



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การทำเสถียรภาพในระบบไมโครกริดแยกโคดที่มีแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่ไม่
สม่ำเสมอด้วยการควบคุมของอิเล็กโทรไลเซอร์ภายใต้การควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ออกแบบ
ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง

An Isolated Microgrid Stabilization Included with Intermittent Renewable
Energy Sources by Electrolyzer Control Based on Optimal Fuzzy Logic
Controller using Bee Colony Optimization

นายอิสระชัย งามหรุ

RCH

๐๙๖๔๗

๒๕๕๕

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 137318

วันเดือนปี..... 22 ส.ย. 2558

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

.b.12623076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การทำเสถียรภาพในระบบไมโครกริดแยกโดดที่มีแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่ไม่สม่ำเสมอด้วยการควบคุมของอิเล็กโทรไลเซอร์ภายใต้การควบคุมพีชชีลอจิกที่ออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงฝูง

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2555

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายอิสระชัย งามหรุ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิก-พีไอดีโดยใช้วิธีฝูงฝูงในการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมให้มีความเหมาะสม เพื่อควบคุมการทำงานของ อิเล็กโทรไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไมโครกริด ที่มีส่วนประกอบของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วย เนื่องจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดไม่คงที่ จึงได้มีการการออกแบบตัวควบคุมเพื่อรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิก-พีไอดีมีประสิทธิภาพ และมีความคงทนต่อการเกิดสิ่งรบกวนในระบบได้สูงกว่าตัววิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ : ไมโครกริด อิเล็กโทรไลเซอร์ พีชชีลอจิก วิธีฝูงฝูง

Research Title: An isolated microgrid stabilization included with intermittent renewable energy sources by electrolyzer control based on optimal fuzzy logic controller using bee colony optimization

Researcher: Issarachai Ngamroo

Faculty: Engineering **Department:** Electrical Engineering

ABSTRACT

This paper proposes the optimal fuzzy logic based-proportional-integral- derivative (FLPID) controller design of the electrolyzer (EZ) by a bee colony optimization (BCO) for microgrid (MG) stabilization. The study MG system consists of wind power (WP), photovoltaic (PV), fuel cell (FC) equipped with EZ, diesel generator, and load. The intermittent power generations from WP and PV cause the severe power fluctuation in the MG. To alleviate power fluctuation, the EZ which is normally used to produce the hydrogen input for FC, can be applied. By control of active and reactive powers absorbed by EZ, the power fluctuation can be stabilized. The structure of active and reactive power controllers of EZ is the FLPID which consists of scale factors (SCs), membership functions (MFs), and control rules (CRs). Without trial and error, SCs, MFs, and CRs of the FLPID controller are automatically optimized by a BCO. Simulation study confirms that the proposed EZ with an optimal FLPID controller is much superior to the EZ with a conventional FLPID controller or an optimal PID controller in terms of stabilizing effect and robustness against various loading conditions and severe disturbances.

Keywords : microgrid, electrolyzer, fuzzy logic, bee colony method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

อิสรระชัย งามหรุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ตัวควบคุมฟuzzy โฟกัส-พีไอดี และการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy	5
2.1 ฟuzzy โฟกัส.....	5
2.2 ตัวควบคุมฟuzzy โฟกัส-พีไอดี.....	6
2.3 วิธีฟuzzy.....	10
2.4 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โฟกัส-พีไอดี ด้วยวิธีฟuzzy.....	17
2.5 สรุป.....	19
บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy โฟกัส-พีไอดีสำหรับอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีฟuzzy	21
3.1 แบบจำลองของระบบ.....	21
3.1.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด.....	21
3.1.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	23
3.1.3 หลักการทำงาน และแบบจำลองของอิเล็กทรอนิกส์และเซลล์เชื้อเพลิง.....	25
3.2 การออกแบบตัวควบคุม.....	32
3.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ.....	36
3.4 สรุป.....	49
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
4.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	52
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	56
ประวัตินักวิจัย.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กฎควบคุมของตัวควบคุมพีชชีโลจิก.....	10
3.1 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	34
3.2 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	36
3.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	37
3.4 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	38
3.5 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบพีชชี	5
2.2 โครงสร้างการทำงานของพีชชีโลจิก	6
2.3 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี	7
2.4 โครงสร้างของตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี	8
2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีโลจิก	9
2.6 แผนผังขั้นตอนการทำงานของวิธีฝูงฝูง	13
2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันที่ใช้ในการหาคำตอบ	14
2.8 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 1 ของวิธีฝูงฝูง	14
2.9 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 2 ของวิธีฝูงฝูง	15
2.10 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 3 ของวิธีฝูงฝูง	15
2.11 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 4 ของวิธีฝูงฝูง	15
2.12 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 5 ของวิธีฝูงฝูง	16
2.13 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 6 ของวิธีฝูงฝูง	16
2.14 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 7 ของวิธีฝูงฝูง	17
2.15 ตัวอย่างการหาคำตอบเมื่อสิ้นสุดการค้นหาของวิธีฝูงฝูง	17
2.16 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีโลจิก	18
2.17 โครงสร้างกฎควบคุมของตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี	19
3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา	21
3.2 แบบจำลองระบบไมโครกริด	22
3.3 แบบจำลองระบบตัวกระตุ้น	24
3.4 แบบจำลองระบบตัวบังคับ	24
3.5 ลักษณะการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ โตรไลเซออร์	26
3.6 ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	28
3.7 โครงสร้างการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ โตรไลเซออร์ และเซลล์เชื้อเพลิง	29
3.8 แบบจำลอง AE และ FC พร้อมด้วยตัวควบคุม P และ Q	30
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในถัง และเอาต์พุตของ FC	31
3.10 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE	32
3.11 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE	32
3.12 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE	33

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13	ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	34
3.14	กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในระบบไมโครกริด.....	36
3.15	ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น.....	37
3.16	ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น.....	38
3.17	การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1.....	40
3.18	การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1.....	40
3.19	การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 1.....	41
3.20	การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 1.....	41
3.21	ปริมาณไฮโดรเจนที่ AE ผลิตได้ในกรณีที่ 1.....	42
3.22	ปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปใช้ในกรณีที่ 1.....	43
3.23	ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือในถังในกรณีที่ 1.....	43
3.24	การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2.....	44
3.25	การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2.....	45
3.26	การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE.....	45
3.27	การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE.....	46
3.28	ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของโหลด.....	47
3.29	การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3.....	47
3.30	การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3.....	48
3.31	การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 3.....	48
3.32	การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 3.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน พลังงานทดแทนได้มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะพลังงานที่มาจากลม และแสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้มาจากธรรมชาติ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย จึงทำให้เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ประโยชน์ โดยพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถที่จะนำไปผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันขนาดเล็ก (Micro-turbine generator) ในรูปแบบของระบบไมโครกริด [1] เพื่อช่วยในการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด เช่น ชุมชนที่อยู่ห่างไกลที่ไม่ได้รับการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำไปผลิตไฟฟ้าให้กับระบบการผลิตไฮโดรเจน [2] โดยอาศัยหลักการทำงานของ อิเล็กโทรไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) ที่สามารถรับกำลังไฟฟ้าไปผลิตเป็นไฮโดรเจนได้ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตเป็นกำลังไฟฟ้า [3] หรือเป็นเชื้อเพลิงให้กับยานพาหนะ [4] เป็นต้น ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาด้วยการนำเอากระบวนการผลิตไฮโดรเจน เข้ามาติดตั้งในระบบไมโครกริด [5] โดยใช้ตัว AE รับกำลังไฟฟ้าเข้ามาผลิตเป็นไฮโดรเจนแล้วนำไฮโดรเจนที่ได้ไปสะสมไว้ในถังเก็บ เพื่อจ่ายเป็นเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิงผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าไปให้ระบบไมโครกริด

การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของพลังงานลม หรือพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้ ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้ไม่คงที่ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบนั้นเกิดการแกว่งขึ้น และอาจจะส่งผลเสียต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าได้ หลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้ อุปกรณ์สะสมพลังงานมาติดตั้งในระบบ เช่น แบตเตอรี่ [6] หรือ SMES [7] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เหล่านี้มีการลงทุนสูงทั้งในการติดตั้ง และการดูแลรักษา อีกทั้งในด้านของ แบตเตอรี่ยังมีอายุการใช้งานน้อย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โครงการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้การควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของตัว AE เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าภายในระบบไมโครกริดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจาก AE มีสมรรถนะในการรับกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วในการผลิตไฮโดรเจน

ในอดีตที่ผ่านมาตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนใหญ่จะเป็นแบบ ตัวควบคุมพีไอ (Proportional integral: PI) [8] และตัวควบคุมพีไอดี (Proportional integral derivative: PID) [9] เนื่องจากออกแบบง่าย ราคาถูก อย่างไรก็ตามตัวควบคุมเหล่านี้ไม่เหมาะกับระบบที่มีอันดับสูงๆ (High-order) ระบบที่มีเวลาหน่วง (Time-delay) ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ (High-nonlinear system) และระบบที่มีความซับซ้อนมากๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไม่นานมานี้ ตัวควบคุมแบบฟuzzy logic-PID (Fuzzy logic-PID: FLPID) [10] มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบการควบคุมต่างๆ เช่น ระบบควบคุมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสถิต (Static var compensator) [11] ระบบควบคุมความถี่โหลด (Load frequency control) [12] ระบบการควบคุมแรงดันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Voltage control for a synchronous generator) [13] ระบบการใช้เหตุผลความเร็วสำหรับเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (Accelerated reasoning for d.c. servo motors) [14] และ ระบบการควบคุมกังหันลม [15] เป็นต้น แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FLPID มีอยู่จำนวนมาก และมีความซับซ้อนทำให้ยากต่อการออกแบบ ทั้งในส่วนของ แฟกเตอร์สัดส่วน (Scale factor) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) และกฎควบคุม (Control rule) ทำให้การออกแบบโดยทั่วไปแล้วจะอาศัยการลองผิดลองถูก (Trial and error) หรืออาศัยความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ทำให้การควบคุมเหล่านั้นมีสมรรถนะไม่ดีเท่าที่ควร

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โครงการวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมของ AE ด้วย FLPID ที่ทำให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง [16] ที่เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของผึ้งตามธรรมชาติ โดยในการออกแบบนั้นจะทำการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุม FLPID ทั้งหมดพร้อมกันภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด ในการศึกษาครั้งนี้ การออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุม FLPID ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งที่นำเสนอ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นว่า การควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ในการผลิตไฮโดรเจนด้วยตัวควบคุมฟuzzy logic-PID ที่ออกแบบให้เหมาะสมดังที่นำเสนอนั้น ไม่เพียงแต่สามารถที่จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบไมโครกริดเท่านั้น แต่ยังสามารถที่จะผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบกับ ภายใต้การจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกันอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการแกว่งกำลังไฟฟ้าในไมโครกริดอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายพลังงานลมและแสงอาทิตย์
- 2) เพื่อประยุกต์ใช้โหลดที่สามารถควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้อิเล็กโตรไลเซอร์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายพลังงานลมและแสงอาทิตย์
- 3) เพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy logic อย่างเหมาะสมของอิเล็กโตรไลเซอร์โดยใช้วิธีฝูงผึ้ง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ระบบไมโครกริดที่พิจารณาประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไม่ได้คือพลังงานลม แสงอาทิตย์ และโหลดที่ควบคุมได้คือ อิเล็กโตรไลเซอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้

ระบบไมโครกริดในบทความวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่ายของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่างๆ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา และสร้างขึ้นมาโดยใช้ซอฟต์แวร์เป็นหลัก
- 3) การออกแบบระบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอ โดยในที่นี้จะทำการออกแบบและทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) พิจารณาเลือกระบบไมโครกริดที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไม่ได้ ได้แก่ พลังงานลมแสงอาทิตย์ และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมได้ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ด้วยการสืบค้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา
- 2) ศึกษาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบไมโครกริด แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดต่างๆ
- 3) วิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพระบบที่แสดงออกมาในสถานะชั่วคราวและพลวัตเมื่อเกิดการรบกวนระบบในรูปแบบต่างๆ เช่น การเกิดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากพลังงานลม แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน การเกิดสถานะฉุกเฉินต่างๆ เป็นต้น ด้วยการจำลองระบบในโคเมนเวลาด้วยคอมพิวเตอร์
- 4) ศึกษาวิธีการการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง
- 5) ทำการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่เหมาะสมให้กับอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีฝูงผึ้ง โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 6) ทดสอบผลการลดการแกว่งของตัวควบคุมพีชชีที่ออกแบบมา โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบทั่วไป
- 7) ทดสอบความคงทนของตัวควบคุมที่ออกแบบมาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การเกิดสิ่งรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังพร้อมกับความไม่แน่นอนในระบบในสถานะต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ใช้งานกันอยู่
- 8) สรุปผลการศึกษาวิจัยเพื่อเขียนบทความส่งวารสารระดับนานาชาติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ความเข้าใจในพฤติกรรมในสถานะพลวัตและชั่วคราวของระบบไมโครกริดที่แสดงออกมาในลักษณะต่างๆ ได้แก่การเปลี่ยนแปลงความถี่ กำลังไฟฟ้า เมื่อได้รับผลกระทบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่นพลังงานลมและแสงอาทิตย์ ตลอดจนเมื่อเกิดสถานะฉุกเฉินต่างๆ
- 2) สามารถประยุกต์ใช้อิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริด และสามารถออกแบบตัวควบคุมพีชชีที่เหมาะสมโดยใช้วิธีฝูงผึ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีความคงทนสูงต่อความไม่แน่นอนในระบบ
และ ยังมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

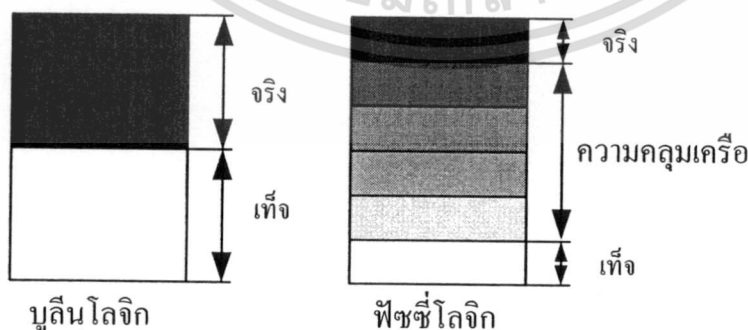
ตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอดี และการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy

ในบทนี้ อธิบายโครงสร้าง และการทำงานของตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอดี และการออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟuzzy โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzy logic-พีไอดี จะมีส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วน คือ แพลตฟอร์มตัวควบคุม ฟuzzy logic-พีไอดี และกฎควบคุม ส่วนประกอบเหล่านี้มีความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบจะอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือการลองผิดลองถูก ทำให้ผลที่ได้ ออกมายังไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีค่าที่เหมาะสม วิธีฟuzzy จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ เพื่อออกแบบในงานวิจัยนี้

2.1 ฟuzzy logic

ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือฟuzzy logic (Fuzzy logic) พัฒนามาจากฟuzzy set โดยเป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณ ซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะ ถูก/ผิด ใช่/ไม่ใช่ ของตรรกศาสตร์แบบฉบับ (Classical logic) ฟuzzy logic นั้นถือเป็นการประยุกต์ใช้งาน เพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญต่อปัญหาที่ซับซ้อน ค่าระดับความจริงในตรรกศาสตร์คลุมเครือ นั้นมักจะสับสนกับค่าความน่าจะเป็น ซึ่งมีแนวความคิดที่ต่างกัน ค่าระดับความจริงคลุมเครือ นั้นใช้ในการระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซต (Set membership) แต่ค่าความน่าจะเป็นนั้นระบุความเป็นไปได้ของสภาพการณ์แต่ละรูปแบบที่อาจจะเกิดขึ้น

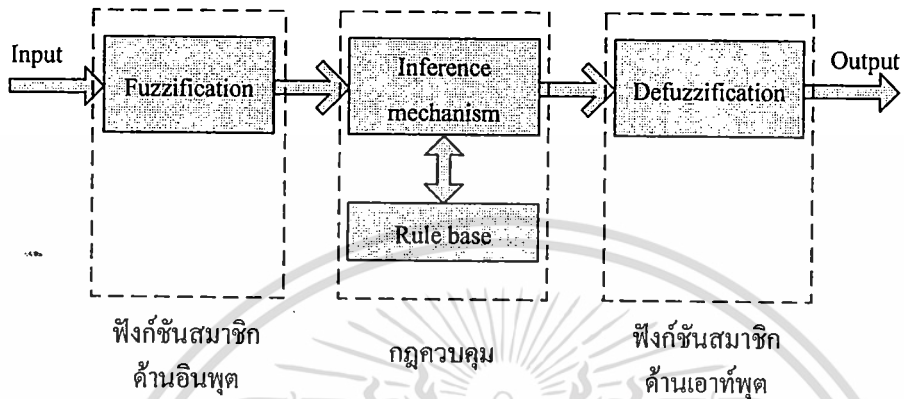
ฟuzzy logic สามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตด้วยค่าระหว่างศูนย์ ถึงหนึ่ง ที่พิเศษกว่าตรรกะแบบเท็จจริง (Boolean logic) ตรงที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false)



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟuzzy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริง (1) กับเท็จ (0) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองระดับด้วยคำพูดที่ว่า "เล็กน้อย" "ค่อนข้าง" หรือ "มาก" โดยใช้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตบางส่วน ฟัซซีโลจิกมีความสัมพันธ์กับ ฟัซซีเซต และทฤษฎีความเป็นไปได้ ซึ่งคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1965 โดย L.A. Zadeh



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการทำงานของฟัซซีโลจิก

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการทำงานของฟัซซีโลจิก สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นการทำหน้าที่แปลงข้อมูลอินพุตให้อยู่ในรูปตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซี ด้วยการใส่ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุต

ขั้นตอนที่ 2 กลไกอนุมาน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริง และกฎ เพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ปัญหา รวมทั้งกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 3 ฐานความรู้ เป็นส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา

ขั้นตอนที่ 4 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) ทำหน้าที่แปลงตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซีที่ได้มาจากกลไกอนุมานให้เป็นเอาต์พุตจริงสำหรับกระบวนการของระบบด้วยการใส่ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุต

2.2 ตัวควบคุมฟัซซีโลจิก-พีไอดี

โดยทั่วไปแล้ว ตัวควบคุมพีไอดี (Proportional-integral-derivative: PID) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก ออกแบบได้ง่าย ราคาถูก และมีประสิทธิภาพ

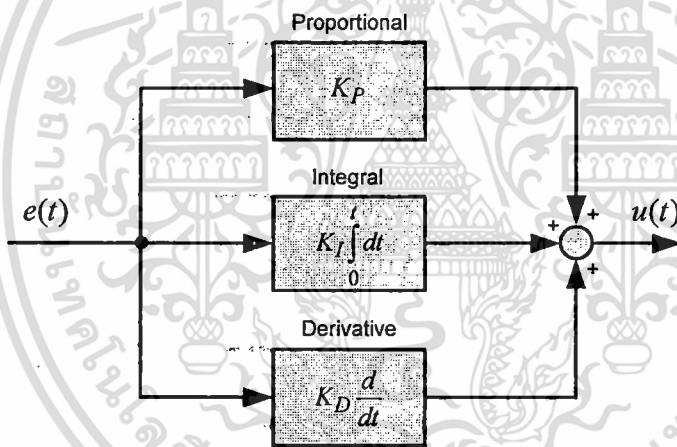
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบที่มีความเป็นเชิงเส้น (Linear system) หรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นไม่มากนัก โดยสามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปของโดเมนทางเวลาได้ดังนี้

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ

- $e(t)$ คือ อินพุตของตัวควบคุม
- K_P คือ อัตราขยายสัดส่วน (Proportional gain)
- K_I คือ อัตราขยายปริพันธ์ (Integral gain)
- K_D คือ อัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative gain)
- $u(t)$ คือ เอาท์พุตของตัวควบคุม



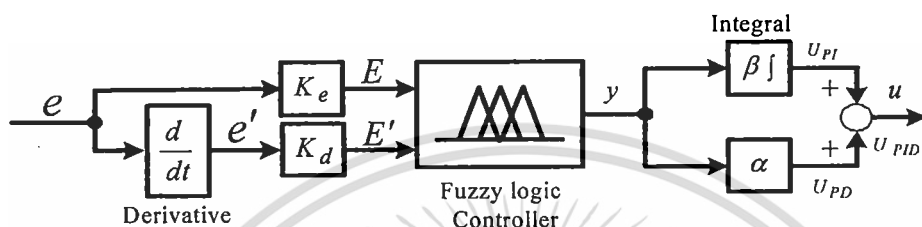
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี

อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมพีไอดีนั้นไม่ค่อยเหมาะกับระบบที่มีอันดับสูงๆ (High-order) ระบบที่มีเวลาหน่วง (Time-delay) ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ (High-nonlinear system) และระบบที่มีความซับซ้อนสูงๆ [17, 18] จนกระทั่งฟัซซี่โลจิก (Fuzzy logic) ได้มีการนำเสนอโดย Zadeh และหลังจากที่ Mamdani [19] ได้ทำการประยุกต์ใช้การควบคุมฟัซซี่โลจิกเป็นครั้งแรก ทำให้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่โลจิกนั้นเป็นที่สนใจอย่างมากทั้งในด้านการศึกษาวิจัย และในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากฟัซซี่โลจิกสามารถที่จะจัดการกับระบบที่ซับซ้อน และระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ ได้ [20]

เพื่อที่จะให้ตัวควบคุมนั้นยังคงมีคุณลักษณะการทำงานแบบตัวควบคุมพีไอดี และสามารถทำงานกับระบบที่มีความซับซ้อนได้แบบตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก หลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเอาตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีไอดี และตัวควบคุมฟuzzy โฟจิกมาทำงานร่วมกัน โดยมีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น ฟuzzy แบบพีไอดี (PID type fuzzy) ฟuzzy-พีไอดี (Fuzzy-PID) หรือ ฟuzzy โฟจิก-พีไอดี (Fuzzy logic-PID: FLPID) โดยในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีไอดี ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 ฟuzzy โฟจิก-พีไอดีที่นำเสนอนี้มาจากโครงสร้างของฟuzzy โฟจิก-พีไอ และฟuzzy โฟจิก-พีดี สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ แพลกเตอร์สัดส่วน ฟuzzy ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม โดยในส่วนของ ฟuzzy ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมจะเป็นกระบวนการทำงานของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีไอดี

เมื่อ

e คือ ค่าอินพุตของตัวควบคุม

e' คือ ค่าอนุพันธ์ของอินพุตของตัวควบคุม

K_e, K_d, β และ α คือ แพลกเตอร์สัดส่วน

y คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก

U_{PI} คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีไอ

U_{PD} คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีดี

u หรือ U_{PID} คือ เอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิก-พีไอดี

โดยสัญญาณควบคุม u สามารถหาได้จาก

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

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และเอาท์พุตของตัวควบคุมฟuzzy โฟจิกประเภท Product-sum สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $E = K_e e$ และ $E' = K_d e'$

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถหาเอาต์พุตของตัวควบคุมได้ดังนี้

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

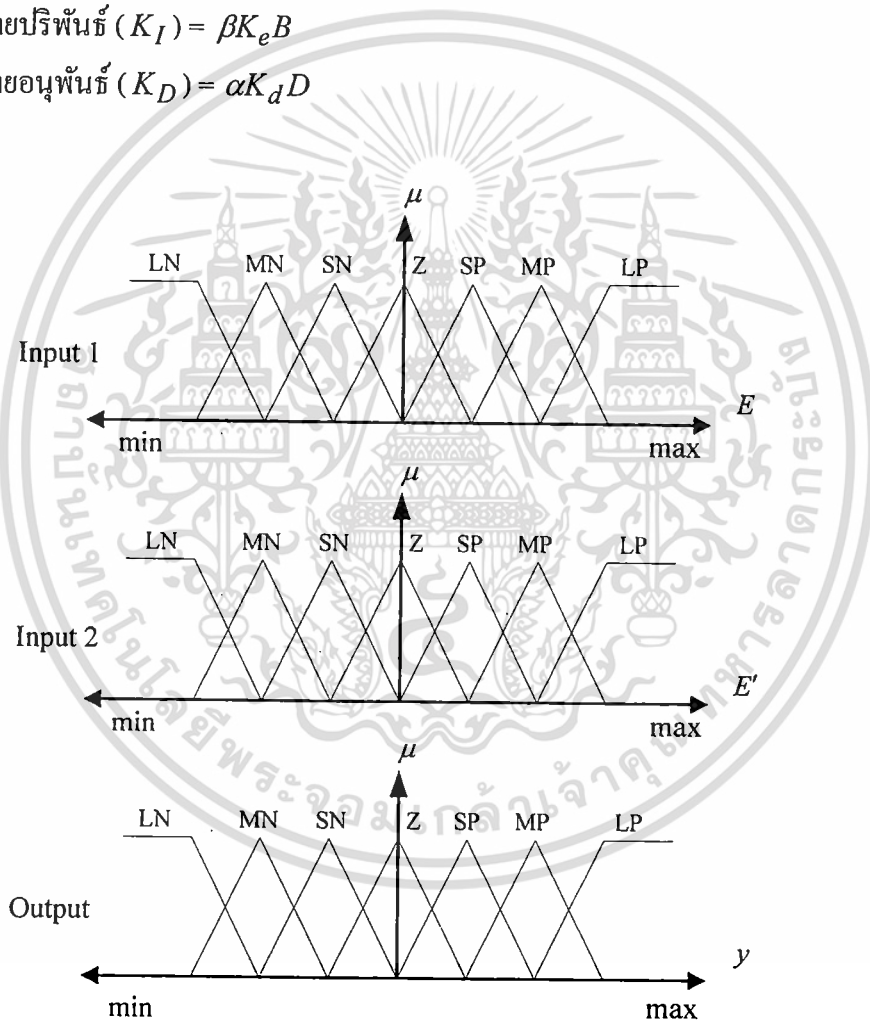
$$u = \alpha A + \beta A t + \alpha K_e B e + \beta K_d D e + \beta K_e B \int e dt + \alpha K_d D e' \quad (2.4)$$

