

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีโลจิก-พีไอดีที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งเพื่อ
ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

DESIGN OF OPTIMAL FUZZY LOGIC-PID CONTROLLER USING BEE
COLONY OPTIMIZATION FOR POWER SYSTEM STABILIZATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-020-056

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งเพื่อ
ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

DESIGN OF OPTIMAL FUZZY LOGIC-PID CONTROLLER USING BEE
COLONY OPTIMIZATION FOR POWER SYSTEM STABILIZATION



T110281

จพ.
56497

เลขหมู่..... 2553
เลขทะเบียน 110281
วัน,เดือน,ปี. - 1 พ.ย. 2553

b. 10255129
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2010-EN-M-020-056 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DESIGN OF OPTIMAL FUZZY LOGIC-PID CONTROLLER USING BEE
COLONY OPTIMIZATION FOR POWER SYSTEM STABILIZATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของโรงเรียนเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMUTL-2010-EN-M-020-056



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ทรัพย์สินทางปัญญา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ โลจิก - พีไอดีที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

Thesis Title Design of Optimal Fuzzy Logic-PID Controller using Bee Colony Optimization for Power System Stabilization

นักศึกษา นายธีรวุฒิ ไชยธรรม

รหัสประจำตัว 51060214

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-020-056

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สมภพ	ผลไม่	
ผศ.ดร.สุรินทร์	คำผ้อย	
ดร.สมยศ	เกียรติวณิชวิไล	
ผศ.ดร.คุณย์พิเชษฐ์	ฤกษ์ปริควงศ์	
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรุ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่ม วันที่ 1 พฤษภาคม 2553
วันที่ 27 มีนาคม 2553
ไม่ส่งชื่อคือหนังสือ 53

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่
โดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of Optimal Fuzzy Logic-PID Controller using Bee Colony Optimization for Power System Stabilization
Student	Mr. Theerawut Chaiyatham
Student ID.	51060214
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ABSTRACT

This thesis presents a design of optimal fuzzy logic-PID (FLPID) controller using bee colony optimization (BCO) for power system stabilization. Normally, the structure of FLPID controller consists of scale factor, membership function and control rule. Accordingly, it is complex and difficult to design. Conventionally, the FLPID parameters are obtained by trial and error or experiences of designers. To tackle this problem, the BCO is applied to concurrently adjust all control parameters of FLPID controller. In order to demonstrate the performance of the proposed method, this thesis applies to three systems as follows. The first system is a frequency control in a hybrid wind-diesel generator. Next, the second system is a superconducting magnetic energy storage control for stabilization of inter-area oscillation. Finally, the third system is a power absorption control of aqua electrolyzer for alleviation of power fluctuation in a microgrid system. Simulation results exhibit that the performance of proposed method is superior to the conventional method under different system disturbances.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความกรุณาของ รศ.ดร.อิสระชัย งามทร อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. สราวุธ โพธิยา ที่ได้ช่วยเหลือ และคอยให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ แก่ข้าพเจ้า ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่าน ที่ได้ถ่ายทอด และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบาย และแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัย เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานแผนเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้แก่ข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการ Electrical Power Applications Research Laboratory (EPRL) ที่คอยให้คำแนะนำ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง พร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณค่า และประโยชน์อันใดที่ได้มาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่บิดา มารดาซึ่งเป็นที่ยรัก ครู อาจารย์ที่เคารพ และผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

ธีรวุฒิ ไชยธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 การควบคุมความถี่ในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และกังหันลม.....	3
1.1.2 การควบคุม SMES เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่.....	3
1.1.3 การควบคุม AE เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริด.....	4
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	5
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	7
บทที่ 2 ตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-พีไอดี และการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง.....	9
2.1 ฟuzzy โลกิก.....	10
2.2 ตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-พีไอดี.....	10
2.3 วิธีฝูงผึ้ง.....	14
2.3.1 ตัวอย่างการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง.....	18
2.4 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-พีไอดี ด้วยวิธีฝูงผึ้ง.....	21
2.5 สรุป.....	23
บทที่ 3 การควบคุมความถี่ในระบบไมโครกริดด้วยตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-พีไอดี ที่ออกแบบด้วยวิธีฝูงผึ้ง.....	24
3.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	24
3.2 การออกแบบตัวควบคุม.....	28

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ.....	32
3.4 สรุป.....	42
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-พีไอดีที่เหมาะสมสำหรับ SMES ด้วยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่.....	43
4.1 แบบจำลองของระบบ.....	43
4.1.1 แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้า.....	43
4.1.2 แบบจำลอง SMES.....	46
4.2 การออกแบบตัวควบคุม.....	50
4.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ.....	54
4.4 สรุป.....	65
บทที่ 5 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-พีไอดีสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ไลเซอร์โดยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไมโครกริด.....	66
5.1 แบบจำลองของระบบ.....	66
5.1.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	66
5.1.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	68
5.1.3 หลักการทำงาน และแบบจำลองของอิเล็กทรอนิกส์ไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง.....	70
5.2 การออกแบบตัวควบคุม.....	77
5.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ.....	80
5.4 สรุป.....	92
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	93
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	94
บรรณานุกรม.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	112



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กฎควบคุมของตัวควบคุมพีชชีโลจิก.....	14
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับแบบจำลองระบบ.....	28
3.2 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล และตัวควบคุมการบิดของใบพัด ด้านกึ่งหันลม.....	30
3.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับด้านดีเซล และกึ่งหันลม.....	32
3.4 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านดีเซล.....	32
3.5 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านกึ่งหันลม.....	32
3.6 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านดีเซล.....	33
3.7 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านกึ่งหันลม.....	34
4.1 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES.....	53
4.2 สถานะการทำงานในระบบที่ใช้ในการศึกษา.....	54
4.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม $K_P(s)$ ของ SMES.....	55
4.4 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม $K_Q(s)$ ของ SMES.....	55
4.5 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม $K_P(s)$ ของ SMES.....	56
4.6 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม $K_Q(s)$ ของ SMES.....	57
5.1 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	79
5.2 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	81
5.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	81
5.4 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	82
5.5 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟัซซี่.....	10
2.2 โครงสร้างการทำงานของฟัซซี่โลจิก.....	10
2.3 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี.....	11
2.4 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดี.....	12
2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก.....	14
2.6 แผนผังขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงผึ้ง.....	17
2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันที่ใช้ในการหาคำตอบ.....	18
2.8 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 1 ของวิธีฝูงผึ้ง.....	18
2.9 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 2 ของวิธีฝูงผึ้ง.....	19
2.10 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 3 ของวิธีฝูงผึ้ง.....	19
2.11 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 4 ของวิธีฝูงผึ้ง.....	19
2.12 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 5 ของวิธีฝูงผึ้ง.....	20
2.13 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 6 ของวิธีฝูงผึ้ง.....	20
2.14 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 8 ของวิธีฝูงผึ้ง.....	21
2.15 ตัวอย่างการหาคำตอบเมื่อสิ้นสุดการค้นหาค่าของวิธีฝูงผึ้ง.....	21
2.16 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก.....	22
2.17 โครงสร้างกฎควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดี.....	22
3.1 ระบบไมโครกริด.....	24
3.2 แบบจำลองของตัวบังคับความเร็ว และเครื่องยนต์ดีเซล.....	25
3.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม.....	27
3.4 แบบจำลองการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และกังหันลม.....	27
3.5 ตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล.....	28
3.6 ตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกังหันลม.....	28
3.7 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล.....	29
3.8 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกังหันลม.....	30
3.9 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านดีเซลเทียบกับค่าเริ่มต้น.....	33
3.10 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านกังหันลมเทียบกับค่าเริ่มต้น.....	34
3.11 ผลตอบสนองของความเร็วระบบในกรณีที่ 1.....	35

เอกสาร 3.12 ผลการทดสอบความมั่งคั่งของค่าพู่กันในกรณีที่ 1 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ผลการทดสอบความคงทนของ IAE ในกรณีที่ 1.....	36
3.14 ผลตอบสนองของควมถี่ระบบในกรณีที่ 2	37
3.15 ผลการทดสอบความคงทนของค่าพุงเกินในกรณีที่ 2	37
3.16 ผลการทดสอบความคงทนของ IAE ในกรณีที่ 2	38
3.17 การเปลี่ยนแปลงของโพลในกรณีที่ 3.....	39
3.18 ผลตอบสนองของควมถี่ระบบในกรณีที่ 3.....	39
3.19 การเปลี่ยนแปลงของกำลังสมในกรณีที่ 4.....	40
3.20 ผลตอบสนองของควมถี่ระบบในกรณีที่ 4.....	40
3.21 การเปลี่ยนแปลงของโพลในกรณีที่ 5.....	41
3.22 การเปลี่ยนแปลงของกำลังสมในกรณีที่ 5.....	41
3.23 ผลตอบสนองของควมถี่ระบบในกรณีที่ 5.....	42
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบ 4 เครื่องจักรเชื่อมโยงกัน 2 พื้นที่.....	43
4.2 แบบจำลองระบบตัวกระตุ้น.....	45
4.3 แบบจำลองระบบตัวบังคับ.....	45
4.4 ลักษณะ โครงสร้างของ SMES.....	47
4.5 ลักษณะการทำงานของการสะสมพลังงานแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด.....	48
4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES	48
4.7 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ SMES.....	51
4.8 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES.....	51
4.9 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ SMES.....	52
4.10 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES.....	52
4.11 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม $K_P(s)$ ของ SMES เทียบกับค่าเริ่มต้น.....	55
4.12 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม $K_Q(s)$ ของ SMES เทียบกับค่าเริ่มต้น.....	56
4.13 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 1.....	58
4.14 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 1	58
4.15 กระแสขดลวดของ SMES ในกรณีที่ 1.....	59
4.16 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 2.....	60
4.17 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 2	60
4.18 กระแสขดลวดของ SMES ในกรณีที่ 2.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 3.....	62
4.20 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 3.....	62
4.21 กระแสขดลวดของ SMES ในกรณีที่ 3.....	63
4.22 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 4.....	64
4.23 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 4	64
4.24 กระแสขดลวดของ SMES ในกรณีที่ 4	65
5.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา.....	66
5.2 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	67
5.3 แบบจำลองระบบตัวกระตุ้น.....	69
5.4 แบบจำลองระบบตัวบังคับ.....	69
5.5 ลักษณะการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์.....	71
5.6 ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	73
5.7 โครงสร้างการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ และเซลล์เชื้อเพลิง.....	74
5.8 แบบจำลอง AE และ FC พร้อมด้วยตัวควบคุม P และ Q.....	75
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในถัง และเอาต์พุตของ FC.....	76
5.10 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	77
5.11 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	77
5.12 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	78
5.13 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	78
5.14 กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในระบบไมโครกริด.....	81
5.15 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น.....	82
5.16 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น.....	83
5.17 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1.....	84
5.18 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1.....	84
5.19 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 1.....	85
5.20 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 1.....	85
5.21 ปริมาณไฮโดรเจนที่ AE ผลิตได้ในกรณีที่ 1.....	86
5.22 ปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปใช้ในกรณีที่ 1.....	87

เอกสาร 5.23 ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือในถังในกรณีที่ 1..... 87

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2.....	88
5.25 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2.....	88
5.26 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	89
5.27 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	89
5.28 ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของโหลด.....	90
5.29 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3.....	90
5.30 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3.....	91
5.31 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 3.....	91
5.32 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 3.....	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฟฟ้า มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และยังเป็นปัจจัยหลักต่อการเจริญก้าวหน้าในการพัฒนาประเทศ ทำให้ความต้องการในการใช้ไฟฟ้านั้นเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้การผลิตกำลังไฟฟ้านั้นเพียงพอต่อความต้องการ การเชื่อมโยงระบบกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ (Interconnected power system) [1] ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย [2-5] ด้วยเหตุผลที่ว่า ระบบไม่เพียงแต่สามารถที่จะช่วยกันจัดส่งกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลดเท่านั้น แต่ยังสามารถที่จะเพิ่มความน่าเชื่อถือทางด้านเศรษฐศาสตร์ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้ากำลังนี้อาจจะก่อให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ (Inter-area oscillation) และส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบหากเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด หรือเกิดความผิดปกติ (Fault) อาจจะทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ และส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับได้ นอกจากนี้ วิกฤตการณ์ด้านพลังงานในการนำมาผลิตไฟฟ้า ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม หรือแม้กระทั่งการลงทุนติดตั้งระบบจำหน่ายไปยังหมู่บ้าน หรือชุมชนที่อยู่ห่างไกลจากระบบที่กล่าวมานั้น แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed generation) [6] เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการนำมาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากสามารถลดปริมาณการสูญเสียพลังงานในการส่งกำลังไฟฟ้า โดยให้แหล่งผลิตไฟฟ้าอยู่ใกล้กับแหล่งที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถที่จะลดขนาด และจำนวนของการสร้างสายส่งไฟฟ้าได้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้วแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลายๆ ชนิด เช่น กังหันลม (Wind turbine) กังหันก๊าซ (Gas turbine) กังหันขนาดเล็ก (Micro-turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel generator) การผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) และเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นต้น เพื่อช่วยกันจ่ายโหลดในระบบเล็กๆ ระบบไฟฟ้ากำลังแบบนี้เรียกว่า ระบบไมโครกริด [7-10] การแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีผลมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานที่ไม่แน่นอนและไม่ต่อเนื่องอย่างเช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่มีคุณภาพ เช่น มีการแกว่งของความถี่ หรือมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องใช้ไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ในการช่วยปรับปรุงเพื่อให้ระบบนั้นยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้

ในอดีตที่ผ่านมาตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อปรับปรุง

เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนใหญ่จะเป็นแบบ ตัวควบคุมพีไอ (Proportional integral: PI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11, 12] และตัวควบคุมพีไอดี (Proportional integral derivative: PID) [13, 14] เนื่องจากออกแบบง่าย ราคาถูก อย่างไรก็ตามตัวควบคุมเหล่านี้ไม่เหมาะกับระบบที่มีอันดับสูงๆ (High-order) ระบบที่มีเวลาหน่วง (Time-delay) ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ (High-nonlinear system) และระบบที่มีความซับซ้อนมากๆ

เมื่อไม่นานมานี้ ตัวควบคุมแบบฟัซซีโลจิก-พีไอดี (Fuzzy logic-PID: FLPID) [15] มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบการควบคุมต่างๆ เช่น ระบบควบคุมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิต (Static var compensator) [16] ระบบควบคุมความถี่โหลด (Load frequency control) [17] ระบบการควบคุมแรงดันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Voltage control for a synchronous generator) [18] ระบบการใช้เหตุผลความเร็วสำหรับเซอร์โวมอเตอร์ กระแสตรง (Accelerated reasoning for d.c. servo motors) [19] ระบบการควบคุมกังหันลม [20] การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีสมรรถนะสูง (High performance motor drives) [21] และระบบควบคุมการระบบความร้อนของเครื่องปรับอากาศ (Heating ventilating and air-conditioning system) [22] เป็นต้น แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FLPID มีอยู่จำนวนมาก และมีความซับซ้อนทำให้ยากต่อการออกแบบ ทั้งในส่วนของ แฟกเตอร์สัดส่วน (Scale factor) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) และกฎควบคุม (Control rule) ทำให้การออกแบบโดยทั่วไปแล้วจะอาศัยการลองผิดลองถูก (Trial and error) หรืออาศัยความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ทำให้การควบคุมเหล่านี้มีสมรรถนะไม่ดีเท่าที่ควร

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุม FLPID ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง [23] ที่เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของผึ้งตามธรรมชาติ โดยในการออกแบบนั้นจะทำการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุม FLPID ทั้งหมดพร้อมกันภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด ในการศึกษาครั้งนี้ การออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุม FLPID ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งที่นำเสนอ ได้นำไปประยุกต์ใช้กับระบบ 3 ระบบคือ 1.การควบคุมความถี่ในระบบไมโครกริดที่ประกอบไปด้วยการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม 2.การควบคุมการทำงานของตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด (Superconducting magnetic energy storage: SMES) เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ในระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่องจักรเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่ และ 3.การควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ อิเล็กโทรไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) ในการผลิตไฮโดรเจน เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริด รายละเอียดของที่มา และความสำคัญของปัญหาสำหรับในแต่ละระบบที่นำมาประยุกต์ใช้ได้แบ่งแยกการอธิบายดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.1 การควบคุมความถี่ในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และกังหันลม

ปัจจุบันวิกฤตด้านพลังงานส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของประชาชน และประเทศชาติ ดังนั้นรัฐบาลจึงได้มีนโยบายให้นำเอาพลังงานทดแทน (Renewable energy) ทางเลือกอื่น เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ มาเป็นแหล่งกำเนิดในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันรูปแบบระบบไฟฟ้าแบบไมโครกริด [7-10] ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูง โดยทั่วไปแล้วระบบไมโครกริดประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ตัวเก็บสะสมพลังงาน และโหลด ระบบไมโครกริดสามารถนำมาใช้จ่ายไฟให้กับตึกสำนักงาน โรงงาน ศูนย์การค้า เป็นต้น นอกจากนี้ ไมโครกริดสามารถทำงานได้ทั้งเมื่อต่อกับกริดของการไฟฟ้า (Utility grid) หรือเมื่อแยกตัวออกมาเป็นอิสระ (Isolated operation) [24] โดยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระ ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และดีเซลทำงานร่วมกัน [25, 26] เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด หรือความไม่สม่ำเสมอของกำลังลม จะทำให้เกิดการแกว่งของความถี่ของระบบอย่างรุนแรงจึงจำเป็นต้องพิจารณาตัวควบคุมที่เหมาะสมมาติดตั้งเพื่อลดการแกว่งความถี่ของระบบ ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการควบคุมความถี่โดยใช้ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมสำหรับ การควบคุมการบิดของใบพัด (Blade pitch control) ในด้านกังหันลม และตัวบังคับความเร็ว (Speed governor) ในด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดีเซล [26] และตัวควบคุมความถี่แบบพีซีโลจิก [27] โดยการตั้งค่าฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมแบบลองผิดลองถูก หรือใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบ เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีซีโลจิก-พีไอที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy สำหรับควบคุมการบิดของใบพัดในด้านกังหันลม และตัวบังคับความเร็วในด้านดีเซล เพื่อควบคุมความถี่ของระบบไมโครกริดที่แยกอิสระ การจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีซีโลจิก-พีไอที่ออกแบบมานั้น นอกจากจะมีสมรรถนะในการควบคุมความถี่แล้วยังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบได้ดีกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบทั้งแบบพีไอ และตัวควบคุมพีซีโลจิกที่ยังไม่ได้ทำให้เหมาะสม

1.1.2 การควบคุม SMES เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่

ระบบกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันได้มีการเชื่อมโยงเข้าหากันระหว่างพื้นที่ เนื่องจากไม่เพียงแต่ช่วยส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลดเท่านั้น แต่ยังสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือในด้านเศรษฐศาสตร์ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการเชื่อมโยงนี้อาจทำให้เกิดปัญหาของโหมดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำระหว่างพื้นที่ (Inter-area low frequency oscillation mode) ก่อให้เกิดคุณลักษณะของการหน่วงที่ไม่ดี [28] จึงมีโอกาที่จะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ หากมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด หรือเกิดความผิดปกติขึ้น เพื่อ

แก้ปัญหาดังกล่าว SMES [29-31] เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติของ SMES สามารถจ่าย หรือรับ ได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้พร้อมกัน โดยการทำงานของ SMES จะรับเอากำลังไฟฟ้ามาสะสมเป็นพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวด และจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกไปยังระบบอย่างรวดเร็วเพื่อลดทอน หรือชดเชยตามการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในระบบ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชีโลจิก -พีไอดีที่ออกแบบพารามิเตอร์ควบคุมให้มีความเหมาะสมทั้งหมดพร้อมกันด้วยวิธีฟuzzy เพื่อควบคุมการรับ หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES โดยผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า SMES ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้น สามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบได้เหนือกว่า วิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองการเกิดสิ่งรบกวนที่แตกต่างกัน

1.1.3 การควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

ในปัจจุบัน พลังงานทดแทนได้มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะพลังงานที่มาจากลม และแสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้มาจากธรรมชาติ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย จึงทำให้เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ประโยชน์ โดยพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถที่จะนำไปผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันขนาดเล็ก (Micro-turbine generator) ในรูปแบบของระบบไมโครกริด [7,8,32,33] เพื่อช่วยในการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด เช่น ชุมชนที่อยู่ห่างไกลที่ไม่ได้รับการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำไปผลิตไฟฟ้าให้กับระบบการผลิตไฮโดรเจน [34-36] โดยอาศัยหลักการทำงานของ อิเล็กโทรไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) ที่สามารถรับกำลังไฟฟ้าไปผลิตเป็นไฮโดรเจนได้ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้กับ เซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตเป็นกำลังไฟฟ้า [37-39] หรือเป็นเชื้อเพลิงให้กับยานพาหนะ [40, 41] เป็นต้น หลายบทความได้มีการพัฒนาด้วยการนำเอา ระบบการผลิตไฮโดรเจน เข้ามาติดตั้งในระบบไมโครกริด [42-44] โดยใช้ตัว AE รับกำลังไฟฟ้าเข้ามาผลิตเป็นไฮโดรเจนแล้วนำไฮโดรเจนที่ได้ไปสะสมไว้ในถังเก็บ เพื่อจ่ายเป็นเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิงผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าไปให้ระบบไมโครกริด

การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของพลังงานลม หรือพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้ไม่คงที่ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบนั้นเกิดการแกว่งขึ้น และอาจจะส่งผลเสียต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าได้ หลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้อุปกรณ์สะสมพลังงานมาติดตั้งในระบบ เช่น แบตเตอรี่ [45, 46] หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SMES [47] เป็นต้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เหล่านี้มีการลงทุนสูงทั้งในการติดตั้ง และการดูแลรักษา อีกทั้งในด้านของ แบตเตอรี่ยังมีอายุการใช้งานน้อย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของตัว AE ด้วยตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-ฟuzzy ใตติ ที่ออกแบบพารามิเตอร์ ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าภายในระบบ ไมโครกริดที่เกิดจากการ เปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจาก AE มีสมรรถนะในการรับกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วในการผลิต ไฮโดรเจน การจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นว่า การควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ใน การผลิตไฮโดรเจนด้วยตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-ฟuzzy ใตติ ที่ออกแบบให้เหมาะสมดังที่นำเสนอ นั้น ไม่ เพียงแต่สามารถที่จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบ ไมโครกริดเท่านั้น แต่ยังสามารถที่จะผลิต ไฮโดรเจน ได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกัน อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษารออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-ฟuzzy ใตติให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูง ผึ้ง โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-ฟuzzy ใตติให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง
2. เพื่อประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมความถี่ของระบบ ไมโครกริดแบบแยก อิสระที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และเซลล์ทำงานร่วมกัน
3. เพื่อประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมการทำงานของ SMES เพื่อที่จะลดการ แกว่งกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ ในระบบที่มีเครื่องกำเนิด 4 เครื่องจักรเชื่อมต่อกัน 2 พื้นที่
4. เพื่อประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าไปผลิต ไฮโดรเจนของ AE เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ไมโครกริด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โลกิก-ฟuzzy ใตติให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีสมมติฐานของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. สามารถที่แทนระบบที่ใช้ศึกษาในการควบคุมความถี่ด้วยระบบเชิงเส้นได้ เนื่องจาก สมมติว่าสิ่งที่มารบกวนระบบมีขนาดเล็กเพียงพอ ทำให้ตัวแปรสถานะในระบบนั้น เปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ จนถือว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นได้
2. แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้า สามารถที่ จะลดอันดับลงมาให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบ โดยในที่นี้จะไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผลของชุดขดลวดตัวหน่วง (Damper winding) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในชั่วครู่ย่อย (Sub-transient internal electro-motive force) เนื่องจากมีผลตอบสนองที่เร็วมากกว่าโหมคการแกว่งระหว่างพื้นที่

3. แบบจำลองของระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์สามารถที่จะจำลองด้วยแหล่งจ่ายสัญญาณที่ไม่สม่ำเสมอได้ เนื่องจากต้องการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่เท่านั้น
4. เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์โวลเทจอร์มีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่เร็วกว่าโหมคการแกว่งของกำลังไฟฟ้า จึงสมมติได้ว่าจะสามารถควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์โวลเทจอร์เพื่อทำเสถียรภาพได้

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษา และการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีไอดีให้เหมาะสมด้วยวิธีฟูฟ่งฟูฟ่งเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ได้ทฤษฎี หรือแนวความคิดมาจากงานวิจัยหลายๆ ด้านในอดีต ประกอบไปด้วยผลงานด้านวิชาการต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ทฤษฎีฟuzzy โฟจิก-พีไอดี

ปี ค.ศ.1965 L. A. Zadeh [48] ได้คิดค้น และนำเสนอผลงานของฟuzzy โฟจิก ว่าเป็นตรรกะที่อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริง ทุกสิ่งบน โลกแห่งความเป็นจริง ไม่ใช่มีเฉพาะสิ่งมีความแน่นอนเท่านั้น แต่มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยง และไม่แน่นอน อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือและไม่ชัดเจน

ปี ค.ศ. 1974. E. H. Mamdani [49] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ฟuzzy โฟจิกในการควบคุมครั้งแรก ส่งผลให้หลังจากนั้น ได้มีการประยุกต์ใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน

ปี ค.ศ. 1997. H. Li [50] ได้นำเสนอถึงการเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างการทำงานของฟuzzy โฟจิกในรูปแบบของ PD และ PID เพื่อให้ตัวควบคุมฟuzzy โฟจิกนั้นมีสมรรถนะเหมือนกับตัวควบคุม PD และ PID

2. ทฤษฎีวิธีฟูฟ่งฟูฟ่ง

ปี ค.ศ. 2006. D.T. Pham [51] ได้นำเสนอเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟูฟ่งฟูฟ่ง ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่เลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของฝูงในธรรมชาติ โดยประยุกต์ใช้ในการหาค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนหลายสมการ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นที่มีอยู่ .

จากหลักการที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังหลายระบบ โดยได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดี ให้เหมาะสมด้วยวิธีฟูล์ฟูล์ง เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ในการออกแบบจะทำการออกแบบ 3 ส่วนคือ แพลตฟอร์คส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ให้มีความเหมาะสมพร้อมกัน ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดตามระบบที่ทำการทดสอบ ภายใต้ระบบปฏิบัติการของโปรแกรม MATLAB และ Dymola ร่วมกับ Object Stab [52] ระบบที่ได้ทำการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. ทำการออกแบบตัวควบคุมของตัวบังคับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม เพื่อลดการแกว่งของความเร็วในระบบไมโครกริดที่แยกอิสระ

2. ทำการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES เพื่อลดการแกว่งของผลต่างความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ 1 และพื้นที่ 2 ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิด 4 เครื่องจักรเชื่อมโยงกันสองพื้นที่

3. ทำการออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในการรับกำลังไฟฟ้าไปผลิตไฮโดรเจน เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายส่งที่จ่ายไปยังโหลด

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอน และรายละเอียดต่างๆ แบ่งออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงโครงสร้าง และส่วนประกอบของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดี พร้อมทั้งหลักการ และขั้นตอนการทำงาน วิธีฟูล์ฟูล์ง และได้กล่าวถึงวิธีการประยุกต์ใช้วิธีฟูล์ฟูล์งในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดี

บทที่ 3 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมความเร็วในระบบไมโครกริดแบบทำงานแยกอิสระที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมทำงานร่วมกัน

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกัน 2 พื้นที่ 4 เครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในการผลิตไฮโดรเจน เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดที่ทำงานแยกอิสระ

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

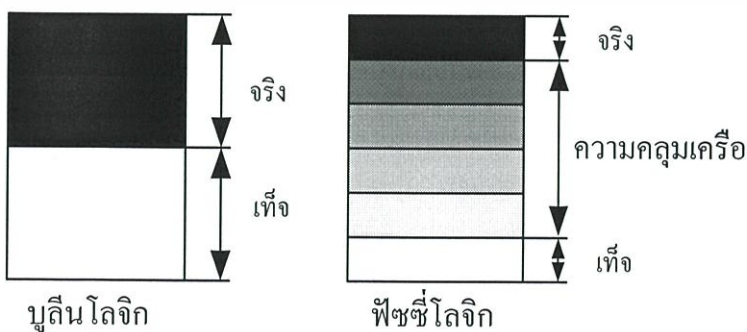
ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก-พีไอดี และการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

ในบทนี้ อธิบายโครงสร้าง และการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก-พีไอดี และการออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก-พีไอดี จะมีส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วนคือ แพลตฟอร์มตัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ส่วนประกอบเหล่านี้มีความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบจะอาศัยผู้เชี่ยวชาญหรือการลองผิดลองถูก ทำให้ผลที่ได้ออกมาไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีค่าที่เหมาะสม วิธีฝูงผึ้งจึงได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้

2.1 ฟัซซี่ลอจิก

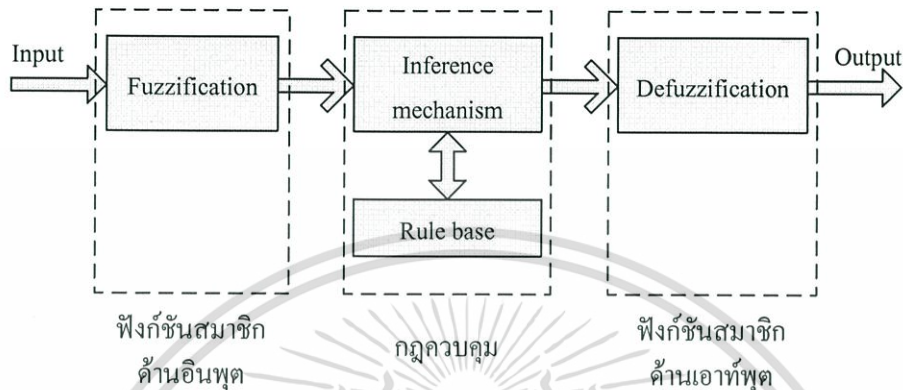
ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy logic) พัฒนาจากฟัซซี่เซต (Fuzzy set) โดยเป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณ ซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะ ถูก/ผิด ใช่/ไม่ใช่ ของตรรกศาสตร์แบบฉบับ (Classical logic) ฟัซซี่ลอจิกนั้นถือเป็นการประยุกต์ใช้งานเพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญต่อปัญหาที่ซับซ้อน ค่าระดับความจริงในตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นมักจะสับสนกับค่าความน่าจะเป็น ซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน ค่าระดับความจริงคลุมเครือนั้นใช้ในการระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซต (Set membership) แต่ค่าความน่าจะเป็นนั้นระบุความเป็นไปได้ของสภาพการณ์แต่ละรูปแบบที่อาจจะเกิดขึ้น

ฟัซซี่ลอจิก สามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตด้วยค่าระหว่างศูนย์ ถึงหนึ่ง ที่พิเศษกว่าตรรกะแบบเท็จจริง (Boolean logic) ตรงที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟัซซี่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริง (1) กับเท็จ (0) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองระดับด้วยคำพูดที่ว่า "เล็กน้อย" "ค่อนข้าง" หรือ "มาก" โดยใช้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตบางส่วน ฟัชชีโลจิกมีความสัมพันธ์กับ ฟัชชีเซต และทฤษฎีความเป็นไปได้ ซึ่งคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1965 โดย L.A. Zadeh [48]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการทำงานของฟัชชีโลจิก

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการทำงานของฟัชชีโลจิก สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ฟัชชีฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นการทำหน้าที่แปลงข้อมูลอินพุตให้อยู่ในรูปแบบแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัชชี ด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุต

ขั้นตอนที่ 2 กลไกอนุมาน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริง และกฎ เพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ปัญหา รวมทั้งกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 3 ฐานความรู้ เป็นส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา

ขั้นตอนที่ 4 ดีฟัชชีฟิเคชัน (Defuzzification) ทำหน้าที่แปลงตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัชชีที่ได้มาจากกลไกอนุมานให้เป็นเอาต์พุตจริงสำหรับกระบวนการของระบบด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุต

2.2 ตัวควบคุมฟัชชีโลจิก-พีไอดี

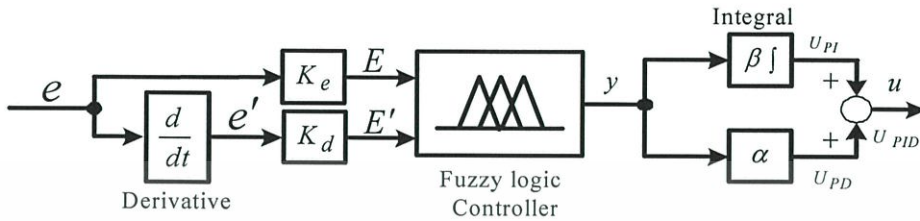
โดยทั่วไปแล้ว ตัวควบคุมพีไอดี (Proportional-integral-derivative: PID) ดังแสดงในรูปที่

2.3 เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก ออกแบบได้ง่าย ราคาถูก และมี

ประสิทธิภาพสำหรับระบบที่มีความเป็นเชิงเส้น (Linear system) หรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
มากนัก โดยสามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปของโดเมนทางเวลาได้ดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 ฟัซซี่ลอจิก-พีไอคือที่นำเสนอนี้มาจากโครงสร้างของฟัซซี่ลอจิก-พีไอ และฟัซซี่ลอจิก-พีดี [50] สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ แพลตฟอร์ม ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม โดยในส่วนของ ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมจะเป็นกระบวนการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก-พีไอ

เมื่อ

- e คือ ค่าอินพุตของตัวควบคุม
- e' คือ ค่าอนุพันธ์ของอินพุตของตัวควบคุม
- K_e, K_d, β และ α คือ แพลตฟอร์ม
- y คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก
- U_{PI} คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก-พีไอ
- U_{PD} คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก-พีดี
- u หรือ U_{PID} คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก-พีไอ

โดยสัญญาณควบคุม u สามารถหาได้จาก

$$u = \alpha y + \beta \int y dt \quad (2.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกประเภท Product-sum ที่ได้แสดงไว้ใน [55] สามารถที่จะแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$y = A + BE + DE' \quad (2.3)$$

โดยที่ $E = K_e e$ และ $E' = K_d e'$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถหาเอาต์พุตของตัวควบคุม ได้ดังนี้

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

$$u = \alpha A + \beta A t + \alpha K_e B e + \beta K_d D e + \beta K_e B \int e dt + \alpha K_d D e' \quad (2.4)$$

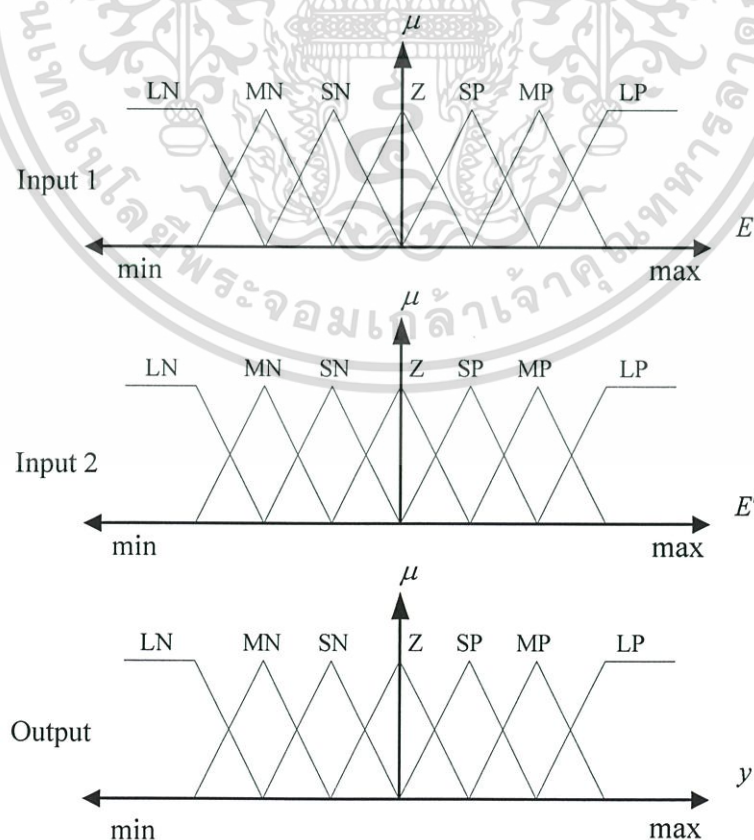
ดังนั้นตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี จากสมการที่ (2.4) สามารถหาองค์ประกอบของอัตราขยายทั้ง 3 ของตัวควบคุมพีไอดีดังแสดงในสมการที่ (2.1) ได้จาก

$$\text{อัตราขยายสัดส่วน } (K_P) = \alpha K_e B + \beta K_d D$$

$$\text{อัตราขยายปริพันธ์ } (K_I) = \beta K_e B$$

$$\text{อัตราขยายอนุพันธ์ } (K_D) = \alpha K_d D$$

ตัวควบคุมพีชชีโลจิกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วย 3 ฟังก์ชันสมาชิก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แยกเป็น 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต แต่ละสมาชิกประกอบไปด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู 2 ตัว และสามเหลี่ยม 5 ตัว และกฎควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยกฎควบคุมเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตทั้งสอง และผลที่ได้เป็นเอาต์พุต โดยกฎควบคุมนี้ได้สร้างจากข้อกำหนดที่ว่า “If input 1 and input 2 then output” ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ เช่น อินพุต 1 แถวที่ 3 คือ SN และอินพุต 2 คอลัมน์ที่ 4 คือ Z จะได้เอาต์พุต เป็น SP เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีโลจิก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 กฎควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy โลกิก

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	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)

SP คือ สัญญาณขนาดเล็กด้านบวก (Small positive)

MP คือ สัญญาณขนาดกลางด้านบวก (Medium positive)

LP คือ สัญญาณขนาดใหญ่ด้านบวก (Large positive)

2.3 วิธีฝูงผึ้ง

วิธีฝูงผึ้ง (Bee colony optimization: BCO) [23] ได้คิดค้นมาจากการเลียนแบบพฤติกรรม การหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ โดยผึ้งตามธรรมชาตินั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท หลักๆ ด้วยกัน คือ ผึ้งสำรวจ หรือผึ้งสอดแนม (Scout bee) และผึ้งงาน (Employed bee) สำหรับผึ้งสำรวจแต่ละตัว จะทำหน้าที่ออกสำรวจหาแหล่งอาหาร เช่น น้ำหวานจากผลไม้ หรือน้ำหวานจาก เกสรดอกไม้ เป็นต้น เมื่อพบแหล่งของอาหารเหล่านั้นแล้ว ผึ้งสำรวจจะทำการประเมินคุณภาพ ของอาหาร เช่น ปริมาณความหวาน แล้วไปที่เวทีสำหรับเต้นรำ (Dance floor) จากนั้นทำการ แสดงที่เรียกกันว่า การเต้นแบบส่ายไป-มา (Waggle dance) [60] พฤติกรรมการเต้นนี้ เปรียบเสมือนเป็นภาษาของผึ้ง และเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของการติดต่อสื่อสารในฝูง

เพื่อที่จะช่วยให้ผึ้งได้พบแหล่งอาหารที่เหมาะสม และสามารถส่งผึ้งงานออกไปเก็บน้ำหวาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ครงที่ผึ้งสำรวจหาเอาไว้ได้อย่างถูกต้อง ส่วนหน้าที่ของผึ้งงานก็จะออกไปเก็บอาหารในบริเวณที่
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผึ้งสำรวจหาเอาไว้แล้วนำกลับมาที่รัง โดยจะออกไปเก็บอาหารเฉพาะในส่วนที่มีคุณภาพของอาหารที่ดีเท่านั้น ซึ่งทำการพิจารณาโดยผึ้งสำรวจ และบริเวณแหล่งอาหารที่มีคุณภาพของอาหารสูงจะส่งผึ้งงานนั้น ไปมากกว่าบริเวณแหล่งอาหารที่มีคุณภาพน้อยเพื่อที่จะได้อาหารที่คืนนั่นเอง

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า วิธีฝูงผึ้งนั้นเป็นวิธีการที่เลียนแบบการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีองค์ประกอบในวิธีฝูงผึ้งคล้ายกับผึ้งตามธรรมชาติ และองค์ประกอบเหล่านี้จำเป็นที่จะต้องกำหนดให้กับวิธีฝูงผึ้ง โดยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

