ตามหมู่เกาะหรือหมู่บ้านตามชนบท และในปัจจุบันได้มีการนำเอาโรงไฟฟ้าชนิดนี้มาผลิต ไฟฟ้าร่วมกับการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทน เช่น ระบบไมโครกริด เนื่องจากสามารถช่วยลด ปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ในระบบได้ เครื่องยนต์ดีเซล ได้คิดค้นโดย Rudolf Diesel วิศวกร ชาวเยอรมัน และพัฒนาใช้จนแพร่หลายในปัจจุบัน เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เป็นต้นกำลังในการหมุน เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีหลักการทำงานเหมือนกับเครื่องยนต์ในรถยนต์ทั่วไป คือ ใช้วิธีการอัดอากาศ ภายในห้องสูบซึ่งจะเกิดการระเบิดจนมีความดันสูงทำให้สามารถดันลูกสูบ ก้านสูบ เพลาข้อเหวี่ยงให้ หมุนเกิดพลังงานกลไปขับเคลื่อนกังหัน (Turbine) ที่ต่ออยู่กับเพลาโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้งานต่อไป

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าดีเซลและตัวบังคับความเร็ว ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.2 [43,44] แบบจำลองนี้ได้มีใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถแสดงถึงพฤติกรรมทางพลวัตของ โรงไฟฟ้าดีเซลเล็กๆ ได้ดี แบบจำลองเครื่องยนต์ดีเซลและตัวบังคับ ได้ทำการแทนด้วยสมการอันดับ หนึ่งและสมการถ่ายโอน นำหน้า-ล่าหลัง (Lead-lag)



ภาพประกอบ 2.2 แบบจำลองของเครื่องยนต์ดีเซลและตัวบังคับ

เมื่อ

$\Delta F$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ (Hz)

$R_D$  คือ คุณสมบัติของดรู๊ป (Droop)

$K_D$  คือ อัตราขยายของตัวบังคับความเร็ว

$T_{D1}, T_{D2}, T_{D3}$  คือ ค่าคงตัวเวลาของตัวบังคับความเร็ว

$T_{D4}$  คือ ค่าคงตัวเวลาของเครื่องยนต์ดีเซล

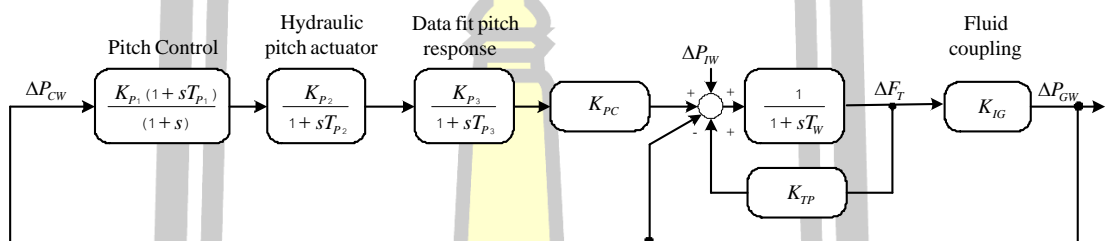
$\Delta P_{GD}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าด้านเครื่องยนต์ดีเซล (pu kW)

โรงไฟฟ้ากังหันลม [45-47] คือ เครื่องจักรกลที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ กังหันลมสามารถแบ่งออกตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้ 2 รูปแบบ คือ 1) กังหันลมแกนตั้ง เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ กังหันลมประเภทนี้จะให้กำลังลมเท่ากันไม่ว่าลมจะมาทิศทางใด แต่หมุนช้ากว่ากังหันลมแกนนอน คือ มีความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบรับลมสูงสุดไม่เกินสองเท่าของความเร็วลม ใบรับลมจะเป็นวัสดุแผ่นบางๆ ที่แบนหรือโค้งก็ได้ เช่น กังหันลมแดร์เรียส (Darrius) หรือกังหันลมซาโวเนียส (Savonius) ซึ่งออกแบบโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส 2) กังหันลมแกนนอน เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดกังหันลมเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม กังหันลมประเภทนี้ หมุนด้วยความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบรับลม ใบรับลมจะเป็นวัสดุแผ่นบางๆ ที่แบนหรือโค้งก็ได้ เช่น กังหันลมพรอเพลเลอร์ (Propeller) หรือกังหันลมใบเสือล่าแพน เป็นต้น

ส่วนประกอบสำคัญๆ ของระบบกังหันลมทั่วไปประกอบด้วย ส่วนแรก ใบกังหัน (Blades) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดพลังงานกลที่เพลลาของกังหัน จำนวนใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งใบถึงหลายสิบใบ กังหันลมที่มีจำนวนใบมากส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิด (Torque) สูง ในทางตรงข้ามกังหันลมที่มีใบพัดน้อยจะใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูงแรงบิดต่ำ เช่น การผลิตไฟฟ้า ส่วนที่ 2 คือ ระบบควบคุม ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท คือ 1) ควบคุมทิศทางกังหันลม ทำหน้าที่ควบคุมกังหันลมให้หันหน้าเข้าหาทิศทางลมตลอดเวลาเมื่อความเร็วต่ำ หรือให้หันหน้าออกจากกระแสลมโดยการหันไปข้างๆ หรือหันเงยหน้าขึ้น หรือทำให้ใบกังหันหุบตัวเมื่อมีพื้นที่ของกังหันที่รับกระแสลมน้อยลงเมื่อความเร็วสูงเกินกำหนด ซึ่งเรียกว่าการควบคุมการบิดของใบพัด (Pitch control) และ 2) ควบคุมความเร็วรอบของเพลลา เป็นระบบควบคุมที่มีการทรอปให้สอดคล้องกันระหว่างความเร็วรอบของแกนกังหันลมกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อ

ป้องกันการเสียหายเนื่องจากความเร็วลมสูงๆ จะมีแรงกระทำกับใบกังหันอย่างมาก ดังนั้นจึงออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานที่ความเร็วสูงสุดที่กังหันจะรับได้ค่าหนึ่ง การควบคุมควบคุมจะมีลักษณะการทำงาน คือ ทำให้เกิดการหน่วงต่อการหมุนของกังหันลม ซึ่งอาจทำได้โดยการบิดมุมของใบกังหันให้เกิดการหน่วงมากกว่าการขับ หรือเพิ่มขึ้นส่วนที่ทำให้เกิดแรงหน่วงขึ้นอย่างสูง เมื่อความเร็วถึงจุดที่กำหนดไว้

แบบจำลองของโรงไฟฟ้ากังหันลมได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.3 [43,44] ประกอบไปด้วย ส่วนของตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัดแบบไฮดรอลิก (Hydraulic pitch actuator) ผลตอบสนองของการบิดใบพัดที่เหมาะสมของข้อมูล (Data fit pitch response) และฟลูอิดคัปปลิง (Fluid coupling)



ภาพประกอบ 2.3 แบบจำลองของโรงไฟฟ้ากังหันลม

เมื่อ

$K_{p1}, T_{p1}$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของการควบคุมการบิดของใบพัด

$K_{p2}, T_{p2}$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัดแบบไฮ

ดรอลิก

$K_{p3}, T_{p3}$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของผลการตอบสนองของการบิดของ

ใบพัดที่

เหมาะสมของข้อมูล

$K_{PC}$  คือ อัตราขยายคุณลักษณะของใบพัด

$\Delta P_{IW}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังลมอินพุต

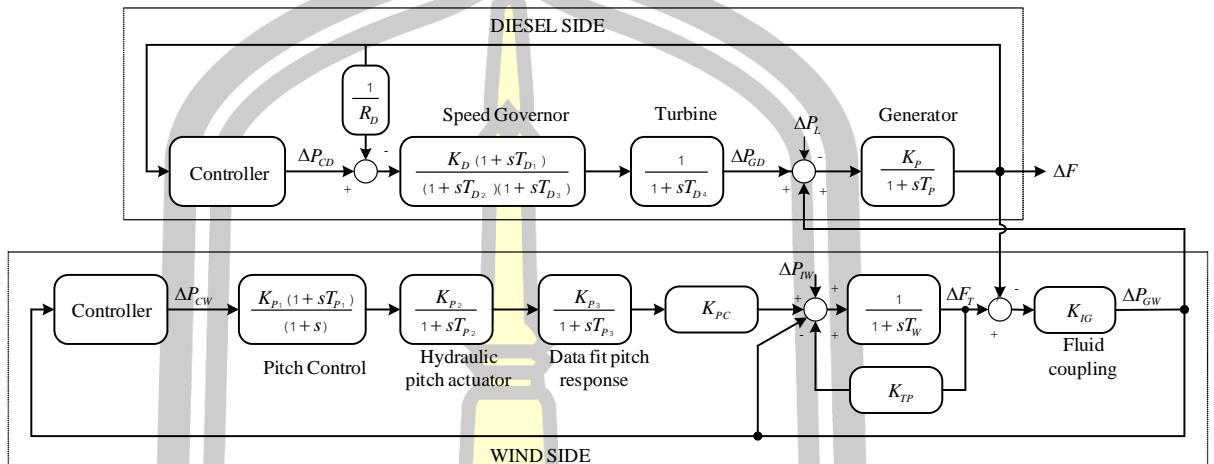
$K_{TP}, T_w$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของระบบกังหันลม

$K_{IG}$  คือ อัตราขยายของฟลูอิดคัปปลิง

$\Delta P_{GW}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้ากังหันลม

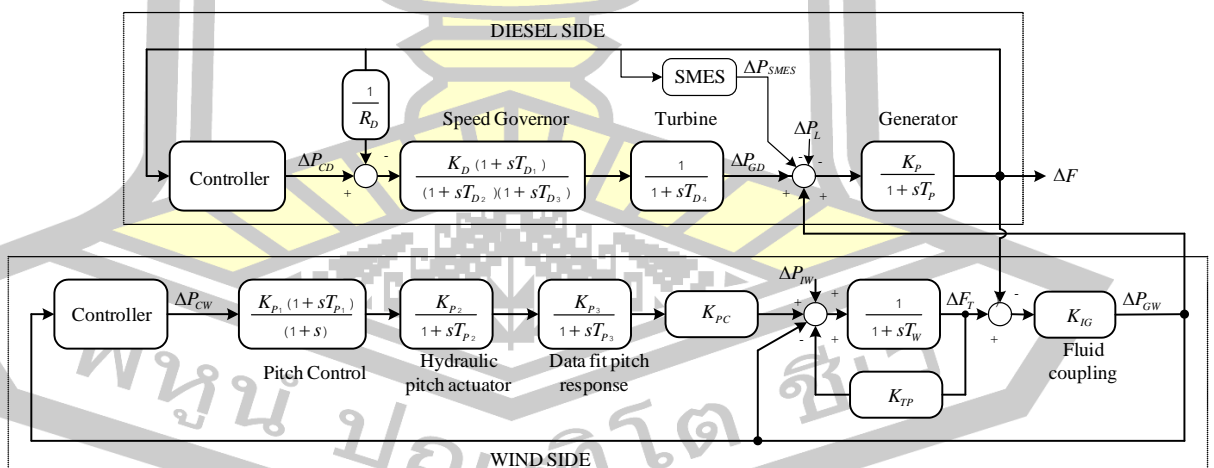


จากภาพประกอบ 2.2 และ 2.3 แสดงแบบจำลองการทำงานร่วมกันระหว่างโรงไฟฟ้ากังหันลมและโรงไฟฟ้าดีเซล พร้อมกับตัวควบคุมทั้งทางด้านของตัวบังคับความเร็วและตัวควบคุมด้านตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัด ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

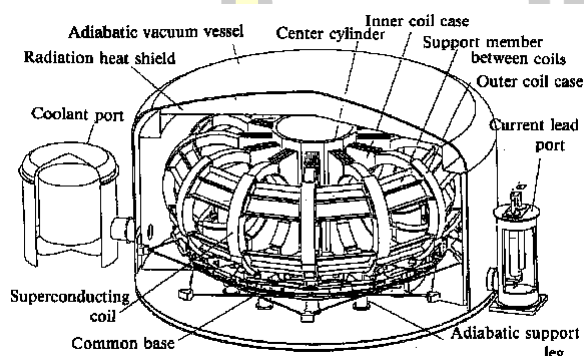
### 2.2.2 โรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ร่วมกับ SMES



ภาพประกอบ 2.5 แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ร่วมกับ SMES [38]

ภาพประกอบ 2.6 ตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด (Superconducting magnetic energy storage : SMES) [42-46] เป็นอุปกรณ์สำหรับสะสม และ

จ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมากอย่างรวดเร็ว โดยจะสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของไฟฟ้ากระแสตรงในขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ทำให้มีอุณหภูมิต่ำจนความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ระบบเหล่านี้ได้มีการนำมาใช้เมื่อหลายปีที่ผ่านมา เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพของไฟฟ้ากำลังในอุตสาหกรรม และเพิ่มเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ โดย SMES สามารถที่จะกลับมารับ หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในเวลาอันสั้น และยังสามารถกลับมาทำซ้ำได้หลายพันครั้งโดยไม่ทำให้แม่เหล็กเกิดการเสื่อม



ภาพประกอบ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของ SMES

โครงสร้างของ SMES ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาพประกอบ 2.6 โดยพลังงานไฟฟ้าสะสมในรูปของสนามแม่เหล็กของ SMES เกิดมาจกไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านขดลวดที่พันไว้ ถ้าขดลวดที่ใช้ นั้นเป็นลวดแบบทั่วไป เช่น ลวดทองแดง พลังงานแม่เหล็กจะค่อยๆลดลงเนื่องจากความร้อน โดยความร้อนนี้เป็นผลมาจากความต้านทานของขดลวดต่อการไหลของกระแส อย่างไรก็ตาม ถ้าขดลวดที่ใช้ นั้นมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวด (ความต้านทานเป็นศูนย์) จะทำให้พลังงานที่สะสมนั้นคงสภาพอยู่ในขดลวดจนกระทั่งจ่ายออกไป ตัวนำยิ่งยวดที่มีความต้านทานเป็นศูนย์นี้ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีความร้อนต่ำ เพื่อที่การลดลงของความร้อนนั้นได้มีการทำให้หายไป ดังนั้น ตัวทำความเย็นจึงมีความต้องการในระบบการทำงานของ SMES เพื่อที่จะทำความเย็นให้กับขดลวด ส่วนทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ในส่วนนี้ยังมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอยู่ แต่ก็สามารถที่จะลดมาให้ต่ำที่สุดด้วยการออกแบบอุปกรณ์ และโครงสร้างให้มีความเหมาะสม สำหรับในส่วนองไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ การรักษาพลังงาน เนื่องจากกระแสเป็นตัวนำไปสู่ความสามารถของขดลวด ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการทำงานที่เหมาะสมโดยทั่วไปของอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ที่ประมาณ 50-77 องศาเคลวิน พลังงานสะสม ( $E$ ) ภายในขดลวดสามารถหาได้จาก

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2.1)$$

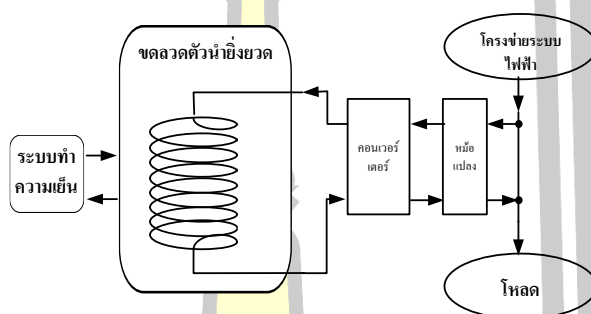


เมื่อ

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

$I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด

ขดลวดที่นำมาใช้เพื่อเป็นตัวนำยิ่งยวดเป็นแบบโลหะผสมไนโอเบียม-ไทเทเนียม (Niobium-Titanium) ซึ่งต้องการบังคับอุณหภูมิลดลง (Helium) เหลวเพื่อที่จะทำให้เป็นตัวนำยิ่งยวด

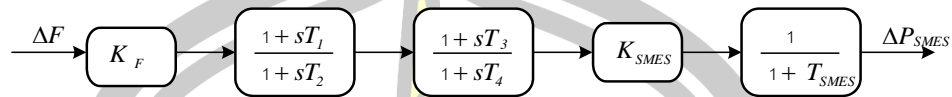


ภาพประกอบ 2.7 ลักษณะการทำงานของระบบสะสมพลังงานแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด

ลักษณะการทำงานของระบบ SMES ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ไว้แสดงในภาพประกอบ 2.7 การส่งผ่านแรงดัน (จากโครงสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ) จะลดลงจากหลายร้อย กิโลโวลต์ ไปยังหลายร้อยโวลต์ด้วยการใช้หม้อแปลงแบบแปลงลง (Step-down transformer) แล้วทำการเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวคอนเวอร์เตอร์ (Converter) เพื่อที่จะป้อนให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด ดังนั้นเมื่อกำลังไฟฟ้าไหลจากระบบไปยังขดลวด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการชาร์จ และจะทำให้พลังงานสะสมในขดลวด การสะสมพลังงานสูงสุดจะขึ้นอยู่กับการออกแบบของอุปกรณ์ เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อย่างเช่น แรงดันตก หรือการเปลี่ยนแปลงของความต้องการเป็นต้น ขดลวดจะทำการจ่ายพลังงานออกมาเสมือนกับแหล่งจ่ายพลังงาน แล้วทำการเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้ตัวคอนเวอร์เตอร์ เป็นตัวปฏิบัติการ โดย SMES ประกอบไปด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด สถานะการทำงานของระบบกำลังไฟฟ้า ตัวทำความเย็น และท่อสุญญากาศ SMES เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่จะสะสมพลังงานไฟฟ้า และสามารถจัดหาได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน คุณลักษณะพิเศษเหล่านี้ได้มีการนำมาใช้สำหรับเสถียรภาพของกริดในระบบการจำหน่าย และสำหรับคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่การต้องการกำลังไฟฟ้าที่สะอาดเป็นพิเศษของโรงงานผลิต

SMES มีคุณลักษณะในการทำงานโดยสามารถที่จะรับ หรือจ่าย ได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนพร้อมกัน [40,47] พร้อมทั้งสามารถใช้เพื่อที่จะลดปัญหาที่รุนแรงของการแกว่งกำลังไฟฟ้าในสายส่งต่อเชื่อม ด้วยเหตุนี้ SMES จึงได้มีการนำมาใช้งานอย่างมากมาย ในอดีต SMES

ได้นำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาหลายๆ ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างเช่น การปรับปรุงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง [48,49] การควบคุมความถี่ในระบบที่มีการเชื่อมโยงกัน [50, 51] ปรับปรุงคุณภาพระบบกำลังไฟฟ้า [52] เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES [38]

ภาพประกอบ 2.8 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES โดย SMES จะทำการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนของ SMES แสดงดังสมการ (2.2)

$$\Delta P_{SMES} = K_F \times K_{SMES} \times \left( \frac{1}{1 + sT_{SMES}} \right) \times \left( \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \times \left( \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \right) \times \Delta f \quad (2.2)$$

เมื่อ

$K_{SMES}$  คือ เกณฑ์ของ SMES

$T_{SMES}$  และ  $T_1 - T_4$  คือ เวลาคงที่ (วินาที) ของ SMES

### 2.3 การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง

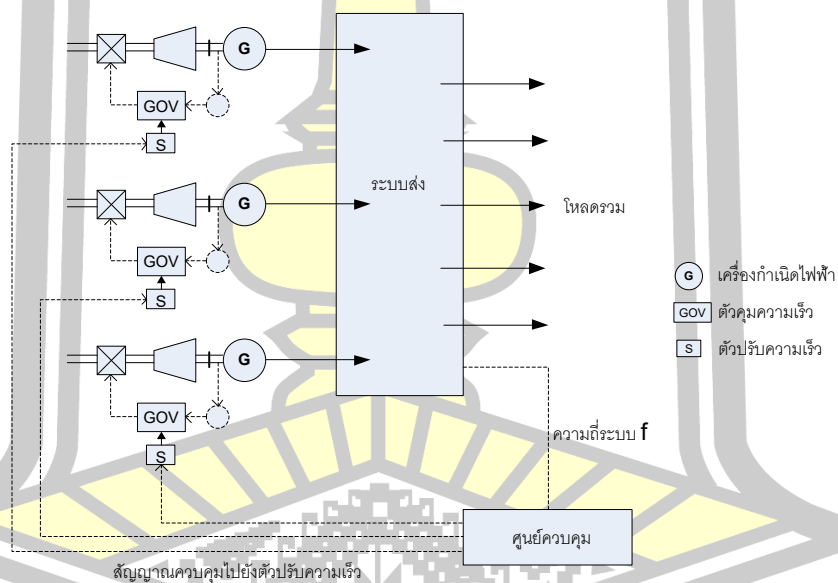
การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การควบคุมค่าการไหลของกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดัน และความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด โดยการควบคุมระบบไฟฟ้านั้นสามารถปฏิบัติได้ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตไฟฟ้า (Generation system) และการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Transmission system) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกสนใจการควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive power) อีกส่วนหนึ่งสนใจการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง หรือการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าซึ่งมีผลโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) ในขณะที่กำลังไฟฟารีแอกทีฟมีผลน้อยต่อค่าความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นผลให้มีการควบคุมแบบแยกส่วนกันระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ โดยการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังทำได้จากการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง ส่วนการควบคุมแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังทำได้จากการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ การควบคุมความถี่มีความสำคัญมากต่อการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครือข่ายขนาดใหญ่และมีการแลกเปลี่ยนโหลดทางไฟฟ้า หรือจ่ายโหลดทางไฟฟ้าทดแทนกัน ซึ่งการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนกันระหว่าง



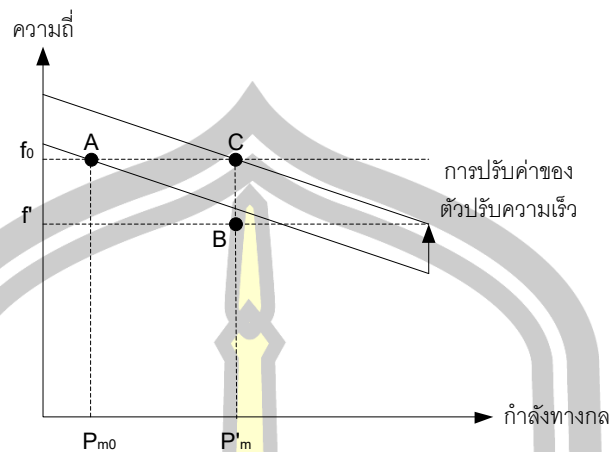
### 2.3.1 การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic generation control: AGC)

การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพมากขึ้นเป็นการทำงานที่มีการควบคุมความถี่โหลด ซึ่งเป็นการควบคุมที่สำคัญอย่างมากในการดำเนินการของระบบไฟฟ้ากำลังและการควบคุมสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ พร้อมทั้งยังต้องทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความน่าเชื่อถือ และมีคุณภาพที่ดี

วงรอบของการควบคุมในวงกว้างเป็นการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังจากศูนย์ควบคุม เรียกว่า การควบคุมความถี่โหลด การควบคุมความถี่อัตโนมัติ (Automatic frequency control : AFC) หรือการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ ภาพประกอบ 2.9 แสดงวงรอบการควบคุมในวงกว้างของระบบไฟฟ้ากำลังแยกโดดซึ่งไม่ได้เชื่อมโยงกับระบบอื่นๆ หลักการทำงานคือ เริ่มจากการวัดความถี่ของระบบ  $f$  ออกมาที่ศูนย์ควบคุมเพื่อคำนวณหาการเบี่ยงเบนความถี่เมื่อเทียบกับความถี่ซึ่งโครนัส จากนั้นจึงคำนวณค่าสัญญาณควบคุมเพื่อปรับความสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตและกำลังไฟฟ้าที่โหลดแล้วส่งสัญญาณนี้ไปยังตัวปรับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อควบคุมกำลังการผลิตให้สมดุลกับโหลดและกำจัดการเบี่ยงเบนความถี่ให้หมดไป



ภาพประกอบ 2.10 วงรอบการควบคุมในวงกว้าง [59]



ภาพประกอบ 2.11 การทำงานของตัวปรับความเร็ว [59]

การทำงานของตัวปรับความเร็วสามารถอธิบายได้โดยใช้คุณลักษณะการควบคุมความเร็วหรือดรู๊ป (Droop) ของตัวควบคุมความเร็วดังแสดงในภาพประกอบ 2.11 เริ่มจากการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่จุด A ที่ความถี่  $f_0$  และกำลังทางกลเริ่มต้น  $P_{m0}$  ต่อมาเกิดการเพิ่มขึ้นของโหลดแบบขั้นบันไดส่งผลให้ความถี่ของระบบลดลงเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องซึ่งโครโนซิงกันที่ความถี่ระบบทำให้ความถี่รอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องลดลงไปตามความสัมพันธ์สมการ  $P_m + P_e = M \frac{df}{dt}$  เป็นผลทำให้จุดการทำงานของระบบเริ่มเคลื่อนตัวลงไปตามคุณลักษณะของดรู๊ปของตัวควบคุมความเร็วมาที่จุด B ถ้าไม่มีการทำงานของตัวปรับความเร็ว กำลังทางกลจะขึ้นมาเป็น  $P'_m$  เพื่อให้สมดุลกับโหลดที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความถี่ของระบบลดลงมาเป็น  $f$  ซึ่งต่ำกว่า  $f_0$  ในกรณีปรับความเร็วรอบได้รับสัญญาณควบคุมในวงกว้างจากศูนย์ควบคุมจะทำให้กราฟเส้นตรงซึ่งแสดงคุณลักษณะของตัวควบคุมความเร็วเคลื่อนตัวขึ้นไปขนานกับกราฟเส้นตรงคุณลักษณะเดิมเป็นผลให้จุดทำงานเคลื่อนตัวมาที่จุด C ซึ่งนอกจากจะทำให้ความถี่ของระบบกลับมาเป็น  $f_0$  แล้ว กำลังการผลิตยังสมดุลกับโหลดอีกด้วย