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

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

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

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



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีโลจิก

ตัวควบคุมพีชชีโลจิกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วย 3 ฟังก์ชันสมาชิก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แยกเป็น 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต แต่ละสมาชิกประกอบไปด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู 2 ตัว และสามเหลี่ยม 5 ตัว และกฎควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยกฎควบคุมเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสอง และผลที่ได้เป็นเอาต์พุต โดยกฎควบคุมนี้ได้สร้างจากข้อกำหนดที่ว่า “If input 1 and input 2 then output” ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ เช่น อินพุต1 แถวที่ 3 คือ SN และ อินพุต2 คอลัมน์ที่ 4 คือ Z จะได้เอาต์พุต เป็น SP เป็นต้น

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) [16] ได้คิดค้นมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ โดยผึ้งตามธรรมชาตินั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ด้วยกัน คือ ผึ้งสำรวจ หรือผึ้งสอดแนม (Scout bee) และผึ้งงาน (Employed bee) สำหรับผึ้งสำรวจแต่ละตัว จะทำหน้าที่ออกสำรวจหาแหล่งอาหาร เช่น น้ำหวานจากผลไม้ หรือน้ำหวานจากเกสรดอกไม้ เป็นต้น เมื่อพบแหล่งของอาหารเหล่านั้นแล้ว ผึ้งสำรวจจะทำการประเมินคุณภาพของอาหาร เช่น ปริมาณความหวาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วไปที่เวทีสำหรับเต้นรำ (Dance floor) จากนั้นทำการแสดงที่เรียกกันว่า การเต้นแบบส่ายไป-มา (Waggle dance) พฤติกรรมการเต้นนี้ เปรียบเสมือนเป็นภาษาของผึ้ง และเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของการติดต่อสื่อสารในฝูงเพื่อที่จะช่วยให้ผึ้งได้พบแหล่งอาหารที่เหมาะสม และสามารถส่งผึ้งงานออกไปเก็บน้ำหวาน ตรงที่ผึ้งสำรวจหาเอาไว้ได้อย่างถูกต้อง ส่วนหน้าที่ของผึ้งงานก็จะออกไปเก็บอาหารในบริเวณที่ผึ้งสำรวจหาเอาไว้แล้วนำกลับมาที่รัง โดยจะออกไปเก็บอาหารเฉพาะในส่วนที่มีคุณภาพของอาหารที่ดีเท่านั้น ซึ่งทำการพิจารณาโดยผึ้งสำรวจ และบริเวณแหล่งอาหารที่มีคุณภาพของอาหารสูงจะส่งผึ้งงานนั้นไปมากกว่าบริเวณแหล่งอาหารที่มีคุณภาพน้อยเพื่อที่จะได้อาหารที่คืนนั่นเอง

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 เพื่อที่จะพิจารณาว่าประชากรตัวไหนมีความเหมาะสมมากที่สุด แล้วทำการจัดเรียงลำดับความเหมาะสมที่ได้มา โดยทำการเรียงจากมากไปหาน้อย

ขั้นตอนที่ 3: ทำการเลือกเอาผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดจำนวน m ค่า หรือเรียกได้ว่า เอา m ค่าแรก จากคำตอบที่ได้เรียงเอาไว้แล้ว เพื่อมาทำการกำหนดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบ และทำการแยกค่าผลลัพธ์ m นั้นออกเป็น 2 กลุ่ม โดยจะให้กลุ่มแรกคือค่าที่ดีที่สุดของ m จำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

e ค่า และส่วนผลลัพธ์ที่เหลือจำนวน $m-e$ ค่าจะให้เป็นกลุ่มที่ 2 สำหรับจุดประสงค์ในการแบ่งแยกผลลัพธ์นี้ก็เพื่อที่จะได้กำหนดจำนวนของฟังก์ชันนั้นให้มีความเหมาะสมในการออกหาค่าตอบ

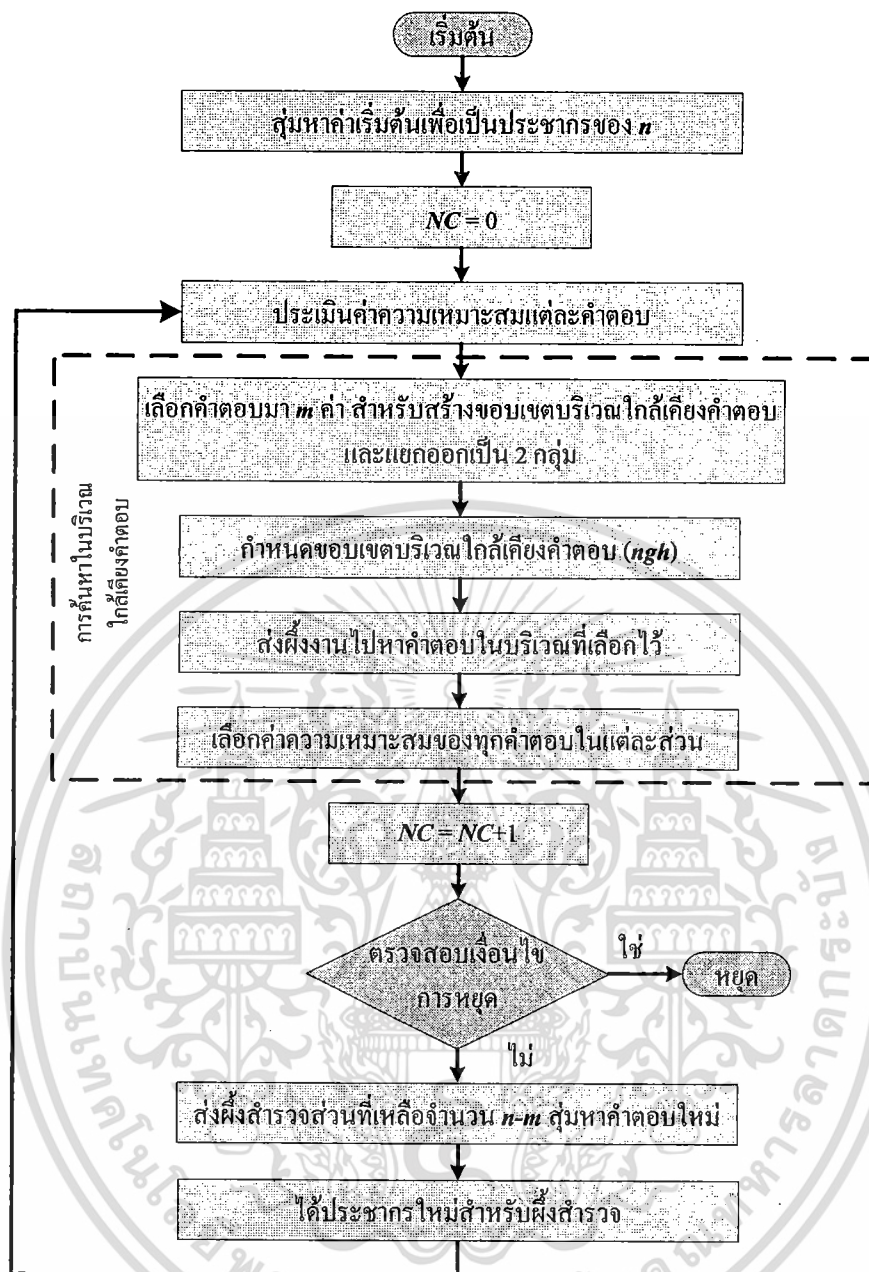
ขั้นตอนที่ 4: ทำการกำหนดขอบเขตการค้นหาค่าบริเวณใกล้เคียง (ngh) ของค่า m แต่ละค่าเพื่อให้ฟังก์ชันได้ออกหาค่าตอบ โดยขอบเขตที่สร้างขึ้นมานั้น ต้องอยู่ภายในขอบเขตต่ำสุด-สูงสุดที่ได้กำหนดไว้ดังที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 5: ส่งฟังก์ชันหาค่าตอบ โดยคำตอบจะอยู่ในขอบเขตการค้นหาค่าบริเวณใกล้เคียงที่สร้างขึ้นตามขั้นตอนที่ 4 สำหรับการส่งฟังก์ชันไปนั้นจะให้จำนวนฟังก์ชันของ ne ไปจำนวนมากสำหรับค้นหาในบริเวณใกล้เคียงคำตอบของ e และจะให้จำนวนฟังก์ชันของ ns จำนวนน้อย ในการค้นหาบริเวณคำตอบของ $m-e$ เนื่องจากว่า บริเวณคำตอบของ e นั้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรที่ได้มา ทำให้มีความน่าจะเป็นในการได้คำตอบที่เหมาะสมมากกว่าบริเวณใกล้เคียงคำตอบของ $m-e$

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

ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดทำงานว่าเป็นจริงหรือไม่ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นจำนวนรอบในการค้นหา หรือก็คือ NC นั้นเอง ถ้าจำนวนรอบการค้นหาค่าที่กำหนดไว้ให้หยุดการค้นหา ก็จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดคือค่า B_{Best} แต่ถ้าหากจำนวนรอบยังไม่ถึงค่าที่กำหนด ก็ให้ทำขั้นตอนต่อไป

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

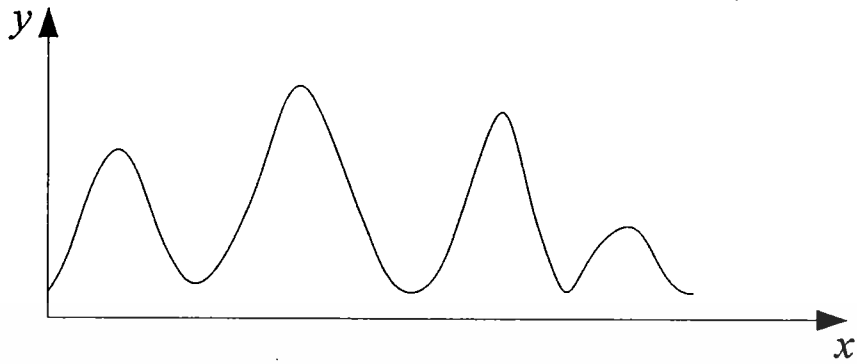


รูปที่ 2.6 แผนผังขั้นตอนการทำงานของวิธีฟุ้งฟุ้ง

ตัวอย่างการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟุ้งฟุ้ง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

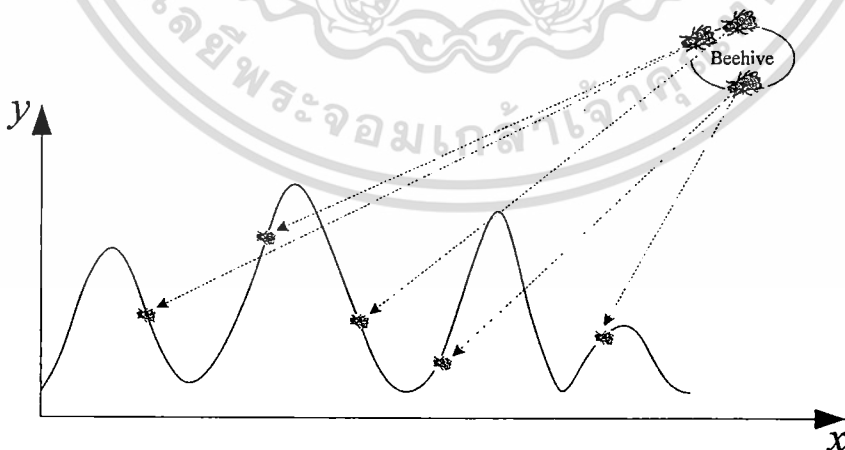


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันที่ใช้ในการหาคำตอบ

เริ่มต้น ทำการกำหนดพารามิเตอร์ในการหาคำตอบของวิธีฝูงผึ้ง

<i>NC</i>	=	20	รอบ
<i>n</i>	=	5	ตัว
<i>m</i>	=	3	คำตอบ
<i>e</i>	=	1	คำตอบ
<i>ngh</i>	=	10	เปอร์เซ็นต์
<i>ne</i>	=	2	ตัว
<i>ns</i>	=	1	ตัว

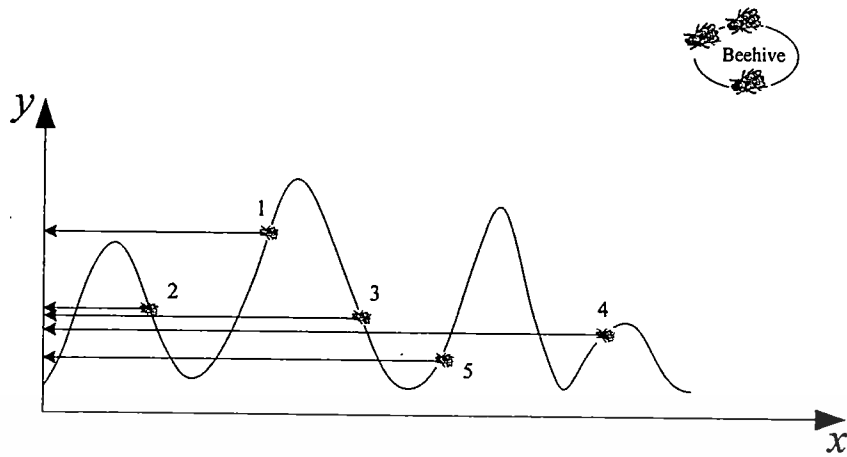
ขั้นตอนที่ 1 ส่งผึ้งสำรวจจำนวน 5 ตัว สุ่มหาคำตอบเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 แล้วทำการกำหนดจำนวนรอบเป็นให้มีค่าเป็นศูนย์ ($NC=0$)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 1 ของวิธีฝูงผึ้ง

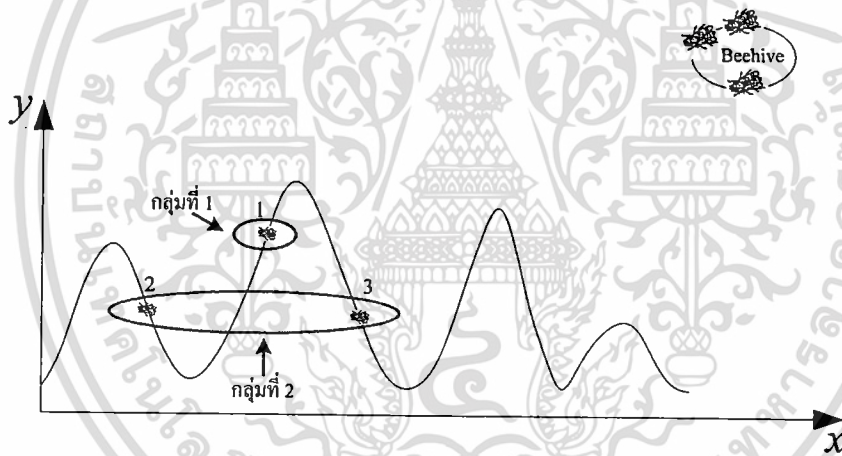
ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาค่าความเหมาะสมจากผึ้งสำรวจแต่ละตัวดังแสดงในรูปที่ 2.9 แล้วทำการเรียงลำดับความเหมาะสมจากมากไปหาน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

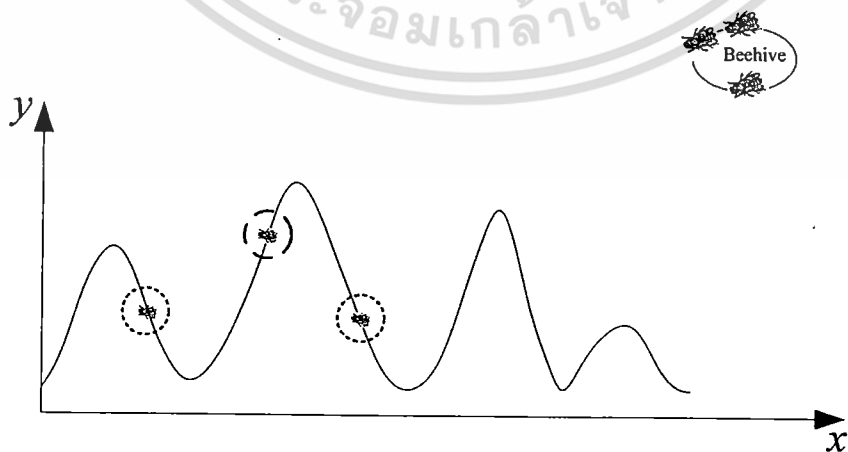


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 2 ของวิธีฝูงผึ้ง

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



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 3 ของวิธีฝูงผึ้ง

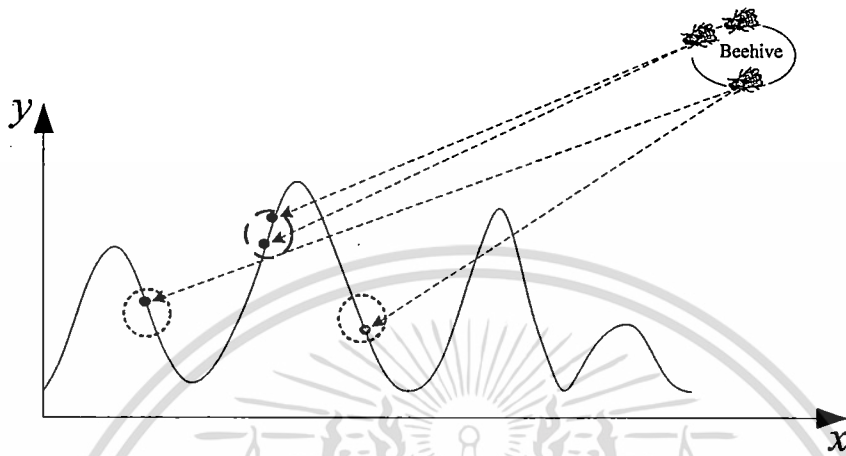


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 4 ของวิธีฝูงผึ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

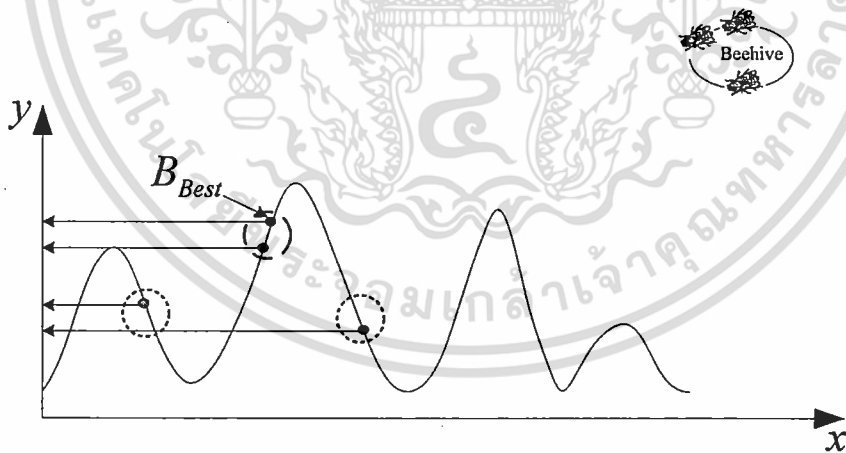
ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขอบเขตการค้นหาบริเวณใกล้เคียงค่าตอบที่เลือกไว้โดยอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ($ngh = 10$) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

ขั้นตอนที่ 5 ส่งผึ้งงานค้นหาคำตอบในบริเวณขอบเขตที่กำหนดไว้ 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 ($NC = NC + 1$)

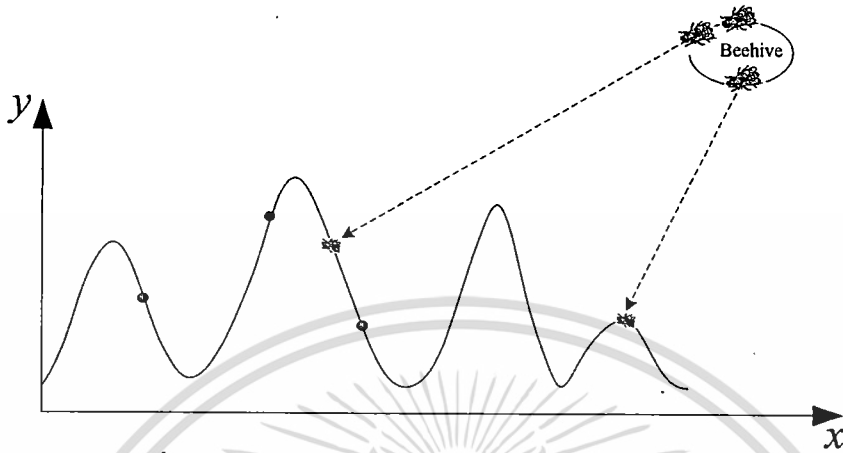


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการหาค่าตอบขั้นตอนที่ 6 ของวิธีฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงานว่าเป็นจริงหรือไม่ โดยในตัวอย่างนี้ทำการกำหนดไว้ 20 รอบ แต่รอบปัจจุบันคือ รอบแรก ดังนั้นให้ทำตามขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 8 ส่งผึ้งงานจำนวน 2 ตัว ($n-m = 5-3 = 2$) สุ่มหาคำตอบใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้นจะได้จำนวนคำตอบเท่ากับจำนวนผึ้งสำรวจในรอบแรก แล้วกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 2 จนกว่าเงื่อนไขการทำงานจะเป็นจริง และจะได้คำตอบที่ดีที่สุด คือ B_{Best} ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการหาคำตอบขั้นตอนที่ 8 ของวิธีฝูงผึ้ง



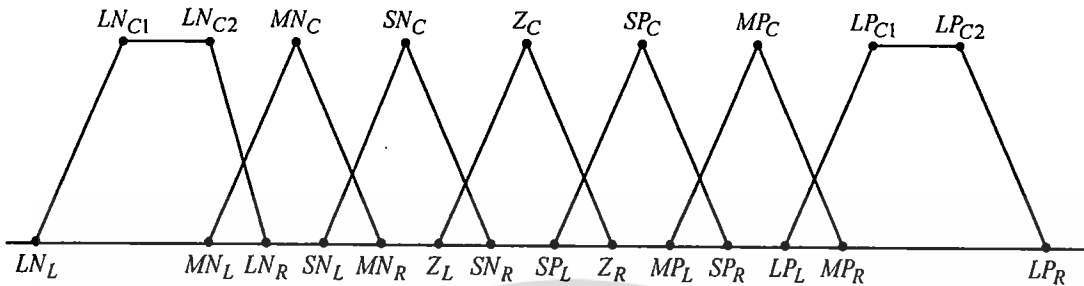
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการหาคำตอบเมื่อสิ้นสุดการค้นหาวงศ์ของวิธีฝูงผึ้ง

2.4 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดี ด้วยวิธีฝูงผึ้ง

ในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดี ขั้นตอนที่สำคัญที่สุด คือ จะทำอย่างไรในการที่จะออกแบบทั้งในส่วนของการออกแบบ แพลตฟอร์มสัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมให้มีความเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วการออกแบบ แพลตฟอร์มสัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม จะได้มาจากการลองผิดลองถูก หรืออาศัยผู้ชำนาญการ ทำให้ประสิทธิภาพของตัวควบคุมนั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง ที่เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของผึ้งในธรรมชาติ ดังที่กล่าวมานั้น เข้ามาช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.16 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่โลจิก

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)