จำนวนผึ้งสำรวจ แทนด้วย n

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย m

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก m แทนด้วย e

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ e แทนด้วย ne

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ $m-e$ แทนด้วย ns

ขนาดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงคำตอบ (Neighborhood) ของ m แทนด้วย ngh

จำนวนรอบของการค้นหา (Iteration) แทนด้วย NC

โดยขั้นตอนของกระบวนการทำงานของวิธีฝูงผึ้งดังที่ได้แสดงไว้รูปที่ 2.6 สามารถอธิบายรายละเอียดเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ให้ผึ้งสำรวจจำนวน n ตัว สุ่มหาค่าเริ่มต้น โดยจะต้องอยู่ในขอบเขตต่ำสุด-สูงสุด ที่กำหนดให้ และให้คำตอบเหล่านี้เป็นประชากรเริ่มต้นในการค้นหา จากนั้นทำการกำหนดค่าจำนวนรอบของการค้นหาให้มีค่าเป็นศูนย์ หรือให้ $NC = 0$

ขั้นตอนที่ 2: นำผลลัพธ์ของผึ้งสำรวจแต่ละตัว มาหาค่าความเหมาะสม เพื่อที่จะพิจารณาว่า ประชากรตัวไหนมีความเหมาะสมมากที่สุด แล้วทำการจัดเรียงลำดับความเหมาะสมที่ได้มา โดยทำการเรียงจากมากไปหาน้อย

ขั้นตอนที่ 3: ทำการเลือกเอาผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดจำนวน m ค่า หรือเรียกว่า เอมามา m ค่าแรก จากคำตอบที่ได้เรียงเอาไว้แล้ว เพื่อมาทำการกำหนดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบ และทำการแยกค่าผลลัพธ์ m นั้นออกเป็น 2 กลุ่ม โดยจะให้กลุ่มแรกคือค่าที่ดีที่สุดของ m จำนวน e ค่า และส่วนผลลัพธ์ที่เหลือจำนวน $m-e$ ค่าจะให้เป็นกลุ่มที่ 2 สำหรับจุดประสงค์ในการแบ่งแยกผลลัพธ์นี้ก็เพื่อที่จะได้กำหนดจำนวนของผึ้งงานนั้นให้มีความเหมาะสมในการออกหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 4: ทำการกำหนดขอบเขตการค้นหาบริเวณใกล้เคียง (ngh) ของค่า m แต่ละค่า เพื่อให้ผึ้งงานได้ออกหาคำตอบ โดยขอบเขตที่สร้างขึ้นมานั้น ต้องอยู่ในขอบเขตต่ำสุด-สูงสุดที่ได้กำหนดไว้ดังที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 1

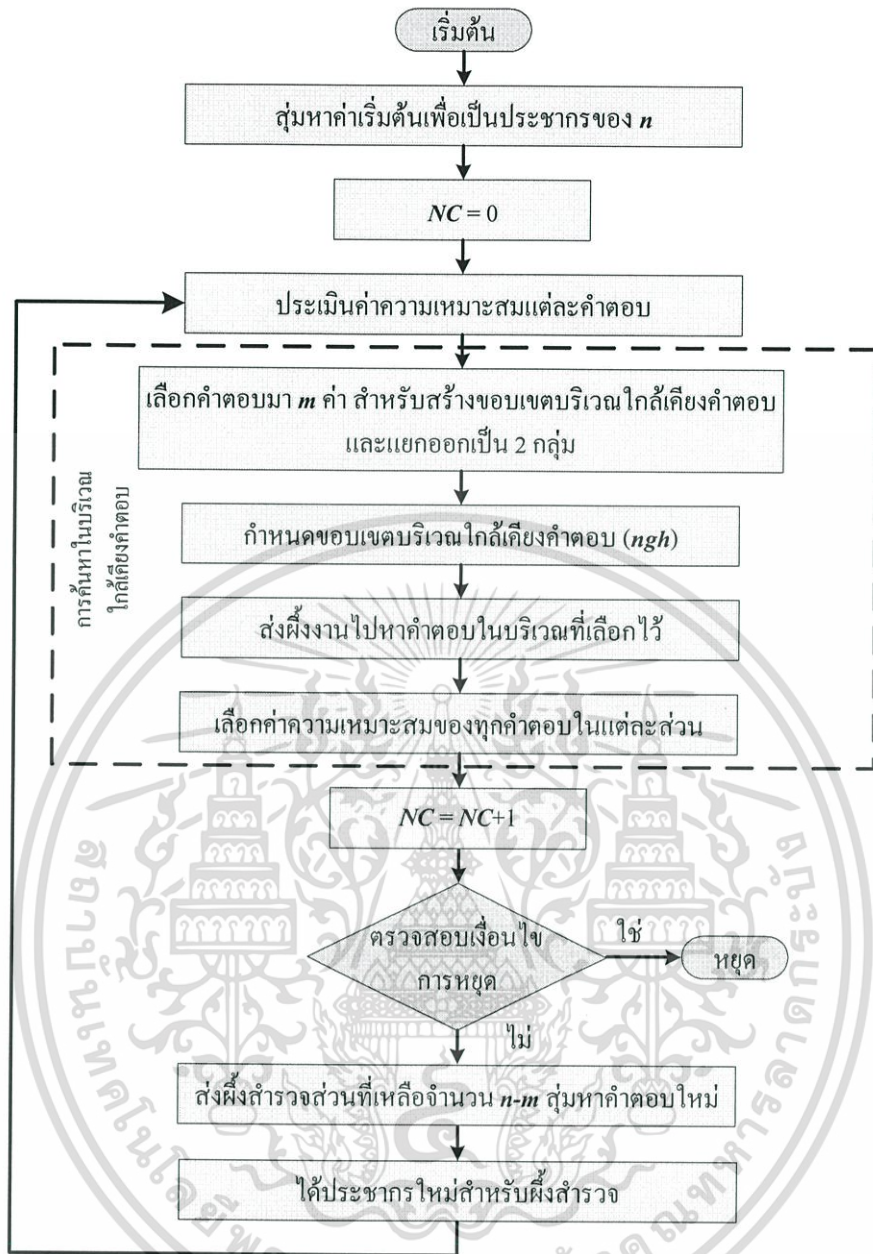
งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5: ส่งฟังก์ชันค้นหาคำตอบ โดยคำตอบจะอยู่ภายในขอบเขตการค้นหาบริเวณใกล้เคียงที่สร้างขึ้นตามขั้นตอนที่ 4 สำหรับการส่งฟังก์ชันไปนั้นจะให้จำนวนฟังก์ชันของ ne ไปจำนวนมาก สำหรับค้นหาในบริเวณใกล้เคียงคำตอบของ e และจะให้จำนวนฟังก์ชันของ ns จำนวนน้อย ในการค้นหาบริเวณคำตอบของ $m-e$ เนื่องจากว่า บริเวณคำตอบของ e นั้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรที่ได้มา ทำให้มีความน่าจะเป็นในการได้คำตอบที่เหมาะสมมากกว่า บริเวณใกล้เคียงคำตอบของ $m-e$

ขั้นตอนที่ 6: ทำการประเมินค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันแต่ละตัว แล้วทำการคัดเลือกคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดของแต่ละกลุ่มออกมา เพื่อจะให้เป็นคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป จากนั้นทำการคัดเลือกหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่สุ่มมา 1 ค่า แล้วแทนด้วย B_{Best} และกำหนดจำนวนรอบการค้นหามีค่าเป็น $NC = NC + 1$

ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดทำงานว่าเป็นจริงหรือไม่ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้เป็นจำนวนรอบในการค้นหา หรือก็คือ NC นั้นเอง ถ้าจำนวนรอบการค้นหาถึงค่าที่กำหนดไว้ให้หยุดการค้นหา ก็จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดคือค่า B_{Best} แต่ถ้าหากจำนวนรอบยังไม่ถึงค่าที่กำหนด ก็ให้ทำขั้นตอนต่อไป

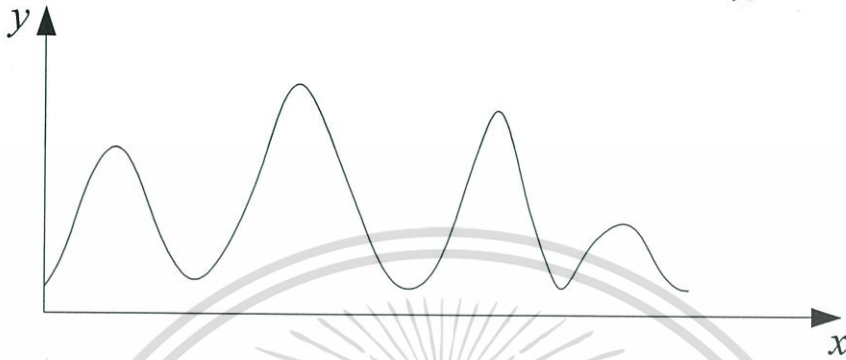
ขั้นตอนที่ 8: ให้ฟังก์ชันสำรวจส่วนที่เหลือจำนวน $n-m$ ตัว (ฟังก์ชันสำรวจในส่วนที่ไม่ได้รับการคัดเลือกจากขั้นตอนที่ 3) ค้นหาคำตอบใหม่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดเหมือนกับขั้นตอนที่ 1 ดังนั้นแล้ว เราก็จะได้ผลลัพธ์ที่เป็นประชากรใหม่จำนวน n ตัว ซึ่งได้มาจากขั้นตอนที่ 7 จำนวน m ตัว และขั้นตอนที่ 9 นี้ อีกจำนวน $n-m$ ตัว ก็จะมีคำตอบเท่ากับขั้นตอนที่ 1 จากนั้นกลับไปทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกว่าเงื่อนไขการหยุดจะเป็นจริงตามขั้นตอนที่ 7



รูปที่ 2.6 แผนผังขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงผึ้ง

2.3.1 ตัวอย่างการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

สมมติว่าเรามีฟังก์ชันที่สามารถแสดงกราฟของฟังก์ชันดังรูปที่ 2.7 ให้หาค่าของ x ที่ทำให้ y มีค่าสูงสุด เมื่อ $y = f(x)$ โดยใช้วิธีฝูงผึ้งในการค้นหาค่าตอบ

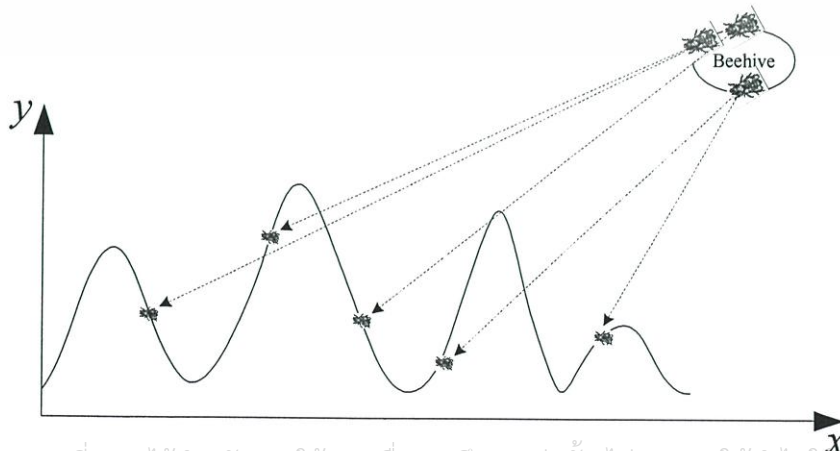


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าตอบ

เริ่มต้น ทำการกำหนดพารามิเตอร์ในการหาค่าตอบของวิธีฝูงผึ้ง

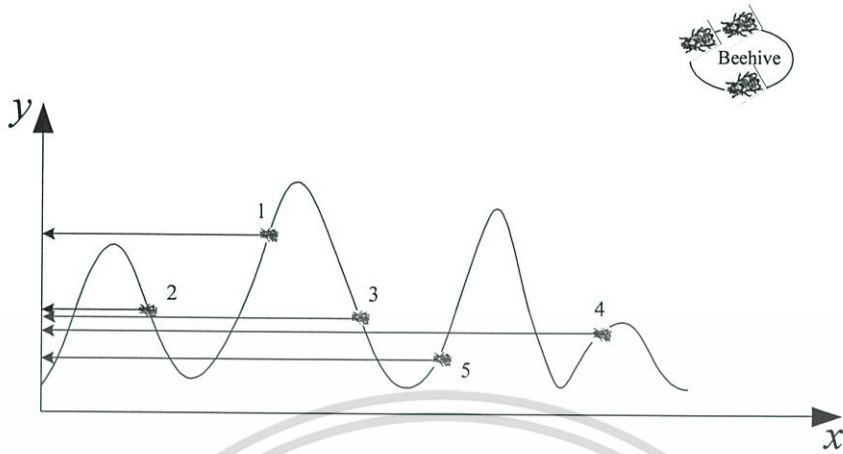
NC	$=$	20	รอบ
n	$=$	5	ตัว
m	$=$	3	คำตอบ
e	$=$	1	คำตอบ
ngh	$=$	10	เปอร์เซ็นต์
ne	$=$	2	ตัว
ns	$=$	1	ตัว

ขั้นตอนที่ 1 ส่งผึ้งสำรวจจำนวน 5 ตัวสุ่มหาค่าตอบเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 แล้วทำการกำหนดจำนวนรอบเป็นให้มีค่าเป็นศูนย์ ($NC = 0$)



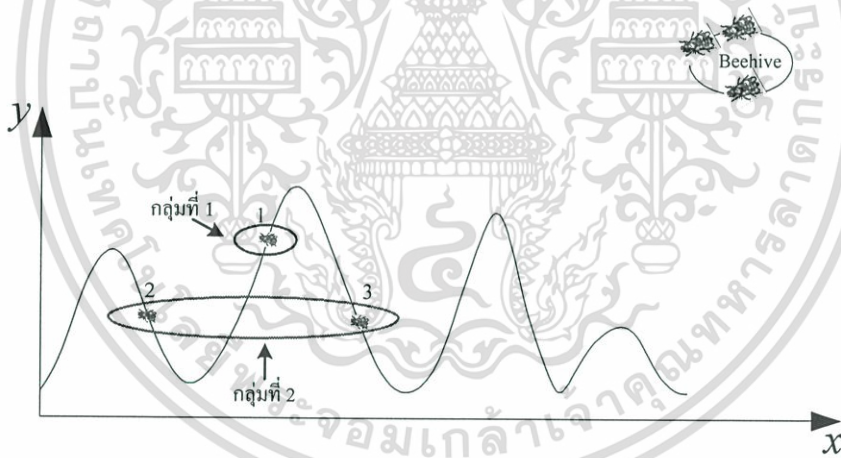
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 1 ของวิธีฝูงผึ้ง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลไปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันสำรวจแต่ละตัวดังแสดงในรูปที่ 2.9 แล้วทำการเรียงลำดับความเหมาะสมจากมากไปหาน้อย

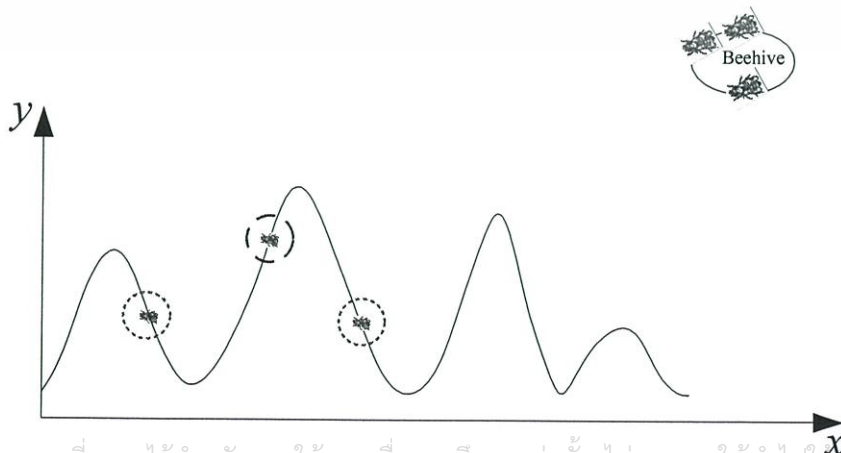


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 2 ของวิธีฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 3 เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดมา 3 ค่าแรก ($m = 3$) แล้วแยกคำตอบที่เลือกมาออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นค่าที่ดีที่สุด 1 ค่าแรก ($e = 1$) ส่วนคำตอบที่เหลือให้อยู่ในกลุ่มที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 3 ของวิธีฝูงผึ้ง

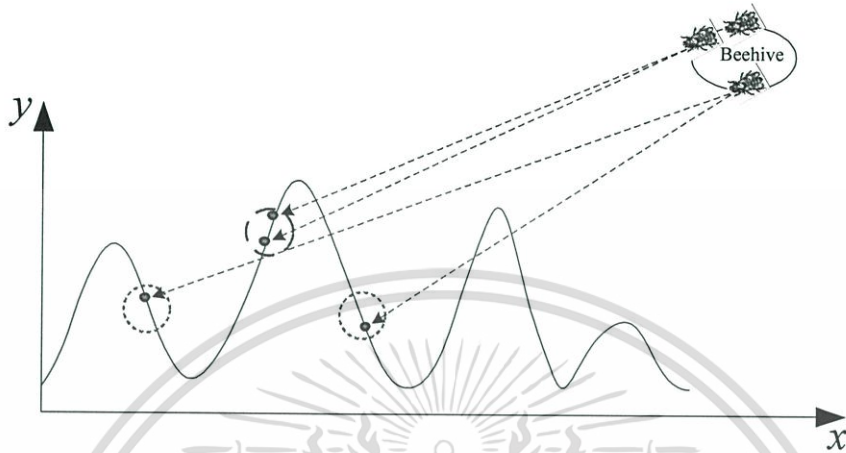


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 4 ของวิธีฝูงผึ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุที่เบี่ยงเบนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

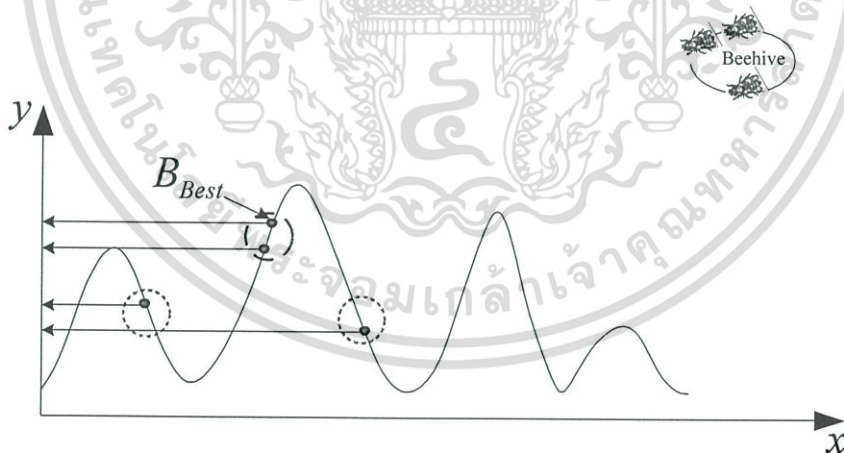
ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขอบเขตการค้นหาค่าตอบในบริเวณใกล้เคียงค่าตอบที่เลือกไว้โดยอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ($ngh = 10$) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

ขั้นตอนที่ 5 ส่งผึ้งงานสู่หาค่าตอบในบริเวณขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยในกลุ่มแรกจะส่งผึ้งงานไปจำนวน 2 ตัว ($ne = 2$) และกลุ่มที่ 2 จำนวน 1 ตัว ($ns = 1$) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 5 ของวิธีฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าความเหมาะสมของผึ้งงานแต่ละตัว แล้วเลือกค่าที่ดีที่สุดของแต่ละกลุ่ม จากนั้นเลือกค่าที่ดีที่สุดของจากทั้งหมดแทนด้วย B_{Best} ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แล้วกำหนดจำนวนรอบเพิ่มอีกหนึ่งรอบ ($NC = NC + 1$)

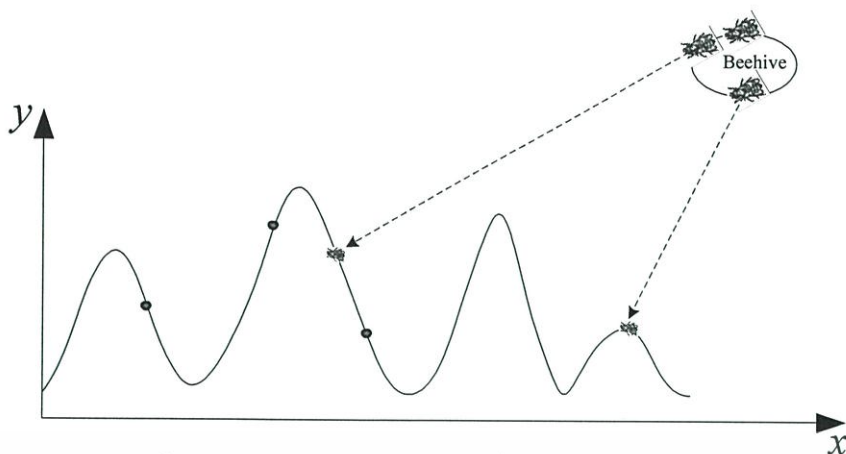


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 6 ของวิธีฝูงผึ้ง

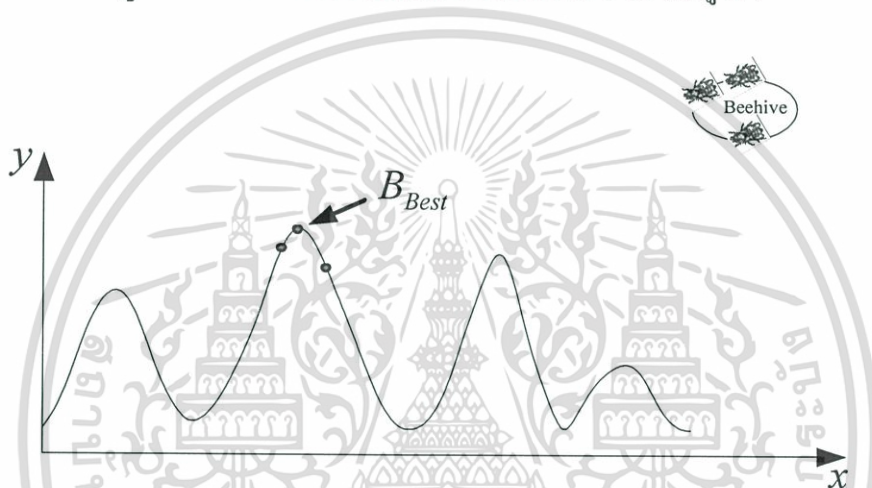
ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงานว่าเป็นจริงหรือไม่ โดยในตัวอย่างนี้ทำการกำหนดไว้ 20 รอบ แต่รอบปัจจุบันคือ รอบแรก ดังนั้นให้ทำตามขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 ส่งผึ้งงานจำนวน 2 ตัว ($n-m = 5-3 = 2$) สุ่มหาค่าตอบใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้นจะได้จำนวนค่าตอบเท่ากับจำนวนผึ้งสำรวจในรอบแรก แล้วกลับไปทำตามขั้นตอนที่

เอกล 2 จนกว่าเงื่อนไขการทำงานจะเป็นจริง และจะได้ค่าตอบที่ดีที่สุด คือ B_{Best} ดังรูปที่ 2.15 ะโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 8 ของวิธีฝูงผึ้ง



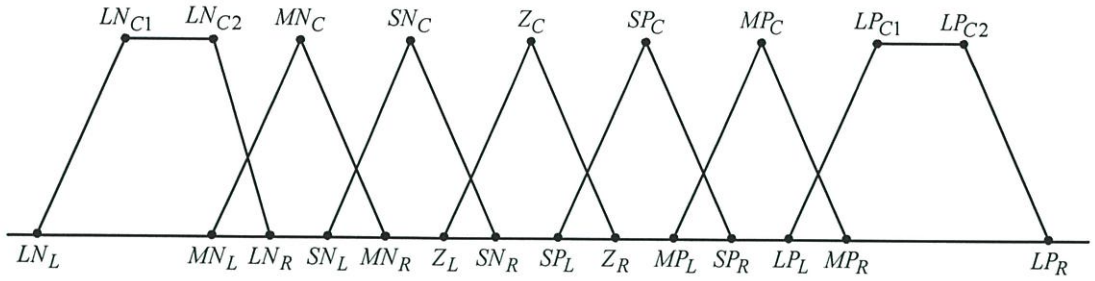
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการหาคำตอบเมื่อสิ้นสุดการค้นหาของวิธีฝูงผึ้ง

2.4 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดี ด้วยวิธีฝูงผึ้ง

ในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดี ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดคือ จะทำอย่างไรในการที่จะออกแบบทั้งในส่วนของ แพลตฟอร์มสัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมให้มีความเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วการออกแบบ แพลตฟอร์มสัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม จะได้มาจากการลองผิดลองถูก หรืออาศัยผู้ชำนาญการ ทำให้ประสิทธิภาพของตัวควบคุมนั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง ที่เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ ดังที่กล่าวมานั้น เข้ามาช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม

จากรูปที่ 2.5 แพลตฟอร์มสัดส่วนจะมีตัวแปร 4 ตัว คือ K_e, K_d, β และ α ส่วนฟังก์ชันสมาชิกแต่ละอินพุต หรือแต่ละเอาต์พุตที่ใช้ จะมีสมาชิก 7 ตัว เป็นแบบสามเหลี่ยม 5 ตัว และแบบสี่เหลี่ยมคางหมู 2 ตัว โดยรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy โลก

โดยที่

แบบสามเหลี่ยม จะมีตำแหน่งสมาชิกเป็นค่าตัวแปร 3 ตัว คือ

ตำแหน่งทางด้านฐานซ้าย Left base (L)

ตำแหน่งศูนย์กลาง Center (C)

ตำแหน่งทางด้านฐานขวา Right base (R)

และแบบสี่เหลี่ยม จะมีตำแหน่งสมาชิกเป็นค่าตัวแปร 4 ตัว คือ

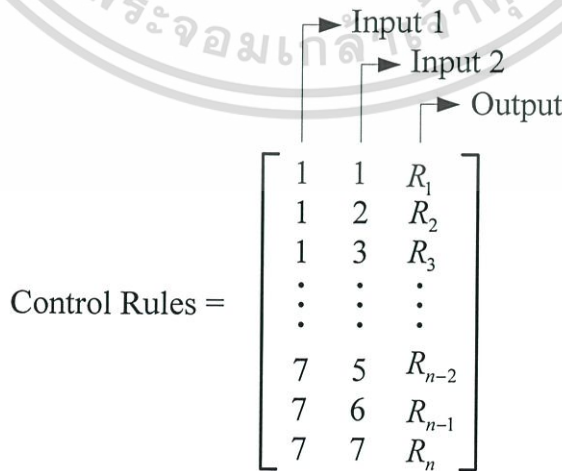
ตำแหน่งทางด้านฐานซ้าย Left base (L)

ตำแหน่งศูนย์กลาง 1 Center 1 (C_1)

ตำแหน่งศูนย์กลาง 2 Center 2 (C_2)

ตำแหน่งทางด้านฐานขวา Right base (R)

ดังนั้นจำนวนตัวแปรที่รับค่ามี 23 ตัว คือ $(4+3+3+3+3+3+4 = 23)$ ตัวควบคุมฟuzzy โลกมีอินพุต 2 ตัว และเอาต์พุต 1 ตัว ดังนั้นตัวแปรทั้งหมดที่จะรับค่ามี 69 ตัว $(3 \times 23 = 69)$



รูปที่ 2.17 โครงสร้างกฎควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy โลก-พีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกฎควบคุมของตัวควบคุมพีชชีโลจิกที่มี 2 อินพุต และ 1 เอาท์พุต ได้แสดงอยู่ในจำนวน n แถว 3 คอลัมน์ ตามที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.17 ในคอลัมน์ที่ 3 เอาท์พุตของหน่วยควบคุมจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรพีชชี โดยทั่วไปแล้ว อินพุต 1 อินพุต 2 และเอาท์พุตจะแสดงโดยตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรพีชชี แทนตัวเลขที่มีสมาชิกอยู่ภายในทั้งหมด 7 ตัว ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 คือ LN

หมายเลข 2 คือ MN

หมายเลข 3 คือ SN

หมายเลข 4 คือ Z

หมายเลข 5 คือ SP

หมายเลข 6 คือ MP

หมายเลข 7 คือ LP

ดังนั้น จะมีตัวแปรอยู่ 49 ตัว (สำหรับฟังก์ชันสมาชิกทั้ง 7 ตัว $n = 7^2 = 49$) ที่ใช้ในการปรับเพื่อหาค่า ดังนั้นตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี 1 ตัว เมื่อทำการรวมตัวแปรทั้งหมด 2 อินพุต และ 1 เอาท์พุต จะได้ตัวแปรที่ต้องทำการปรับเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่จะใช้ในตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี จำนวน 122 ค่า ($4+49+69 = 122$)

2.5 สรุป

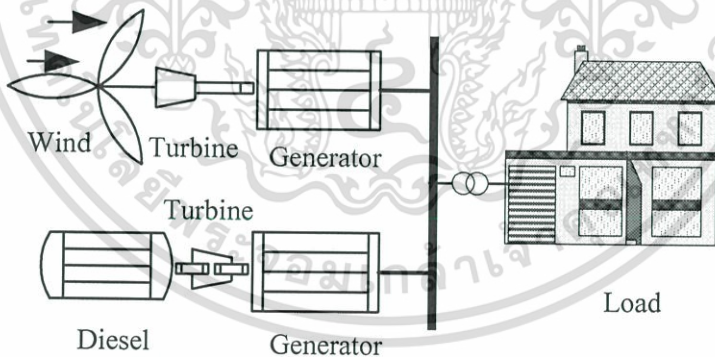
ในบทนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะที่คล้ายกับตัวควบคุมพีไอดี และสามารถที่จะจัดการกับระบบที่มีความซับซ้อนได้แบบตัวควบคุมพีชชีโลจิก จึงได้มีการนำเอาตัวควบคุมพีชชีโลจิกมาทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี ที่เรียกว่าตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี ส่วนประกอบของตัวควบคุมประกอบไปด้วยแฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ส่วนต่างๆ เหล่านี้มีความซับซ้อน และยากต่อการออกแบบ โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายของแฟลคเตอร์สัดส่วน ตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก และเงื่อนไขของกฎควบคุม จะทำการออกแบบด้วยการลองผิดลองถูก หรืออาศัยผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบ ทำให้สมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้นั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้ จึงได้นำเอาวิธีฝูงผึ้งมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยปรับหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ควบคุมเหล่านั้นพร้อมกันทั้งหมด

บทที่ 3

การควบคุมความถี่ในระบบไมโครกริดด้วยตัวควบคุมฟuzzy โลจิก-พีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีฝูงผึ้ง

ในบทนี้จะกล่าวถึง การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟuzzy โลจิก-พีไอดี (Fuzzy logic-PID: FLPID) ที่ออกแบบให้เหมาะสม ด้วยวิธีฝูงผึ้งดังที่นำเสนอในบทที่ 2 สำหรับการควบคุมความถี่ในระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันลม และดีเซลที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงของลม หรือการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด โดยจะทำการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โลจิก-พีไอดีสำหรับ ตัวควบคุมการบิดใบพัดกังหัน (Blade pitch control) ในด้านกังหันลม และสำหรับตัวบังคับความเร็ว (Speed governor) ในด้านดีเซล ผลการทดสอบโดยการจำลองคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความถี่ด้วยตัวควบคุมฟuzzy โลจิก-พีไอดีมีประสิทธิภาพ และความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบได้สูงกว่าตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมฟuzzy โลจิก-พีไอดีที่ออกแบบยังไม่เหมาะสม

3.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด



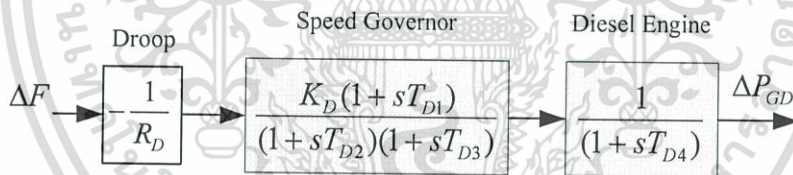
รูปที่ 3.1 ระบบไมโครกริด

ระบบไมโครกริดดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระ ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ทำงานร่วมกัน หลักการทำงาน และแบบจำลองของระบบที่ใช้ในการศึกษาทั้งในส่วนของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel generator) [61, 62] เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้การเผาไหม้หรือการสันดาปภายใน โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล

นี้สามารถเดินเครื่องได้รวดเร็วมีประสิทธิภาพสูงในการใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองสำหรับจ่ายไฟฟ้าเข้าเสริมระบบในขณะที่มีการใช้โหลดจำนวนมาก (Peak load) หรือเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักในกรณีที่ศูนย์กลางโหลดห่างไกลจากแหล่งโรงต้นกำลังชนิดอื่นๆ เช่นตามหมู่เกาะหรือหมู่บ้านตามชนบท และในปัจจุบันได้มีการนำเอาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้มาผลิตไฟฟ้าร่วมกับการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทน เช่นระบบไมโครกริด เนื่องจากสามารถช่วยลดปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ในระบบได้ เครื่องยนต์ดีเซลได้คิดค้นโดย Rudolf Diesel วิศวกรชาวเยอรมัน และพัฒนาใช้จนแพร่หลายในปัจจุบัน เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เป็นต้นกำลังในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้ามีหลักการทำงานเหมือนกับเครื่องยนต์ในรถยนต์ทั่วไปคือ ใช้วิธีอัดอากาศภายในห้องสูบซึ่งจะเกิดการระเบิด จนมีความดันสูงทำให้สามารถดันลูกสูบ ก้านสูบ เพลาข้อเหวี่ยงให้หมุนเกิดพลังงานกลไปขับเคลื่อนกังหัน (Turbine) ที่ต่ออยู่กับเพลาโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้งานต่อไป

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และตัวบังคับความเร็ว ได้แสดงในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม แบบจำลองนี้ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถแสดงถึงพฤติกรรมทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเล็กๆ ได้ดี แบบจำลองเครื่องยนต์ดีเซล และตัวบังคับได้ทำการแทนด้วยสมการอันดับหนึ่ง และสมการถ่ายโอน นำหน้า-ล่าหลัง (Lead-lag) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 [25, 26]



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของตัวบังคับความเร็ว และเครื่องยนต์ดีเซล

เมื่อ

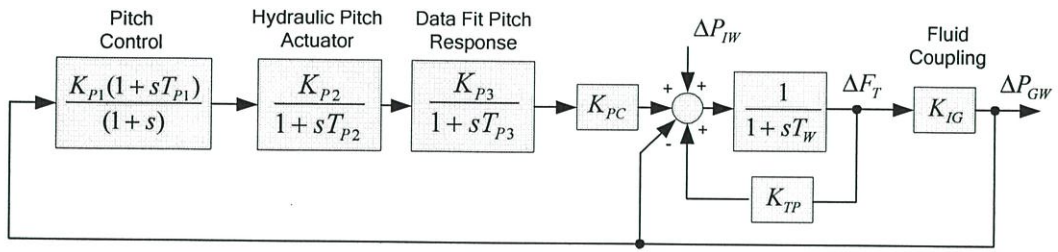
- ΔF คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ (Hz)
- R_D คือ ค่าคงที่ของดรู๊ป (Droop)
- K_D คือ อัตราขยายของตัวบังคับความเร็ว
- T_{D1}, T_{D2}, T_{D3} คือ ค่าคงที่เวลาของตัวบังคับความเร็ว
- T_{D4} คือ ค่าคงที่เวลาของเครื่องยนต์ดีเซล
- ΔP_{GD} คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (pu.kW)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม [63-65] คือ เครื่องจักรกลที่สามารถรับพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ กังหันลมสามารถแบ่งออกตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้ 2 รูปแบบ คือ 1. กังหันลมแกนตั้ง เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุน และใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ กังหันลมประเภทนี้จะให้กำลังลมเท่ากันไม่ว่าลมจะมาทิศทางใด แต่หมุนช้ากว่ากังหันลมแกนนอน คือ มีความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบรับลมสูงสุดไม่เกินสองเท่าของความเร็วมุม ใบรับลมจะเป็นวัสดุแผ่นบางๆ ที่แบนหรือโค้งก็ได้ เช่น กังหันลม แดร์ริส (Darrius) หรือกังหันลมซาโวเนียส (Savonius) ซึ่งออกแบบโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส และแบบที่ 2 คือ กังหันลมแกนนอน เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดกังหันลมเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม กังหันลมประเภทนี้หมุนด้วยความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบรับลม ใบรับลมจะเป็นวัสดุแผ่นบางๆ ที่แบนหรือโค้งก็ได้ เช่น กังหันลมพรอเพลเลอร์ (Propeller) หรือกังหันลมใบเสือล่าแพน เป็นต้น

ส่วนประกอบสำคัญ ๆ ของระบบกังหันลมทั่วไปประกอบไปด้วย ส่วนแรก ใบกังหัน (Blades) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดพลังงานกลที่เพลลาของกังหันจำนวนใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งใบถึงหลายสิบใบ กังหันลมที่มีจำนวนใบมากส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิด (Torque) สูง ในทางตรงข้ามกังหันที่มีจำนวนใบน้อยจะใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง แรงบิดต่ำ เช่น การผลิตไฟฟ้า ส่วนที่ 2 คือ ระบบควบคุม ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภทคือ 1. ควบคุมทิศทางของกังหันลม ทำหน้าที่ควบคุมให้กังหันลมให้หันหน้าเข้าหาทิศทางลมตลอดเวลาเมื่อความเร็วลมต่ำ หรือให้หันหน้าออกจากกระแสลมโดยการหันไปข้าง ๆ หรือหันเงยหน้าขึ้น หรือทำให้ใบกังหันหุบตัวเพื่อให้มีพื้นที่ของกังหันที่รับกระแสลมน้อยลงเมื่อความเร็วสูงเกินกำหนด ซึ่งเรียกว่าการควบคุมการบิดของใบพัด (Pitch control) และ 2. ควบคุมความเร็วรอบของเพลลา เป็นระบบควบคุมที่จะมีการทรอปให้สอดคล้องกันระหว่างความเร็วรอบของแกนกังหันลมกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อป้องกันการเสียหายเนื่องจากความเร็วลมสูงๆ จะมีแรงกระทำกับใบกังหันอย่างมาก ดังนั้นจึงออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานที่ความเร็วสูงสุดที่กังหันจะรับได้ค่าหนึ่ง การควบคุมจะมีลักษณะการทำงานคือทำให้เกิดการหน่วงต่อการหมุนของกังหันลม ซึ่งอาจทำได้โดยการปิดมุมของใบกังหันให้เกิดการหน่วงมากกว่าการขับ หรือเพิ่มขึ้นส่วนที่ทำให้เกิดแรงหน่วงขึ้นอย่างสูง เมื่อความเร็วถึงจุดที่กำหนดไว้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมได้แสดงไว้ในรูปแบบบล็อกไดอะแกรมที่ประกอบไปด้วย ส่วนของตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัดแบบไฮดรอลิก (Hydraulic pitch actuator) ผลตอบสนองของการบิดใบพัดที่เหมาะสมของข้อมูล (Data fit pitch response) และฟลูอิดคัปปลิง (Fluid coupling) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 [25, 26]