เมื่อพิจารณาผลการทำงานของตัวปรับความเร็ว สามารถแสดงสมการเบี่ยงเบนกำลังทางกลในสถานะอยู่ตัวได้ คือ

$$\Delta P_m = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\Delta P_{ref}$  เป็นสมการเบี่ยงเบนกำลังทางกลอ้างอิงจากตัวปรับความเร็ว ส่วนพจน์  $-\frac{1}{R} \Delta f$  เป็นผลการควบคุมจากตัวควบคุมความเร็ว สำหรับ  $\Delta P_{ref}$  สามารถคำนวณได้จากผลของปริพันธ์ของ  $\Delta f$  ที่วัดได้จากศูนย์ควบคุม

$$P_{ref} = -K_i \int \Delta f dt \quad (2.4)$$

$K_i$  เป็นอัตราการขยายของตัวควบคุมอินทิกรัล (Integral controller) เนื่องจากวงรอบการควบคุมในวงกว้างใช้ตัวควบคุมอินทิกรัลในการสร้างสัญญาณ  $\Delta P_{ref}$  จึงทำให้  $\Delta f$  ถูกจำกัดให้มีค่าเป็นศูนย์ที่สถานะอยู่ตัว ส่งผลให้ความถี่ระบบกลับมาที่ความถี่ซึ่งโครนัส

### 2.3.1.1 การควบคุมความถี่

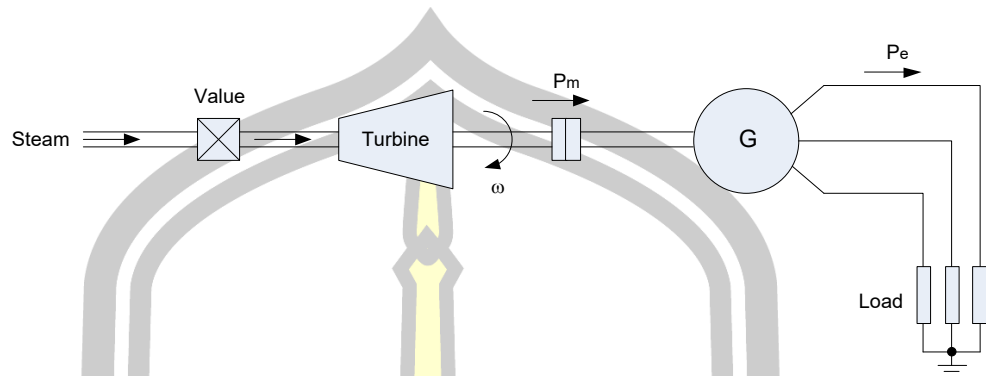
วัตถุประสงค์ของการควบคุมความถี่ก็เพื่อรักษาระดับค่าความถี่ และค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งไปในพื้นที่อื่นให้อยู่ในระดับที่กำหนดค่าไว้ การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ และการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าสามารถวัดได้จากเครื่องวัดที่ติดตั้งบริเวณขอบเขตของพื้นที่ควบคุม จากนั้นค่าสัญญาณผิดพลาด เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ และค่าการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าถูกนำมาทำกระบวนการการขยายสัญญาณ การรวมกันของสัญญาณ แล้วส่งสัญญาณไปยังเครื่องต้นกำลัง (Prime Mover) เพื่อควบคุมการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อไป

เครื่องต้นกำลัง เป็นตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังงานกลที่ป้อนเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของความถี่ และการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมคือ ต้องทราบฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) ก่อน ต่อมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

เสถียรภาพความถี่ (Frequency stability) หมายถึง ความสามารถในการรักษาความถี่ซึ่งโครนัสของระบบไฟฟ้ากำลังให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เมื่อเกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความต้องการกำลังไฟฟ้าที่โหลด ความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความถี่ระบบและความถี่ซึ่งโครนัสหรือที่เรียกว่า การเบี่ยงเบนความถี่ (Frequency deviation) เมื่อการเบี่ยงเบนความถี่ที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าการเบี่ยงเบนความถี่ที่ยอมรับได้ จะทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของกำลังไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับในระบบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมถี่ของระบบให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



## 2.3.1.2 หลักการควบคุมความถี่



ภาพประกอบ 2.12 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย [59]

การควบคุมความถี่นั้นจะสัมพันธ์กับสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้ากำลังและความต้องการกำลังไฟฟ้าในระบบ เมื่อเกิดความไม่สมดุลขึ้นระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตและโหลด จะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนความถี่ของระบบขึ้น เพื่อทำความเข้าใจในเรื่องนี้ พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายดังแสดงในภาพประกอบ 2.12 เครื่องกำเนิดกำลังไฟฟ้า G ขับเคลื่อนด้วยกำลังทางกล  $P_m$  หน่วย MW และผลิตกำลังไฟฟ้า  $P_e$  หน่วย MW จ่ายให้กับโหลด  $P_L$  ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกลและกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงด้วยสมการแกว่งในรูปความถี่ระบบ คือ

$$P_m - P_e = M \frac{df}{dt} \quad (2.5)$$

สมการนี้ยังแสดงถึงความสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าและความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดอีกด้วย เมื่อเกิดความไม่สมดุลระหว่างการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนความถี่ ( $\Delta f$ ) ขึ้นดังตาราง 2.2 เมื่อ  $\Delta f = f - f_0$  คือ ผลต่างระหว่างความถี่ของระบบ  $f$  กับความถี่ซิงโครนัส  $f_0$

พูนุ ปณ ทิโต ชีเว

ตาราง 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเบี่ยงเบนความถี่ กำลังทางกล และกำลังไฟฟ้า [59]

ความแตกต่างระหว่างกำลังทางกลและไฟฟ้า	ความเร่งของโรเตอร์ $\frac{df}{dt}$	การเบี่ยงเบนความถี่ $\Delta f$
$P_m > P_e$ การผลิตกำลังไฟฟ้ามักเกินไป	บวก (เร่ง)	เพิ่ม
$P_m = P_e$ สมดุลระหว่างกำลังการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้า	ศูนย์ (ไม่มีความเร่ง)	คงที่
$P_m < P_e$ การผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอ	ลบ (หน่วง)	ลดลง

โดยทั่วไปสามารถนำสัญญาณการเบี่ยงเบนความถี่มาใช้แทนความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้าในระบบเพื่อควบคุมความถี่ระบบได้ หลักการควบคุมความถี่ คือ การสร้างความสมดุลระหว่างกำลังการผลิตและความต้องการกำลังไฟฟ้า นั่นคือ  $P_m = P_e$  เพื่อให้ความถี่ของระบบเท่ากับความถี่ซิงโครนัส สามารถอธิบายหลักการควบคุมได้ดังนี้

1) เมื่อความถี่ของระบบมากกว่าความถี่ซิงโครนัส เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตมากกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้า ( $P_m > P_e$ ) ในการควบคุมความถี่ให้กลับมาที่ความถี่ซิงโครนัส จำเป็นต้องลดกำลังทางกลลงมาโดยการลดปริมาณไอน้ำที่ไหลเข้ากังหันเพื่อให้กำลังทางกลด้านเข้าลดลงจนสมดุลกับกำลังไฟฟ้าด้านออก

2) เมื่อความถี่ของระบบน้อยกว่าความถี่ซิงโครนัส เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตไม่เพียงพอกับความต้องการกำลังไฟฟ้า ( $P_m < P_e$ ) ในการควบคุมความถี่ให้กลับมาที่ความถี่ซิงโครนัส จึงจำเป็นต้องเพิ่มกำลังทางกลโดยการเพิ่มปริมาณไอน้ำที่ไหลเข้ากังหันเพื่อให้สมดุลกับกำลังไฟฟ้าด้านออก และทำให้ความถี่ของระบบกลับมาที่ความถี่ซิงโครนัส

#### 2.4 ตัวควบคุม (Controller)

เมื่อนึกถึงคำว่า การควบคุม (Control) อาจกล่าวได้ว่า การควบคุมเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันก็ว่าได้ ตัวอย่างเช่น การขับขี้อัจฉริยะยานยนต์ ผู้ขับขี่จะต้องทำให้รถจักรยานยนต์ทรงตัววิ่งไปตามเส้นทางให้ได้ นั่นคือ เราเป็นผู้ควบคุมรถจักรยานยนต์ รถจักรยานยนต์นั้นถือได้ว่าเป็นเครื่องกลไก ขณะที่ผู้ขับขี่เป็นมนุษย์ หากมองว่ามนุษย์ขับขี้อัจฉริยะยานยนต์เป็นระบบ (Systems) เราเรียกระบบเช่นนี้ว่า ระบบที่มีการเชื่อมโยงระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักร (Man-machine interface systems) กลไกที่เกิดขึ้นเรียกว่า การควบคุมด้วยมนุษย์ (Manual control) หากการควบคุมเกิดขึ้นด้วยกลไก และอุปกรณ์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อการควบคุมดำเนินงานไปก็มิได้มีมนุษย์ไปเกี่ยวข้อง

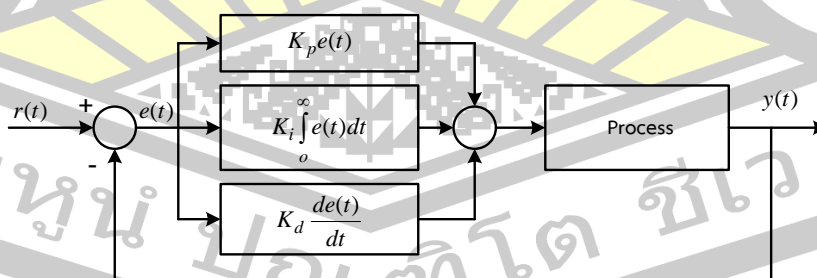


เลยคงเป็นการดำเนินงานโดยอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ของมนุษย์ล้วนๆ เราเรียกการควบคุมเช่นนี้ว่า การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) ตัวอย่างเช่น ตู้เย็น เมื่อตู้เย็นได้เสียบปลั๊กไฟ และปรับระดับความเย็นตามที่ต้องการแล้ว คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ก็จะทำงานไปโดยอัตโนมัติเพื่อรักษา ระดับความเย็นภายในตู้เย็นอย่างคงที่ได้สม่ำเสมอ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการควบคุมเป็นกระบวนการที่ กำกับหรือบังคับให้ระบบที่ต้องการควบคุมดำเนินงานตามที่ต้องการ ซึ่งระบบที่ควบคุมอยู่นั้นจะผลิต เอาท์พุท หรือการตอบสนอง (Response) ตามความประสงค์ของมนุษย์

#### 2.4.1 ตัวควบคุมพีไอดี (Proportional integral derivative controller: PID)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ หรือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) เป็นตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) โดยใช้ค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการ (Process Value; PV) และค่าที่ต้องการ (Set Point; SP) ตัวควบคุมจะพยายาม ลดค่าผิดพลาดให้ เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ซึ่งค่าของตัวแปรของตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามคุณลักษณะของระบบที่ต้องการควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ขึ้นอยู่กับสามตัวแปร คือ อัตราขยายสัดส่วน ( $K_p$ ) อัตราขยายปริพันธ์ ( $K_i$ ) และ อัตราขยายอนุพันธ์ ( $K_d$ ) ค่าอัตราขยายสัดส่วน กำหนดจากผล ของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าอัตราขยายปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความ ผิดพลาดที่ซึ่งพียงผ่านพ้นไป และค่าอัตราขยายอนุพันธ์ กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการ เปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด ผลลัพธ์ที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามค่านี้ จะใช้ในการปรับ กระบวนการ ในทางปฏิบัติบ่อยครั้งการปรับค่าพารามิเตอร์ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ ที่มีความชำนาญ มักจะใช้วิธีทดลองปรับค่า (Trial and error) หรือใช้สูตรสำเร็จ บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ พีไอดี แสดงในภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอดี [60]

โดยการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม สามารถปรับรูปแบบการควบคุม ให้เหมาะสมตามที่ต้องการได้ ซึ่งการตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของ ค่าความผิดพลาด (Error) ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีนี้ ไม่รับประกันว่า จะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุด หรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรภาพที่แน่นอน

การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการ เป็นสำคัญ ดังนั้น ตัวควบคุมแบบพีไอดีบางครั้ง จะถูกเรียกว่า ตัวควบคุมแบบ พี (P Controller) ไอ (I Controller) พีไอ (PI Controller) และ พีดี (PD Controller) ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใด

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีไอดี ในรูปการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) แทนด้วย

$$G_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.6)$$

สัญญาณขาออก (Output) ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ในรูปโดเมนเวลา (Time domain) แทนด้วย

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $u(t)$  คือ สัญญาณควบคุม (Control signal)

$e(t)$  คือ สัญญาณความผิดพลาด (Error signal)

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูง ค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรภาพได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย

ผลอัตราขยายปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงอัตราขยายสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม อัตราขยายปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น)

อัตราขยายอนุพันธ์ จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นอัตราขยายอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูต ที่เกิดจากอัตราขยายปริพันธ์ และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาด และสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรภาพได้ ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ

ผลกระทบต่อผลตอบสนองทางเวลาของระบบ เมื่อมีการปรับแต่งอัตราขยายทั้งสาม แสดงในตาราง 2.3

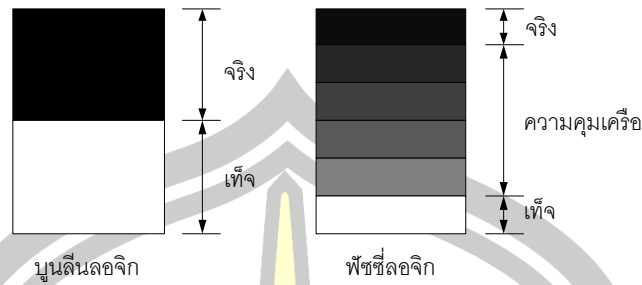
ตาราง 2.3 ผลกระทบต่อผลตอบสนองทางเวลาของระบบ เมื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์อย่างอิสระ

ตัวแปร	เวลารุ่ง (Rise time)	โอเวอร์ชูต (Overshoot)	เวลาสู่สมดุล Settling time	ความผิดพลาดสถานะคง ตัว (Steady state error)	เสถียรภาพ (Stability)
$K_p$	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ลด	ลด
$K_i$	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ	ลด
$K_d$	ลดลง เล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ตามทฤษฎีไม่มีผล	ดีขึ้น ถ้ามีค่า น้อย

#### 2.4.2 ฟัชซีโลจิก (Fuzzy logic)

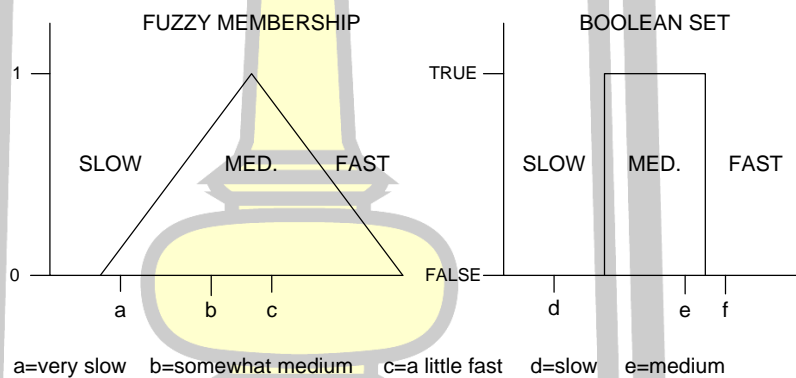
ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือฟัชซีโลจิก (Fuzzy logic) พัฒนาจากฟัชซีเซต (Fuzzy set) โดยเป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณ ซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะ ถูก/ผิด ใช่/ไม่ใช่ ของตรรกศาสตร์แบบฉบับ (Classical logic) ฟัชซีโลจิกนั้นถือเป็นการประยุกต์ใช้งานเพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญต่อปัญหาที่ซับซ้อน ค่าระดับความจริงในตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นมักจะสับสนกับค่าความน่าจะเป็นซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน ค่าระดับความจริงคลุมเครือนั้นใช้ในการระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซต (Set membership) แต่ค่าความน่าจะเป็นนั้นระบุความเป็นไปได้ของสภาพการณ์แต่ละรูปแบบที่อาจจะเกิดขึ้นได้

ฟัชซีโลจิก สามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตด้วยค่าระหว่างศูนย์ถึงหนึ่ง ที่พิเศษกว่าตรรกะแบบเท็จจริง (Boolean logic) ตรงที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริง (1) กับเท็จ (0) เท่านั้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.14 ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองระดับคำพูดที่ว่า "เล็กน้อย" "ค่อนข้าง" หรือ "มาก" โดยใช้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตบางส่วน ฟัชซีโลจิกมีความสัมพันธ์กับฟัชซีเซต และทฤษฎีความเป็นไปได้ ซึ่งคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1965 โดย L.A. Zadeh [61]



ภาพประกอบ 2.14 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟัซซี

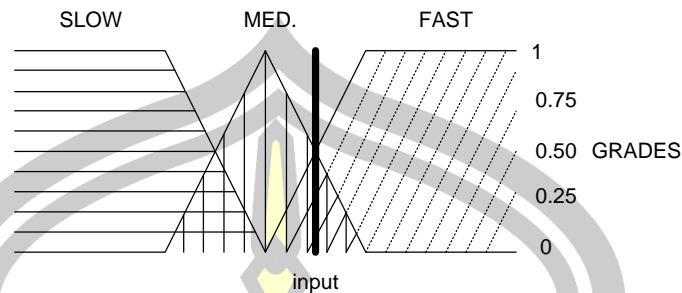
แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับฟัซซีโลจิก ฟัซซีเซตเป็นเซตที่ยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งแตกต่างกับเซตแบบดั้งเดิมที่มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตแค่สองกรณีคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น พิจารณาจากรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงถึงค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต และเซตแบบดั้งเดิม



ภาพประกอบ 2.15 การนิยามความเร็วในรูปแบบของฟัซซีเซต และเซตแบบดั้งเดิม

จากภาพประกอบ 2.15 ด้านซ้ายมือจะเห็นว่าฟัซซีเซตเป็นรูปสามเหลี่ยมทำให้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตที่จุด a, b และ c มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ตรงกันข้ามกับรูปด้านขวามือซึ่งเป็นเซตแบบดั้งเดิมค่าความเป็นสมาชิกของเซตที่จุด d, e และ f มีค่าเพียง 0 หรือ 1 เท่านั้น แต่ถ้าฟัซซีเซตมีการนิยามมากกว่าหนึ่งเซตเพื่อให้ครอบคลุมค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดดังนั้นค่าความเป็นสมาชิกก็จะมีได้หลายค่าดังภาพประกอบ 2.16

## Membership Sets



ภาพประกอบ 2.16 การทับซ้อนกันของฟัซซีเซต

จากภาพประกอบ 2.16 จะพบว่าค่าอินพุตอยู่ในฟัซซีเซต MED และ FAST โดยมีค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต MED เท่ากับ 0.75 และ ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต FAST เท่ากับ 0.25

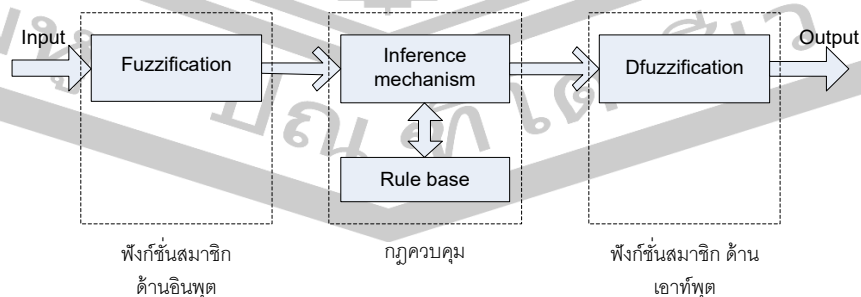
ภาพประกอบ 2.17 แสดงโครงสร้างการทำงานของฟัซซีโลจิก สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นการทำหน้าที่แปลงข้อมูลอินพุตให้อยู่ในรูปตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรฟัซซี ด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุต

ขั้นตอนที่ 2 กลไกอนุมาน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริง และกฎ เพื่อใช้ในการติดตามเหตุผลเหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ปัญหา รวมทั้งกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 3 ฐานความรู้ เป็นส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา

ขั้นตอนที่ 4 ดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) ทำหน้าที่แปลงตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซีที่ได้มาจากกลไกอนุมานให้เป็นเอาท์พุตจริงสำหรับกระบวนการของระบบด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาท์พุต

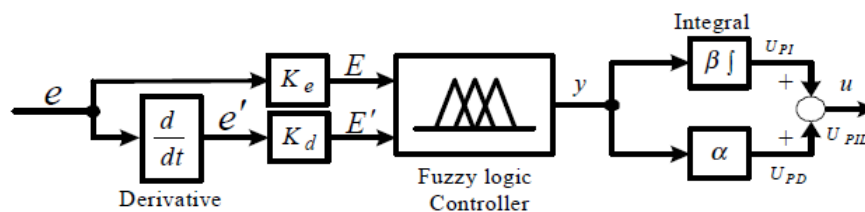


ภาพประกอบ 2.17 โครงสร้างการทำงานของฟัซซีโลจิก

### 2.4.3 ฟัชซีโลจิกพีไอดี (Fuzzy logic PID: FLPID)

โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมพีไอดี เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากออกแบบง่าย ราคาถูก และมีประสิทธิภาพสำหรับระบบที่มีความเป็นเชิงเส้น (Linear system) หรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากนัก อย่างไรก็ตามตัวควบคุมพีไอนั้นไม่ค่อยเหมาะกับระบบที่มีอันดับสูงๆ (High order) ระบบที่มีเวลาหน่วง (Time delay) ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ (High nonlinear system) และระบบที่มีความซับซ้อนสูงๆ [62,63] จนกระทั่งฟัชซีโลจิก (Fuzzy logic) ได้มีการนำเสนอโดย Zadeh [61] และหลังจากที่ Mamdani [64] ได้ทำการประยุกต์ใช้การควบคุมฟัชซีโลจิกเป็นครั้งแรก ทำให้ตัวควบคุมฟัชซีโลจิกนั้นเป็นที่สนใจอย่างมากทั้งในด้านการศึกษาวิจัย และในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากฟัชซีโลจิกสามารถที่จะจัดการกับระบบที่ซับซ้อนและระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ ได้ [65]

เพื่อที่จะให้ตัวควบคุมนั้นยังคงมีคุณลักษณะการทำงานแบบตัวควบคุมพีไอดี และสามารถทำงานกับระบบที่มีความซับซ้อนได้แบบตัวควบคุมฟัชซีโลจิก หลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเอาตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมฟัชซีโลจิกมาทำงานร่วมกัน โดยมีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น ฟัชซีแบบพีไอดี (PID type fuzzy) ฟัชซี-พีไอดี (Fuzzy-PID) หรือ ฟัชซีโลจิกพีไอดี (Fuzzy logic PID : FLPID) [66-67] โดยงานวิจัยนี้จะเรียกว่า ตัวควบคุมฟัชซีโลจิกพีไอดี ที่มีโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบ 2.18 ฟัชซีโลจิกพีไอดีที่นำเสนอนี้มาจากโครงสร้างของฟัชซีโลจิกพีไอ และฟัชซีโลจิกพีดี [65] สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ แพลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม โดยในส่วนของฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม จะเป็นกระบวนการทำงานของตัวควบคุมฟัชซีโลจิก



ภาพประกอบ 2.18 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัชซีโลจิกพีไอดี

เมื่อ

$e$  คือ ค่าอินพุตของตัวควบคุม

$e'$  คือ ค่าอนุพันธ์ของอินพุตของตัวควบคุม

$K_e, K_d, \beta$  และ  $\alpha$  คือ แพลคเตอร์สัดส่วน

$y$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัชซีโลจิก

$U_{PI}$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัชซีโลจิกพีไอ

$U_{PD}$  คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัชซีโลจิกพีดี



$u$  หรือ  $U_{PID}$  คือ เอาท์พุทของตัวควบคุมพีซีแอลจิกพีไอดี

โดยสัญญาณควบคุม  $u$  สามารถหาได้จาก

$$u = \alpha y + \beta \int y dt \quad (2.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และเอาท์พุทของตัวควบคุมพีซีแอลจิกประเภท Product-sum ที่แสดงไว้ใน [62] สามารถที่จะแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$y = A + BE + DE' \quad (2.9)$$

โดยที่  $E = K_e e$  และ  $E' = K_d e'$

จากสมการ (2.8) และ (2.9) สามารถหาเอาท์พุทของตัวควบคุมได้ดังนี้

$$u = \alpha(A + BK_e e + DK_d e') + \beta \int (A + BK_e e + DK_d e') dt$$

$$u = \alpha A + \beta A t + \alpha K_e B e + \alpha K_d D e' + \beta K_d D e' + \beta K_e B \int e dt + \alpha K_d D e' \quad (2.10)$$