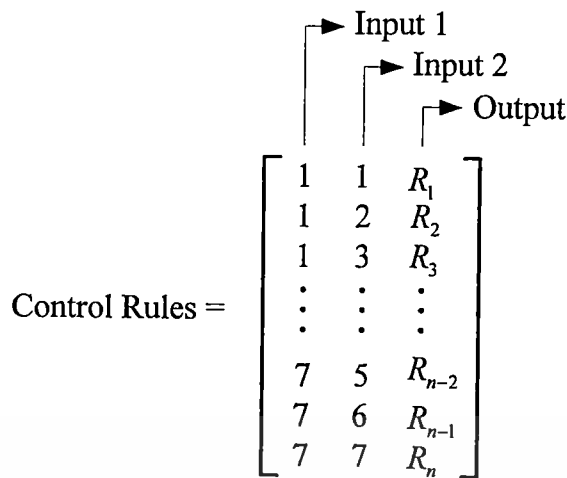
ตำแหน่งศูนย์กลาง 2 Center 2 (C_2)

ตำแหน่งทางด้านฐานขวา Right base (R)

ดังนั้นจำนวนตัวแปรที่ปรับค่ามี 23 ตัว คือ $(4+3+3+3+3+3+4 = 23)$ ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกมีอินพุต 2 ตัว และเอาต์พุต 1 ตัว ดังนั้นตัวแปรทั้งหมดที่จะปรับค่ามี 69 ตัว $(3 \times 23 = 69)$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โครงสร้างกฎควบคุมของตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดี

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 ส่วนต่างๆเหล่านี้มีความซับซ้อน และยากต่อการออกแบบโดยทั่วไปแล้วอัตราขยายของแฟลคเตอร์สัดส่วน ตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก และเงื่อนไขของกฎควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำการออกแบบด้วยการลองผิดลองถูก หรืออาศัยผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบ ทำให้สมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้นั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ จึงได้นำเอาวิธีฝูงผึ้งมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยปรับค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ควบคุมเหล่านั้นพร้อมกันทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

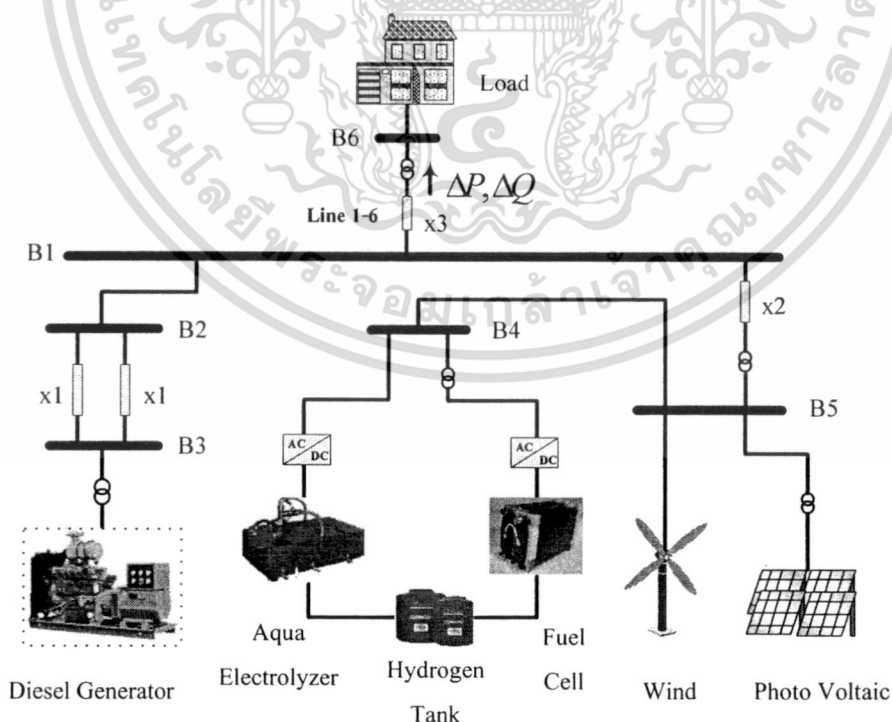
บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีสำหรับอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธี ฝูงผึ้งเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไมโครกริด

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีโดยใช้วิธีฝูงผึ้งในการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมให้มีความเหมาะสม เพื่อควบคุมการทำงานของ อิเล็กโทรไลเซอร์ (Aqua electrolyzer: AE) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไมโครกริด ที่มีส่วนประกอบของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วย เนื่องจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดไม่คงที่ จึงได้มีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้รับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความด้วยตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีมีประสิทธิภาพ และความคงทนต่อการเกิดสิ่งรบกวนในระบบ ได้สูงกว่าตัววิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน

3.1 แบบจำลองของระบบ

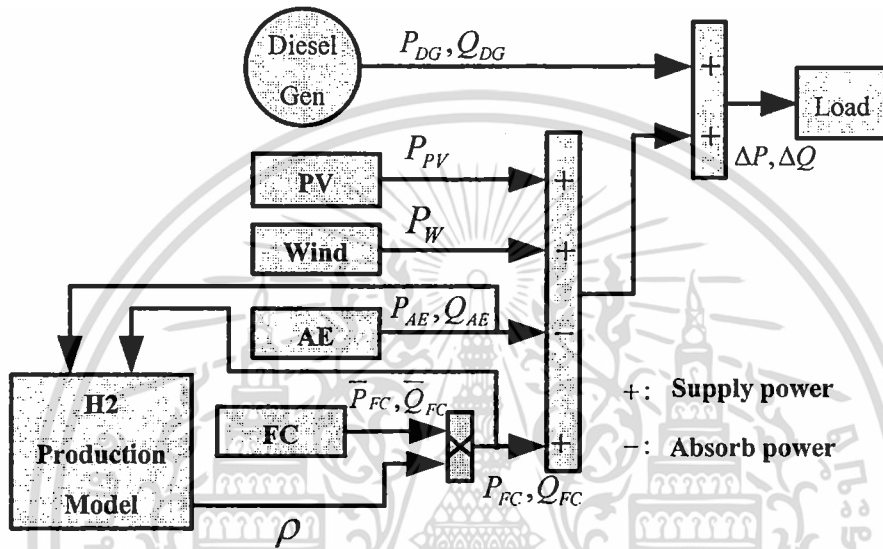
3.1.1 แบบจำลองระบบไมโครกริด



รูปที่ 3.1 ระบบไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 [21] ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (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 เชื่อมต่อกันเพื่อร่วมกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด ขนาด $10 + j2$ MVA และระบบการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen production) คือ AE ขนาด 3 MW โดยสามารถแสดงเป็นแบบจำลองของระบบได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 แบบจำลองของระบบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.1.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลแทนด้วยสมการแบบจำลองอันดับที่สาม ที่ประกอบไปด้วย $[\dot{E}'_q, \dot{\omega}, \dot{\delta}]$ โดยสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้
สมการสวิง (Swing equation)

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (3.1)$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D(\omega - \omega_s)) / M \quad (3.2)$$

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

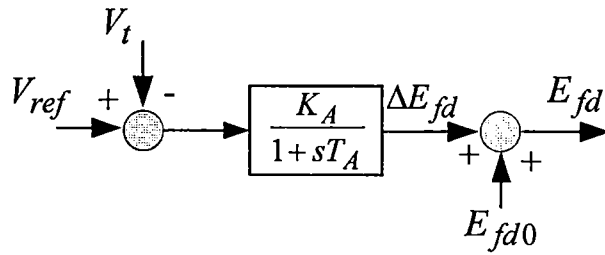
$$\dot{E}'_q = (E_{fd} - E'_q + I_d(X_d - X'_d)) / T'_{do} \quad (3.3)$$

โดยที่

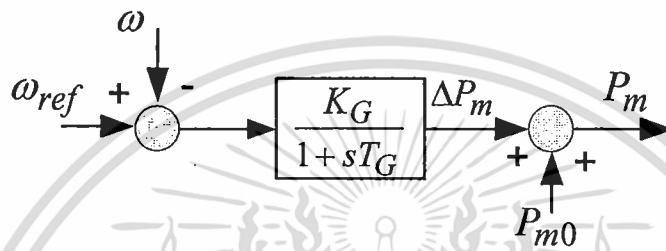
δ	คือ มุมโรเตอร์ (Rotor angle)
ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity)
ω_s	คือ ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)
P_m	คือ กำลังทางกล (Mechanical power)
P_e	คือ กำลังทางไฟฟ้า (Electrical power)
D	คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping coefficient)
M	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
E'_q	คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั่วคราวในแนวแกนขวาง
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'_{do}	คือ ค่าคงตัวเวลาชั่วคราว (Transient time constant) ในแนวแกนตรง

โดยเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องจะประกอบไปด้วยแบบจำลองอย่างง่ายของตัวกระตุ้น (Exciter) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และแบบจำลองอย่างง่ายของตัวบังคับ (Governor) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบตัวกระตุ้น



รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบตัวบังคับ

เครื่องกำเนิดดีเซลมีพิกัด 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})	=	1.01s
ค่าสัมประสิทธิ์ของความเฉื่อย (H)	=	0.8s
ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D)	=	1

พารามิเตอร์ของสายส่งแต่ละสายมีค่าอิมพีแดนซ์ คือ

รีแอกแตนซ์ของสาย ($x1$)	=	0.4 pu.
รีแอกแตนซ์ของสาย ($x2$)	=	0.2 pu.
รีแอกแตนซ์ของสาย ($x3$)	=	0.001 pu.

พารามิเตอร์ของตัวกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยายของตัวกระตุ้น} (K_A) &= 10 \\ \text{ค่าคงตัวของตัวกระตุ้น} (T_A) &= 0.1 \text{ s} \end{aligned}$$

พารามิเตอร์ของตัวบังคับ

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยายของตัวบังคับ} (K_G) &= 10 \\ \text{ค่าคงตัวของตัวบังคับ} (T_G) &= 4 \text{ s} \end{aligned}$$

ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากในระบบนี้ไม่ได้พิจารณาการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้แทนการจำลองด้วยสัญญาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่เข้าไปยังระบบ

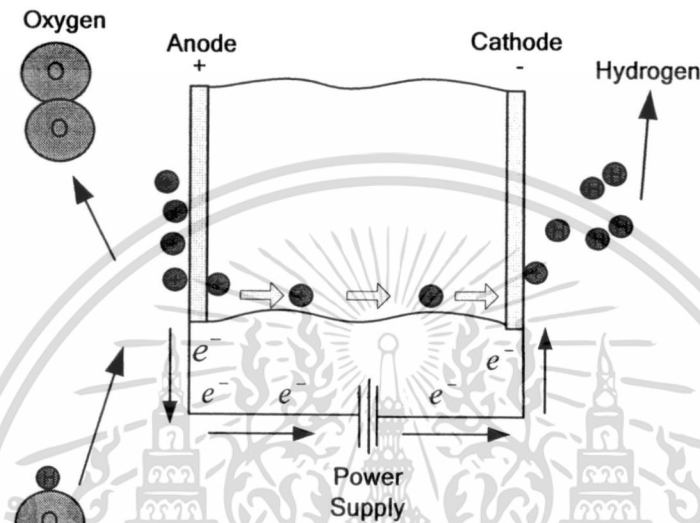
3.1.3 หลักการทำงาน และแบบจำลองของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

ก. อิเล็กโทรไลเซอร์

อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) [23-25] เป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไฮโดรเจน และออกซิเจนที่บริสุทธิ์ โดยสามารถที่จะแจกจ่ายไปยังความต้องการที่แตกต่างกันเช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ของแต่ละบุคคล ระบบพลังงานทดแทน สถานีเติมเชื้อเพลิง และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม อิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane (PEM) electrolyzer) เป็นอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้พื้นที่น้อย หรืออัดแน่นมากที่สุด และง่ายต่อการสร้าง นอกจากนี้ ยังสามารถที่จะผลิตไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง และความมีประสิทธิภาพที่ระดับความหนาแน่นกระแสสูงอีกด้วย 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 3.5 การประยุกต์ในด้านอื่นๆ ของระบบอิเล็กโทรไลต์ คือ สามารถที่จะใช้เป็นเสมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อที่จะผลิตไฟฟ้าจากไฮโดรเจน และออกซิเจนด้วยการแปลงรูปเพียงเล็กน้อย

ส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลเซอร์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง บัมพ์น้ำ เครื่องแยกน้ำ-ก๊าซ ถึงแม้ว่า อิเล็กโทรไลเซอร์จะสามารถผลิตได้ทั้ง H_2 และ O_2 ด้วยการแยกไฟฟ้าเคมีของน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วอิเล็กโทรไลเซอร์จะได้รับการพิจารณาเสมือนเครื่องผลิตไฮโดรเจน และได้จำแนกตามระบบการป้อนที่แอโนด หรือระบบการป้อนที่แคโทด โดยจะขึ้นอยู่กับว่าทางเข้าของน้ำอยู่ที่ไหน เมื่ออิเล็กโทรไลเซอร์ใช้สำหรับเป็นเครื่องผลิตไฮโดรเจน ระบบการป้อนที่แคโทดจึงเป็น

ตัวเลือกที่ดี เนื่องจากตัวแยกซึ่งแยกน้ำ และออกซิเจนได้รับการจัดออกที่แอโนด พร้อมกับออกซิเจน ได้รับการระบายอากาศร่วมกับน้ำ แต่ข้อเสียในกรณีนี้คือจะมีข้อจำกัดในการโอนถ่ายปริมาณมาก และความหนาแน่นของกระแสต่ำ ในการศึกษาครั้งนี้แบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์แบบการป้อนที่แอโนดได้ ประยุกต์ใช้ในการศึกษา เนื่องจากส่วนใหญ่อิเล็กโทรไลเซอร์ในด้านธุรกิจ และในหน่วยทางการทหาร เป็นอิเล็กโทรไลเซอร์แบบการป้อนที่แอโนด



รูปที่ 3.5 ลักษณะการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์

การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรไลเซอร์ประกอบไปด้วย การใช้ผลิต O_2 สำหรับเครื่องช่วยหายใจของคนป่วย การใช้ผลิต H_2 เพื่อเป็นเชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ผลิต H_2 เพื่อเป็นระบบพลังงานสำรอง การผลิต H_2 สำหรับควบคุมการกักตร้อนของสารเคมี ตัวตรวจจับโครมาโทกราฟี (Chromatograph) ของแก๊ส การขึ้นรูปเหล็ก และการเชื่อม อิเล็กโทรไลเซอร์ที่ศึกษาในปัจจุบัน งานวิจัยหลายๆ งานวิจัยจะมาจากภาคอุตสาหกรรม ที่ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ และระบบพลังงานทดแทน อย่างเช่น Onda [26] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ เพื่อที่จะวิเคราะห์ห้ออิเล็กโทรไลเซอร์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน Ullberg [27] ได้แสดงแบบจำลองสำหรับอิเล็กโทรไลเซอร์แอลคาไลน์บนพื้นฐานของทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และการโอนถ่ายความร้อน (Heat transfer) เมื่อไม่นานมานี้ ระบบพลังงานทดแทน โดย Kelouwani et al. [28] ได้พิสูจน์ระบบพลังงานทดแทนที่ทำงานตามลำพังร่วมกับการสะสมของไฮโดรเจน และ Khan et al. [29] ได้นำเสนอแบบจำลองของระบบพลังงานที่มีการทำงานร่วมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เซลล์เชื้อเพลิง

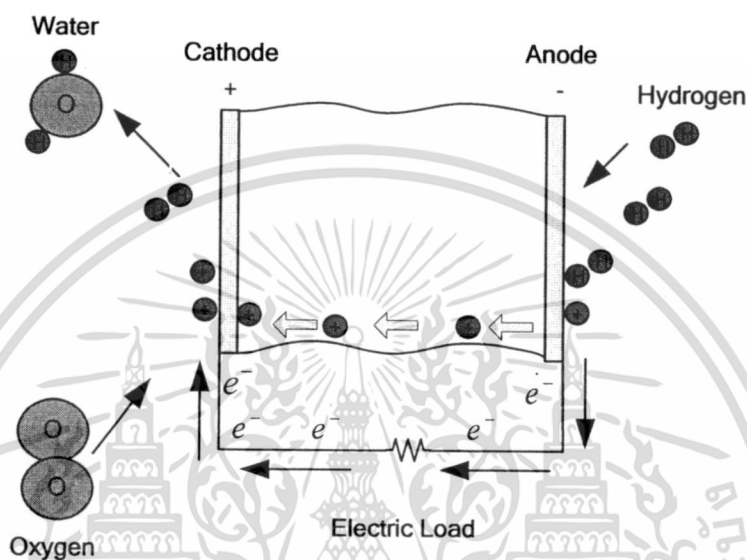
เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) [30-36] เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่งคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบตลอดเวลา นั่นคือการเติมไฮโดรเจน และออกซิเจนตลอดเวลาซึ่งช่วยจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป นอกจากนี้ที่ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเข้าทำปฏิกิริยาเมื่ออัดประจุ หรือคายประจุ ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและค่อนข้างเสถียร สารตั้งต้นที่ใช้โดยทั่วไปในเซลล์เชื้อเพลิงได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนที่ด้านแอโนด และก๊าซออกซิเจนที่ด้านแคโทด (เซลล์ไฮโดรเจน) โดยปกติแล้วเมื่อมีสารตั้งต้นไหลเข้าสู่ระบบ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็จะไหลออกจากระบบไปด้วย ดังนั้นการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงดำเนินต่อไปได้เรื่อยๆ หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงได้ค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวิส Christian Friedrich Schönbein ในปี ค.ศ. 1838 และตีพิมพ์ในเดือนมกราคมปีถัดมาใน "Philosophical Magazine" จากบทความชิ้นนี้ เซลล์เชื้อเพลิงได้สร้างขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเวลส์ Sir William Grove โดยต้นแบบได้ตีพิมพ์ในปี 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 ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันที่เกิดจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำ อย่างไรก็ตามยังมีความกังวลอยู่ในขั้นตอนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งใช้พลังงานมาก การผลิตไฮโดรเจนจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่มีไฮโดรเจน เช่น น้ำ หรือ เชื้อเพลิงอื่นๆ นอกจากนี้ยังต้องใช้

เอ็กสตรันเป็นเอ็กสตรันพลังงานและพลังงานเพื่อการผลิตไฟฟ้าในไม่ช้า โดยผู้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิงจะยังคงใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าซึ่งก็ผลิตมาจากแหล่งพลังงานแบบดั้งเดิม ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน หรือแม้แต่พลังงานนิวเคลียร์ ในขณะที่พลังงานทางเลือกอื่น เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ก็อาจสามารถใช้ได้ แต่ราคาก็ยังสูงมากในปัจจุบัน ดังนั้นจึงไม่สามารถกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอิสระจากเชื้อเพลิงแบบทั่วไป จนกว่าจะสามารถหาวิธีการผลิตไฮโดรเจนปริมาณมากด้วยพลังงานทดแทน หรือพลังงานนิวเคลียร์



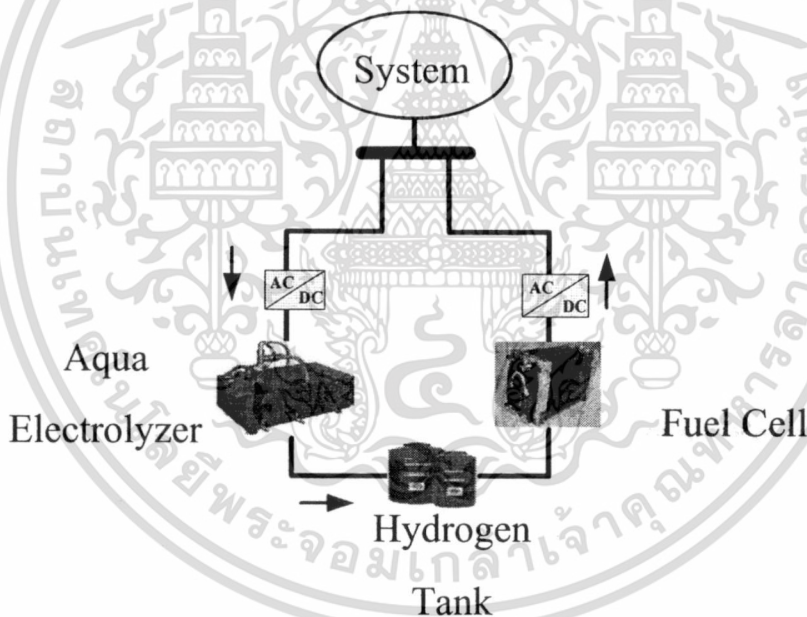
รูปที่ 3.6 ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells) หรือ PEMFC ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พอลิเมอร์ที่ให้โปรตอนผ่านได้จะแยกฝั่งแอโนดและแคโทดออกจากกัน แต่ละด้านจะมีขั้วไฟฟ้าของตัวเอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแผ่นคาร์บอนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ในด้านของแอโนด ไฮโดรเจนจะแพร่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด ทำให้แตกตัวออกเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน โปรตอนจะวิ่งผ่านเยื่อขึ้นไปแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะได้รับการบังคับให้วิ่งเข้าสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก (ให้พลังงานออกมา) เพราะว่าเยื่อนั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคโทด โมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่มาจากแอโนดผ่านวงจรภายนอก และมารวมกับออกซิเจนและโปรตอนที่ด้านนี้กลายเป็นน้ำ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับผลิตไฟฟ้า หรือเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแก่ยานพาหนะ หรือตามสถานที่ต่าง ๆ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีจุดเด่นที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ อีกทั้งยังมีความพิเศษในส่วนของเยื่อพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในการแลกเปลี่ยนโปรตอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ตามปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยที่ขั้วอิเล็กโทรดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัมและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้โพลีเมอร์แข็ง คือ แนฟฟิออน เป็นเยื่อเคลื่อนผ่านประจุ สารตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยน โปรตอน ใช้ ก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน(หรืออากาศ) โดยก๊าซไฮโดรเจนจะแตกตัวบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ด้านแอโนด ให้ผลออกมาคือ โปรตอน และอิเล็กตรอน ตามปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แนฟฟิออนเป็นเยื่อผ่านนี้ อีออนที่มีประจุบวกเท่านั้นจึงจะผ่านได้ ดังนั้น โปรตอนจึงเคลื่อนที่ผ่านไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านโหลด และเป็นที่รู้กันดีว่าไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นก็จะได้แสงสว่างจากไฟฟ้าที่ผลิตได้หากโหลดชนิดนั้นคือหลอดไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดถือว่าครบวงจร จากนั้นอิเล็กตรอน โปรตอน และก๊าซออกซิเจน ตามปฏิกิริยารีดักชันก็จะรวมตัวกันกลายเป็นน้ำ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

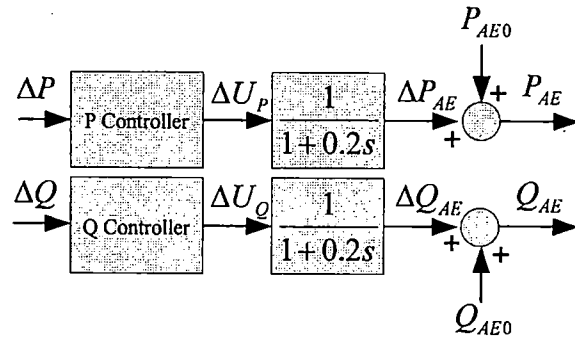
ก. แบบจำลองของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง



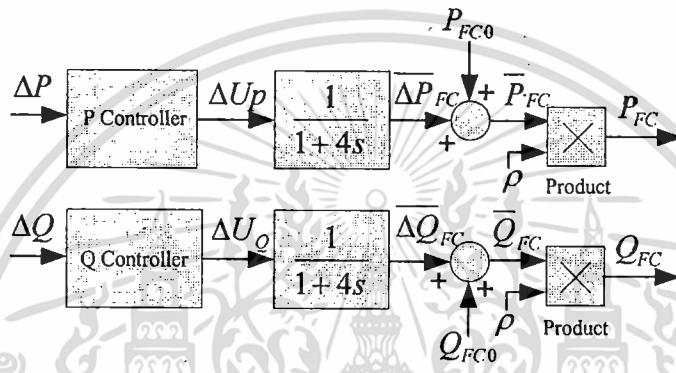
รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ และเซลล์เชื้อเพลิง โดยสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 3.8 ในส่วนของระบบการผลิตไฮโดรเจน AE จะทำการรับกำลังไฟฟ้าจากระบบมาผลิตเป็นไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.029 (l/kWh) แล้วนำเอาไฮโดรเจนที่ได้ไปเก็บสะสมไว้ในถังเก็บขนาด 500 ลิตร เพื่อให้ FC ทำการเปลี่ยนจากไฮโดรเจนเป็นกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าให้กับระบบด้วยอัตรา 0.061 (l/kWh)

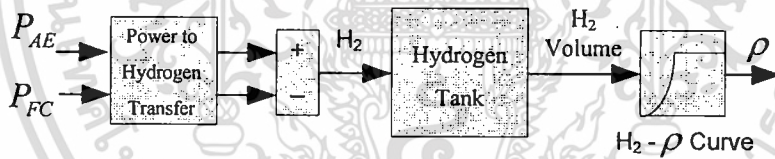
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.แบบจำลองของอิลีกโตรไลเซอร์



ข.แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง



ค.แบบจำลองการผลิต และการนำไปใช้ของไฮโดรเจน

รูปที่ 3.8 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)

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

$\bar{\Delta Q}_{FC}$ คือ การเปลี่ยนแปลงในจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

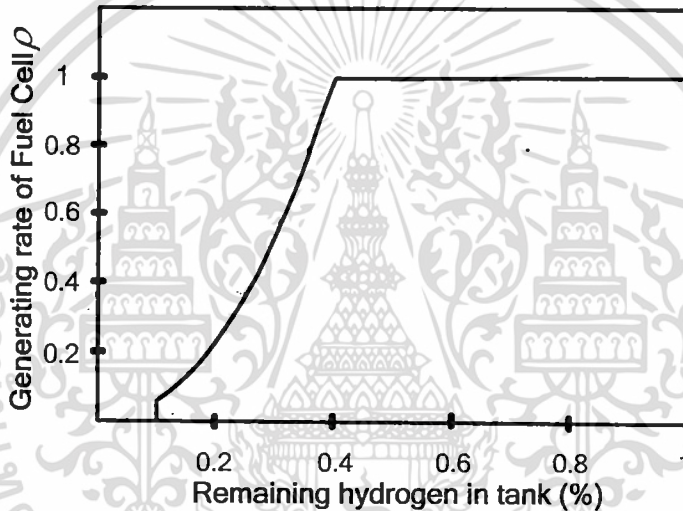
\bar{Q}_{FC0} คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ควรจะได้รับของ FC เริ่มต้น (0 pu.)

การรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE สามารถหาได้จาก

$$P_{AE} = P_{AE0} + \Delta P_{AE} \quad (3.4)$$

$$Q_{AE} = Q_{AE0} + \Delta Q_{AE} \quad (3.5)$$

การทำงานของ FC ในการเริ่มเดินเครื่อง และการหยุดการทำงาน ส่งผลให้เกิดแรงดันตก [37] ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในการจ่ายให้กับระบบของ FC นั้นจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจนในถังดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในถัง และเอาต์พุตของ FC

เมื่อปริมาณไฮโดรเจนในถังมีน้อยกว่า 10 % การผลิตกำลังไฟฟ้าของ FC จะหยุดการทำงาน จนกระทั่งปริมาณไฮโดรเจนจะมีมากกว่า 50 % และอัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าของ FC ในขณะที่ไฮโดรเจนมีปริมาณตั้งแต่ 10-40 % จะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.9 [38] ดังนั้นสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ FC ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{FC} = \rho * \bar{P}_{FC} \quad (3.6)$$

$$Q_{FC} = \rho * \bar{Q}_{FC} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$\bar{P}_{FC} = P_{FC0} + \Delta P_{FC} \quad (3.8)$$

$$\bar{Q}_{FC} = Q_{FC0} + \Delta Q_{FC} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

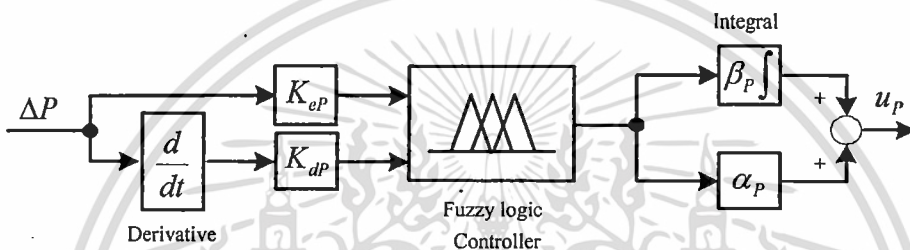
แต่เนื่องจากค่าคงตัวเวลาของ FC นั้นมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่าคงตัวเวลาของ AE ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงไม่คิดการควบคุมของ FC ($\Delta P_{FC} = \Delta Q_{FC} = 0$) จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) สามารถสรุปได้เป็น

$$\bar{P}_{FC} = P_{FC0} \quad (3.10)$$

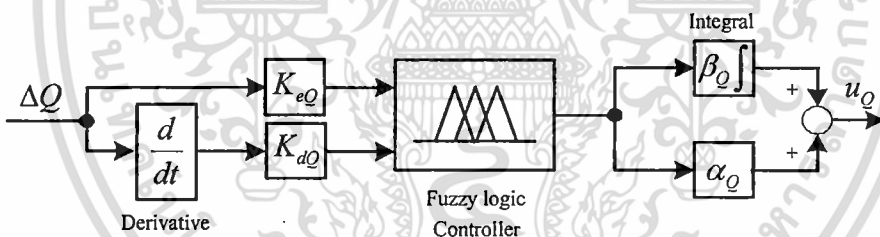
$$\bar{Q}_{FC} = Q_{FC0} \quad (3.11)$$

3.2 การออกแบบตัวควบคุม

จากรูปที่ 3.8 (ก) ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P Controller) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q Controller) ได้ทำการแทนด้วยตัวควบคุมฟัซซี่-พีไอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE



รูปที่ 3.11 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

เมื่อ

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

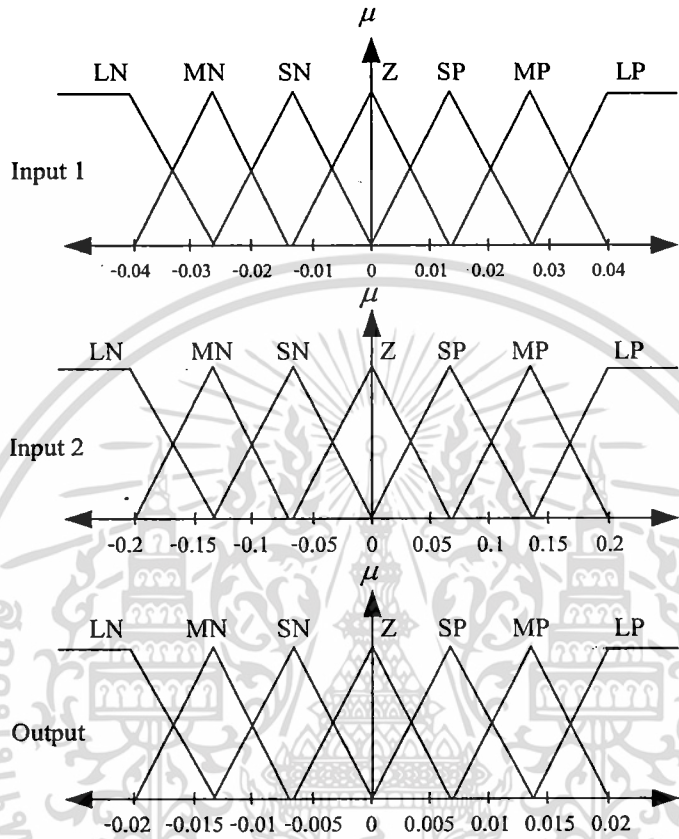
K_{eQ}, K_{dQ}, β_Q และ α_Q คือ แฟคเตอร์สัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

u_P และ u_Q คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่-พีไอดีสำหรับควบคุม กำลังไฟฟ้า

จริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน

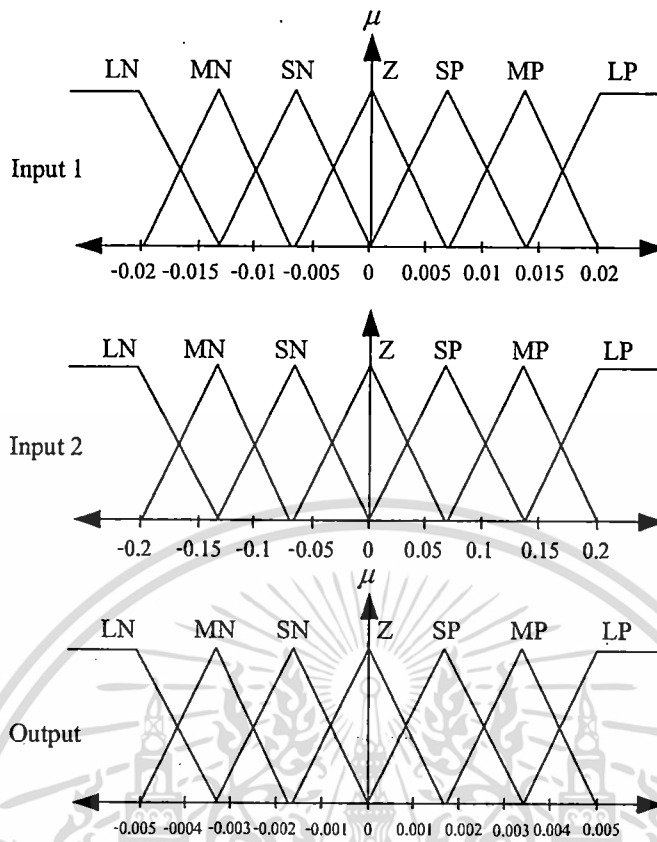
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzy โลกิกที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12-3.13 และกฎควบคุมของตัวควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานะเริ่มต้นจะใช้แบบเดียวกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.12 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ฟังก์ชันสมาชิกเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

ตารางที่ 3.1 กฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

		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

ในการศึกษาครั้งนี้ การออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดีที่นำเสนอ นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟuzzy-โลจิก-พีไอดีแบบทั่วไป และระบบที่ไม่ได้มีการควบคุม โดยมีลักษณะของการออกแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวควบคุมฟuzzy logic-PID ใอดีสำหรับ AE แบบทั่วไป (Conventional fuzzy logic-PID AE controller: Conventional FLPID) โดยตัวควบคุมนี้จะใช้ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.12-3.13 และ ตารางที่ 3.1 ตามลำดับ ส่วนทางด้านแฟลคเตอร์สัดส่วนจะทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฟูฟั้ง

2. ตัวควบคุมฟuzzy logic-PID ใอดีสำหรับ AE แบบเหมาะสม (Optimal fuzzy logic-PID AE controller: Optimal FLPID) ตัวควบคุมนี้ เป็นตัวควบคุมที่งานวิจัยนี้นำเสนอ โดยจะทำการออกแบบทั้งในส่วนของ แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม ให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฟูฟั้งพร้อมกันทั้งหมด

สำหรับการออกแบบให้มีความเหมาะสม การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน ในสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ได้พิจารณาในการนำมาหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยใช้วิธี integral absolute error (IAE) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 3.12

$$\text{Minimize } IAE = \int_0^{\infty} (|\Delta P(t)| + |\Delta Q(t)|) dt \quad (3.12)$$

เมื่อ

ΔP คือ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย1-6

ΔQ คือ การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย1-6

โดยพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบกำหนดค่าไว้ดังนี้

แฟลคเตอร์สัดส่วนทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -10 ถึง 10

ฟังก์ชันสมาชิกทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง -50% ถึง +50% จากตำแหน่งเดิม

กฎควบคุมทุกตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7 (LN-LP)

ส่วนพารามิเตอร์ของขบวนการวิธีฟูฟั้งกำหนดดังนี้

จำนวนฟั้งสำรวจ แทนด้วย $(n) = 100$ ตัว

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมา แทนด้วย $(m) = 10$ ค่า

จำนวนของคำตอบที่ดีที่สุดที่เลือกมาจาก m $(e) = 4$ ค่า

จำนวนฟั้งงานที่จะส่งออกไปเก็บคำตอบของ e $(ne) = 10$ ตัว

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

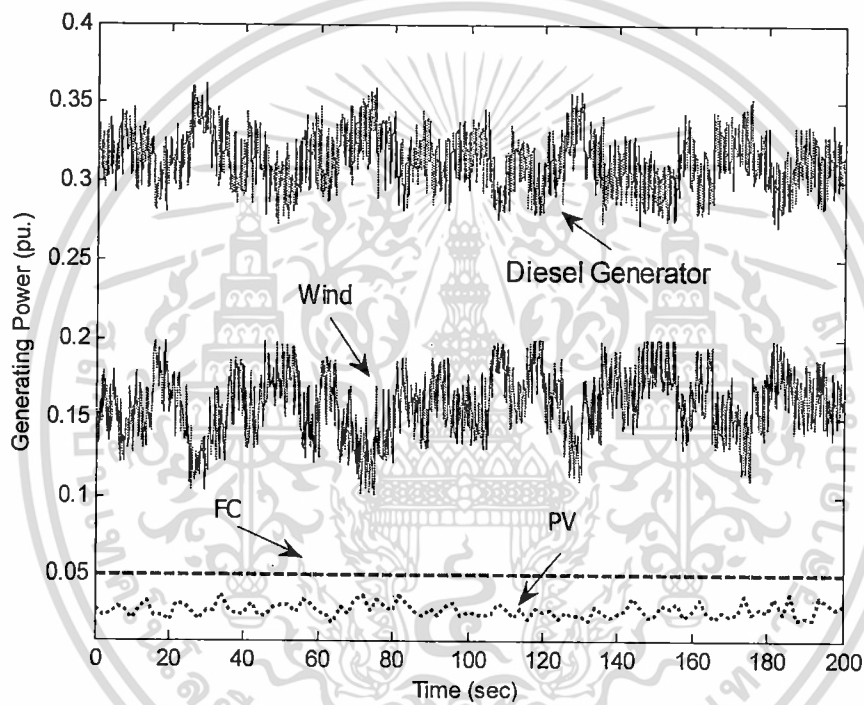
ขนาดขอบเขตของบริเวณใกล้เคียงคำตอบ (Neighborhood) ของ m $(ngh) = 30\%$

จำนวนรอบของการค้นหา $(NC) = 100$ รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ผลการจำลอง และผลการออกแบบ

เพื่อที่จะทดสอบถึงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบ การจำลองสถานการณ์การเกิดสิ่งรบกวนในสถานะต่างๆ ได้สมมติขึ้น เริ่มจากกรณีที่ 1 สมมติให้มีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องจ่ายเข้าไปยังโหลดที่มีค่าคงที่ $10 + j2 \text{ MVA}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในกรณีนี้ ได้ใช้เป็นกรณีในการออกแบบทั้งตัวควบคุม Conventional FLPID และ Optimal FLPID ด้วยการจำลองในโปรแกรม Dymola ร่วมกับ ObjecStab และโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ในการออกแบบปรับค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม Conventional FLPID (แฟลคเตอร์สัดส่วน) และ Optimal FLPID (แฟลคเตอร์สัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุม) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และตาราง 3.3



รูปที่ 3.14 กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในระบบไมโครกริด

ตารางที่ 3.2 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

ตัวควบคุม	K_{eP}	K_{dP}	β_p	α_p	MF	CR
Conv.FLPID	0.749	0.297	-1.051	0.242	รูปที่ 3.12	ตารางที่ 3.1
Optimal FLPID	0.743	0.714	-0.880	0.0582	รูปที่ 3.15	ตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

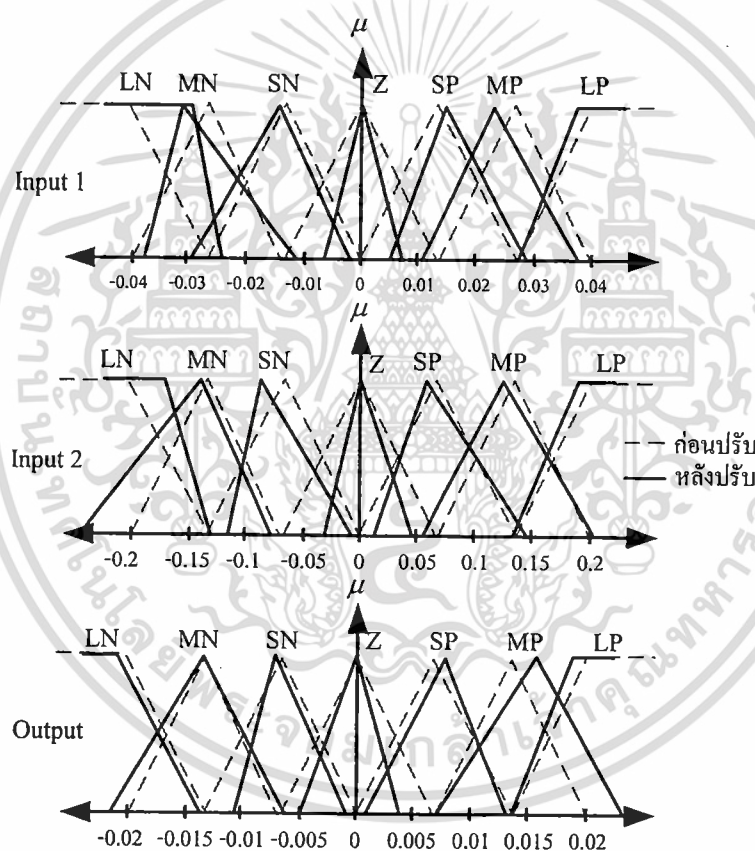
ตารางที่ 3.3 ผลการปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

ตัวควบคุม	K_{eQ}	K_{dQ}	β_Q	α_Q	MF	CR
Conv. FLPID	0.557	0.5855	1.027	-0.204	รูปที่ 3.13	ตารางที่ 3.1
Optimal FLPID	0.729	1.092	0.546	-0.199	รูปที่ 3.16	ตารางที่ 3.5

โดย

MF คือ ฟังก์ชันสมาชิก

CR คือ กฎควบคุม

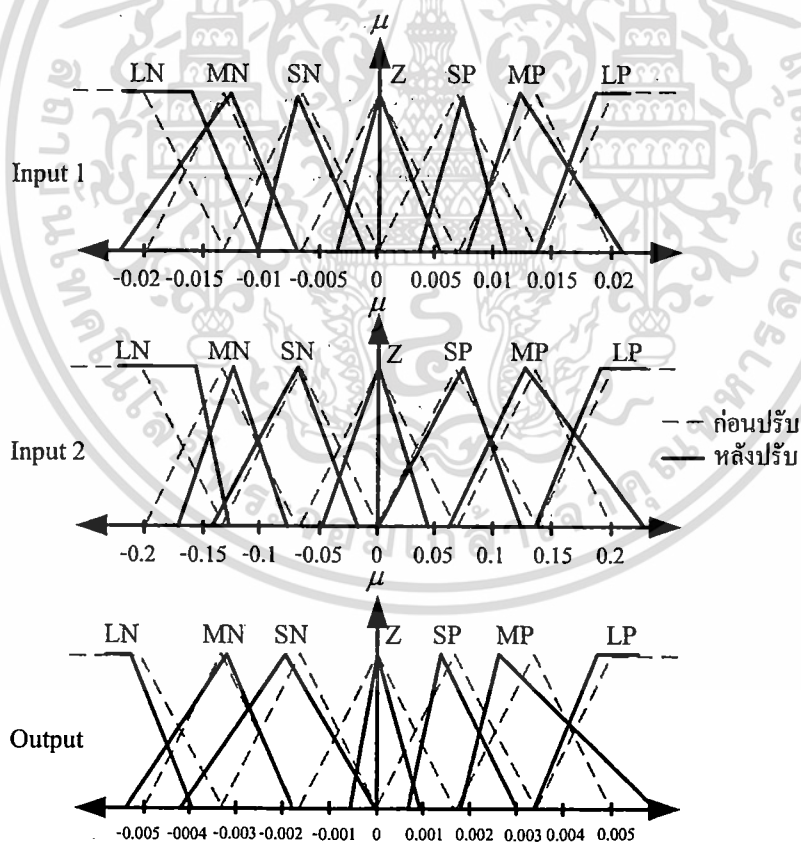


รูปที่ 3.15 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 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



รูปที่ 3.16 ผลการปรับฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE เทียบกับค่าเริ่มต้น

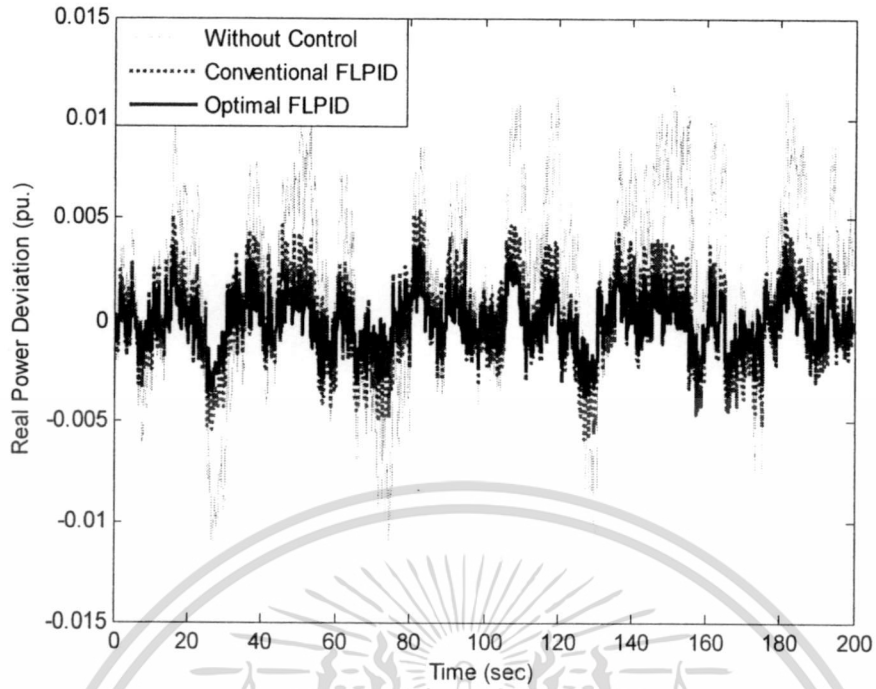
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ผลการปรับกฎควบคุมสำหรับตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

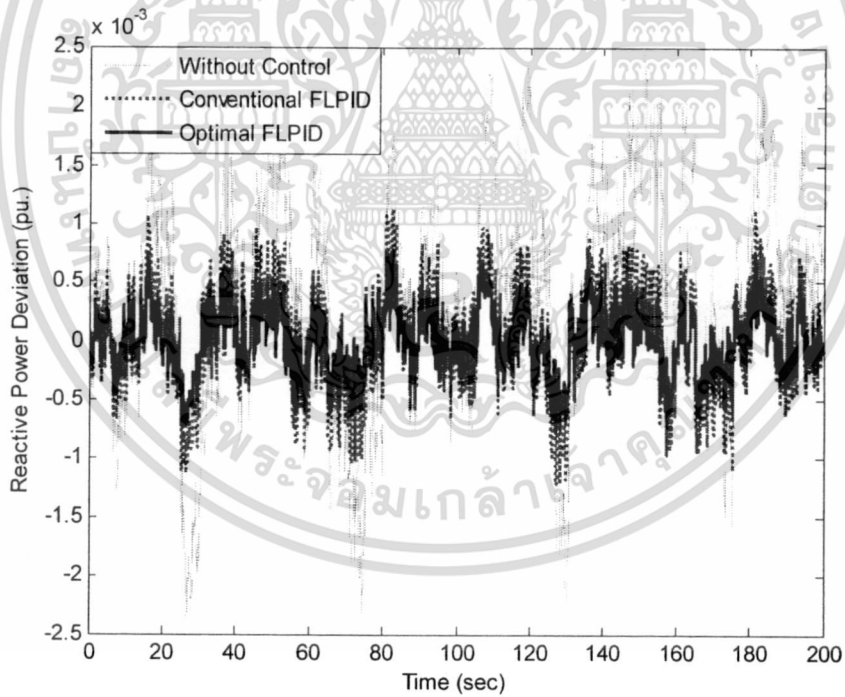
	<i>Input2</i>						
	LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
<i>Input1</i> LN	LP	LP	MP	MP	MP	SP	Z
MN	LP	MP	MP	SP	Z	SN	MN
SN	MP	SP	SP	Z	Z	SN	MN
Z	MP	MP	SP	Z	MN	MN	MN
SP	MP	SP	Z	SN	SN	MN	MN
MP	SP	SP	SP	SN	SN	MN	MN
LP	SP	SN	MN	MN	LN	LN	MN

รูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงผลการปรับตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกแต่ละตัวซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม และแต่ละฟังก์ชันสมาชิกนั้นจะมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการประมวลผลในการควบคุมระบบ ทางด้านผลการปรับกฎควบคุมดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขของกฎนั้นได้เปลี่ยนไปบางตำแหน่ง เพื่อให้เปลี่ยนไปตามความต้องการของระบบ เช่น *Input 1* คือ LN และ *Input 2* คือ MN จะเห็นได้ว่า ในด้านของกฎตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ AE นั้นจะเปลี่ยนเป็น MP เนื่องจากว่าหากมีการชดเชยที่มากกว่านี้อาจจะทำให้เกินความต้องการของระบบ หรือถ้าหากชดเชยน้อยกว่านี้ ก็อาจจะทำให้ไม่เพียงพอต่อการปรับปรุงเสถียรภาพ โดยในส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีผลแตกต่างกัน เนื่องจากการทำงานของตัวควบคุมทั้ง 2 ทำงานแยกอิสระกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