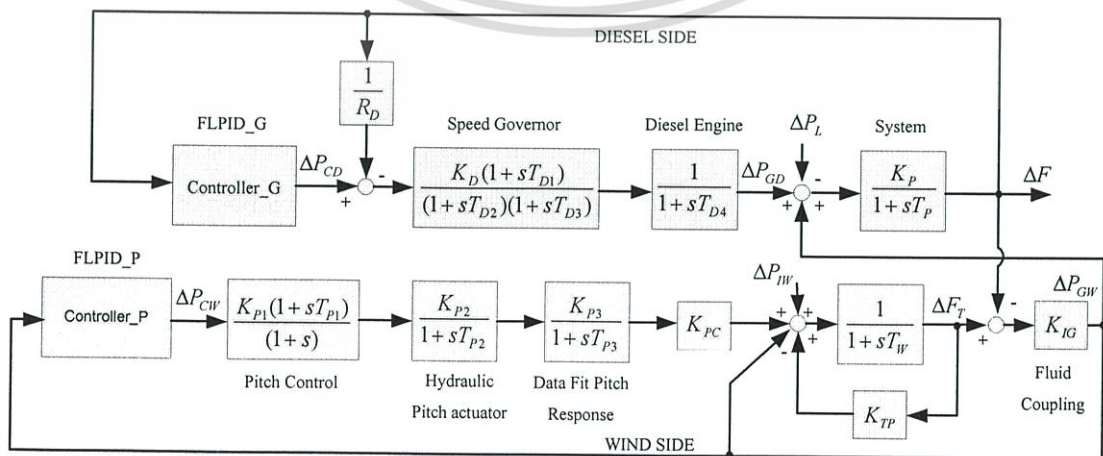


รูปที่ 3.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม

เมื่อ

- K_{P1}, T_{P1} คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของการควบคุมการบิดของใบพัด
- K_{P2}, T_{P2} คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัดแบบไฮดรอลิก
- K_{P3}, T_{P3} คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของผลตอบสนองของการบิดใบพัดที่เหมาะสมของข้อมูล
- K_{PC} คือ อัตราขยายคุณลักษณะของใบพัด
- ΔP_{IW} คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังลมอินพุต
- K_{TP}, T_W คือ อัตราขยาย และค่าคงตัวเวลาของระบบพลังงานลม
- K_{IG} คือ อัตราขยายของฟลูอิดคัปปลิง
- ΔP_{GW} คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

จากรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 สามารถแสดงการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม พร้อมกับตัวควบคุมทั้งทางด้านของตัวบังคับความเร็ว และตัวควบคุมทางด้านตัวขับเคลื่อนการบิดของใบพัด ได้ดังรูปที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1



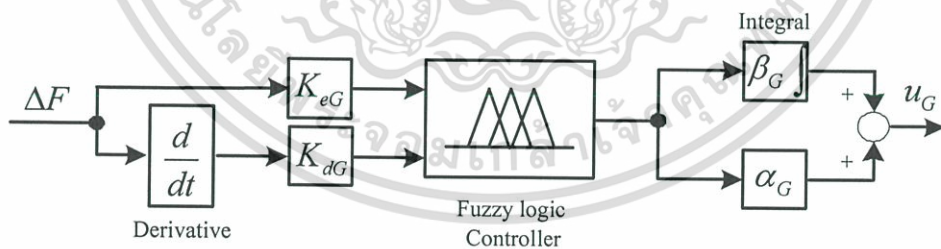
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 แบบจำลองการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และกังหันลม
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลของเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับแบบจำลองระบบ

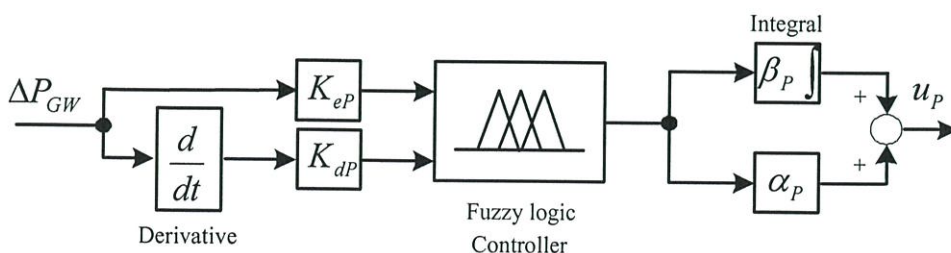
พารามิเตอร์ด้านดีเซล	พารามิเตอร์ด้านกังหันลม
$K_D = 0.4 \text{ pu.kW} / H_z$	$K_{p1} = 1.25$
$T_{D1} = 1.00 \text{ sec.}$	$K_{p2} = 1.00$
$T_{D2} = 2.00 \text{ sec.}$	$K_{p3} = 1.40$
$T_{D3} = 0.025 \text{ sec.}$	$K_{PC} = 0.080 \text{ pu.kW} / \text{deg}$
$T_{D4} = 3.00 \text{ sec.}$	$K_{TP} = 0.0040 \text{ pu.kW} / H_z$
$R_D = 5.00 \text{ Hz} / \text{pu.kW}$	$K_{IG} = 1.494 \text{ pu.kW} / H_z$
พารามิเตอร์ระบบ	$T_{p1} = 0.60 \text{ sec.}$
อัตราขยายของระบบ (K_p) = $72 \text{ Hz} / \text{pu.kW}$	$T_{p2} = 0.041 \text{ sec.}$
ค่าคงตัวเวลา (T_p) = 14.4 sec.	$T_{p3} = 1.00 \text{ sec.}$
	$T_w = 4.00 \text{ sec.}$

3.2 การออกแบบตัวควบคุม

จากรูปที่ 3.4 ตัวควบคุมตัวบังคับความเร็ว (Controller_G) จะทำหน้าที่ปรับความเร็วในการขับเคลื่อนเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัวควบคุมการบิดของใบพัด (Controller_P) ที่ทำหน้าที่ปรับการเอียงของใบพัดตามลักษณะของกระแสลม ทำการแทนด้วยตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล



รูปที่ 3.6 ตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

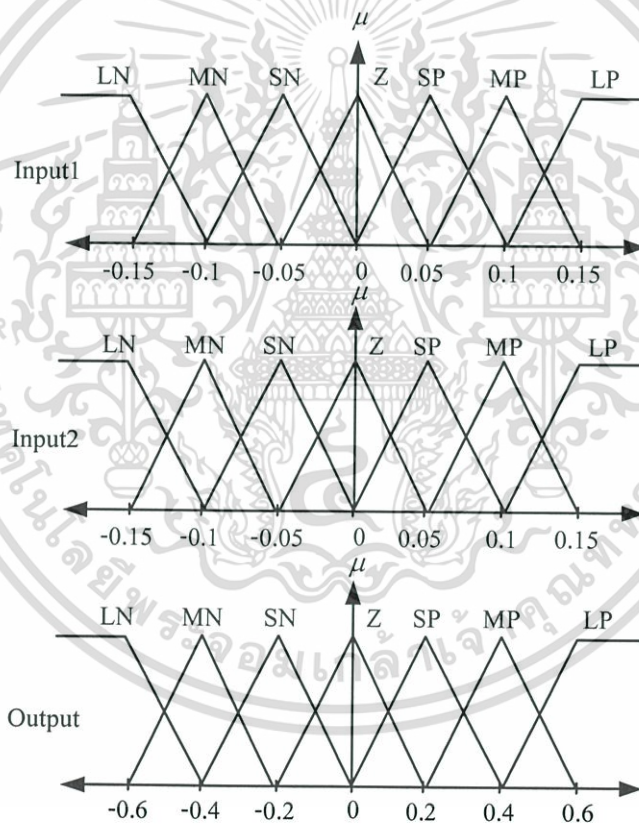
เมื่อ

K_{eG}, K_{dG}, β_G และ α_G คือ แฟลคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล

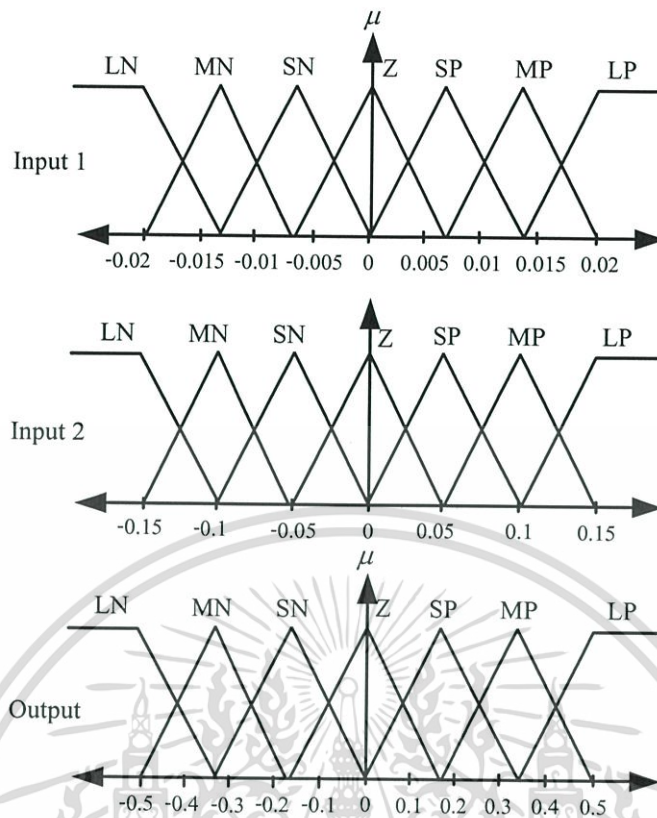
K_{eP}, K_{dP}, β_P และ α_P คือ แฟลคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกังหันลม

u_G และ u_P คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีไอดี

ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิกที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล และตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกังหันลม ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7- 3.8 และกฎควบคุมของตัวควบคุมทั้งตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล และการบิดของใบพัดด้านกังหันลม ในสถานะเริ่มต้นจะใช้แบบเดียวกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.7 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซล



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกึ่งหันลม

ตารางที่ 3.2 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วด้านดีเซด และตัวควบคุมการบิดของใบพัดด้านกึ่งหันลม

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมพีซี-พีไอดี 2 ตัวเพื่อควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันลม และดีเซล โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือต้องการให้เกิดการแกว่งของความถี่น้อยที่สุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของลม ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมคือ Integral Absolute Error (IAE) นั่นคือ

$$\text{Minimize } IAE = \int_0^{\infty} |\Delta F| dt \quad (3.1)$$

เมื่อ

ΔF คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ

ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบการทำงานของตัวควบคุมพีซี-พีไอดีที่นำเสนอ นั้น ได้ทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี (PID) ที่ได้ทำการปรับค่าอย่างเหมาะสมโดยใช้วิธี ฟังก์ชันภายใต้เงื่อนไขตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ (3.1) และตัวควบคุมพีซี-พีไอดีที่ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่เหมาะสม (Non-Optimal FLPID) โดยตัวควบคุมนี้จะใช้ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.7-3.8 และ ตารางที่ 3.2 ส่วนทางด้านแฟลคเตอร์สัดส่วน จะทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฟังก์ชันตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (3.1) กระบวนการค้นหาคำตอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบไว้ดังนี้

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

ส่วนพารามิเตอร์ของกระบวนการวิธีฟังก์ชันกำหนดดังนี้

จำนวนฟังก์ชันสำรวจ แทนด้วย (n) = 100 ตัว

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย (m) = 10 ค่า

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก m (e) = 5 ค่า

จำนวนฟังก์ชันที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ e (ne) = 10 ตัว

จำนวนฟังก์ชันที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ $m-e$ (ns) = 5 ตัว

ขนาดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงคำตอบ (Neighborhood) ของ m (ngh) = 20%

จำนวนรอบของการค้นหา (NC) = 100 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ

เพื่อที่จะทดสอบถึงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบ ผลการทดสอบโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์การเกิดสิ่งรบกวนในสถานะต่างๆ ได้สมมติขึ้น เริ่มจากกรณีที่ 1 ในกรณีนี้ได้นำมาใช้ในการออกแบบทั้งตัวควบคุม พีไอดี ตัวควบคุม Non-Optimal FLPID และ Optimal FLPID ด้วยการจำลองในโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ในการออกแบบปรับค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม พีไอดี Non-Optimal FLPID (แฟคเตอร์สัดส่วน) และ Optimal FLPID (แฟคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 – 3.5

ตารางที่ 3.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับด้านดีเซล และกังหันลม

ตัวควบคุม	K_p (อัตราขยายสัดส่วน)	K_i (อัตราขยายปริพันธ์)	K_D (อัตราขยายอนุพันธ์)
ด้านดีเซล	-240.36	-55.67	-0.326
ด้านกังหันลม	38.69	0.79	9.085

ตารางที่ 3.4 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านดีเซล

ตัวควบคุม	K_{eG}	K_{dG}	β_G	α_G	MF	CR
Non-Optial FLPID	35.7423	4.5964	1.2236	6.7090	รูปที่ 3.7	ตารางที่ 3.2
Optimal FLPID	42.1213	2.6473	2.1971	4.5629	รูปที่ 3.9	ตารางที่ 3.6

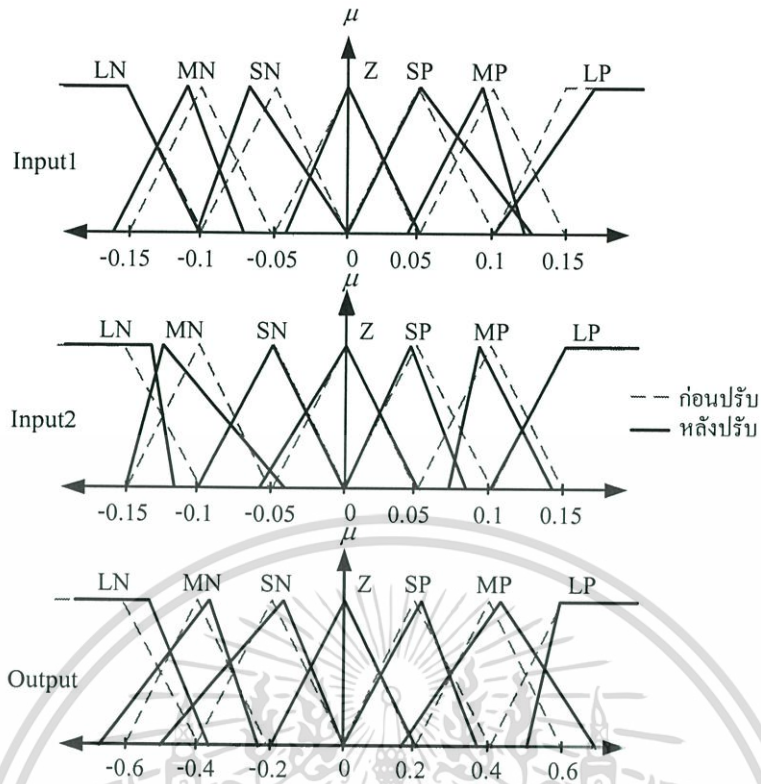
ตารางที่ 3.5 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านกังหันลม

ตัวควบคุม	K_{eP}	K_{dP}	β_P	α_P	MF	CR
Non-Optial FLPID	14.8812	21.3581	0.6873	4.2881	รูปที่ 3.8	ตารางที่ 3.2
Optimal FLPID	8.0930	22.8265	0.7908	9.6743	รูปที่ 3.10	ตารางที่ 3.7

โดย

MF คือ ฟังก์ชันสมาชิก

CR คือ กฎควบคุม

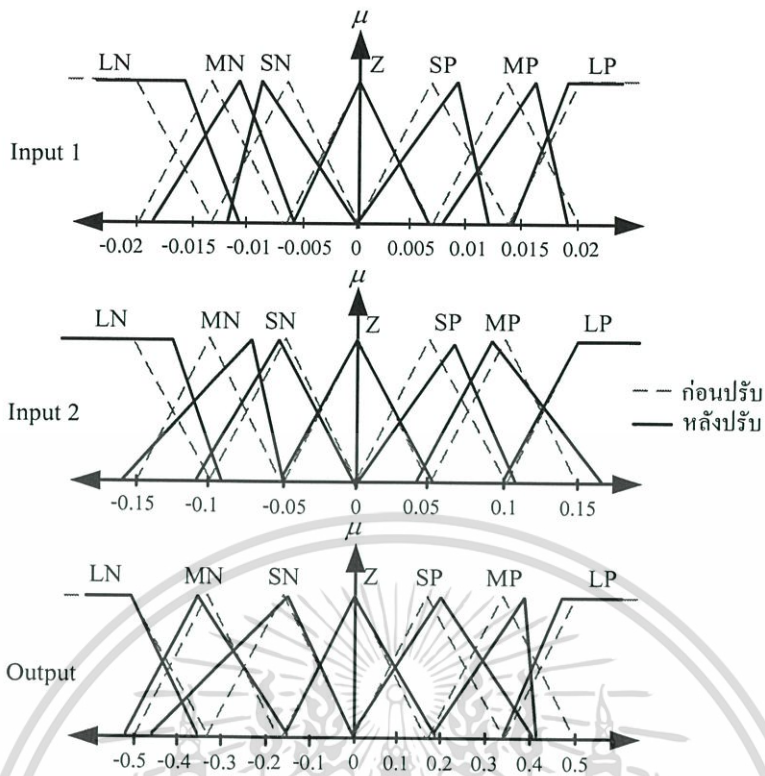


รูปที่ 3.9 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านดีเซลเทียบกับค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 3.6 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านดีเซล

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	LP	MP	MP	SP	MP	Z	SN
	MN	LP	LP	MP	MP	SP	SN	SN
	SN	MP	SP	MP	MP	Z	SN	MN
	Z	MP	SP	SP	Z	SN	MN	MN
	SP	MP	SP	Z	SN	SN	SN	LN
	MP	SP	Z	MN	MN	MN	MN	MN
	LP	Z	SN	SN	SN	MN	LN	MN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



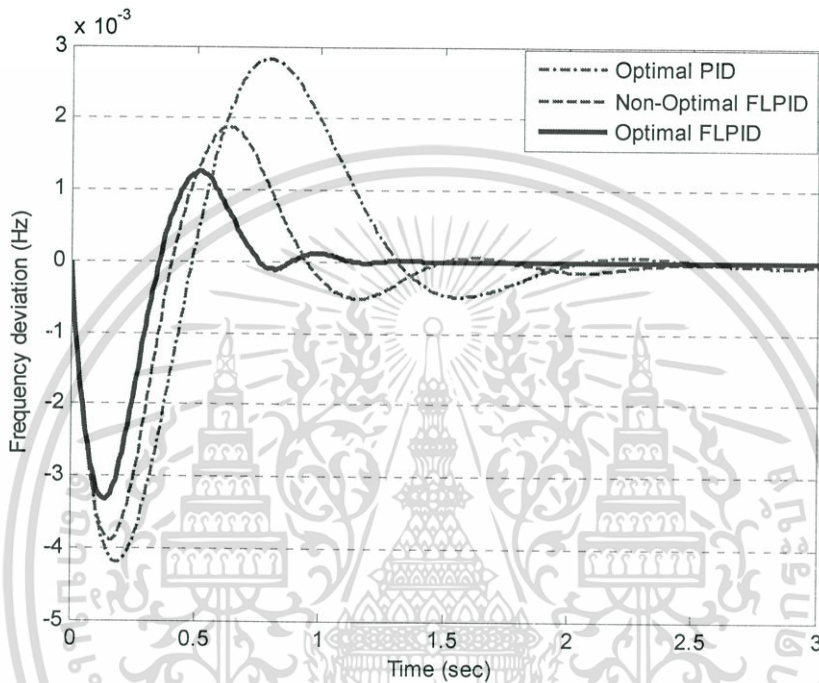
รูปที่ 3.10 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านกึ่งหั่นลมเทียบกับค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 3.7 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม FLPID ด้านกึ่งหั่นลม

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	MP	MP	MP	SP	SP	MP	Z
	MN	MP	MP	SP	MP	Z	SP	SN
	SN	MP	LP	SP	Z	SN	SN	MN
	Z	MP	LP	SP	Z	SN	SN	MN
	SP	LP	SP	SN	SN	MN	LN	LN
	MP	MP	Z	Z	MN	MN	LN	MN
	LP	SN	SN	SN	MN	MN	MN	MN

รูปที่ 3.9 และ 3.10 แสดงผลการปรับตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกเทียบกับค่าเริ่มต้น โดยผลที่ได้จะมีความกว้าง และรูปร่างของแต่ละฟังก์ชันแตกต่างกันเพื่อให้มีความเหมาะสมในการแบ่งข้อมูลในการนำไปประมวลผลสำหรับการควบคุม ส่วนผลการปรับกฎควบคุมดังแสดงในตารางที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขของกฎนั้นได้เปลี่ยนไปบางตำแหน่ง เพื่อให้เงื่อนไขนั้นเหมาะสมกับการทำงานของระบบ นอกจากนี้ทำให้การทำงานของตัวควบคุมที่ได้มีการทำงานที่สอดคล้องกันด้วย เนื่องจากว่าระบบนี้มีการควบคุมสองส่วน ทั้งในส่วนของการกำเนิดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเว็บไซต์ที่กล่าวถึงในเอกสารนี้

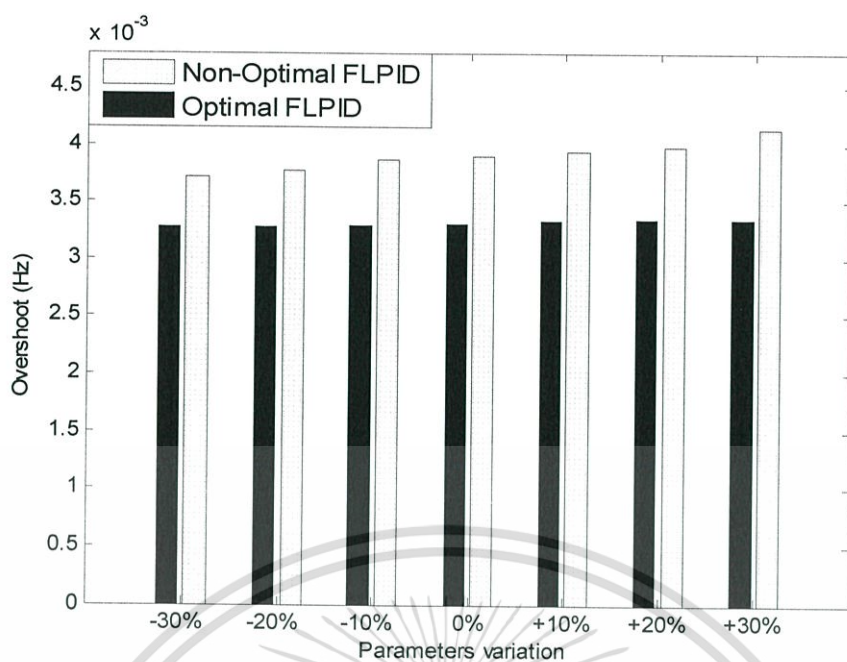
ไฟฟ้าดีเซล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม ดังนั้นเมื่อมีตัวควบคุมตัวใดตัวหนึ่งชดเชยไปแล้ว ตัวควบคุมอีกตัวหนึ่งก็ควรที่จะชดเชยให้มีความเหมาะสมกัน เช่น ในตารางที่ 3.6 และ 3.7 ในส่วนของ *Input 1* คือ LN และ *Input 2* คือ LN จะเห็นได้ว่า ในด้านของกฎตัวควบคุมของดีเซลนั้น ยังคงเป็นเงื่อนไข LP อยู่ แต่ทางด้านกฎของกังหันลมจะเปลี่ยนเป็น MP เนื่องจากว่า ทางด้านของดีเซลนั้นอาจจะชดเชยไปมากแล้ว ถ้าตัวควบคุมด้านกังหันลมยังชดเชยไปเพิ่มด้วยสัญญาณขนาดใหญ่ (LP) ก็อาจจะทำให้ระบบนั้นได้รับการชดเชยเกินกว่าที่จำเป็น



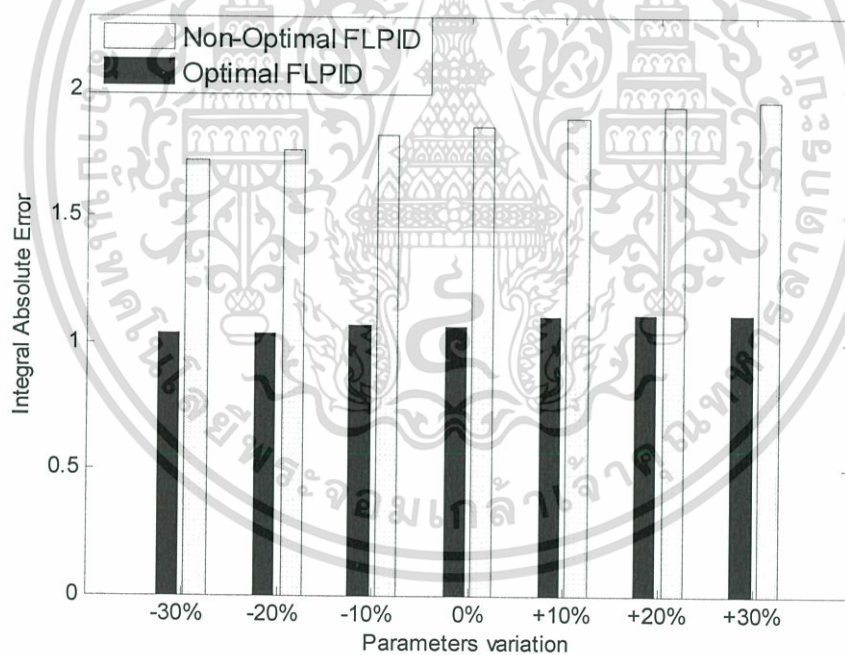
รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองของความถี่ระบบในกรณีที่ 1

ในการจำลองกรณีที่ 1 สมมุติว่ามีการเพิ่มขึ้นของโหลดเป็นแบบขั้นบันได (Step) มีขนาดเป็น $\Delta P_L = 0.01 pu$. ที่เวลา $t = 0 sec$ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของการแกว่งของความถี่ที่ควบคุมด้วย Optimal FLPID มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุม Non-Optimal FLPID และ PID ทั้งในด้านของค่าพุ่งเกิน (Overshoot: OS) ที่ต่ำกว่า และค่าเวลาคงตัว (Setting Time) ที่สั้นกว่า

การทดสอบความคงทนของตัวควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบนั้นทำได้โดยหาค่าโอเวอร์ชูทของ ΔF และ คำนวณค่า IAE ของระบบเมื่อเกิดโหลดแบบขั้นบันได และสมมุติว่าค่าพารามิเตอร์ของระบบทั้งหมดเปลี่ยนไป $\pm 30\%$ จากค่าเริ่มต้น รูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงให้เห็นว่าในกรณีของตัวควบคุม Non-Optimal FLPID นั้นเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบเพิ่มขึ้น ค่าพุ่งเกิน และ ค่า IAE ก็เพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนกรณีของตัวควบคุม Optimal FLPID นั้นทั้งค่าพุ่งเกินและ ค่า IAE แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแบบ Optimal FLPID มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบได้สูงกว่าตัวควบคุมแบบ Non-Optimal FLPID

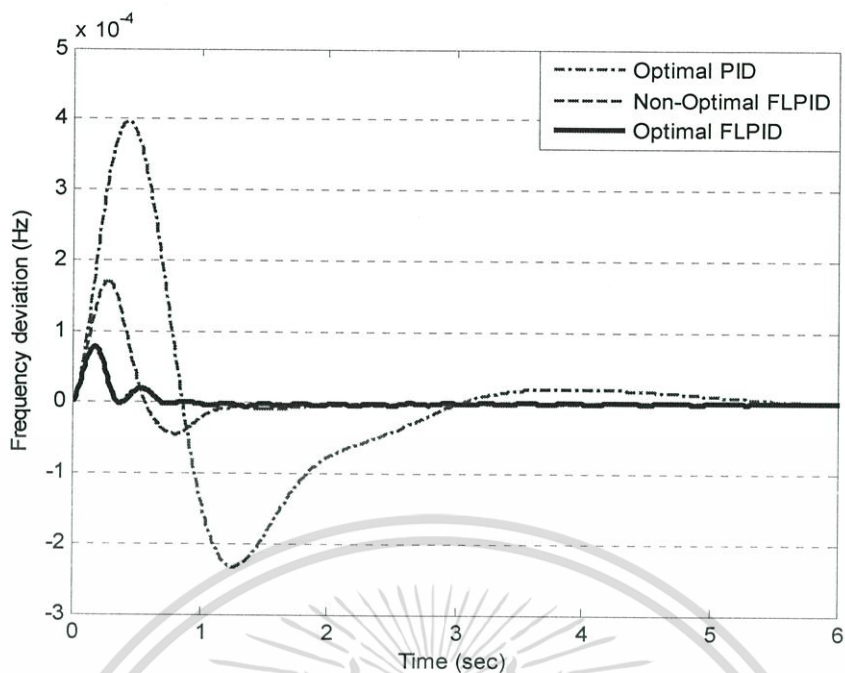


รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบความคงทนของค่าพ่วงเกินในกรณีที่ 1

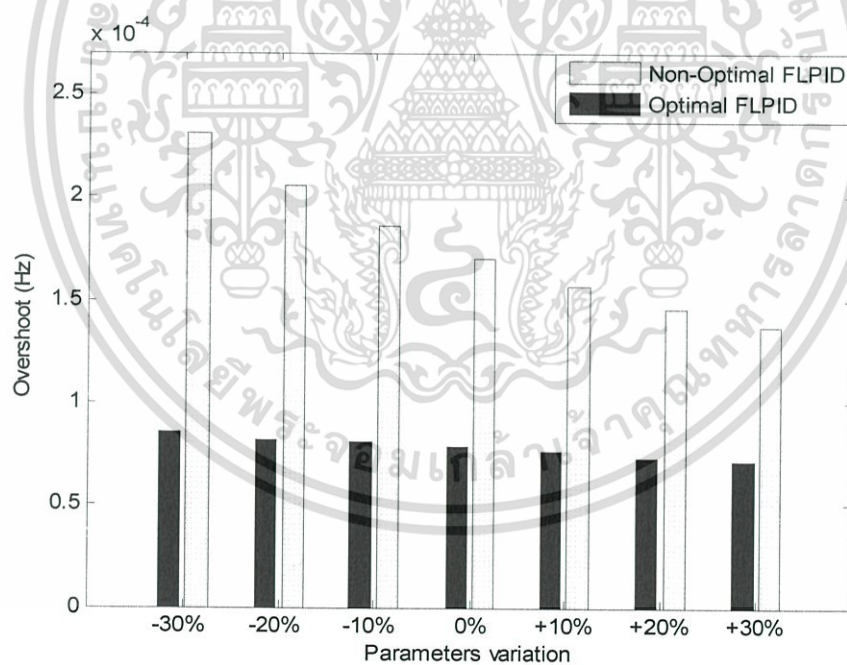


รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบความคงทนของ IAE ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

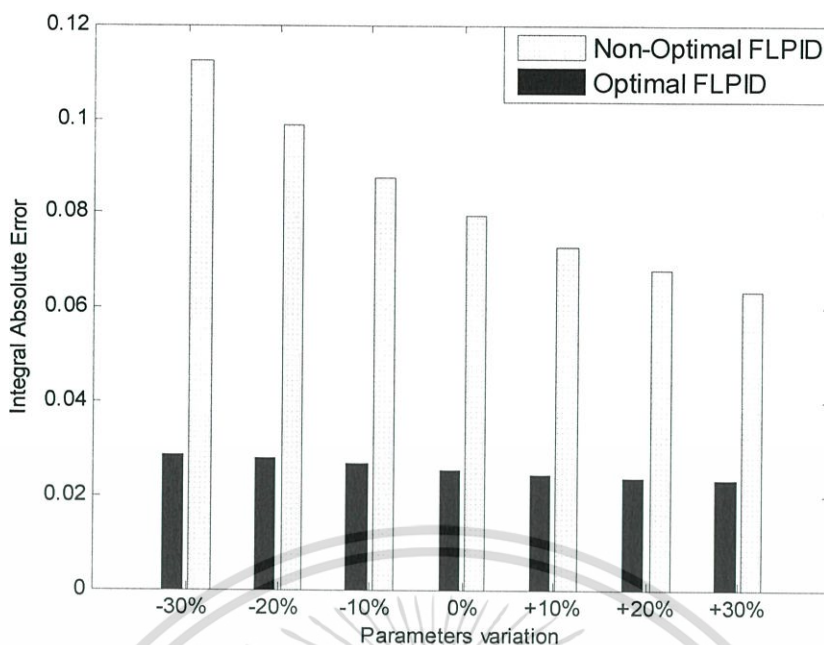


รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองของความถี่ระบบในกรณีที่ 2



รูปที่ 3.15 ผลการทดสอบความคงทนของค่าพ่วงเกินในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



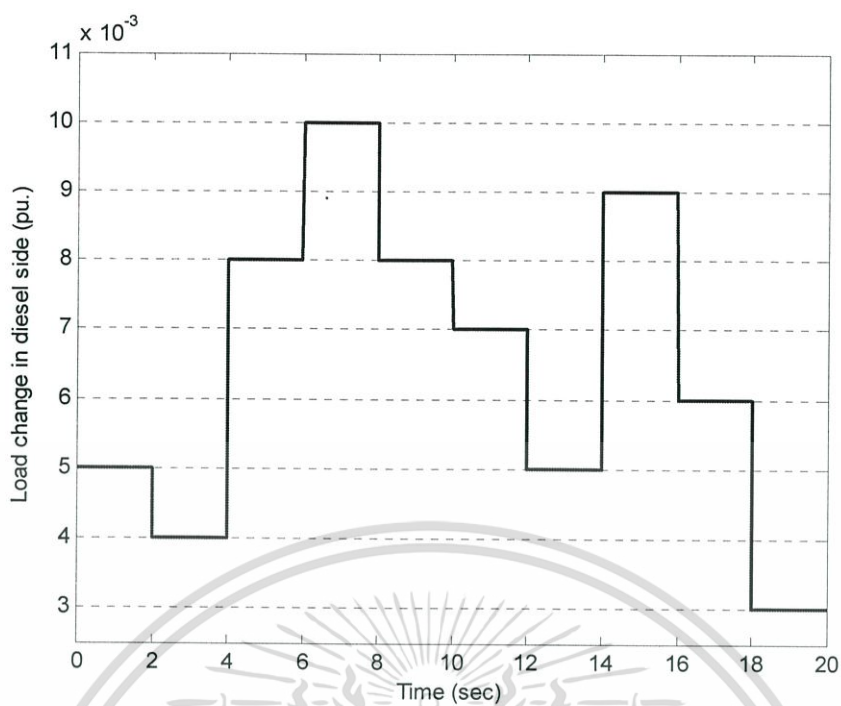
รูปที่ 3.16 ผลการทดสอบความคงทนของ IAE ในกรณีที่ 2

กรณีที่ 2 สมมติว่าเกิดการเพิ่มขึ้นของขนาดของกำลังลมอินพุต โดยมีขนาดเป็น $\Delta P_{iw} = 0.01$ pu. ที่เวลา $t = 0$ sec รูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นว่าค่าฟุงเกิน และค่าเวลาคงตัวของ ΔF ในกรณีของตัวควบคุม Optimal FLPID นั้นจะลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวควบคุม Non-Optimal FLPID และ PID รูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าฟุงเกิน และ IAE เมื่อเกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังลมแบบขั้นบันได และสมมติว่าค่าพารามิเตอร์ของระบบทั้งหมดเปลี่ยนไป $\pm 30\%$ จากค่าเริ่มต้น ในกรณีของตัวควบคุม Non-Optimal FLPID นั้นค่าฟุงเกิน และ IAE มีการเปลี่ยนแปลงสูงมากเมื่อพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปในทางตรงกันข้าม ค่าฟุงเกิน และ IAE ในกรณีของตัวควบคุม Optimal FLPID แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย ผลการทดสอบนี้แสดงความคงทนอย่างมากของตัวควบคุม Optimal FLPID เมื่อพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงไป

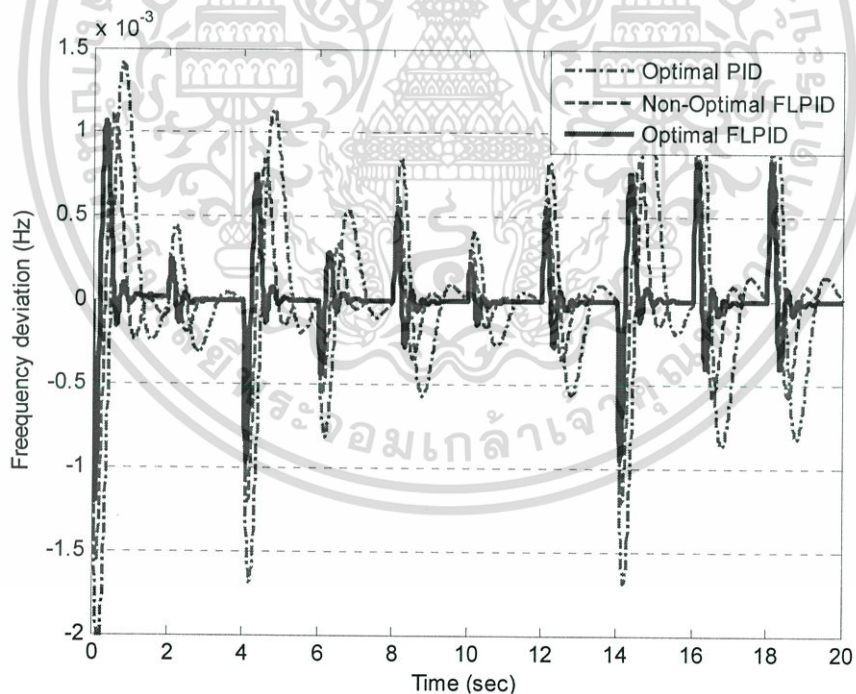
จากนั้น ในกรณีที่ 3 สมมติว่ามีการเปลี่ยนแปลงของโหลด (ΔP_L) เป็นลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าค่าฟุงเกิน และการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวของ ΔF ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ในกรณีของตัวควบคุม Optimal FLPID นั้นจะมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุม Non-Optimal FLPID และ PID

ต่อมาในกรณีที่ 4 สมมติว่าระบบได้รับการเปลี่ยนแปลงของกำลังลม (ΔP_{iw}) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ผลตอบสนองของควมถี่ระบบภายใต้การควบคุมของ Optimal FLPID ดังแสดงในรูปที่ 3.20 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุม Non-Optimal FLPID และ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

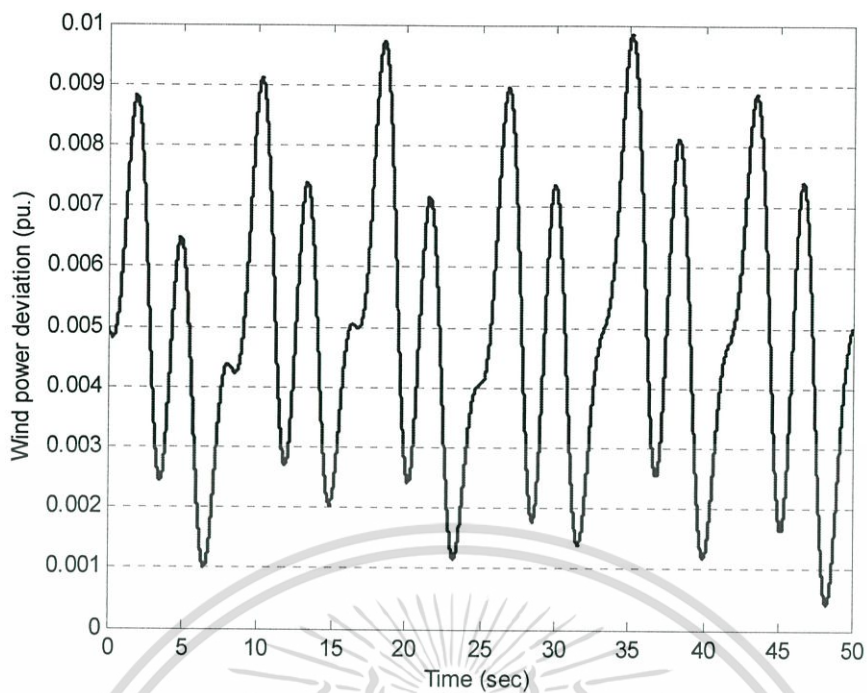


รูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงของโหลดในกรณีที่ 3

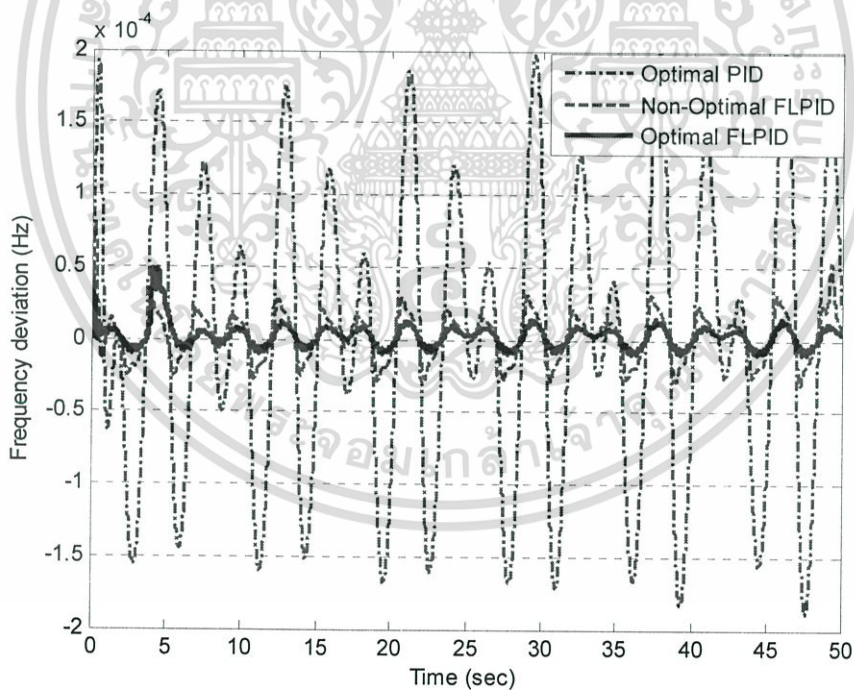


รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองของความถี่ระบบในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