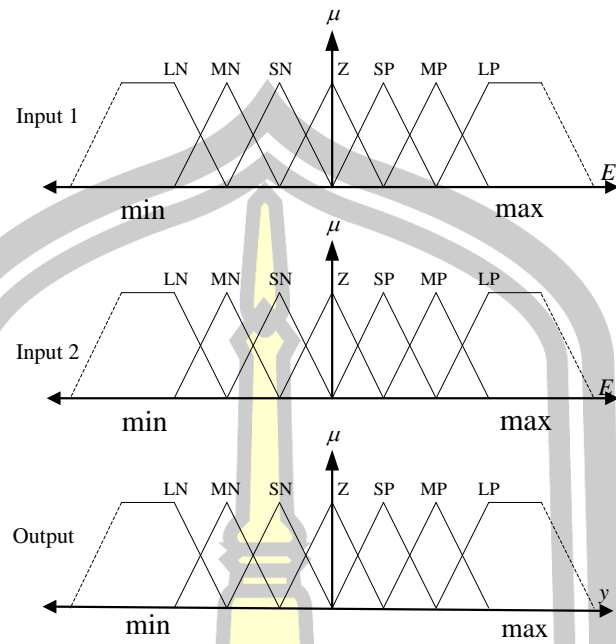
ดังนั้นตัวควบคุมพีซีแอลจิกพีไอดี จากสมการที่ (2.10) สามารถหาค่าประกอบของ อัตราการขยายทั้ง 3 ของตัวควบคุมพีไอดีดังแสดงในสมการที่ (2.7) ได้จาก

$$\text{อัตราการขยายสัดส่วน } (K_p) = \alpha K_e B + \alpha K_d D$$

$$\text{อัตราการขยายอินทิกรัล } (K_i) = \beta K_e B$$

$$\text{อัตราการขยายอนุพันธ์ } (K_d) = \alpha K_d D$$

ควบคุมพีซีแอลจิกที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย 3 ฟังก์ชันสมาชิก ดังแสดงใน ภาพประกอบ 2.19 แยกเป็น 2 อินพุต และ 1 เอาท์พุต แต่ละสมาชิกประกอบไปด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู 2 ตัว และสามเหลี่ยม 3 ตัว และกฎควบคุม ดังแสดงในตาราง 2.4 โดยกฎควบคุมเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างอินพุตทั้งสอง และผลที่ได้เป็นเอาท์พุต โดยกฎควบคุมนี้ได้สร้างจากข้อกำหนดที่ว่า "If input 1 and input 2 then output" ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ เช่น อินพุต 1 แลวที่ 3 คือ SN และ อินพุต 2 คอลัมน์ที่ 4 คือ Z จะได้เอาท์พุต เป็น SP เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.19 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyโลจิก

พหุ ประถม วิทยาลัย ชีวะ



ตาราง 2.4 กฎควบคุมของตัวควบคุมพีซีโลจิก

	$E \cdot$							
	LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP	
LN	LP	LP	LP	MP	MP	SP	Z	
MN	LP	MP	MP	MP	SP	Z	SN	
SN	LP	MP	SP	SP	Z	SN	MN	
$E$	Z	MP	MP	SP	Z	SN	MN	MN
SP	MP	SP	Z	SN	SN	MN	LN	
MP	SP	Z	SN	MN	MN	MN	LN	
LP	Z	SN	MN	MN	LN	LN	LN	

โดยที่

LN คือ สัญญาณขนาดใหญ่ด้านลบ (Large negative)

MN คือ สัญญาณขนาดกลางด้านลบ (Medium negative)

SN คือ สัญญาณขนาดเล็กด้านลบ (Small negative)

Z คือ สัญญาณเป็นศูนย์ (Zero)

LP คือ สัญญาณขนาดใหญ่ด้านบวก (Large positive)

MP คือ สัญญาณขนาดกลางด้านบวก (Medium positive)

SP คือ สัญญาณขนาดเล็กด้านบวก (Small positive)

### 2.4.3 เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ

การเลือกหรือการคำนวณค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) ของระบบ อย่างเช่น เวลาหน่วง (Delay time) ค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) และ ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady State Error) ในทางปฏิบัติอาจจะพิจารณาคุณสมบัติอย่างอื่นเพิ่มเติม อย่างเช่น เวลาพุ่ง (Rise time) เวลาเข้าสู่สมดุล (Settling time) ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum overshoot) นอกจากนี้ อาจจะแสดงในรูปแบบของความถี่ เช่น ช่วงความถี่การทำงาน (Bandwidth) ความถี่รีโซแนนซ์ (Resonant frequency) และ ค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Peak amplitude) เป็นต้น ข้อสรุปของคุณสมบัติต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) คุณสมบัติที่ตำแหน่งสมดุล (Equilibrium specifications)
  - ความมีเสถียรภาพ (Stability)
  - ความผิดพลาดในสภาวะคงตัว
- 2) คุณสมบัติในช่วงการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว (Transient specifications)
  - ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of response)

- รูปแบบของการตอบสนอง อาจจะบอกในรูปของค่าการหน่วง (Degree of dimpling)
- 3) คุณสมบัติที่บอกความไวของระบบ (Sensitivities specifications)
  - ความไวของระบบที่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของระบบ (Sensitivity of parameter variation)
  - ความไวของระบบที่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของระบบไม่ละเอียด (Sensitivity of model inaccuracies)
  - ความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise rejection) ซึ่งอาจจะบอกเป็นช่วงความถี่
- 4) ผลอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (Nonlinear effects)
  - ความมีเสถียรภาพ
  - ความสามารถของอุปกรณ์ควบคุม

วัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบควบคุม คือ การหาค่าอัตราขยายต่างๆ ของตัวควบคุม แล้วคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดของเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้ เพื่อให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะที่ดีที่สุด เกณฑ์ดังกล่าวนิยมใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด (Optimal control) เรียกเกณฑ์เหล่านี้ว่า เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะ (Performance index criteria) ซึ่งจะเป็นดัชนีชี้วัดว่า ระบบที่ต้องการควบคุมทำงานอย่างไรตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ เช่น ถ้าต้องการควบคุมการทำงานระบบให้มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด ระหว่างที่ทำการควบคุม ดัชนีสมรรถนะที่กำหนดในการออกแบบ ต้องเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานของระบบนั้น หรือ ถ้าต้องการควบคุมการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยใช้เวลาน้อยที่สุดในการเคลื่อนที่ ดัชนีสมรรถนะที่กำหนด ต้องเป็นระยะเวลาที่ต้องการขับเคลื่อนระบบจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ค่าดัชนีสมรรถนะเหล่านี้บางครั้ง เรียกว่า ฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) ดังนั้น การออกแบบระบบควบคุม เป็นหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุม เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมไปควบคุมระบบ และสัญญาณเข้าออกของระบบมีสมรรถนะที่ดีที่สุด ซึ่งดัชนีสมรรถนะอาจจะมีค่าสูงที่สุดหรือน้อยที่สุด แล้วแต่กรณี เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะที่นิยมใช้มีอยู่หลายแบบ ได้แก่

- 1) ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ (Integral Absolute Error; IAE) ดังสมการ

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.11)$$

- 2) ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time multiplied Absolute Error; ITAE) ดังสมการ

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.12)$$

- 3) ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (Integral Square Error; ISE) ดังสมการ

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2.13)$$

4) ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสองคูณด้วยเวลา (Integral Time multiplied Square Error; ITSE) ดังสมการ

$$J = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (2.14)$$

ถ้าสัญญาณค่าความผิดพลาด  $e(t)$  ไม่เป็นศูนย์ เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  ค่าดัชนีสมรรถนะเหล่านี้ จะมีค่าสูง หรือเป็นค่าอนันต์ ทำให้เป้าหมายไม่เป็นจริง เป้าหมายของการออกแบบ คือต้องการให้ค่าดัชนีมีค่าน้อยที่สุด หรือค่า  $e(t)$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไป ในทางปฏิบัติต้องกำหนดขอบเขตของเวลา เพื่อให้เป้าหมายหรือค่าดัชนีเป็นความจริง ดังนั้นขอบเขตของเวลาในการปริพันธ์ต้องเปลี่ยนจาก  $\infty$  เป็นค่า เวลาที่กำหนด ( $t_f$ )

ค่าเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ (IAE) และ ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (ISE) ผู้ออกแบบระบบควบคุมโดยมากจะสนใจเฉพาะขนาดของสัญญาณความผิดพลาด โดยไม่สนใจเครื่องหมายว่าจะเป็นบวกหรือลบ และไม่ขึ้นกับเวลา ทำให้ผลตอบสนองที่ได้มีค่าโอเวอร์ชูตต่ำ แต่จะได้เวลาเข้าสู่สมดุลนาน อีกทั้งค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวยังมีค่าสูง ส่วนตัวดัชนีปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) และ ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสองคูณด้วยเวลา นั้นจะมีผู้นิยมใช้มากกว่า เนื่องจากว่ามีตัวเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย กล่าวคือ เมื่อเวลาเริ่มต้น ค่าตัว  $t$  จะมีค่าน้อย และเมื่อเวลาผ่านไปค่า  $t$  นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นั้นหมายความว่า เมื่อเวลาผ่านไปสัญญาณความผิดพลาดจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้น ตัวควบคุมที่ออกแบบจะต้องพยายามลดค่าสัญญาณความผิดพลาดนี้ลงเรื่อยๆ เพื่อให้ค่าดัชนีที่กำหนดมีค่าน้อยที่สุด การใช้เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะทั้งสองแบบนี้ จะช่วยลดการแกว่งของระบบ ทำให้ระบบควบคุมมีค่าโอเวอร์ชูตต่ำ จะได้เวลาเข้าสู่สมดุลไม่นาน อีกทั้งค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวยังมีค่าน้อย แต่ยังไม่รับประกันถึงความมีเสถียรภาพ

## 2.5 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฮิวริสติก [68]

หลักการพื้นฐานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหลายวิธี มีพื้นฐานมาจากการค้นหาคำตอบบริเวณใกล้เคียง (Neighborhood search) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การค้นหาเฉพาะถิ่น (Local search) โดยอาศัยการค้นหาคำตอบที่ดีจากการเคลื่อนที่ตามคำตอบบริเวณใกล้เคียง ขบวนการนี้จะทำซ้ำๆ จนกระทั่งเจอคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น (Local minimum) สำหรับปัญหาที่ยาก อย่างเช่น Combinatorial optimization และ Global optimization ต้องอาศัยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฮิวริสติก โดยคำว่าฮิวริสติก (Heuristic) มาจากคำว่า “Heuriskein” ในภาษากรีก หมายถึง การหา หรือ การค้นหา ดังนั้น วิธีฮิวริสติก เป็นวิธีการค้นหาคำตอบใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (Near-optimal) ภายใต้อาคารคำนวณที่สมเหตุสมผล โดยไม่รับประกันว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่

เหมาะสมที่สุด โดยวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฮิวริสติกสมัยใหม่ (Modern heuristic techniques) มีพื้นฐานมาจากพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ วิธีพันธุกรรมยีนต์ (Genetic Algorithm; GA) วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) วิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm; BA) เป็นต้น

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอหลักการพื้นฐานของวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฮิวริสติกสมัยใหม่ ได้แก่ วิธีพันธุกรรมยีนต์ วิธีกลุ่มอนุภาค และวิธีผึ้งผึ้ง มีหลักการพื้นฐานพอสรุปได้ดังนี้

### 2.5.1 วิธีพันธุกรรมยีนต์ (Genetic Algorithm; GA)

John Holland ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีพันธุกรรมยีนต์ (Genetic algorithm) ในปี ค.ศ. 1975 ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีทั้งคุณลักษณะที่ดีและไม่ดี ซึ่งคุณลักษณะที่ดีก็ย่อมมีโอกาสอยู่รอดและจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดพันธุกรรมไปยังรุ่นลูกหลานได้มากกว่า เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตรุ่นใหม่มีคุณลักษณะที่ดีขึ้น สำหรับวิธีพันธุกรรมยีนต์เมื่อนำมาใช้กับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด (Optimization problem) อาศัยหลักการถ่ายทอดทางพันธุกรรม เพื่อให้ได้คำตอบในรุ่น (Generation) ต่อไป ให้ค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีขึ้น

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับแล้วว่า วิธีพันธุกรรมยีนต์เป็นวิธีที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งได้ประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาในสาขาต่างๆ มากมาย

#### 2.5.1.1 หลักการพื้นฐานของวิธีพันธุกรรมยีนต์

วิธีพันธุกรรมยีนต์จะนำเสนอข้อมูลหรือคำตอบในรูปของ โครโมโซม (Chromosome) ในแต่ละโครโมโซม จะประกอบด้วยบิต (bit) เรียกว่า ยีนต์ (Gene) โดยจะทำการคัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมจากกลุ่มของโครโมโซมทั้งหมด และนำโครโมโซมเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการคัดเลือกที่เลียนแบบกระบวนการคัดเลือกทางพันธุกรรม เพื่อหาโครโมโซมที่มีความเหมาะสมในการอยู่รอด โดยใช้ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ที่สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธีพันธุกรรมยีนต์ แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.20 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** สร้างประชากรเริ่มต้นในรูปของโครโมโซม โดยการสุ่มเลือกจากประชากรต้นแบบ

**ขั้นตอนที่ 2** หาค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของแต่ละโครโมโซม

**ขั้นตอนที่ 3** การคัดเลือก (Re-production) อ้างอิงจากค่าฟังก์ชันความเหมาะสม โดยพิจารณาว่าโครโมโซมใดมีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดี จะถูกกำหนดน้ำหนักความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกแต่ละครั้งสูง

**ขั้นตอนที่ 4** การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) ทำโดยการกำหนดค่าสุ่มให้แก่โครโมโซมที่ถูกเลือกมาทั้งหมด โครโมโซมใดที่มีค่าสุ่มน้อยกว่าความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์ จะถูกนำไปจับคู่เป็นโครโมโซมพ่อแม่ แล้วมีการแลกเปลี่ยนบางส่วนของโครโมโซมทั้งสองเพื่อสร้างโครโมโซมรุ่นลูก

**ขั้นตอนที่ 5** การกลายพันธุ์ (Mutation) ทำโดยการเปลี่ยนค่าของโครโมโซมบางตำแหน่ง เป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ ตามอัตราความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์

**ขั้นตอนที่ 6** แทนที่ประชากร (Replacement) ประชากรรุ่นใหม่ เป็นชุดโครโมโซมลูกที่เกิดจากขั้นตอนวิวัฒนาการต่าง ๆ ข้างต้น จะถูกนำไปแทนที่ประชากรรุ่นก่อนหน้า และถูกนำไปเข้ากระบวนการวิวัฒนาการใหม่ โดยกระบวนการต่างๆ จะถูกปฏิบัติซ้ำ ๆ จนกระทั่งถึงรุ่นที่ต้องการ

**ขั้นตอนที่ 7** เพิ่มจำนวนของรุ่น ( $gen = gen + 1$ ) และตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไขการหยุดให้หยุด ถ้าไม่ย้อนกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2

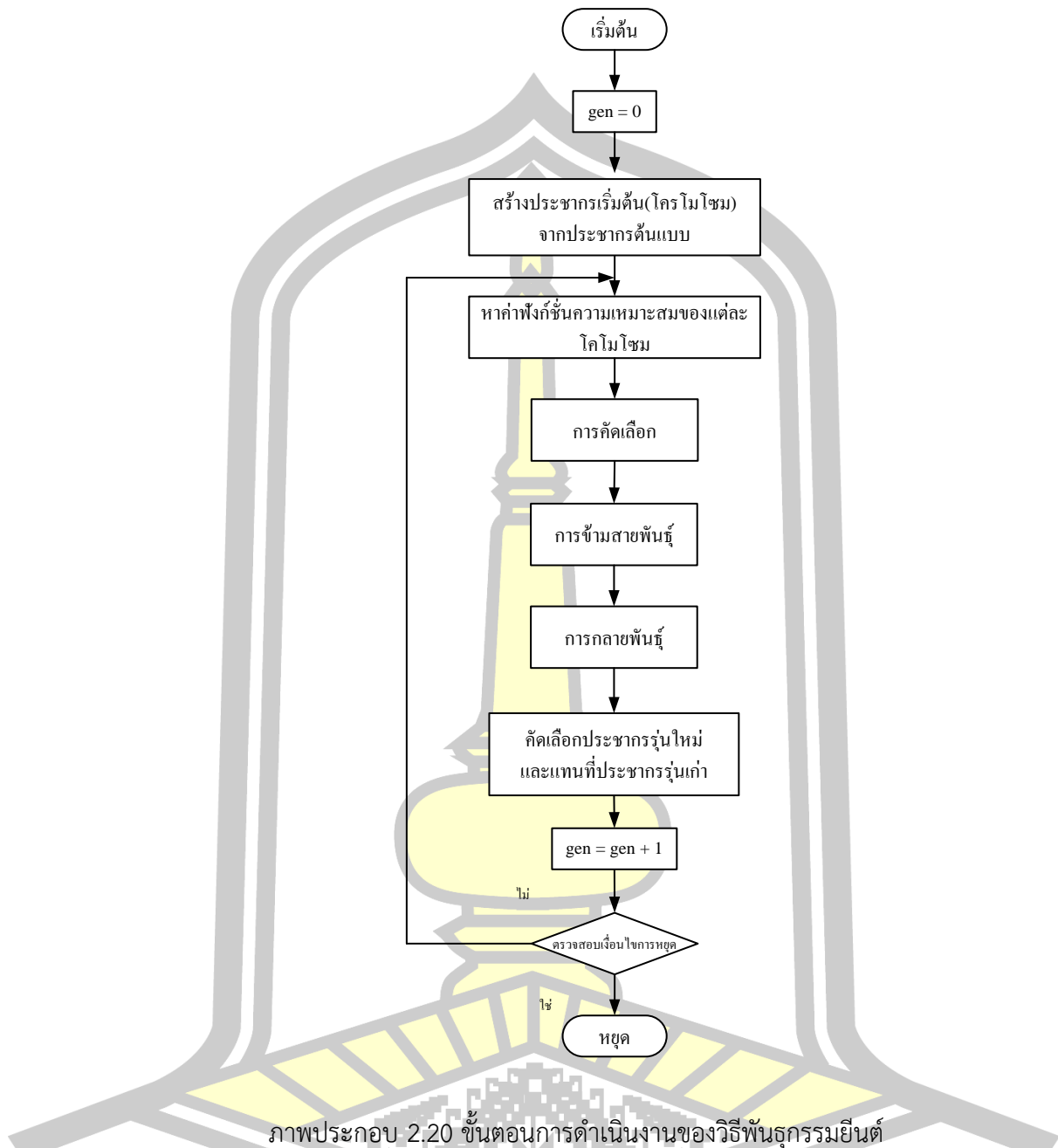
จากขั้นตอนการทำงานของวิธีพันธุกรรมยีนต์ สามารถเขียนเป็น Pseudo code ได้ ดังนี้

---

1. Initialization
  - Generate initial population
  - Set generation = 0
  - Define termination conditions
2. Evaluate fitness function
  - Find the fitness value of initial population
3. Re-production
  - Ranking the chromosomes base on fitness value
4. Crossover
  - Crossover between chromosomes
5. Mutation
  - Mutate the chromosomes
6. Replacement
  - Replace the new chromosome to the old chromosome
7. Termination
  - If generation < maximum generation
    - Then
      - Go to step 3
    - Else
      - generation = generation + 1
  - End

---

End



ภาพประกอบ 2.20 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีพันธุกรรมยีนต์

### 2.5.1.2 องค์ประกอบของวิธีพันธุกรรมยีนต์

องค์ประกอบสำคัญของวิธีพันธุกรรมยีนต์ มีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

#### 1) รูปแบบโครโมโซม (Chromosome Encoding)

การถอดรหัส หรือการได้มาของโครโมโซม เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก ก่อนที่จะเริ่มแก้ปัญหาโดยใช้วิธีพันธุกรรมยีนต์ ในการถอดรหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับปัญหานั้นๆ ดังนั้นรูปแบบของโครโมโซมจึงมีความแตกต่างกันออกไปตามแต่ปัญหานั้นๆ ที่นิยมใช้จะแสดงใน



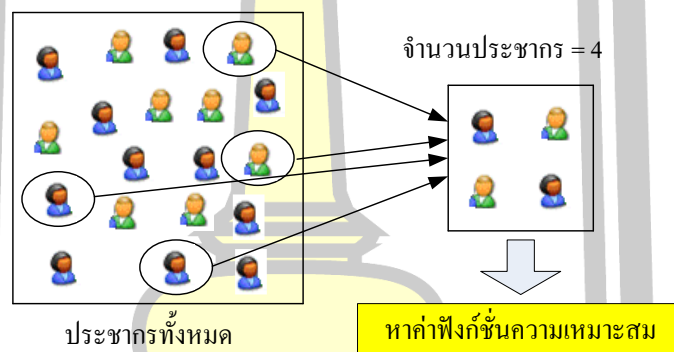
รูปแบบเลขฐานสอง (Binary) โดยแต่ละตำแหน่งของยีนดีในโครโมโซม จะเป็นค่าบิต มีค่า เป็น 0 หรือ 1 ตัวอย่าง เช่น

โครโมโซม A: 1 0 0 0 1 1 1 0 0

โครโมโซม B: 1 1 0 0 1 0 0 0 1

## 2) ประชากรเริ่มต้น (Initial Population)

เป็นการดำเนินการอันดับแรกก่อนที่จะเข้ากระบวนการของวิธีพันธุกรรมยีนดี ประชากรเริ่มต้นนี้ได้มาจากการสุ่มเลือก (Random) จากประชากรทั้งหมด ดังภาพประกอบ 2.21 ในการสุ่มเลือกต้องให้ได้จำนวนประชากรเริ่มต้นตามที่กำหนดไว้ โดยที่ยังไม่มีการพิจารณาค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม



ภาพประกอบ 2.21 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้น จำนวน 4 โครโมโซม

## 3) ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function)

โครโมโซมทุกตัวจะต้องมีค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาว่าสมควรนำไปสืบสายพันธุ์ในรุ่นต่อไปหรือไม่ ดังนั้น ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม เป็นตัวที่ใช้ในการประเมินโครโมโซมนั้น มีความเหมาะสม หรือสามารถใช้เป็นคำตอบของปัญหาได้ดีเพียงใด ตัวอย่างของฟังก์ชันความเหมาะสม เช่น

ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม = จำนวนของบิตที่มีค่าเป็น 1 ทั้งหมดในโครโมโซม

โครโมโซม A: 1 0 0 0 1 1 1 0 0 ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของโครโมโซม A คือ 4

โครโมโซม B: 1 1 0 1 1 1 0 0 1 ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม ของโครโมโซม B คือ 6

## 4) การดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operator)

การดำเนินการทางพันธุกรรม เป็นหัวใจสำคัญของวิธีพันธุกรรมยีนดี ซึ่งมีกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

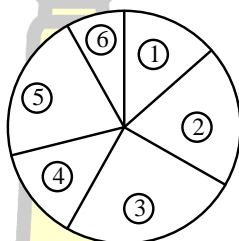
(1) การคัดเลือก (Selection)



ในการคัดเลือกโครโมโซม เพื่อที่จะนำมาเป็นพ่อแม่ (Parent) ในการสืบสายพันธุ์ ทำให้เกิดปัญหาว่าจะอย่างไรให้การคัดเลือกโครโมโซมเป็นที่น่าพอใจ เพื่อที่จะเกิดการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต จึงทำให้เกิดรูปแบบมากมายในการคัดเลือกโครโมโซมที่น่าพอใจที่สุดเพื่อนำไปสืบสายพันธุ์ เช่น การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel) แบบจัดลำดับ (Ranking) และ แบบอีลิทิสต์ (elitist) การคัดเลือกแต่ละวิธี มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### (1.1) การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต

โครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีย่อมมีโอกาสถูกคัดเลือกมากกว่า อธิบายได้จากภาพประกอบที่ 2.22 แสดงวงล้อเสี่ยงโชค โดยขนาดพื้นที่ของวงล้อเสี่ยงโชค คือสัดส่วนของค่าฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่มีค่ามากจะมีขนาดพื้นที่มากตามไปด้วย จึงมีโอกาสมากที่จะถูกคัดเลือกมาก



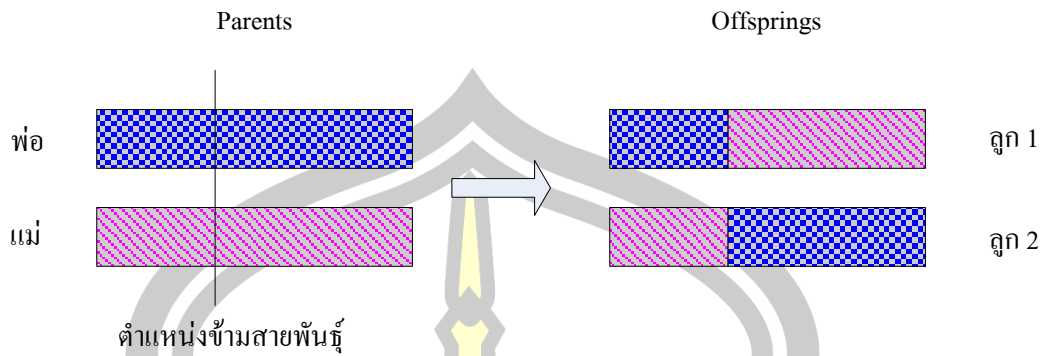
ภาพประกอบ 2.22 แสดงสัดส่วนของค่าฟังก์ชันความเหมาะสมในวงล้อรูเล็ต

(1.2) การคัดเลือกแบบจัดลำดับ เป็นการคัดเลือกโครโมโซมโดยเรียงลำดับจากค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดจากมากไปหาน้อย

(1.3) การคัดเลือกแบบอีลิทิสต์ เป็นการคัดเลือกโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดไว้ก่อน ส่วนโครโมโซมที่เหลือจะใช้วิธีการคัดเลือกแบบอื่นๆ