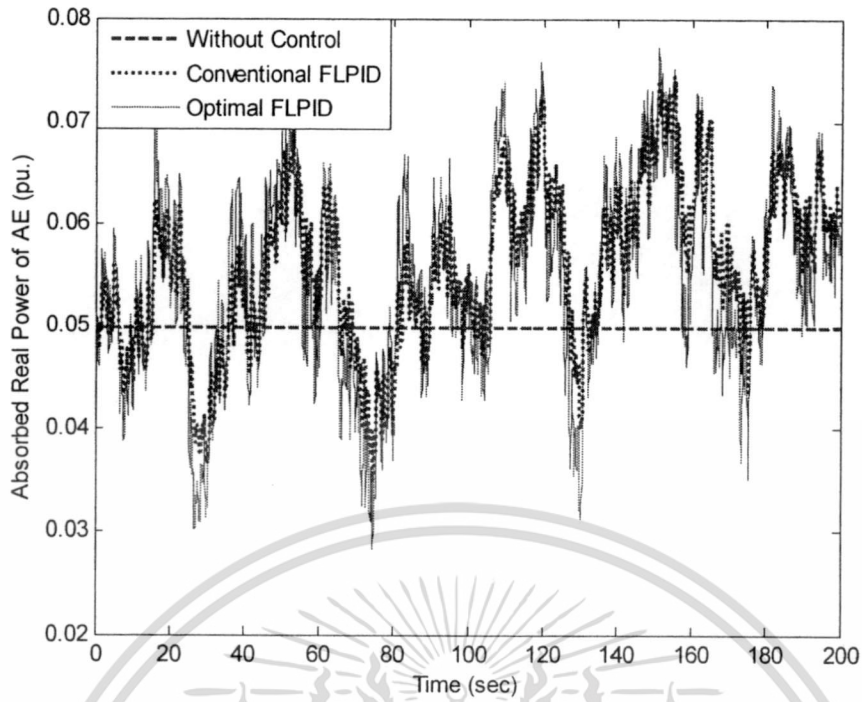


รูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1

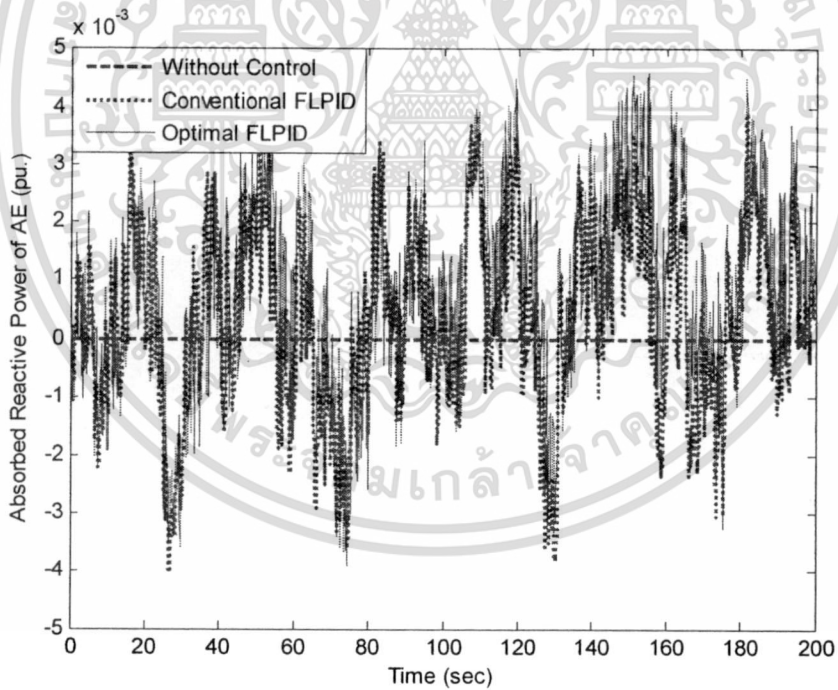


รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 1

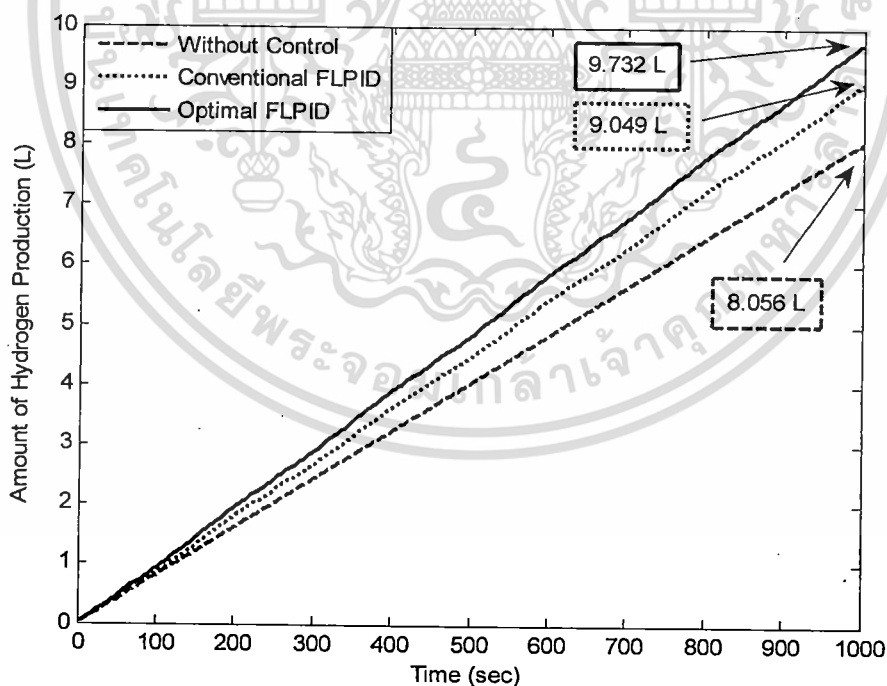


รูปที่ 3.20 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

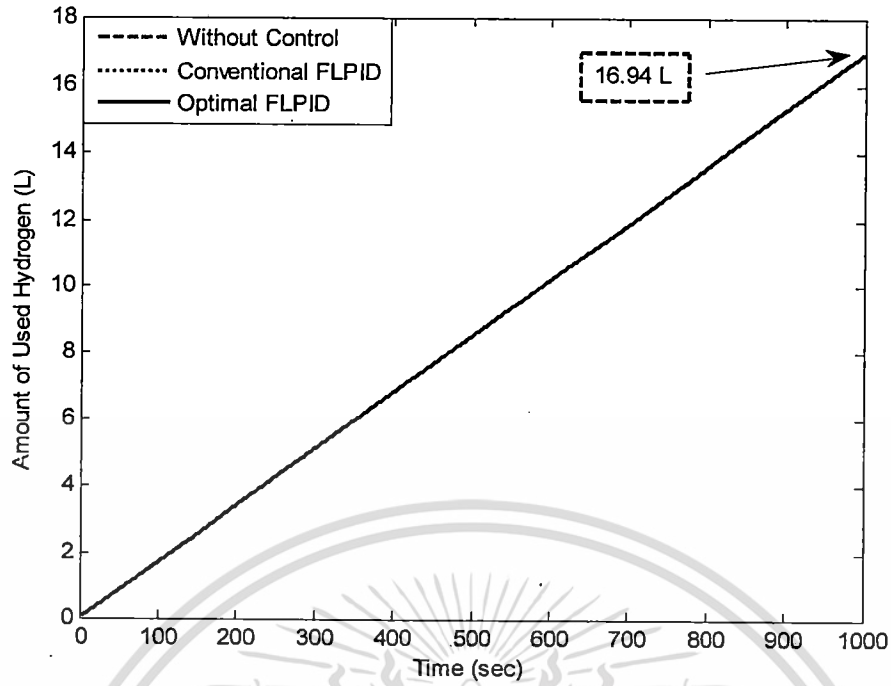
การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 1 สมมติว่าในระบบมีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 จ่ายเข้าไปยังระบบ ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในสาย 1-6 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.17 และ 3.18 ได้แสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของ AE เมื่อระบบมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเนื่องมาจากผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่คงที่ ภายใต้ตัวควบคุมฟิชชีโลจิก-พีไอดีที่ออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้งคิงที่นำเสนอ (Optimal FLPID) สามารถที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนให้น้อยลงกว่าวิธีออกแบบโดยทั่วไป (Conventional FLPID) และระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (ให้ AE รับไฟฟ้าคงที่) ส่วนพฤติกรรมทางพลวัตในการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 และ 3.20 จะเห็นได้ว่า AE ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุม Optimal FLPID AE สามารถที่จะรับ และจ่ายได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

นอกจากนั้น รูปที่ 3.21 ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณการผลิตไฮโดรเจนของวิธีที่นำมาเสนอนั้นสามารถที่จะผลิตได้มากกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ รูปที่ 3.22 แสดงปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปผลิตเป็นกำลังไฟฟ้า แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่คิดผลการควบคุมของ FC ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้าแต่ละวิธีที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเมื่อวิธีที่นำเสนอสามารถที่จะผลิตได้มากกว่า แต่ใช้เท่ากับกับวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือภายในถังนั้นมีมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 3.23

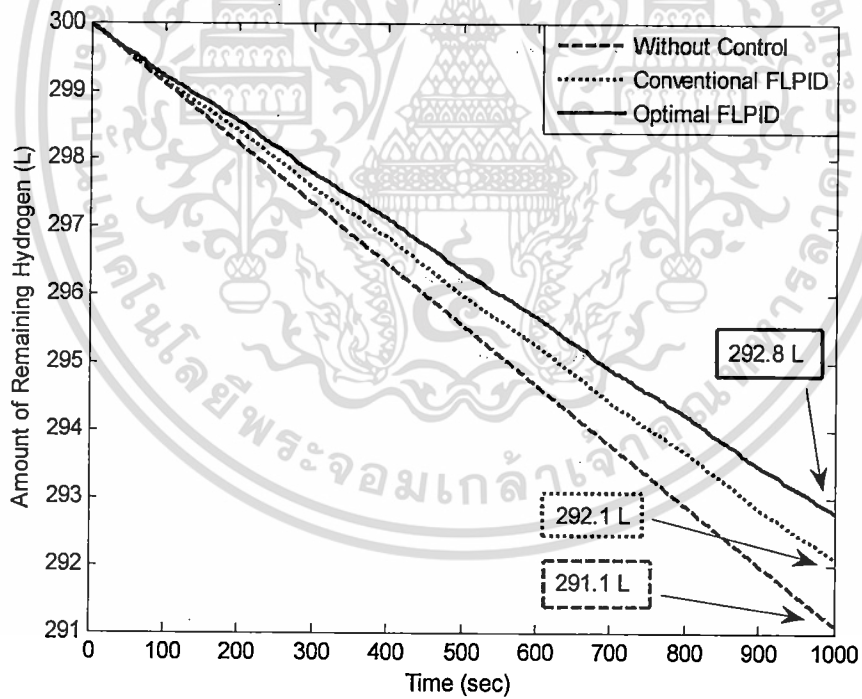


รูปที่ 3.21 ปริมาณไฮโดรเจนที่ AE ผลิตได้ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



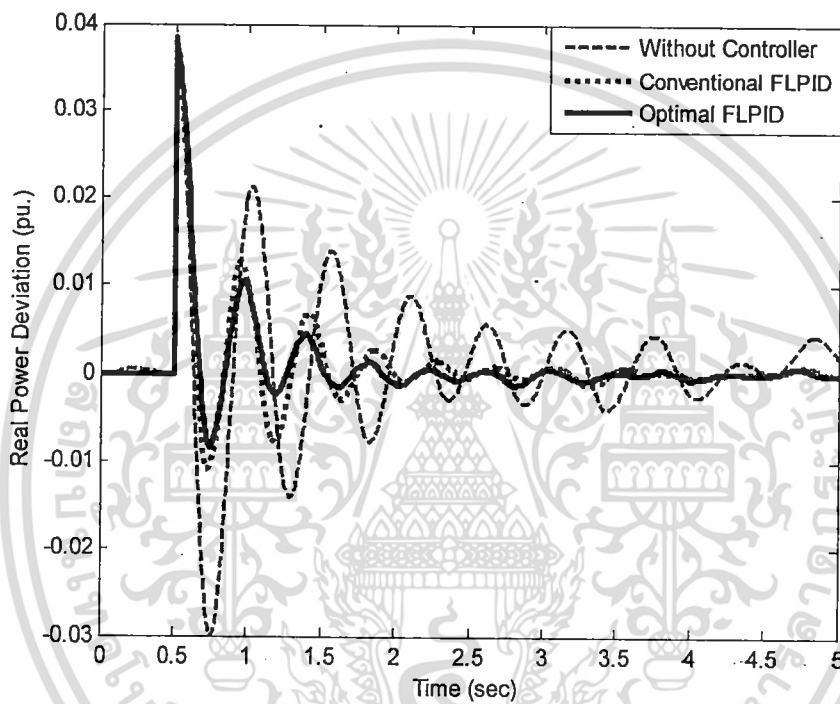
รูปที่ 3.22 ปริมาณไฮโดรเจนที่ FC นำไปใช้ในกรณีที่ 1



รูปที่ 3.23 ปริมาณไฮโดรเจนที่เหลือในถังในกรณีที่ 1

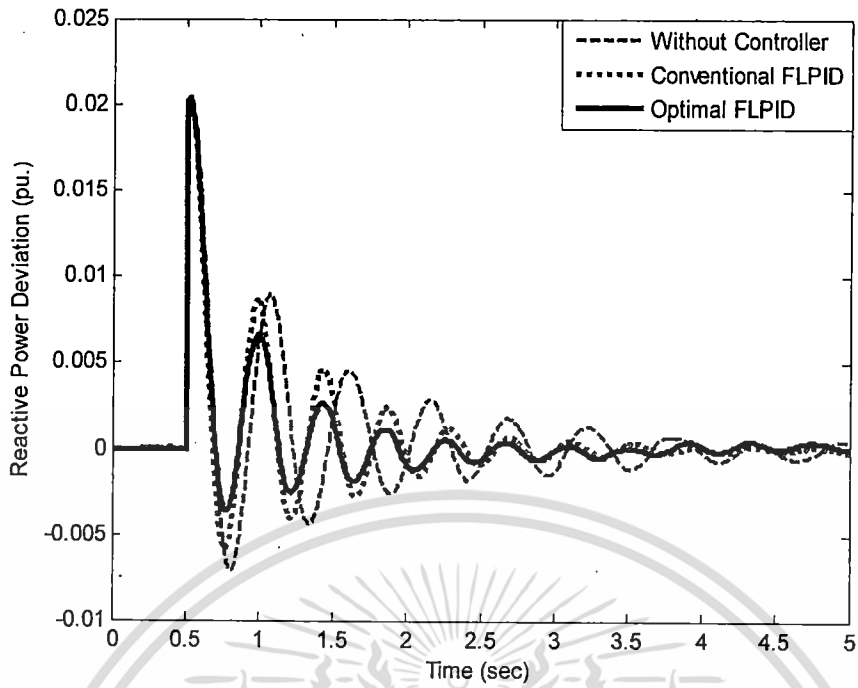
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ 2 สมมติว่าจากในกรณีแรกนั้น เกิดความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจาก 0.5 เป็น 0.6 pu. เมื่อพิจารณาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และ 3.25 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนภายใต้การควบคุมของ AE ที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี-โลจิก-พีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีฝูงผึ้งดังที่นำเสนอ นั้น มีการแกว่งที่น้อยกว่า และสามารถที่จะกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าตัวควบคุม พีชซี-โลจิก-พีไอดีที่ออกแบบโดยทั่วไป และระบบที่ไม่มีตัวควบคุม โดยผลการรับกำลังไฟฟ้าไปผลิตไฮโดรเจนของ AE นั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.26 และ 3.27

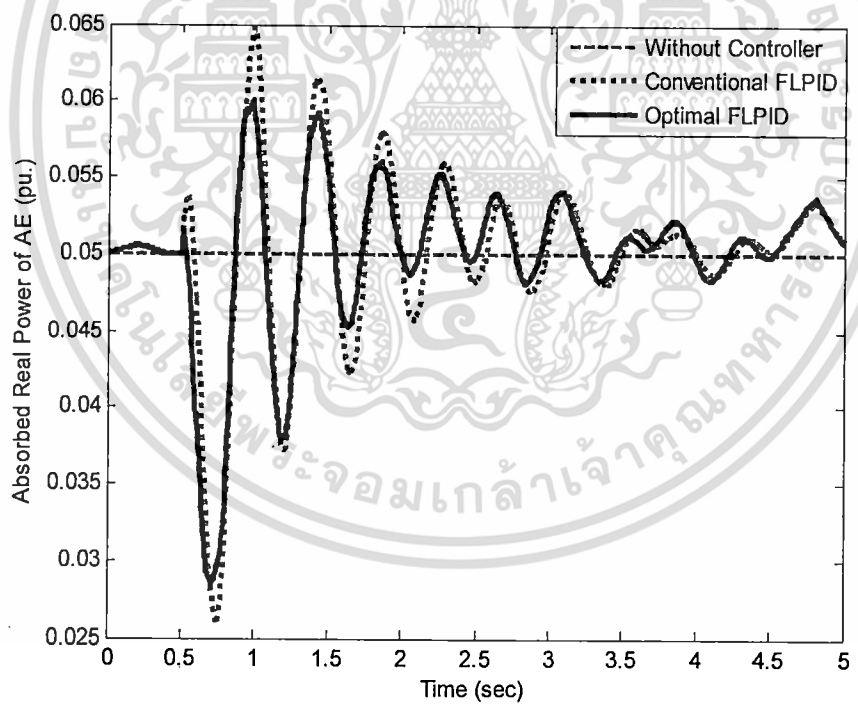


รูปที่ 3.24 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

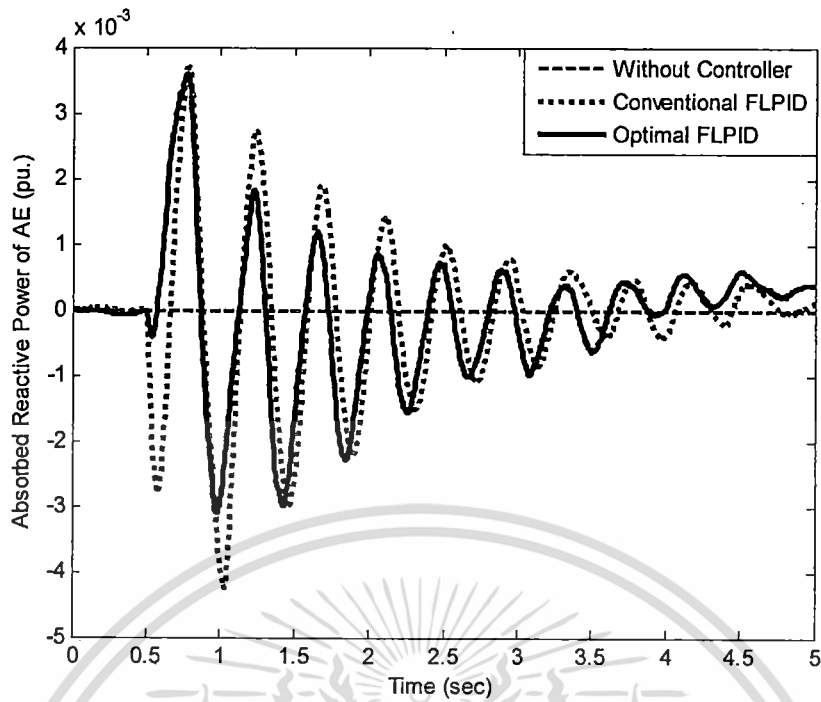


รูปที่ 3.25 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 2



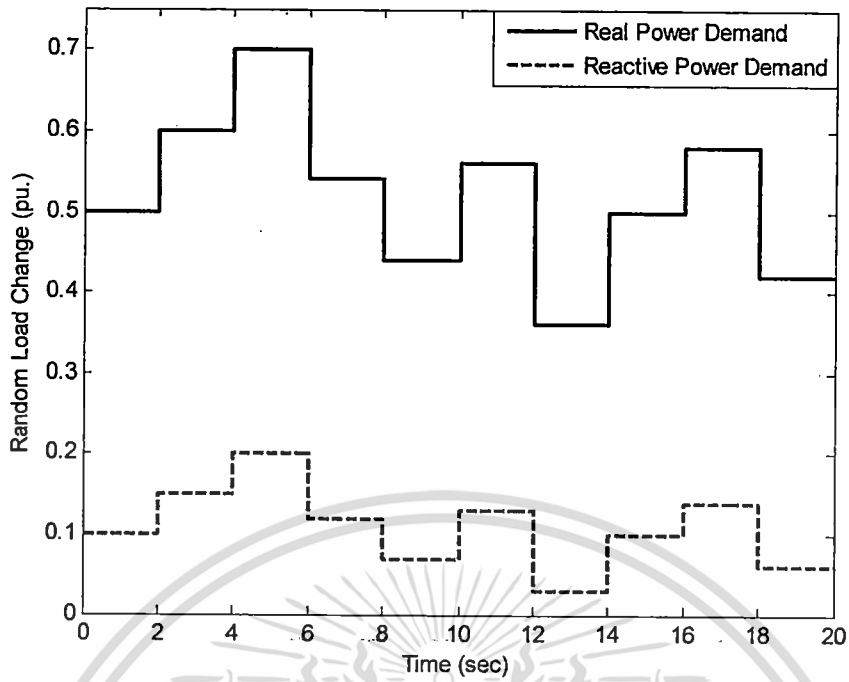
รูปที่ 3.26 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

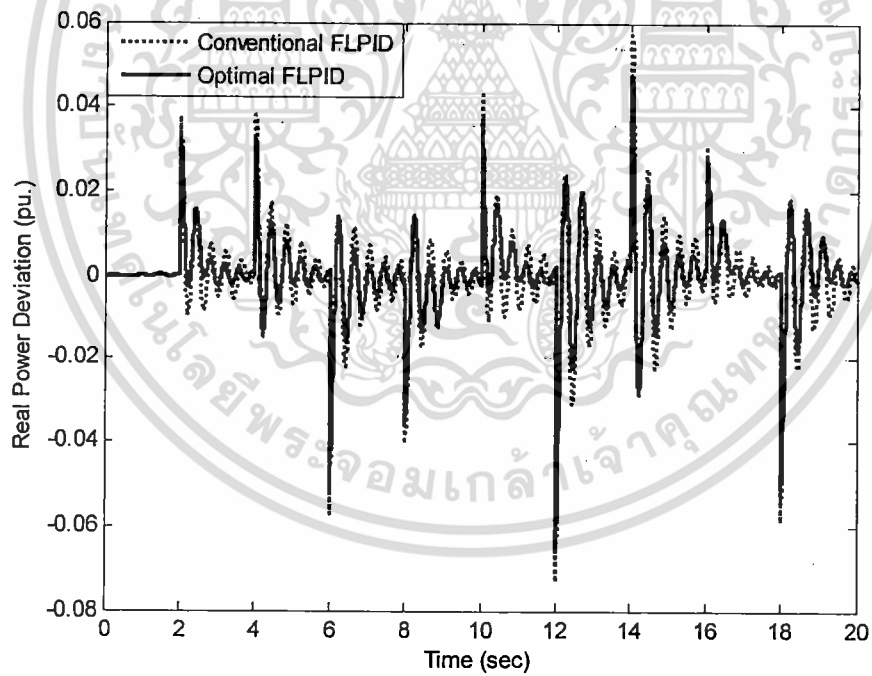


รูปที่ 3.27 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE

ในกรณีที่ 3 สมมติว่าในกรณีที่ 1 ระบบมีความต้องการของโหลดทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามรูปที่ 3.28 ผลตอบสนองของการแกว่งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของสาย 1-6 ดังแสดงในรูปที่ 3.29 และ 3.30 ได้แสดงให้เห็นว่า การทำงานของ AE ภายใต้การควบคุมของฟuzzy โดจิก-ฟิโอดีที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นสามารถที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบ และพฤติกรรมในการรับกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.31 และ 3.32