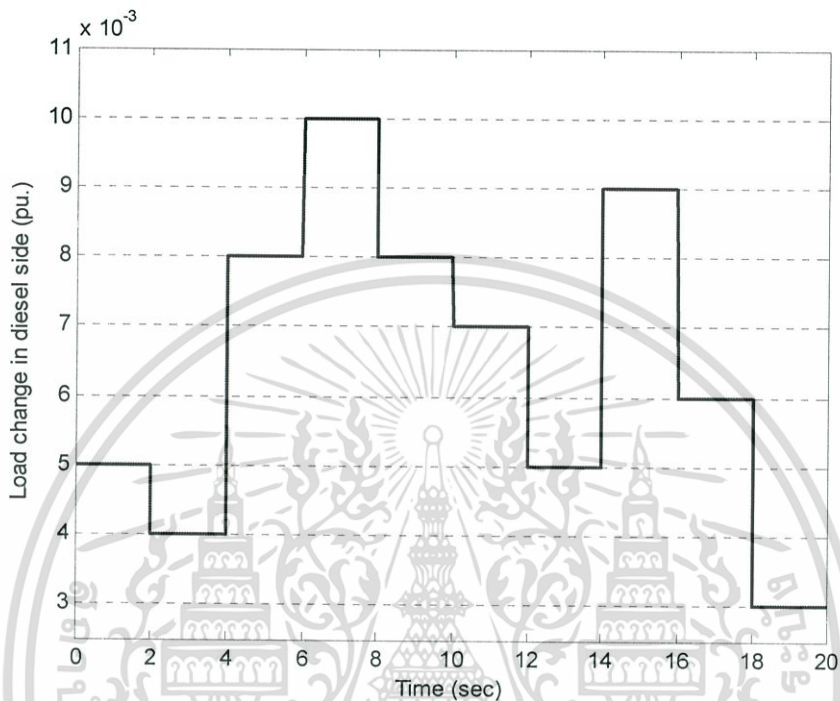
รูปที่ 3.19 การเปลี่ยนแปลงของกำลังลมในกรณีที่ 4



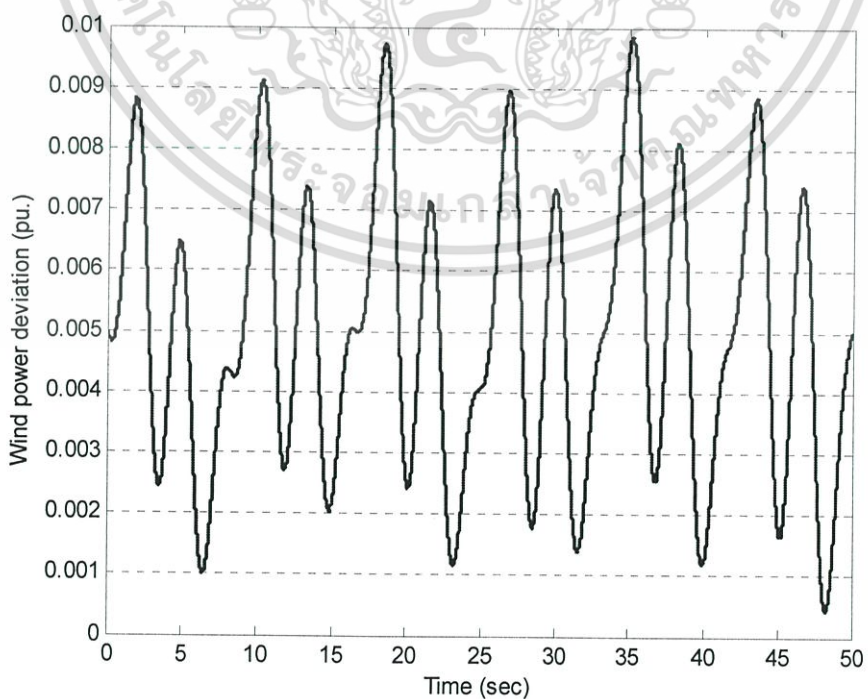
รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองของความถี่ระบบในกรณีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 5 สมมติว่าในระบบมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดดังแสดงในรูปที่ 3.21 พร้อมทั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังลมดังแสดงในรูปที่ 3.22 พร้อมกัน จากผลการจำลองในรูปที่ 3.23 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าพุงเกิน และการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวของ ΔF ในกรณีของตัวควบคุม Optimal FLPID นั้นจะมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุม Non-Optimal FLPID และ PID

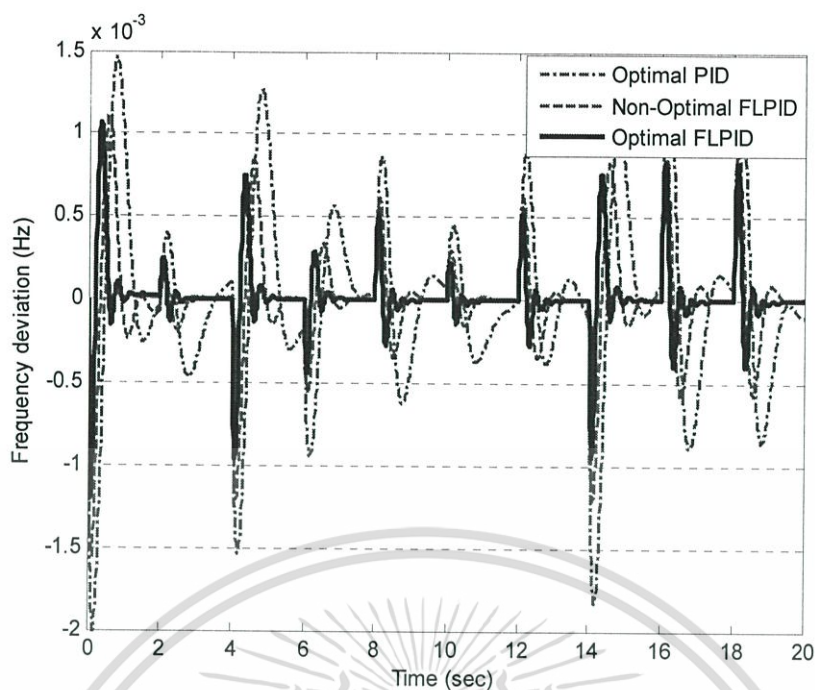


รูปที่ 3.21 การเปลี่ยนแปลงของโหลดในกรณีที่ 5



รูปที่ 3.22 การเปลี่ยนแปลงของกำลังลมในกรณีที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองของความถี่ระบบในกรณีที่ 5

3.4 สรุป

ในบทนี้แนะนำวิธีการออกแบบตัวควบคุมความถี่แบบฟuzzy โฟจิก-พีไอดีที่เหมาะสมโดยใช้วิธีฝูงผึ้งในระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระที่ประกอบไปด้วยการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และดีเซล ด้วยวิธีที่นำเสนอ ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีไอดี สามารถออกแบบได้โดยอัตโนมัติด้วยการประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง ที่ปราศจากการลองผิดลองถูก หรืออาศัยผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอนั้นนอกจากมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมความถี่ แล้วยังมีความคงทนอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบอีกด้วย เมื่อเทียบกับตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบ

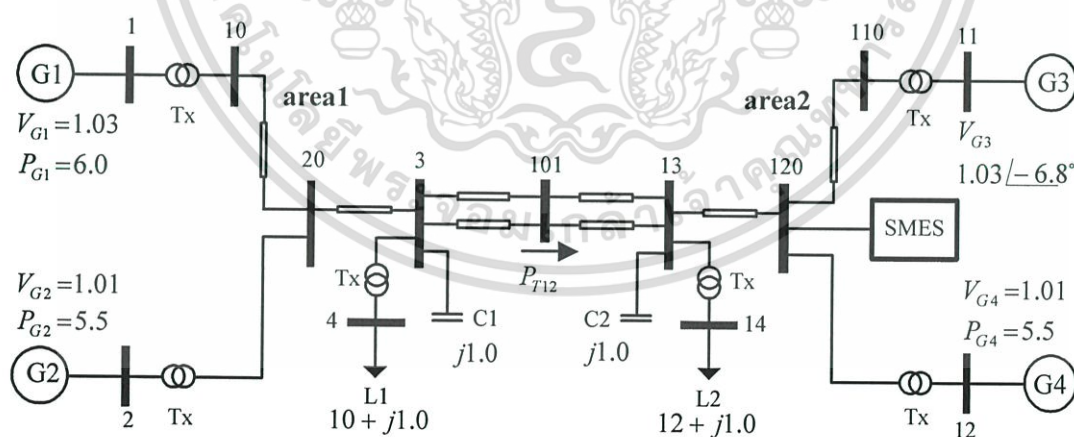
บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมฟิสิกส์-พีไอดีที่เหมาะสมสำหรับ SMES ด้วยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อลดการแกว่งกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟิสิกส์-พีไอดีเพื่อควบคุมการทำงานของตัวสะสมพลังงานแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำยิ่งยวด (Superconducting magnetic energy storage: SMES) โดยใช้วิธีฝูงผึ้งในการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้มีความเหมาะสมเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงเข้าหากันจากพื้นที่หนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่ง ที่มีปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ โดยจะทำการออกแบบให้กับทางด้านตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES ผลการทดสอบโดยการจำลองคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความด้วยตัวควบคุมฟิสิกส์-พีไอดีมีประสิทธิภาพ และความคงทนต่อการเกิดสิ่งรบกวนในระบบได้สูงกว่าตัววิธีที่นำมาเปรียบเทียบภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน

4.1 แบบจำลองของระบบ

4.1.1 แบบจำลองระบบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแบบ 4 เครื่องจักรเชื่อมโยงกัน 2 พื้นที่

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.1 [28] ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 4 เครื่อง เชื่อมโยงกัน 2 พื้นที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะมีพิกัด 900 MVA และ 20 kV โดยได้ทำการแทนด้วยสมการแบบจำลองอันดับที่สี่ ที่ประกอบไปด้วย $[\delta, \omega, E'_d, E'_q]$ โดยสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

สมการสวิง (Swing equation)

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (4.1)$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D(\omega - \omega_s)) / M \quad (4.2)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในชั่วคราว (Transient internal electro-motive force) ในแนวแกนตรง (Direct axis) และในแกนขวาง (Quadrature axis)

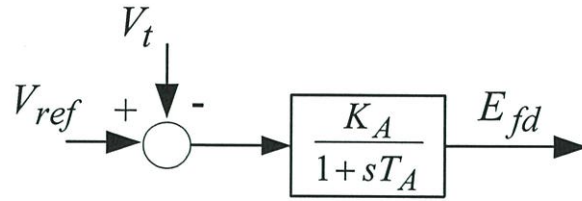
$$\dot{E}'_q = (E_{fd} - E'_q + I_d(X_d - X'_d)) / T'_{d0} \quad (4.3)$$

$$\dot{E}'_d = (-E'_d - I_q(X_q - X'_q)) / T'_{q0} \quad (4.4)$$

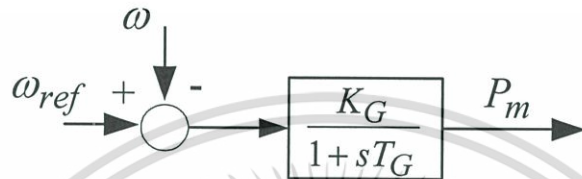
โดย

- δ คือ มุมโรเตอร์ (Rotor angle)
- ω คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity)
- ω_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)
- P_m คือ กำลังทางกล (Mechanical power)
- P_e คือ กำลังทางไฟฟ้า (Electrical power)
- D คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping coefficient)
- M คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
- E'_d, E'_q คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั่วคราวในแนวแกนตรง และแกนขวาง
- E_{fd} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขดฟิลด์ (Field voltage)
- X_d, X_q คือ รีแอกแตนซ์ (Reactance) ในแนวแกนตรง และแกนขวาง
- X'_d, X'_q คือ รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient reactance) ในแนวแกนตรง และแกนขวาง
- I_d, I_q คือ กระแส (Current) ที่แนวแกนตรง และแกนขวาง
- T'_{d0}, T'_{q0} คือ ค่าคงตัวเวลาชั่วคราว (Transient time constant) ของแนวแกนตรง และแกนขวาง

โดยเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องจะประกอบไปด้วยแบบจำลองอย่างง่ายของตัวกระตุ้น (Exciter) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และแบบจำลองอย่างง่ายของตัวบังคับ (Governor) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แบบจำลองระบบตัวกระตุ้น



รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบตัวบังคับ

พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดในหน่วยของ pu . เมื่อพิจารณาค่าฐานตามค่าพิกัดสูงสุดมีดังต่อไปนี้

รีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง (X_d)	=	1.8 pu .
รีแอกแตนซ์ในแนวแกนขวาง (X_q)	=	1.7 pu .
รีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกนตรง (X'_d)	=	0.3 pu .
รีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกนขวาง (X'_q)	=	0.55 pu .
ค่าคงตัวเวลาชั่วคราวในแนวแกนตรง (T'_{d0})	=	8 sec
ค่าคงตัวเวลาชั่วคราวในแนวแกนขวาง (T'_{q0})	=	0.4 sec
ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant) (H)	=	6.5 sec (สำหรับ G1 และ G2)
	=	6.175 sec (สำหรับ G3 และ G4)
ความถี่ (Frequency) (f)	=	60 Hz

พารามิเตอร์ของหม้อแปลงแต่ละตัวมีค่าอิมพีแดนซ์ บนค่าฐาน 900 MVA คือ

$$\text{รีแอกแตนซ์หม้อแปลง (Transformer reactance)} (T_x) = 0.15 \text{ pu.}$$

พารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละสายมีค่าอิมพีแดนซ์บนค่าฐาน 100 MVA คือ

$$\text{ความต้านทานสาย (Line resistance)} (R_L) = 0.0001 \text{ pu./km}$$

$$\text{รีแอกแตนซ์สาย (Line reactance)} (X_L) = 0.01 \text{ pu./km}$$

$$\text{ชัตเช็ปแดนซ์ขนาน (Shunt susceptance)} (B_c) = 0.0175 \text{ pu./km}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ของตัวกระตุ้น

อัตราขยายตัวกระตุ้น(K_A)	=	200
ค่าคงตัวเวลาตัวกระตุ้น(T_A)	=	0.05 sec

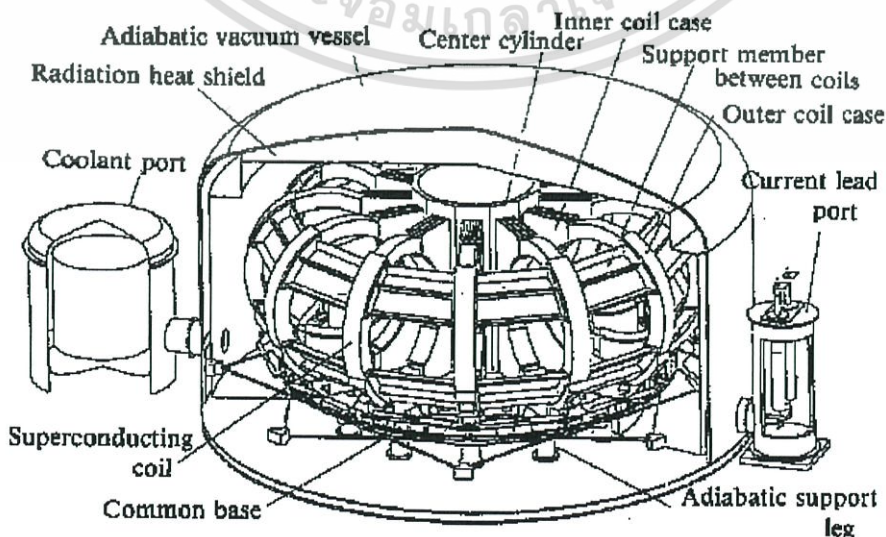
พารามิเตอร์ตัวตัวบังคับ

อัตราขยายตัวบังคับ(K_G)	=	10
ค่าคงตัวเวลาตัวบังคับ(T_G)	=	5 sec

สำหรับ SMES ทำการติดตั้งไว้ที่บัส 120 เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในระบบนี้ [66] การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริง (ΔP_{tie}) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (ΔQ_{tie}) ที่ไหลจากบัส 13 ไปยังบัส 120 ได้นำมาใช้เป็นสัญญาณอินพุตสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES โดยมีรายละเอียดต่างๆของ SMES คือ 80 MJ , 4 kA , 100 MVA [67]

4.1.2 แบบจำลอง SMES

SMES [68-72] เป็นอุปกรณ์สำหรับสะสม และจ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมากอย่างรวดเร็ว โดยจะสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของไฟฟ้ากระแสตรงในขดลวดตัวนำยิ่งยวดที่ทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าจนความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ระบบเหล่านี้ได้มีการนำมาใช้เมื่อหลายปีที่ผ่านมา เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพของไฟฟ้ากำลังในอุตสาหกรรม และเพิ่มเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ โดย SMES สามารถที่จะกลับมารับ หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในเวลาอันสั้น และยังสามารถกลับมาทำซ้ำได้หลายพันครั้ง โดยไม่ทำให้แม่เหล็กเกิดการเสื่อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของระบบ SMES ได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 4.4 โดยพลังงานไฟฟ้าสะสมในรูปของสนามแม่เหล็กของ SMES เกิดมาจากไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านขดลวดที่พันไว้ ถ้าขดลวดที่ใช้เป็นขดลวดแบบทั่วไป เช่น ขดลวดทองแดง พลังงานแม่เหล็กจะค่อยๆลดลงเนื่องจากความร้อน โดยความร้อนนี้เป็นผลมาจากความต้านทานของขดลวดต่อการไหลของกระแส อย่างไรก็ตาม ถ้าขดลวดที่ใช้มีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวด (ความต้านทานเป็นศูนย์) จะทำให้พลังงานที่สะสมนั้นคงสภาพอยู่ในขดลวดจนกระทั่งจ่ายออกไป ตัวนำยิ่งยวดที่มีความต้านทานเป็นศูนย์นี้ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีความร้อนต่ำ เพื่อที่การลดลงของความร้อนนั้นได้มีการทำให้หายไป ดังนั้น ตัวทำความเย็นจึงมีความต้องการในระบบการทำงานของ SMES เพื่อที่จะทำความเย็นให้กับขดลวด ส่วนทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ในส่วนนี้ยังมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอยู่ แต่ก็สามารถที่จะลดมาให้ต่ำที่สุดด้วยการออกแบบอุปกรณ์ และ โครงสร้างให้มีความเหมาะสมสำหรับในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ การรักษาพลังงานเนื่องจากกระแสเป็นตัวนำไปสู่ความสามารถของขดลวด ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการทำงานที่เหมาะสมโดยทั่วไปของอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ที่ประมาณ 50–77 องศาเคลวิน พลังงานสะสม (E) ภายในขดลวดสามารถหาได้จาก

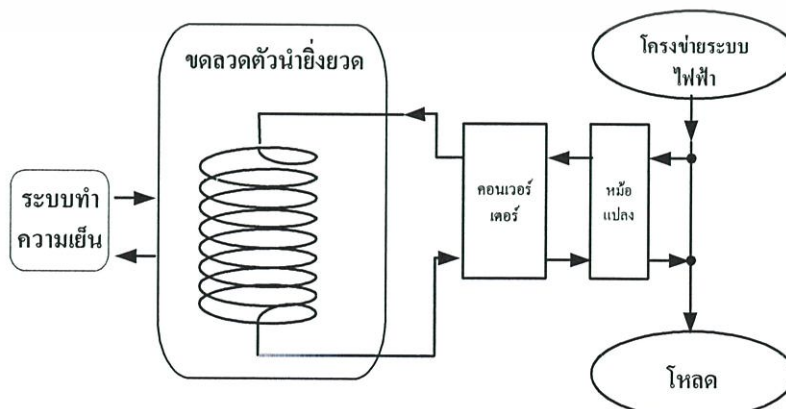
$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4.5)$$

เมื่อ

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

I คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด

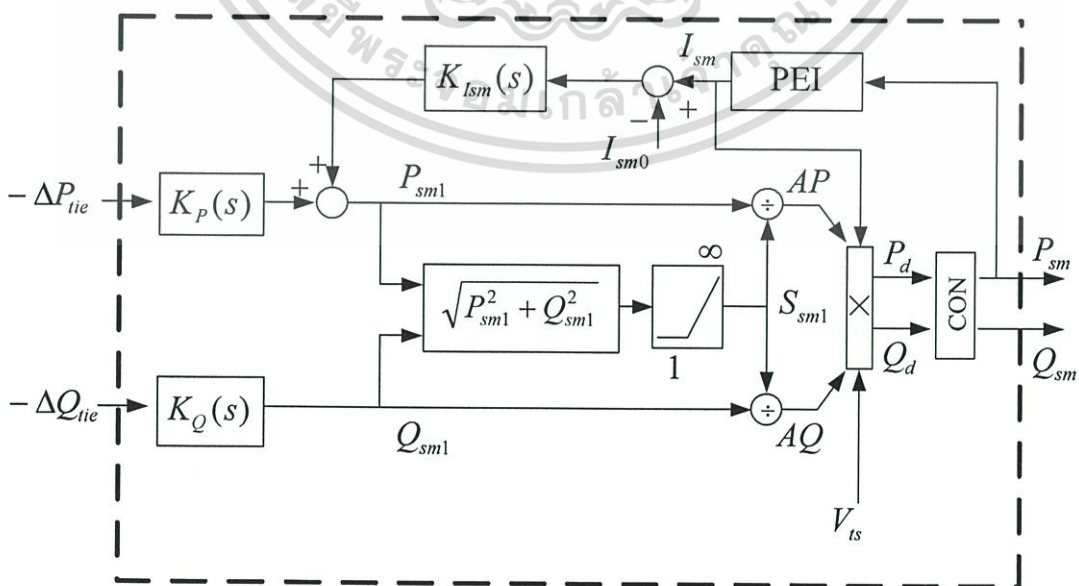
ขดลวดที่นำมาใช้เพื่อเป็นตัวนำยิ่งยวดเป็นแบบโลหะผสมไนโอเบียม-ไทเทเนียม (Niobium-Titanium) ซึ่งต้องการบังคับอุณหภูมิฮีเลียม (Helium) เหลวเพื่อที่จะทำให้เป็นตัวนำยิ่งยวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.5 ลักษณะการทำงานของ การสะสมพลังงานแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการทำงานของระบบ SMES ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ไว้แสดงในรูปที่ 4.5 การส่งผ่านแรงดัน (จากโครงสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ) จะลดลงจากหลายร้อย กิโลโวลต์ ไปยังหลายร้อย โวลต์ด้วยการใช้หม้อแปลงแบบแปลงลง (Step-down transformer) แล้วทำการเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวคอนเวอร์เตอร์ (Converter) เพื่อที่จะป้อนให้กับขดลวดตัวนำยิ่งยวด ดังนั้น เมื่อกำลังไฟฟ้าไหลจากระบบไปยังขดลวด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการชาร์จ และจะทำให้พลังงานสะสมในขดลวด การสะสมพลังงานสูงสุดจะขึ้นอยู่กับการออกแบบของอุปกรณ์ เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อย่างเช่น แรงดันตก หรือการเปลี่ยนแปลงของความถี่เป็นต้น ขดลวดจะทำการจ่ายพลังงานออกมาเสมือนกับแหล่งจ่ายพลังงาน แล้วทำการเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้ตัวคอนเวอร์เตอร์ เป็นตัวปฏิบัติการ โดย SMES ประกอบไปด้วยขดลวดตัวนำยิ่งยวด สถานะการทำงานของระบบกำลังไฟฟ้า ตัวทำความเย็น และท่อสุญญากาศ SMES เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่จะสะสมพลังงานไฟฟ้า และสามารถจัดหาได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน คุณลักษณะพิเศษเหล่านี้ได้มีการนำมาใช้สำหรับเสถียรภาพของกริดในระบบการจำหน่าย และสำหรับคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่การต้องการกำลังไฟฟ้าที่สะอาดเป็นพิเศษของโรงงานผลิต

SMES มีคุณลักษณะในการทำงานโดยสามารถที่จะรับ หรือจ่าย ได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนพร้อมกัน [31, 73] พร้อมทั้งสามารถที่จะใช้เพื่อที่จะลดปัญหาที่รุนแรงของการแกว่งกำลังไฟฟ้าในสายส่งต่อเชื่อม ด้วยเหตุนี้ SMES จึงได้มีการนำมาใช้งานอย่างมากมาย ในอดีต SMES ได้นำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาหลายๆ ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างเช่น การปรับปรุงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลัง [74, 75] การควบคุมความถี่ในระบบที่มีการเชื่อมโยงกัน [76, 77] ปรับปรุงคุณภาพระบบกำลังไฟฟ้า [78] เป็นต้น



รูปที่ 4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SMES ซึ่งสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ในเวลาเดียวกัน [79] ซึ่งประกอบด้วย 2 ตัวควบคุมหลักคือ $K_p(s)$ และ $K_O(s)$ พร้อมทั้งมี ตัวควบคุมย่อยที่ได้ทำการติดตั้งไว้เรียบร้อยแล้วใน SMES คือ $K_{Ism}(s)$ ที่อยู่ในรูปของตัวควบคุมพีไอ ดังสมการ (4.6)

$$K_{Ism}(s) = 40 + \frac{100}{s} \quad (4.6)$$

เมื่อ

$K_p(s)$ และ $K_O(s)$ คือ ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES
 $K_{Ism}(s)$ คือ ตัวควบคุมกระแสขดลวดของ SMES

เนื่องจากพฤติกรรมทางพลวัตของกระแสขดลวด SMES (I_{sm}) มีผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของ SMES ดังนั้นในทางปฏิบัติ I_{sm} จึงกำหนดไม่ให้มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อป้องกันของการนำกระแสที่ไม่ต่อเนื่องภายใต้สื่งรบกวนที่คาดไม่ถึง ในทางกลับกัน I_{sm} สูงๆ ซึ่งเกินขอบเขตที่ยอมรับได้สูงสุดอาจนำไปสู่การสูญเสียของคุณสมบัติตัวนำยิ่งยวด ทำให้ขอบเขตของกระแสขดลวดต่ำสุด และสูงสุดได้นำมาพิจารณา และได้กำหนดให้เป็น $0.30I_{sm0}$ และ $1.38I_{sm0}$ [30]

เมื่อ

I_{sm0} คือค่าเริ่มต้นของ I_{sm} กำหนดให้มีค่า = 0.6377 pu.

บล็อก PEI ในรูปที่ 4.6 เป็นส่วนที่ใช้เพื่อหาค่ากระแสขดลวด SMES เมื่อพิจารณา กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ SMES (P_{sm}) I_{sm} สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.7) และ (4.8)

$$E_{out} = \int P_{sm} dt \cdot S_{sm,base} \quad (4.7)$$

$$I_{sm} = \sqrt{I_{sm0}^2 - 2E_{out} / (L_{sm} \cdot I_{sm,base}^2)} \quad (4.8)$$

เมื่อ

L_{sm} คือ ค่าความเหนี่ยวนำของ SMES (H)

E_{out} คือ พลังงานเอาต์พุตของ SMES (J)

$I_{sm,base}$ คือ ค่าฐานของกระแส SMES (A)

$S_{sm,base}$ คือ ค่าฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (MVA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสะสมพลังงานของ SMES (E_{sm}) และการสะสมพลังงานของ SMES เริ่มต้น (E_{sm0}) สามารถหาได้จากสมการที่ (4.9) และ (4.10)

$$E_{sm} = E_{sm0} - E_{out} \quad (4.9)$$

$$E_{sm0} = 0.5L_{sm}I_{sm0}^2 \cdot I_{sm,base}^2 \quad (4.10)$$

เอาต์พุตของ SMES กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน (P_d และ Q_d) ที่ต้องการสามารถหาได้จากสมการ (4.11) และ (4.12)

$$P_d = V_{is} I_{sm} AP \quad (4.11)$$

$$Q_d = V_{is} I_{sm} AQ \quad (4.12)$$

เมื่อ

AP และ AQ คือ เศษส่วนกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน
 V_{is} คือ แรงดันบัสที่สถานะคงตัวของ SMES มีหน่วยเป็น (pu)

กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นคือ P_{sm} และ Q_{sm} เป็นเอาต์พุตของตัวคอนเวอร์เตอร์ของ SMES ซึ่งแทนด้วยสมการอันดับหนึ่ง ดังสมการที่ (4.13) และ (4.14)

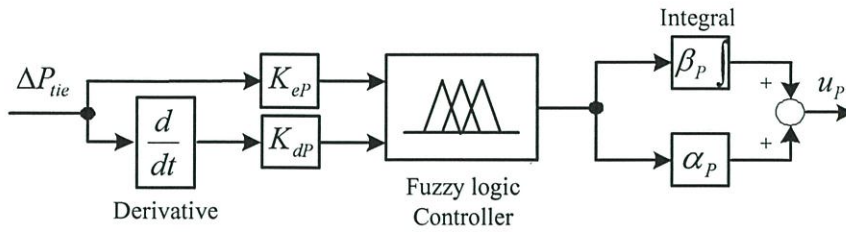
$$P_{sm} = 1/(1+0.01s)P_d \quad (4.13)$$

$$Q_{sm} = 1/(1+0.01s)Q_d \quad (4.14)$$

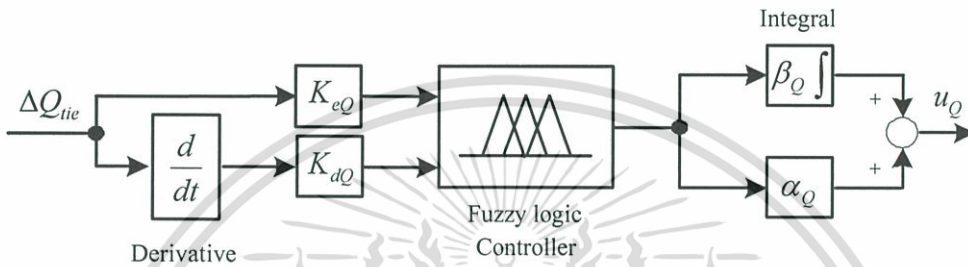
ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการสมมติว่าในสถานะการทำงานปกติ SMES จะไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนไปยังระบบไฟฟ้ากำลัง และ SMES จะไม่รับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน จากระบบไฟฟ้ากำลัง โดย SMES จะทำการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในระบบ

4.2 การออกแบบตัวควบคุม

จากรูปที่ 4.6 ตัวควบคุม $K_P(s)$ และ $K_Q(s)$ ได้แทนด้วยตัวควบคุมพีซซีโลจิก-พีไอดี ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ SMES

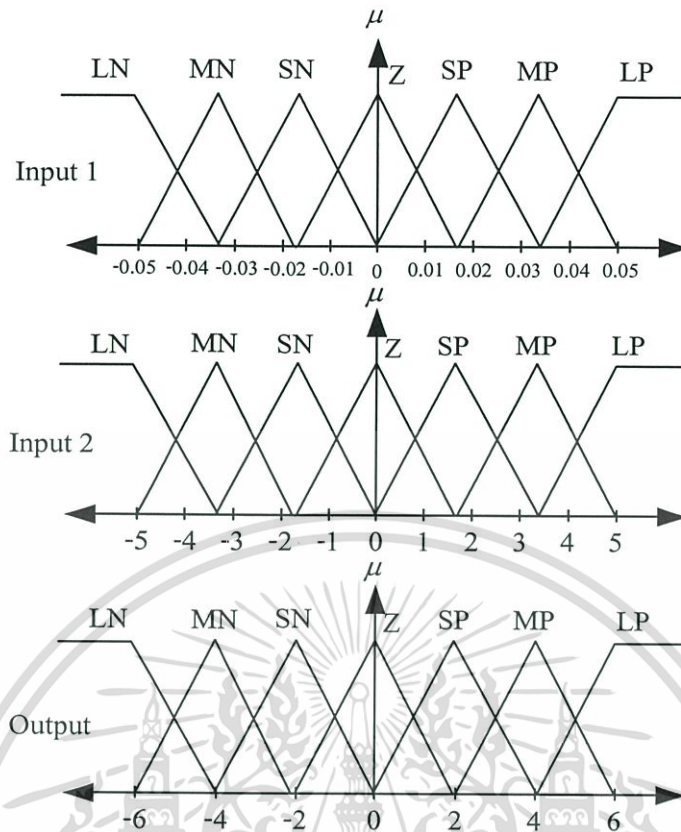


รูปที่ 4.8 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES

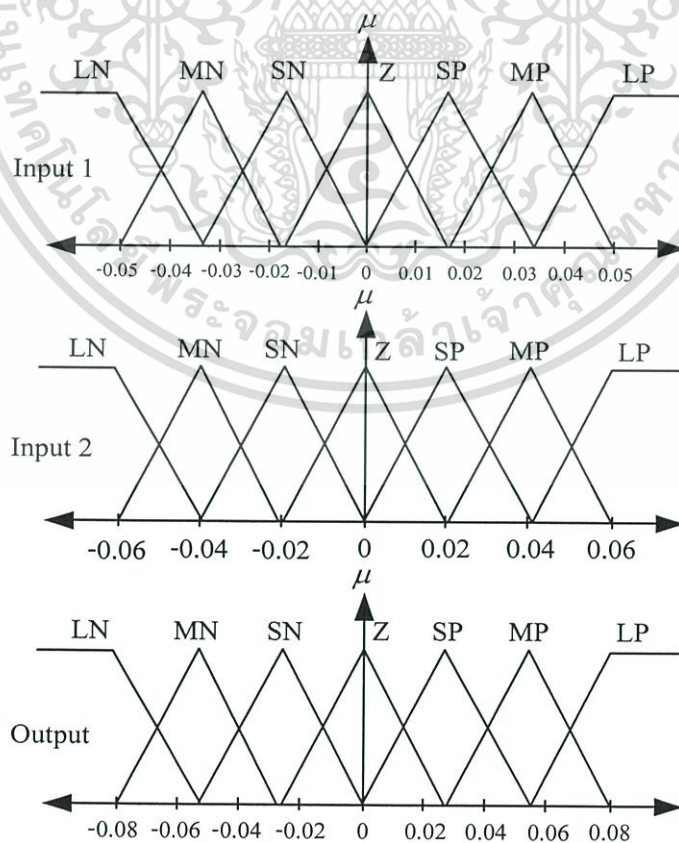
เมื่อ

ΔP_{tie} และ ΔQ_{tie} คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน
 K_{eP}, K_{dP}, β_P และ α_P คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง
 K_{eQ}, K_{dQ}, β_Q และ α_Q คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน
 u_P และ u_Q คือสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดีสำหรับควบคุม
 กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน

ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy-โลจิกที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9- 4.10 และกฎควบคุมของตัวควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานะเริ่มต้นจะใช้แบบเดียวกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.9 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ SMES



รูปที่ 4.10 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ SMES

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	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

ในการออกแบบตัวควบคุมได้ออกแบบในลักษณะที่แตกต่างกันเพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบ โดยมีดังต่อไปนี้

1. ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีสำหรับ SMES แบบทั่วไป (Conventional fuzzy logic-PID SMES controller: Conv.FLPID SMES) โดยตัวควบคุมนี้จะใช้ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.10 และ ตารางที่ 4.1 ส่วนทางด้านแฟลคเตอร์สัดส่วนจะทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

2. ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีสำหรับ SMES แบบเหมาะสม (Optimal fuzzy logic-PID SMES controller: Optimal FLPID SMES) ตัวควบคุมนี้เป็นตัวควบคุมที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ โดยจะทำการออกแบบทั้งในส่วนของ แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งพร้อมกันทั้งหมด

สำหรับการออกแบบให้มีความเหมาะสม ผลต่างของความเร็วเชิงมุมระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 (G1) และเครื่องที่ 3 (G3) ได้นำมาพิจารณาในการหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยใช้วิธี integral of time-multiplied absolute error (ITAE) เพื่อทำเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ดังสมการที่ (4.15)

$$\text{Minimize } ITAE = \int_0^t |\Delta\omega_d| dt \quad (4.15)$$

เมื่อ

t คือ เวลา (sec)

$\Delta\omega_d$ คือ ผลต่างของความเร็วเชิงมุมระหว่าง G1 และ G3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบกำหนดค่าไว้ดังนี้

แฟลคเตอร์สัดส่วนทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -50 ถึง 50

ฟังก์ชันสมาชิกทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -50% ถึง +50% จากตำแหน่งเดิม

กฎควบคุมทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7 (LN-LP)

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธีฝูงผึ้งกำหนดดังนี้

จำนวนผึ้งสำรวจ แทนด้วย (n) = 200 ตัว

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย (m) = 10 ค่า

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก m (e) = 4 ค่า

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ e (ne) = 10 ตัว

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ $m-e$ (ns) = 5 ตัว

ขนาดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงคำตอบ (Neighborhood) ของ m (ngh) = 30%

จำนวนรอบของการค้นหา (NC) = 100 รอบ

4.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ

เพื่อที่จะทดสอบถึงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบ การจำลองสถานการณ์การเกิดสิ่งรบกวนในสถานะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.2 ได้ทำการสมมติขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ 1 ได้ใช้เป็นกรณีในการออกแบบทั้งในส่วนของตัวควบคุม Conv.FLPID SMES และ Optimal FLPID SMES ด้วยการจำลองใน โปรแกรม Dymola ร่วมกับ ObjecStab [52] และ โปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ในการออกแบบปรับค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม Conv.FLPID SMES (แฟลคเตอร์สัดส่วน) และ Optimal FLPID SMES (แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 สถานะการทำงานในระบบที่ใช้ในการศึกษา

กรณี	สิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ
1	เกิดความผิดพลาด 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส 101 ณ เวลา $t = 1 \text{ sec}$ แล้วหายไปเองหลังจากเวลาผ่านไป 50 msec
2	เกิดความผิดพลาด 3 เฟสลงกราวด์ที่สายใดสายหนึ่งระหว่างบัส 3 และ บัส 101 ณ เวลา $t = 1 \text{ sec}$ แล้วหายไปเองหลังจากเวลาผ่านไป 50 msec
3	มีสายใดสายหนึ่งระหว่างบัส 101 และบัส 13 เปิดออกจากการทำงาน ณ เวลา $t = 1 \text{ sec}$ แล้วไม่ได้ปิดกลับเข้ามาทำงาน
4	มีสายใดสายหนึ่งที่ได้เปิดออกจากการทำงาน ปิดกลับเข้ามาระบบ ณ เวลา $t = 1 \text{ sec}$

ตารางที่ 4.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม $K_P(s)$ ของ SMES

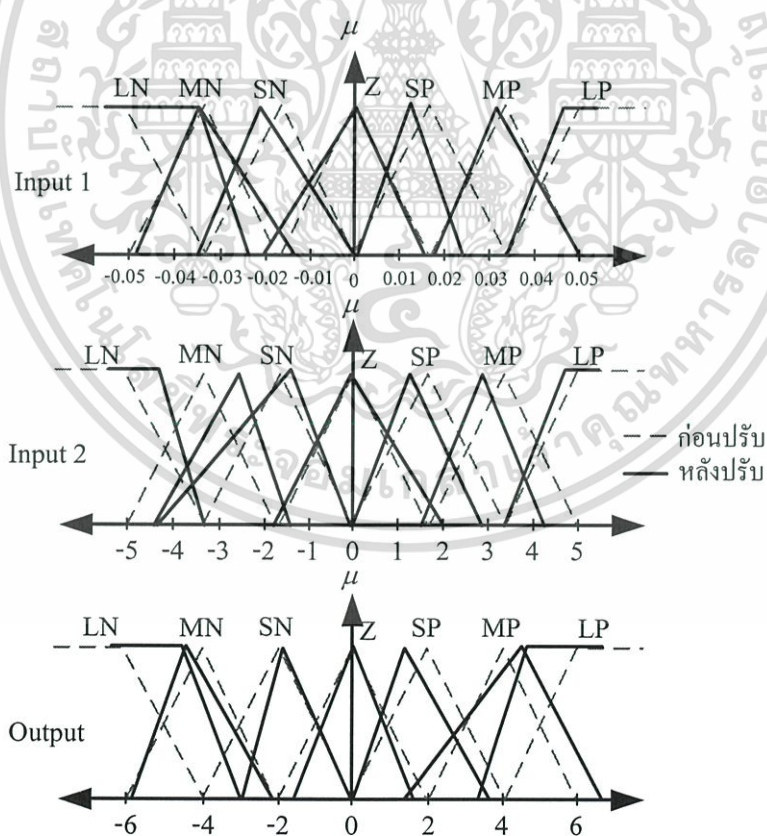
ตัวควบคุม	K_{eP}	K_{dP}	β_P	α_P	MF	CR
Conv.FLPID	0.3012	0.0490	1.2651	1.8452	รูปที่ 4.9	ตารางที่ 4.1
Optimal FLPID	0.3140	0.0196	0.7333	1.8724	รูปที่ 4.11	ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม $K_Q(s)$ ของ SMES