#### (2) การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)

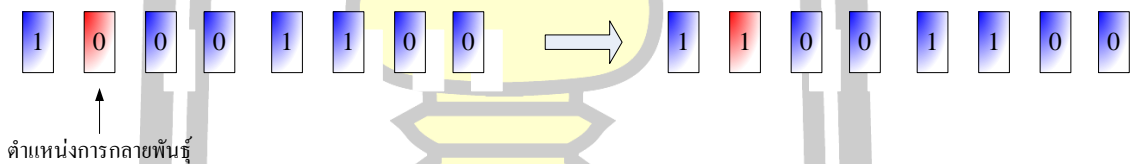
เป็นกระบวนการที่สำคัญของวิวัฒนาการยีนส์ ซึ่งเมื่อเกิดการข้ามสายพันธุ์ขึ้น ในทางพันธุศาสตร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายขึ้น ซึ่งการข้ามสายพันธุ์จะต้องอาศัยกระบวนการวิวัฒนาการที่เป็นเวลานาน ขั้นตอนในการข้ามสายพันธุ์ ทำได้โดยนำ 2 โครโมโซม (Parent) มาผสมพันธุกรรมกัน เพื่อให้กำเนิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการสลับตำแหน่งของการข้ามสายพันธุ์ และ ทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งของพ่อ และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งของแม่มารวมกันเป็นลูกตัวที่ 1 จากนั้น ทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งของแม่ และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งของพ่อ มารวมกันเป็นลูกตัวที่ 2 ดังภาพประกอบ 2.23



ภาพประกอบ 2.23 การข้ามสายพันธุ์

(3) การกลายพันธุ์ (Mutation)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากการข้ามสายพันธุ์เสร็จสิ้น นั้นหมายความว่าได้รับลูกที่เกิดจากผสมพันธุ์จากรุ่นพ่อแม่แล้ว จึงนำรุ่นลูกมาดำเนินการกลายพันธุ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือทำให้เกิดลักษณะใหม่ ๆ เกิดขึ้น หรือเกิดการวิวัฒนาการ ขึ้นตอน ในการกลายพันธุ์ ทำได้โดยการสุ่มตำแหน่งของการกลายพันธุ์ แล้วเปลี่ยนแปลงค่า ณ ตำแหน่งที่สุ่ม นั้น ถ้าโครโมโซมอยู่ในรูปแบบเลขฐานสอง จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 1 เป็น 0 หรือ จาก 0 เป็น 1 ดังภาพประกอบ 2.24



ภาพประกอบ 2.24 การกลายพันธุ์

2.5.2 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)

Kennedy และ Eberhart ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีอนุภาคเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1995 ได้แรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ เช่น ผีเสื้อกลางคืน หรือ ผีเสื้อ ซึ่งวิธีกลุ่มอนุภาคนี้เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสม อาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร (Population-based) แต่ละตัวดำเนินการ เรียกว่า “อนุภาค (Particle)” ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ อนุภาคนี้จะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม อยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา ระหว่างแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่ง โดยอาศัยการอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่เคลื่อนที่ผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งอาจจะค้นพบด้วยตัวเอง หรือ อนุภาคใกล้เคียง

ระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธีกุ่มอนุภาค ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในภาพประกอบ 2.25 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** กำหนดขอบเขต ต่ำสุด สูงสุด  $X_{Lower}, X_{Upper}$  ของพารามิเตอร์ทุกตัว และให้ทำการสุ่มหาค่าเริ่มต้นของอนุภาคแต่ละตัว ( $X^t$ ), สุ่มหาแต่ละมิติ, สุ่มหาความเร็วเริ่มต้น ( $V^t$ ), จากนั้นกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นของตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหาแล้วของอนุภาคแต่ละตัว ( $pbest$ ) และกำหนดอนุภาคที่ค้นหาค่าตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด ( $gbest$ ) ซึ่งค่าตอบเหล่านั้นนี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคืออยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ

**ขั้นตอนที่ 2** หาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอนุภาค

**ขั้นตอนที่ 3** ทำการประเมินเปรียบเทียบค่าของอนุภาคแต่ละตัวแล้วกำหนดให้เป็น  $pbest$  จากนั้นเลือกค่าที่ดีที่สุดจากค่า  $pbest$  โดยกำหนดให้เป็น  $gbest$

**ขั้นตอนที่ 4** ปรับเปลี่ยนความเร็วใหม่ของอนุภาคของแต่ละตัว โดยใช้สมการ (2.15)

**ขั้นตอนที่ 5** เมื่อได้ความเร็วใหม่จากขั้นตอนที่ 4 ให้ตรวจสอบคือ ถ้า

$$v_{id}^{t+1} > V_d^{\max}, \text{ ให้ } v_{id}^{t+1} = V_d^{\max} \text{ และถ้า } v_{id}^{t+1} < V_d^{\min}, \text{ ให้ } v_{id}^{t+1} = V_d^{\min}$$

**ขั้นตอนที่ 6** ปรับเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ของอนุภาคของแต่ละตัว โดยใช้สมการ (2.16) จากนั้นให้ตรวจสอบคือ ถ้า  $x_{id}^{t+1} > P_d^{\max}$ , ให้  $x_{id}^{t+1} = P_d^{\max}$  และถ้า  $x_{id}^{t+1} < P_d^{\min}$ , ให้  $x_{id}^{t+1} = P_d^{\min}$

**ขั้นตอนที่ 7** ตรวจสอบตำแหน่งใหม่ของอนุภาคจะต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ แต่ถ้าไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับก็ให้อนุภาคนั้นอยู่ตำแหน่งเดิม

**ขั้นตอนที่ 8** ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าถึงค่าสูงสุดแล้วให้หยุดทำงาน ถ้ายังไม่ถึงค่าสูงสุดให้ย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2

การเปลี่ยนความเร็ว และตำแหน่งของแต่ละอนุภาค สามารถคำนวณได้โดยใช้ความเร็วปัจจุบันและระยะทางระหว่าง  $pbest_{id}$  ถึง  $gbest_d$  ดังสมการ 2.15 และ 2.16

$$v_{id}^{t+1} = \omega \cdot v_{id}^t + c_1 * rand() * (pbest_{id} - x_{id}^t) + c_2 * rand() * (gbest_d - x_{id}^t) \quad (2.15)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2.16)$$

องค์ประกอบที่สำคัญของวิธีกุ่มอนุภาคและการกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของระเบียบวิธีอนุภาค คือ

$d$  คือ มิติ (Dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา

$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  แทน ตำแหน่งของอนุภาคที่  $i$

$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$  แทน อัตราความเร็วสำหรับอนุภาคที่  $i$

$pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{id})$  แทน ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของ

อนุภาคที่  $i$

$gbest_d$  แทน อนุภาคที่ค้นหาค่าตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด

$m$  คือ จำนวนอนุภาค

$n$  คือ จำนวนอนุภาคในกลุ่ม

$t$  คือ ครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration)

$\omega$  คือ ตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย (Inertial Weight Factor)

$c_1, c_2$  คือ ค่าคงที่ของอัตราเร่ง

$rand()$  คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง  $[0,1]$

$v_i^t$  คือ ความเร็วของอนุภาคที่  $i$  ในรอบที่  $t$  โดยที่  $V_d^{\min} \leq v_{id}^t \leq V_d^{\max}$

ค่า  $V^{\max}$  ใช้ในการหาค่าความละเอียดของคำตอบ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้อนุภาคบินผ่านคำตอบที่ดีที่สุดไป แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปก็อาจจะค้นหาไม่ครอบคลุมทำให้ได้คำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นจากการทดสอบมาแล้ว ควรจะกำหนดค่า  $V^{\max}$  ประมาณ 10–20 % ของช่วงการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรแต่ละตัว

ค่าคงที่  $c_1$  และ  $c_2$  แทนน้ำหนักของความเร็วแบบสุ่มของแต่ละอนุภาคผ่านตำแหน่ง  $pbest$  และ  $gbest$  ถ้ามีค่าน้อยเกินไป ในกรณีที่อนุภาคอยู่ห่างจากตำแหน่งเป้าหมายก็อาจจะหมดแรงก่อนถึงเป้าหมาย แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปก็อาจจะบินข้ามเป้าหมายไป ดังนั้นค่า  $c_1$  และ  $c_2$  จากการทดสอบมาแล้ว ควรอยู่ระหว่าง 1.4–2.0 การเลือกค่า  $\omega$  ที่เหมาะสมดังสมการที่ 2.17

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (2.17)$$

ค่าที่เหมาะสม คือ  $\omega_{\max} = 0.9$  และ  $\omega_{\min} = 0.4$

จากขั้นตอนการทำงานของวิธีกลุ่มอนุภาค สามารถเขียนเป็น Pseudo code ได้ ดังนี้

### 1. Initialization of positions of agents

Set Iter = 0 /\* Iter: cycle counter \*/

For every combination (x) /\*Best position/

Random generate initial solutions

End

Start time

2. Initialization of velocities of agents

For every combination (m,n) /\* velocity\*/

Calculate velocity ( $v_i$ )

End

3. Function to be minimized.

For  $i=1$  to  $m$

check\_constraint( $x(:,i,1)$ )

If con = 1,

Calculate Cost ( $x(:,i,1)$ )

Else

Set the function to high value

End

End

Evaluate objective function

4. Matrix composed of gbest vector

For  $p=1$  to  $m$

Calculate Gbest  $G(:,p,1)$  and Calculate Fbest

For  $i=1$  to  $m$

Calculate  $pbest(i+1)=x(:,i,1)$ ;

End

End

Calculate velocities ( $[:,:,1]$ )

While (iter < itmax)

Set iter = iter+1;

5. Calculation of new positions

For  $i=1$  to  $m$

check\_constraint( $x(:,i,1+1)$ )

If con = New,

Calculate Cost ( $x(:,i,1+1)$ )

Else

Set the function to high value

End

**End**

Evaluate objective function

6. Matrix composed of gbest+1 vector

**For** p=1 to m

Calculate Gbest  $G(:,p,1+1)$  and Calculate Fbest

**For** i=1 to m

Calculate  $pbest(i,1+1)=x(:,i,1+1)$

**End**

**End**

7. Calculate velocities  $(:,:,1+1)$

**For** t=1 to m,

check\_constraint( $x(:,t,j+1)$ )

**If** con = 0

Set Constraint  $x(:,t,j)$

**End**

**End**

Check error =  $100*abs(cbest-Fmin)/Fmin$ ;

**If** error  $\leq 0.05$ ,

Set find\_time = stop\_time - start\_time;

**End**

8. Termination

**if** count\_time  $\geq 300$  /\*Set long time 300S/ and iter=itmax

**Then**

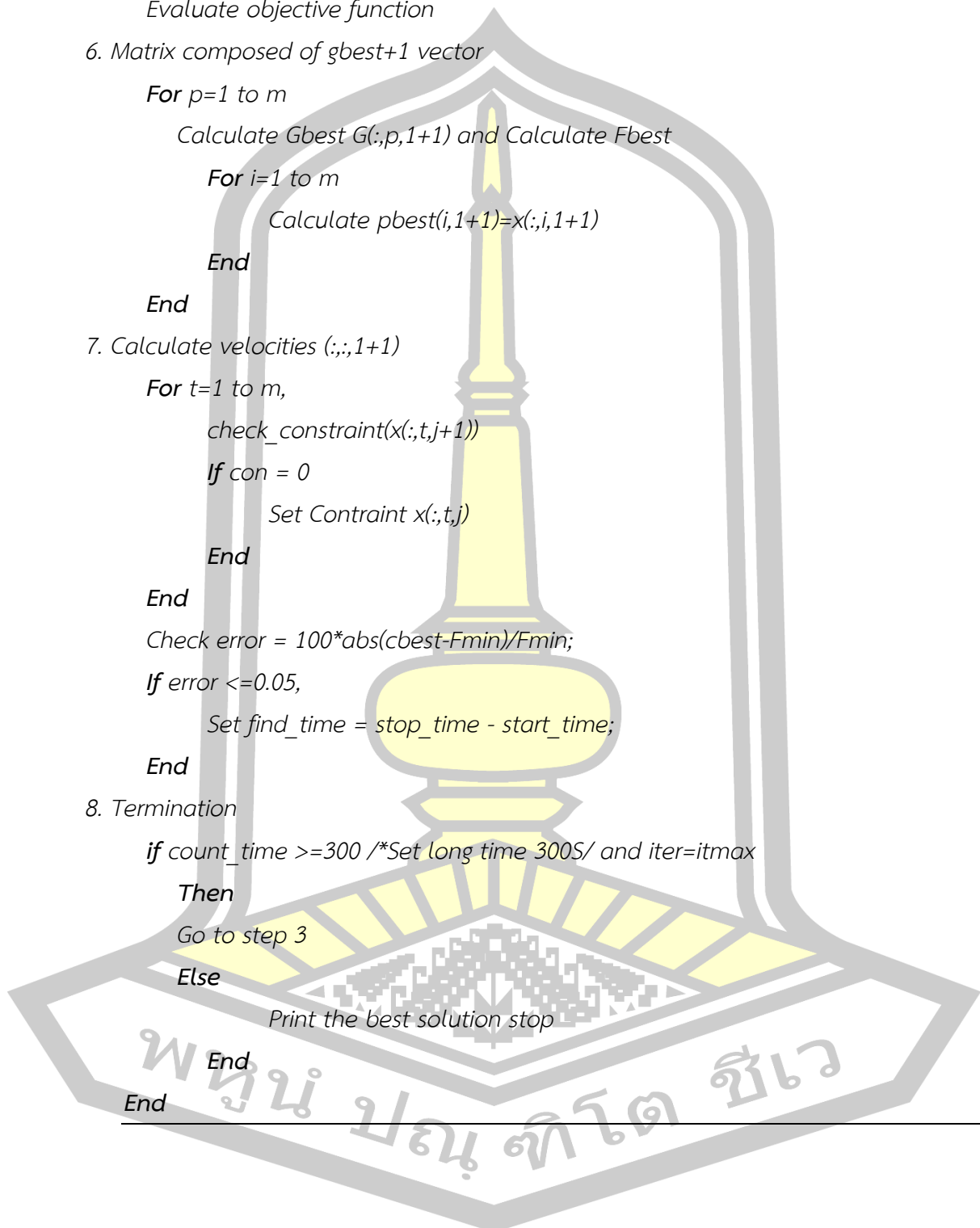
Go to step 3

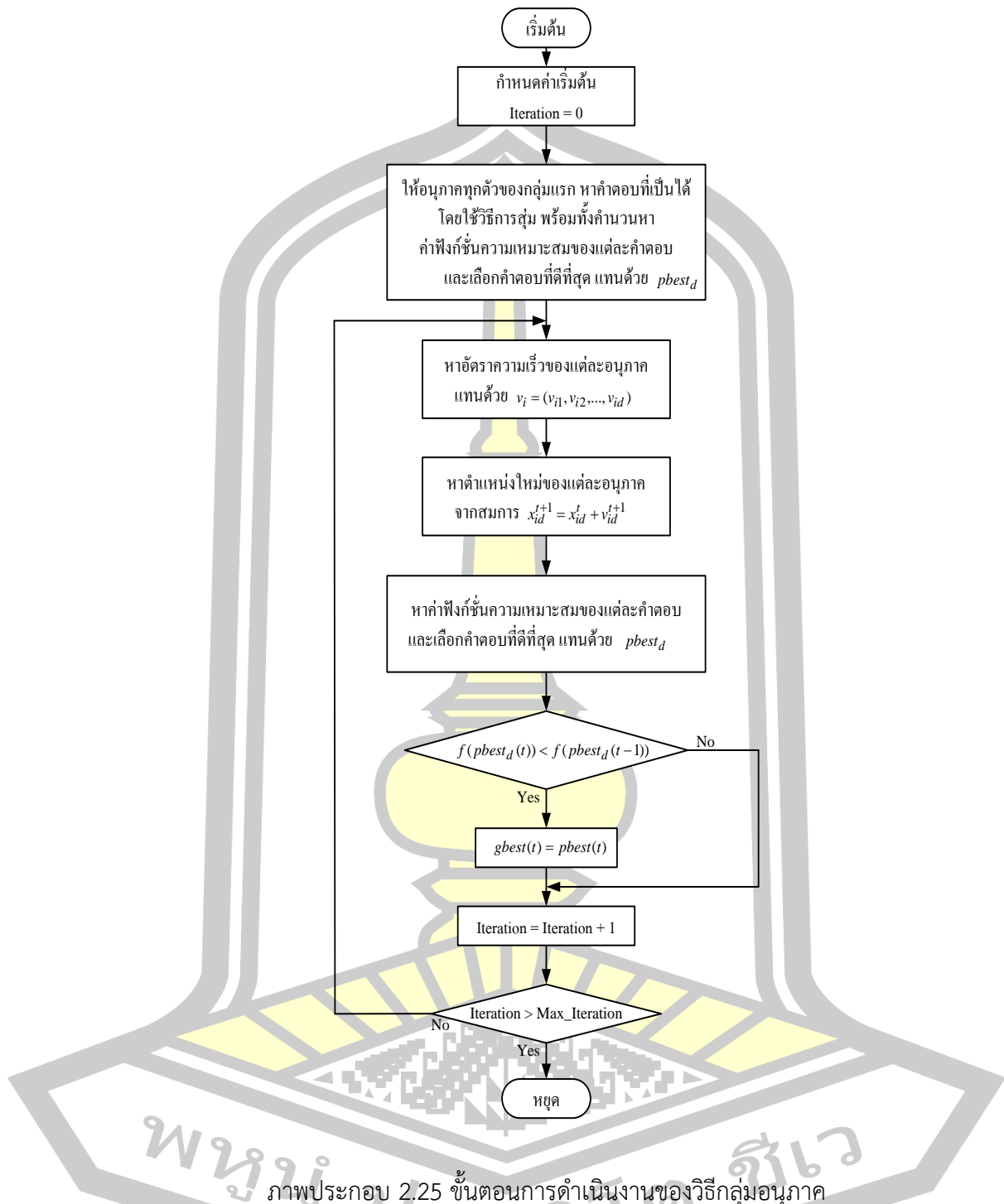
**Else**

Print the best solution stop

**End**

**End**





### 2.5.3 วิถีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm; BA)

วิถีผึ้งผึ้ง เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่เลียนแบบพฤติกรรมกรหาหน้าหวานของผึ้ง ดำเนินการผ่านตัวดำเนินการ คือ ผึ้ง โดยแบ่งชนิดของผึ้ง ออกเป็น 2 ประเภท คือ ผึ้งสอดแนม (Scout bee) และ ผึ้งงาน (Employee bee) เพื่อค้นหาคำตอบ โดยสมมุติว่าคำตอบคือ แหล่งน้ำหวาน หน้าที่ของผึ้งสอดแนม คือ ค้นหาแหล่งน้ำหวานแบบสุ่มในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้



(Search space) เมื่อผึ้งสอดแนม ค้นหาคำตอบได้ ก็จะบินกลับมาที่รังผึ้ง เพื่อสื่อสารกับผึ้งตัวอื่นๆ ภายในรังผึ้ง การสื่อสารของผึ้งจะใช้วิธีการเด่นลักษณะต่างๆ เพื่อบอกปริมาณน้ำหวาน ทิศทางของแหล่งน้ำหวาน จากนั้น ผึ้งงานก็จะไปทำหน้าที่ขนน้ำหวานในแหล่งน้ำหวาน โดยจำนวนผึ้งงานจะแปรตามปริมาณน้ำหวานและระยะทาง ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้ง แสดงดังภาพประกอบ 2.26 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n$  ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC = 0$

**ขั้นตอนที่ 2** ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับจากคำตอบดีมากที่สุดไปหาคำตอบที่น้อยที่สุด

**ขั้นตอนที่ 3** เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี  $m$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 4** คัดแยกคำตอบ  $m = 5$  คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด  $e$  คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ตรงลงมา  $m - e$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 5** กำหนดขอบเขตในการค้นหาบริเวณรอบๆ  $e$  คำตอบ และ  $m - e$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 6** ให้ผึ้งงานจำนวน  $n_{ep}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $e$  คำตอบ และผึ้งงานจำนวน  $n_{sp}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $m - e$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 7** ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

**ขั้นตอนที่ 8** ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ

**ขั้นตอนที่ 9** กำหนดให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n - m$  ตัว ค้นหาคำตอบใหม่ แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนได้คำตอบที่สูงที่สุด

จากขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงผึ้ง สามารถเขียนเป็น Pseudo code ได้ ดังนี้

1. Initialization of population of  $N$  scout bees

Set Iter = 0 /\* Iter: cycle counter \*/

For every combination (x)

Random generate initial solutions

End

Start time

2. Evaluate the fitness function of the population

For  $i=1$  to  $N$

check\_constraint(x(:,i))

```

    If con = 1
        Calculate  $F(i) = \text{find\_cost}(x(:,i))$ 
    Else
        Set the function to high value
    End
End
3. Select  $M$  site for neighbourhood search
    Set site neighbourhood ( $x_r, Fr$ )
    For  $k = 1$  to  $M$ 
        Chose  $x_r(:,k) = x(:,R(k))$ 
        Chose  $Fr(k) = Fb(k)$ 
    End
4. Determine the size of neighbourhood (Patch size,  $ngh$ )
    Set boundary of neighbourhood
     $xep = x_r(:,1:E)$ ;
     $xsp = x_r(:,E+1:M)$ 
5. Recruit bees for selected sites
    Set step size of each neighbourhood
    For  $i = 1$  to  $E$ 
        Generate neighbourhood solutions
    End
    For  $j = 1:M-E$ 
        Generate neighbourhood solutions
    End
6. Evaluate the fitness function of the neighbourhood
    For  $i=1$  to  $E$ 
        For  $j=1:nep+1$ ;
            Check constraint of  $(xnep(:,j,i))$ 
            If con = 1
                find cost  $(xnep(:,j,i))$ 
            Else
                Set  $Fm(j,i)$  to high value
            End
        End
    End

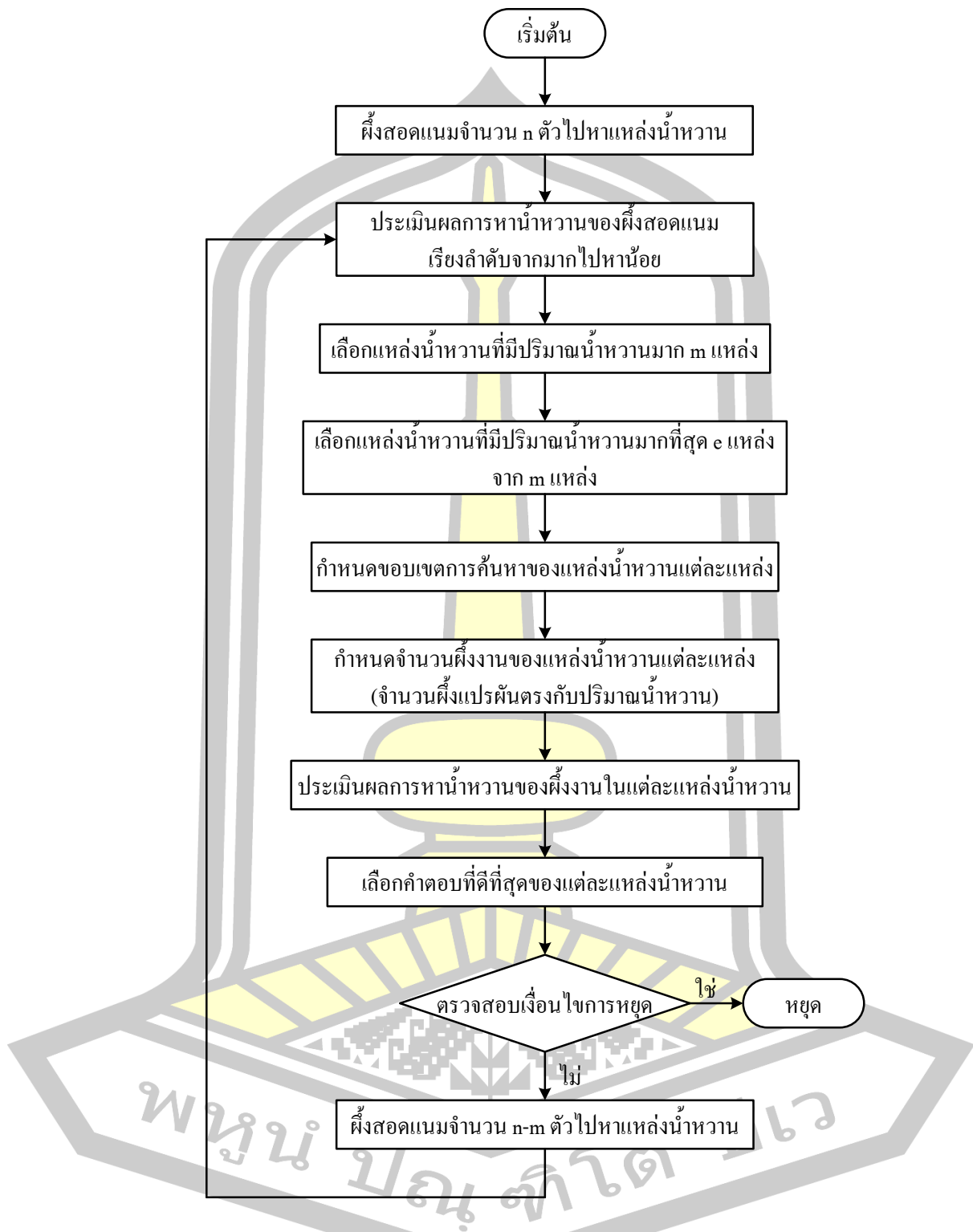
```

```

    End
  End
7. Evaluate the fitness function of the neighbourhood
  For i=1 to M-E,
    For j=1:nsp+1
      Check constraint of(xnsp(:,j,i))
      If con = 1
        find cost(xnsp(:,j,i));
      Else
        Set Fm(j,i) to high value
      End
    End
  End
End
8. Termination
  If generation < maximum generation
9. Assign the N-M remaining bee to random search
  if X_Best = Fmin
  Then
  Go to step 2
  Else
  Print the best solution stop
  End
End

```

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพประกอบ 2.26 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงฝึง

ตาราง 2.5 สรุปหลักการในการดำเนินงานของแต่ละวิธี

	วิธีพันธุกรรมยีนต์ (GA)	วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)	วิธีฝูงผึ้ง (BA)
ตัวดำเนินการ	โครโมโซม (Chromosome)	อนุภาค (Particle)	ผึ้ง (Bee)
การค้นหาแบบกลุ่ม	ใช้กลุ่มโครโมโซม	ใช้กลุ่มอนุภาค	ใช้ฝูงผึ้ง
ชนิดของตัวดำเนินการ	เป็นชนิดเดียวกัน	เป็นชนิดเดียวกัน	มี 2 ชนิดที่ต่างกัน (ผึ้งงาน และผึ้งสอดแนม)
การหาคำตอบเริ่มต้น	ใช้การสุ่มเลือกกลุ่มประชากรในรูปของกลุ่มโครโมโซม	ใช้การสุ่มเลือกตำแหน่งของกลุ่มอนุภาค	ใช้กลุ่มของผึ้งสอดแนมสุ่มหาแหล่งน้ำหวาน
การค้นหาค่าบริเวณใกล้เคียง	การคัดเลือก (Re-production) การข้ามสายพันธ์ (Crossover) การกลายพันธ์ (Mutation) การแทนที่ (Replacement)	หาอัตราความเร็ว และตำแหน่งใหม่ของแต่ละอนุภาค (Velocity and Position)	ใช้ผึ้งงานหาปริมาณน้ำหวานจากแหล่งน้ำหวานโดยใช้ขอบเขตแบบคงที่
การลู่เข้าสู่คำตอบ	แบบสุ่ม ผ่านการข้ามสายพันธ์ และการกลายพันธ์	แบบสุ่ม และขึ้นอยู่กับความเร็วปัจจุบัน ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่เคยหามาได้ และตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่ม	แบบสุ่ม และขึ้นอยู่กับจำนวนผึ้งงานของแต่ละแหล่งน้ำหวาน
การใช้ข้อมูลร่วมกัน	ไม่มีการใช้ข้อมูลร่วมกันระหว่างโครโมโซม	มีการใช้ข้อมูลตำแหน่งที่ดีที่สุดร่วมกัน	มีการใช้ข้อมูลปริมาณน้ำหวานแต่ละแหล่ง ผ่านตัวจัดการส่วนกลาง
มีหน่วยความจำระยะสั้น	เก็บคำตอบที่ดีที่สุด และโครโมโซมปัจจุบัน	- เก็บคำตอบที่ดีที่สุด ของกลุ่มและแต่ละอนุภาค - ความเร็วและตำแหน่งของแต่ละอนุภาค	เก็บคำตอบที่ดีที่สุด และคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่งน้ำหวาน
การเริ่มต้นใหม่	ไม่มีขั้นตอนการหาคำตอบเริ่มต้นใหม่	ไม่มีขั้นตอนการหาคำตอบเริ่มต้นใหม่	มีการหาคำตอบเริ่มต้นใหม่โดยใช้ผึ้งสอดแนม
ขบวนการหลุดจากโลคอล	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี

จากตาราง 2.5 จะเห็นว่าวิธีการฝูงผึ้งเป็นวิธีการที่มีข้อดีมากที่สุด และมีข้อเสียน้อยที่สุดใน 3 วิธีการที่ได้กล่าวถึง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟuzzy Logic [69]

(Automatic Generation Control Using Fuzzy Logic)

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟuzzy Logic โดยการพัฒนาสร้างเงื่อนไขการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ และพัฒนาการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าให้

การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งช่วยลดการสึกหรอของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเนื่องจากจำนวนครั้งในการส่งสัญญาณไปควบคุมมีค่าน้อยลง ช่วยลดต้นทุนการผลิต และยังคงผ่านการวัดคุณภาพระบบผลิตไฟฟ้าที่สภาพความเชื่อถือได้แห่งอเมริกาเหนือกำหนดไว้ ผู้วิจัยได้ออกแบบจัดสร้างกฎการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยการเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์จากระบบการคิดหาเหตุผลแบบฟัซซีโลจิก ด้วยการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB โดยใช้กล่องเครื่องมือฟัซซีโลจิกมาประยุกต์ใช้ในการควบคุม งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบควบคุมที่นำเสนอกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบมี 3 เขตพื้นที่ควบคุมเชื่อมต่อถึงกัน ผลการทดสอบที่ได้รับเป็นที่น่าพอใจทั้งในด้านคุณภาพการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้น และต้นทุนที่ลดลง ซึ่งเหมาะสมเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติที่ต้องการประสิทธิภาพในเชิงการควบคุมและเศรษฐศาสตร์

2) ตัวควบคุมฟัซซีโลจิกพีไอที่เหมาะสมสำหรับระบบไฮโดร-เทอร์มอลโดยวิธีฝูงผึ้ง [70]  
(Optimal Fuzzy logic-PI Controller for Hydro-Thermal System by using Bee Algorithm)

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีโลจิกพีไอสำหรับการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของสองพื้นที่ ที่มีกรเชื่อมต่อถึงกันระหว่างโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยใช้วิธีฝูงผึ้งมาประยุกต์เพื่อใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าอัตราการขยายพีไอ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีโลจิกพีไอ เพื่อดำเนินการให้ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด ผลการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีโลจิกพีไอมีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม และดีกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีโลจิกพีไอแบบไม่เหมาะสม

3) การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และอิเล็กโทรไลเซอร์ร่วมกับการกำหนดอัตราขยายแบบฟัซซีเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง [71]  
(Control of Photovoltaic and Electrolyzer with Fuzzy Gain Scheduling for Power System Stabilization)

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และอิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer: EZ) เพื่อทำเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มเข้ามาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน ทั้งในด้านของผลกระทบด้านการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวในระบบ ด้วยความสามารถของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ของ PV และคอนเวอร์เตอร์ (Converter) ของ EZ ที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทได้โดยการประยุกต์ใช้การกำหนดอัตราขยายแบบฟัซซี (Fuzzy Gain Scheduling: FGS) แบบซิงเกิลตัน (Singleton) ในการปรับอัตราขยายตัวควบคุมของ PV และ EZ ให้เปลี่ยนไปตามสภาวะการทำงานของระบบ โดยพารามิเตอร์ของ FGS ทั้งในส่วน ของ แฟกเตอร์สัดส่วน (Scale Factor: SF) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function: MF) และกฎควบคุม (Control Rule: CR) ได้ทำการออกแบบให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง (Bee Colony Optimization: BCO) พร้อมกันทั้งหมด จากผลการทดสอบการควบคุม PV

และ EZ ด้วยการกำหนดอัตราขยายแบบฟัซซี่ที่ทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งสามารถเพิ่มเสถียรภาพของระบบทั้งในด้านของ การแกว่งของความถี่ การแกว่งของกำลังไฟฟ้า และเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราว ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความคงทนที่เหนือกว่า ตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบกับภายใต้การจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

- 4) การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีฝูงผึ้งปรับตัวได้เมื่อพิจารณาเงื่อนไขบังคับการปฏิบัติงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [72]

(Solving Economic Dispatch Problem with Generator Constraints using Adaptive Bee Algorithm)

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่เรียกว่า วิธีฝูงผึ้งปรับตัวได้ เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเมื่อพิจารณาเงื่อนไขบังคับการปฏิบัติงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การทดสอบสมรรถนะได้ดำเนินการกับระบบไฟฟ้ากำลัง 2 ระบบ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 และ 15 เครื่อง ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพันธุกรรมยีนต์วิธีกลุ่มอนุภาค และวิธีฝูงผึ้ง ปรากฏว่าการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการที่นำเสนอ มีสมรรถนะที่ดีกว่าทุกวิธี ทั้งในด้านความเร็วในการหาค่าตอบ การลู่เข้าสู่ค่าตอบ และประสิทธิภาพของค่าตอบ

- 5) การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกพีไอดีสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนโดยใช้วิธีฝูงผึ้ง [73]

(Optimal Fuzzy Logic Proportional Integral Derivative Controller Design by Bee Algorithm for Hydro-Thermal Systems)

บทความนี้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกพีไอดีสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนโดยใช้วิธีฝูงผึ้ง มาประยุกต์เพื่อใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าอัตราการขยายพีไอดี ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกพีไอดี เพื่อดำเนินการให้ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด ผลการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่โลจิกพีไอดีมีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม และดีกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่โลจิกพีไอแบบไม่เหมาะสม

- 6) อัลกอริทึมควอไซออปโปสิชันนอลฮาร์โมนีเซิร์ทและตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกสำหรับเสถียรภาพความถี่โหลดระบบไฟฟ้ากำลังผสมผสานแบบอิสระ [74]

(Quasi-oppositional harmony search algorithm and fuzzy logic controller for load frequency stabilization of an isolated hybrid power system)

บทความนี้นำเสนอ วิธีการใหม่ของวิธี Harmony search เรียกว่า Quasi-oppositional harmony search เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกสำหรับการควบคุมความถี่ของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ร่วมกับ CES โดยทำการออกแบบ ค่าฟังก์ชันความเป็น





โหลดสถานะที่ต่ำกว่า 60% และสถานะที่สูงกว่า 90% ของโหลดพิกัด และพิจารณาฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) เช่น ชีตจำกัดอัตราการผลิตไฟฟ้ากำลัง (Generation rate limit)

- 10) การควบคุมความถี่และกำลังไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าร่วมแยกด้วยตัวควบคุมสเกลลิงแพคเตอร์ฟuzzyโลจิก [78]

(Integrated frequency and power control of an isolated hybrid power system considering scaling factor based fuzzy classical controller)

บทความนี้นำเสนอ วิธีการ Quasi-oppositional harmony search ในการออกแบบตัวควบคุมสเกลลิงแพคเตอร์ฟuzzyโลจิก สเกลลิงแพคเตอร์ฟuzzyโลจิกพีไอ สเกลลิงแพคเตอร์ฟuzzyโลจิกพีดี สเกลลิงแพคเตอร์ฟuzzyโลจิกพีไอดี กับระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ร่วมกับ SMES โดยการทดสอบกับระบบภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันได 1% ทั้งด้านกังหันลมและดีเซล และการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่ม



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

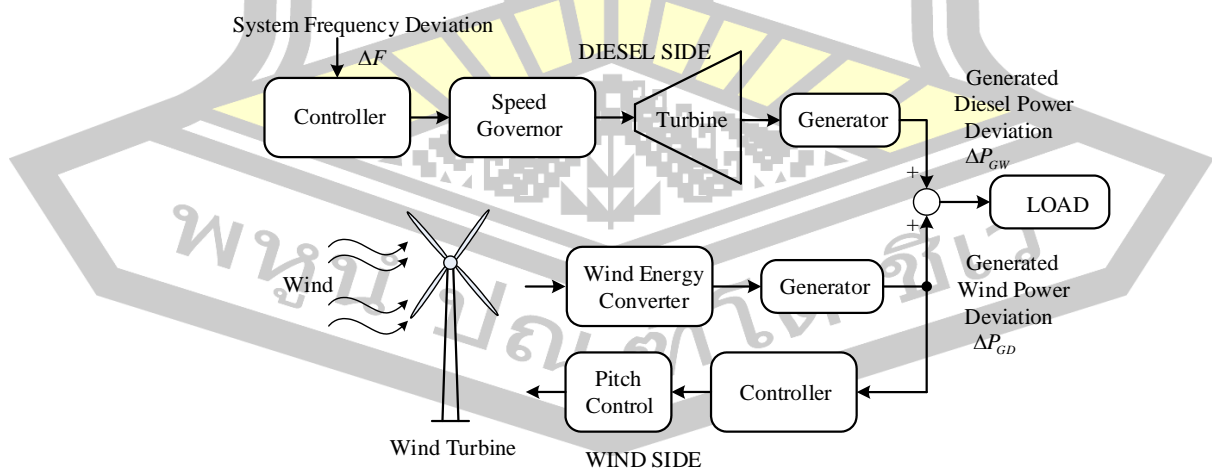
#### 3.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึง หลักการและขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีฝูงผึ้ง ส่วนในการนำวิธีการเหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี พีซีโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด เพื่อใช้ควบคุมระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล โดยการพัฒนาโปรแกรมของวิธีการเหล่านี้ด้วยโปรแกรม MATLAB®R2010 และ Simulink® ของบริษัท MathWorks® ใช้คอมพิวเตอร์ DELL, CPU: Intel Core (TM) i5 2.0 GHz, 4 Gbytes RAM ปฏิบัติการ Windows 7

#### 3.2 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษา

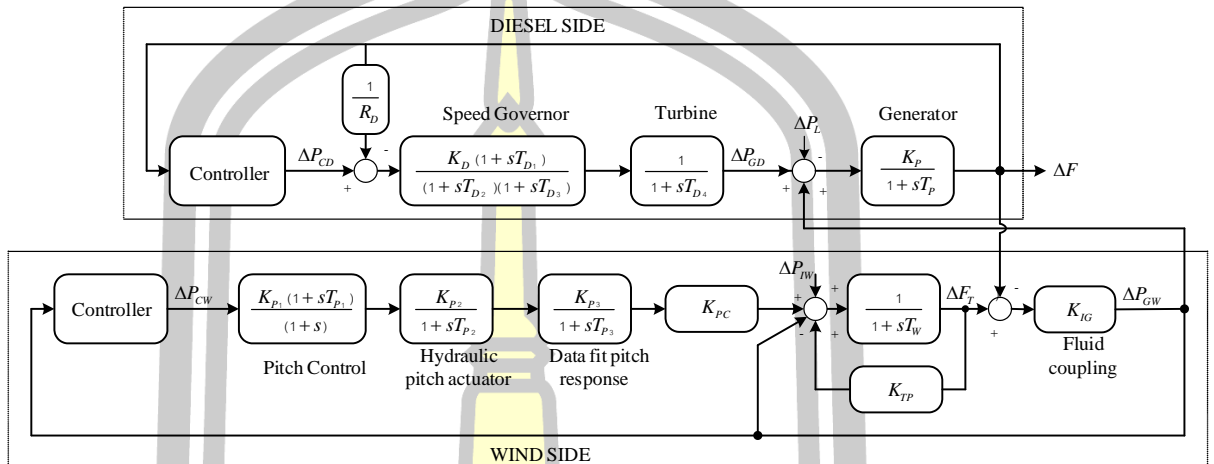
ในหัวข้อที่ 2.2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล พร้อมทั้งแบบจำลองของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 3.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผล มีการสมมติให้ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงของลมหรือการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด โดยการออกแบบตัวควบคุมพีซีโลจิกพีไอดีสำหรับควบคุมการบิดของใบพัด (Blade pitch control) ในด้านกังหันลม และสำหรับตัวบังคับความเร็ว (Speed governor) ในด้านดีเซล เพื่อให้ระบบอยู่ในสถานะอยู่ตัว (Steady state) และคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบได้



ภาพประกอบ 3.1 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

จากภาพประกอบ 3.2 แสดงแบบจำลองการทำงานร่วมกันระหว่างโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล พร้อมกับตัวควบคุมทั้งทางด้านของตัวบังคับความเร็วและตัวควบคุมด้านตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัด และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบได้แสดงไว้ในตาราง 3.1



ภาพประกอบ 3.2 แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

เมื่อ

$\Delta F$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ (Hz)

$R_D$  คือ คุณสมบัติของดรู๊ป (Droop)

$K_D$  คือ อัตราขยายของตัวบังคับความเร็ว

$T_{D1}, T_{D2}, T_{D3}$  คือ ค่าคงตัวของตัวบังคับความเร็ว

$T_{D4}$  คือ ค่าคงตัวของเครื่องยนต์ดีเซล

$\Delta P_{GD}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าด้านเครื่องยนต์ดีเซล (pu kW)

$K_{P1}, T_{P1}$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวของการควบคุมการบิดของใบพัด

$K_{P2}, T_{P2}$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวของตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัดแบบไฮดรอลิก

$K_{P3}, T_{P3}$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวของผลการตอบสนองของการบิดของใบพัดที่เหมาะสมของข้อมูล

$K_{PC}$  คือ อัตราขยายคุณสมบัติของใบพัด

$\Delta P_{IW}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังลมอินพุต

$K_{TP}, T_w$  คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม

$K_{IG}$  คือ อัตราขยายของฟลูอิดคัปปลิง

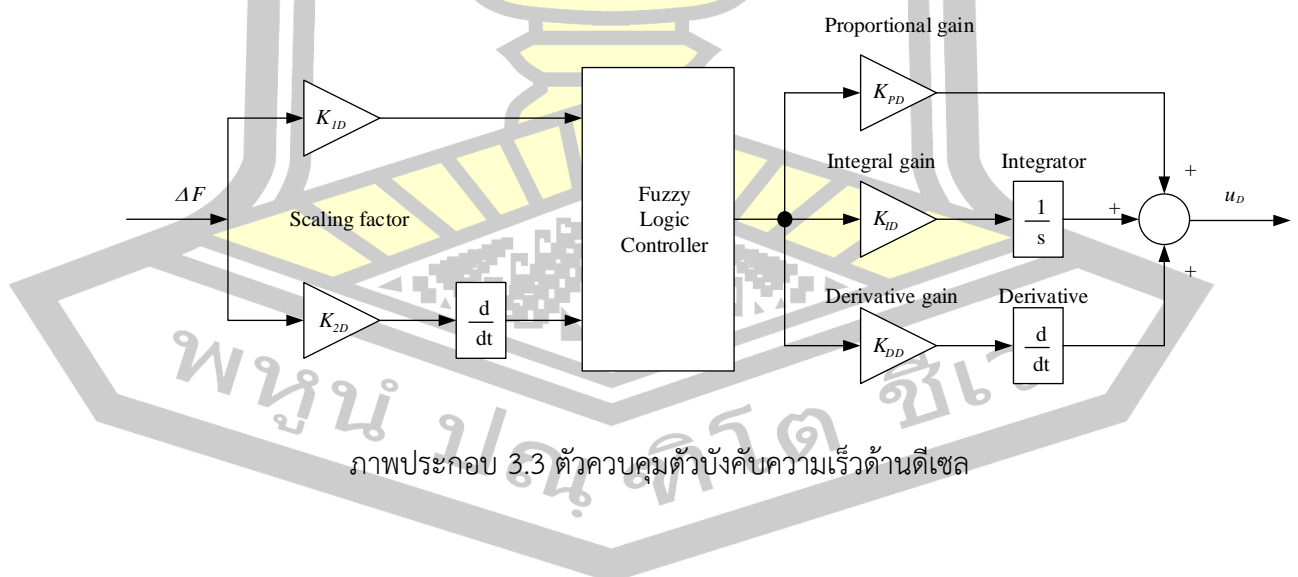
$\Delta P_{GW}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้ากังหันลม

ตาราง 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับแบบจำลองระบบ

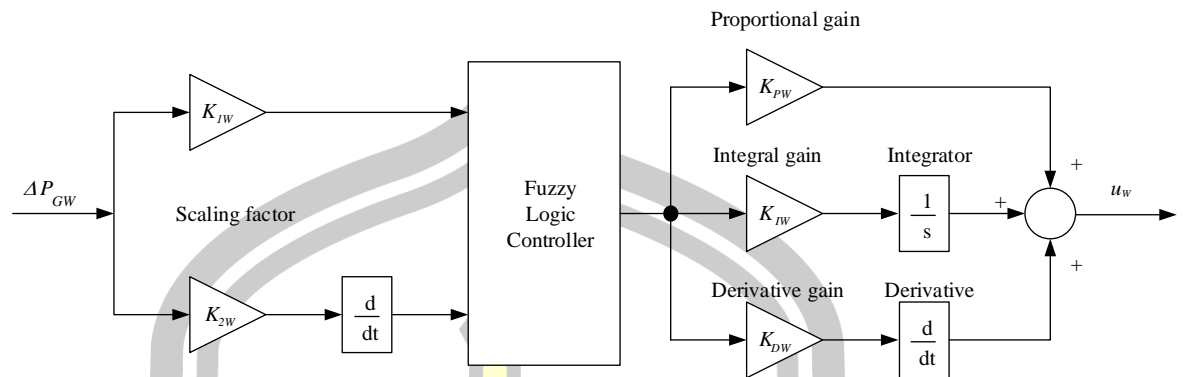
พารามิเตอร์ด้านดีเซล	พารามิเตอร์ด้านกังหันลม
$K_D = 0.4 \text{ pu kW/Hz}$	$K_{P1} = 1.25$
$T_{D1} = 1.0 \text{ sec}$	$K_{P2} = 1.0$
$T_{D2} = 2.0 \text{ sec}$	$K_{P3} = 1.4$
$T_{D3} = 0.025 \text{ sec}$	$K_{PC} = 0.080 \text{ pu kW/deg}$
$T_{D4} = 3.0 \text{ sec}$	$K_{TP} = 0.004 \text{ pu kW/Hz}$
$R_D = 5.0 \text{ Hz/pu kW}$	$K_{IG} = 1.494 \text{ pu kW/Hz}$
	$T_{P1} = 0.6 \text{ sec}$
พารามิเตอร์ระบบ	$T_{P2} = 0.041 \text{ sec}$
$K_p = 72 \text{ Hz/pu kW}$	$T_{P3} = 1.0 \text{ sec}$
$T_p = 1.44 \text{ sec}$	$T_W = 4.0 \text{ sec}$

### 3.3 การออกแบบตัวควบคุม

จากภาพประกอบ 3.2 ตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล จะทำหน้าที่ปรับความเร็วในการขับเคลื่อนเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกังหันลมจะทำหน้าที่ปรับการเอียงของใบพัดตามลักษณะของกระแสลม ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกพีไอดี ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3 และภาพประกอบ 3.4



ภาพประกอบ 3.3 ตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล



ภาพประกอบ 3.4 ตัวควบคุมการปิดของไอน้ำด้านกึ่งหันลม

เมื่อ

$K_{1D}, K_{2D}, K_{PD}, K_{ID}, K_{DD}$  คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้าน

ดีเซล

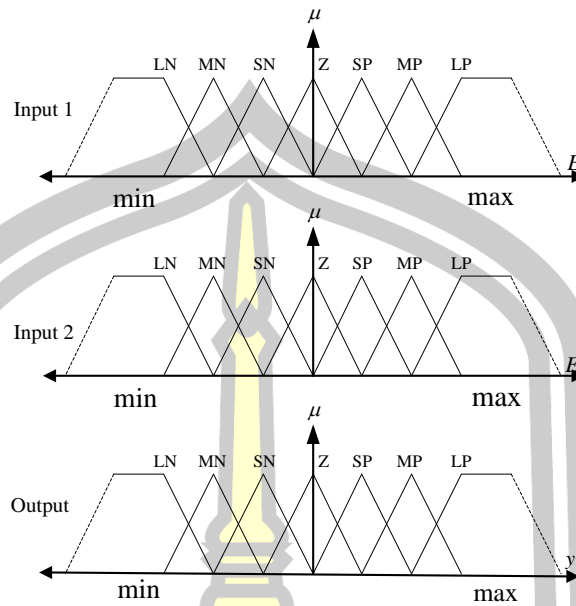
$K_{1W}, K_{2W}, K_{PW}, K_{IW}, K_{DW}$  คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมการปิดของไอน้ำด้าน

กึ่งหันลม

$u_D$  และ  $u_W$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy logic ที่ไอดี

ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy logic ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล และตัวควบคุมการปิดของไอน้ำด้านกึ่งหันลมดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 3.5 และกฎการควบคุมของตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล และตัวควบคุมการปิดของไอน้ำด้านกึ่งหันลมในสถานะเริ่มต้นจะใช้แบบเดียวกันดังแสดงไว้ในตาราง 3.2

พหุ ประถม วิชา ชีวะ



ภาพประกอบ 3.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy

ตาราง 3.2 กฎควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy

	LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
LN	LP	LP	LP	MP	MP	SP	Z
MN	LP	MP	MP	MP	SP	Z	SN
SN	LP	MP	SP	SP	Z	SN	MN
Z	MP	MP	SP	Z	SN	MN	MN
SP	MP	SP	Z	SN	SN	MN	LN
MP	SP	Z	SN	MN	MN	MN	LN
LP	Z	SN	MN	MN	LN	LN	LN

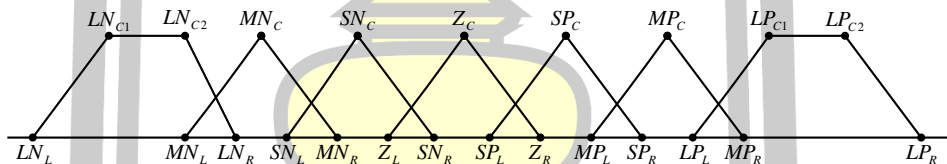
โดยที่

- LN คือ สัญญาณขนาดใหญ่ด้านลบ (Large negative)
- MN คือ สัญญาณขนาดกลางด้านลบ (Medium negative)
- SN คือ สัญญาณขนาดเล็กด้านลบ (Small negative)
- Z คือ สัญญาณเป็นศูนย์ (Zero)
- LP คือ สัญญาณขนาดใหญ่ด้านบวก (Large positive)
- MP คือ สัญญาณขนาดกลางด้านบวก (Medium positive)
- SP คือ สัญญาณขนาดเล็กด้านบวก (Small positive)



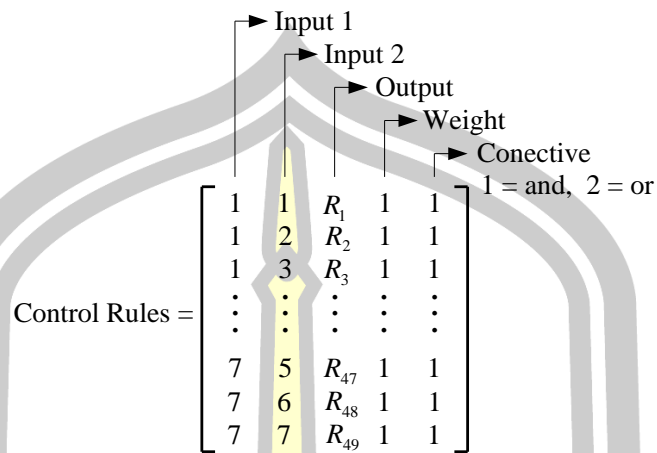
ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอที่มีการใช้ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมก่อนการปรับค่า จะถูกเรียกว่า ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอแบบไม่เหมาะสม (Non-optimal FLPI Controller) ส่วนตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอที่นำเสนอ จะถูกเรียกว่า ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอแบบเหมาะสม (Optimal FLPI Controller) เมื่อค่าอัตราขยายพีไอ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมได้ถูกเลือกค่าให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

สำหรับการออกแบบของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอนั้น อัตราขยายพีไอดี มีตัวแปรที่จะต้องปรับค่าแค่ 3 ค่า คือ อัตราขยายสัดส่วน อัตราขยายอินทิกรัล และอัตราขยายอนุพันธ์ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และกฎการควบคุม มีค่าตัวแปรที่ต้องทำการปรับค่าหลายตัว สำหรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จะต้องมีการปรับค่าตัวแปรดังที่ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 3.6 คือ สมาชิกรูปสามเหลี่ยม (Triangular Membership) มี 3 ตัว คือ Left Base (L), Center (C) และ Right base (R) ส่วนสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีค่าตัวแปร 4 ค่า คือ Left Base (L), Centre1 (C<sub>1</sub>), Centre2 (C<sub>2</sub>) และ Right base (R) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู 2 รูป และมีสมาชิกรูปสามเหลี่ยม 5 รูป ดังนั้นจะมีตัวแปรที่จะต้องปรับค่ารวมกันได้เท่ากับ 23 ตัว ( $4+3+3+3+3+3+4 = 23$ ) แต่ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกมีอินพุต 2 ค่า และเอาต์พุต 1 ค่า เมื่อรวมตัวแปรทั้งหมดที่จะต้องทำการปรับค่าได้เท่ากับ 69 ตัว จากผลรวมดังนี้  $23+23+23 = 69$



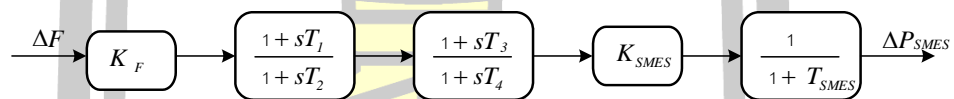
ภาพประกอบ 3.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 1 ชุด

กฎการควบคุมสำหรับอินพุต 2 ค่า และเอาต์พุต 1 ค่า ของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก โครงสร้างของกฎการควบคุมจะเป็นแบบเมทริกซ์ที่มี  $n$  แถว และ 5 คอลัมน์ ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 3.7 เมื่อมีแนวความคิดถึงการประยุกต์ใช้กล่องเครื่องมือฟuzzyลอจิก (Fuzzy Logic Toolbox) กำหนดให้  $n$  คือ ค่าตัวเลขที่เป็นผลรวมของค่าสมาชิกระหว่างความเป็นไปได้ทั้งหมดของอินพุต 2 ค่า สำหรับฟังก์ชันสมาชิก 7 ค่า จะได้  $n = 7^2 = 49$  คอลัมน์ที่ 3 ในตารางของกฎการควบคุมเป็นค่าตัวแปรเอาต์พุตที่เปลี่ยนตามเงื่อนไขการควบคุม โดยปกติแล้วค่าของกฎการควบคุมนี้จะต้องแสดงค่าเป็นค่าตัวเลข จากการศึกษาที่ผ่านมาที่บอกว่า ค่าสมาชิกจะต้องมี 7 ค่า ดังนั้นกฎการควบคุมจะต้องถูกแทนค่าเป็นตัวเลข 1 ถึง 7 คือ 1:LN, 2:MN, 3:SN, 4:Z, 5:SP, 6:MP และ 7:LP เพราะฉะนั้นจะมีตัวแปรที่จะต้องปรับ 49 ค่า ดังนั้นตัวแปรรวมทั้งหมดสำหรับอินพุต 2 ค่า และค่าเอาต์พุต 1 ค่า ของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดีจะมีตัวแปรทั้งหมดที่จะต้องปรับค่า คือ 122 ตัว จากผลรวมดังนี้  $4+69+49 = 122$



ภาพประกอบ 3.7 โครงสร้างกฎการควบคุมตัวควบคุมฟuzzy

ตัวควบคุม SMES มีคุณลักษณะในการทำงานโดยสามารถที่จะรับ หรือจ่าย ได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนพร้อมกัน [40,47] พร้อมทั้งสามารถที่จะใช้เพื่อที่จะลดปัญหาที่รุนแรงของการแกว่งกำลังไฟฟ้าในสายส่งต่อเชื่อม ด้วยเหตุนี้ตัวควบคุม SMES จึงได้มีการนำมาใช้งานอย่างมากมาย ในอดีตตัวควบคุม SMES ได้นำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาหลายๆ ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างเช่น การปรับปรุงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง [48,49] การควบคุมความถี่ในระบบที่มีการเชื่อมโยงกัน [50, 51] ปรับปรุงคุณภาพระบบกำลังไฟฟ้า [52] เป็นต้น



ภาพประกอบ 3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES [38]

ภาพประกอบ 3.8 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES โดย SMES จะทำการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนของ SMES แสดงดังสมการ (3.1)

$$\Delta P_{SMES} = K_F \times K_{SMES} \times \left( \frac{1}{1 + sT_{SMES}} \right) \times \left( \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \times \left( \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \right) \times \Delta f \quad (3.1)$$

เมื่อ  $K_{SMES}$  คือ เกณฑ์ของ SMES

$T_{SMES}$  และ  $T_1 - T_4$  คือ เวลาคงที่ (วินาที) ของ SMES

### 3.4 เงื่อนไขในการควบคุม

การจำลองแบบการดำเนินงานของตัวควบคุมทั้ง 3 แบบ ซึ่งได้แก่ ตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมฟuzzyโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังทำงานร่วมกันแบบแยกอิสระของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 3.2 โดยการประยุกต์ใช้มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่ค่า 0.01 pu หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของลม และใช้พารามิเตอร์ในระบบดังแสดงไว้ในตาราง 3.1 ส่วนอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการจำลองแบบการดำเนินงานได้ใช้โปรแกรม MATLAB 2010-simulink และกล่องเครื่องมือฟuzzyโลจิก (Fuzzy logic toolbox) ปฏิบัติการจำลองแบบโดยใช้ตัวประมวลผล Core (TM) i5, 2.0 GHz, 4 Gbytes RAM ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Window 7 ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ ในการดำเนินงานได้ทำการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 4 แบบ เพื่อควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังด้านกังหันลม-ดีเซล โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ ต้องการให้เกิดการแกว่งของความถี่น้อยที่สุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของลม ดังนั้นเพื่อที่จะหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมฟuzzyโลจิกพีไอดี ในงานวิจัยนี้จะใช้เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะค่าผิดพลาดสมบูรณ์อินทิกรัลคูณด้วยเวลา (Integral time multiplied absolute error : ITAE) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ดังสมการ (3.2)

$$\text{Minimize } ITAE = \int_0^{\infty} t |\Delta F| dt \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\Delta F$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ

### 3.5 การประยุกต์ใช้วิธีผึ้ง

วิธีผึ้ง เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่เลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของผึ้ง ดำเนินการผ่านตัวดำเนินการ คือ ผึ้ง โดยแบ่งชนิดของผึ้ง ออกเป็น 2 ประเภท คือ ผึ้งสอดแนม (Scout bee) และ ผึ้งงาน (Employee bee) เพื่อค้นหาค่าตอบ โดยสมมุติว่าคำตอบคือ แหล่งน้ำหวาน หน้าที่ของผึ้งสอดแนม คือ ค้นหาแหล่งน้ำหวานแบบสุ่มในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ (Search space) เมื่อผึ้งสอดแนม ค้นหาค่าตอบได้ ก็จะบินกลับมาที่รังผึ้ง เพื่อสื่อสารกับผึ้งตัวอื่นๆ ภายในรังผึ้ง การสื่อสารของผึ้งจะใช้วิธีการเด่นลักษณะต่างๆ เพื่อบอกปริมาณน้ำหวาน ทิศทางของแหล่งน้ำหวาน จากนั้น ผึ้งงานก็จะไปทำหน้าที่ขนน้ำหวานในแหล่งน้ำหวาน โดยจำนวนผึ้งงานจะแปรตามปริมาณน้ำหวานและระยะทาง ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีผึ้ง แสดงดังภาพประกอบ 2.22 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n$  ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่างๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ  $NC = 0$

**ขั้นตอนที่ 2** ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับจากคำตอบดีมากที่สุดไปหาคำตอบดีน้อยที่สุด

**ขั้นตอนที่ 3** เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี  $m$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 4** คัดแยกคำตอบ  $m = 5$  คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด  $e$  คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ด้อยลงมา  $m - e$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 5** กำหนดขอบเขตในการค้นหาบริเวณรอบๆ  $e$  คำตอบ และ  $m - e$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 6** ให้ผึ้งงานจำนวน  $n_{ep}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $e$  คำตอบ และผึ้งงานจำนวน  $n_{sp}$  ตัว ค้นหาคำตอบรอบๆ  $m - e$  คำตอบ

**ขั้นตอนที่ 7** ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

**ขั้นตอนที่ 8** ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ

**ขั้นตอนที่ 9** กำหนดให้ผึ้งสอดแนมจำนวน  $n - m$  ตัว ค้นหาคำตอบใหม่ แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนได้คำตอบที่สูงที่สุด

จากขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงผึ้ง สามารถเขียนเป็น Pseudo code ได้ ดังนี้

---

1 Initialization of population of  $N$  scout bees

Set  $Iter = 0$  /\*  $Iter$ : cycle counter \*/

For every combination ( $x$ )

Random generate initial solutions

End

Start time

2 Evaluate the fitness function of the population

For  $i=1$  to  $N$

check\_constraint( $x(:,i)$ )

If  $con = 1$

Calculate  $F(i) = find\_cost(x(:,i))$

Else

Set the function to high value

```

    End
  End
3 Select M site for neighbourhood search
  Set site neighbourhood (xr, Fr)
  For k = 1 to M
    Chose  $xr(:,k)=x(:,R(k))$ 
    Chose  $Fr(k)= Fb(k)$ 
  End
4 Determine the size of neighbourhood (Patch size,ngh)
  Set boundary of neighbourhood
   $xep = xr(:,1:E);$ 
   $xsp = xr(:,E+1:M)$ 
5 Recruit bees for selected sites
  Set step size of each neighbourhood
  For i = 1 to E
    Generate neighbourhood solutions
  End
  For j = 1:M-E
    Generate neighbourhood solutions
  End
6 Evaluate the fitness function of the neighbourhood
  For i=1 to E
    For j=1:nep+1;
      Check constraint of( $xnep(:,j,i)$ )
      If con = 1
        find cost( $xnep(:,j,i)$ )
      Else
        Set  $Fm(j,i)$  to high value
      End
    End
  End
  End
  End
7 Evaluate the fitness function of the neighbourhood
  For i=1 to M-E,

```

```

For j=1:nsp+1
    Check constraint of(xnsp(:,j,i))
    If con = 1
        find cost(xnsp(:,j,i));
    Else
        Set Frn(j,i) to high value
    End
End
End
End
8 Termination
    If generation < maximum generation
9 Assign the N-M remaining bee to random search
    if X_Best = Fmin
    Then
        Go to step 2
    Else
        Print the best solution stop
    End
End
End

```

จาก [58-61] ข้อดีของวิธีฝูงผึ้ง คือ ขั้นตอนไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการประยุกต์ใช้ ใช้พารามิเตอร์ (จำนวนผึ้ง) น้อยสามารถค้นหาคำตอบได้ดี หากคำตอบได้รวดเร็ว คำตอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือ และเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม แต่ก็มีข้อเสีย คือ ถ้ากำหนดขอบเขตการค้นหาไม่เหมาะสมก็จะได้คำตอบที่ดีเท่าที่ควร และขั้นตอนการค้นหาคำตอบใหม่อาจจะไม่มีประโยชน์ในกรณีปัญหาต่างๆ

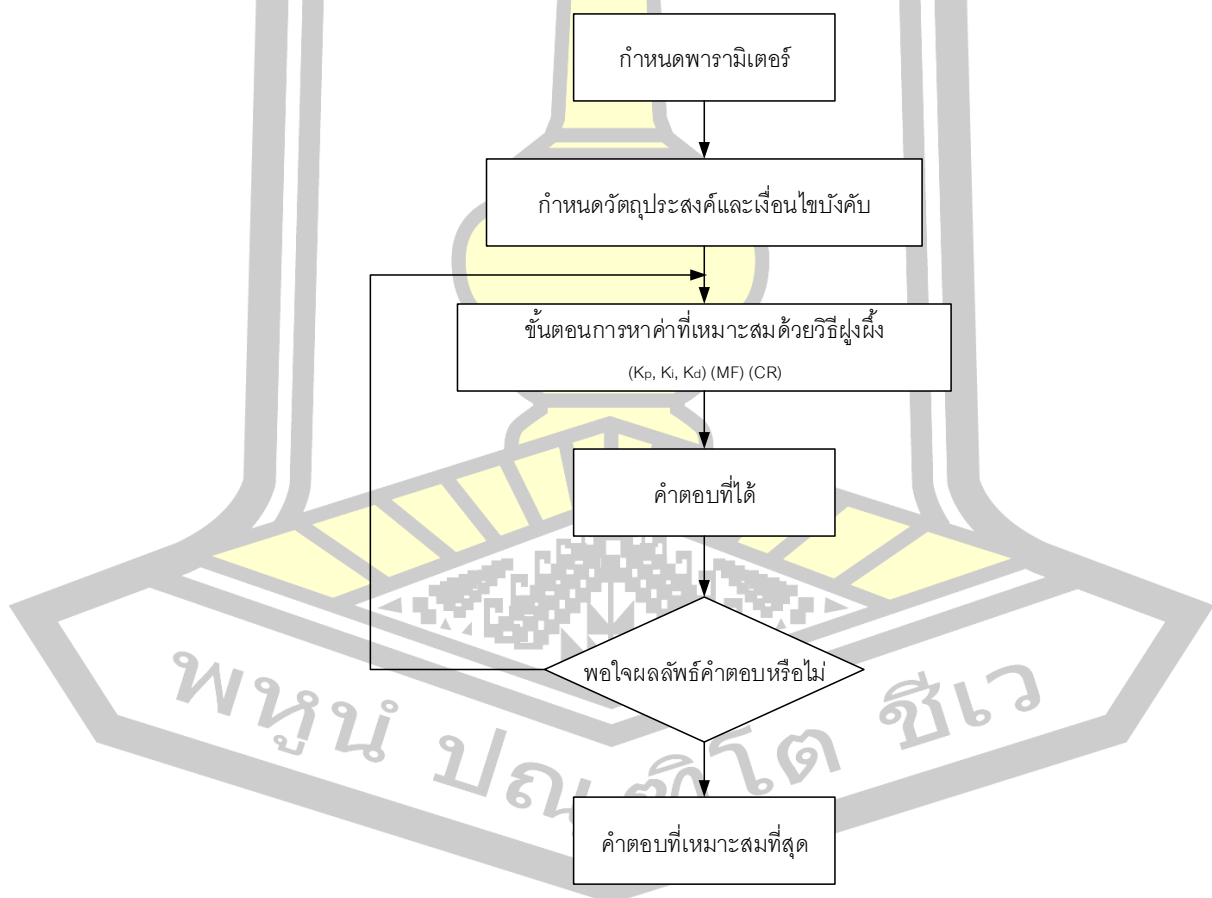
ดังนั้นจึงได้นำวิธีฝูงผึ้ง มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมพีซซีโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด แล้วประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล เพื่อทดสอบการตอบสนองพลวัต และความคงทนของระบบไฟฟ้ากำลัง จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องปรับค่าในแต่ละตัวควบคุม มีดังนี้

- 1) ตัวควบคุมพีไอดี ต้องดำเนินการปรับค่าพารามิเตอร์ 6 ตัว ได้แก่  $K_{PD}, K_{ID}, K_{DD}, K_{PW}, K_{IW}$  และ  $K_{DW}$  ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง
- 2) ตัวควบคุมพีซซีโลจิกพีไอดี ต้องดำเนินการปรับค่าพารามิเตอร์ 10 ตัว ได้แก่  $K_{1D}, K_{2D}, K_{1W}, K_{2W}, K_{PD}, K_{ID}, K_{DD}, K_{PW}, K_{IW}$  และ  $K_{DW}$  ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ปรับค่า

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่มีจำนวน 69 ตัว ให้เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy ปรับค่ากฎการควบคุมที่มีจำนวน 49 ตัว ให้เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy ปรับค่าพารามิเตอร์จำนวนทั้งหมด  $10+69+49=128$  ตัว

3.) ตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด ต้องดำเนินการปรับค่าพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่  $K_{sm}, T_{sm}, T_1, T_2, T_3$  และ  $T_4$  ให้เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy

ตัวควบคุมทั้งหมด 3 แบบ ใช้แผนผังการดำเนินงานดังภาพประกอบ 3.9 เพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมด้วยการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy เริ่มจากกำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับค่า กำหนดวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับตามสมการ 3.2 เข้าสู่ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy เมื่อได้ผลลัพธ์แล้วต้องวิเคราะห์ว่าพอใจกับผลลัพธ์ที่ได้หรือไม่ ถ้าไม่พอใจก็ให้ไปเริ่มที่ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy ใหม่จนกว่าจะพอใจกับผลลัพธ์ที่ได้ ในที่นี้ต้องการค่าผิดพลาดสมบูรณ์อินทิกรัลคูณด้วยเวลา (ITAE) ที่มีค่าต่ำที่สุด จึงจะถือว่าได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด



ภาพประกอบ 3.9 แผนผังการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy เพื่อหาค่า  $K_p, K_i, K_d, K_e, K_d, \beta, MF, CR, K_{sm},$

$T_{sm}, T_1, T_2, T_3$  และ  $T_4$



ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบการทำงานของตัวควบคุม ฟิชซีโลจิกพีไอดี (FLPID) ที่นำเสนอ นั้น ได้ทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี (PID) ที่ได้ทำการปรับค่าที่เหมาะสม โดยใช้วิธีฝูงผึ้ง ภายใต้เงื่อนไขตามวัตถุประสงค์ 3.1 และตัวควบคุมฟิชซีโลจิกพีไอดีที่ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่เหมาะสม (Non-optimal FLPID) โดยตัวควบคุมนี้จะใช้ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ และตาราง ส่วนทางด้านแฟคเตอร์สัดส่วนจะทำการออกแบบให้เหมาะสมโดยใช้วิธีฝูงผึ้ง ภายใต้เงื่อนไขตามวัตถุประสงค์ 3.1 กระบวนการค้นหาคำตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบไว้ดังนี้

- ตัวควบคุมพีไอดีทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -500 ถึง 500
- แฟคเตอร์สัดส่วนทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -50 ถึง 50
- ฟังก์ชันสมาชิกทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -50% ถึง 50% จากตำแหน่งเดิม
- กฎควบคุมทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7 (LN-LP)

ในส่วนระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธีฝูงผึ้ง ในการหาค่าที่เหมาะสมของอัตราขยายต่างๆ ของตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมฟิชซีโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด มีการดำเนินงานกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

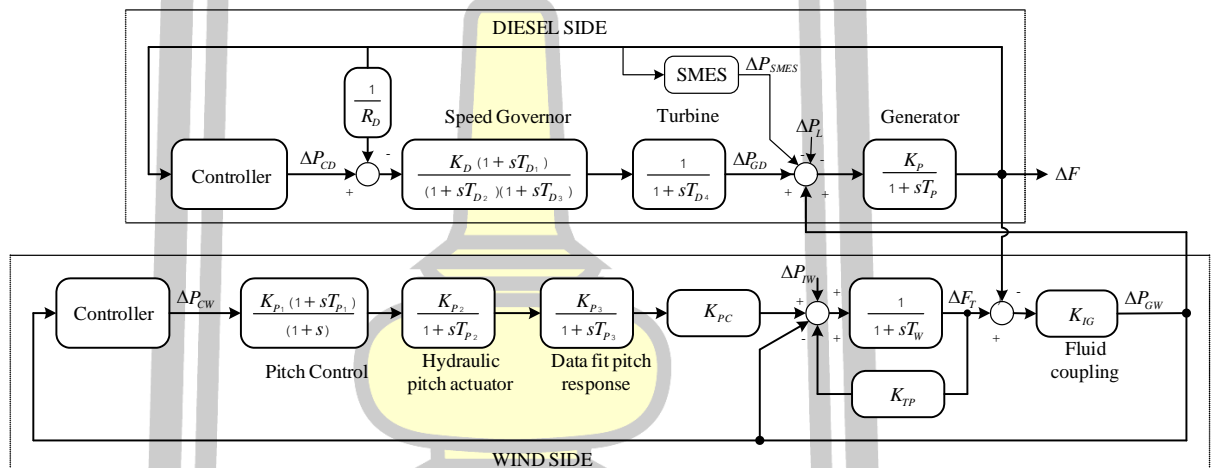
- จำนวนของผึ้งสอดแนม แทนด้วย  $n=100$  ตัว
- จำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย  $m=10$  ค่า
- จำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก  $m$  แทนด้วย  $e=5$  ค่า
- จำนวนผึ้งงานที่ส่งออกไปเก็บคำตอบของ  $e$  แทนด้วย  $n_{ep}=10$  ตัว
- จำนวนผึ้งงานที่ส่งออกไปเก็บคำตอบของ  $m-e$  แทนด้วย  $n_{sp}=5$  ตัว
- จำนวนรอบในการค้นหาสูงสุด (Maximum generation) แทนด้วย  $NC=100$  รอบ

พหุ ประทีป ชีวะ

## บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 4.1 กล่าวนำ

จากการประยุกต์ใช้วิธีฝังฝังเพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุม สำหรับการควบคุมความถี่ โหลดของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ในการจำลองแบบดำเนินงานได้ใช้ตัวควบคุมที่ต่างกัน 2 คุณสมบัติคือ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีซีไอโลจิกพีไอดี เพื่อควบคุมความถี่โหลดของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมที่มีผลต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยได้วิเคราะห์ผลการตอบสนองพลวัตที่มีค่าช่วงเวลาเข้าที่ ค่าการพุ่งเกิน และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ คุณด้วยเวลา เป็นหลัก



ภาพประกอบ 4.1 แบบจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

กรณีใช้ตัวควบคุมพีไอดี ต้องดำเนินการเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของอัตราขยายสัดส่วน อัตราขยายปริพันธ์ และอัตราขยายอนุพันธ์ กรณีใช้ตัวควบคุมพีซีไอโลจิกพีไอดี ต้องดำเนินการเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของอัตราขยายสัดส่วน อัตราขยายปริพันธ์ อัตราขยายอนุพันธ์ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และค่ากฎการควบคุม พร้อมทั้งอัตราขยายของตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด เพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดำเนินงานของตัวควบคุมแบบต่างๆ อย่างชัดเจน จึงได้มีการทดสอบความคงทน (Robustness) ของระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์และภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด การจำลองแบบการดำเนินงานของตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่ได้นำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมความถี่โหลดของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล โดยผลลัพธ์ของการจำลองแบบการดำเนินงานมีดังนี้

## 4.2 ตัวควบคุมที่เหมาะสม

4.2.1 กรณีโหลดมีค่า 0.01 p.u. ด้านกังหันลม

การจำลองแบบการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy เพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม ใช้แบบจำลองดังภาพประกอบ 4.1 ได้ผลลัพธ์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม ด้านกังหันลม

controller/SMES device	parameters	system configuration			
		PID	PID+SMES	Fuzzy PID	Fuzzy PID+SMES
diesel side	$K_1$	-	-	2.7991	3.8318
	$K_2$	-	-	2.7044	1.1269
		296.580			
	$K_p$	0	227.2000	1.5986	2.8031
	$K_i$	68.2260	74.8520	1.6090	2.0479
wind side	$K_d$	81.8010	48.2370	0.0006	0.1135
	$K_1$	-	-	0.5473	-0.2875
	$K_2$	-	-	0.3488	-0.1406
	$K_p$	55.7250	70.8290	0.0499	-0.0072
	$K_i$	3.0624	9.8787	0.0019	-0.0036
SMES block		133.800			
	$K_d$	0	161.6600	0.0616	0.4590
	$K_{sm}$	-	9.5895	-	4.6837
	$T_{sm}$	-	2.6721	-	0.7028
	$T_1$	-	1.3696	-	7.3753
	$T_2$	-	5.3770	-	5.9380
	$T_3$	-	7.4870	-	0.0650
$T_4$	-	6.6151	-	7.0882	

## 4.2.2 กรณีโหลดมีค่า 0.01 p.u. ด้านดีเซล

การจำลองแบบการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy เพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม ใช้แบบจำลองดังภาพประกอบ 4.1 ได้ผลลัพธ์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม ด้านดีเซล

controller/SMES device	parameters	system configuration			
		PID	PID+SMES	Fuzzy PID	Fuzzy PID+SMES
diesel side	$K_1$	-	-	2.7461	2.4552
	$K_2$	-	-	2.4950	2.7205
		213.180			
	$K_p$	0	101.0000	1.1684	1.0775
	$K_i$	35.4340	89.0370	0.3001	0.6073
	$K_d$	16.7070	14.6090	0.0005	-0.0008
wind side	$K_1$	-	-	0.3007	0.2952
	$K_2$	-	-	0.5530	0.1103
	$K_p$	5.78590	42.7730	0.3456	0.0653
		34.5620			
	$K_i$	0	35.2930	0.1200	0.0057
	$K_d$	9.25830	12.8480	0.0830	0.2412
SMES block	$K_{sm}$	-	2.4533	-	3.2003
	$T_{sm}$	-	0.0413	-	0.0179
	$T_1$	-	4.4846	-	4.7656
	$T_2$	-	4.0149	-	4.0582
	$T_3$	-	0.0987	-	0.0900
	$T_4$	-	4.6523	-	4.6925