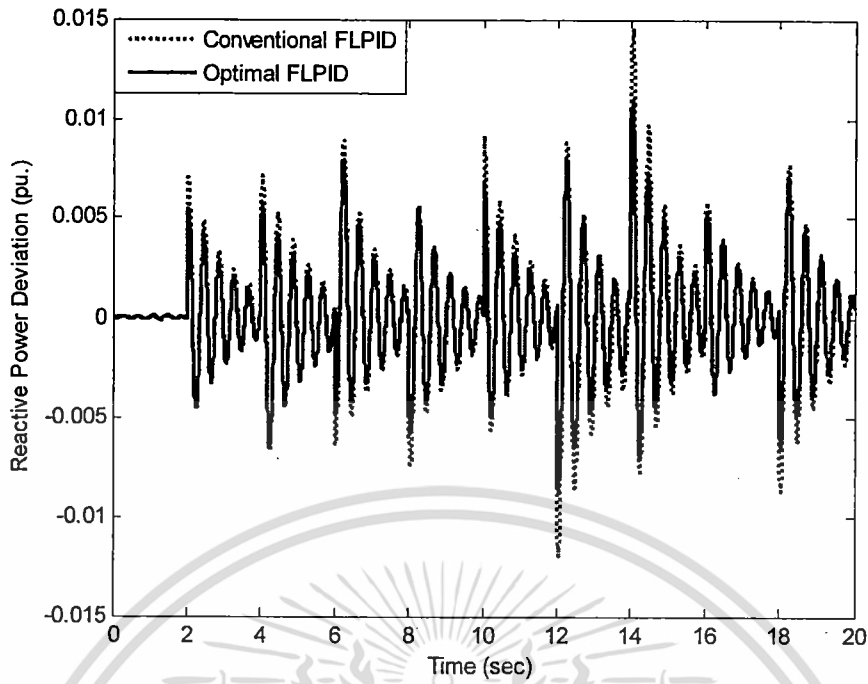


รูปที่ 3.28 ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของโหลด

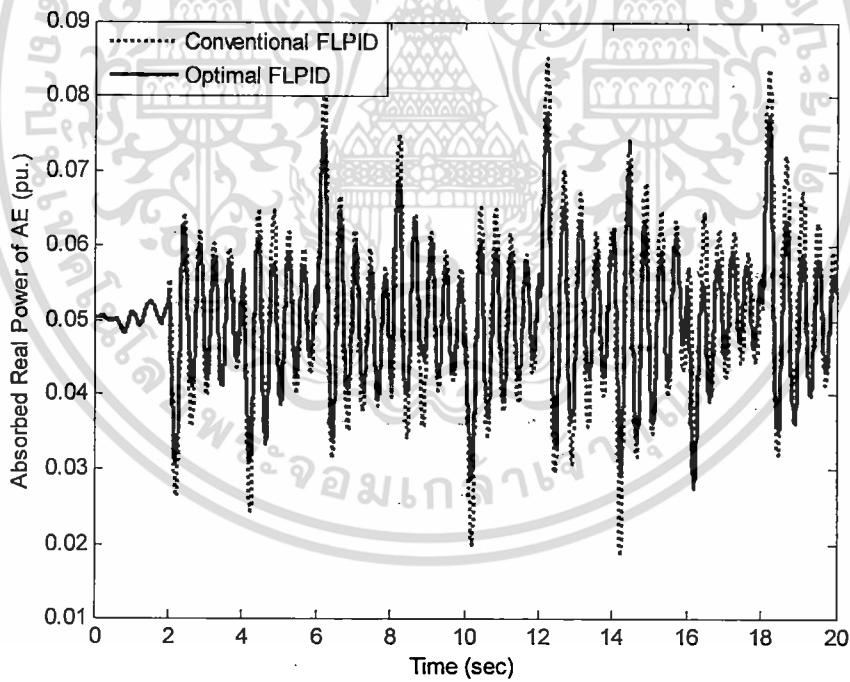


รูปที่ 3.29 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในสาย i-6 ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

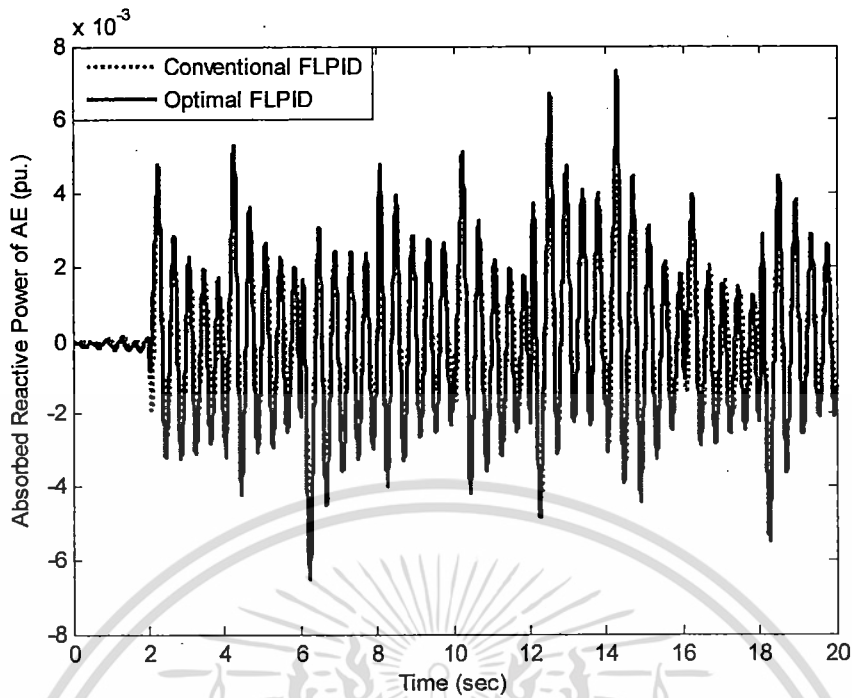


รูปที่ 3.30 การแกว่งของกำลังไฟฟ้าเสมือนในสาย 1-6 ในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.31 การรับกำลังไฟฟ้าจริงของ AE ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของ AE ในกรณีที่ 3

3.4 สรุป

ในบทนี้แนะนำการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชีโลจิก-พีไอดีเพื่อควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ AE มาผลิตเป็นไฮโดรเจนสำหรับ FC เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่มีผลจากการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริด ในส่วนของแพลตฟอร์มสัดส่วน ฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมของพีชชีโลจิก-พีไอดีนั้น สามารถออกแบบได้โดยไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือการลองผิดลองถูก ด้วยการใช้วิธีฝูงผึ้งในการค้นหาที่เหมาะสมพร้อมกันทั้งหมดแบบอัตโนมัติ ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การประยุกต์ใช้ AE ที่ทำงานภายใต้การควบคุมของตัวควบคุม Optimal FLPID ดังที่นำเสนอ นั้น สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุม Conventional FLPID และระบบที่ไม่ได้ทำการควบคุม นอกจากนี้ พฤติกรรมทางพลวัตของการรับกำลังไฟฟ้าของ AE ภายใต้การควบคุมของวิธีที่นำเสนอ นั้น สามารถตอบสนองได้ดีกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองการเกิดสิ่งรบกวนที่แตกต่างกัน

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy-พีไอดีให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะที่คล้ายกับตัวควบคุมพีไอดี และมีคุณลักษณะการทำงานแบบฟuzzy-ลอจิก จึงได้มีการนำเอาตัวควบคุมฟuzzy-ลอจิกมาทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี ที่เรียกว่าตัวควบคุมฟuzzy-ลอจิก-พีไอดี อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy-ลอจิก-พีไอดี มีความยุ่งยาก และมีความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยทั่วไปนั้นยังมีสมรรถนะที่ไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้งเข้าในการปรับค่าที่เหมาะสมพร้อมกันทั้งหมด ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถที่จะสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) สามารถที่จะออกแบบอัตราขยายของแพลคเตอร์สัดส่วน ตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก และเงื่อนไขของกฎควบคุมได้พร้อมกันทั้งหมดแบบอัตโนมัติ โดยปราศจากการลองผิดลองถูก หรือใช้ความชำนาญการของผู้ออกแบบ
- 2) สามารถที่จะประยุกต์ใช้ออกแบบตัวควบคุมมากกว่า 1 ตัวให้ทำงานร่วมกันได้อย่างเหมาะสม
- 3) ได้ประยุกต์วิธีที่นำเสนอไปออกแบบตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และเสมือนของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบไมโครกริดที่มีส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม และแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วยได้ ผลที่ได้คือ อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุมที่นำเสนอมานั้นมีสมรรถนะในการทำให้เสถียรภาพระบบได้ดีกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบ ภายใต้การจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

4.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟuzzy-ลอจิก-พีไอดี ให้เหมาะสมด้วยวิธีฝูงผึ้ง ดังที่งานวิจัยนี้นำเสนอ สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่นๆ ได้ เช่น

- 1) สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ Flexible AC transmission system (FACTS) แบบอื่นได้
- 2) สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอุปกรณ์ชดเชยมากกว่า 1 ตัว ทั้งแบบชนิดเดียวกัน และต่างชนิดกันได้
- 3) สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามวิธีที่นำเสนอขึ้นเป็นการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมพืชที่
โลจิก-พีไอดี โดยทำการออกแบบจากการทดสอบกรณีเดียวแต่ตัวควบคุมยังสามารถที่จะรองรับกับการ
ทำงานกรณีอื่นๆ ได้ แต่สำหรับการออกแบบเพื่อใช้งานจริงควรที่จะทำการออกแบบโดยใช้หลายๆ
กรณีศึกษา เพื่อให้ตัวควบคุมที่ได้ขึ้นมีความเหมาะสมกับทุกสถานการณ์ ในการเกิดสิ่งรบกวนต่างๆ ขึ้น
ในระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] N. Hatziargyriou, H. Asono, R. Iravani, C. Marnay, Microgrids, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 6, pp. 78-94, 2008.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] M.E. El-Hawary, Electric Power Applications of Fuzzy Systems, Wiley-IEEE Press, 1998.
- [11] 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.
- [12] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] C. Xiao, L.Zhang, J.Yan, "Fuzzy PID Controller for Wind Turbines," *Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 2009.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] B.M. Mohan and A. Sinha, "Analytical Structures and Stability Analysis of Fuzzy PID Controller," *Applied Soft Computing*, Vol.8, pp.749-758, 2008.
- [19] E. H. Mamdani, "Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant," in *Proc. IEE*, vol. 121, no. 12, pp. 1585–1588, 1974.
- [20] 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.
- [21] T.Senju, et al, "Generating Power Leveling of Renewable Energy for Small Power System in Isolated Island," *IEEE Transactions on Power Energy*, Vol.25, No.12, pp.1209–1215, 2005.
- [22] T.Senju, et al, "Stabilization Control for Remote Power System by Using H_{∞} Decentralized Controllers," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.
- [23] H.Gorgun, "Dynamic Modeling of a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer," *International Journal of Hydrogen Energy*, No.33, pp 29 – 38, 2006.
- [24] 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.
- [25] F.Barbir. "PEM Electrolysis for Production of Hydrogen from Renewable Energy Sources," *International Journal of Solar Energy*, Vol.78, pp.661-669, 2005.
- [26] 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.

- [27] Ulleberg, "Modeling of Advanced Alkaline Electrolyzers: A System Simulation Approach," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 21-33, 2003.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Bei Gou, Woon Ki Na and Bill Diong, "Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications," Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] J.Jia, et al, "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell," IEEE Transactions on Energy Conversation, Vol. 24, 2009.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Theerawut Chaiyatham and Issarachai Ngamroo,

“A bee colony optimization based-fuzzy logic-PID control design of electrolyzer for microgrid stabilization”,

International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.8, No.9, September 2012, pp.6049-6066. (ISI Impact Factor 2010 = 1.664)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

November 23, 2011

Reference No.: IJICIC-11-05105

Title: A Bee Colony Optimization based-Fuzzy Logic-PID Control Design of Electrolyzer for Microgrid Stabilization

Author(s): Theerawut Chaitham and Issarachai Ngamroo

Dr. Issarachai Ngamroo
School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand.
E-mail: ngamroo@gmail.com

Dear Dr. Issarachai Ngamroo,

We have completed the review of your paper (**Theerawut Chaitham and Issarachai Ngamroo**), "**A Bee Colony Optimization based-Fuzzy Logic-PID Control Design of Electrolyzer for Microgrid Stabilization**" (revised version), submitted to the *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*.

I am happy to inform you that your paper mentioned above has been accepted for publication in IJICIC. We are planning tentatively to publish your paper in Vol.8, No.7, July 2012, if the final version of your paper (LaTeX source files, or Word file with PDF file) is satisfactory and can reach us within one month time from the date of this letter.

Thank you for submitting your work to IJICIC. Hope to work for you again in the near future.

Sincerely yours,



Yan Shi

Professor, Executive Editor, IJICIC
School of Industrial Engineering, Tokai University
9-1-1, Toroku, Kumamoto 862-8652, Japan
Tel & Fx: (+81 96) 3862666
E-mail: office@ijicic.org

A BEE COLONY OPTIMIZATION BASED-FUZZY LOGIC-PID CONTROL DESIGN OF ELECTROLYZER FOR MICROGRID STABILIZATION

THEERAWUT CHAIYATHAM AND ISSARACHAI NGAMROO

School of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Bangkok 10520, Thailand
ngamroo@gmail.com

Received May 2011; revised September 2011

ABSTRACT. *This paper proposes the optimal fuzzy logic based-proportional-integral-derivative (FLPID) controller design of the electrolyzer (EZ) by a bee colony optimization (BCO) for microgrid (MG) stabilization. The study MG system consists of wind power (WP), photovoltaic (PV), fuel cell (FC) equipped with EZ, diesel generator, and load. The intermittent power generations from WP and PV cause the severe power fluctuation in the MG. To alleviate power fluctuation, the EZ which is normally used to produce the hydrogen input for FC, can be applied. By control of active and reactive powers absorbed by EZ, the power fluctuation can be stabilized. The structure of active and reactive power controllers of EZ is the FLPID which consists of scale factors (SCs), membership functions (MFs), and control rules (CRs). Without trial and error, SCs, MFs, and CRs of the FLPID controller are automatically optimized by a BCO. Simulation study confirms that the proposed EZ with an optimal FLPID controller is much superior to the EZ with a conventional FLPID controller or an optimal PID controller in terms of stabilizing effect and robustness against various loading conditions and severe disturbances.*

Keywords: Electrolyzer, Microgrid, Fuzzy PID control, Bee colony optimization

1. Introduction. Nowadays, the microgrid (MG) is expected as the smart electrical power management for rural and isolated areas that cannot access to the main power grid due to the restriction of installation costs of transmission lines, right of way difficulties, social, and environmental impacts [1]. The MG is the cluster of the distributed generation with renewable energy sources and/or conventional generating units and loads [2]. At present, there are many MG projects around the world such as Kythnos Island MG in Greece [2], Aichi, Kyotango and Hachinohe MG projects in Japan [3], and the Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) project in the United States [4], etc.

Generally, renewable energy sources such as wind power (WP), photovoltaic (PV), fuel cell (FC) with electrolyzer (EZ), are usually installed in the MG, since these sources are inexhaustible, environmental friendly, clean, and no CO₂ emission [5]. These renewable energy sources are often operated with the conventional electricity generations such as diesel generator (DG), and gas turbine. Nevertheless, the solar and wind energy are intermittent in nature. The power generation from WP and PV is variable [6]. This causes the power unbalance in generation and load [7], and results in the severe power fluctuation in the MG [8-10]. To suppress the power fluctuation, several methods have been proposed in previous works [11-14]. Recent advancement in the EZ equipped with an FC has opened up options for using hydrogen as an energy storage. In addition to a

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hydrogen production for an FC input, the EZ can be used as the controllable load [15,16]. Moreover, the power absorbed by EZ can be rapidly controlled to compensate for power fluctuation in the MG [17].

In recent years, many works have been conducted on control system stabilization. However, all those control design methods require the exact mathematical model of the control systems which may not be available in practice. On the other hand, a fuzzy logic control has been successfully employed for solving many nonlinear control problems. Without exact mathematical model of the control system, the fuzzy controller can be designed. In [18], the fuzzy decentralized state feedback and observer-based decentralized output feedback controllers for a class of continuous nonlinear interconnected systems with time-delay and the modelling error have been applied. In [19], the sliding mode controller with fuzzy logic has been used for the heading control of the submersible vehicle. In [20], the method of fuzzy control systems for trailers driven by multiple motors in side slipways to haul out ships has been presented. In [21], the fuzzy logic controller with interval-valued inference mechanism has been applied for the control of distributed parameter system. Besides, the fuzzy logic based-proportional-integral-derivative (FLPID) controller has been proposed in [22]. In these works, nevertheless, the selection of scale factors (SF), membership functions (MF), and control rules (CR) of the FLPID controller is still the inevitable problem and depends on the designer's experience.

To overcome this problem, this paper proposes the new optimal FLPID controller design of EZ for alleviation of power fluctuation in the MG with hybrid power generations such as WP, PV, FC with EZ, and DG. The intermittent power generations from WP and PV result in severe power fluctuation in the MG. With the fast response of EZ, the power absorbed by an EZ can be rapidly controlled to compensate for power fluctuation. To achieve the optimal SF, MF, and CR of the FLPID, this paper applies a bee colony optimization (BCO) [23] to automatically tune these parameters of the FLPID. Simulation study is carried out in the nonlinear MG model. The proposed EZ with an optimal FLPID controller not only shows superior stabilizing effect than the EZ with a conventional FLPID or optimal PID controller, but also provides high robustness under various operating conditions and large disturbances.

2. Study System and Modeling. A single line diagram of a stand-alone MG [24] is depicted in Figure 1. It consists of 20 MVA DG, 4 MW WP, 800 kW PV, 3 MW EZ, 2 MW FC and $10+j2$ MVA load. The system MVA base is set at 20 MVA. System parameters are given in Table 1. The DG is represented by a 3rd-order synchronous generator model [25]. It is equipped with a simplified 1st-order model of exciter and governor [25]. Since the response of the converters equipped with WP and PV is very fast, these converters have not been included in the WP and PV models for the sake of simplicity. Here, the WP and PV are represented by the random active power source model [17]. The intermittent power generations from WP and PV cause power fluctuation in the MG.

Figure 2(a) depicts the simplified model of the study MG. The negative sign implies the absorbed power by EZ from the system while the positive sign of other power sources means the power supply to the system. The difference between supplied and absorbed powers is shown by active power deviation (ΔP) and reactive power deviation (ΔQ) which are controlled by EZ to be minimum.

As shown in Figure 1, it is assumed that the converter used for an EZ is the voltage source converter type. Normally, the role of the converter is used to absorb AC power from the system and convert to DC power for a hydrogen production as an FC input. In this work, the converter is also applied to control the active and reactive powers absorbed from the system by the FLPID controller with the objective of alleviation of power fluctuation

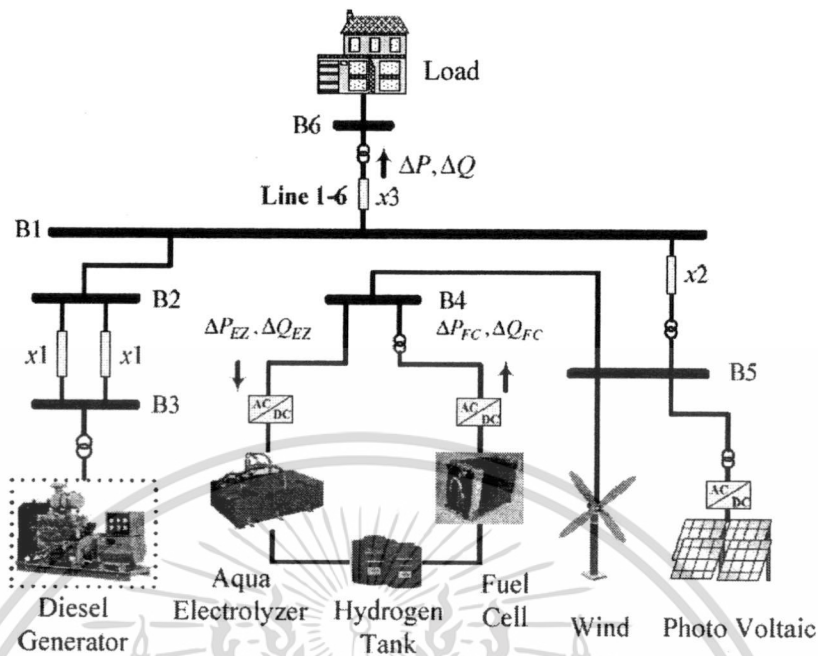


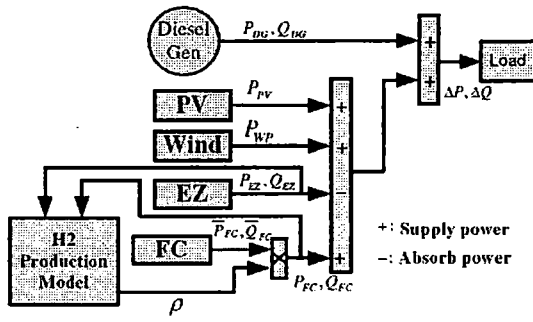
FIGURE 1. A stand-alone microgrid

TABLE 1. System parameters

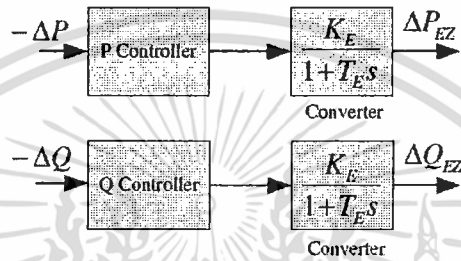
Devices	Parameters	values
Diesel Generator	Armature resistance R_a	0.0036 pu
	d-axis synchronous reactance X_d	1.56 pu
	q-axis synchronous reactance X_q	1.06 pu
	d-axis transient reactance X'_d	0.296 pu
	d-axis open circuit transient time constant T'_{d0}	1.01 s
	Inertia coefficient H	0.8 s
Transmission line	Reactance $x1$	0.4 pu
	Reactance $x2$	0.2 pu
	Reactance $x3$	0.5 pu

in the system. Based on the ability of independent and simultaneous control of active and reactive powers by the converter, the active and reactive power controllers of EZ can be shown separately in Figure 2(b). As the power source model, the converter dynamic can be represented by the 1st-order transfer function [26-28]. The converter gain K_E and time constant T_E are set at 5.0 and 0.2, respectively [26]. The active and reactive power deviations absorbed by EZ (ΔP_{EZ} and ΔQ_{EZ}) are controlled by the FLPID of P and Q controllers, respectively. The active and reactive power deviations in the line 1-6 (ΔP and ΔQ) are used as the input signals of P and Q controllers, respectively.

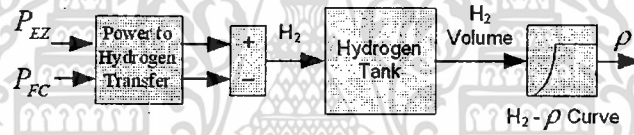
Figure 2(c) shows the hydrogen production model [26]. The block diagram of a power to hydrogen transfer shows the rate of a hydrogen production by the absorbed power from an EZ (P_{EZ}) as well as the rate of a hydrogen usage for a power production by an FC (P_{FC}). Here, the EZ absorbs the active and reactive powers from the system in order to produce the hydrogen with the rate of 0.029 l/kWh. The produced hydrogen is stored in the 500 litre hydrogen tank. The FC uses the hydrogen in the tank as the input fuel and converts to the active and reactive power outputs with the rate of 0.061 l/kWh.



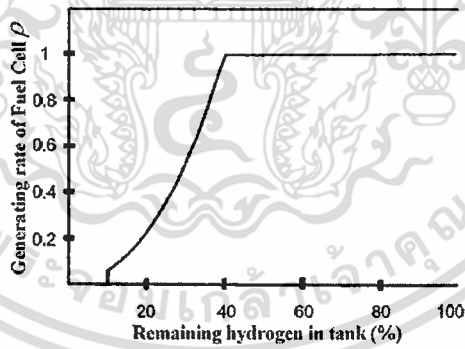
(a) Simplified diagram



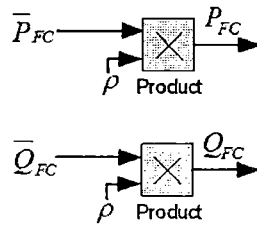
(b) EZ model with P and Q controllers



(c) Hydrogen production model



(d) Relation of the remaining hydrogen in the tank and the generating rate of FC



(e) FC model

FIGURE 2. MG modelling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The difference between a hydrogen production by an EZ and a hydrogen usage by an FC becomes the remaining hydrogen in the tank.

In this study, the operating method of FC generators has two limitations. These limitations are very important in reduction of a start-up and a shutdown of FC generators since a voltage of FC drops due to its start-up and shutdown operations [26]. These two limitations are given as follows.

- i If the remaining amount of the hydrogen drops below 10% of a hydrogen tank capacity, the FC stops. The FC continues to stop until the capacity of the hydrogen reaches 50%.
- ii The generating rate of the FC (ρ) varies with the remaining fuel in the hydrogen tank. The relation between the remaining fuel in hydrogen tank and the generating rate is shown in Figure 2(d) [26].

For the FC model, it is represented by the constant power source model as shown in Figure 2(e). The active and reactive power output commands (\bar{P}_{FC} and \bar{Q}_{FC}) of FC are kept constant at 0.05 pu and 0 pu, respectively. From the limitation (ii), the actual generating power of FC (P_{FC} and Q_{FC}) is represented by the product of the generating rate and the output command of FC as

$$\begin{aligned} P_{FC} &= \rho \bar{P}_{FC} \\ Q_{FC} &= \rho \bar{Q}_{FC} \end{aligned} \quad (1)$$

3. Proposed Optimized FLPID Controller. The main idea of fuzzy logic system was introduced by Zadeh in 1965 [29], and first applied to control theory in 1974 by Mamdani [30]. Based on these works, the fuzzy controllers have successfully been employed for various applications [31-33]. One of most popular type of fuzzy logic control is the FLPID controller as shown in Figure 3, because the FLPID is able to eliminate steady state error and good performance during the transient state [34].

Figure 3 shows the proposed FLPID for P-Q controllers of EZ. The input signal e is the active power deviation in the line 1-6 for P controller or reactive power deviation in the line 1-6 for Q controller. The output signal of FLPID controller is given by

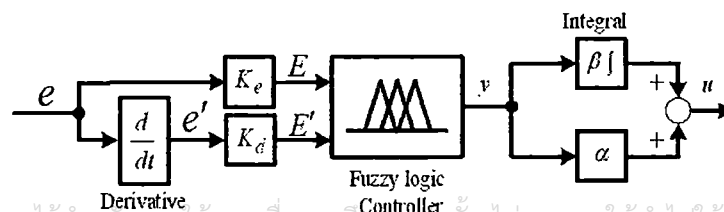
$$u = \alpha y + \beta \int y dt \quad (2)$$

It has been shown in [22] 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

$$y = A + BE + DE' \quad (3)$$

where $E = K_e e$ and $E' = K_d e'$. Therefore, from (2) and (3), the controller output is obtained as

$$u = \alpha A + \beta A t + \alpha K_e B e + \beta K_d D e + \beta K_e B \int e dt + \alpha K_d D e' \quad (4)$$



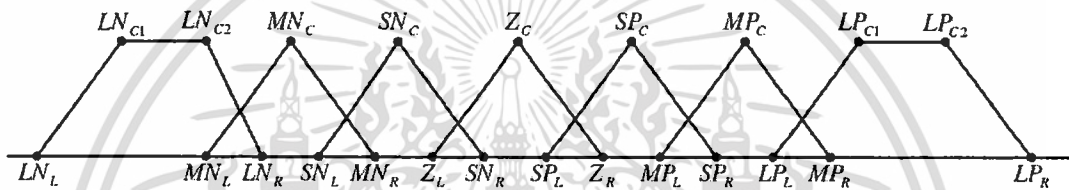
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิพนธ์

FIGURE 3. Block diagram of FLPID controller

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 case of the design of FLPID controller, there are four tuning parameters of SFs i.e., K_e , K_d , β and α . Besides, there are many tuning parameters of MFs and CRs. Here, consider two shapes of MF, i.e., triangular and trapezoidal memberships which are shown in Figure 4. A triangular membership is defined by three parameters, i.e., left base (L), centre (C), and right base (R). For a trapezoidal membership, it is defined by four parameters, i.e., left base (L), centre 1 (C_1), centre 2 (C_2), and right base (R). Each MF is composed of two trapezoidal memberships and five triangular memberships. Accordingly, it has 23 ($4 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 4 = 23$) tuning parameters. The fuzzy logic controller has two-inputs and one-output. Therefore, there are 69 ($3 \times 23 = 69$) tuning parameters.



LN: large negative; MN: medium negative; SN: small negative;
 Z: zero; SP: small positive; MP: medium positive;
 LP: large positive.

FIGURE 4. The shape of membership functions

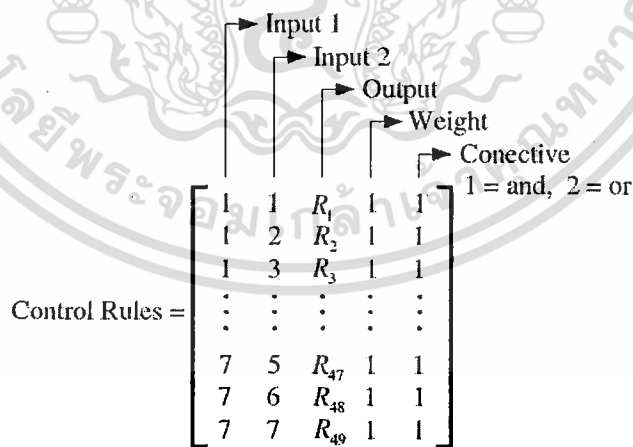
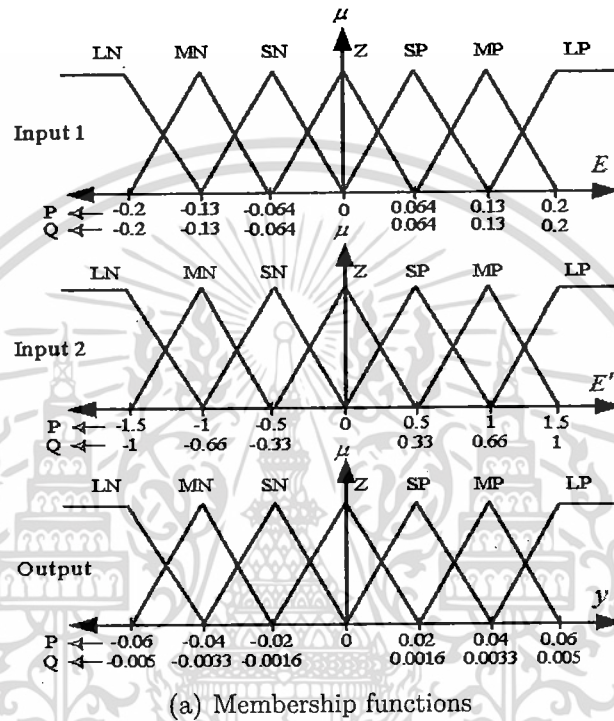


FIGURE 5. Structure of control rules for fuzzy logic controller

The CRs for two-inputs and one-output fuzzy logic controller is represented by n rows and 5 columns matrix as shown in Figure 5. When this idea is applied to the fuzzy logic toolbox, n is the total number of relationships between all possible input pairs (for 7 MFs, $n = 7^2 = 49$). The third column in the control rule table is the linguistic variable outputs. Generally, it is represented by a numeric symbol. The universe of discourse in this study contains seven memberships. Consequently, the control rules are represented by seven numbers (1to 7), 1: LN, 2: MN, 3: SN, 4: Z, 5: SP, 6: MP, and 7: LP. Note

that there are 49 tuning parameters. Therefore, the total parameters for two-inputs and one-output FLPID controller are 122 (4 + 69 + 49 = 122).

In the FLPID controller design, the important procedure is how to determine the SFs, MFs, and CRs. In general, they are determined by the trial and error and designer's experiences. To overcome this problem, this study applies a BCO algorithm to automatically determine the SFs, MFs and CRs.



(a) Membership functions

		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

(b) Control rules

FIGURE 6. P and Q controllers design of EZ with a conventional FLPID

Figure 6 shows the MFs and CRs before optimization of the conventional FLPID. Three MFs with two-input and one-output of the FLPID are depicted in Figure 6(a). For the case of two-input and one-output, the CRs can be depicted graphically in Figure 6(b), where every cell shows the output MF of a CR with two input MFs. The CRs are built from the statement: if input 1 and input 2 then output 1. For example, consider the third row and fourth column in Figure 6(b), that means: if E is SN and E' is Z , then u is SP . The FLPID controller which uses the MFs and the CRs as shown in Figure 6, is

referred to as the “Conventional FLPID controller”. Note that only the SFs are tuned for conventional FLPID. On the other hand, for the proposed controller which is referred to as the “Optimal FLPID controller”, the SFs, MFs, and CRs are automatically tuned.

The optimization problem for optimal PID, conventional FLPID and optimal FLPID controllers is formulated based on the minimization of the integral absolute error (IAE) of the line power deviations as,

$$\text{Minimize } IAE = \int_0^t (|\Delta P(t)| + |\Delta Q(t)|) dt \quad (5)$$

This optimization problem is solved by BCO.

4. Bee Colony Optimization. The BCO algorithm mimics the food foraging behaviour of swarms of honey bees [23]. Honey bees use several mechanisms like waggle dance to optimally locate food sources and 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. The procedure of the BCO algorithm for tuning FLPID parameters as shown in Figure 7 can be described as below:

- Step 1: Generate randomly the initial populations of n scout bees for the parameters of SF, MF, and CR. These initial populations must be feasible candidate solutions that satisfy the constraints. Set $NC = 0$.
- Step 2: Represent the value of SF, MF, and CR from each population.
- Step 3: Evaluate the fitness value of the initial populations by (5).
- Step 4: Select m best sites for neighborhood search. 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 of ne employed bees for selected sites (more bees for the best e sites).
- Step 7: Represent the value of SF, MF, and CR from each employed bee.
- Step 8: Select the fittest bees from each patch.
- Step 9: Check the stopping criterion. If satisfied, terminate the search, else $NC = NC + 1$.
- Step 10: Assign the $n - m$ remaining bees to random search. Go to Step 2.

where ns is number of scout bee, NC is number of iteration, m is number of sites selected for neighborhood search, e is number of best “elite” sites out of m selected sites and ne is number of employed bee.

The motivation of the practical use of the theoretic results obtained from the proposed method is the automatic optimization of SFs, MFs, and CRs for the FLPID controller by BCO. Without trial and error and designer’s experience, the optimal FLPID controller can be automatically tuned. In addition, the proposed method can be practically applied in industrial systems such as a fuzzy control design in a tunnel lighting system [35], a fuzzy control design in a wire transport system of wire electrical discharge machining machine [36], a fuzzy control design in a fuel-cell hybrid tramway [37], and a fuzzy control design for a gas engine driven heat pump [38] etc. The application of the proposed method to these practical systems not only considerably simplifies the fuzzy control design, but also significantly enhances the control effect.

However, the deficiency of the proposed technique is that the trained parameters obtained from some case studies cannot guarantee the control effect of the designed FLPID

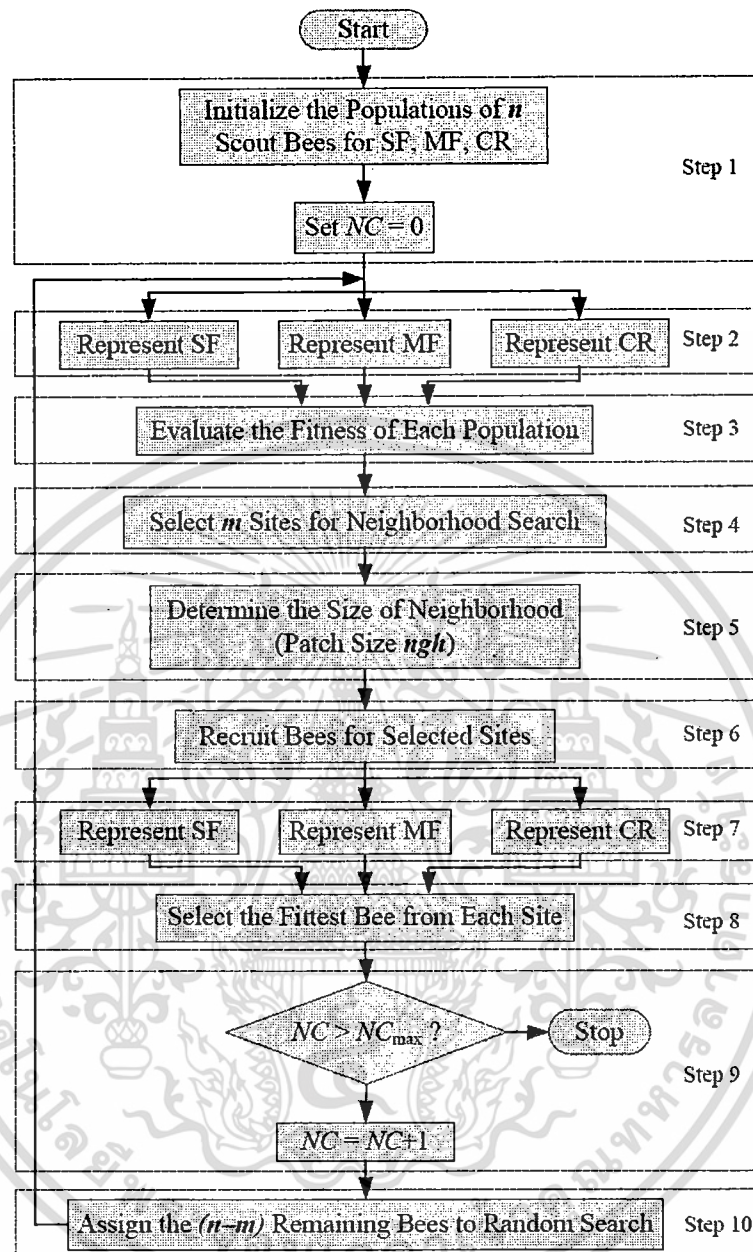


FIGURE 7. Procedure of BCO algorithm for tuning FLPID parameters

controller. The control effect of FLPID may be deteriorated when the control signal input differs from the trained data. To overcome this problem, the parameters of FLPID controller should be designed by several trained data of many case studies.

5. Simulation Study. To show the superior effect of the EZ with an optimal FLPID controller, the following controllers are designed individually for comparison studies.

- 1) The EZ with an optimal PID controller.
- 2) The EZ with a conventional FLPID controller.
- 3) The EZ with an optimal FLPID controller.

In the optimization of EZ with each controller, it is supposed that the WP and PV with 180 s in Figure 8 are applied to the MG. Note that the trained parameters obtained by 180 s of the simulation period (short-term) can be applied to the long-term optimization.

Although the optimization with long-term provides better result than that with short-term, it takes longer time in the optimization. If the data of short-term and long-term are not much different, the short-term data is preferable. Here, the constant parameters in BCO are set as follows: $ns = 100$, $ne = 10$, $m = 10$, $e = 4$, $ngh = 30\%$ and $NC = 100$.

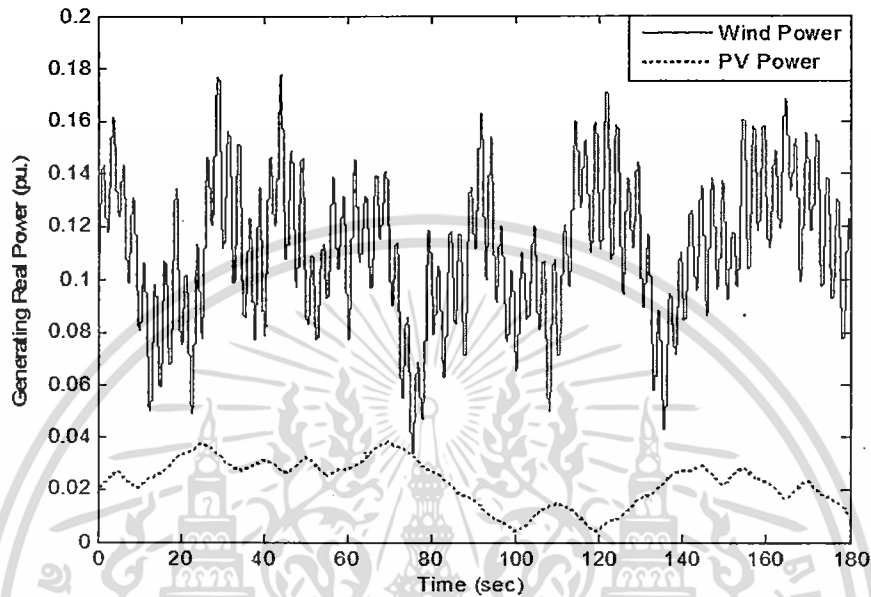


FIGURE 8. WP and PV outputs

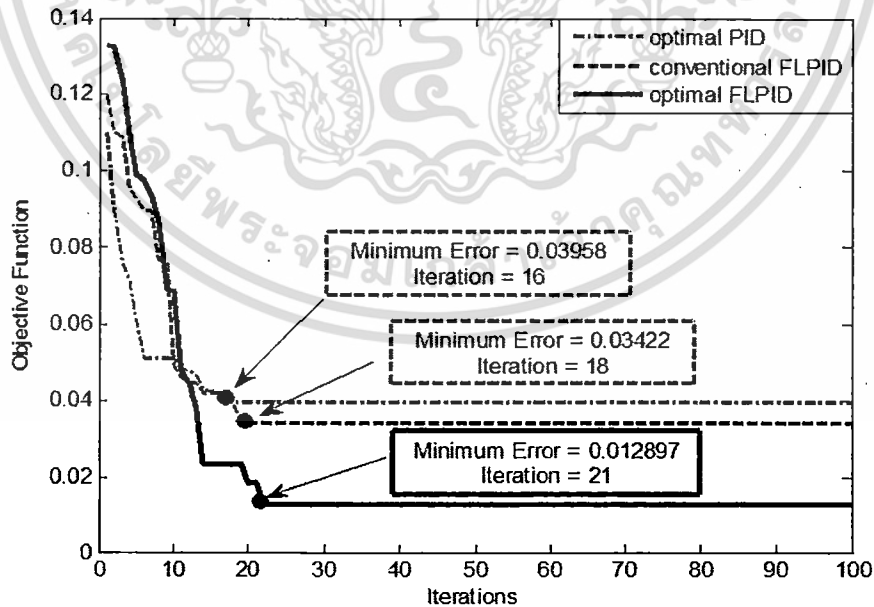
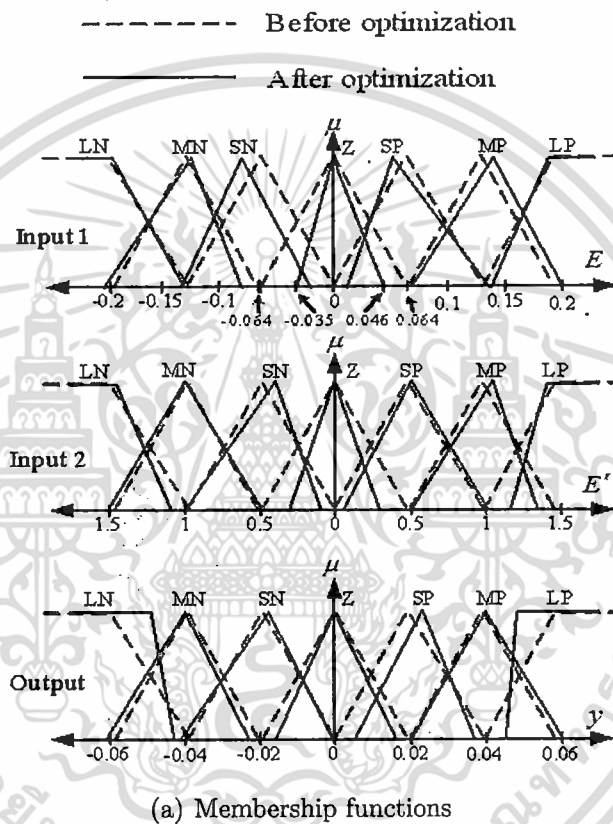


FIGURE 9. Convergence curves

As a result, the convergence curves of the EZ with an optimal PID, the EZ with a conventional FLPID, and the EZ with an optimal FLPID are shown in Figure 9. They start at the different initial values and gradually decrease to the minimum values. Besides, the MF and CR of P and Q controllers of EZ are delineated in Figures 10 and 11,

respectively. For example of the MF before and after optimizations in Figure 10(a), the left base value, the centre value, and the right base value of the optimized membership Z have been moved from $-0.064, 0, 0.064$ to $-0.035, 0, 0.046$, respectively. For example of the CR before and after optimizations, the encircled rule "LP" before optimization in Figure 6(b) has been changed to the encircled "MP" after optimization in Figures 10(b) and 11(b). The optimized parameters of P and Q controllers of EZ can be automatically achieved as in Tables 2 and 3, respectively. Besides, the PID control parameters of EZ are obtained by the same proposed method as shown in Table 4.



(a) Membership functions

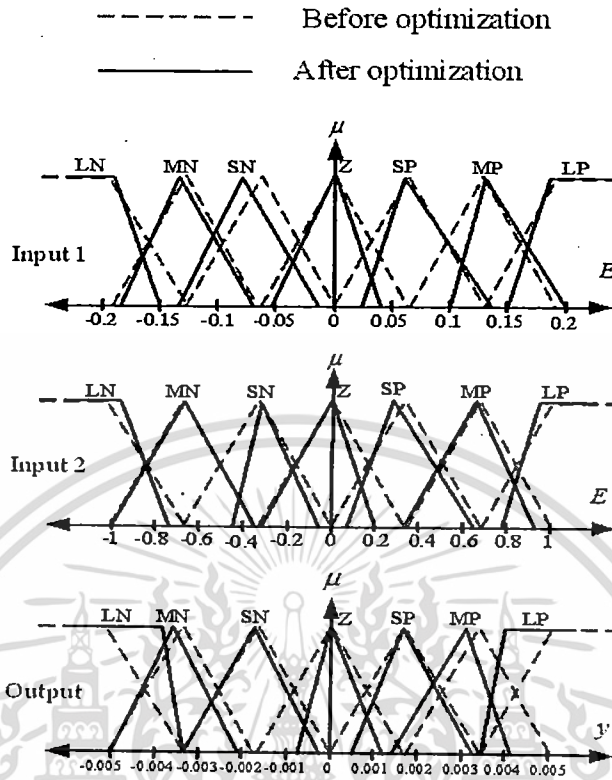
		Input 2						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Input 1	LN	LP	LP	MP	MP	SP	SP	Z
	MN	MP	MP	MP	SP	SP	Z	Z
	SN	MP	SP	SP	SP	Z	SN	SN
	Z	MP	SP	Z	Z	SN	SN	MN
	SP	MP	SP	Z	SN	SN	MN	MN
	MP	SP	Z	SN	SN	MN	MN	MN
	LP	Z	SN	SN	SN	MN	MN	LN

(b) Control rules

FIGURE 10. P controller design of the proposed EZ with an optimal FLPID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 Nonlinear simulations are carried out for four case studies.

Case 1: The MG is operated under power generations from WP and PV in Figure 8.



(a) Membership functions

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

(b) Control rules

FIGURE 11. Q controller design of the proposed EZ with an optimal FLPID

TABLE 2. Control parameters of P controller

Controller	K_e	K_d	β	α	MF	CR
Conventional FLPID	0.7294	0.518	0.4623	0.3761	Figure 6(a)	Figure 6(b)
Optimal FLPID	0.7783	0.881	0.6821	0.2275	Figure 10(a)	Figure 10(b)

TABLE 3. Control parameters of Q controller

Controller	K_e	K_d	β	α	MF	CR
Conventional FLPID	1.047	0.625	1.1328	0.1196	Figure 6(a)	Figure 6(b)
Optimal FLPID	0.983	0.869	1.0616	0.1504	Figure 11(a)	Figure 11(b)

TABLE 4. PID control parameters of P and Q controllers

Controller	K_P	K_I	K_D
P Controller	0.357	0.056	0.052
Q Controller	0.195	0.042	0.049

Simulation results for 2,000 s are depicted in Figure 12. As shown in Figures 12(a) and 12(b), without EZ controller, the active and reactive power flows in the lines 1-6 severely fluctuate. On the other hand, the EZs with an optimal PID, conventional FLPID and optimal PID are able to alleviate the power fluctuation effectively. Nevertheless, the EZ with an optimal FLPID provides better damping effect than EZ with conventional FLPID or optimal PID. The absorbed active and reactive powers of EZ are demonstrated in Figures 12(c) and 12(d), respectively. The power absorbed by the EZ with an optimal FLPID is higher than that of the EZ with conventional FLPID or optimal PID. Accordingly, the active and reactive power fluctuations in the line 1-6 in case of the EZ with an optimal FLPID are lower than those of the EZ with conventional FLPID or optimal PID.

Case 2: Assume that the power generations from WP and PV in Figure 8 decrease by 50%. At $t = 0.5$ s, the active power of load suddenly increases from 0.6 pu to 0.8 pu.

Simulation results of active and reactive power deviations in the line 1-6 are shown in Figures 13(a) and 13(b), respectively. In comparison to the EZ with a conventional FLPID or optimal PID, the EZ with an optimal FLPID shows better stabilizing effect.

Case 3: Assume that the power generations from WP and PV in Figure 8 decrease by 50% while the random step load occurs as shown in Figure 14(a).

Simulation results of active and reactive power fluctuations in the line 1-6 are shown in Figures 14(b) and 14(c), respectively. The EZ with a conventional FLPID is very sensitive to the disturbances. The power oscillations are higher and very severe. On the contrary, the proposed EZ with an optimal FLPID is robustly capable of damping the power oscillations.

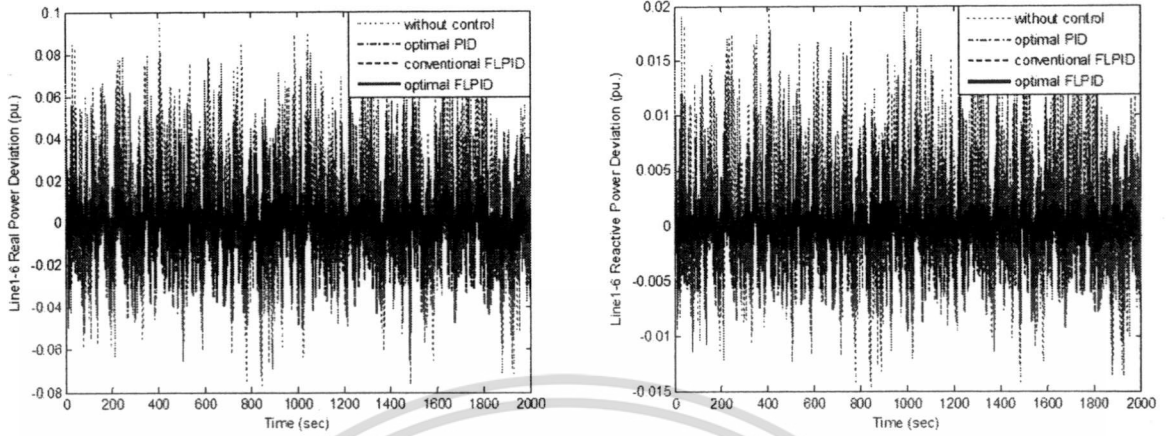
Case 4: Assume that the power generations from WP and PV in Figure 8 decrease by 35%. The three phase fault to ground occurs at $t = 0.5$ s for 70 ms and is cleared naturally.

Simulation results of active and reactive power fluctuations in the line 1-6 are depicted in Figure 15(a) and 15(b), respectively. It can be observed that the stabilizing effect of the EZ with a conventional FLPID is considerably deteriorated by the three-phase fault. The damping of power oscillation is very poor. On the other hand, the proposed EZ with an optimal FLPID can tolerate this severe disturbance. It is able to damp out power oscillations robustly.

6. Conclusion. The BCO-based optimal FLPID control design of EZ for stabilization of power fluctuation in a stand-alone MG has been presented in this paper. The active and reactive power controllers of EZ are optimized by the proposed design.

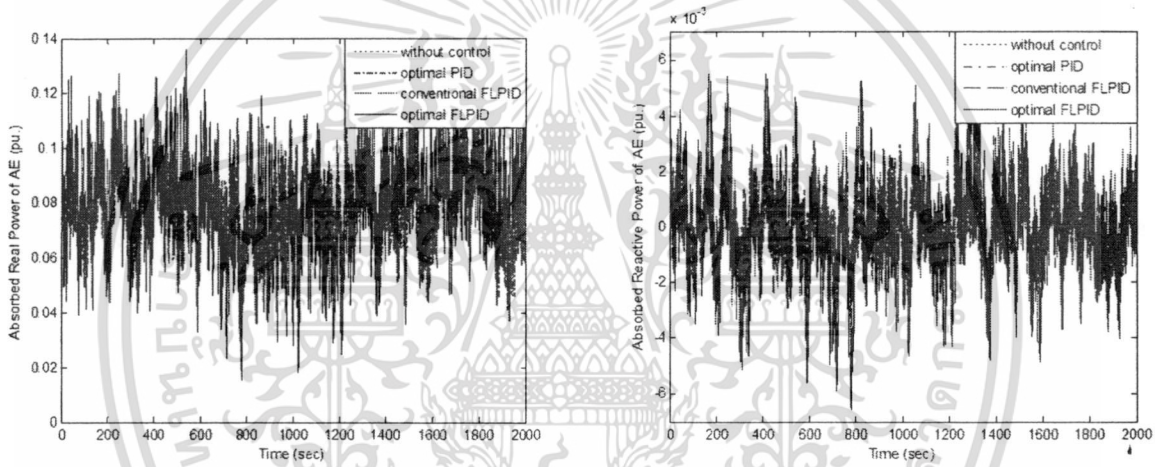
The unique features and the main advantages which make the proposed BCO based FLPID superior over other fuzzy control approaches can be summarized as follows.

- 1) Without trial and error, all adjusting parameters of the FLPID controller, i.e. SCs, MFs, and CRs are automatically and simultaneously optimized by a BCO. As a result, the optimal FLPID controller can be guaranteed.
- 2) The designed FLPID controller is very effective and robust because it can deal with various disturbances and system uncertainties such as various loading conditions and



(a) Active power deviation in line 1-6

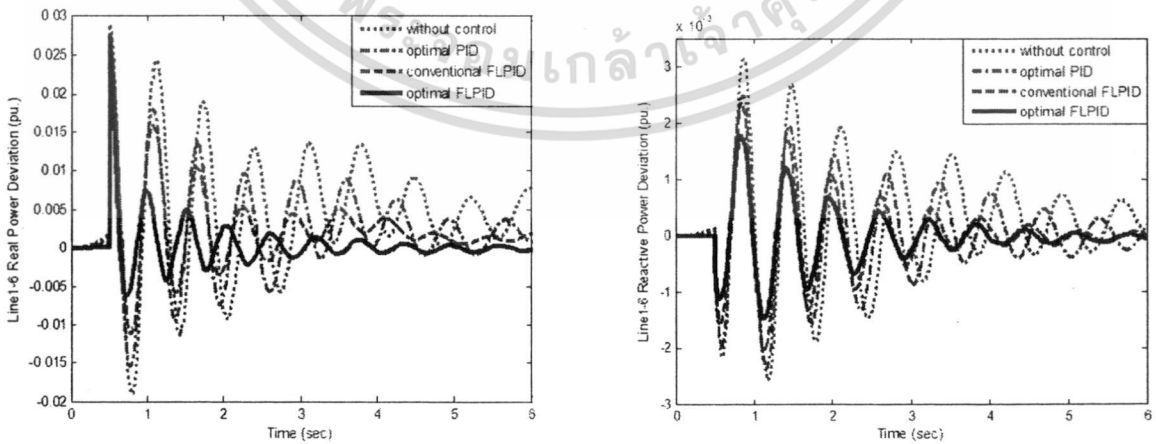
(b) Reactive power deviation in line 1-6



(c) Absorbed real power of EZ

(d) Absorbed reactive power of EZ

FIGURE 12. Simulation results in case 1

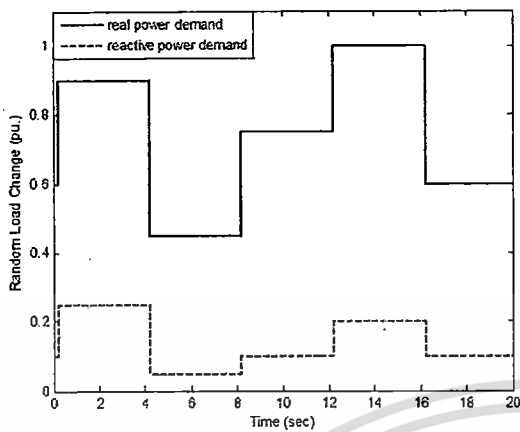


(a) Active power deviation in line 1-6

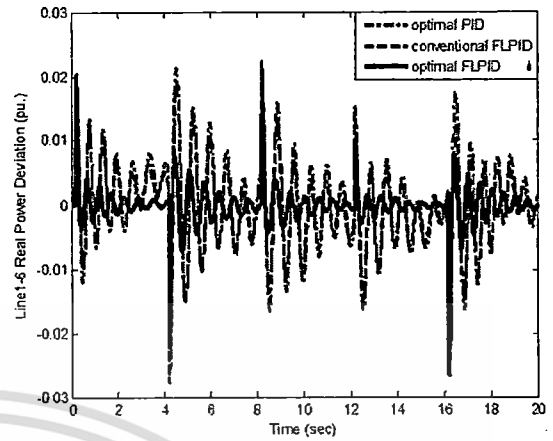
(b) Reactive power deviation in line 1-6

FIGURE 13. Simulation results in case 2

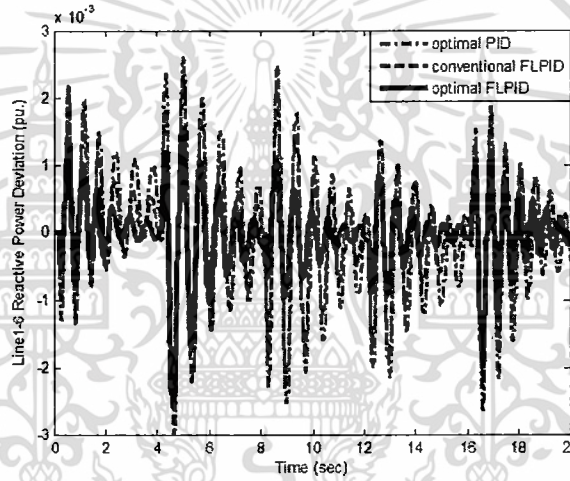
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Random load changes

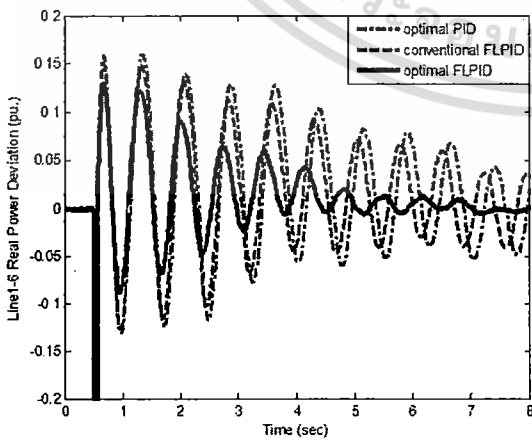


(b) Active power deviation in line 1-6

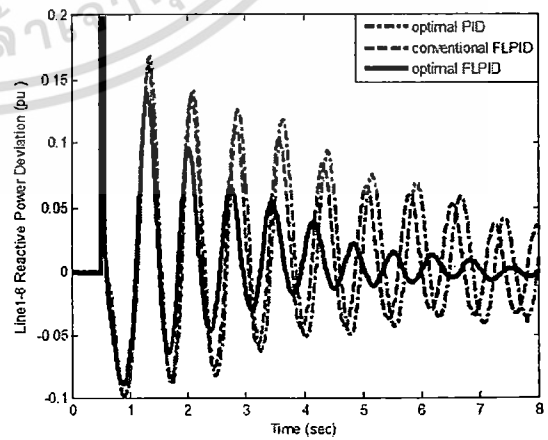


(c) Reactive power deviation in line 1-6

FIGURE 14. Simulation results in case 3



(a) Active power deviation in line 1-6



(b) Reactive power deviation in line 1-6

FIGURE 15. Simulation results in case 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

severe faults etc. The superior effectiveness and robustness of the proposed FLPID controller in comparison with the conventional FLPID controller and optimal PID controller have been confirmed by various case studies.

The convincing and practical examples of the proposed techniques to demonstrate the advantages and effectiveness are given as follows:

- 1) Load frequency control of hydro-electrical power plants [39].
- 2) Intelligent control of elevator systems [40].
- 3) Energy saving for multi-unit room air-conditioners [41].
- 4) The control of weld line positions in injection-molded part [42].

Acknowledgment. This work is supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund. The authors also gratefully acknowledge the helpful comments and suggestions of the reviewers, which have improved the presentation.

REFERENCES

- [1] J. Park, W. Liang, J. Choi, A. A. El-Keib and J. Watada, Probabilistic production cost credit evaluation of wind turbine generators, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.5, no.11(A), pp.3637-3646, 2009.
- [2] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, Microgrids, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol.5, no.4, pp.78-94, 2007.
- [3] S. Morozumi, Micro-grid demonstration projects in Japan, *Proc. of IEEE Power Conversion Conference*, vol.6, pp.35-42, 2007.
- [4] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papathanassiou and N. Hatziargyriou, Making microgrids work, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol.6, no.3, pp.40-53, 2008.
- [5] M. Calderón, A. J. Calderón, A. Ramiro and J. F. González, Weather data and energy balance of a hybrid photovoltaic-wind system with hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.35, no.15, pp.7706-7715, 2010.
- [6] G. Giannakoudis, A. I. Papadopoulos, P. Seferlis and S. Voutetakis, Optimum design and operation under uncertainty of power system using renewable energy sources and hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.35, no.3, pp.872-891, 2010.
- [7] S. Obara and 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, no.19, pp.8213-8222, 2009.
- [8] J. L. Márquez, M. G. Molina and J. M. Pacas, Dynamic modelling, simulation and control design of an advanced micro-hydro power plant for distributed generation applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.35, no.11, pp.5772-5777, 2010.
- [9] M. Little, M. Thomson and I. Infield, Electrical integration of renewable energy into stand-alone power supplies incorporating hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.32, no.10-11, pp.1582-1588, 2007.
- [10] F. Gutiérrez-Martín, D. Confente and I. Guerra, Management of variable electricity loads in wind – Hydrogen systems: The case of a Spanish wind farm, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.35, no.14, pp.7329-7336, 2010.
- [11] M. Uzunoglu and O. C. Onar, Static var compensator reactive power management for SOFC power plants, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.33, no.9, pp.2367-2378, 2008.
- [12] M. Calderón, A. J. Calderón, A. Ramiro and J. F. González, Automatic management of energy flows of a stand-alone renewable energy supply with hydrogen support, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.35, no.6, pp.2226-2235, 2010.
- [13] D. Ramirez, L. F. Beites, F. Blazquez and J. C. Ballesteros, Distributed generation system with PEM fuel cell for electrical power quality improvement, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.33, no.16, pp.4433-4443, 2008.
- [14] M. G. Molina and P. E. Mercado, Stabilization and control of tie-line power flow of microgrid including wind generation by distributed energy storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.35, no.11, pp.5827-5833, 2010.
- [15] E. Troncoso and M. Newborough, Electrolysers as a load management mechanism for power systems with wind power and zero carbon thermal power plant, *Applied Energy*, vol.87, no.1, pp.1-15, 2010.

- [16] E. Troncoso and M. Newborough, Implementation and control of electrolyzers to achieve high penetrations of renewable power, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.32, no.13, pp.2253-2268, 2007.
- [17] S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai, Application of electrolyzer system to enhance frequency stabilization effect of microturbine in a microgrid system, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.34, no.17, pp.7131-7142, 2009.
- [18] S. Tong, S. Tong and Q. Zhang, Robust stabilization of nonlinear time-delay interconnected systems via decentralized fuzzy control, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.4, no.7, pp.1567-1582, 2008.
- [19] X. Song, J.-W. Ye and L.-M. Wu, Application of the integral sliding mode controller with fuzzy logic to submersible vehicle, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.3, no.4, pp.897-906, 2007.
- [20] N. Aung, E. Cooper, Y. Hoshino and K. Kamei, A proposal of fuzzy control systems for trailers driven by multiple motors in side slipways to haul out ships, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.3, no.4, pp.799-812, 2007.
- [21] S. Li and X. Zhang, Fuzzy logic controller with interval-valued inference for distributed parameter system, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.2, no.6, pp.1197-1206, 2006.
- [22] 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.
- [23] D. Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, *Technical Report-Tr06t*, Erciyes Univ., Turkey, 2005.
- [24] T. Senjyu, D. Hayashi, R. Sakamoto, N. Urasaki and T. Funabashi, Generating power levelling of renewable energy for small power system in isolated island, *IEEE Trans. on Power and Energy*, vol.25, no.12, pp.1209-15, 2005.
- [25] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [26] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato and T. Funabashi, A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.20, no.2, pp.406-414, 2005.
- [27] T. Ise, Y. Murakami and K. Tsuji, Simultaneous active and reactive power control of superconducting magnet energy storage using GTO converter, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.1, no.1, pp.1418-1425, 1988.
- [28] Y. Mitani, K. Tsuji and Y. Murakami, Application of superconducting magnet energy storage to improve power system dynamic performance, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.3, no.4, pp.143-150, 1986.
- [29] L. A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and Control*, vol.8 no.3, pp.338-353, 1965.
- [30] E. H. Mamdani, Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant, *Proc. of IEE*, vol.121, no.12, pp.1585-1588, 1974.
- [31] S. Tong, Y. Li and T. Wang, Adaptive fuzzy backstepping fault-tolerant control for uncertain nonlinear systems based on dynamic surface, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.5, no.10(A), pp.3249-3261, 2009.
- [32] L. Luoh, Control design of T-S fuzzy large-scale systems, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.5, no.9, pp.2869-2880, 2009.
- [33] T. Wang, S. Tong and Y. Li, Robust adaptive fuzzy control for nonlinear system with dynamic uncertainties based on backstepping, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.5, no.9, pp.2675-2688, 2009.
- [34] B. M. Mohan and A. Sinha, Analytical structure and stability analysis of a fuzzy PID controller, *Applied Soft Computing*, vol.8, no.1, pp.749-758, 2008.
- [35] C. Yang, S. Fan, Z. Wang and W. Li, Application of fuzzy control method in a tunnel lighting system, *Mathematical and Computer Modeling*, vol.54, no.3-4, pp.931-937, 2011.
- [36] M. T. Yan and C. C. Fang, Application of genetic algorithm-based fuzzy logic control in wire transport system of wire-EDM machine, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.205, no.1-3, pp.128-137, 2008.
- [37] J. P. Torreglosa, F. Jurado, P. García and L. M. Fernández, Application of cascade and fuzzy logic based control in a model of a fuel-cell hybrid tramway, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol.24, no.1, pp.1-11, 2011.
- [38] S. Li, W. Wugao, R. Zhang, D. Lv and Z. Huang, Cascade fuzzy control for gas engine driven heat pump, *Energy Conversion and Management*, vol.46, no.11-12, pp.1757-1766, 2005.

- [39] E. Cam, Application of fuzzy logic for load frequency control of hydro-electrical power plants, *Energy Conversion and Management*, vol.48, no.4, pp.1281-1288, 2007.
- [40] J. Jamaludin, N. A. Rahim and W. P. Hew, Development of a self-tuning fuzzy logic controller for intelligent control of elevator systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol.22, no.8, pp.1167-1178, 2009.
- [41] C.-B. Chiou, C.-H. Chiou, C.-M. Chu and S.-L. Lin, The application of fuzzy control on energy saving for multi-unit room air-conditioners, *Applied Thermal Engineering*, vol.29, no.2-3, pp.310-316, 2009.
- [42] M.-Y. Chen, H.-W. Tzeng, Y.-C. Chen and S.-C. Chen, The application of fuzzy theory for the control of weld line positions in injection-molded part, *ISA Trans.*, vol.47, no.1, pp.119-126, 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล อิสระหทัย งามทร

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Electrical Engineering	Osaka University	2543
M.Eng	Electrical Engineering	Osaka University	2540
B.Eng	Electrical Engineering	KMITL	2535

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ การควบคุมเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2548	รางวัลทุนวิจัยมูลนิธิโทเรครั้งที่ ๑๒	มูลนิธิโทเร
2549	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2550	Best paper award, The 8 th International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore	The 8 th International Power Engineering Conference, Singapore
2552	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
2553	Best paper award in electrical power systems, the 2010 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference, (ECTI-CON 2010, Chiangmai, Thailand.	ECTI Association
2554	บทความดีเด่นสาขาไฟฟ้ากำลัง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34	การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2537- 2543	ทุนรัฐบาลญี่ปุ่น	รัฐบาลญี่ปุ่น
2544- 2546	ทุนวิจัยหลังปริญญาเอก เลขที่ PDF/71/2544	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2547- 2549	ทุนพัฒนานักวิจัย (เมธีวิจัย สกว.) เลขที่ RSA4780015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550- 2553	ทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว.)	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
2550- 2552	ทุนวิจัยโครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม เลขที่ IUG5080015	สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul (2012). Coordinated control of optimized SFCL and SMES for improvement of power system transient stability. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5600805.
2. M. Saejia and I. Ngamroo (2012). Alleviation of power fluctuation in interconnected power systems with wind farm by SMES with optimal coil size. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue 3, June 2012, pp.5701504.
3. I. Ngamroo (2011). Simultaneous optimization of SMES coil size and control parameters for robust power system stabilization. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 21, Issue 3, Part 2, June 2011, pp. 1358-1361.
4. S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo (2011). Robust controller design of heat pump and plug-in hybrid electric vehicle for frequency control in a smart microgrid based on specified-structure mixed H_2/H_∞ control technique. *Applied Energy*, Vol. 88, Issue 11, November 2011, pp. 3860-3868
5. J. Pahasa and I. Ngamroo (2011). A heuristic training-based least squares support vector machines for power system stabilization by SMES. *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, Issue 11, October 2011, pp. 13987-13993.
6. M. Saejia and I. Ngamroo (2011). A robust centralized SMES controller design based on WAMS considering system and communication delay uncertainties. *Electric Power Systems Research*, Vol.81, Issue.4, April 2011, pp. 846-852.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. I. Ngamroo, A. N. Cuk Supriyadi, S. Dechanupaprittha, M. Watanabe and Y. Mitani (2010). Wide area robust SMES controller design using synchronized PMUs for stabilization of interconnected power system with wind farms. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, Vol.5, No.4, July 2010, pp.428-438.
8. I. Ngamroo (2010). Robust SMES controller design based on inverse additive perturbation for stabilization of interconnected power systems with wind farms. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, Issue 3, March 2010, pp. 459-464.
9. I. Ngamroo (2010). Robust SMES controller design for stabilization of inter-area oscillation considering coil size and system uncertainties. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 470, Issue 22, December 2010, pp. 1986-1993.
10. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai (2009). Robust voltage stabilization in an isolated wind-diesel power system using PSO based-fixed structure H_{∞} loop shaping control. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, Vol.129-B, No.6, June 2009, pp.756-764.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. I. Ngamroo and C. Ratanapornchai (2012). Bidirectional power controller design of PHEV for robust frequency control. *Proceedings of The Fifth IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, (AsiaPES 2012)*, 2-4 April 2012, Phuket, Thailand, no. 768-095.
2. J. Pahasa, K. Hongesombut and I. Ngamroo (2012). PSO-based learning of support vector machines for adaptive TCSC. *Proceedings of The Fifth IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, (AsiaPES 2012)*, 2-4 April 2012, Phuket, Thailand, no. 768-092.
3. I. Ngamroo and A. Kunakorn (2011). Smart grid stabilization based on GPS synchronized wide area phasor measurement. *Proceedings of the 3rd Regional Conference on ICT Application for Industries and Small Companies in ASEAN Countries (RCICT 2011)*, 10-11 March 2011, Vientiane, Lao PDR, No. IT B-05, pp. 98-103.
4. M. Saejia and I. Ngamroo (2010). Design of robust centralized PSS based on WAMS considering system and signal transmission delay uncertainties. *Proceedings of IASTED Technology and Management Conferences 2010, Power and Energy Systems, (AsiaPES 2010)*, 24-26 November 2010, Phuket, Thailand, no. 701-159.
5. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo and S. Kaitwanidvilai (2010). Design of robust control and monitoring system for stabilization of frequency fluctuation in a microgrid system. *Proceedings of IASTED Technology and Management Conferences 2010, Power and Energy Systems, (AsiaPES 2010)*, 24-26 November 2010, Phuket, Thailand, no. 701-151.
6. I. Ngamroo, Cuk Supriyadi A.N., S. Dechanupaprittha and Y. Mitani (2009). Stabilization of tie-line power oscillations by robust SMES in interconnected power system with large wind farms. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090302-95.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. T. Chaiyatham, I. Ngamroo, S. Vachirasricirikul and S. Pothiya (2009). Design of optimal fuzzy logic-PID controller using bee colony optimization for frequency control in an isolated wind-diesel system. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090331-212.
8. S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai and T. Chaiyatham (2009). Robust frequency stabilization in a microgrid system. *Proceedings of 2009 IEEE Transmission & Distribution Asia Conference & Exposition*, 26-30 October 2009, Seoul, Korea, Paper no. D20090228-74.
9. Cuk Supriyadi A.N., I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, A. Kunakorn, T. Hashiguchi and T. Goda (2008). Design of robust power system stabilizer using genetic algorithm-based fixed-structure H_{∞} loop shaping control. *Proceedings of The 17th World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC2008)*, 6-11 July 2008, Seoul, Korea, Paper ThA1.55, pp.11086-11091.
10. Cuk Supriyadi A.N., I. Ngamroo, A. Kunakorn, S. Dechanupaprittha, M. Watanabe, Y. Mitani, T. Hashiguchi and T. Goda (2008). Inverse additive perturbation-based optimization of robust PSS in an interconnected power system with wind farms. *Proceedings of SICE Annual Conference 2008, International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology*, 20-22 August, Tokyo, Japan, pp.237-240.

ผลงานลิขสิทธิ์/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในแขนอ่านฮาร์ดดิสก์ FEM KMITL ลิขสิทธิ์เลขที่ 253609 ได้รับการจดลิขสิทธิ์เมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 โดยกรมทรัพย์สินทางปัญญา

อื่นๆ

หนังสือ พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Dynamics and Stability)

ISBN: 978-616-7367-46-0 วศ.สจล.: 244 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1 เมื่อ สิงหาคม พ.ศ. 2554, 459 หน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้