ตัวควบคุม	K_{eQ}	K_{dQ}	β_Q	α_Q	MF	CR
Conv. FLPID	0.0171	-0.0353	0.3604	-0.0209	รูปที่ 4.10	ตารางที่ 4.1
Optimal FLPID	0.0302	-0.0380	0.2121	-0.0250	รูปที่ 4.12	ตารางที่ 4.6

โดย MF คือ ฟังก์ชันสมาชิก

CR คือ กฎควบคุม

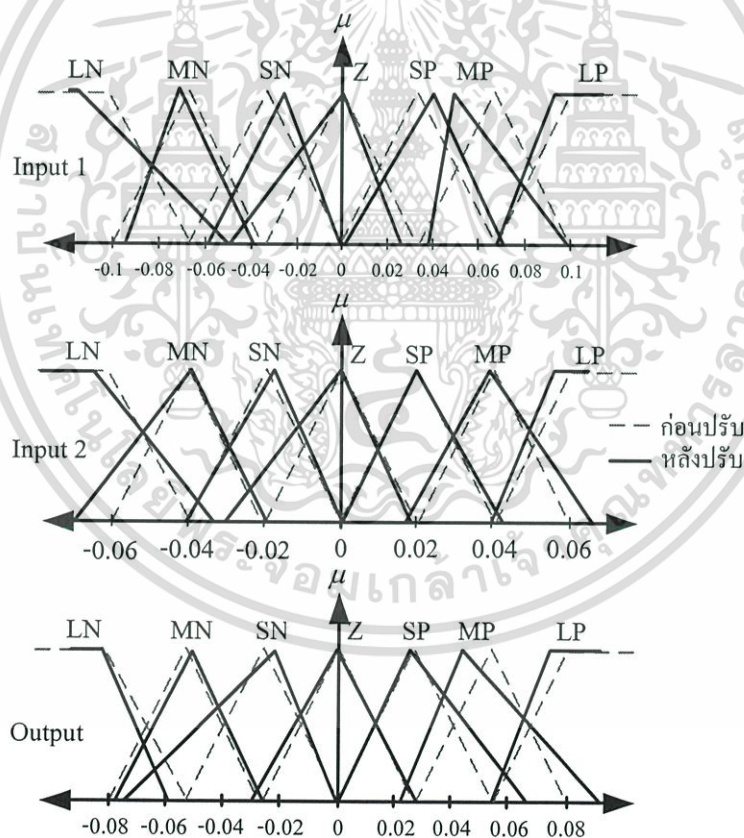


รูปที่ 4.11 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม $K_P(s)$ ของ SMES เทียบกับค่าเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม $K_P(s)$ ของ SMES

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	MN	MN	MN	Z	LN	MN	Z
	MN	SN	MN	Z	MN	LN	SP	MN
	SN	LN	SN	MN	SN	MN	Z	SP
	Z	SN	SN	SP	Z	SP	Z	LP
	SP	MN	LN	SP	SP	MP	LP	MP
	MP	Z	Z	SP	MP	MP	MP	MP
	LP	MP	SP	SP	MP	MP	MP	Z



รูปที่ 4.12 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุม $K_Q(s)$ ของ SMES เทียบกับค่าเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

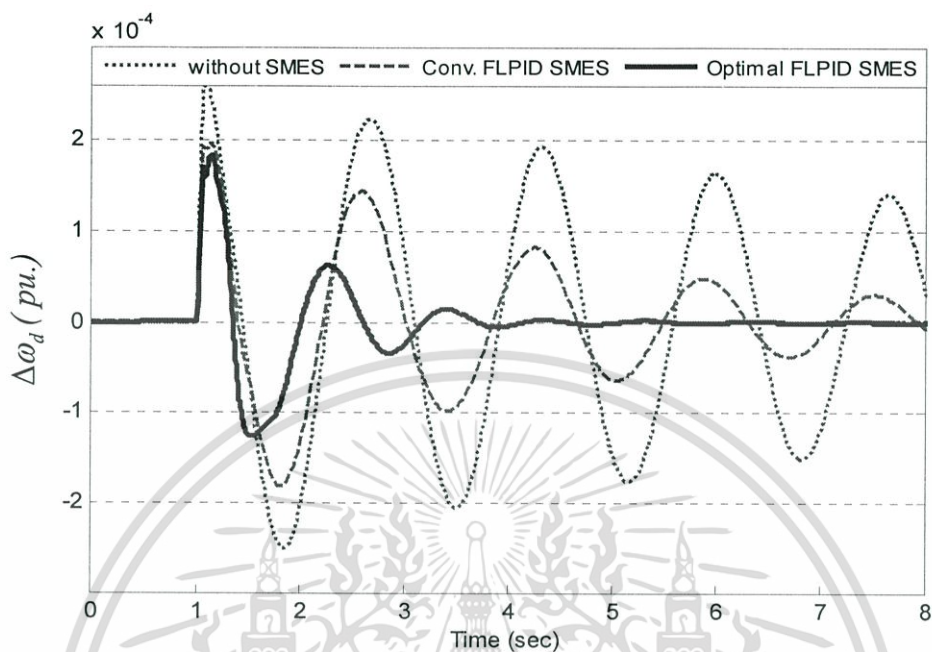
ตารางที่ 4.6 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุม $K_O(s)$ ของ SMES

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	SN	MN	MN	MN	LN	LN	LN
	MN	MN	MN	MN	SP	Z	SP	SP
	SN	MN	LN	MN	SN	SP	Z	Z
	Z	LN	SN	MN	Z	SP	LP	MP
	SP	MN	SN	SN	MP	SN	MP	Z
	MP	Z	MP	SP	SP	LP	MP	LP
	LP	SN	Z	MP	SN	MP	MP	LP

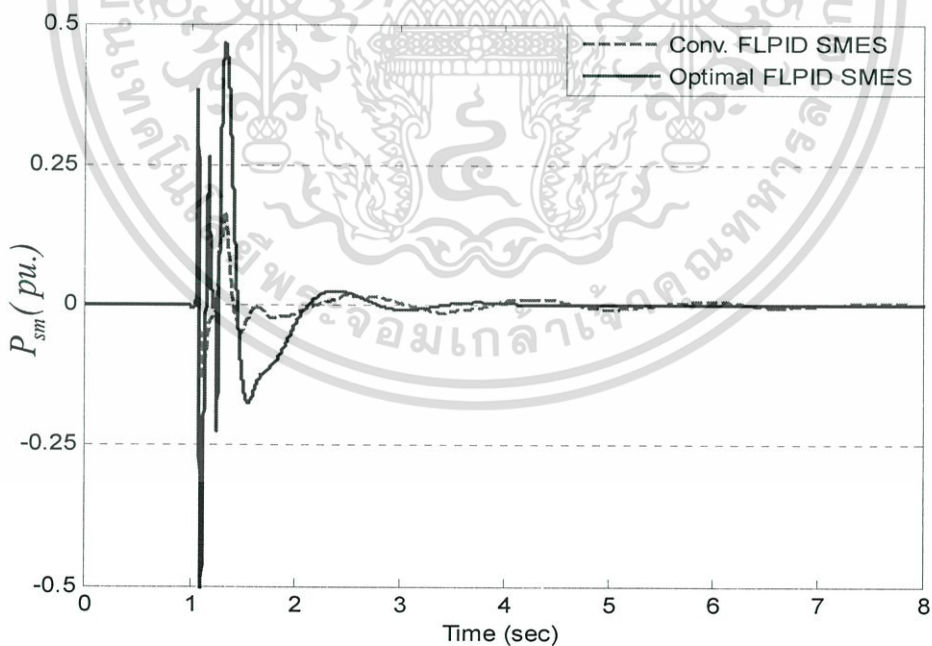
รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงผลการปรับค่าตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก โดยผลที่ได้นั้นจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างไปจากค่าเริ่มต้น อีกทั้งยังมีความกว้าง และรูปร่างของแต่ละฟังก์ชันนั้นมีความแตกต่างกันเพื่อให้มีความเหมาะสมของการประมวลผลในการควบคุม ทางด้านผลการปรับกฎควบคุมดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขของกฎนั้นได้เปลี่ยนไปในทิศทางตรงกันข้ามจากบวกเป็นลบ เช่น *Input 1* คือ LN และ *Input 2* คือ LN จะสังเกตได้ว่า ในด้านของกฎตัวควบคุมของ $K_p(s)$ นั้นจะเปลี่ยนจาก P เป็น N เนื่องจากอินพุตที่ป้อนให้ตัวควบคุมมีค่าเป็นลบ (ดูได้จากรูปที่ 4.6) ส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบ เพื่อให้การชดเชยนั้นมีความเหมาะสมทั้งในส่วน of ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน เนื่องจากในระบบมีการควบคุมการทำงานที่เครื่องกำเนิดแต่ละตัวร่วมอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น *Input 1* คือ SN และ *Input 2* คือ MN จะเห็นได้ว่า ในด้านของกฎตัวควบคุมของ $K_p(s)$ นั้นจะเปลี่ยนเป็น SN เนื่องจากระบบอาจจะมีความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงในการชดเชยเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอต่อความต้องการ หากมีการชดเชยไปมากกว่านี้อาจจะทำให้ระบบเกิดความไม่สมดุลของเสถียรภาพระบบ

การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 1 สมมติว่าในระบบเกิดความผิดปกติ (Fault) 3 เฟสลงกราวด์ที่บัส 101 โดยเกิดขึ้นที่เวลา $t = 1 \text{ sec}$ และได้หายไปเองหลังจากเวลาผ่านไป 50 msec ผลตอบสนองของระบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 ได้แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของ SMES เมื่อระบบเกิดความผิดปกติ ค่า $\Delta\omega_d$ ภายใต้การควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-ฟuzzy ได้ออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy คั้งที่นำเสนอ (Optimal FLPID SMES) สามารถที่จะกลับคืนสู่สภาวะปกติได้เร็วกว่า และมีค่าฟuzzyเกิน (Overshoot) ต่ำกว่า วิธีที่ออกแบบโดยทั่วไป และระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES ส่วนพฤติกรรมทางพลวัตในการรับและจ่ายของ SMES ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า SMES ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุม Optimal FLPID SMES สามารถที่จะรับและจ่าย

ได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ นอกจากนั้น กระแสขดลวด SMES ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ยังทำงานอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ทั้งวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ และวิธีที่นำเสนอ

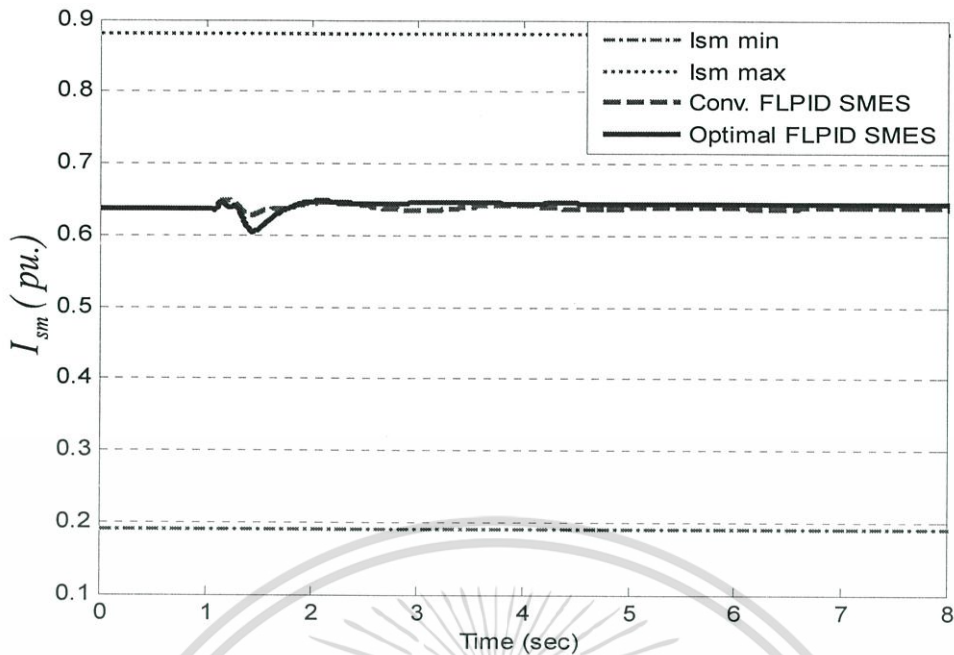


รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 1



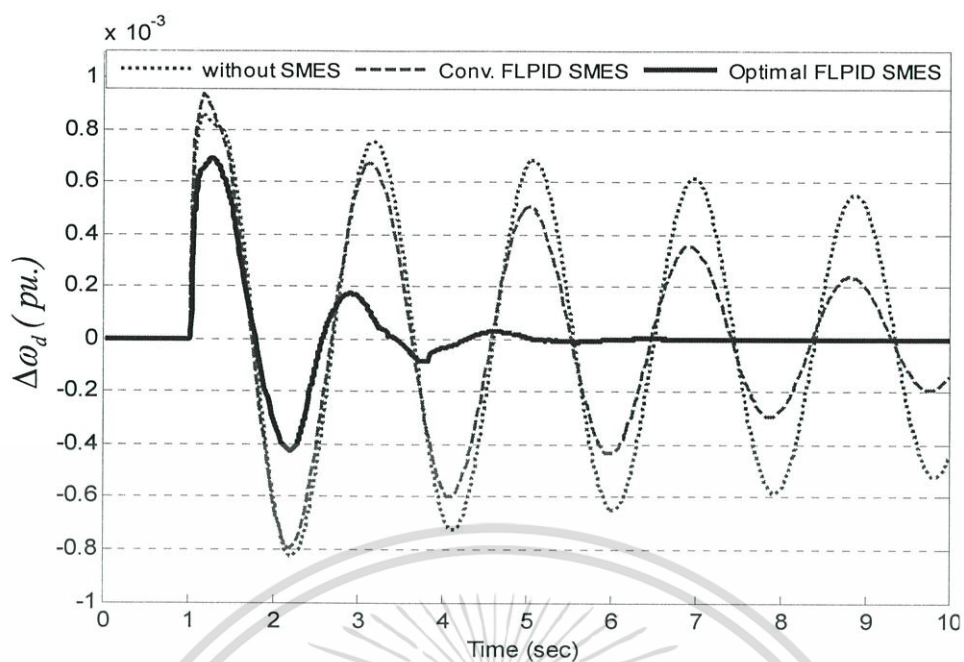
รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

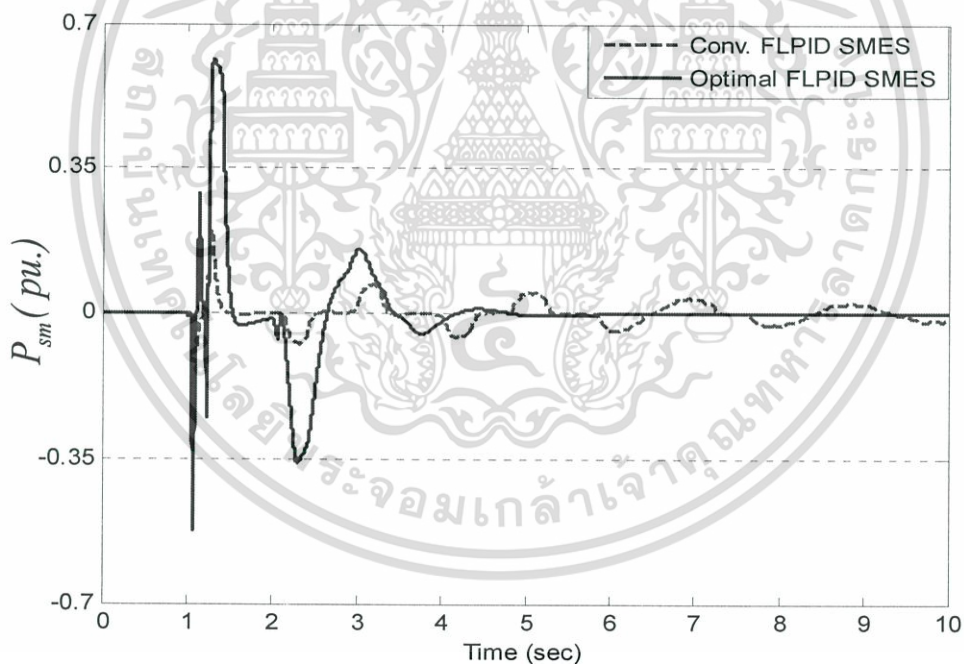


รูปที่ 4.15 กระแสขดลวดของ SMES ในกรณีที่ 1

ในกรณีที่ 2 สมมติว่าในระบบเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงกราวด์โดยเกิดขึ้นที่สายใดสายหนึ่งระหว่างบัส 3 และบัส 101 ที่เวลา $t = 1 \text{ sec}$ และได้หายไปเองหลังจากเวลาผ่านไป 50 msec ดังแสดงในรูปที่ 4.16 SMES ภายใต้การควบคุมของ Conv. FLPID SMES สามารถที่จะปรับค่าผลต่างความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่สภาวะปกติได้เร็วกว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES อย่างไรก็ตามผลของตัวควบคุม Optimal FLPID SMES มีค่าพุ่งเกิน และเวลาเข้าสู่สภาวะปกติ น้อยกว่าทั้งตัวควบคุม Conv. FLPID SMES และระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES พฤติกรรมทางพลวัตในการรับ และจ่ายของ SMES ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า SMES ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุม Optimal FLPID SMES สามารถที่จะรับ และจ่ายได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียมนอกจากนั้น ในรูปที่ 4.18 ได้แสดงให้เห็นว่ากระแสขดลวด SMES ทั้งวิธีที่นำเสนอ และวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ยังทำงานอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด

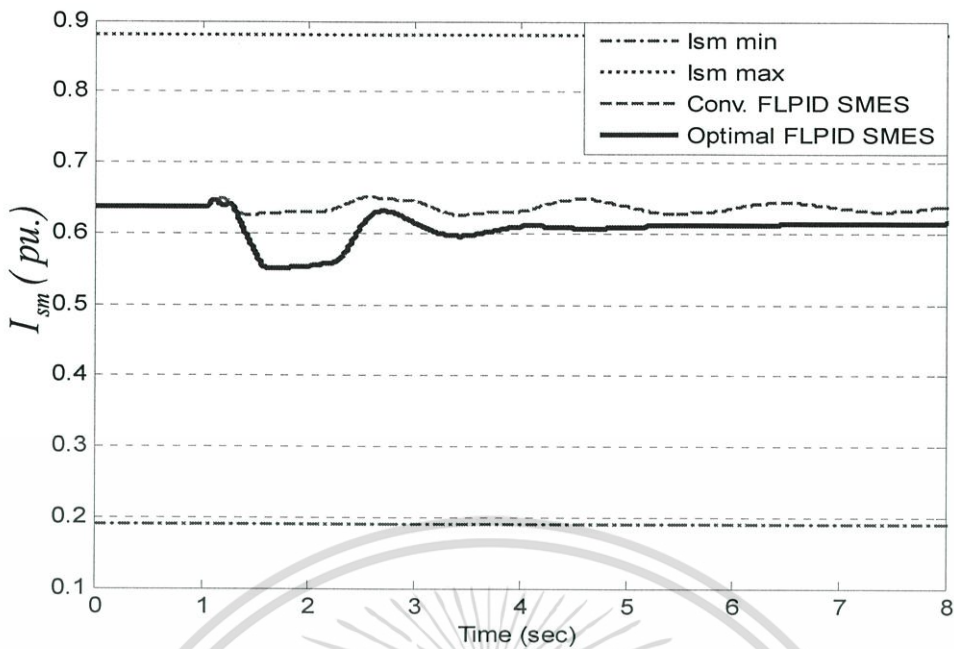


รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 2



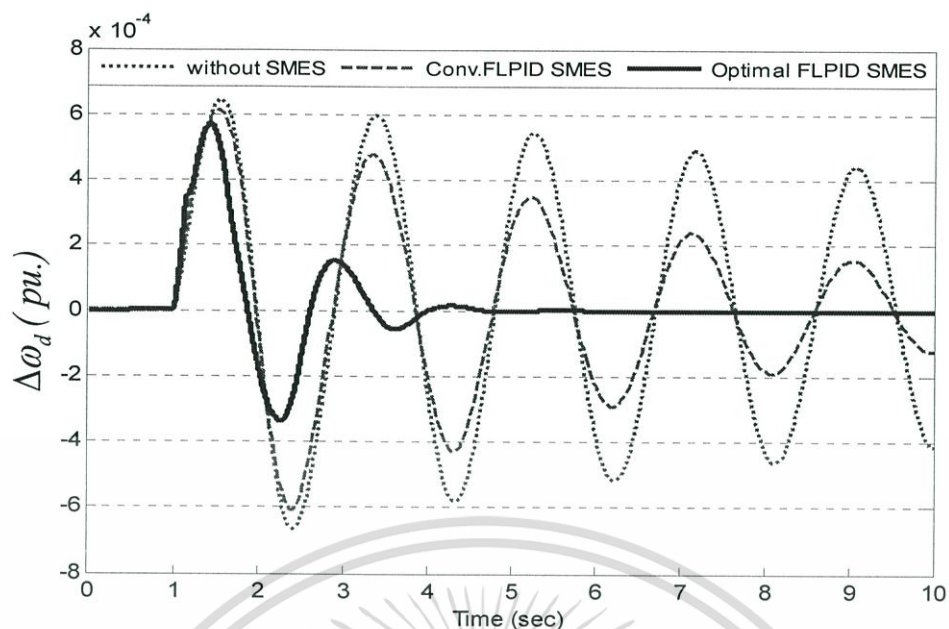
รูปที่ 4.17 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

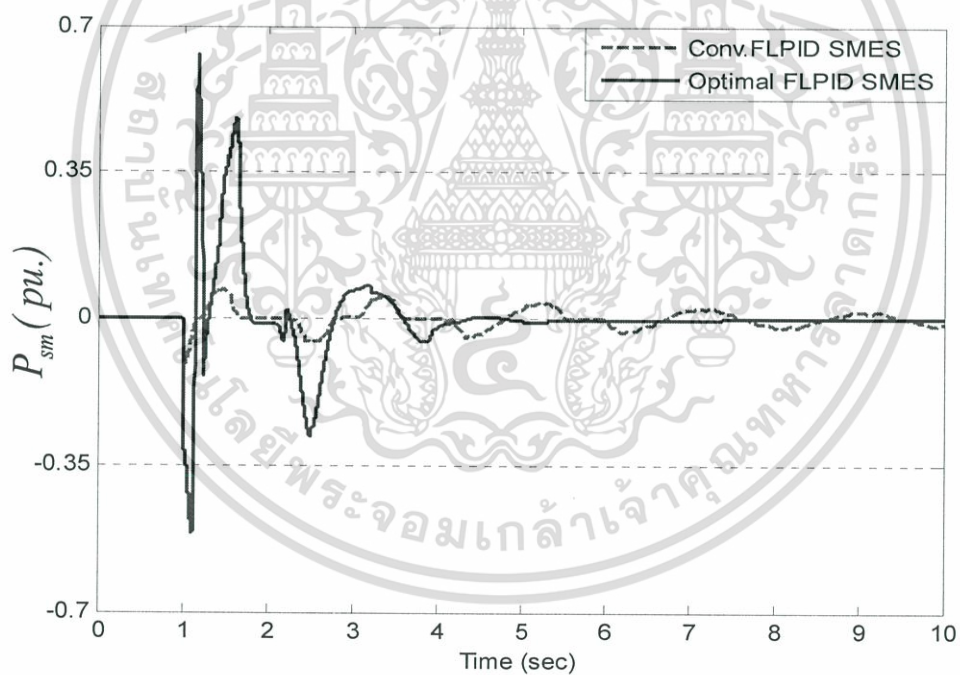


รูปที่ 4.18 กระแสขดลวดของ SMES ในกรณีที่ 2

ในกรณีต่อมา กรณีที่ 3 สมมติว่าในระบบมีสายโคสายหนึ่งระหว่างบัส 101 และบัส 13 ได้เปิดออกจากการทำงาน ณ เวลา $t = 1 \text{ sec}$ โดยไม่ได้ทำการปิดกลับมาเชื่อมต่อใหม่ ทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากพื้นที่ 1 ไปพื้นที่ 2 ผ่านสายส่งได้เส้นเดียว ผลต่างความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.19 SMES ที่ทำการควบคุมด้วยตัวควบคุม Optimal FLPID SMES สามารถที่จะทำให้ค่า $\Delta\omega_d$ กลับเข้าสู่สภาวะปกติโดยใช้เวลา และมีค่าพุ่งเกิน น้อยกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุม Conv. FLPID SMES และระบบที่ไม่ได้ทำการติดตั้ง SMES ทางด้านพฤติกรรมทางพลวัตในการรับ และจ่ายของ SMES ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า SMES ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุม Optimal FLPID SMES สามารถที่จะรับ และจ่ายได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ นอกจากนั้น ในรูปที่ 4.21 ได้แสดงให้เห็นว่ากระแสขดลวด SMES ยังทำงานอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ทั้งวิธีที่นำเสนอ และวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

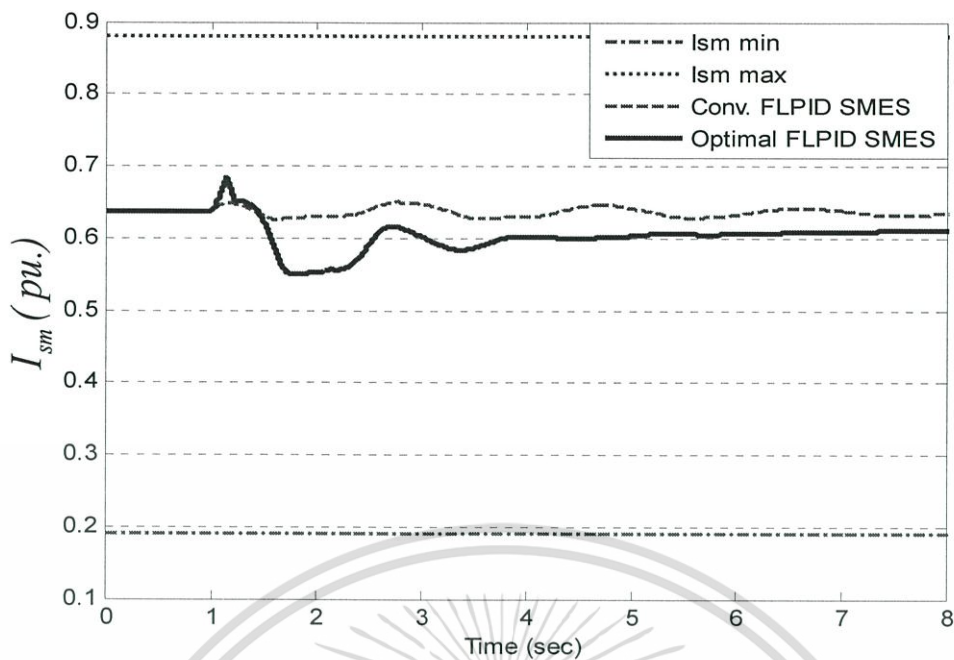


รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 3



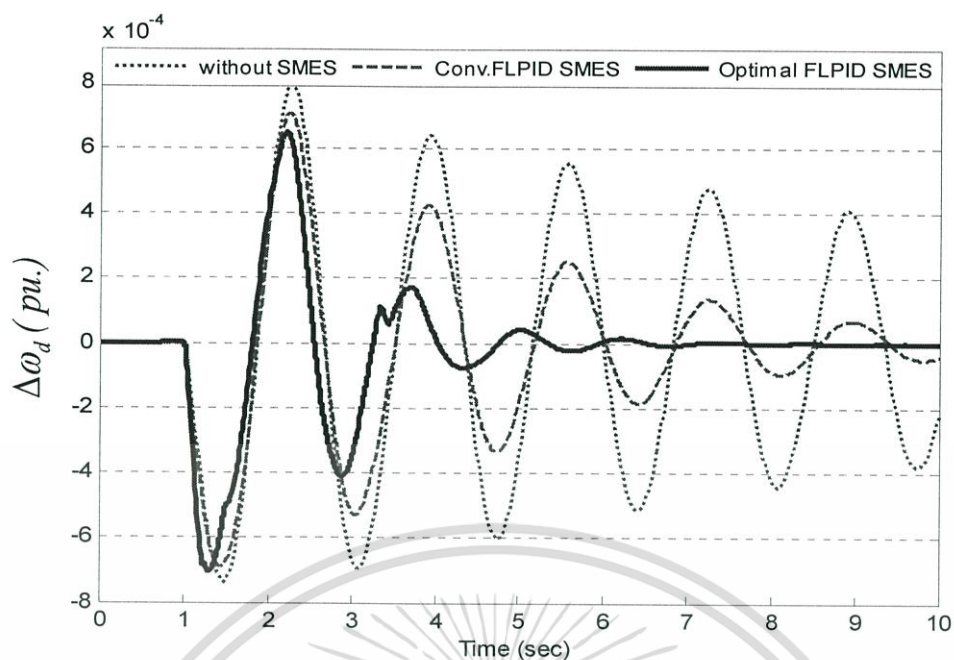
รูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

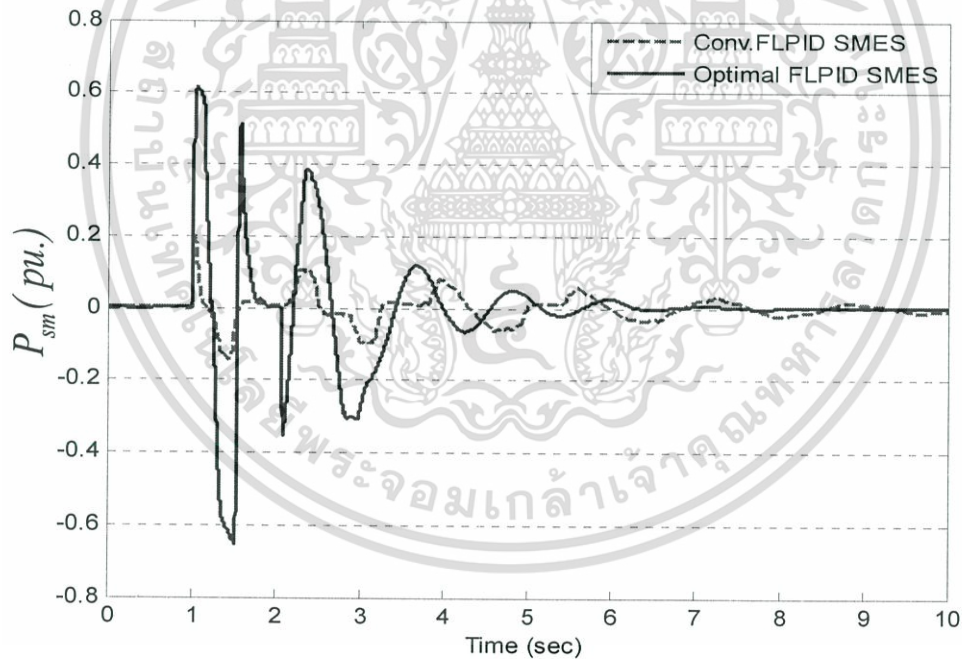


รูปที่ 4.21 กระแสควดของ SMES ในกรณีที่ 3

กรณีสุดท้าย สมมติว่าในระบบมีสายโคสายหนึ่งที่ได้เปิดออกจากการทำงานไว้ (ดังกรณี ที่ 3) แล้วปิดกลับมาเชื่อมต่อเข้าในระบบ ณ เวลา $t = 1 \text{ sec}$ ทำให้กำลังไฟฟ้ากลับมาไหลจาก พื้นที่ 1 ไปยังพื้นที่ 2 เหมือนดังสภาวะปกติ ผลตอบสนองของระบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 ได้ แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของ SMES เมื่อระบบเกิดความผิดปกติ ค่า $\Delta\omega_d$ ภายใต้การควบคุม ของตัวควบคุม Optimal FLPID SMES สามารถที่จะกลับคืนสู่สภาวะปกติได้เร็วกว่า และมีค่าพุ่ง เกิน ต่ำกว่า ตัวควบคุม Conv. FLPID SMES และระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง SMES และพฤติกรรมทาง พลวัตในการรับ และจ่ายของ SMES ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่า SMES ที่ทำงานภายใต้ ตัวควบคุม Optimal FLPID SMES สามารถที่จะรับ และจ่ายได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ นอกจากนั้น กระแสควดของ SMES ยังทำงานอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ทั้งวิธีที่นำเสนอ และวิธี ที่นำมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.24

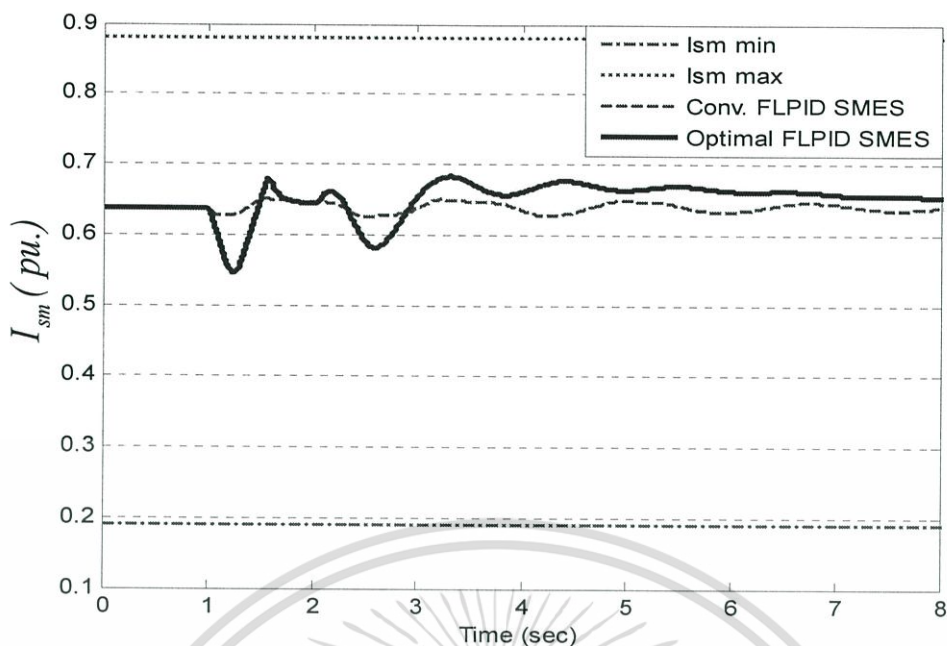


รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่ 4



รูปที่ 4.23 กำลังไฟฟ้าจริงเอาต์พุตของ SMES ในกรณีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กระแสขดลวดของ SMES ในกรณีที่ 4

4.4 สรุป

ในบทนี้ นำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 เครื่อง เชื่อมโยงกัน 2 พื้นที่ ด้วยการใช้ตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีควบคุมการรับ และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ SMES ในส่วนของ แพลเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมของพีชชีโลจิก-พีไอดีนั้นสามารถออกแบบได้โดยไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือการลองผิดลองถูกโดยการ ใช้วิธีผู่ผู่ในการค้นหาค่าที่เหมาะสมพร้อมกันแบบอัตโนมัติ ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การประยุกต์ใช้ SMES ภายใต้การควบคุมของตัวควบคุม Optimal FLPID SMES ที่ ออกแบบให้เหมาะสมทั้งในส่วนของแพลเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม มีค่า ผลต่างความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ 1 และพื้นที่ 2 ที่น้อยกว่าทั้งในด้านเวลาเข้าสู่ สภาวะปกติ และค่าพุงเกิน เมื่อเทียบกับตัวควบคุม Conv. FLPID SMES ที่ออกแบบเฉพาะในส่วน ของแพลเตอร์สัดส่วนเท่านั้น และระบบที่ไม่ได้ทำการติดตั้ง SMES นอกจากนั้น พฤติกรรมทาง พลวัตของการรับ และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ SMES ภายใต้การควบคุมของวิธีที่นำเสนอ นั้น สามารถตอบสนองได้ดีกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ อีกทั้งสภาวะการทำงานของกระแสขดลวดยัง อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ ภายใต้สถานการณ์การจำลองสี่รบกวนที่แตกต่างกัน

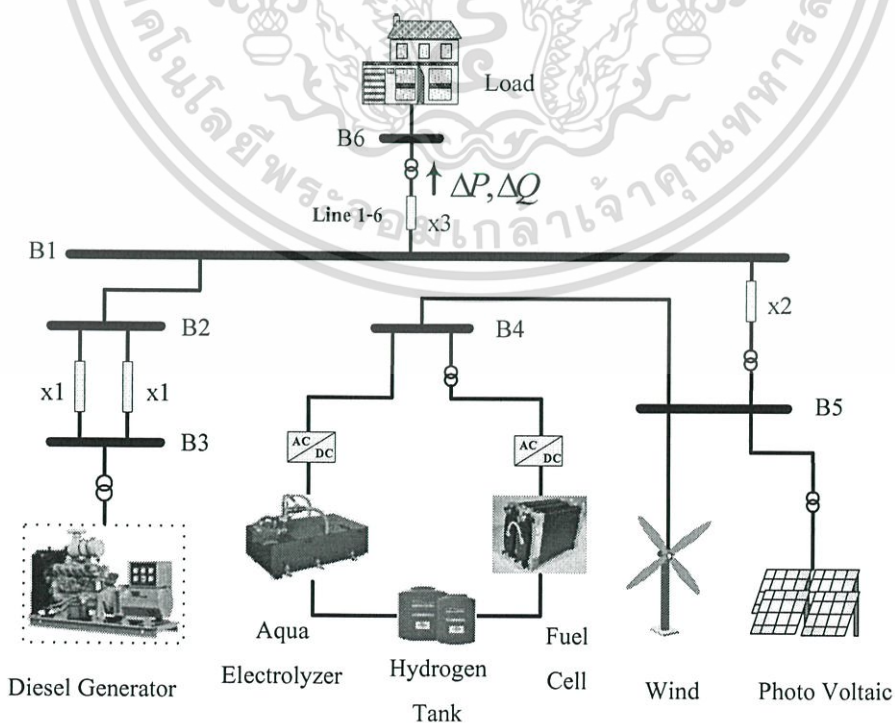
บทที่ 5

การออกแบบตัวควบคุมฟิวส์ลจิก-พีไอดีสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ ไลเซอร์โดยวิธีฝูงผึ้ง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไมโครกริด

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟิวส์ลจิก-พีไอดีโดยใช้วิธีฝูงผึ้งในการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมให้มีความเหมาะสม เพื่อควบคุมการทำงานของ อิเล็กทรอนิกส์ไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไมโครกริด ที่มีส่วนประกอบของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วย เนื่องจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดไม่คงที่ จึงได้มีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้รับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความด้วยตัวควบคุมฟิวส์ลจิก-พีไอดีมีประสิทธิภาพ และความคงทนต่อการเกิดสิ่งรบกวนในระบบได้สูงกว่าตัววิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน

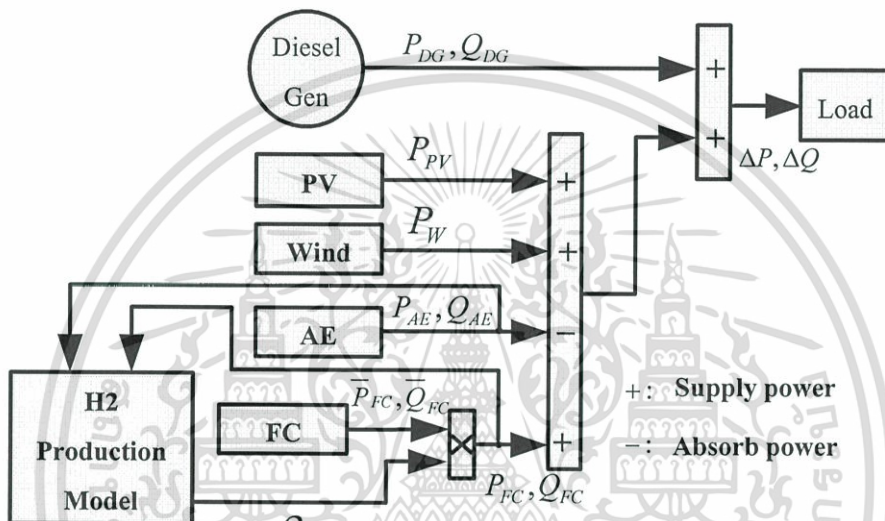
5.1 แบบจำลองของระบบ

5.1.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.1 [80] ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel generator: DG) ขนาด 20 MVA เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (Wind power generator: WG) ขนาด 4 MW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photo voltaic: PV) ขนาด 800 kW และ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell: FC) ขนาด 2 MW เชื่อมต่อกันเพื่อร่วมกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดขนาด $10 + j2$ MVA และระบบการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen production) คือ AE ขนาด 3 MW โดยสามารถแสดงเป็นแบบจำลองของระบบได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แบบจำลองระบบไมโครกริด

เมื่อ

P_{DG}, Q_{DG} คือ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลที่จ่ายเข้าระบบ

P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายเข้าระบบ

P_W คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่จ่ายเข้าระบบ

P_{AE}, Q_{AE} คือ การรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE จากระบบ

ρ คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในถังเก็บ และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ FC

$\bar{P}_{FC}, \bar{Q}_{FC}$ คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะจ่ายออกมาของ FC

P_{FC}, Q_{FC} คือ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ FC ที่จ่ายเข้าระบบ

$\Delta P, \Delta Q$ คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสายที่จ่ายไปยังโหลด

5.1.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลแทนด้วยสมการแบบจำลองอันดับที่สาม ที่ประกอบไปด้วย $[\dot{E}'_q, \dot{\omega}, \dot{\delta}]$ โดยสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

สมการสวิง (Swing equation)

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (5.1)$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D(\omega - \omega_s)) / M \quad (5.2)$$

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั่วคราว (Transient internal electro-magnetic field) ในแนวแกนขวาง (Quadrature axis)

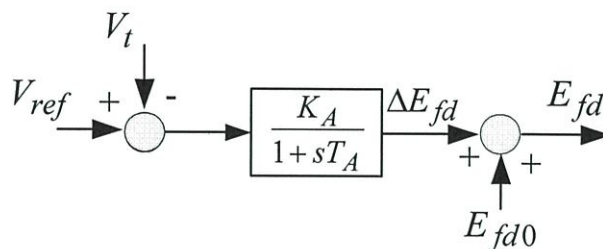
$$\dot{E}'_q = (E_{fd} - E'_q + I_d(X_d - X'_d)) / T'_{d0} \quad (5.3)$$

โดยที่

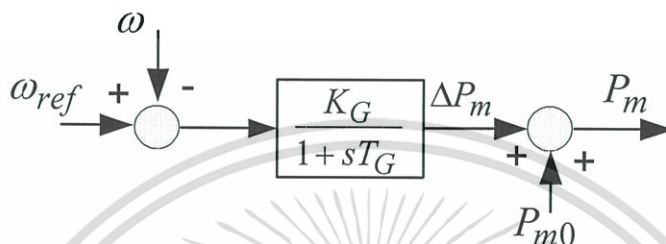
δ	คือ มุมโรเตอร์ (Rotor angle)
ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity)
ω_s	คือ ความเร็วเชิงโครนัส (Synchronous speed)
P_m	คือ กำลังทางกล (Mechanical power)
P_e	คือ กำลังทางไฟฟ้า (Electrical power)
D	คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping coefficient)
M	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
E'_q	คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั่วคราวในแนวแกนขวาง
E_{fd}	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขดฟิลด์ (Field voltage)
X_d	คือ รีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง (Direct axis)
X'_d	คือ รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient reactance) ในแนวแกนตรง
I_d	คือ กระแส (Current) ในแนวแกนตรง
T'_{d0}	คือ ค่าคงที่เวลาชั่วคราว (Transient time constant) ในแนวแกนตรง

โดยเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องจะประกอบไปด้วยแบบจำลองอย่างง่ายของตัวกระตุ้น (Exciter) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และแบบจำลองอย่างง่ายของตัวบังคับ (Governor) ดังแสดงในรูปที่ 5.4 [81]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แบบจำลองระบบตัวกระตุ้น



รูปที่ 5.4 แบบจำลองระบบตัวบังคับ

เครื่องกำเนิดคิเซลมีพิกัด 20 MVA พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดมีดังต่อไปนี้

ความถี่ (f)	=	60 Hz
ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature resistance) (R_a)	=	0.0036 pu.
รีแอกแตนซ์ในแนวแกนตรง (X_d)	=	1.56 pu.
รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสในแนวแกนขวาง (X_q)	=	1.06 pu.
รีแอกแตนซ์ชั่วคราวในแนวแกนตรง (X'_d)	=	0.296 pu.
ค่าคงตัวเวลาชั่วคราวของการเปิดวงจรในแนวแกนตรง (T'_{d0})	=	1.01 sec.
ค่าสัมประสิทธิ์ของความเฉื่อย (H)	=	0.8 sec.
ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D)	=	1

พารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละสายมีค่าอิมพีแดนซ์ คือ

รีแอกแตนซ์ของสาย (x_1)	=	0.4 pu.
รีแอกแตนซ์ของสาย (x_2)	=	0.2 pu.
รีแอกแตนซ์ของสาย (x_3)	=	0.001 pu.

พารามิเตอร์ของตัวกระตุ้น

$$\text{อัตราขยายของตัวกระตุ้น} (K_A) = 10$$

$$\text{ค่าคงตัวเวลาของตัวกระตุ้น} (T_A) = 0.1 \text{ sec}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ของตัวบ่งชี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยายของตัวบ่งชี้} (K_G) &= 10 \\ \text{ค่าคงตัวของตัวบ่งชี้} (T_G) &= 4 \text{ sec} \end{aligned}$$

ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากในระบบนี้ไม่ได้พิจารณาการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้แทนการจำลองด้วยสัญญาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่เข้าไปยังระบบ

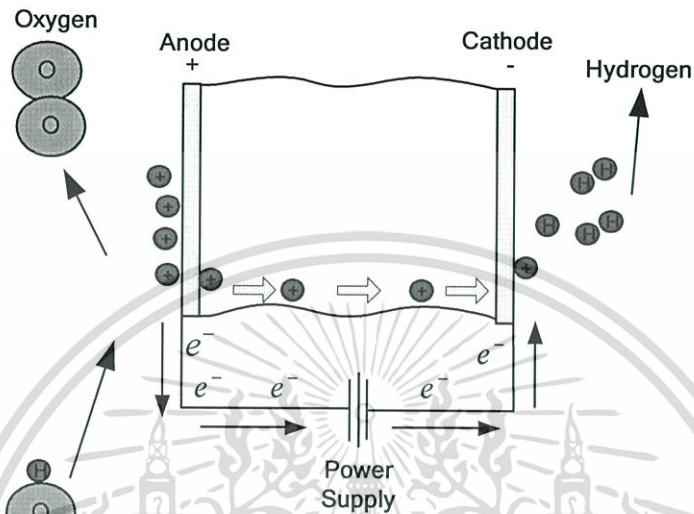
5.1.3 หลักการทำงาน และแบบจำลองของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

ก. อิเล็กโทรไลเซอร์

อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) [82-84] เป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไฮโดรเจน และออกซิเจนที่บริสุทธิ์ โดยสามารถที่จะแจกจ่ายไปยังความต้องการที่แตกต่างกันเช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ของแต่ละบุคคล ระบบพลังงานทดแทน สถานีเติมเชื้อเพลิง และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม อิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane (PEM) electrolyzer) เป็นอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้พื้นที่น้อย หรืออัดแน่นมากที่สุด และง่ายต่อการสร้าง นอกจากนี้ ยังสามารถที่จะผลิตไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง และควมมีประสิทธิภาพที่ระดับความหนาแน่นกระแสสูงอีกด้วย ในอิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน พันธะระหว่างไฮโดรเจน และออกซิเจนของน้ำ (H_2O) ได้แยกออกจากกันด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) และตัวเร่งปฏิกิริยาของแพลตินัม (Platinum) ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายออกไป ที่แอโนด เยื่อเซลล์จะทำการแยกไฮโดรเจน (H_2) ออกจากโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) โปรตอนไฮโดรเจน (H^+) จะเคลื่อนย้ายผ่านเยื่อเซลล์ และกลับมารวมกันที่แคโทดร่วมกับอิเล็กตรอนที่ไหลกลับ (e^-) แล้วอยู่ในรูปแบบของไฮโดรเจน (H_2) ดังแสดงในรูปที่ 5.5 การประยุกต์ในด้านอื่นๆ ของระบบอิเล็กโทรไลต์ คือ สามารถที่จะใช้เป็นเสมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อที่จะผลิตไฟฟ้าจากไฮโดรเจน และออกซิเจนด้วยการแปลงรูปเพียงเล็กน้อย

ส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลเซอร์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ปั้มน้ำ เครื่องแยกน้ำ-ก๊าซ ถึงแม้ว่า อิเล็กโทรไลเซอร์จะสามารถผลิตได้ทั้ง H_2 และ O_2 ด้วยการแยกไฟฟ้าเคมีของน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วอิเล็กโทรไลเซอร์จะได้รับการพิจารณาเสมือนเครื่องผลิตไฮโดรเจน และได้จำแนกตามระบบการป้อนที่แอโนด หรือระบบการป้อนที่แคโทด โดยจะขึ้นอยู่กับว่าทางเข้าของน้ำอยู่ที่ไหน เมื่ออิเล็กโทรไลเซอร์ใช้สำหรับเป็นเครื่องผลิตไฮโดรเจน ระบบการป้อนที่แคโทดจึงเป็นตัวเลือกที่ดี เนื่องจากตัวแยกซึ่งแยกน้ำ และออกซิเจนได้รับการขจัดออกที่แอโนด พร้อมกับออกซิเจนได้รับการระบายอากาศร่วมกับน้ำ แต่ข้อเสียใน

กรณีนี้คือจะมีข้อจำกัดในการโอนถ่ายปริมาณมาก และความหนาแน่นของกระแสต่ำ ในการศึกษาครั้งนี้แบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์แบบการป้อนที่แอโนดได้ประยุกต์ใช้ในการศึกษา เนื่องจากส่วนใหญ่อิเล็กโทรไลเซอร์ในด้านธุรกิจ และในหน่วยทางการทหารเป็นอิเล็กโทรไลเซอร์แบบการป้อนที่แอโนด



รูปที่ 5.5 ลักษณะการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์

การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรไลเซอร์ประกอบไปด้วย การใช้ผลิต O_2 สำหรับเครื่องช่วยหายใจของคนป่วย การใช้ผลิต H_2 เพื่อเป็นเชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ผลิต H_2 เพื่อเป็นระบบพลังงานสำรอง การผลิต H_2 สำหรับควบคุมการกักต้อนของสารเคมี ตัวตรวจจับโครมาโทกราฟี (Chromatograph) ของแก๊ส การขึ้นรูปเหล็ก และการเชื่อม อิเล็กโทรไลเซอร์ที่ศึกษาในปัจจุบัน งานวิจัยหลายๆ งานวิจัยจะมาจากภาคอุตสาหกรรม ที่ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ และระบบพลังงานทดแทน อย่างเช่น Onda [85] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ เพื่อที่จะวิเคราะห์ห้อิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยน โปรตอน Ulleberg [86] ได้แสดงแบบจำลองสำหรับอิเล็กโทรไลเซอร์แอลคาไลน์บนพื้นฐานของทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และการโอนถ่ายความร้อน (Heat transfer) เมื่อไม่นานมานี้ ระบบพลังงานทดแทนโดย Kelouwani et al. [87] ได้พิสูจน์ระบบพลังงานทดแทนที่ทำงานตามลำพัง ร่วมกับการสะสมของไฮโดรเจน และ Khan et al. [88] ได้นำเสนอแบบจำลองของระบบพลังงานที่มีการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

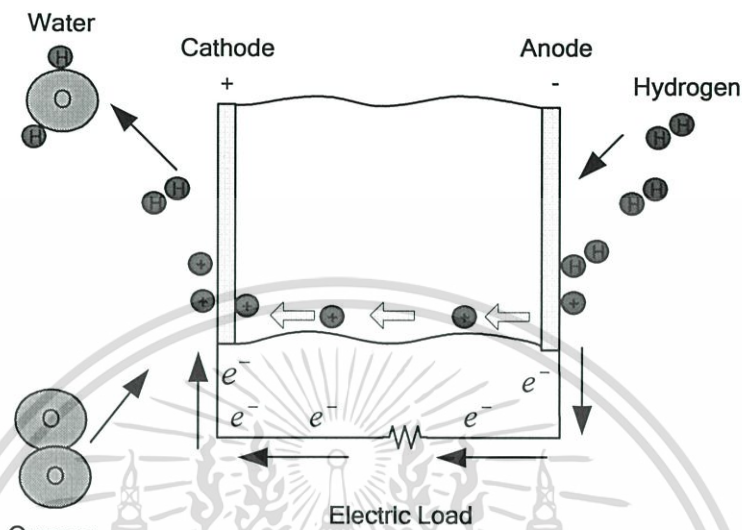
ข. เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) [89-95] เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่งคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบตลอดเวลา นั่นคือการเติมไฮโดรเจน และออกซิเจนตลอดเวลาซึ่งช่วยขจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป นอกจากนี้ที่ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเข้าทำปฏิกิริยาเมื่ออัดประจุ หรือคายประจุ ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และค่อนข้างเสถียร สารตั้งต้นที่ใช้โดยทั่วไปในเซลล์เชื้อเพลิงได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนที่ด้านแอโนด และก๊าซออกซิเจนที่ด้านแคโทด (เซลล์ไฮโดรเจน) โดยปกติแล้วเมื่อมีสารตั้งต้นไหลเข้าสู่ระบบ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็จะไหลออกจากระบบไปด้วย ดังนั้นการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงดำเนินต่อไปได้เรื่อยๆ หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงได้ค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวิส Christian Friedrich Schönbein ในปี ค.ศ. 1838 และตีพิมพ์ในเดือนมกราคมปีถัดมาใน "Philosophical Magazine" จากบทความชิ้นนี้ เซลล์เชื้อเพลิงได้สร้างขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเวลส์ Sir William Grove โดยค้นพบได้ตีพิมพ์ในปี 1843 จนกระทั่งในปี 1959 F.T. Bacon วิศวกรชาวอังกฤษ ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 kW ได้สำเร็จ ในปีเดียวกันนี้เองกลุ่มที่นำโดย Harry Ihrig ได้ผลิตแทรกเตอร์ขนาด 15 kW ให้กับ Allis-Chalmers ซึ่งได้นำไปแสดงทั่วสหรัฐอเมริกา ระบบนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ไฮโดรเจนอัด และก๊าซออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น ในปีเดียวกันนี้เองที่ Bacon และทีมงานได้สร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าขนาด 5 kW ที่ใช้งานได้จริงสำหรับเครื่องเชื่อม ซึ่งนำไปสู่การจดสิทธิบัตรของ Bacon ในช่วงยุค 1960 หลักการเดียวกันนี้ก็ได้นำไปใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐด้วยเพื่อผลิตน้ำดื่ม และพลังงาน ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงต้นนี้ยังสูงอยู่มากเพราะค่าวัสดุที่แพง นอกจากนี้ยังทำงานในอุณหภูมิที่สูงมากจนเป็นปัญหาในการนำไปประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงยังคงเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากเชื้อเพลิงนั้นสามารถหาได้ง่าย (ไฮโดรเจน และออกซิเจน) และการใช้งานที่สะอาด

การพัฒนาต่อมาในช่วงยุค 1980 และ 1990 โดย G. Ballard เจ้าของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิงในแคนาดาที่โด่งดัง Ballard Power Systems Inc. ได้ใช้เนฟฟิออน(Nafion) ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกลงและทนทานเป็นอิเล็กโทรไลต์ และการลดการใช้แพลทินัม ทำให้อายุการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผู้บริโภค เช่น ในรถยนต์มีความเป็นไปได้มากขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงมักจะได้รับการมองว่าเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง และปราศจากมลพิษ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น ก๊าซมีเทน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวที่เกิดจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำ อย่างไรก็ตามยังมีความกังวลอยู่ในขั้นตอนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งใช้พลังงานมาก การผลิตไฮโดรเจนจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีไฮโดรเจน เช่น น้ำ หรือ เชื้อเพลิงอื่นๆ นอกจากนั้นยังต้องใช้ไฟฟ้าซึ่งก็ผลิตมาจากแหล่งพลังงานแบบดั้งเดิม ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน หรือแม้แต่พลังงานนิวเคลียร์ ในขณะที่พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าทางเลือกอื่น เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ก็อาจสามารถใช้ได้ แต่ราคาก็ยังสูงมากในไม่ช้ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบัน ดังนั้นจึงไม่สามารถกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอิสระจากเชื้อเพลิงแบบทั่วไป จนกว่าจะสามารถหาวิธีการผลิตไฮโดรเจนปริมาณมากด้วยพลังงานทดแทน หรือพลังงานนิวเคลียร์



รูปที่ 5.6 ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

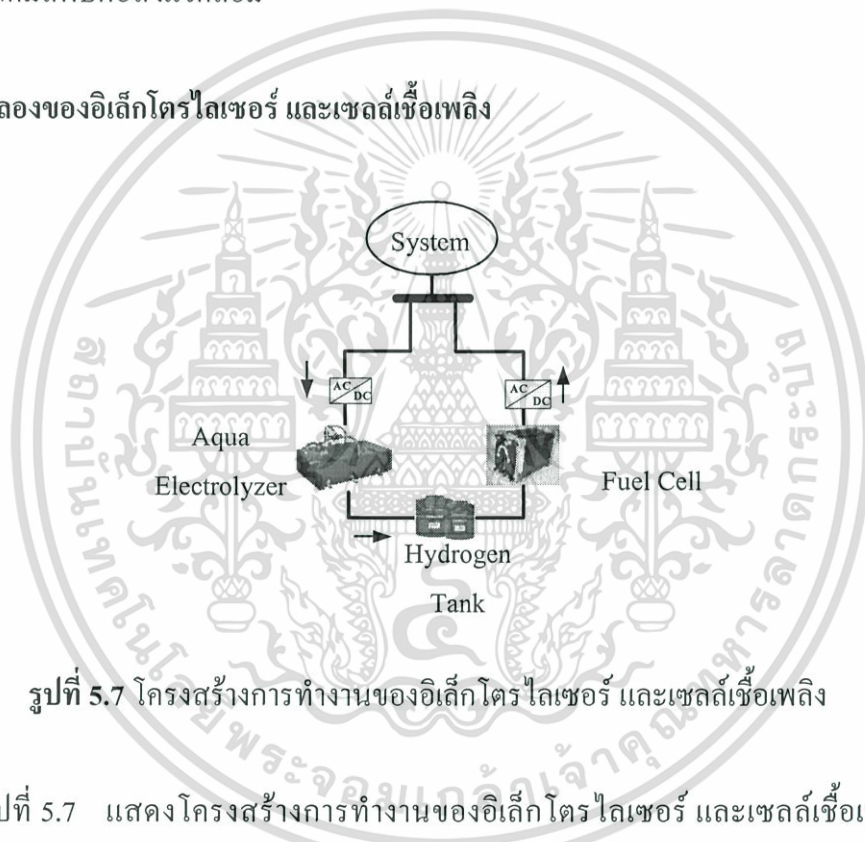
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells) หรือ PEMFC ดังแสดงในรูปที่ 5.6 พอลิเมอร์ที่ให้โปรตอนผ่านได้จะแยกฝั่งแอโนด และแคโทดออกจากกัน แต่ละด้านจะมีขั้วไฟฟ้าของตัวเอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแผ่นคาร์บอนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ในด้านของแอโนด ไฮโดรเจนจะแพร่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด ทำให้แตกตัวออกเป็นโปรตอน และอิเล็กตรอน โปรตอนจะวิ่งผ่านเยื่อขึ้นไปแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะได้รับการบังคับให้วิ่งเข้าสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก (ให้พลังงานออกมา) เพราะว่ายื่อกั้นนั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคโทด โมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่มาจากแอโนดผ่านวงจรภายนอก และมารวมกับออกซิเจนและโปรตอนที่ด้านนี้กลายเป็นน้ำ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับผลิตไฟฟ้า หรือเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแก่ยานพาหนะ หรือตามสถานที่ต่าง ๆ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีจุดเด่นที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำ อีกทั้งยังมีความพิเศษในส่วนของเยื่อพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในการแลกเปลี่ยนโปรตอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ตามปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยที่ขั้วอิเล็กโทรด ของเซลล์ไฟฟ้านี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

และขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้โพลิเมอร์แข็ง คือ แนฟฟิออนเป็นเยื่อเคลื่อนผ่านประจุ สารตั้งต้นของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

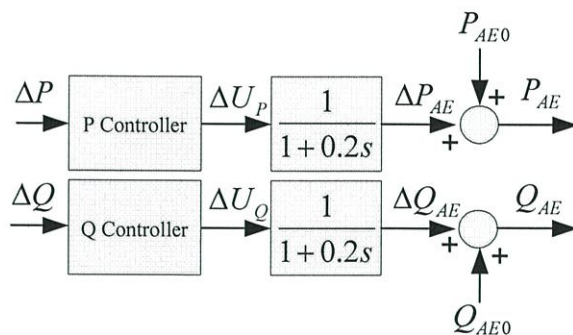
เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ใช้ ก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน(หรืออากาศ) โดย ก๊าซไฮโดรเจนจะแตกตัวบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ด้านแอโนด ให้ผลออกมาคือ โปรตอน และ อิเล็กตรอน ตามปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แนฟฟิออนเป็นเยื่อผ่านนี้ อีออนที่มี ประจุบวกเท่านั้นจึงจะผ่านได้ ดังนั้น โปรตอนจึงเคลื่อนที่ผ่าน ไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะ เคลื่อนที่ออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านโหลด และเป็นที่รู้กันดีว่าไฟฟ้าเกิดจาก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นก็จะได้แสงสว่างจาก ไฟฟ้าที่ผลิตได้หากโหลดชนิดนั้นคือ หลอดไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดถือว่าครบวงจร จากนั้นอิเล็กตรอน โปรตอน และก๊าซออกซิเจน ตามปฏิกิริยารีดักชันก็จะรวมตัวกันกลายเป็นน้ำ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึง ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ค. แบบจำลองของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

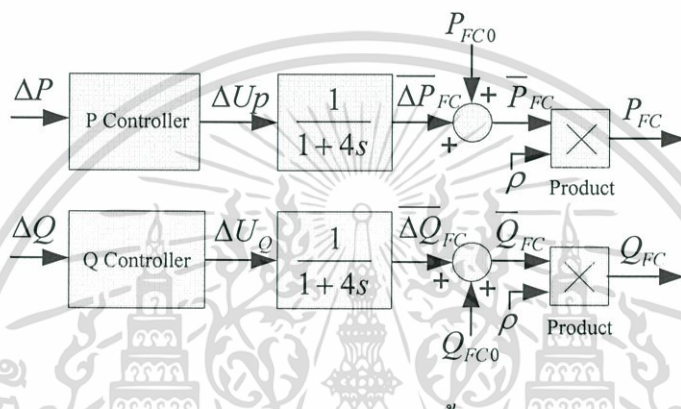


รูปที่ 5.7 โครงสร้างการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

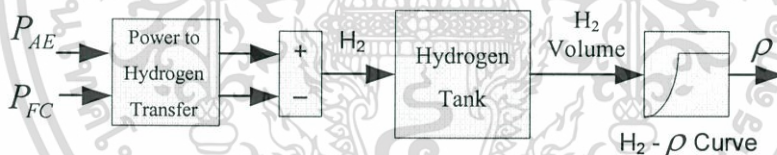
รูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง โดย สามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 5.8 ในส่วนของระบบการผลิต ไฮโดรเจน AE จะทำการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบมาผลิตเป็นไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.029 (l/kWh) แล้วนำเอาไฮโดรเจนที่ได้ไปเก็บสะสมไว้ในถังเก็บขนาด 500 ลิตร เพื่อให้ FC ทำการเปลี่ยนจาก ไฮโดรเจนเป็นกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าให้กับระบบด้วยอัตรา 0.061 (l/kWh) [80]



ก.แบบจำลองของอิเล็กทรอนิกส์



ข.แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง



ค.แบบจำลองการผลิต และการนำไปใช้ของไฮโดรเจน

รูปที่ 5.8 แบบจำลอง AE และ FC พร้อมด้วยตัวควบคุม P และ Q

เมื่อ

ΔP_{AE} คือ การเปลี่ยนแปลงของการรับกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบของ AE

ΔQ_{AE} คือ การเปลี่ยนแปลงของการรับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบของ AE

P_{AE0} คือ การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE เริ่มต้น (Initial) (กำหนดให้ = 0.05 pu)

Q_{AE0} คือ การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เริ่มต้น (Initial) (กำหนดให้ = 0 pu)

$\overline{\Delta P}_{FC}$ คือ การเปลี่ยนแปลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่ควรจะได้รับของ FC

$\overline{\Delta Q}_{FC}$ คือ การเปลี่ยนแปลงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC

\overline{P}_{FC0} คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC เริ่มต้น (0.05 pu.)

\overline{Q}_{FC0} คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC เริ่มต้น (0 pu.)

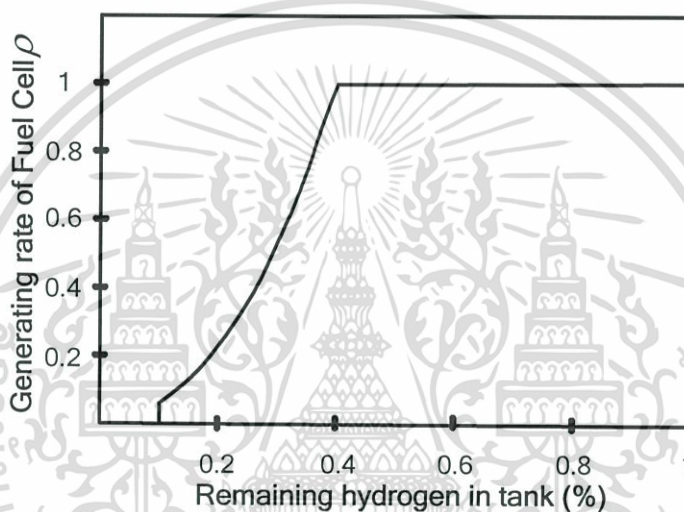
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE สามารถหาได้จาก

$$P_{AE} = P_{AE0} + \Delta P_{AE} \quad (5.4)$$

$$Q_{AE} = Q_{AE0} + \Delta Q_{AE} \quad (5.5)$$

การทำงานของ FC ในการเริ่มเดินเครื่อง และการหยุดการทำงาน ส่งผลให้เกิดแรงดันตก [96] ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในการจ่ายให้กับระบบของ FC นั้นจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจนในถังดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในถัง และเอาต์พุตของ FC

เมื่อปริมาณไฮโดรเจนในถังมีน้อยกว่า 10 % การผลิตกำลังไฟฟ้าของ FC จะหยุดการทำงาน จนกระทั่งปริมาณไฮโดรเจนจะมีมากกว่า 50 % และอัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าของ FC ในขณะที่ไฮโดรเจนมีปริมาณตั้งแต่ 10-40 % จะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.9 [97] ดังนั้นสามารถหา กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ FC ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{FC} = \rho * \bar{P}_{FC} \quad (5.6)$$

$$Q_{FC} = \rho * \bar{P}_{FC} \quad (5.7)$$

โดยที่

$$\bar{P}_{FC} = P_{FC0} + \Delta P_{FC} \quad (5.8)$$

$$\bar{Q}_{FC} = Q_{FC0} + \Delta Q_{FC} \quad (5.9)$$

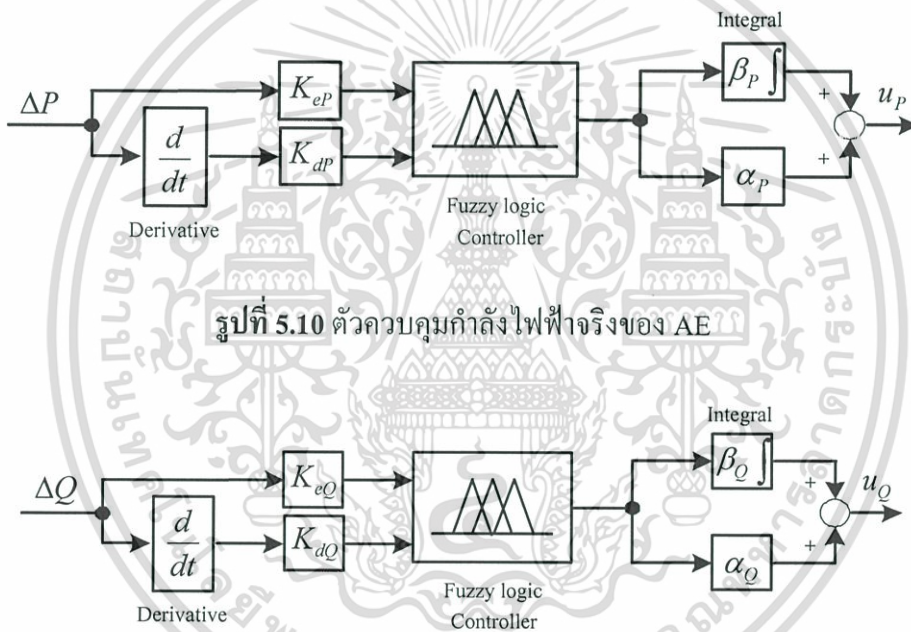
แต่เนื่องจากค่าคงตัวของเวลาของ FC นั้นมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่าคงตัวของ AE ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ จึงไม่คิดการควบคุมของ FC ($\Delta P_{FC} = \Delta Q_{FC} = 0$) จากสมการที่ (5.8) และ (5.9) สามารถสรุปได้เป็น

$$\bar{P}_{FC} = P_{FC0} \quad (5.10)$$

$$\bar{Q}_{FC} = Q_{FC0} \quad (5.11)$$

5.2 การออกแบบตัวควบคุม

จากรูปที่ 5.8 (ก) ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P Controller) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q Controller) ได้ทำการแทนด้วยตัวควบคุมฟัซซีโลจิก-พีไอดี ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

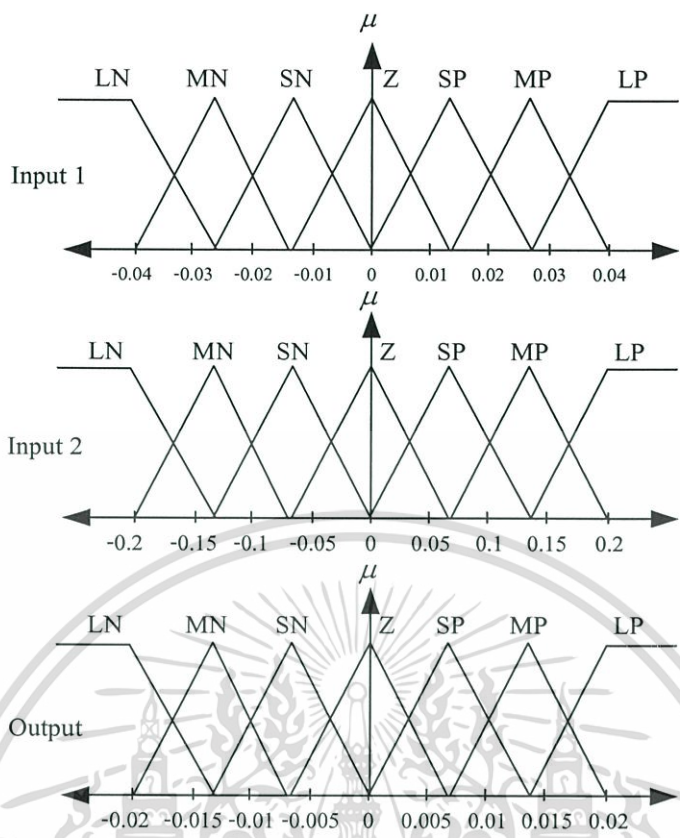
รูปที่ 5.11 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

เมื่อ

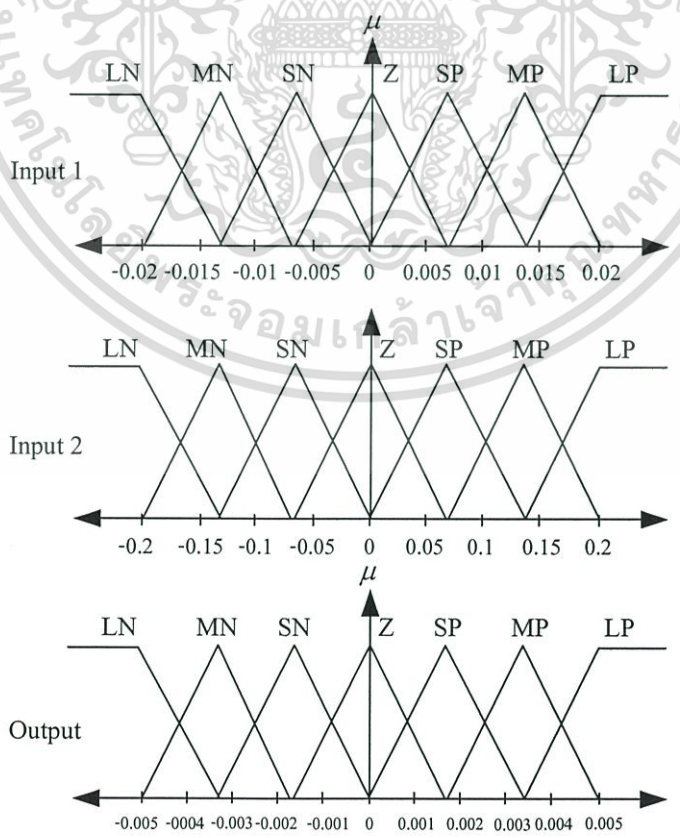
K_{eP}, K_{dP}, β_P และ α_P คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง
 K_{eQ}, K_{dQ}, β_Q และ α_Q คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน
 u_P และ u_Q คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีโลจิก-พีไอดีสำหรับควบคุม
 กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน

ในส่วนของฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีโลจิกที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุม
 กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.12-5.13 และกฎควบคุมของตัว

ควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานะเริ่มต้นจะใช้แบบเดียวกันดังแสดงไว้
 ในตารางที่ 5.1 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.13 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

	Input 2						
	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

ในการศึกษาครั้งนี้ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีที่นำเสนอ นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีแบบทั่วไป และระบบที่ไม่ได้มีการควบคุมโดยมีลักษณะของการออกแบบดังนี้

1. ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีสำหรับ AE แบบทั่วไป (Conventional fuzzy logic-PID AE controller: Conventional FLPID) โดยตัวควบคุมนี้จะใช้ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมดังแสดงในรูปที่ 5.12-5.13 และ ตารางที่ 5.1 ตามลำดับ ส่วนทางด้านแฟลคเตอร์สัดส่วนจะทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฟุ้ง

2. ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีสำหรับ AE แบบเหมาะสม (Optimal fuzzy logic-PID AE controller: Optimal FLPID) ตัวควบคุมนี้เป็นตัวควบคุมที่วิทยานิพนธ์นี้แนะนำ โดยจะทำการออกแบบทั้งในส่วนของ แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฟุ้งพร้อมกันทั้งหมด

สำหรับการออกแบบให้มีความเหมาะสม การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ได้พิจารณาในการนำมาหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยใช้วิธี integral absolute error (IAE) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 5.12

$$\text{Minimize } IAE = \int_0^{\infty} (|\Delta P(t)| + |\Delta Q(t)|) dt \quad (5.12)$$

เมื่อ

ΔP คือ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ΔQ คือ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบกำหนดค่าไว้ดังนี้

แฟลคเตอร์สัดส่วนทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -10 ถึง 10

ฟังก์ชันสมาชิกทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -50% ถึง +50% จากตำแหน่งเดิม

กฎควบคุมทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7 (LN-LP)

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธีฝูงผึ้งกำหนดดังนี้

จำนวนผึ้งสำรวจ แทนด้วย $(n) = 100$ ตัว

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย $(m) = 10$ ค่า

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก m (e) = 4 ค่า

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ e (ne) = 10 ตัว

จำนวนผึ้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ $m-e$ (ns) = 5 ตัว

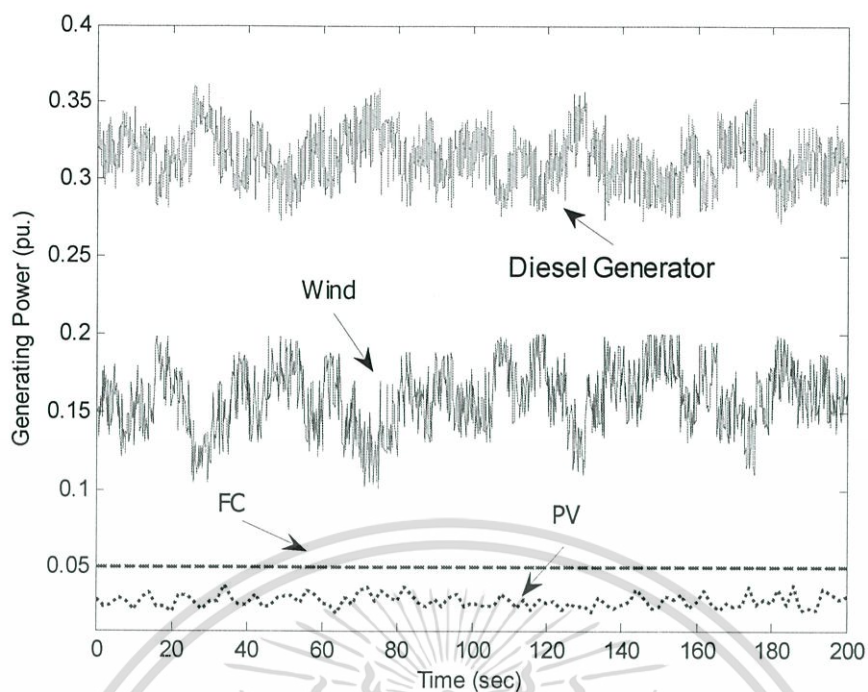
ขนาดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงคำตอบ (Neighborhood) ของ m (ngh) = 30%

จำนวนรอบของการค้นหา (NC) = 100 รอบ

5.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ

เพื่อที่จะทดสอบถึงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบ การจำลองสถานการณ์การเกิดสิ่งรบกวนในสถานะต่างๆ ได้สมมติขึ้น เริ่มจากกรณีที่ 1 สมมติให้มีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องจ่ายเข้าไปยังโหลดที่มีค่าคงที่ $10 + j2$ MVA ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ในกรณีนี้ ได้ใช้เป็นกรณีในการออกแบบทั้งตัวควบคุม Conventional FLPID และ Optimal FLPID ด้วยการจำลองในโปรแกรม Dymola ร่วมกับ ObjecStab [52] และ โปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ในการออกแบบปรับค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม Conventional FLPID (แฟลคเตอร์สัดส่วน) และ Optimal FLPID (แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 และตาราง

5.3



รูปที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในระบบไมโครกริด

ตารางที่ 5.2 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

ตัวควบคุม	K_{eP}	K_{dP}	β_P	α_P	MF	CR
Conv.FLPID	0.749	0.297	-1.051	0.242	รูปที่ 5.12	ตารางที่ 5.1
Optimal FLPID	0.743	0.714	-0.880	0.0582	รูปที่ 5.15	ตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

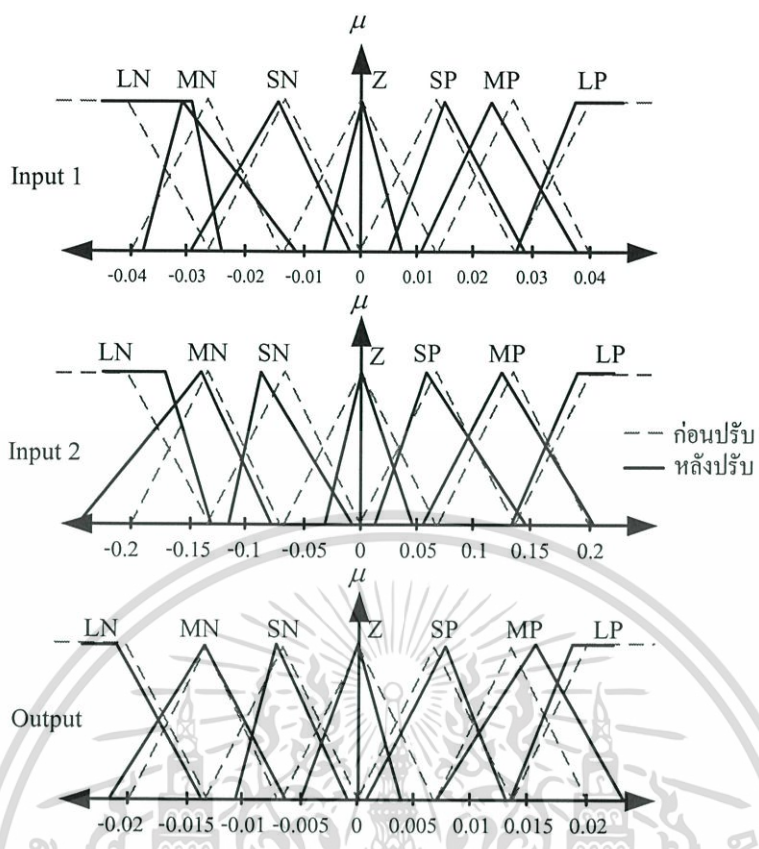
ตัวควบคุม	K_{eQ}	K_{dQ}	β_Q	α_Q	MF	CR
Conv. FLPID	0.557	0.5855	1.027	-0.204	รูปที่ 5.13	ตารางที่ 5.1
Optimal FLPID	0.729	1.092	0.546	-0.199	รูปที่ 5.16	ตารางที่ 5.5

โดย

MF คือ ฟังก์ชันสมาชิก

CR คือ กฎควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

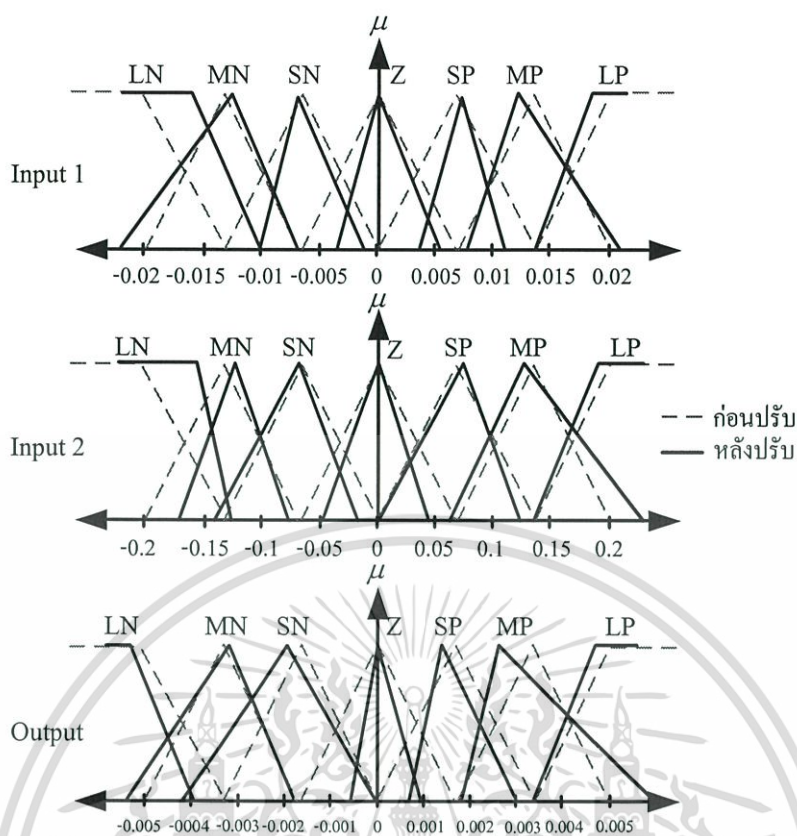


รูปที่ 5.15 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 5.4 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	LP	MP	MP	MP	SP	SP	Z
	MN	MP	MP	SP	SP	SP	SN	SN
	SN	MP	MP	Z	SP	SN	SN	LN
	Z	MP	SP	SP	Z	SN	MN	MN
	SP	MP	SP	SP	Z	Z	SN	MN
	MP	SP	SP	Z	SN	SN	MN	MN
	LP	SP	Z	MN	MN	SN	MN	MN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



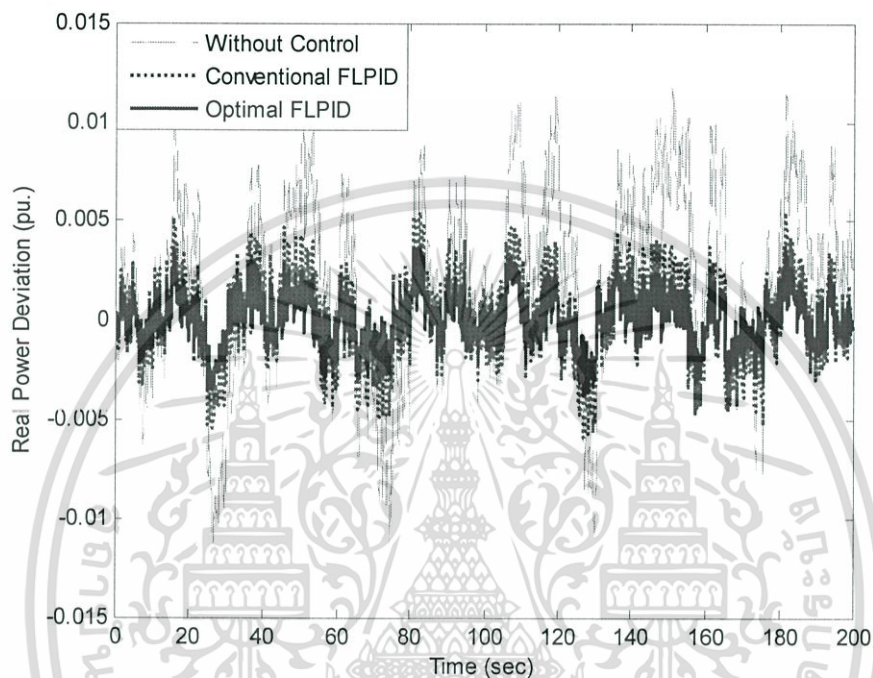
รูปที่ 5.16 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 5.5 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

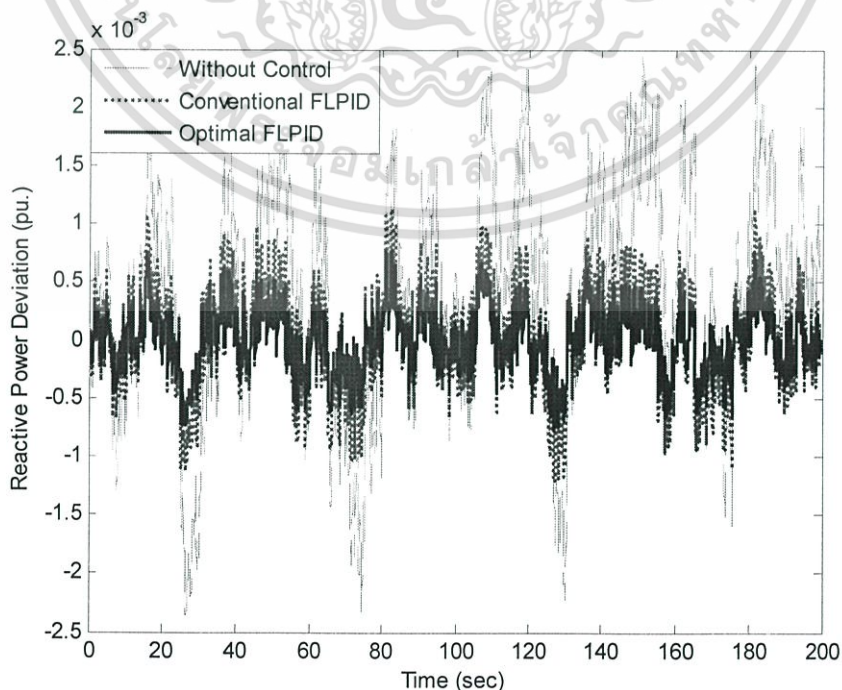
		Input2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input1	LN	LP	LP	MP	MP	MP	SP	Z
	MN	LP	MP	MP	SP	Z	SN	MN
	SN	MP	SP	SP	Z	Z	SN	MN
	Z	MP	MP	SP	Z	MN	MN	MN
	SP	MP	SP	Z	SN	SN	MN	MN
	MP	SP	SP	SP	SN	SN	MN	MN
	LP	SP	SN	MN	MN	LN	LN	MN

รูปที่ 5.15 และ 5.16 แสดงผลการปรับตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกแต่ละตัวซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม และแต่ละฟังก์ชันสมาชิกนั้นจะมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกัน เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการประมวลผลในการควบคุมระบบ ทางด้านผลการปรับกฎควบคุมดังแสดงในตารางที่ 5.4 และ 5.5 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขของกฎนั้นได้เปลี่ยนไปบางตำแหน่ง เพื่อให้เปลี่ยนไปตามความต้องการของระบบ เช่น *Input 1* คือ LN และ *Input 2* คือ MN จะเห็น

ได้ว่า ในด้านของกฎตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE นั้นจะเปลี่ยนเป็น MP เนื่องจากว่าหากมีการชดเชยที่มากกว่านี้อาจจะทำให้เกินความต้องการของระบบ หรือถ้าหากชดเชยน้อยกว่านี้ ก็อาจทำให้ไม่เพียงพอต่อการปรับปรุงเสถียรภาพ โดยในส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีผลแตกต่างกัน เนื่องจากการทำงานของตัวควบคุมทั้ง 2 ทำงานแยกอิสระกัน

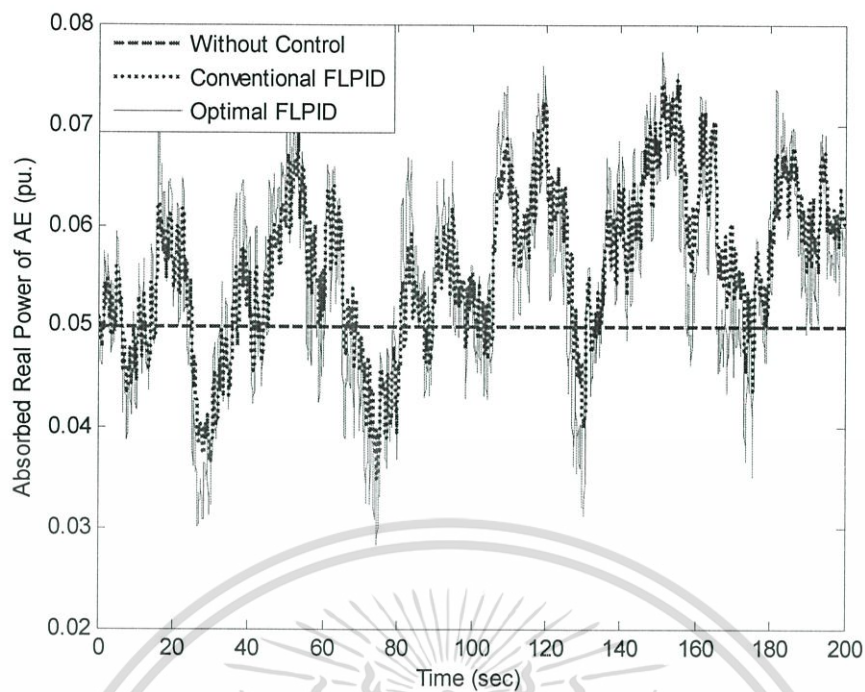


รูปที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1

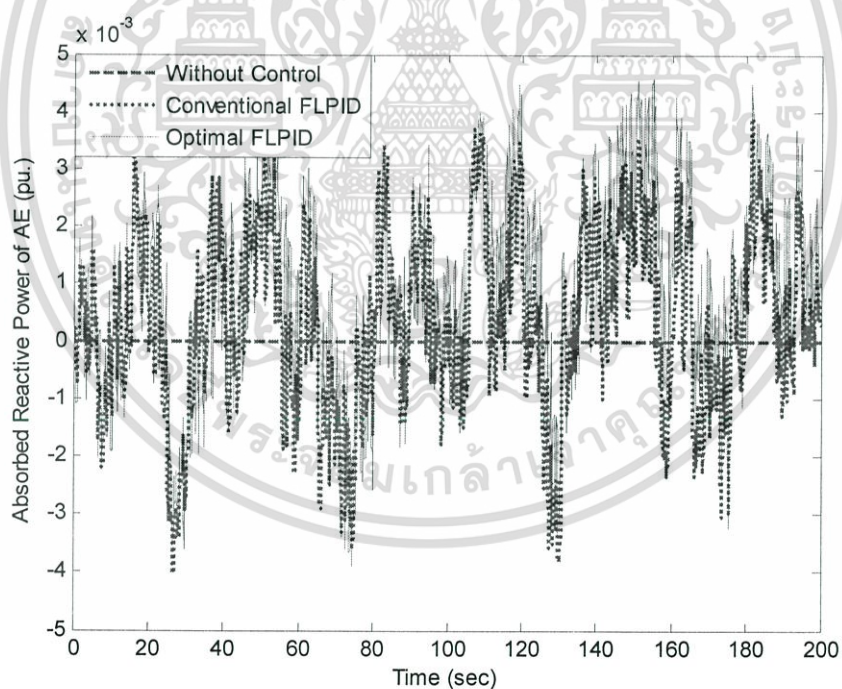


รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 1



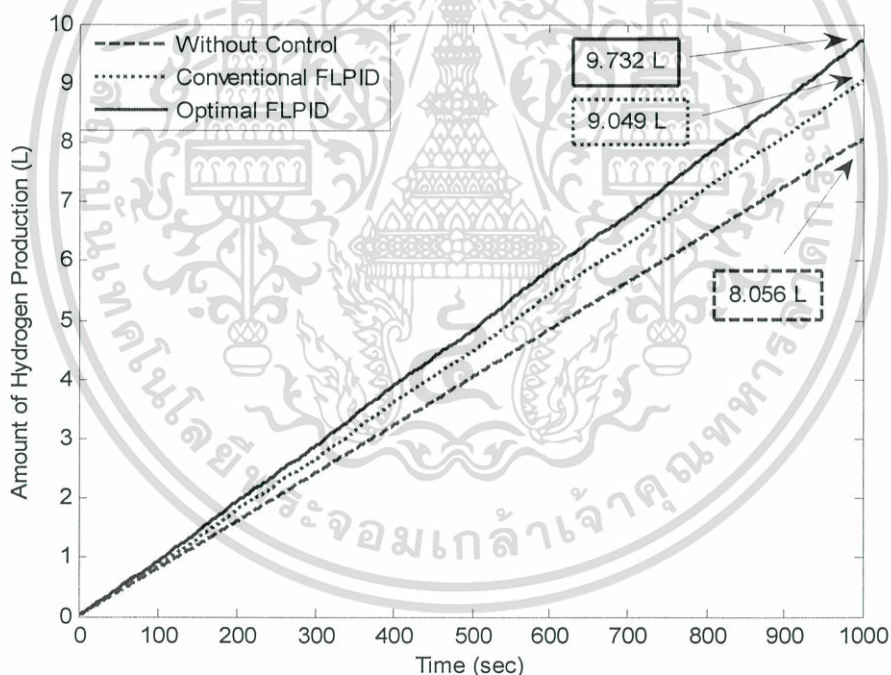
รูปที่ 5.20 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 1

การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 1 สมมติว่าในระบบมีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.14 จ่ายเข้าไปยังระบบ ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในสาย 1-6 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.17 และ 5.18 ได้แสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของ AE

เมื่อระบบมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของพลังงาน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในระบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

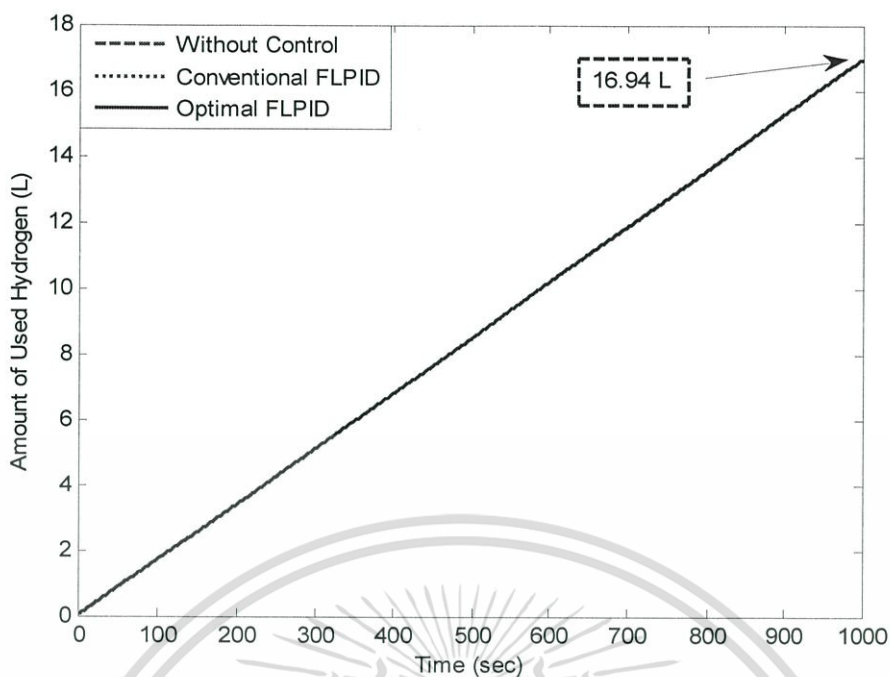
ลม และพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่คงที่ ภายใต้ตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดีที่ออกแบบให้เหมาะสม ด้วยวิธีฝูงผึ้งคิงที่นำเสนอ (Optimal FLPID) สามารถที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้าเสมือนให้น้อยลงกว่าวิธีออกแบบโดยทั่วไป (Conventional FLPID) และระบบที่ไม่มี ตัวควบคุม (ให้ AE รับไฟฟ้าคงที่) ส่วนพฤติกรรมทางพลวัตในการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ได้ แสดงไว้ในรูปที่ 5.19 และ 5.20 จะเห็นได้ว่า AE ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุม Optimal FLPID AE สามารถที่จะรับ และจ่ายได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

นอกจากนั้น รูปที่ 5.21 ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณการผลิตไฮโดรเจนของวิธีที่นำมาเสนอนั้นสามารถที่จะผลิตได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ รูปที่ 5.22 แสดงปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปผลิตเป็นกำลังไฟฟ้า แต่เนื่องจากว่าวิทยานิพนธ์นี้ไม่คิดผลการควบคุมของ FC ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้าแต่ละวิธีที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเมื่อวิธีที่นำเสนอสามารถที่จะผลิตได้มากกว่า แต่ใช้เท่ากันกับวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือภายใน ถังนั้นมีมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.23

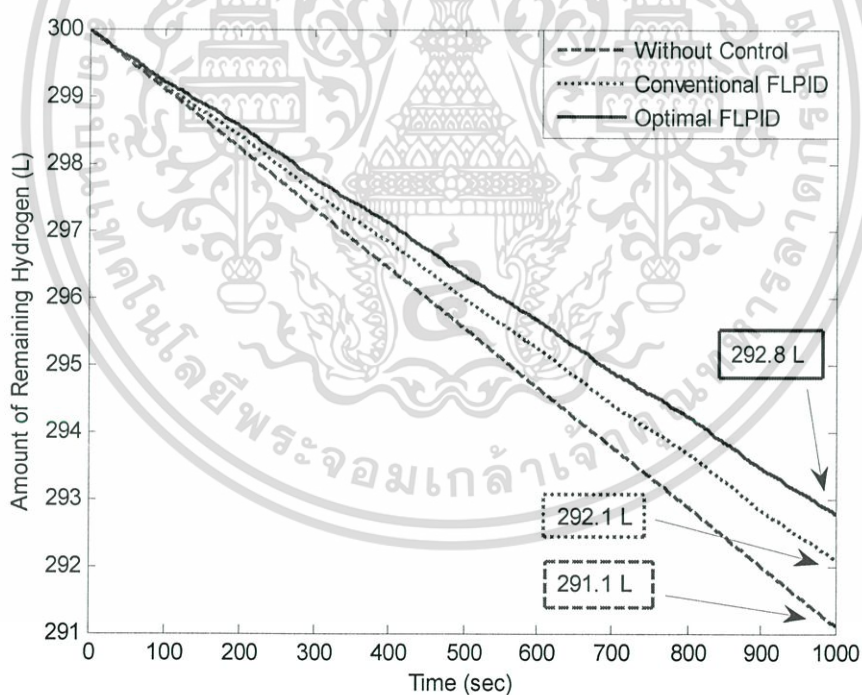


รูปที่ 5.21 ปริมาณไฮโดรเจนที่ AE ผลิตได้ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



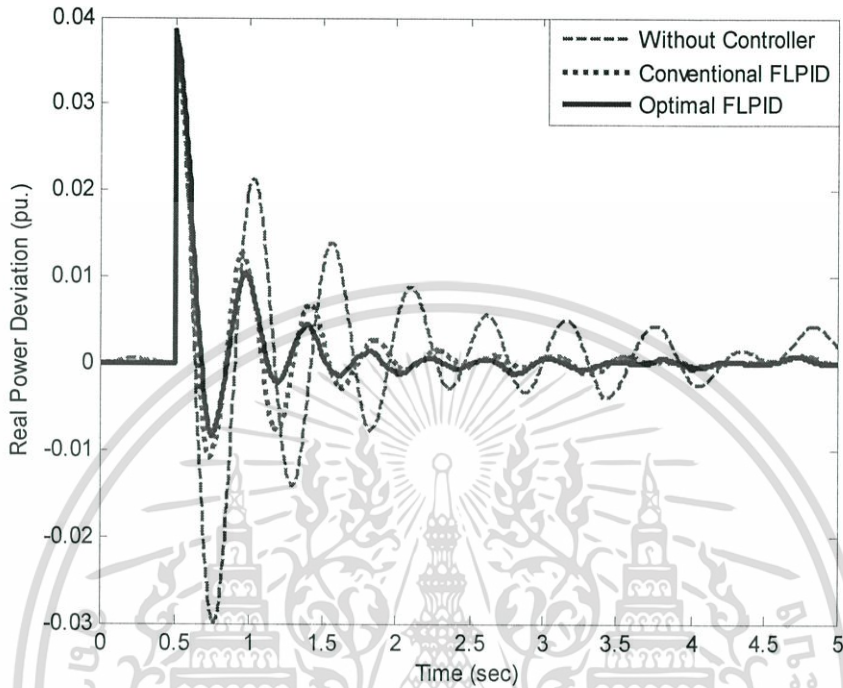
รูปที่ 5.22 ปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปใช้ในกรณีที่ 1



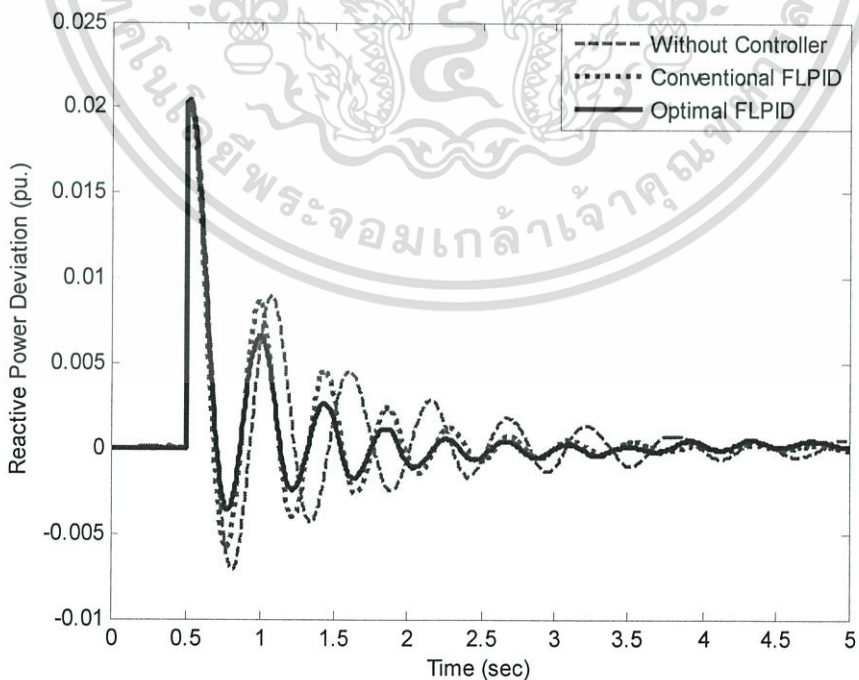
รูปที่ 5.23 ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือในถังในกรณีที่ 1

ในกรณีที่ 2 สมมติว่าจากในกรณีแรกนั้น เกิดความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจาก 0.5 เป็น 0.6 pu. เมื่อพิจารณาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 5.24 และ 5.25 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนภายใต้การควบคุมของ AE ที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-ฟิวส์ได้ออกแบบด้วยวิธีฟuzzy คั้งทำนาเสนอนั้น มีการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกว่งที่น้อยกว่า และสามารถที่จะกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าตัวควบคุม ฟิชซีโลจิก-พีไอดีที่ ออกแบบโดยทั่วไป และระบบที่ไม่มีตัวควบคุม โดยผลการรับกำลังไฟฟ้าไปผลิตไฮโดรเจนของ AE นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.26 และ 5.27

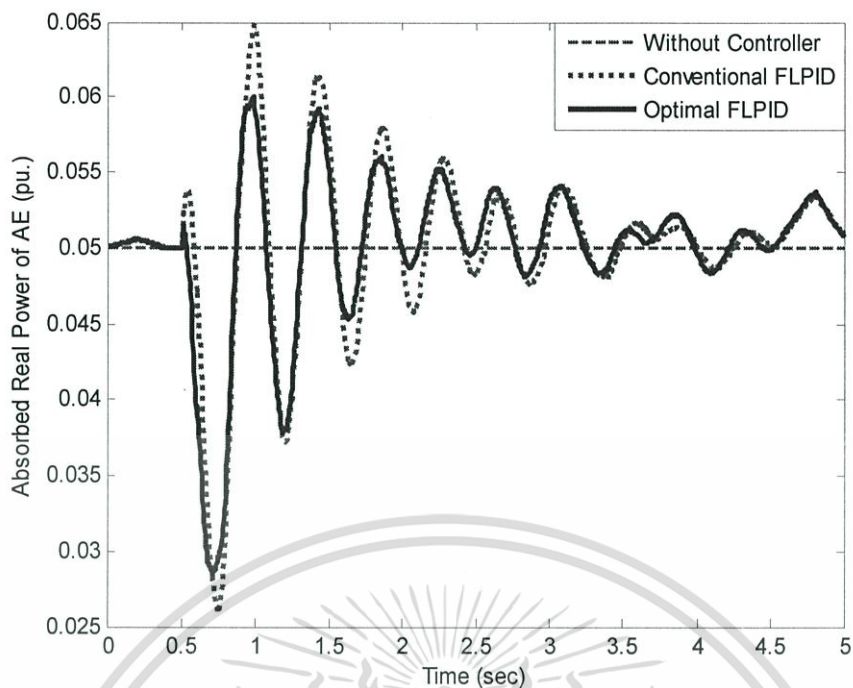


รูปที่ 5.24 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2

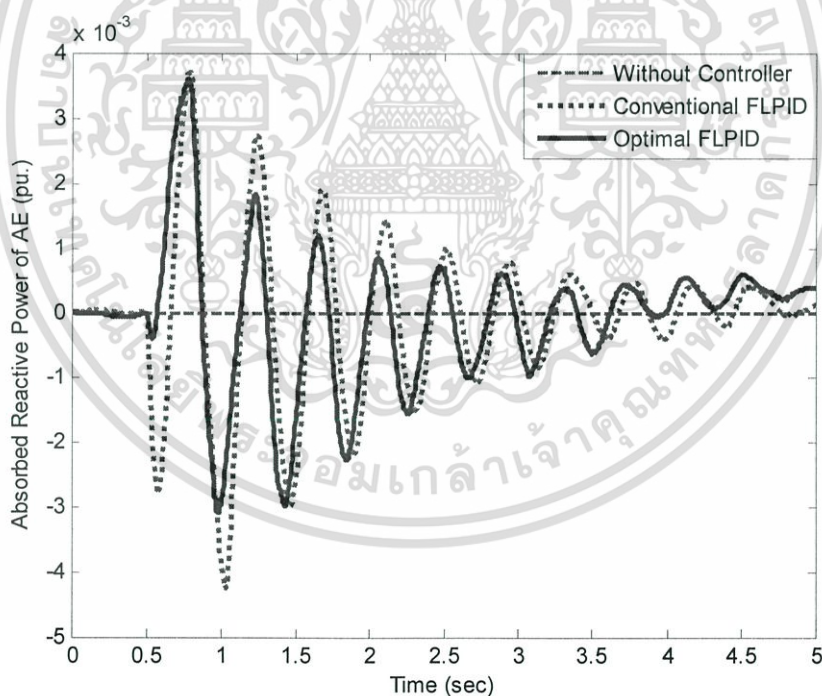


รูปที่ 5.25 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



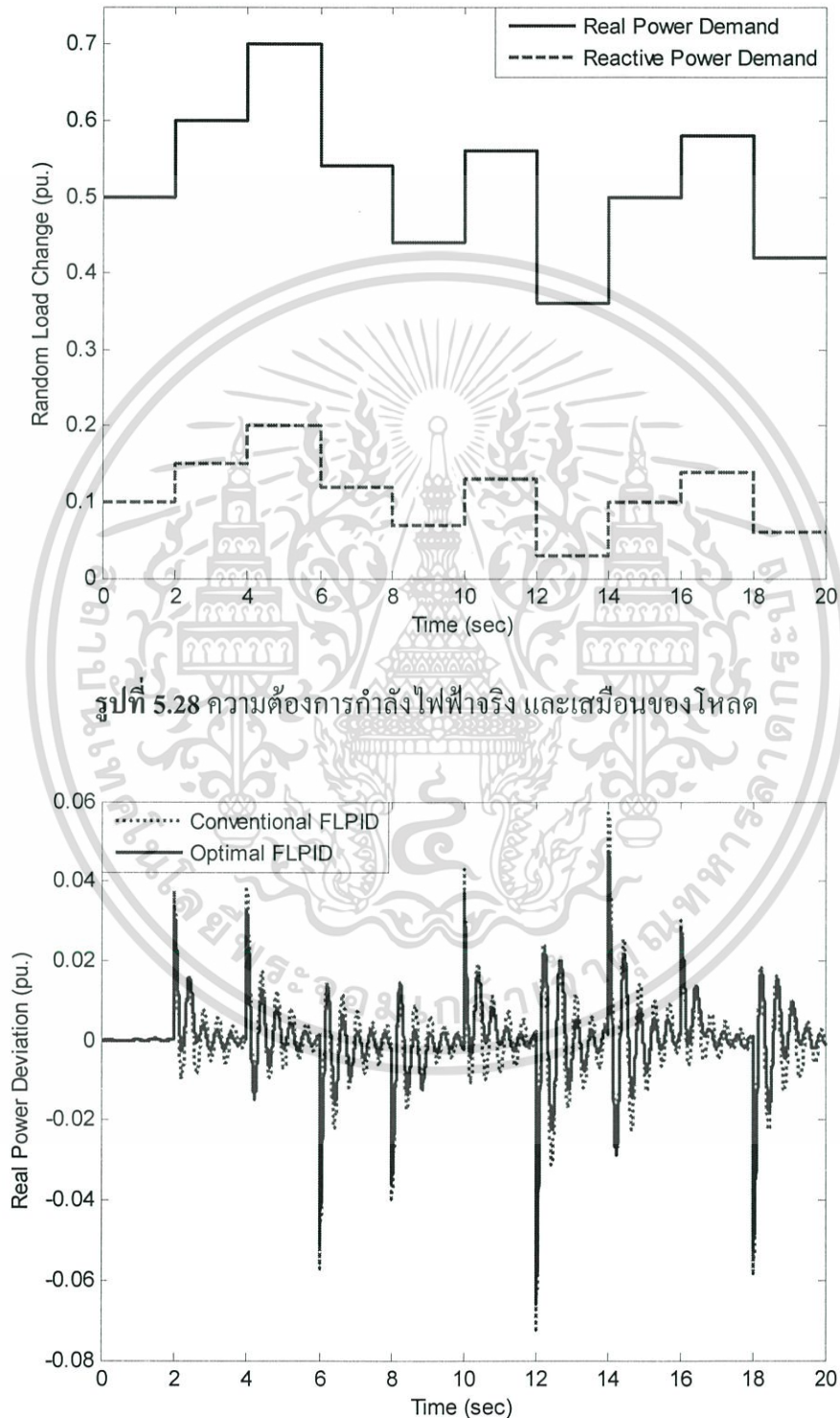
รูปที่ 5.26 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE



รูปที่ 5.27 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

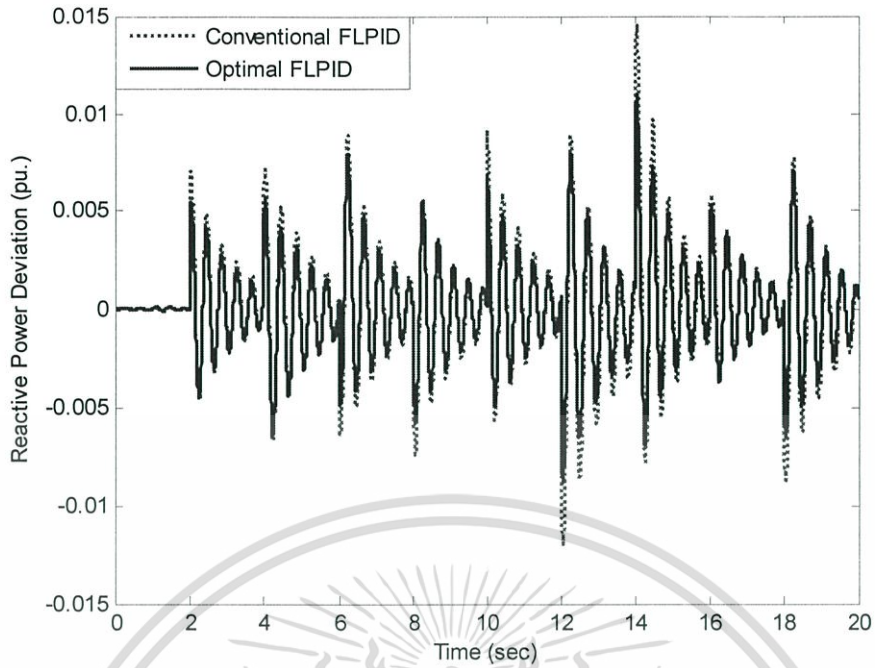
ในกรณีที่ 3 สมมติว่าในกรณีที่ 1 ระบบมีความต้องการของโหลดทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้าเสมือนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามรูปที่ 5.28 ผลตอบสนองของการแกว่ง กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 5.29 และ 5.30 ได้แสดงให้เห็นว่า การทำงานของ AE ภายใต้การควบคุมของพีซี ไลจิก-พี ไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นสามารถที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบ และพฤติกรรมในการรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.31 และ 5.32

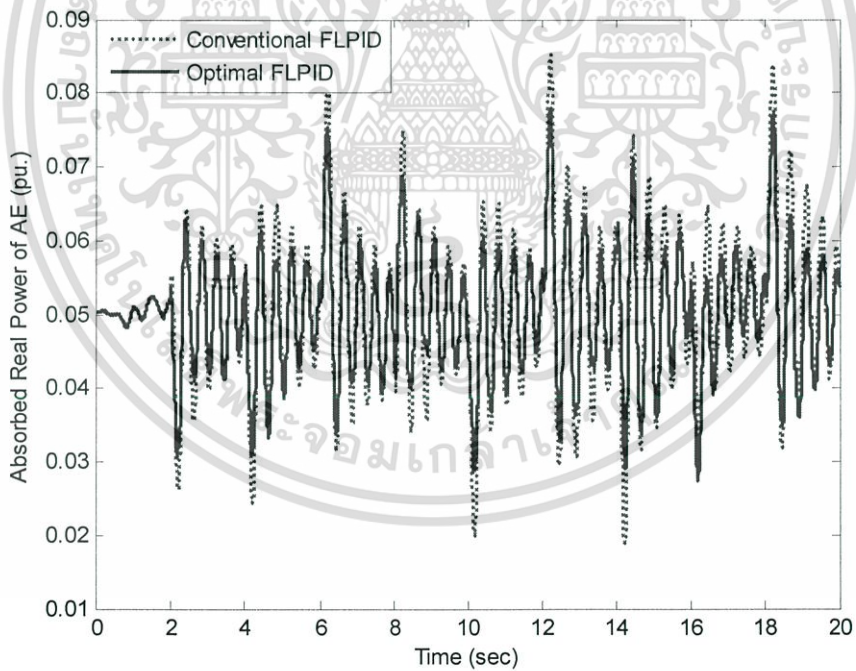


รูปที่ 5.29 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

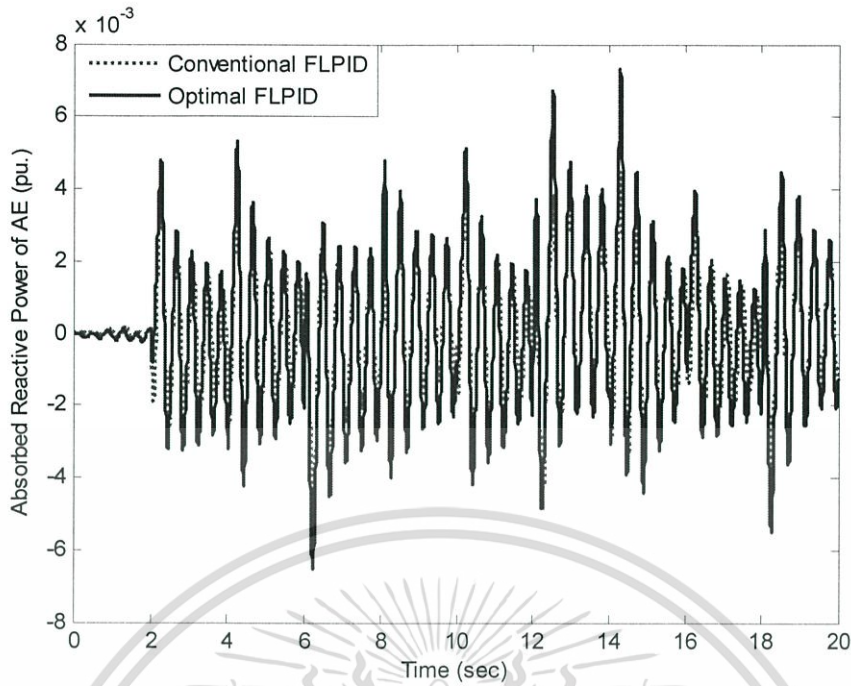


รูปที่ 5.30 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3



รูปที่ 5.31 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 3

5.4 สรุป

ในบทนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดีเพื่อควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ AE มาผลิตเป็นไฮโดรเจนสำหรับ FC เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีผลจากการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริด ในส่วนของแพ็คเกจรีสแตต ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมของฟัซซี่โลจิก-พีไอดีนั้น สามารถออกแบบได้โดยไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือการลองผิดลองถูก ด้วยการใช้วิธีฟูงฟิงในการค้นหาที่เหมาะสมพร้อมกันทั้งหมดแบบอัตโนมัติ ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การประยุกต์ใช้ AE ที่ทำงานภายใต้การควบคุมของตัวควบคุม Optimal FLPID ดังที่นำเสนอ นั้นสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุม Conventional FLPID และระบบที่ไม่ได้ทำการควบคุม นอกจากนี้ พฤติกรรมทางพลวัตของการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ภายใต้การควบคุมของวิธีที่นำเสนอ นั้นสามารถตอบสนองได้ดีกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองการเกิดสิ่งรบกวนที่แตกต่างกัน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชี-โลจิก-พีไอดีให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะที่คล้ายกับตัวควบคุมพีไอดี และมีคุณลักษณะการทำงานแบบพีชชี-โลจิก จึงได้มีการนำเอาตัวควบคุมพีชชี-โลจิกมาทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี ที่เรียกว่าตัวควบคุมพีชชี-โลจิก-พีไอดี อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชี-โลจิก-พีไอดี มีความยุ่งยาก และมีความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยทั่วไปนั้นยังมีสมรรถนะที่ไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้งเข้าในการปรับค่าที่เหมาะสมพร้อมกันทั้งหมด ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถที่จะสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถที่จะออกแบบอัตราขยายของแฟลคเตอร์ตัดส่วน ตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก และเงื่อนไขของกฎควบคุม ได้พร้อมกันทั้งหมดแบบอัตโนมัติ โดยปราศจากการลองผิดลองถูก หรือใช้ความชำนาญการของผู้ออกแบบ
2. สามารถที่จะประยุกต์ใช้ออกแบบตัวควบคุมมากกว่า 1 ตัวให้ทำงานร่วมกันได้อย่างเหมาะสม
3. ได้ประยุกต์วิธีที่นำเสนอไปออกแบบตัวควบคุมความถี่ในระบบที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังลม และดีเซลทำงานร่วมกัน ผลที่ได้คือตัวควบคุมตัวบังคับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และตัวควบคุมการบิดของใบพัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นอย่างดีทั้งในการลดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบเนื่องมาจากสิ่งรบกวนต่างๆ ได้อย่างดี แล้วยังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบสูง
4. ได้ประยุกต์วิธีที่นำเสนอไปออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของ SMES เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบหลายเครื่องจักร ผลที่ได้คือ SMES ที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถให้ผลการทำเสถียรภาพระบบได้เหนือกว่า SMES ที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ทั้งในเรื่องของสมรรถนะ และความคงทนภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนต่างๆ
5. ได้ประยุกต์วิธีที่นำเสนอไปออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดที่มีส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วยได้ ผลที่ได้คือ อิเล็กทรอนิกส์

ไลเซอร์ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุมที่นำเสนอมานั้นมีสมรรถนะในการทำเสถียรภาพระบบได้ดีกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่โลจิก-พีไอดี ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ดังที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่นๆ ได้ เช่น

1. สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ Flexible AC transmission system (FACTS) แบบอื่นได้
2. สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอุปกรณ์ชุดมากกว่า 1 ตัว ทั้งแบบชนิดเดียวกันและต่างชนิดกันได้
3. สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ได้

อย่างไรก็ตามวิธีที่นำเสนอขึ้นเป็นการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก-พีไอดี โดยทำการออกแบบจากการทดสอบกรณีเดียวแต่ตัวควบคุมยังสามารถที่จะรองรับกับการทำงานกรณีอื่นๆ ได้ แต่สำหรับการออกแบบเพื่อใช้งานจริงควรที่จะทำการออกแบบโดยใช้หลายๆ กรณีศึกษา เพื่อให้ตัวควบคุมที่ได้ขึ้นมีความเหมาะสมกับทุกสถานการณ์ในการเกิดสิ่งรบกวนต่างๆ ขึ้นในระบบ

บรรณานุกรม

- [1] Steven W. Blume, **Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional**, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
- [2] G. Liu, Z. Xu, Y. Huang, W. Pan, “**Analysis of Inter-Area Oscillations in the South China Interconnected Power System,**” *Electric Power Systems Research*, Vol.70, pp.38-45, 2004.
- [3] J. Rasmussen and P.Jørgensen, “**Synchronized Phasor Measurements of a Power System Event in Eastern Denmark,**” *IEEE Transactions on Power System*, Vol.21, 2006.
- [4] M. Ishimaru, R. Yokoyama, O. M. Neto, K. Y. Lee, “**Allocation and Design of Power System Stabilizers for Mitigating Low-Frequency Oscillations in the Eastern Interconnected Power System in Japan,**” *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 26, pp.607-618, 2004.
- [5] R. Castellanos B. et al, “**Use of Power System Stabilizers for Damping Inter-Area Oscillations in the South Systems of the Mexican Electrical Grid,**” *Electric Power Systems Research*, Vol.76, pp. 169–179, 2006.
- [6] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, **Microgrids and Active Distribution Networks**, Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2009.
- [7] N. Hatziargyriou, H. Asono, R. Iravani, C. Marnay, **Microgrids**, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 6, pp. 78-94, 2008.
- [8] Lasseter, R. et al, **Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS MicroGrid Concept**, Office of Power Technologies, the US Department of Energy, April 2002.
- [9] H. Nikkhajoei, R. H. Lassete, **Distributed Generation Interface to the CERTS Microgrid**, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, 2009.
- [10] H. Jiayi, J. Chuanwen and X. Rong, “**A Review on Distributed Energy Resources and Microgrid,**” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.12, pp. 2472–2483, 2008.
- [11] C.H. Liu, Y.Y. Hsu, “**Design of a Self-Tuning PI Controller for a STATCOM Using Particle Swarm Optimization,**” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] P. Rao, M. L. Crow, Z. Yang, “**STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications,**” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, 2000.
- [13] M. G. Na, “**Auto-Tuned PID Controller Using a Model Predictive Control Method for the Steam Generator Water Level,**” IEEE Transactions on Nuclear SCIENCE, Vol. 48, 2001.
- [14] Z.L. Gaing, “**A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System,**” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, 2004.
- [15] M.E. El-Hawary, **Electric Power Applications of Fuzzy Systems,** Wiley-IEEE Press, 1998.
- [16] J. Wang, C. Fu, and Yao Zhang, “**SVC Control System Based on Instantaneous Reactive Power Theory and Fuzzy PID,**” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, 2008.
- [17] E. Yesil, M. Guzelkaya, II. Eksin, “**Self Tuning Fuzzy PID Type Load and Frequency Controller,**” Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 377–390, 2004.
- [18] C. Su, H. Hwung, G. Lii, “**Fuzzy Logic based Voltage Control for a Synchronous Generator,**” Electric Power Systems Research, Vol. 41, pp.225-231, 1997.
- [19] S. K. Nam, W. S.Yoo, “**Fuzzy PID Control with Accelerated Reasoning for D.C. Servo Motors,**” Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 7, pp. 559-569 1994.
- [20] C. Xiao, L.Zhang, J.Yan, “**Fuzzy PID Controller for Wind Turbines,**” Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2009.
- [21] A. Rubaai, M. J. Castro-Sitiriche, A.Ofoli, “**DSP-based Implementation of Fuzzy-PID Controller Using Genetic Optimization for High Performance Motor Drives,**” Industry Applications Conference, 2007.
- [22] J. Wang, D. An and C. Lou, “**Application of Fuzzy-PID Controller in Heating Ventilating and Air-Conditioning System,**” International Conference on Mechatronics and Automation, 2006.
- [23] Pham, D.T., A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, and M. Zaidi. “**The Bee Algorithm-A Novel Tool for Complex Optimisation Problems,**” Intelligent Production Machines and Systems, Oxford: Elsevier 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] F. Katiraei, M.R. Iravani and P.W. Lehn, **“Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process,”** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.1, pp.248–257, 2005.
- [25] T.S Bhatti, A.A.F. Al-Ademi and N.K. Bansal. **“Load-Frequency Control of Isolated Wind-Diesel-Micro Hydro Hybrid Power Systems (WDMHPS),”** Int. J. Energy, vol. 22, no. 5, pp. 461–470, 1997.
- [26] T.S Bhatti, A.A.F. Al-Ademi and N.K. Bansal, **“Load Frequency Control of Isolated Wind Diesel Hybrid Power System,”** Energy Conversion and Management, Vol.38, No. 9, pp. 829-837, 1997.
- [27] I. Kocaarslan, E. Çam, **“Fuzzy Logic Controller in Interconnected Electrical Power Systems for Load-Frequency Control,”** Int. J of Elect Power & Energy Syst., Vol. 27, Issue 8, pp. 542-549, 2005.
- [28] P. Kundur, **Power System Stability and Control,** McGraw Hill, 1994.
- [29] T. Ise, Y. Mitani and K. Tsuji, **“Simultaneous Active and Reactive Power Control of Superconducting Magnetic Energy Storage to Improve Power System Dynamic Performance,”** IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 143–150, 1986.
- [30] C. Wu and Y. Lee, **“Application of Superconducting Magnetic Energy Storage Unit to Improve the Damping of Synchronous Generator,”** IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 573–578, 1991.
- [31] R.W. Boom and H. Perterson, **“A Superconducting Energy Storage for Power Systems,”** IEEE Transactions on Magnetics, pp. 701–703, 1972.
- [32] T. Senjyu, T. Kaneko, A. Uehara, A. Yona, H. Sekine, C.Kim, **“Output Power Control for Large Wind Power Penetration in Small Power System,”** Renewable Energy, Vol.34 pp. 2334-2343, 2009.
- [33] M. Datta, T. Senjyu, A. Yona, T. Funabashi, C.Kim **“A Coordinated Control Method for Leveling PV Output Power Fluctuation of PV-Diesel Hybrid Systems Connected to Isolated Power Utility,”** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.24, 2009.
- [34] T.Zhou and B.Francois, **“Modeling and Control Design of Hydrogen Production Process for an Active Hydrogen/Wind Hybrid Power System,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 21-30, 2009.

- [35] J.J. Hwang, L.K. Lai, W. Wu, W.R. Chang, **“Dynamic Modeling of a Photovoltaic Hydrogen Fuel Cell Hybrid System,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, pp. 9531-9542, 2009.
- [36] C. Wang, M.H. Nehrir. **“Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System,”** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.23, No.3, 2008.
- [37] B. Paul, J. Andrews **“Optimal Coupling of PV Arrays to PEM Electrolysers in Sola-Hydrogen Systems for Remote Area Power Supply,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 490-498, 2008.
- [38] E.M. Stewart, A.E. Lutz, S. Schoenung, M. Chiesa, J.O. Keller, J. Fletcher, G. Ault, J. McDonald, A. Cruden **“Modeling, Analysis and Control System Development for the Italian Hydrogen House,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 1638-1646, 2009.
- [39] A. Mills, A. Al-Hallaj **“Simulation of Hydrogen-Based Hybrid Systems Using Hydrogen2,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, pp. 991-999, 2004.
- [40] D. Mori, K. Hirose **“Recent Challenges of Hydrogen Storage Technologies for Fuel Cell Vehicles,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 4569-4574, 2009.
- [41] S. Hodoshima. et al. **“Catalytic Decalin Dehydrogenation/Naphthalene Hydrogenation Pair as a Hydrogen Source for Fuel-Cell Vehicle,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 1255-1262, 2003.
- [42] S. Vachirasricirkul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai **“Application of Electrolyzer System to Enhance Frequency Stabilization Effect of Microturbine in a Microgrid System,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 7131-7124, 2009.
- [43] R. Duflo-lopez, J.L. Bernal-Agustin **“Multi-Objective Design of PV-Wind-Diesel-Hydrogen-Battery Systems,”** Renewable Energy, Vol.33, pp.2559-2572, 2008.
- [44] D. Lee, L. Wang **“Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I : Time Domain Simulations,”** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.23, No.1, 2008.

- [45] S. Obara, A. G. El-Sayed “**Compound Microgrid Installation Operation Planning of a PEFC and Photovoltaics with Prediction of Electricity Production using GA and Numerical Weather Information,**” International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, pp. 8213-8222, 2009.
- [46] W. Zhou, H. Yang, Z. Fang “**Battery Behavior Prediction and Battery Working States Analysis of a Hybrid Solar–Wind Power Generation System,**” Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1413–1423, 2008.
- [47] A. Hirota, K. Seo, Y. Ohsawa, K. Arai. “**Design of SMES Controller for Wind/Diesel Hybrid System Stabilization via Pole Assignment,**” T.IEE Japan Vol. 114-C, No.11, pp.1134-1139, 1994.
- [48] L. A. Zadeh, “**Fuzzy Sets,**” Information and control, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [49] E. H. Mamdani, “**Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant,**” in Proc. IEE, vol. 121, no. 12, pp. 1585–1588, 1974.
- [50] H. Li, “**A Comparative Design and Tuning for Conventional Fuzzy Control,**” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part B, Vol.27, No.5, pp.884-889, 1997.
- [51] Pham, D.T., A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, and M. Zaidi. “**The Bee Algorithm-A Novel Tool for Complex Optimisation Problems,**” Intelligent Production Machines and Systems, Oxford: Elsevier, 2006.
- [52] M. Larsson, “**ObjectStab – an Educational Tool for Power System Stability Studies,**” IEEE Transactions on Power Systems, vol.19, no. 1, pp. 56-63, 2004.
- [53] B.M. Mohan and A. Sinha, “**Analytical Structures for Fuzzy PID Controllers,**” IEEE Transactions on Fuzzy systems, Vol.16, No.1, pp.52-60, 2008.
- [54] B.M. Mohan and A. Sinha, “**Analytical Structures and Stability Analysis of Fuzzy PID Controller,**” Applied Soft Computing, Vol.8, pp.749-758, 2008.
- [55] W.Z. Qiao and M. Mizumoto, “**PID Type Fuzzy Controller and Parameters Adaptive Method,**” Fuzzy Set and Systems, Vol.78, pp.23-35, 1996.
- [56] J. Carvajal, G. Chen and H. Ogmen, “**Fuzzy PID Controller: Design Performance Evaluation, and Stability Analysis,**” Information Sciences, Vol.123, pp.249-270, 2000.

- [57] S. Pothiya and I. Ngamroo, **“Optimal Fuzzy Logic-based PID Controller for Load-Frequency Control Including Superconducting Magnetic Energy Storage Units,”** Energy Conversion and Management, Vol.49, pp.2833-2838, 2008.
- [58] Z. Woo, H. Chung and J. Lin, **“A PID Type Fuzzy Controller with Self-Tuning Scaling Factors,”** Fuzzy Set and Systems, Vol.115, pp.321-326, 2000.
- [59] H. Li, L. Zhang, K. Cai and G. Chen, **“An Improved Robust Fuzzy-PID Controller with Optimal Fuzzy Reasoning,”** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part B, Vol.35, No.6, pp.1283-1294, 2005.
- [60] Von Frisch K. **“Bees: Their Vision, Chemical Senses and Language,”** (Revised edition) Cornell University Press, N.Y., Ithaca, 1976.
- [61] Sandip D. Shah et al. **“Emissions of Regulated Pollutants From in-use Diesel Back-Up Generators,”** Atmospheric Environment, Vol.40, pp.4199-4290, 2006.
- [62] J.K. Kaldellis. **“An Integrated Model for Performance Simulation of Hybrid Wind-Diesel Systems,”** Renewable of Energy, Vol. 32, pp. 1544-1564, 2007.
- [63] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, **“Wind Energy Handbook”** John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [64] P.M.Anderson, A.Bose. **“Stability Simulation of Wind Turbine Systems,”** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102,1983.
- [65] E. N. Hinrichsen, P. J. Nolan, **“Dynamic and Stability of Wind Turbine Generators,”** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, 1982.
- [66] Pal BC, Coonick AH, Jaimoukha IM, El-Zobaidi H. **“A Linear Matrix Inequality Approach to Robust Damping Control Design in Power Systems with Superconducting Magnetic Energy Storage Device,”** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, pp. 356–362, 2000.
- [67] S. Dechanupaprittha, K. Hongesombut, M. Watanabe, Y. Mitani and I.Ngamroo, **“A Heuristic-based Design of Robust SMES Controller Taking System Uncertainties into Consideration,”** IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 1, no. 3, pp. 255-267, 2006.
- [68] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [69] W. Hassenzahl, **“Superconducting Magnetic Energy Storage,”** IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 25, No. 2, 1989.
- [70] Buckles, W.; Hassenzahl, W.V. **“Superconducting Magnetic Energy Storage,”** IEEE Power Engineering Review Volume: 20 Page(s): 16 – 20, 2000.
- [71] Chung-Shih Hsu, Wei-Jen Lee, **“Superconducting Magnetic Energy Storage for Power System Applications,”** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 5, 1992.
- [72] L. Chen et al, **“Detailed Modeling of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System,”** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, 2006.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76]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.
- [77] 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.
- [78] X. Chu, X. Jiang, Y. Lai , X. Wu, W. Liu, **“SMES Control Algorithms for Improving Customer Power Quality,”** IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 11, pp.1769-1772, 2001.
- [79] S. Dechanupaprittha, K. Hongesombut, M. Watanabe, Y. Mitani, I. Ngamroo, **“A Practical Design of a Fuzzy SMES Controller based on Synchronized Phasor Measurement for Interconnected Power Systems.”** Int. J Emerging Electric Power Systems, vol.9, No. 5, 2008.

- [80] T.Senjyu, et al, **“Generating Power Leveling of Renewable Energy for Small Power System in Isolated Island,”** IEEJ Transactions on Power Energy, Vol.25, No.12, pp.1209–1215, 2005.
- [81] T.Senjyu, et al, **“Stabilization Control for Remote Power System by Using H_∞ Decentralized Controllers,”** IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [82] H.Gorgun, **“Dynamic Modeling of a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer,”** International Journal of Hydrogen Energy, No.33, pp 29 – 38, 2006.
- [83] A. Marshall, et al. **“Hydrogen Production by Advanced Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysers—Reduced Energy Consumption by Improved Electrocatalysis,”** International Journal of Energy, Vol.32, pp. 431-436, 2007.
- [84] F.Barbir. **“PEM Electrolysis for Production of Hydrogen from Renewable Energy Sources,”** International Journal of Solar Energy, Vol.78, pp.661-669, 2005.
- [85] Onda K, Murakami T, Hikosaka T, Kobayashi M, Notu R, Ito K. **“Performance Analysis of Polymer–Electrolyte Water Electrolysis Cell at a Small-Unit Test Cell and Performance Prediction of Large Stacked Cell,”** J Electrochemical Soc, Vol. 149, pp. 1069–1078, 2002.
- [86] Ulleberg, **“Modeling of Advanced Alkaline Electrolyzers: A System Simulation Approach,”** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 21-33, 2003.
- [87] Kelouwani S, Agbossou K, Chahine R. **“Model for Energy Conversion in Renewable Energy System with Hydrogen Storage,”** International Journal of Power Sources, Vol.140, pp.392–399, 2005.
- [88] Khan MJ, Iqbal MT. **“Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind–Fuel Cell Hybrid Energy System,”** Renewable Energy, Vol.30, pp. 421-439, 2005.
- [89] Bei Gou, Woon Ki Na and Bill Diong, **“Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications,”** Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [90] J.J. Baschuk, Xianguo Li, **“A General Formulation for a Mathematical PEM Fuel Cell Model,”** International Journal of Power Sources, Vol.142, pp. 134-153, 2004.
- [91] C. Marr á, X. Li. **“An Engineering Model of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance,”** An International Journal for Physical and Engineering Sciences, Vol. 50, pp.190-200, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [92] J.Jia, et al, “**Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell,**” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, 2009.
- [93] S.Yerramalla, A. Davari, A. Feliachi, T. Biswas, “**Modeling and Simulation of the Dynamic Behavior of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell,**” International Journal of Power Sources, Vol. 124, pp.104-113, 2003.
- [94] J.J. Baschuk, Xianguo Li. “**Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Variable Degrees of Water Flooding,**” International Journal of Power Sources, Vol. 86, pp.181-196, 2000.
- [95] J. Wee, K.Lee, S.Kim. “**Sodium Borohydride as the Hydrogen Supplier for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems,**” Fuel Processing Technology, Vol. 87, pp.811-819, 2006.
- [96] K. Sasaki et al., “**On the Voltage Drop of Phosphoric Acid Fuel Cell Due to Its on-off Operation,**” Transactions of the Institute of Electrical Engineering of Japan, vol. 118-B, no. 12, pp. 1450–1456, 1998.
- [97] Senjyu, T.; Nakaji, T.; Uezato, K.; Funabashi, T., “**A Hybrid Power System using Alternative Energy Facilities in Isolated Island,**” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.20, No. 2, pp. 406- 414, 2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก1 รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ธีรวุฒิ ไชยธรรม, อิศระชัย งามหรุ และศราวุธ โพธิยา, “การออกแบบตัวควบคุมพีชซีโลจิก-พีไอดีที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งในระบบไมโครกริด,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), 29-31 ตุลาคม 2551, นครนายก, ประเทศไทย, หน้า.77-80.
2. **T. Chaiyatham, I. Ngamroo, S. Pothiya and S. Vachirasricirikul, “Fuzzy Logic PID-based SMES Controller Design using Bee Colony Optimization for Stabilization of Inter-Area Oscillation,”** Proceeding of International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, and Information Technology (ECTI 2009), 6 – 9 May 2009, Chonburi, Thailand, Vol.1, pp.322-325.
3. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and **T. Chaiyatham, “Design of Robust Control and Monitoring System for Microgrid Stabilization,”** Proceeding of International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, and Information Technology (ECTI 2009), 6 – 9 May 2009, Chonburi, Thailand, Vol.1, pp.62-65.
4. **T. Chaiyatham, I. Ngamroo, S. Pothiya and S. Vachirasricirikul, “Design of Optimal Fuzzy Logic-PID Controller using Bee Colony Optimization for Frequency Control in An Isolated Wind-Diesel System,”** Proceeding of IEEE Conference on Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific (IEEE T&D 2009), 26-30 October 2009, Seoul, Korea.
5. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and **T. Chaiyatham, “Robust Frequency Stabilization in a Microgrid System,”** Proceeding of IEEE Conference on Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific (IEEE T&D 2009), 26-30 October 2009, Seoul, Korea.
6. **T. Chaiyatham, I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul, “Microgrid Stabilization using Controllable Aqua Electrolyzer & Fuel Cell based on Bee Colony Optimization of Fuzzy Logic-PID controller,”** Proceeding of 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), 28-30 October 2009, Prachinburi, Thailand, Vol.1, pp.319-322.
7. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and **T. Chaiyatham, “Enhancement of Frequency Control Effect of Microturbine by Electrolyzer in a Smart Grid System,”** Proceeding of 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), 28-30 October 2009, Prachinburi, Thailand, Vol.1, pp.183-186.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1

2009 6th International Conference
on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications,
and Information Technology

**ECTI-CON
2009**

May 6th - 9th, 2009
Ambassador City Jomtien
Pattaya, Chonburi, Thailand

ISBN 978-1-4244-3388-9
IEEE Catalog Number: CFP0906E
Library of Congress: 2008910219

ECTI
50th ANNIVERSARY
KMUTNB
ELECTRICAL
Engineering Institute

NTC
National Telecommunications Commission

NECTEC
a member of NSTDA

IEEE
THAILAND SECTION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fuzzy Logic PID-based SMES Controller Design using Bee Colony Optimization for Stabilization of Inter-Area Oscillation

Theerawut Chaiyatham*, Issarachai Ngamroo**, Saravuth Pothiya* and Siththidet Vachirasricirikul*

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (Email: t.chaiyatham@hotmail.com)

**Center of Excellence for Innovative Energy Systems
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Abstract- This paper proposes a design of Fuzzy Logic based-Proportional-Integral-Derivative (FLPID) controller of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) by a Bee Colony Optimization (BCO) for stabilization of inter-area oscillation in an interconnected power system. Conventionally, the scale factors, membership functions and control rules of FLPID are obtained by trial and error method or experiences of designers. To tackle this problem, the BCO is applied to simultaneously tune all control parameters of FLPID controller based on the minimization of the integral of time-multiplied absolute error of the generators speed difference between any two areas. Simulation results in a two-area four-machine power system show the superior stabilizing effect of the SMES with the proposed optimal FLPID controller in comparison with the SMES with conventional FLPID controller.

I. INTRODUCTION

Interconnections in a power system not only provide the improvement of system reliability, but also increase the economical efficiency. Nevertheless, they occasionally cause the inter-area low frequency oscillation with poor damping characteristic [1]. The stability of the inter-area oscillation mode is deteriorated by the heavy load condition in tie-lines especially due to the electric power exchange. To solve this problem, a superconducting magnetic energy storage (SMES) [2], which is capable of controlling active and reactive power simultaneously, has been proposed as one of the most effective stabilizers of inter-area power oscillations.

Recently, fuzzy logic based-Proportional-Integral-Derivative (FLPID) control has extensively received attentions in various power systems applications [3]. The FLPID controller is not sensitive to the variations of system structure, parameters and operating points. In addition, it can be easily implemented in practical systems. Nevertheless, the determination of scale factors, membership function and control rules is an inevitable problem in a FLPID control design. Generally, control parameters of FLPID are selected by trial and error method or experiences of designers. To solve this problem, more flexible and systematic optimization technique based on a sophisticated algorithm is highly expected.

Based on this motivation, many nature inspired algorithms were developed like simulated annealing, genetic algorithm, Tabu search. These algorithms can provide better solution in

comparison to classical algorithm. A branch of nature inspired algorithms which are known as Swarm Intelligence is focused on insect behavior in order to develop some meta-heuristics such as Ant Colony Optimization (ACO), Particle Swarm Optimization (PSO) etc. Among of them, Bee Colony Optimization (BCO) which is proposed by *Karaboga* [4], is a relatively new member of Swarm Intelligence. The BCO algorithm mimics the food foraging behavior of swarms of honey bees. Honey bees use several mechanisms like waggle dance to optimally locate food sources and to search new ones. Besides, BCO algorithm is a very simple, robust and population based stochastic optimization algorithm.

This paper applies a BCO algorithm to optimize scale factors, membership functions, and control rules of FLPID controller of SMES power controllers for stabilization of inter-area oscillation in an interconnected power system. Without trial and error, all FLPID control parameters can be tuned automatically by BCO based on the minimization of the integral of time-multiplied absolute error of the generators speed difference between any two areas. Simulation studies in a two-area four-machine power system confirm that the stabilizing effect of the SMES equipped with the proposed FLPID controller is superior to that of the SMES with conventional FLPID controller.

This paper is organized as follows. Section II presents the detail of a two-area four machine power system. The FLPID SMES controller is described in Section III. The principle of BCO algorithm is explained in Section IV. Simulation results in are presented in Section V. Finally, the conclusion is provided.

II. STUDY SYSTEM

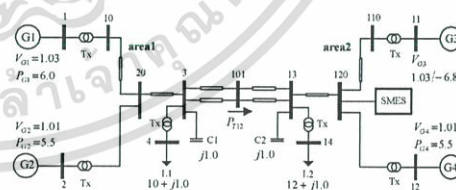


Figure 1 Two-area four-machine power system

The proposed design is tested with a two-area four-machine power system [1] as shown in Fig. 1. Each generator model is represented by a 4-state transient model and is equipped with a simplified exciter and governor [1]. The power system consists of two areas connected by an AC tie-line and exhibits a weak inter-area oscillation mode. The electric power is flowing from areas 1 to 2. Based on the residue method [5], bus 120 is the most effective SMES location for stabilization of inter-area oscillation. In particular, the active and reactive power flow deviations from bus 13 to bus 120 are used as feedback input signals for the FLPID SMES controller for power system stabilization. The SMES has a specification of 80 MJ, 40 kA, 100 MVA [5].

III. FUZZY LOGIC-PID SMES CONTROLLER

A. SMES model and control scheme

The SMES model with active and reactive power modulation control scheme [5], as depicted in Fig. 2, is used. The SMES unit includes four controllers of $K_P(s)$, $K_Q(s)$, $K_V(s)$ and $K_{IDC}(s)$. $K_P(s)$ and $K_Q(s)$ are the FLPID based-active and reactive (P - Q) power controllers, respectively. The detail block of $K_P(s)$ and $K_Q(s)$ is shown in Fig. 3. $K_V(s)$ is the voltage controller. $K_{IDC}(s)$ is the SMES coil current. The effect of SMES coil current I_{DC} is considered in the SMES model, since the dynamic behavior of I_{DC} affects the overall performance of SMES. In practice, I_{DC} is not allowed to reach zero to prevent the possibility of discontinuous conduction under unexpected disturbances. On the other hand, I_{DC} , which is above the maximum allowable limit, may lead to the loss of superconducting properties. Based on the hardware operational constraints, the lower and upper coil current limits are considered and assigned as $0.30I_{DC0}$ and $1.38I_{DC0}$, respectively, where, I_{DC0} is an initial value of I_{DC} .

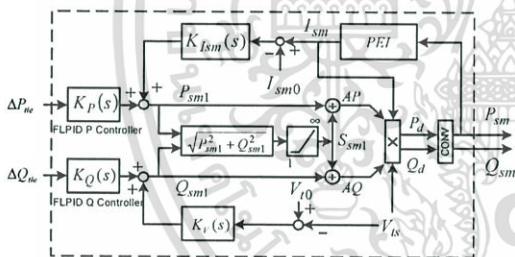


Figure 2 SMES with P - Q controller

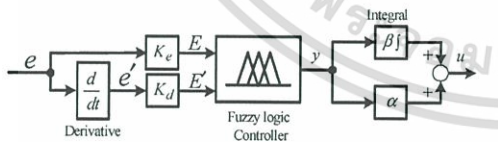


Figure 3 Block diagram of FLPID controller.

B. Scale factors, membership functions and control rules

Fig. 3 shows the proposed FLPID for P - Q controllers of SMES. The input signal (e) is the change of active power (ΔP_{tie}) in a tie-line for P controller or reactive power (ΔQ_{tie}) for Q controller. The output signal (u) of FLPID controller is given by

$$u = \alpha y + \beta \int y dt \quad (1)$$

where y is the output of the fuzzy logic controller. It has been shown in [6] that for the product-sum crisp type fuzzy controller, the relation between the input and the output variables of the fuzzy logic controller can be given as

$$y = A + PE + DE' \quad (2)$$

where $E = K_e e$ and $E' = K_d e'$. Therefore, from (1) and (2), the controller output is obtained as

$$u = \alpha A + \beta A t + \alpha K_e P e + \beta K_d D e + \beta K_e P \int e dt + \alpha K_d D e' \quad (3)$$

Thus, the equivalent control components of the FLPID type are obtained as follows:

- Proportional gain: $\alpha K_e P + \beta K_d D$
- Integral gain: $\beta K_e P$
- Derivative gain: $\alpha K_d D$

In the FLPID controller design, the important procedure is how to determine the scale factors (K_e, K_d, β and α), membership functions and control rules. In general, they are determined by the trial and error and designer's experiences. To overcome this problem, this paper applies a BCO algorithm to automatically determine the scale factors, membership functions and control rules. Here, the fuzzy logic controller as shown in Fig. 4(a) consists of three membership functions with two-input and one-output. Each membership function consists of two trapezoidal memberships and five triangular memberships.

For the case of two-input and one-output, the control rules can be shown graphically in Table 1, where every cell shows the output membership function of a control rule with two input membership functions. The control rules are built from the statement: *if input 1 and input 2 then output 1*. For example, consider the third row and fourth column in Fig. 4(b), that means: *if E is SN and E' is Z, then u is SP*.

The FLPID controller which uses the membership functions and the control rules as shown in Fig. 4(a) and Fig. 4(b) and included SMES, is called the "*Conventional FLPID SMES controller*". On the other hand, for the proposed controller that is the "*Optimal FLPID SMES controller*", the scale factors, membership functions and control rules are automatically tuned by the BCO algorithm.

IV. BEE COLONY OPTIMIZATION

BCO algorithm was proposed by Karaboga [4] in 2005 for optimizing numerical problems. The algorithm mimics the food foraging behavior of swarms of honey bees. Honey bees use several mechanisms like waggle dance to optimally locate food sources and to search new ones. This makes them a good candidate for developing new intelligent search algorithms. It is a very simple, robust and population based stochastic optimization algorithm.

In BCO algorithm, the colony of artificial bees contains two groups of bees which are scout and employed bees. The scout bees have the responsibility of finding a new food source. The responsibility of employed bees is to determine a food source within the neighborhood of the food source in their memories and share their information with other bees within the hive.

The procedure of the BCO algorithm is given as below:

Step 1: Generate randomly the initial populations of n scout bees. These initial populations must be feasible candidate solutions that satisfy the constraints. Set $NC = 0$.

Step 2: Evaluate the fitness value of the initial populations.

Step 3: Select m best sites for neighborhood search.

Step 4: Separated the m best sites to two groups, the first group has e best sites and another group has $m-e$ best sites.

Step 5: Determine the size of neighborhood search of each best size (patch size, ngh).

Step 6: Recruit bees for selected sites (more bees for the best e sites).

Step 7: Select the fittest bees from each patch.

Step 8: Check the stopping criterion. If satisfied, terminate the search, else $NC = NC + 1$.

Step 9: Assign the $n-m$ remaining bees to random search.

Step 10: New population of scout bees. Go to Step 2.

where NC is number of iteration, n is number of scout bees, m is number of the best selected sites, e is number of the best site, ngh is neighborhood size.

V. SIMULATION RESULTS

The following controllers are designed individually for comparison studies.

1. Conventional FLPID SMES controller
2. Optimal FLPID SMES controller.

In the optimization, the speed difference between generators 1 and 3 ($\Delta\omega_d$) which implies the inter-area oscillation, is selected to set the integral of time-multiplied absolute error (ITAE). Accordingly, the objective function is set as

$$\text{Minimize } ITAE = \int_0^{\infty} t |\Delta\omega_d| dt \quad (4)$$

Case 1 in Table I is used for design of both conventional and optimal FLPID controllers. Nonlinear simulation study is carried out by are performed by Dymola software package with ObjectStab [7] and MATLAB. As a result, the tuned parameters of conventional FLPID (scale factors) and optimal FLPID controllers (scale factors, membership functions and control rules) are shown in Table II and Table III.

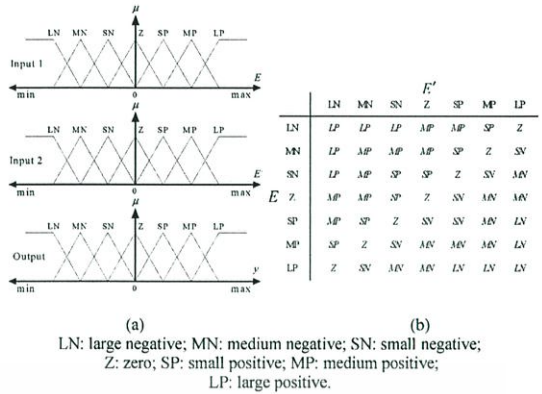


Figure 4 Membership functions and control rules of FLPID controller.

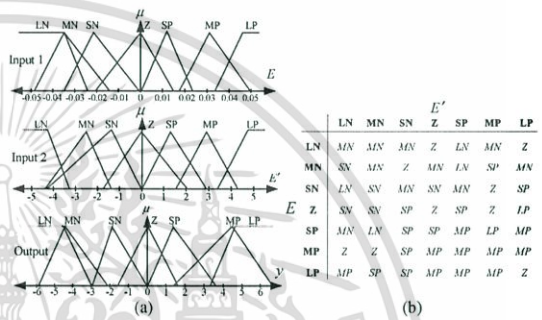


Figure 5 Optimized membership functions and control rules of $K_p(s)$ controller

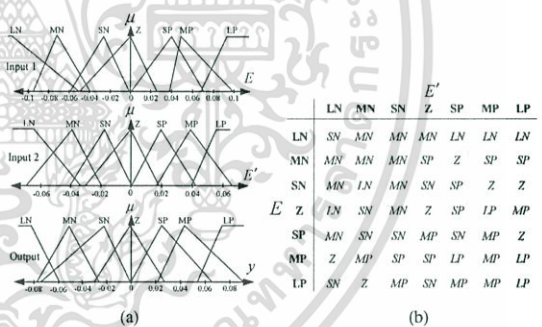


Figure 6 Optimized membership functions and control rules of $K_i(s)$ controller

Figs. 7-9 show the system responses for each case. The generator speed differences $\Delta\omega_d$ are shown to examine the dynamic responses of the inter-area oscillation. The proposed optimal FLPID SMES controller gives the better dynamic performance than conventional FLPID SMES controller and without SMES after being subjected to major system

TABLE I
CASE STUDIES ($P_{T12} = 1.28 pu$)

Case	System Disturbance
1	A temporary three-phase fault to ground is applied at bus 101 at $t = 1$ s, for 50 ms.
2	A temporary three-phase fault-to-ground on the middle of line 3-101 occurs at $t = 1$ s for 50 ms.
3	A sudden loss of line 101-13 occurs at $t = 1$ s.

TABLE II
TUNED PARAMETERS FOR $K_{PI}(s)$ CONTROLLER

Controller	K_p	K_d	β	α	MF	CR
Conv. FLPID	0.3012	0.0490	1.2651	1.8452	Fig.4(a)	Fig.4(b)
Optimal FLPID	0.3140	0.0196	0.7333	1.8724	Fig.5(a)	Fig.5(b)

*Conv: conventional, MF: membership functions, CR: control rules

TABLE III
TUNED PARAMETERS FOR $K_{CI}(s)$ CONTROLLER

Controllers	K_p	K_d	β	α	MF	CR
Conv. FLPID	0.0171	-0.0353	0.3604	-0.0209	Fig.4(a)	Fig.4(b)
Optimal FLPID	0.0302	-0.0380	0.2121	-0.0250	Fig.6(a)	Fig.6(b)

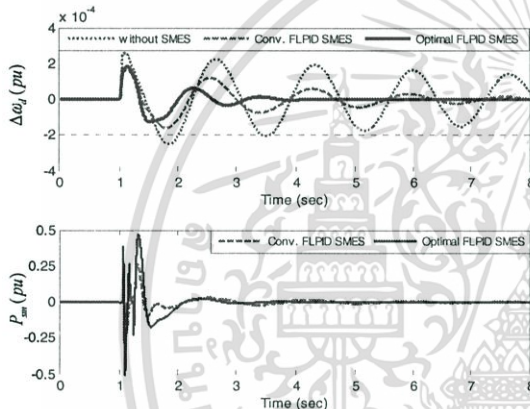


Figure 7 System response of case 1

disturbances. In addition, the SMES power outputs are given to show that they considerably remain within the limits.

VI. CONCLUSIONS

In this paper, the optimal FLPID control design using the BCO of SMES power controller for power system stabilization has been presented. Without trial and error or experiences of designers, the scale factors, membership functions and control rules of the FLPID SMES controller are automatically optimized by the BCO. Simulation results in the two-area four-machine system show that the stabilizing effect of the SMES with proposed optimal FLPID controller is superior to that of the SMES with conventional FLPID controller under various system disturbances.

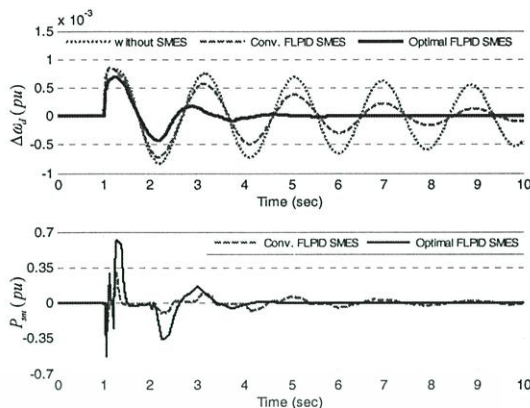


Figure 8 System response of case 2

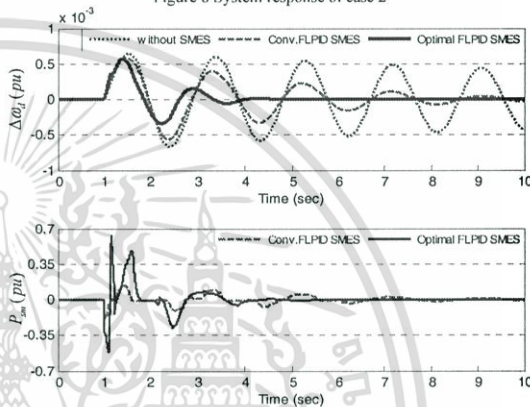


Figure 9 System response of case 3

VII. ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

VIII. REFERENCES

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGrawHill, 1994.
- [2] Y. Mitani, K. Tsuji and Y. Murakami, "Application of superconducting magnetic energy storage to improve power system dynamic performance," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 1418-1425, 1988.
- [3] M.E. El-Hawary, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, Wiley-IEEE Press, 1998.
- [4] D. Karaboga, "An idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization", *Technical Report-TR06*, Erciyes University, Engineering faculty, Computer Engineering Department, Turkey, 2005.
- [5] S. Dechanupaprittha, K. Hongseombut, M. Watanabe, Y. Mitani and I. Ngamroo, "A heuristic-based design of robust SMES controller taking system uncertainties into consideration," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 255-267, 2006.
- [6] Z.Q. Wu and M. Mizumoto, "PID type fuzzy controller and parameter adaptive method", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 78, no. 1, pp. 23-36, 1996.
- [7] M. Larsson, "ObjectStab - an educational tool for power system stability studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.19, no. 1, pp. 56-63, 2004.

ประวัติผู้เขียน

นายธีรวุฒิ ไชยธรรม เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 โดยมีความสนใจงานวิจัยในด้าน เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง และ ระบบไมโครกริด วิธีการฮิวริสติก (Heuristic) และตัวควบคุมฟัชซีโลจิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้