พหุ ประถมศึกษา

#### 4.2.3 กรณีโหลดมีค่า 0.01 p.u. ด้านกังหันลม-ดีเซล

การจำลองแบบการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy เพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม ใช้แบบจำลองดังภาพประกอบ 4.1 ได้ผลลัพธ์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.3

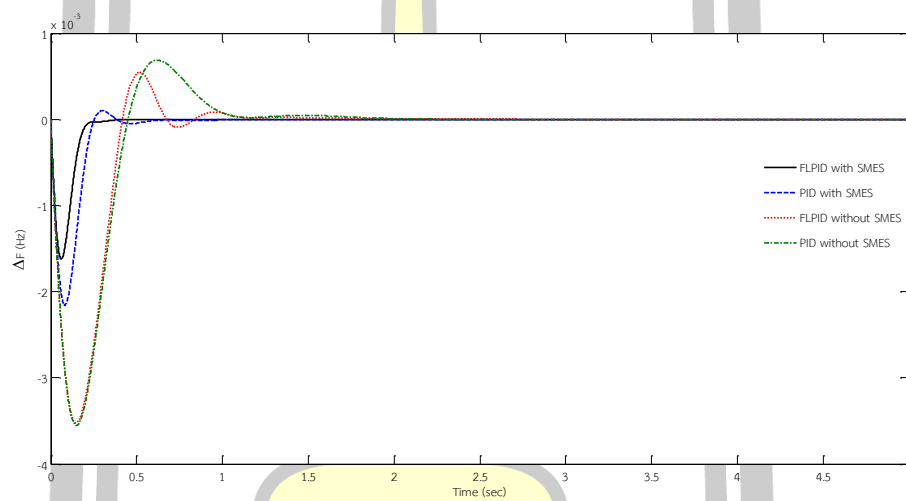
ตาราง 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม

controller/SMES device	parameter	system configuration			
		PID	S	Fuzzy PID	Fuzzy PID+SMES
diesel side	$K_1$	-	-	2.7422	5.9752
	$K_2$	-	-	3.0864	3.2384
	$K_p$	235.9400	22.9460	1.0796	1.1374
	$K_i$	8.8780	65.1380	1.5082	1.6125
	$K_d$	14.5450	17.8150	-0.0004	-0.0015
wind side	$K_1$	-	-	0.1503	0.1008
	$K_2$	-	-	0.6189	0.4114
	$K_p$	31.46300	28.7490	0.0799	0.1635
	$K_i$	2.72280	3.6960	0.1320	0.2014
	$K_d$	68.03900	15.0190	0.1161	0.1979
SMES block	$K_{sm}$	-	9.4785	-	10.0290
	$T_{sm}$	-	0.9438	-	0.0735
	$T_1$	-	1.9375	-	1.0056
	$T_2$	-	7.3341	-	4.3644
	$T_3$	-	3.3127	-	3.9603
	$T_4$	-	9.4325	-	10.9090

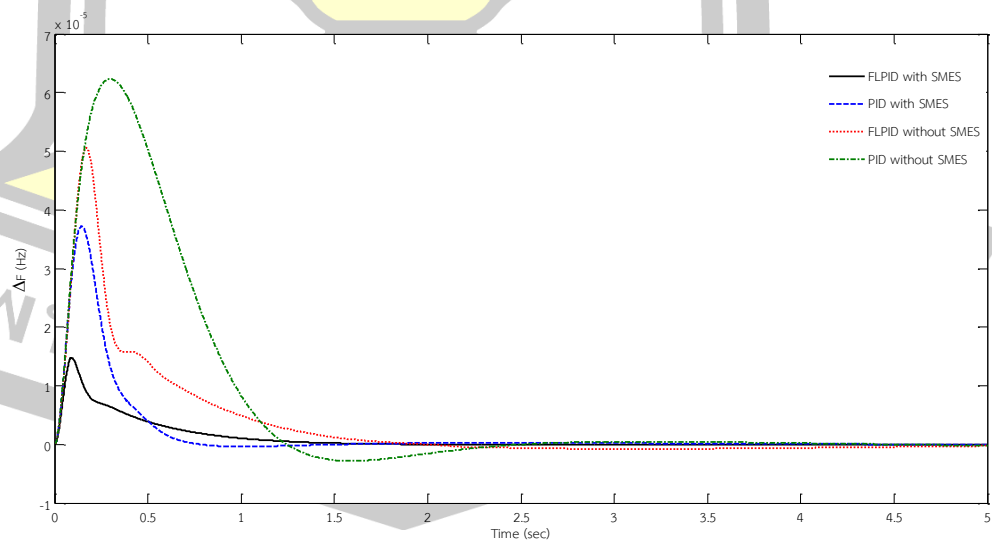
พหุ ประถมศึกษา

### 4.3 การตอบสนองพลวัต

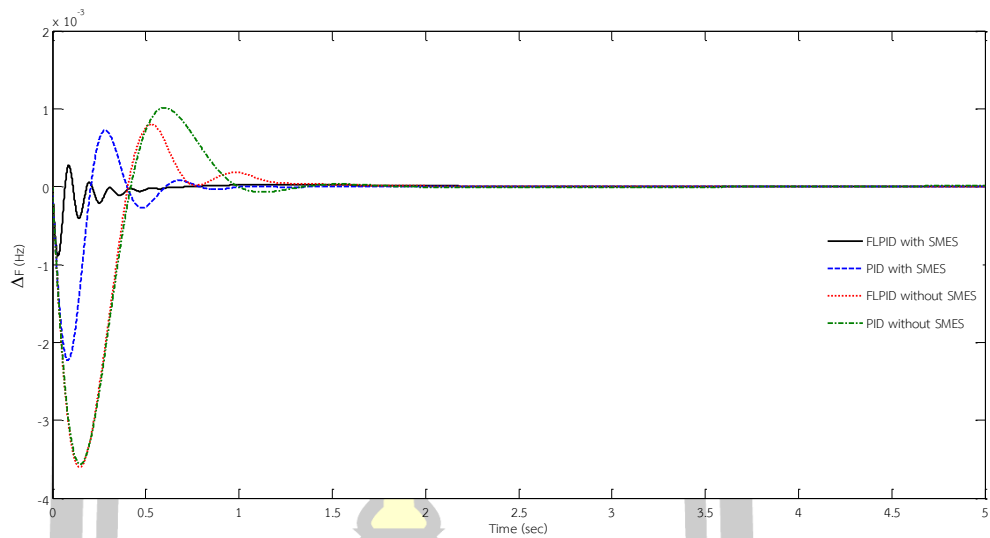
ในการจำลองในกรณีที่ 1 ถึง 3 สมมติว่ามีการเพิ่มขึ้นของโหลดเป็นแบบขั้นบันได (Step) มีขนาดเป็น  $\Delta P_L = 0.01$  p.u. ที่เวลา  $t = 0$  sec โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 4.2 ถึง 4.4 จะเห็นว่า ผลตอบสนองของการแกว่งของความถี่ที่ควบคุมด้วย FLPID with SMES มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุม FLPID without SMES, PID with SMES และ PID without SMES ทั้งในด้านของค่าพุ่งเกิน (Overshoot : OS) ที่ต่ำกว่า และค่าเวลาคงตัว (Setting time) ที่สั้นกว่า



ภาพประกอบ 4.2 ผลตอบสนองความถี่ระบบ ในกรณีที่ 1 (ด้านดีเซล)



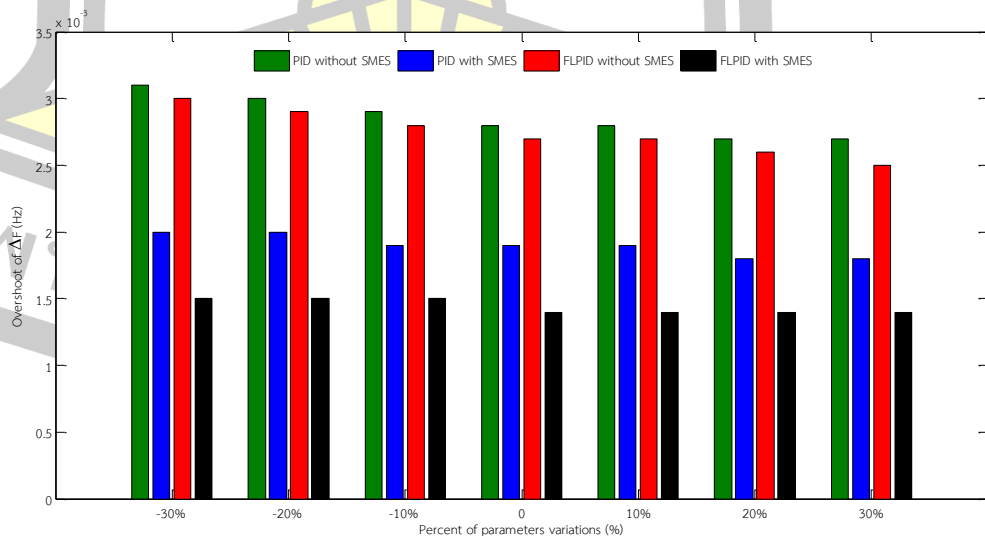
ภาพประกอบ 4.3 ผลตอบสนองความถี่ระบบ ในกรณีที่ 2 (ด้านกังหันลม)



ภาพประกอบ 4.4 ผลตอบสนองความถี่ระบบ ในกรณีที่ 3 (ด้านกึ่งหันลม-ดีเซล)

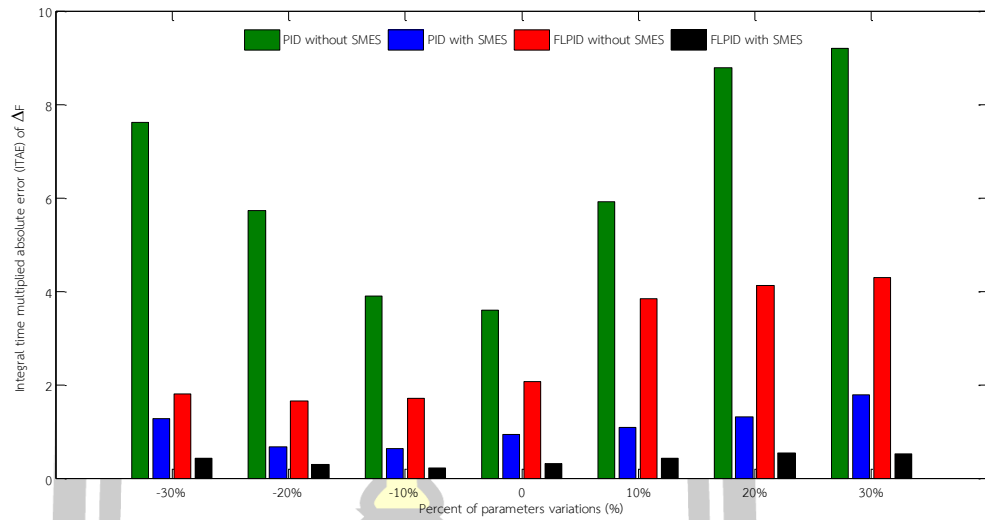
#### 4.4 การทดสอบความคงทน

การทดสอบความคงทนของตัวควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบนั้น ทำได้โดยหาค่าพุงเกินของ  $\Delta F$  และคำนวณค่า ITAE ของระบบเมื่อเกิดโหลดแบบขั้นบันได และสมมติว่าค่าพารามิเตอร์ของระบบทั้งหมดเปลี่ยนไป  $\pm 30\%$  จากค่าเริ่มต้น จากภาพประกอบ 4.5 ถึง 4.10 แสดงให้เห็นว่าในกรณีของตัวควบคุม FLPID with SMES นั้น ค่าพุงเกินและค่า ITAE แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม FLPID with SMES มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบได้สูงกว่าตัวควบคุมแบบ FLPID without SMES, PID with SMES และ PID without SMES

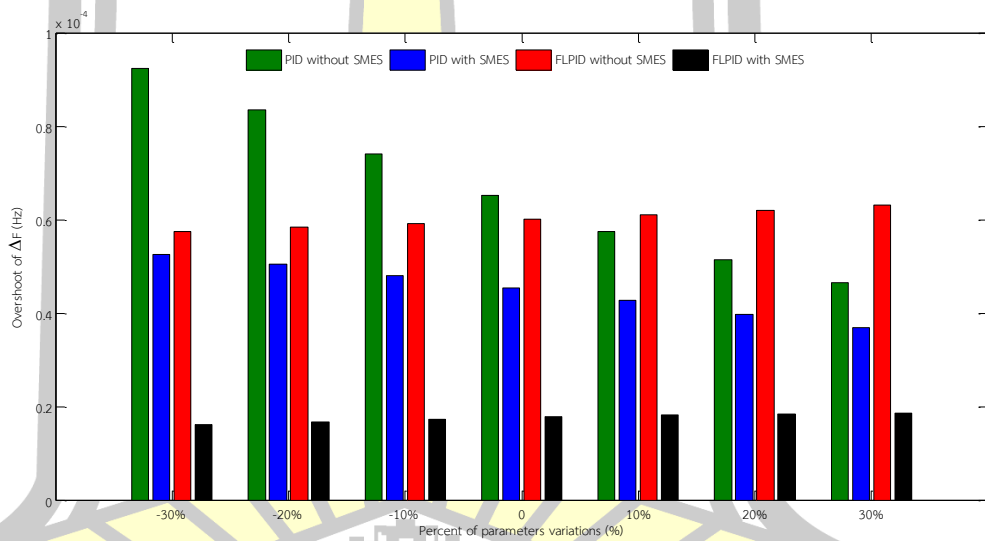


ภาพประกอบ 4.5 ผลการทดสอบความคงทนของค่าการพุงเกิน ในกรณีที่ 1 (ด้านดีเซล)



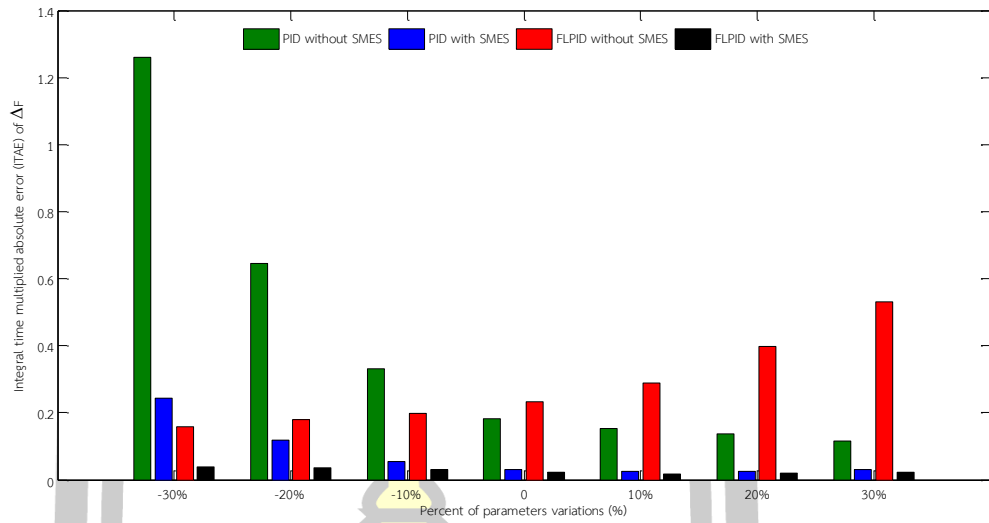


ภาพประกอบ 4.6 ผลการทดสอบความคงทนของค่า ITAE ในกรณีที่ 1 (ด้านดีเซล)

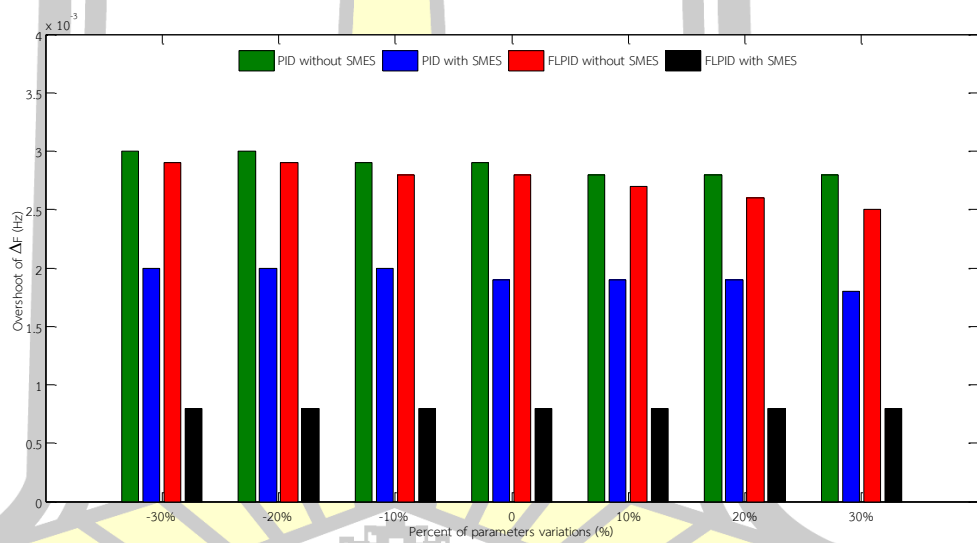


ภาพประกอบ 4.7 ผลการทดสอบความคงทนของค่าการพุ่งเกิน ในกรณีที่ 2 (ด้านกังหันลม)

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์

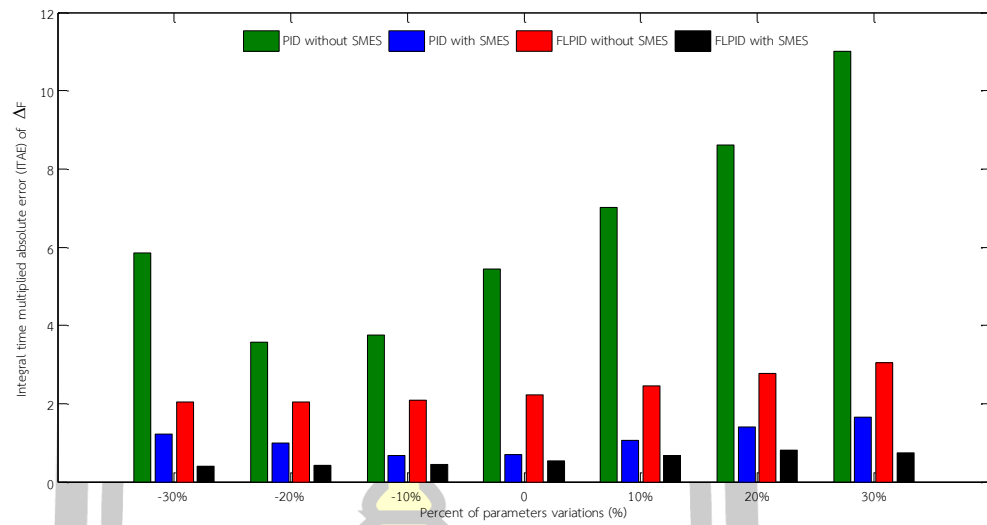


ภาพประกอบ 4.8 ผลการทดสอบความคงทนของค่า ITAE ในกรณีที 2 (ด้านกึ่งหันลม)



ภาพประกอบ 4.9 ผลการทดสอบความคงทนของค่าการพุ่งเกิน ในกรณีที 3 (ด้านกึ่งหันลม-ดีเซล)

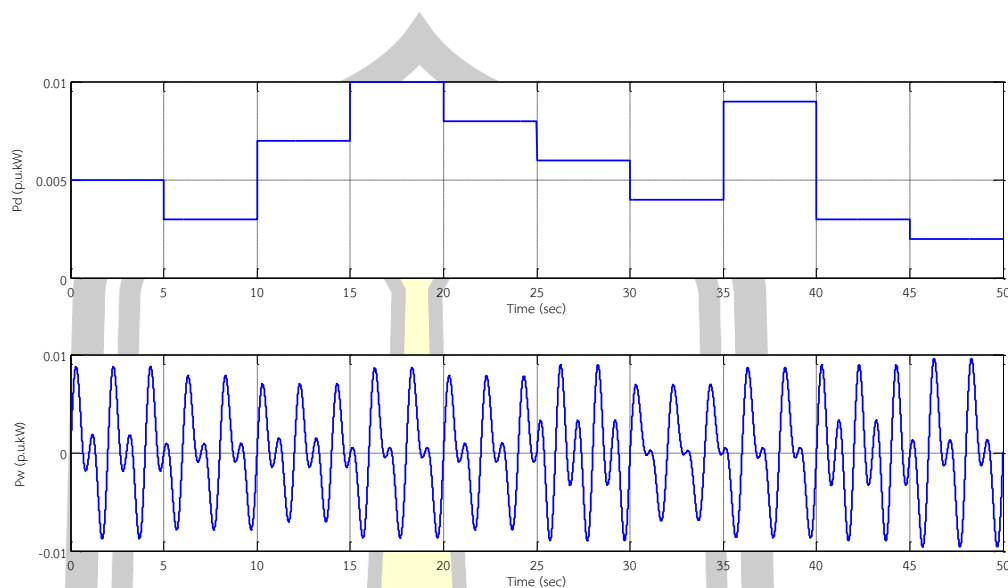
พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบ 4.10 ผลการทดสอบความคงทนของค่า ITAE ในกรณีที 3 (ด้านกึ่งหันลม-ดีเซล)



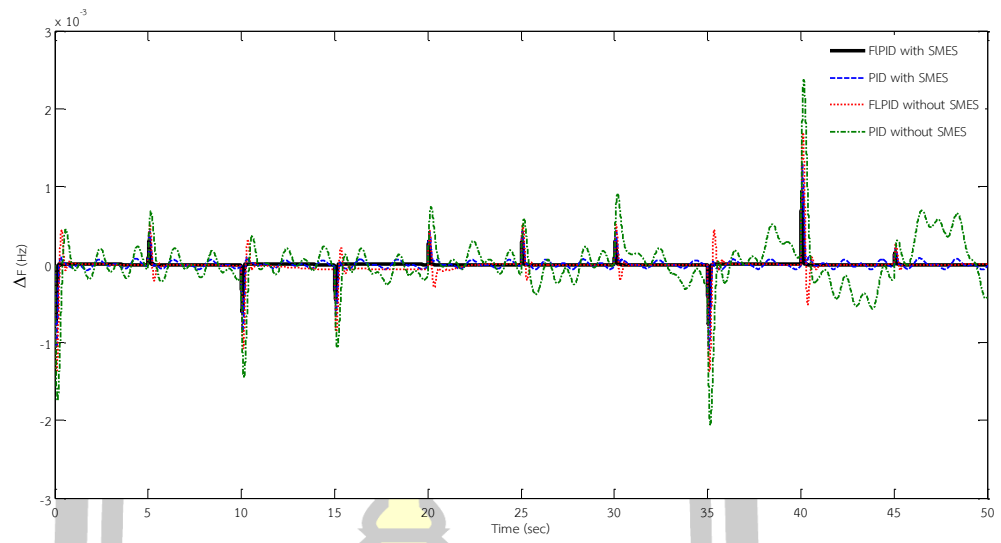
#### 4.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระ



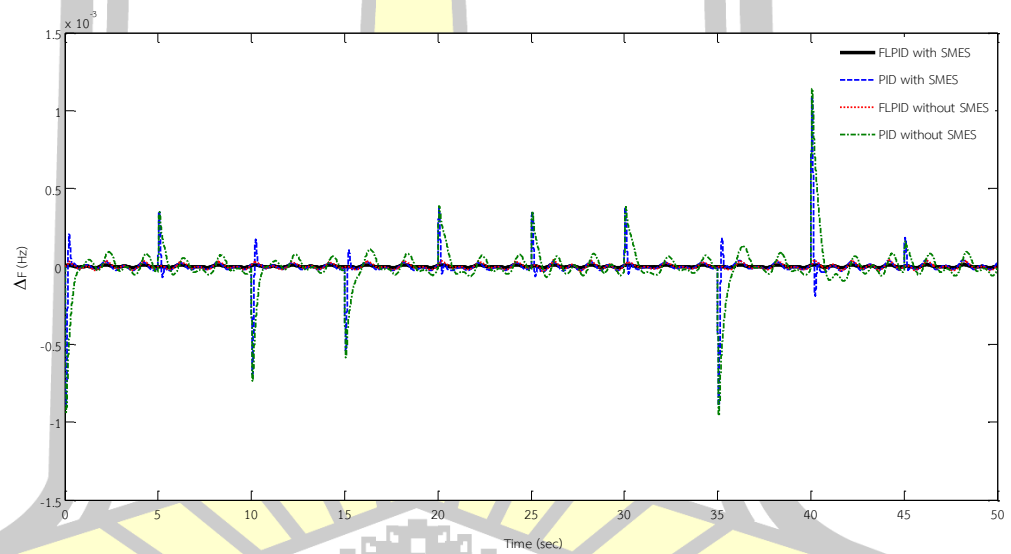
ภาพประกอบ 4.11 การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระของโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระของตัวควบคุมที่นำเสนอ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระที่กำหนดให้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดไม่เกิน 1% (0.01 p.u.) และมีการเปลี่ยนแปลงต่ำที่สุดไม่เกิน 1% (-0.01 p.u.) ของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 150 kW เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองพลวัตที่ ค่าช่วงเวลาเข้าที่และค่าการพุ่งเกินของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระได้แสดงในภาพประกอบ 4.11 ส่วนผลลัพธ์ของการจำลองแบบการดำเนินงานได้แสดงในภาพประกอบ 4.12 ถึง 4.14 ปรากฏว่าผลการตอบสนองพลวัตที่ ค่าช่วงเวลาเข้าที่และค่าการพุ่งเกินของระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวควบคุม FLPID with SMES มีการตอบสนองพลวัตที่ ค่าช่วงเวลาเข้าที่และค่าการพุ่งเกินดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ FLPID without SMES, PID with SMES และ PID without SMES

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์

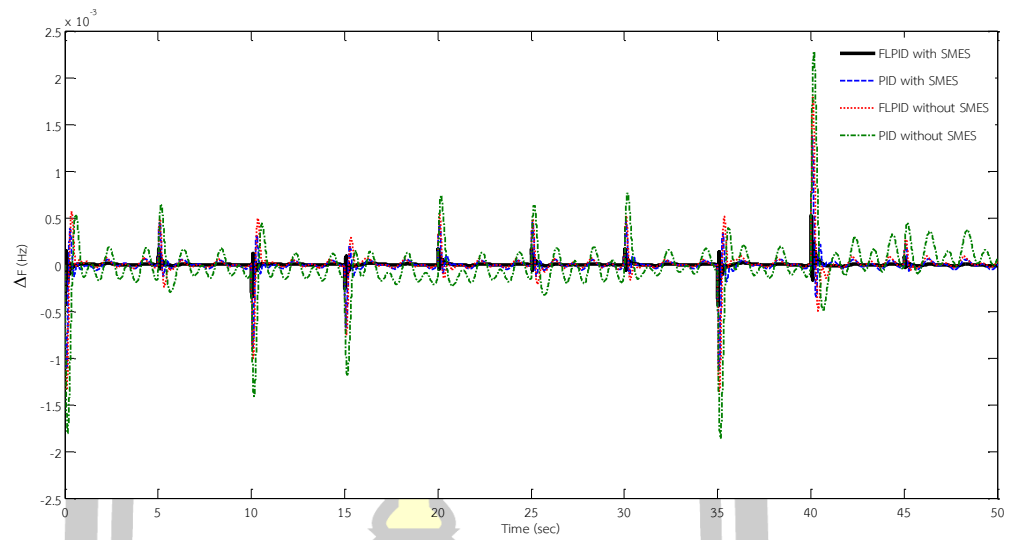


ภาพประกอบ 4.12 การเปลี่ยนแปลงโหมดแบบอิสระ (ด้านดีเซล)



ภาพประกอบ 4.13 การเปลี่ยนแปลงโหมดแบบอิสระ (ด้านก้านแหลม)

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์ ชีวะ



ภาพประกอบ 4.14 การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบอิสระ (ด้านกังหันลม-ดีเซล)



## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด อาทิเช่น ตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมพีซีโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด สำหรับการควบคุมความถี่โหลดของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี อีกทั้งแพคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก กฎการควบคุม และอัตราขยายพีไอดีของตัวควบคุมพีซีโลจิกพีไอดี พร้อมทั้งอัตราขยายของตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด มักใช้วิธีการลองผิดลองถูกหรือใช้ประสบการณ์ของผู้ออกแบบ เพื่อที่จะแก้ปัญหาที่จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้งในการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อที่จะให้การเปลี่ยนแปลงความถี่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดและการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของระบบ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการฝูงผึ้งมีสมรรถนะที่ดีในการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 แบบ

#### 5.2 อภิปรายผล

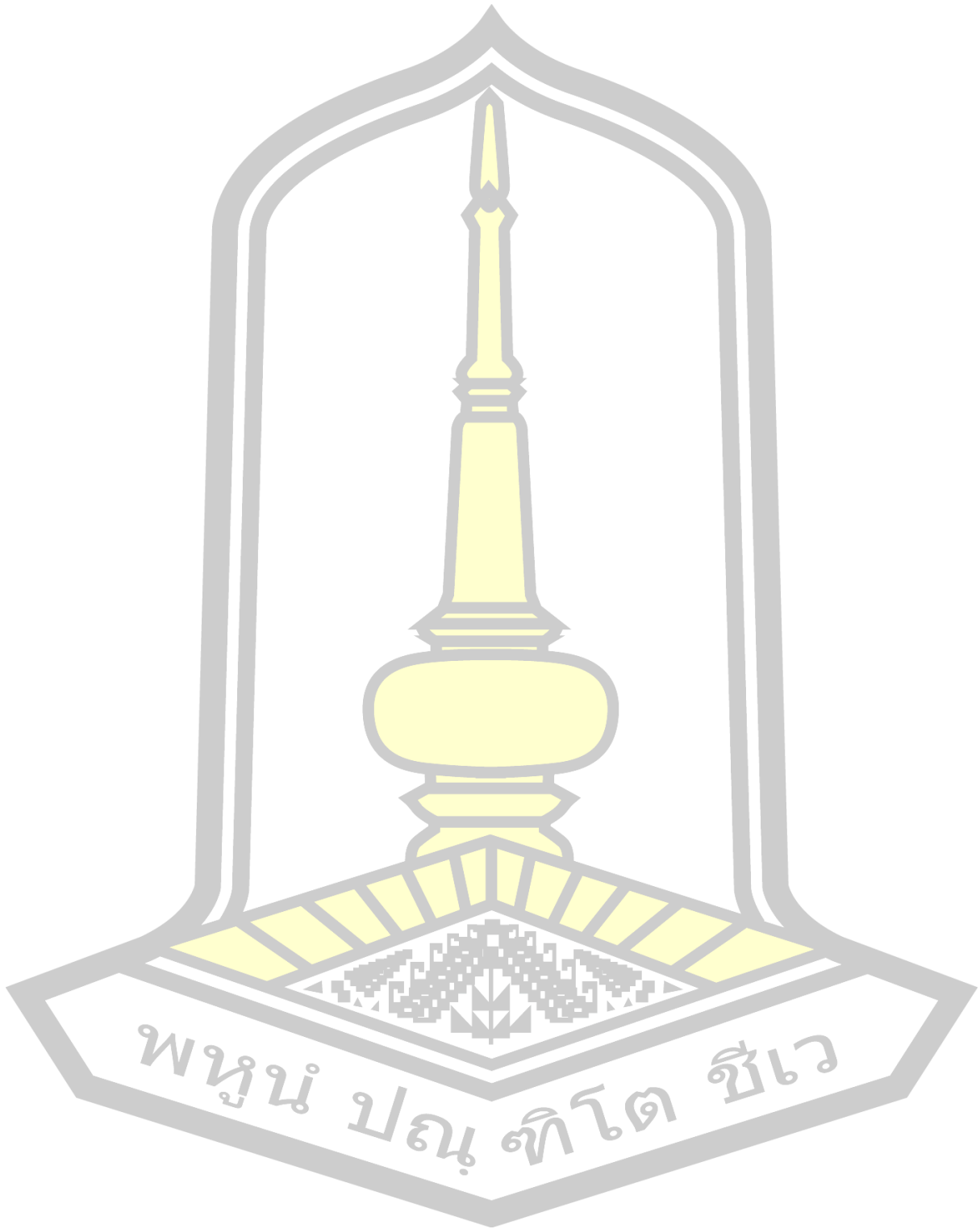
ผลการจำลองการประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดการประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล ด้วยวิธีที่นำเสนออัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี อีกทั้งแพคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก กฎการควบคุม และอัตราขยายพีไอดีของตัวควบคุมพีซีโลจิกพีไอดี พร้อมทั้งอัตราขยายของตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด สามารถออกแบบได้โดยอัตโนมัติด้วยวิธีฝูงผึ้ง ที่ปราศจากการลองผิดลองถูก หรือใช้ประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนออยู่นั้นนอกจากมีสมรรถนะที่สูงในการควบคุมความถี่แล้ว ยังมีความคงทนอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบอีกด้วย

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ใช้ปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมพีซีโลจิกพีไอดี และตัวควบคุมสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด สำหรับการควบคุมความถี่โหลดของระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล โดยใช้วิธีฝูงผึ้ง ซึ่งในงานวิจัยในอนาคต จะได้นำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดปัญหาอื่นๆ ต่อไป เช่น ระบบโรงไฟฟ้ากังหันลม-ดีเซล-ไฮโดร-เทอร์โมล-พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น และสามารถที่จะประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอุปกรณ์ขดเค็มมากกว่า 1 ตัว ทั้งแบบชนิดเดียวกัน และต่างชนิดกันได้



บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- [1] Blume, Steven W. "Electric power system basics for the nonelectrical professional". Hoboken. New jersey: John wiley & Son. Inc 2007.
- [2] Lui G, Xu Z, Huang W, and Pan W. "Analysis of inter-area oscillations in the south china interconnected power system". Electric power systems research 2004; 70: 38-45.
- [3] Rasmussen J, and Jorgensen P. "Synchronised phasor measurements of a power system event in eastern Denmark". IEEE Trans. Power Syst 2006; 21.
- [4] Ishimaru M, Yokoyama R, Neto M, and Lee K.Y. "Allocation and design of power system stabilizer for mitigating low-frequency oscillations in the eastern interconnected power system in Japan". Electrical power and energy system 2004; 26: 607-618.
- [5] Castellanos R, et al. "Use of power system stabilizer of the Mexican electrical grid". Electric power systems research 2006; 76: 169-179.
- [6] Chowdhury S, Chowdhury S.P., and Crossley P. "Microgrids and active distribution networks". Institution of engineering and technology. London: 2009.
- [7] Hatzigiorgiou N, Asono H, Iravani R, and Marnay C. "Microgrid". IEEE Power and Energy magazine 2008; 6: 78-94.
- [8] Lasseter R, et al. "Integration of distributed energy resources". The CERTS microgrid concept. Office of power technologies. London: April 2002.
- [9] Nikkhajoei H, Lasseter R.H. "Distributed generation interface to the CERTS microgrid". IEEE Trans. Power Delivery 2009; 24.
- [10] Jiayi H, Chuanwen J, and Rong X. "A review on distributed energy resources and microgrid". Renewable and sustainable energy reviews 2008; 12: 2472-2483.
- [11] Kruger P. "Alternative Energy Sources: The Quest for Sustainable Energy". Wiley 2006.
- [12] Pan C.T, Lai C.M. and Cheng M.C. "A Novel Integrated Single-Phase Inverter with Auxiliary Step-Up Circuit for Low-Voltage Alternative Energy Source Applications". IEEE Trans Power Electron 2010; 25(9): 2234-2241.
- [13] Yu F. R. Zhang P. Xiao W. and Choudhury P. "Communication Systems for Grid Integration of Renewable Energy Resources". IEEE Network 2011; 25(5): 22-29.

- [14] Wang K. Ciucu F. Lin C. and Low S. H. "A Stochastic Power Network Calculus for Integrating Renewable Energy Sources into the Power Grid". IEEE J. Sel. Areas Commun 2012; 30(6): 1037-1048.
- [15] Maisonneuve N. and Gross G. "A Production Simulation Tool for Systems with Integrated Wind Energy Resources". IEEE Trans. Power Syst 2011; 26(4): 2285-2292.
- [16] Niknam T. et al., "Impact of Heat, Power and Hydrogen Generation on Optimal Placement and Operation of Fuel Cell Power Plants". Int J Hydrogen Energy 2013; 38: 1111-1127.
- [17] Teleke S. et al., "Rule-Based Control of Battery Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Sources". IEEE Trans. Sustain. Energy 2010; 1(3): 117-124.
- [18] Zhu D. Glanzmann G.H. "Coordination of Storage and Generation in Power System Frequency Control using An  $H^\infty$  Approach". IET Gener. Transm. Distrib 2013; 7(11) : 1263-1271.
- [19] Jaleeli N, VanSlyck L.S, Ewart D.N, Fink LH, & Hoffmann AG. "Understanding automatic generation control". IEEE Trans Power Systems 1992; 7: 1106-1112.
- [20] Chang C.S, & Weihui Fu. "Area load-frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers". Electr. Power Syst. Res 1997; 42: 145-152.
- [21] Talaq J, & AL-Basri F. "Adaptive fuzzy gain scheduling for load frequency Control". IEEE Trans. Power Systems 1999; 14: 145-150.
- [22] Liu C.H, and Hsu Y.Y. "Design of a self-tuning PI controller for a STATCOM using particle swarm optimization". IEEE Trans. on Industrial electronics. 2010; 57.
- [23] Rao P, Crow M.L, and Yang Z. "STATCOM control for power system voltage control applications". IEEE Trans. Power Delivery. 2000; 15.
- [24] Na M.g. "Auto-tuned PID controller using a model predictive control method for the stream generator water level". IEEE Trans. on nuclear science. 2001; 48.
- [25] Gaing Z.L. "Aparticle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in VAR system". IEEE Trans. on energy conversion. 2004; 19.
- [26] El-Hawary M.E. "Electric power application of fuzzy systems". Wiley-IEEE press 1998.
- [27] Yesil E, Guzelkaya M, and Eksin Il. "Self tuning fuzzy PID type load and frequency controller". Energy conversion and management 2004; 45: 377-390.

- [28] Pothiya S. and Ngamroo I. "Optimal fuzzy logic-based PID controller for load-frequency control including superconducting magnetic energy storage units". *Energy Conversion and Management* 2008; 49: 2833-2838.
- [29] Su C, Hwung H, and Lii G. "Fuzzy logic based voltage control for a synchronous generator". *Electric power systems research* 1997; 41: 225-231.
- [30] Xiao C, Zhang L, and Yan J. "Fuzzy PID controller for wind turbines". *Second international conference on intelligent networks and intelligent systems* 2004.
- [31] ME. El-Hawary. "Electric power applications of fuzzy systems". New York: IEEE Press 1998.
- [32] Denna M. Mauri G. and Zanaboni A.M. "Learning fuzzy rules with tabu search an application to control". *IEEE Trans. On Fuzzy Systems* 1999; 7: 295-318.
- [33] Karaboga D. "Design of fuzzy logic controllers using tabu search algorithm". *Fuzzy Information Processing Society. NAFIPS. Biennial Conference of the North American* 1996; 489-491.
- [34] Karaboga D. "An idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization". *Technical Repor* 2005; Tr06t.
- [35] Devaraj D. and Selvabala B. "Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic approach for real-time tuning of proportional-integral-derivative controller in automatic voltage regulator system". *IET Gener. Transm. Distrib* 2009; 3(7) : 641-649.
- [36] Chih-Min Lin, Ming-Hung Lin, and Chun-Wen Chen, "SoPC-Based Adaptive PID Control System Design for Magnetic Levitation System". *IEEE SYSTEMS JOURNAL* 2011; 5(2) : 278-287.
- [37] Li Wang and Mi Sa-Nguyen Thi. "Stability Enhancement of a PMSG-Based Offshore Wind Farm Fed to a Multi-Machine System Through an LCC-HVDC Link". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS* 2013; 28(3) : 3327-3334.
- [38] Tarkeshwar and V. Mukherjee. "A novel quasi-oppositional harmony search algorithm and fuzzy logic controller for frequency stabilization of an isolated hybrid power system". *Electrical Power and Energy Systems* 2015; 66 : 247-261.
- [39] Chaiyatham T, and Ngamroo I. "A bee colony optimization based fuzzy logic PID control design of electrolyzer for microgrid stabilization". *International Journal of Innovative Computing. Information and Control* 2012; 8.
- [40] R.W. Boom and H. Perterson, "A Superconducting Energy Storage for Power Systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 701-703, 1972.

- [42] Byung M. Han, George G. Karady, "A New Power-Conditioning System for Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 2, 1993.
- [43] W. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No. 2, 1989.
- [44] Buckles, W.; Hassenzahl, W.V. "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Power Engineering Review Volume: 20 Page(s): 16 – 20, 2000.
- [45] Chung-Shih Hsu, Wei-Jen Lee, "Superconducting Magnetic Energy Storage for Power System Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 5, 1992.
- [46] L. Chen et al, "Detailed Modeling of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, 2006.
- [47] H.J Boenig, J.F. Hauer, "Commissioning Tests of the Bonneville Power Administration 30 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage Unit," IEEE Trans on Power Application Systems, vol.10, pp. 302–309, 1985.
- [48] M.G. Rabbani, J.B.X. Devotta, S. Elangovan, "An Adaptive Fuzzy Controlled Superconducting Magnetic Energy Storage Unit for Power Systems," Energy Conversion and Management, vol. 39, pp.931-942. 1998.
- [49] J.B.X. Devotta, M.G. Rabbani, "Application of Superconducting Magnetic Energy Storage Unit in Multi-Machine Power Systems," Energy Conversion and Management, vol. 41, pp. 493-504, 2000.
- [50] S.C. Tripathy, "Dynamic Simulation of Hybrid Wind-Diesel Power Generation System with Superconducting Magnetic Energy Storage," Energy Conversion and Management, vol.38 , pp.919-930, 1997.
- [51] I. Ngamroo, "An Optimization Technique of Robust Load Frequency Stabilizers for Superconducting Magnetic Energy Storage," Energy Conversion and Management, vol.46, pp.3060-3090, 2005.
- [52] X. Chu, X. Jiang, Y. Lai , X. Wu, W. Liu, "SMES Control Algorithms for Improving Customer Power Quality," IEEE Trans. Applied Superconductivity 2001, 11: 1769-1772.
- [53] Theerawut Chaiyatham, and Issarachai Ngamroo "Improment of power system transient stability fuzzy gain scheduling of PID controller ". IEEE System Journal 2014.

- [54] Sandip D, Shah et al. "Emission of regulate pollutants from in-use diesel back-up generators". Atmospheric environment 2006; 40: 4199-4209.
- [55] Kaldellis J.K. "An integrated model for performance simulation of hybrid wind diesel systems". Renewable of energy 2007; 32: 1544-1564.
- [56] Bhatti T.S, Al-Ademi A.A.F, and Bansal N.K. "Load-frequency control of isolated wind -diesel-micro hydro hybrid power systems (WDMHPS)". Int. J. energy 1997; 22 (5): 461-470.
- [57] Bhatti T.S, Al-Ademi A.A.F, and Bansal N.K. "Load-frequency control of isolated wind diesel hybrid power systems". Energy conversion and management 1997; 38 (9): 829-837.
- [58] Rerkpreedapong D. "Novel control design and strategy for load frequency control in restructured power systems". [Ph.D. Thesis]. West virginia: West virginia university; 2003.
- [59] รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ. "พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง". พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย; 2554.
- [60] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. "ระบบควบคุมพีไอดี". [online]. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2560.
- [61] Zadeh L.A. "Fuzzy set". Information and control 1965; 8: 338-353.
- [62] Mohan B.M. and Sinha A. "Analytical structures for fuzzy PID controllers". IEEE Trans. on fuzzy systems 2008; 8 : 52-60.
- [63] Mohan B.M. and Sinha A. "Analytical structures and stability analysis of fuzzy PID controller". Applied soft computer 2008; 16(1) : 749-758.
- [64] Mamdani E.H. "Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant". In Proc. IEE 1974; 121 (12): 1585-1588.
- [65] Li H. "A comparative design and tuning for conventional fuzzy control". IEEE Trans. on systems, man, and cybernetics-part B 1997; 27(5): 884-889.
- [66] Qiao W.Z. and Mizumoto M. "PID type fuzzy controller and parameter adaptive method". Fuzzy set and systems 1996; 78: 23-35.
- [67] Cavajal J. Chen G. and Ogmen H. "Fuzzy PID controller: Design performance evaluation and stability analysis". Information sciences 2000; 123: 249-270.
- [68] ศราวุธ โพธิยา. "เอกสารการสอน Optimization". มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- [69] พนิดา ศรีคชา. "การควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟuzzyโลจิก" [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2547.
- [70] พิพัฒน์ ดุรงค์ดำรงชัย. "ตัวควบคุมฟuzzyโลจิกพีไอดีที่เหมาะสมสำหรับระบบไฮโดร-เทอร์โมลโดยวิธีฟuzzy". [วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2557.

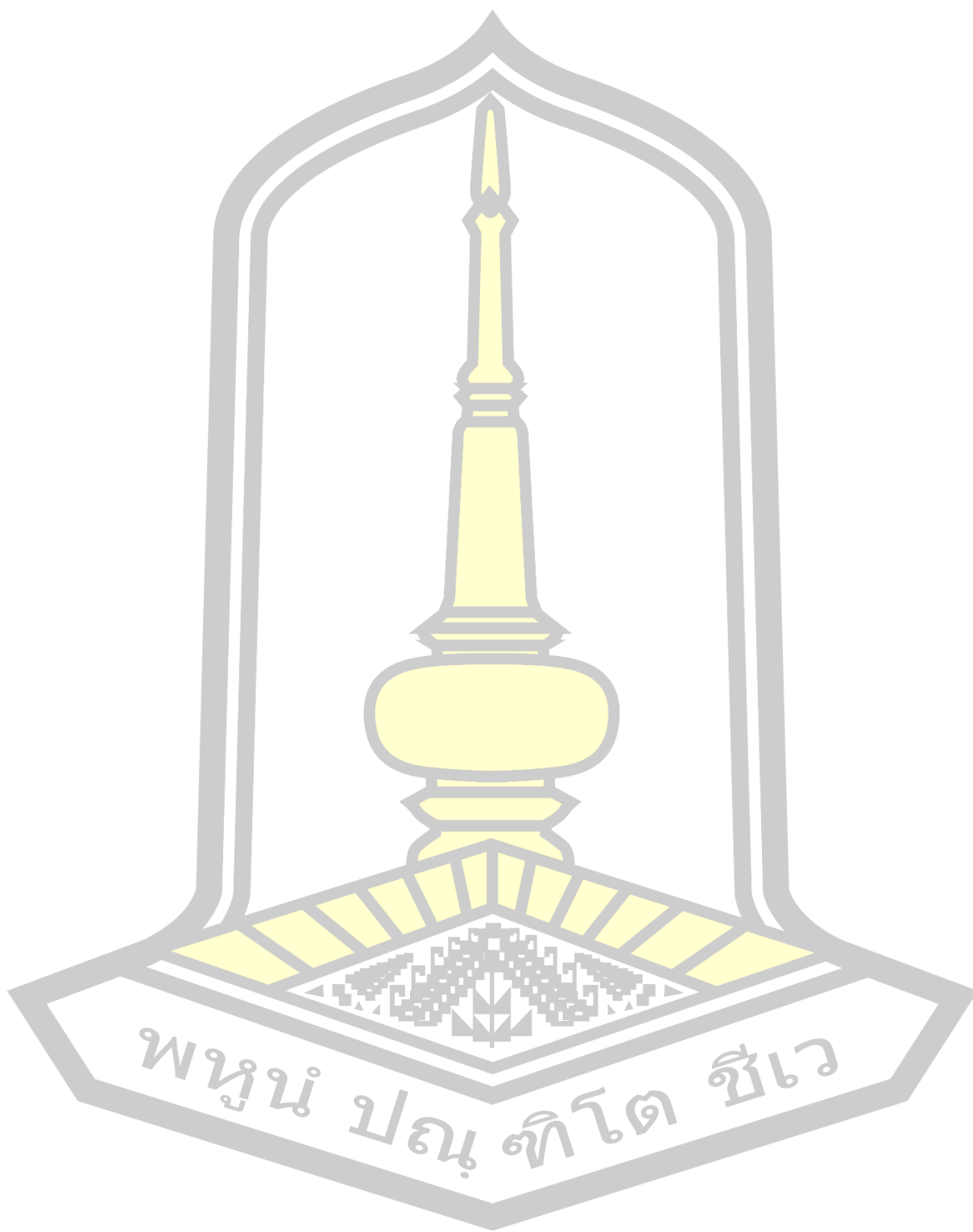
- [71] ชีรุตติ ไชยธรรม. “การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และอิเล็กทรอนิกส์ ร่วมกับการกำหนดอัตราขยายแบบฟัซซีเพื่อทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง”. [วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต]. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2557.
- [72] สุทธาวาส สุลเจริญ. "การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีฟัซซีปรับตัวได้เมื่อพิจารณาเงื่อนไขบังคับการปฏิบัติงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า" [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต] มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2559.
- [73] Worawat Sa-ngiamvibool. “Optimal Fuzzy Logic Proportional Integral Derivative Controller Design by Bee Algorithm for Hydro-Thermal Systems”. IEEE Trans. on Industrial Informatics 2017.
- [74] Mahto Tarkeshwar and Vivekananda Mukherjee. “Quasi-oppositional harmony search algorithm and fuzzy logic controller for load frequency stabilization of an isolated hybrid power system” . IET Gener. Transm. Distrib. 2015; 9, (5) : 427-444.
- [75] Tarkeshwar Mahto and V. Mukherjee. “Evolutionary optimization technique for comparative analysis of different classical controllers for an isolated wind–diesel hybrid power system”. Swarm and Evolutionary Computation. 2016; 26 : 120–136.
- [76] Tarkeshwar Mahto and V. Mukherjee. “A novel scaling factor based fuzzy logic controller for frequency control of an isolated hybrid power system”. Energy. 2017; 130 : 339-350.
- [77] Tarkeshwar Mahto and Vivekananda Mukherjee. “Fractional order fuzzy PID controller for wind energy-based hybrid power system using quasi-oppositional harmony search algorithm”. IET Gener. Transm. Distrib. 2017; 11 (13) : 3299-3309.
- [78] Somnath Ganguly, Tarkeshwar Mahto and V. Mukherjee. “Integrated frequency and power control of an isolated hybrid power system considering scaling factor based fuzzy classical controller”. Swarm and Evolutionary Computation. 2017; 32 : 184–201.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวิชาญ ศรีสุวรรณ
วันเกิด	25 ธันวาคม พ.ศ.2516
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดยโสธร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	456/269 หมู่บ้านพฤษภา ตำบลบ้านเป็ด อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2535 มัธยมศึกษาตอนปลาย (ม.6) โรงเรียนยโสธรพิทยาคม พ.ศ.2539 ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (อศ.บ.) สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พ.ศ.2550 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2562 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรม ไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทัโต ชีเว



พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว