



การพัฒนาและการออกแบบตัวควบคุมอนุพันธ์อินทิกรัลตามสัดส่วนสององศาอิสระของลอจิกฟัซซีที่
เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบกำลังสองพื้นที่ โดยใช้อัลกอริทึมของฟุ้งฝัง

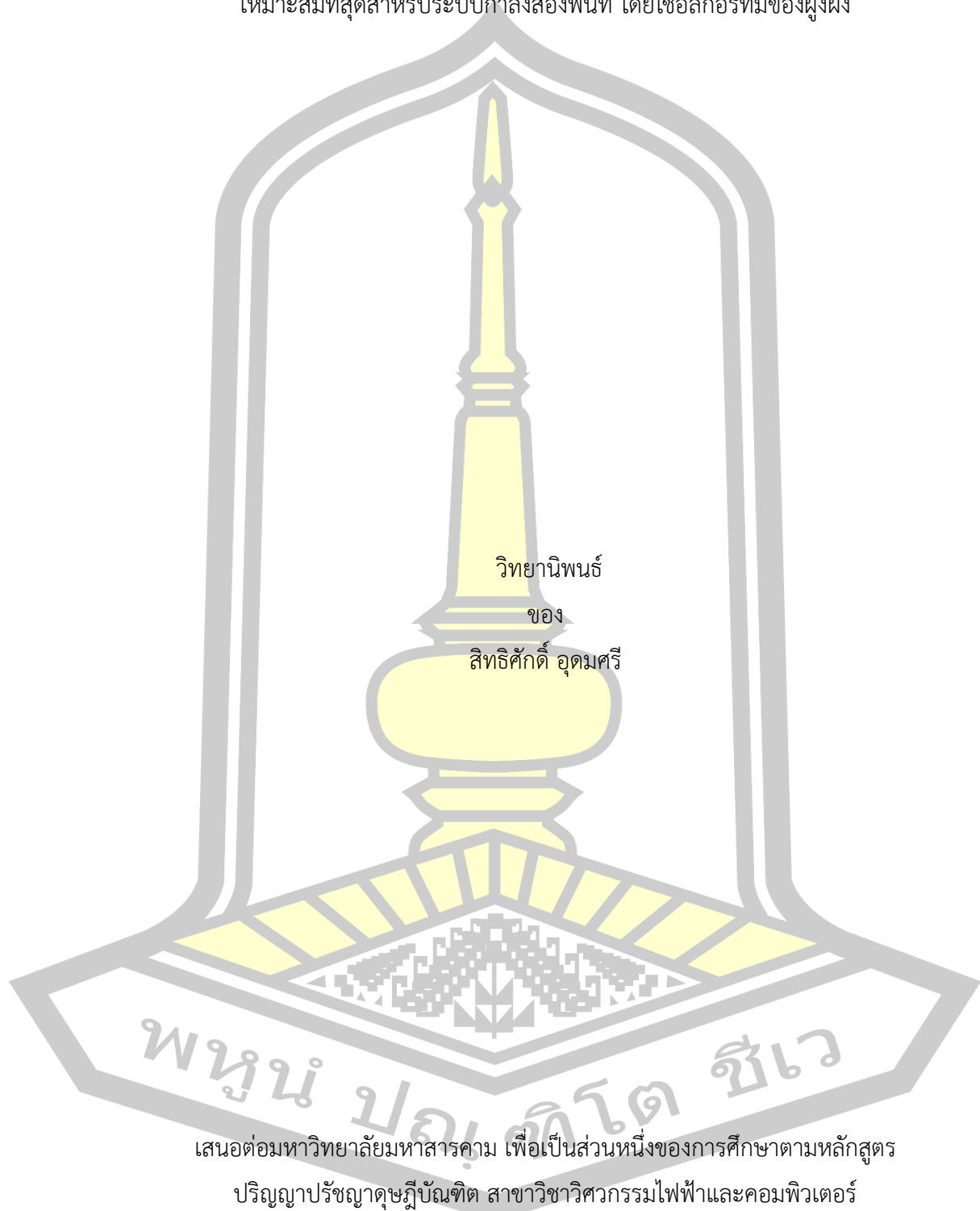
วิทยานิพนธ์
ของ
สิทธิตักดิ์ อุดมศรี

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาและการออกแบบตัวควบคุมอนุพันธ์อินทิกรัลตามสัดส่วนสององศาอิสระของลอจิกฟัซซี่ที่
เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบกำลังสองพื้นที่ โดยใช้อัลกอริทึมของฝูงผึ้ง



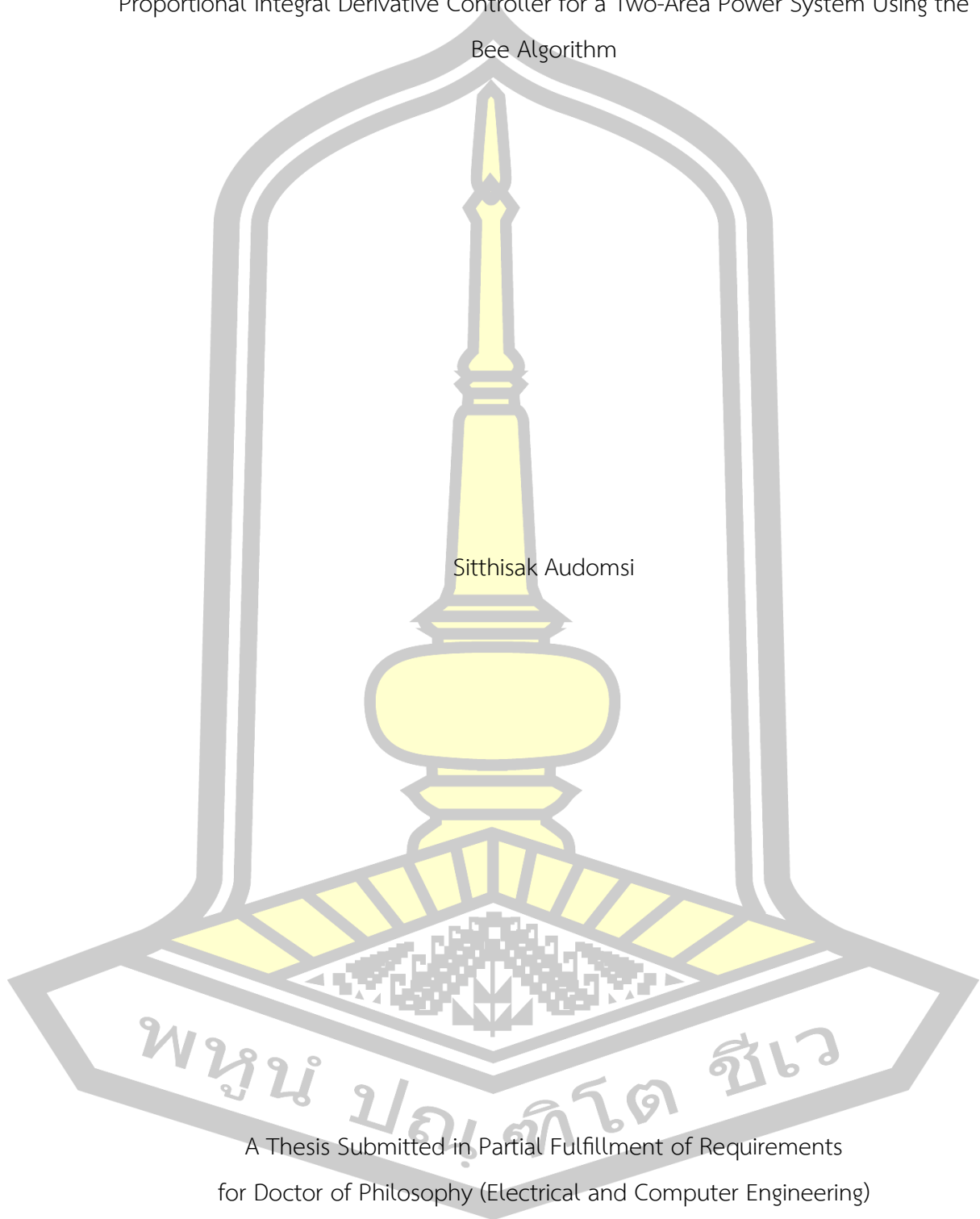
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development and Design of an Optimal Fuzzy Logic Two Degrees of Freedom-
Proportional Integral Derivative Controller for a Two-Area Power System Using the
Bee Algorithm

Sitthisak Audomsi



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

July 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสิทธิศักดิ์ อุดมศรี แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. สุพรรณนิภา วัฒนะ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อ. ดร. ณรงค์กรณ์ อุทาพิทย์)

กรรมการ

(รศ. ดร. นิวัตร อังควิศิฐพันธ์)

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผศ. ดร. จักรพันธ์ ออบมา)

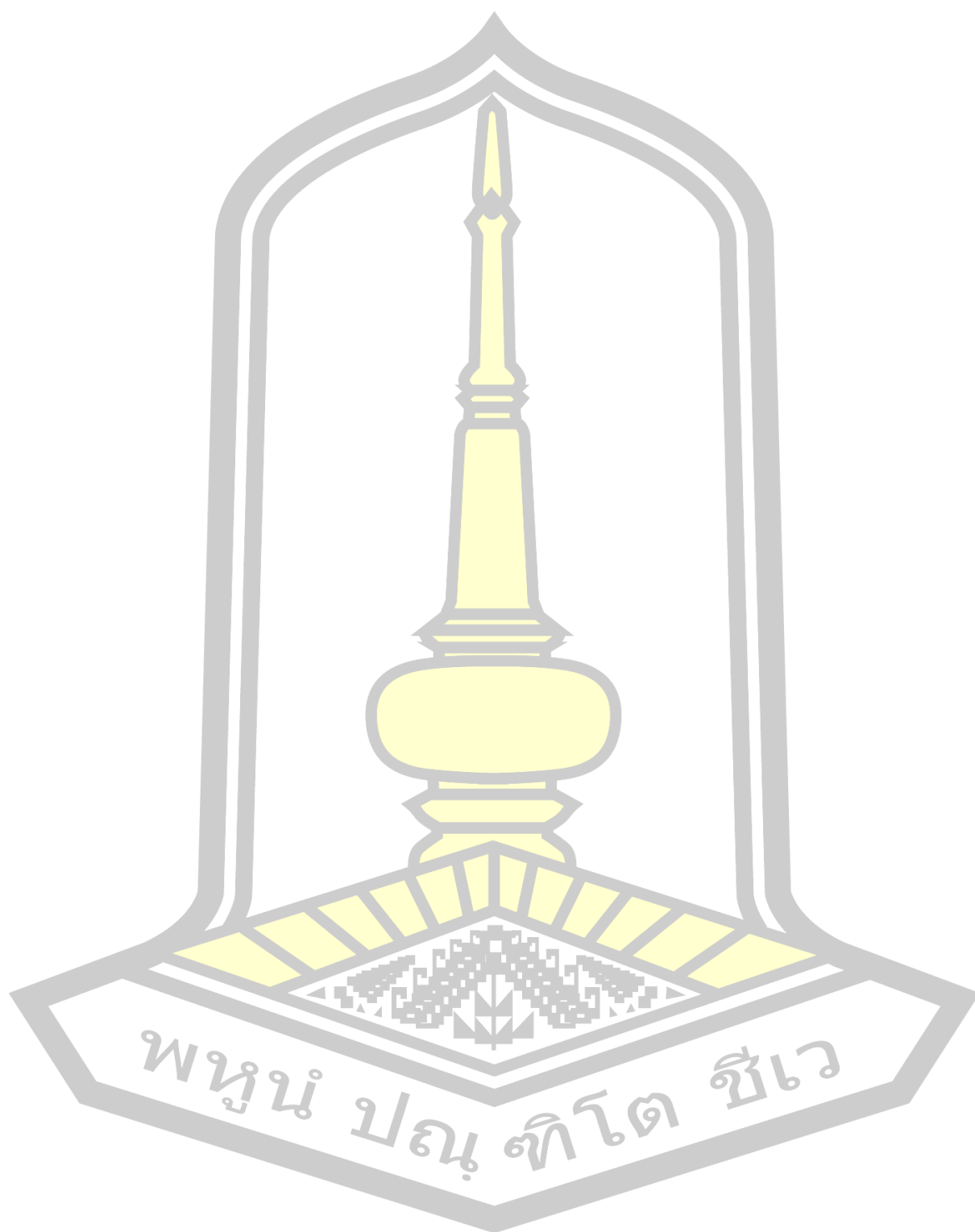
มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

(รศ. ดร. จักรมาส เลาหวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



ชื่อเรื่อง	การพัฒนาและการออกแบบตัวควบคุมอนุพันธ์อินทิกรัลตามสัดส่วนสององศา อิสระของลอจิกฟัซซีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบกำลังสองพื้นที่ โดยใช้ อัลกอริทึมของฝูงผึ้ง		
ผู้วิจัย	สิทธิศักดิ์ อุดมศรี		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล รองศาสตราจารย์ ดร. สุพรรณนิกา วัฒนะ อาจารย์ ดร. ณรงค์กรณ์ อุทาพิทย์		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2568

บทคัดย่อ

การจัดการพื้นที่และการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญในระบบการผลิตพลังงานขนาดใหญ่เพื่อสร้างพลังงานที่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ระบบไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็นโซนควบคุมย่อยเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการที่หลากหลายของประชากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแต่ละโซนจะมีระบบที่เป็นอิสระของตนเอง งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการผลิตพลังงานในสองโดเมนที่เชื่อมต่อกัน ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบ Reheat และโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ระบบดังกล่าวใช้เทคโนโลยีตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic) ร่วมกับตัวควบคุมแบบ 2DOF-PID เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม นอกจากนี้ ยังได้ใช้วิธีการปรับแต่งแบบ Bee Swarm Optimization ในการออกแบบและพัฒนาตัวควบคุม Fuzzy Logic 2DOF-PID (FL2DPID) ซึ่งเน้นการปรับค่าอัตราขยาย (Gain) และกฎการควบคุม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม FL2DPID มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวควบคุมแบบเดิม ได้แก่ Fuzzy Logic PID, 2DOF-PID และ PID โดยแบบจำลองสามารถลดค่าความผิดพลาดให้น้อยที่สุดที่ 0.1308 ซึ่งบ่งชี้ถึงการปรับปรุงที่สำคัญ ข้อมูลที่ได้ยืนยันว่าตัวควบคุมใหม่นี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างชัดเจนทั้งในด้านการควบคุมโดยรวมและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ : การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ, ตัวควบคุม 2-DOF PID, ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก 2DOF-PID, ตัวควบคุมพีไอดี, วิธีฝูงผึ้ง

TITLE	Development and Design of an Optimal Fuzzy Logic Two Degrees of Freedom-Proportional Integral Derivative Controller for a Two-Area Power System Using the Bee Algorithm		
AUTHOR	Sitthisak Audomsi		
ADVISORS	Professor Worawat Sa-Ngiavibool , Ph.D. Associate Professor Supannika Wattana , Ph.D. Narongkorn Uthathip , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2025

ABSTRACT

Effective management of space and connectivity is essential in large-scale power production systems to generate adequate energy to satisfy market demand. The electric power system is segmented into smaller control zones to more effectively meet the needs of diverse populations, with each zone possessing its independent system. The study aims to design an automated control system for energy production across two interconnected domains: a reheat thermal power plant and a hydropower facility. The system employs fuzzy logic technologies alongside a 2DOF-PID controller to improve control efficacy. The bee swarm optimization approach was employed to facilitate the design and advancements of the fuzzy logic 2DOF-PID controller (FL2DPID). This technique primarily focused on modifying gain and control rules. The fuzzy logic 2DOF-PID controller (FL2DPID) exhibited enhanced performance compared to previous controllers, including fuzzy logic PID, 2DOF-PID and PID controllers. The model achieved a minimal error value of 0.1308, indicating a significant improvement. The data indicate that the new controller is operational, showing a significant improvement in overall control performance and the stability of the electrical system.

Keyword : Automatic Generation Control, 2DOF-PID Controller, Fuzzy Logic 2DOF-PID Controller, PID Controller, Bee Algorithm

กิตติกรรมประกาศ

ด้วยความเคารพและซาบซึ้งใจอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งเปรียบเสมือนแสงสว่างนำทางในเส้นทางแห่ง การศึกษาครั้งนี้ ด้วยความมุ่งมั่นและความใส่ใจอย่างลึกซึ้งที่ท่านได้มอบให้ ทั้งในด้านวิชาการและ กำลังใจ ท่านไม่เพียงเป็นครูผู้สอน แต่ยังเป็นแบบอย่างที่ยิ่งใหญ่แห่งความมุ่งมั่นและการอุทิศตน

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณจากใจต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณนิภา วัฒนะ และ อาจารย์ ดร.ณรงค์กรณ์ อุทาพิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สนับสนุนและมอบคำแนะนำที่ เปี่ยมด้วยความปรารถนาดี ความเอาใจใส่ของท่านทั้งสองไม่เพียงช่วยให้ข้าพเจ้าก้าวผ่านความท้าทาย แต่ยังเป็นกำลังใจสำคัญที่ช่วยให้ข้าพเจ้าเชื่อมั่นในศักยภาพของตนเอง

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร ในฐานะประธาน สอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาขอเสนอแนะเชิงลึกและคำแนะนำอันทรงคุณค่า ข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติ อย่างยิ่งที่ได้เรียนรู้จากประสบการณ์และวิสัยทัศน์ของท่าน ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร พันธ์ ออบมา ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ รองศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐ์พันธ์ กรรมการสอบ ที่ได้ มอบมุมมองใหม่และความเห็นที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คณาจารย์ในหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ คอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านในคณะ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุก มิติ ทั้งในด้านวิชาการและการประสานงาน ความช่วยเหลือของทุกท่านล้วนมีความสำคัญต่อการบรรลุ เป้าหมายในครั้งนี้

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2568 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการ สนับสนุนทุนวิจัย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงการนี้สามารถดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์

ท้ายที่สุดและสำคัญที่สุด ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณจากใจต่อ บิดาและมารดา ที่เป็นดัง รากฐานแห่งชีวิตและกำลังใจอันยิ่งใหญ่ ท่านได้มอบความรัก ความเข้าใจ และการสนับสนุนอย่างไม่มี เงื่อนไข ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้ามีความเข้มแข็งและศรัทธาในตนเอง ความสำเร็จในครั้งนี้ คือความสำเร็จของครอบครัวเรา และข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในทุกสิ่งที่ท่านทำเพื่อข้าพเจ้ามาโดยตลอด

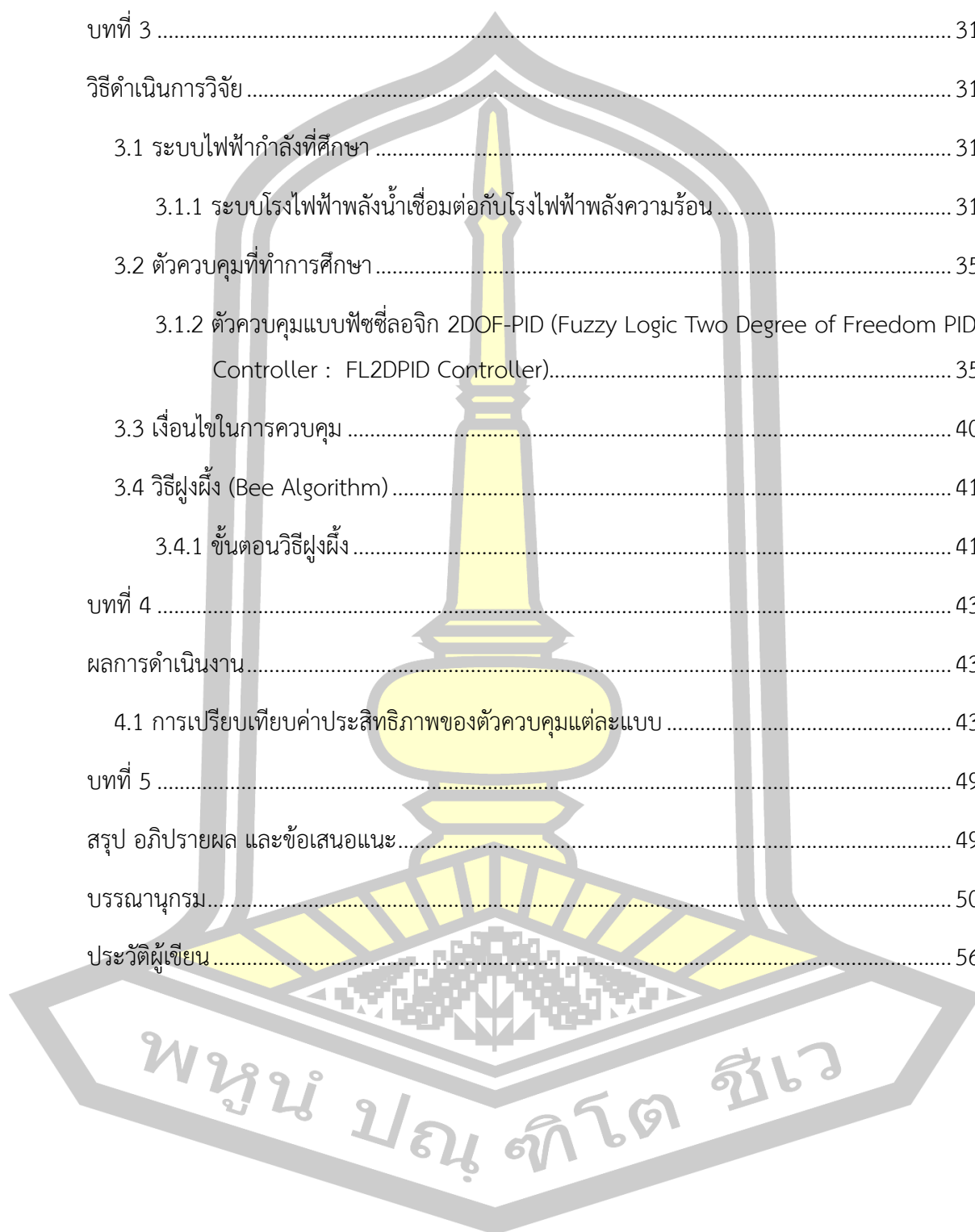
สิทธิศักดิ์ อุดมศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2.....	1
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	1
2.1 ระบบโรงไฟฟ้า.....	1
2.1.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Thermal Power System).....	1
ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	1
แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	3
2.1.2 โรงงานพลังงานน้ำ (Hydro Power System).....	3
ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ.....	3
แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ.....	4

2.1.3 ระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Hydro with Thermal Area Power System)	5
ข้อดีและข้อเสียของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน	6
2.2 ระบบควบคุม	7
2.2.1 ระบบควบคุมพีไอดี (PID Controller System)	7
องค์ประกอบของระบบควบคุมพีไอดี	8
สมการของระบบควบคุมพีไอดี	8
ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี	9
2.2.2 ระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ (2DOF-PID Controller System)	10
องค์ประกอบของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ	10
สมการของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ	11
ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ	12
2.2.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller System)	13
องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก	13
ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบฟัซซี่	14
2.2.4 ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ (Fuzzy Logic 2DOF-PID Controller System)	16
องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ	16
ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ	17
2.3 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม	18
2.3.1 วิธีผึ้งผึ้ง (Bee Optimization Algorithm)	18
ขั้นตอนการทำงานของวิธีผึ้งผึ้ง	21
ตัวอย่างการใช้วิธีผึ้งผึ้งแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	21
ข้อดีและข้อเสียของวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm)	26

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3	31
วิธีดำเนินการวิจัย	31
3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษา	31
3.1.1 ระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน	31
3.2 ตัวควบคุมที่ทำการศึกษา	35
3.1.2 ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID (Fuzzy Logic Two Degree of Freedom PID Controller : FL2DPID Controller).....	35
3.3 เงื่อนไขในการควบคุม	40
3.4 วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm)	41
3.4.1 ขั้นตอนวิธีฝูงผึ้ง	41
บทที่ 4	43
ผลการดำเนินงาน.....	43
4.1 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของตัวควบคุมแต่ละแบบ	43
บทที่ 5	49
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	56



พจนัน ปณ จิตโต ชีเว

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	2
ตาราง 2 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ	3
ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (ต่อ).....	4
ตาราง 4 ข้อดีและข้อเสียของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน	6
ตาราง 5 ข้อดีและข้อเสียของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (ต่อ).....	7
ตาราง 6 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี	9
ตาราง 7 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี (ต่อ).....	10
ตาราง 8 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ	12
ตาราง 9 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีซี	14
ตาราง 10 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีซี (ต่อ).....	15
ตาราง 11 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบพีซีลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ.....	17
ตาราง 12 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบพีซีลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ (ต่อ)	18
ตาราง 13 ข้อดีและข้อเสียของวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm).....	26
ตาราง 14 ข้อดีและข้อเสียของวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm) (ต่อ).....	27
ตาราง 15 สรุปข้อมูลจากบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและการออกแบบตัวควบคุมของงานวิจัย ในหัวข้อต่าง ๆ.....	29
ตาราง 16 สรุปข้อมูลจากบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและการออกแบบตัวควบคุมของงานวิจัย ในหัวข้อต่าง ๆ (ต่อ)	30
ตาราง 17 ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง	32
ตาราง 18 ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)	33
ตาราง 19 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	33

ตาราง 20 ตัวชี้วัดของการทดสอบระบบ Load Frequency Control (LFC) โดยใช้ตัวควบคุมประเภทต่างๆ.....	43
ตาราง 21 ค่า U_{SH} , O_{SH} และ T_s ของตัวควบคุมประเภทต่าง ๆ.....	45
ตาราง 22 การเปรียบเทียบค่า RMAE และ MAE สำหรับตัวควบคุมประเภทต่างๆ ในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบ Reheat และโรงไฟฟ้าพลังน้ำ.....	48



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 แบบจำลองโครงสร้างโรงไฟฟ้าพลังความร้อน.....	3
ภาพประกอบ 2 แบบจำลองโครงสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำ.....	4
ภาพประกอบ 3 แผนภาพของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน.....	5
ภาพประกอบ 4 แบบจำลองของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันระหว่างระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน.....	6
ภาพประกอบ 5 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller).....	8
ภาพประกอบ 6 บล็อกโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ.....	10
ภาพประกอบ 7 บล็อกโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller).....	13
ภาพประกอบ 8 บล็อกโครงสร้างระบบควบคุมแบบฟัซซี่พีไอดี แบบสององศาอิสระ.....	16
ภาพประกอบ 9 แผนผังของวิธีฝูงผึ้ง.....	20
ภาพประกอบ 10 ฟังก์ชันในทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการหาค่าสูงสุด.....	22
ภาพประกอบ 11 ผึ้งสอดแนม $n = 10$ ตัว สุ่มหาคำตอบเริ่มต้น.....	22
ภาพประกอบ 12 ประเมินผลของคำตอบ แล้วจัดเรียงลำดับจากมากไปน้อยของฝูงผึ้ง.....	23
ภาพประกอบ 13 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี $m=5$ คำตอบ.....	23
ภาพประกอบ 14 คัดแยกคำตอบออกเป็น 2 กลุ่ม.....	24
ภาพประกอบ 15 กำหนดขอบเขตในการค้นหาบริเวณรอบ ๆ.....	24
ภาพประกอบ 16 ผึ้งงานค้นหาคำตอบรอบ ๆ คำตอบ.....	25
ภาพประกอบ 17 เลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง.....	25
ภาพประกอบ 18 ผึ้งสอดแนม $n-m=5$ ตัว สุ่มหาคำตอบเริ่มต้นใหม่.....	26
ภาพประกอบ 19 แผนภาพของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	31

ภาพประกอบ 20 แบบจำลองของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันระหว่างระบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	32
ภาพประกอบ 21 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิก 2DOF-PID.....	36
ภาพประกอบ 22 องค์ประกอบของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก.....	36
ภาพประกอบ 23 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก 2DOF-PID	37
ภาพประกอบ 24 กฎการควบคุมของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก 2DOF-PID.....	38
ภาพประกอบ 25 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 1 ชุด	39
ภาพประกอบ 26 โครงสร้างกฎการควบคุมตัวควบคุมฟuzzyลอจิก	40
ภาพประกอบ 27 แผนผังการประยุกต์ใช้วิธีฟuzzy เพื่อหาค่าที่เหมาะสม	42
ภาพประกอบ 28 ความหลากหลายของความรู้ในหมวดหมู่ของตัวควบคุมต่างๆ.....	44
ภาพประกอบ 29 ความหลากหลายของความรู้ในระบบตัวควบคุมต่างๆ ในโซนโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ.....	44
ภาพประกอบ 30 ความหลากหลายของความรู้ในหมวดหมู่ของตัวควบคุมต่างๆ สำหรับทั้งสองพื้นที่	45
ภาพประกอบ 31 การตอบสนองของสัญญาณควบคุมในตัวควบคุมของพื้นที่ที่ 1.....	46
ภาพประกอบ 32 การตอบสนองของสัญญาณควบคุมในตัวควบคุมของพื้นที่ที่ 2.....	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ด้วยระบบโรงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก จึงมีความจำเป็นต้องมีระบบการจัดการพื้นที่ [1] รวมไปถึงการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพ เพื่อควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการในปัจจุบัน ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่จะถูกแบ่งออกเป็นพื้นที่ควบคุมย่อยหลาย ๆ พื้นที่ แต่ละพื้นที่จะมีการควบคุมเป็นของระบบตัวเอง เพื่อช่วยให้ควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ ตอบสนองต่อความต้องการของแต่ละพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างสูงสุด ในส่วนของการเชื่อมโยงในแต่ละพื้นที่ จะกล่าวได้ว่าพื้นที่ควบคุมในแต่ละพื้นที่ที่มีการเชื่อมโยงกันผ่านสายส่งของสายไฟ (Tie-Line) [2] การเชื่อมโยงนี้ สามารถส่งผลได้ดังนี้ 1). สามารถแบ่งปันกำลังไฟฟ้า กล่าวได้คือพื้นที่ที่มีกำลังไฟฟ้ามาก สามารถส่งจ่ายไปยังพื้นที่ขาดแคลนได้ 2). เพิ่มประสิทธิภาพ กล่าวได้คือช่วยให้ใช้ทรัพยากรไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ทำให้เกิดความซับซ้อนและเพิ่มความยากลำบากในการรักษาความสมดุลและเสถียรภาพของระบบ 3). เสริมสร้างเสถียรภาพ ความหมายคือ กรณีเกิดปัญหาในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง พื้นที่อื่นสามารถช่วยจ่ายไฟฟ้า ปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของระบบ (Stability) ที่มีการผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ระบบไฟฟ้าที่ดีจะต้องสามารถกลับสู่สภาวะสมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพหลังจากเกิดการรบกวน การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control) หรือ AGC [3] เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า โดยช่วยให้ระบบสามารถปรับการผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างต่อเนื่อง [4] การควบคุมระบบไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมความถี่-โหลด (Load-Frequency Control) หรือ LFC [5] ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถปรับการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องกับการใช้งานอย่างเชี่ยวชาญและมีความเสถียรภาพในระยะยาว การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นหัวใจสำคัญในการดำเนินงาน มีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้ 1) ความเพียงพอของกำลังไฟฟ้า กล่าวได้ว่า ควบคุมให้การจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความเพียงพอต่อความต้องการของโหลด และป้องกันไฟฟ้าดับ 2) ความน่าเชื่อถือ กล่าวได้ว่า รักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ป้องกันปัญหาไฟฟ้าตก ไฟฟ้ากระชาก 3) คุณภาพ กล่าวได้ว่า รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ 1) การเปลี่ยนแปลงของโหลด 2) ความล้มเหลวของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 3) การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ปัญหาความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า กำลังสามารถแก้ไขได้โดยการควบคุมความถี่ (Frequency Control) ผ่านการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต (Output Power) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ที่กำหนด การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อบรรลุผล ดังต่อไปนี้ 1) ค่าคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว (Steady State Error) [6] ของระบบมีค่าเท่ากับศูนย์ในสายส่งเชื่อมต่อขณะที่ความถี่มีค่าเบี่ยงเบน หมายความว่าระบบจะทำงานที่จุดสมดุลโดยไม่มีความผิดพลาดคงค้างในสายส่ง 2) มีการควบคุมพฤติกรรมของระบบในสภาวะชั่วคราว (Transient) ให้เหมาะสม ระบบจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดและสถานการณ์อื่นๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ และ 3) ในสถานะอยู่ตัวระดับการดำเนินงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกกำหนดให้เหมาะสมตามเงื่อนไขของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ระบบจะปรับการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการของโหลดและประสิทธิภาพการส่งจ่าย

ที่ผ่านมา มีการพัฒนาเทคนิคการควบคุมหลายวิธีสำหรับการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมต่องร่วมกัน เทคนิคเหล่านี้มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงความตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) [7] และประสิทธิภาพของการควบคุม เทคนิคที่ได้รับความนิยม ได้แก่ 1) การป้อนกลับเชิงเส้น (Linear Feedback) [8, 9] คือ เป็นเทคนิคการควบคุมแบบคลาสสิกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เทคนิคนี้ใช้ข้อมูลเกี่ยวกับความถี่และกำลังไฟฟ้าเพื่อปรับการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการ เทคนิคนี้มีข้อดีคือใช้งานง่ายและเข้าใจง่าย แต่ประสิทธิภาพอาจไม่ดีเท่าเทคนิคอื่นๆ ในบางกรณี 2) การควบคุมที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Control) [10] เทคนิคนี้ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับระบบ สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด แต่มีความซับซ้อนสูงและต้องการข้อมูลเกี่ยวกับระบบมาก 3) การควบคุมระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Variable Structure Control) [11] เทคนิคนี้ใช้โครงสร้างการควบคุมที่เปลี่ยนแปลงตามสถานะของระบบ สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีและมีความยืดหยุ่นสูง แต่มีความซับซ้อนสูงและต้องการข้อมูลเกี่ยวกับระบบมาก ยังมีเทคนิคการควบคุมอื่นๆ อีกมากมาย เช่น การควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Control) [12] การควบคุมแบบอัจฉริยะ (Intelligent Control) ฯลฯ เทคนิคเหล่านี้มีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกันไป

การประยุกต์ใช้ฟัซซี่ลอจิกในงานทางวิศวกรรมศาสตร์ [13] งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมในหลายงานทางวิศวกรรมศาสตร์ นอกจากนี้ ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ยังเป็นทางเลือกที่ดีในการออกแบบ เนื่องจากความง่ายในการปรับค่าของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Functions) และกฎการควบคุม (Control Rules) แม้ว่าการเลือกค่าเหล่านี้อาจเป็นงานที่ซับซ้อนเนื่องจากความยุ่งยากในการออกแบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ นักออกแบบจึงต้องมีความชำนาญในการปรับค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการ

ควบคุม การออกแบบค่าเหล่านี้จะต้องใช้วิธีการที่เหมาะสม โดยการศึกษาระบบปฏิบัติหรือตัวควบคุมที่มีอยู่ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีสำหรับการปรับค่าของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุม เพื่อให้ค่าคลาดเคลื่อนในเอาต์พุตมีค่าต่ำที่สุดหรือสูงสุดของตัวบ่งชี้สมรรถนะโดยไม่ต้องใช้วิธีการทดลองผิดลองถูก

วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm: BA) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimization) ดังที่ได้กล่าวไว้ใน จึงถูกนำมาใช้ในการเลือกพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่าง ๆ ในอดีต ระบบไฟฟ้ากำลังใช้วิธีการควบคุมด้วยมนุษย์ เมื่อความถี่ในระบบสูงกว่าค่าพิกัด จะมีการลดกำลังการผลิตไฟฟ้า และหากต่ำกว่าค่าพิกัด จะต้องเพิ่มกำลังผลิต ทั้งหมดขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งวิธีการนี้มีข้อจำกัด ไม่คำนึงถึงจุดคุ้มทุน ดังนั้น การควบคุมอัตโนมัติจึงถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหา ในปัจจุบัน การออกแบบระบบควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิก ได้รับความนิยมนี เนื่องจากสามารถเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ และมีความยืดหยุ่นในการปรับกฎการควบคุมให้เหมาะสมได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) โดยนำมาต่อร่วมกับตัวควบคุม PID สององศาอิสระ (2DOF-PID Controller) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ส่งผลให้ระบบทำงานได้ดียิ่งขึ้น การควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกยังถูกใช้แพร่หลายในระบบควบคุมต่าง ๆ เพราะสามารถจัดการกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ซึ่งในหลายกรณีระบบควบคุมมักมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ฟัซซี่ลอจิกเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการจัดการกับระบบเหล่านี้

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ได้ถูกกล่าวถึง การวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของสองพื้นที่ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้าพลังน้ำและโรงไฟฟ้าพลังความร้อน โดยใช้เทคโนโลยีฟัซซี่ลอจิกร่วมกับตัวควบคุม 2DOF-PID การวิเคราะห์และการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID นี้ ได้ใช้วิธีฝูงผึ้งซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการช่วยให้ค่าอัตราขยายฟัซซี่ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และค่ากฎการควบคุมเหมาะสม เพื่อให้การดำเนินงานในระบบไฟฟ้าของทั้งสองพื้นที่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพสูง โดยใช้เทคโนโลยีและวิธีการที่ทันสมัยนี้ เป็นการทำให้ระบบไฟฟ้ามีความสามารถในการปรับความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างถูกต้องและสอดคล้อง และเป็นการลดปัญหาที่เกิดขึ้นในการรักษาความสมดุลและเสถียรภาพของระบบในระยะยาว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2-DOF PID สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้วิธีฟูงฝังในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิก 2-DOF PID สำหรับระบบโรงไฟฟ้ากำลังสองพื้นที่

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมทั้งหมด 4 ตัวควบคุม ได้แก่ พีไอดีแบบดั้งเดิม ตัวควบคุม PID สององศาอิสระ ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดี และตัวควบคุมฟuzzyลอจิก PID สององศาอิสระที่นำเสนอ

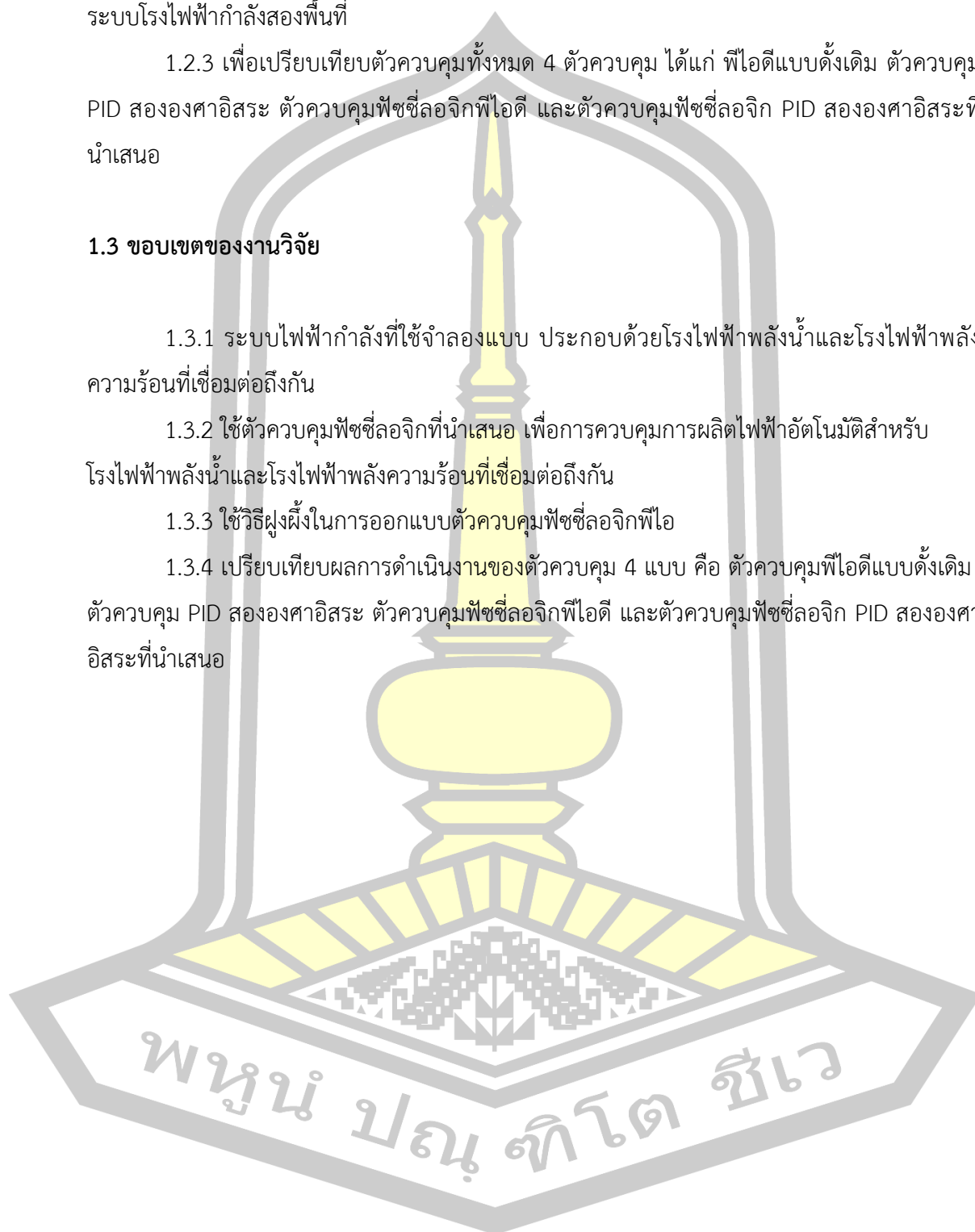
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้จำลองแบบ ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังน้ำและโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่เชื่อมต่อถึงกัน

1.3.2 ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่นำเสนอ เพื่อการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำและโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่เชื่อมต่อถึงกัน

1.3.3 ใช้วิธีฟูงฝังในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอ

1.3.4 เปรียบเทียบผลการดำเนินงานของตัวควบคุม 4 แบบ คือ ตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิม ตัวควบคุม PID สององศาอิสระ ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพีไอดี และตัวควบคุมฟuzzyลอจิก PID สององศาอิสระที่นำเสนอ



บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

บทนี้กล่าวถึง ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบการดำเนินงาน ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนและโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ข้อดีและข้อเสียของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภท แบบจำลองการดำเนินงานของโรงไฟฟ้าทั้งสอง คุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน แบบจำลองของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ตัวควบคุมที่นำเสนอและเปรียบเทียบ การหาค่าที่เหมาะสม คือ วิธีฟูงฟังก์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างประเทศ

2.1 ระบบโรงไฟฟ้า

2.1.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Thermal Power System)

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Thermal Power System) หมายถึง โรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าจากการใช้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน น้ำมัน หรือ ก๊าซธรรมชาติ โดยมีการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล และจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

ในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะถูกนำมาใช้ในการต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำแรงดันสูง ซึ่งจะนำไปหมุนกังหัน (Turbine) เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผลิตไฟฟ้าออกมา กระบวนการนี้เรียกว่า การผลิตไฟฟ้าจากไอน้ำ (Steam Power Generation)

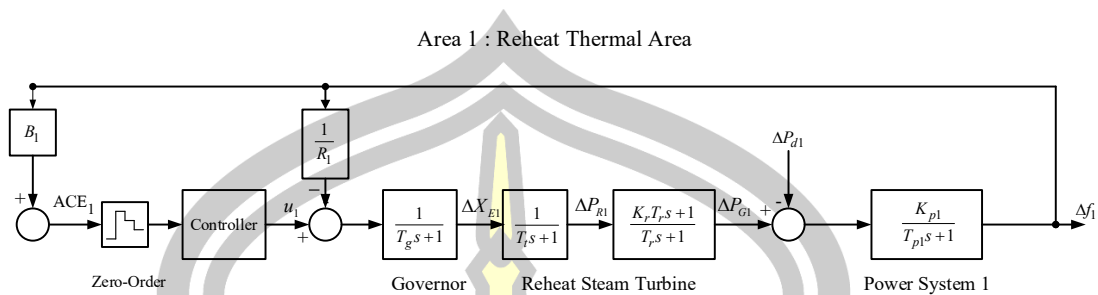
ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีข้อดีในเรื่องของการผลิตต่อเนื่อง เทคโนโลยีที่แพร่หลาย ต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำกว่า และความพร้อมใช้งานของเชื้อเพลิง แต่ข้อเสียสำคัญคือผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้ทรัพยากรฟอสซิลที่ไม่หมุนเวียน และผลกระทบต่อสุขภาพและทรัพยากรน้ำ

ตาราง 1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
ความพร้อมใช้งาน	- แหล่งเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติมีอยู่มาก และสามารถนำมาใช้ได้ทันที	- ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ไม่หมุนเวียนและจะหมดไปในอนาคต
การผลิตต่อเนื่อง	- โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ไม่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ	- ปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น CO ₂ และสารมลพิษอื่น ๆ ซึ่งส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสภาพอากาศ
ต้นทุนการก่อสร้างต่ำกว่า	- การสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใช้ต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนบางประเภท	- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการบำรุงรักษาสูงเนื่องจากต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมาก
เทคโนโลยีที่มีอยู่ทั่วไป	- มีเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาและใช้งานมานานแล้ว จึงง่ายต่อการออกแบบ ก่อสร้าง และบำรุงรักษา	- การจัดการของเสีย เช่น ถ่านหิน ต้องใช้พื้นที่และระบบการจัดการที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
ประสิทธิภาพสูง	- สามารถใช้ระบบเสริม เช่น การนำไอน้ำไปใช้ในกระบวนการอื่น ๆ (Cogeneration) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ	- โรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ต้องการพื้นที่ก่อสร้างและระบบขนส่งเชื้อเพลิงที่ซับซ้อน
ระยะเวลาการผลิตเร็ว	- การสร้างและติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนทำได้รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียนบางประเภท	- การใช้ทรัพยากรน้ำจำนวนมากในกระบวนการทำความเย็น ส่งผลให้เกิดการขาดแคลนน้ำในบางพื้นที่
การควบคุมง่าย	- สามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าได้ง่ายตามความต้องการของตลาด	- ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ เช่น ฝุ่นละอองและมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล

แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังความร้อน



ภาพประกอบ 1 แบบจำลองโครงสร้างโรงไฟฟ้าพลังความร้อน [14]

ภาพประกอบ 1 แสดงถึงส่วนที่สำคัญไว้ 3 ส่วน คือ ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) กังหันไอน้ำแบบให้ความร้อนซ้ำ (Reheat Steam Turbine) ตัวควบคุมความเร็ว (Governor) ป้อนโพลต์ที่ ΔP_{d1} สัญญาณการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่วิเคราะห์คือ Δf_1

2.1.2 โรงงานพลังงานน้ำ (Hydro Power System)

โรงไฟฟ้าพลังน้ำเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าสำคัญในหลายประเทศรวมถึงไทย โดยอาศัยการสร้างเขื่อนกั้นแม่น้ำเพื่อกักเก็บน้ำในระดับสูง จากนั้นนำน้ำที่มีแรงดันและปริมาณเพียงพอไปหมุนกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าซึ่งตั้งอยู่ที่ระดับต่ำกว่า กำลังผลิตและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นอยู่กับแรงดันและปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกังหัน

ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมีข้อดีในเรื่องของการผลิตพลังงานสะอาดที่ยั่งยืน ความเสถียรในการผลิต และต้นทุนการดำเนินงานที่ต่ำหลังการก่อสร้างเสร็จ แต่ข้อเสียสำคัญคือความต้องการการลงทุนเริ่มต้นสูง และอาจเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน

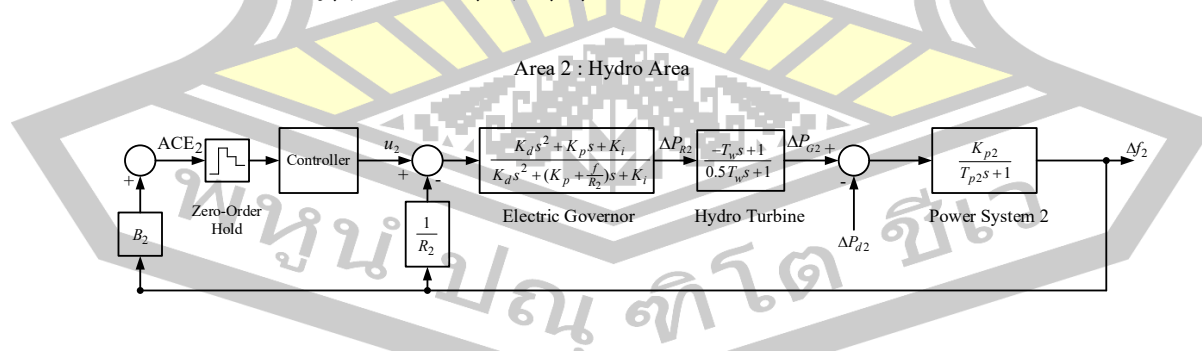
ตาราง 2 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
พลังงาน สะอาดและ ยั่งยืน	- ใช้พลังงานจากน้ำซึ่งเป็นพลังงาน หมุนเวียน ทำให้ไม่มีการปล่อยก๊าซ เรือนกระจกและลดมลพิษ	- ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ซึ่งอาจลดลง ในช่วงฤดูแล้งหรือเมื่อเกิดการ เปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (ต่อ)

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
ความเสถียรของการผลิต	- สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และมีความเสถียรสูง เมื่อมีแหล่งน้ำเพียงพอ	- ระบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำอาจไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เต็มประสิทธิภาพในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ
ต้นทุนการดำเนินงานต่ำ	- หลังการก่อสร้างเสร็จสิ้น ต้นทุนการดำเนินงานและบำรุงรักษาต่ำ เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ	- ต้นทุนการก่อสร้างสูง โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อน และระบบเก็บกักน้ำ
ความยืดหยุ่นในการผลิต	- สามารถปรับเปลี่ยนหรือลดการผลิตได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา	- ข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์ ต้องมีแหล่งน้ำธรรมชาติที่เพียงพอและเหมาะสมในการสร้างโรงไฟฟ้า
อายุการใช้งานยาวนาน	- โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมีอายุการใช้งานยาวนานถึงหลายสิบปี จึงเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าในระยะยาว	- ผลกระทบต่อระบบนิเวศ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศทางน้ำ และสัตว์น้ำที่อยู่ในบริเวณที่สร้างเขื่อน

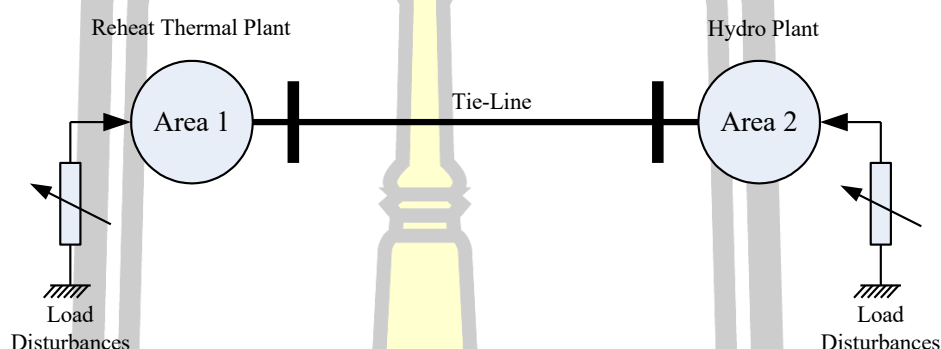
แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ



ภาพประกอบ 2 แบบจำลองโครงสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ [14]

ภาพประกอบ 2 มีส่วนประกอบที่สำคัญคือระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) กังหันน้ำ (Hydro Turbine) ตัวควบคุมความเร็วไฟฟ้า (Electric Governor) ป้อนโหลดที่ ΔP_{d2} สัญญาณการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่วิเคราะห์คือ Δf_2

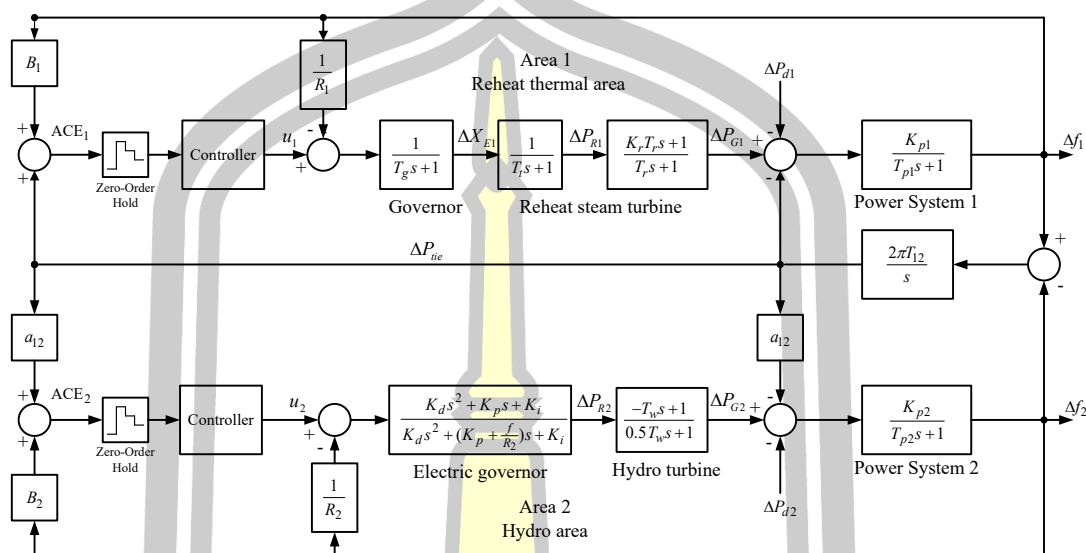
2.1.3 ระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Hydro with Thermal Area Power System)



ภาพประกอบ 3 แผนภาพของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน [14]

จากการแบ่งพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อแบ่งการควบคุมการผลิตไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ถึงกันด้วยสายส่งต่อเชื่อม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ได้ถูกเชื่อมโยงกันเป็นกลุ่ม การเชื่อมต่อกันของสองพื้นที่ของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 3 แบบจำลองของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันระหว่างระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ในการจำลองแบบดำเนินงานได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 4 แบบจำลองนี้ประกอบด้วยพื้นที่ที่ 1 คือส่วนของโรงโรงไฟฟ้าพลังความร้อน มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System 1) ใช้กังหันไอน้ำแบบให้ความร้อนซ้ำ มีตัวควบคุมความเร็วการทำงานแบบธรรมดา ป้อนโหลดที่ ΔP_{d1} สัญญาณการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่วิเคราะห์คือ Δf_1 พื้นที่ที่ 2 คือส่วนของโรงโรงไฟฟ้าพลังน้ำ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System 2) ใช้กังหันน้ำ ตัวควบคุมความเร็วไฟฟ้า ป้อนโหลดที่ ΔP_{d2} สัญญาณการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่วิเคราะห์คือ Δf_2 พื้นที่ทั้งสองถูกเชื่อมต่อถึงกันด้วยสายส่งเชื่อมต่อเพื่อวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้า ΔP_{tie} ถ้าเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเสถียรภาพสัญญาณทั้ง 3 ค่านี้จะมีค่าต่ำ เพราะถ้าสัญญาณเหล่านี้มีค่าสูงเกินไปจะส่งผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้ เฉพาะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่ดีเพื่อช่วยให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ ตัวควบคุมที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังนี้ คือตัวควบคุมพีชชีลลจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ โดยตัวควบคุมนี้สามารถปรับเปลี่ยน

ได้หลายชนิด แล้วแต่ผู้ออกแบบจะประยุกต์ใช้ ในส่วนเนื้อหาของการออกแบบตัวควบคุมได้กล่าวไว้ในบทที่ 3



ภาพประกอบ 4 แบบจำลองของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่องันระหว่างระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน [14]

ข้อดีและข้อเสียของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

การเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้าพลังน้ำและโรงไฟฟ้าพลังความร้อนมีข้อดีในเรื่องของการเพิ่มเสถียรภาพของระบบและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของต้นทุนสูงและความซับซ้อนในการจัดการและบำรุงรักษา

ตาราง 4 ข้อดีและข้อเสียของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
แหล่งพลังงาน	- ใช้แหล่งพลังงานที่หลากหลาย ช่วยเพิ่มความเสถียรในการผลิตไฟฟ้า	- การพึ่งพาทรัพยากรน้ำ อาจได้รับผลกระทบจากความแห้งแล้งหรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ
สิ่งแวดล้อม	- ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากใช้พลังงานน้ำที่เป็นพลังงานสะอาด	- ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ เช่น การเปลี่ยนแปลงการไหลของแม่น้ำ และสิ่งแวดล้อมรอบข้าง

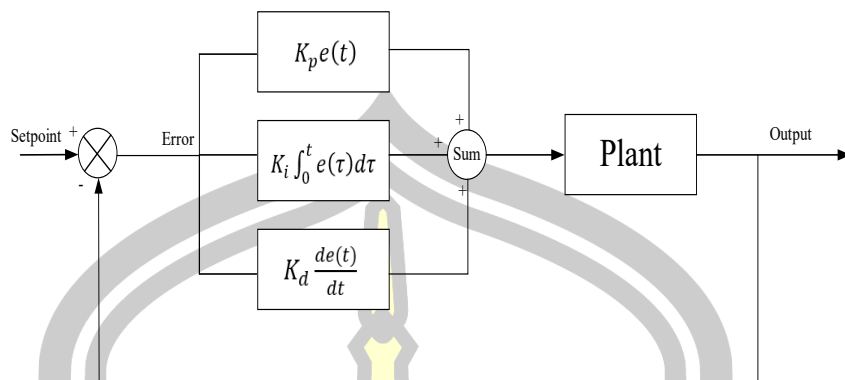
ตาราง 5 ข้อดีและข้อเสียของระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (ต่อ)

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า	- มีเสถียรภาพสูงขึ้นจากการทำงานร่วมกันระหว่างพลังน้ำและพลังความร้อน	- การจัดการการผลิตซับซ้อน เนื่องจากต้องควบคุมแหล่งพลังงานที่แตกต่างกัน
ความยืดหยุ่นในการผลิต	- พลังน้ำสามารถปรับเพิ่มหรือลดการผลิตได้เร็ว ในขณะที่พลังความร้อนให้การผลิตต่อเนื่อง	- ระบบพลังน้ำต้องพึ่งพาสภาพอากาศ และอาจได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น น้ำท่วม
ต้นทุน	- ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้ลดต้นทุนระยะยาวจากความผันผวนของราคาน้ำมัน	- ต้นทุนการก่อสร้างสูง เนื่องจากต้องสร้างโครงสร้างพื้นฐานทั้งพลังน้ำและพลังความร้อน
ประสิทธิภาพการผลิต	- การทำงานร่วมกันของทั้งสองระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าในระยะยาว	- การบำรุงรักษาสูง ต้องมีการดูแลรักษาทั้งระบบพลังน้ำและพลังความร้อนที่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายสูง

2.2 ระบบควบคุม

2.2.1 ระบบควบคุมพีไอดี (PID Controller System)

ระบบควบคุม PID (PID Controller System) เป็นหนึ่งในระบบควบคุมที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะในด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ ระบบนี้มีประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่า โดยประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ควบคุมแบบอัตราส่วน (Proportional) ควบคุมแบบการสะสม (Integral) และควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative) ซึ่งสามองค์ประกอบนี้ทำงานร่วมกันเพื่อให้ได้การควบคุมที่แม่นยำและเสถียร สามารถดูรูปแบบโครงสร้างดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) [15]

องค์ประกอบของระบบควบคุมพีไอดี

- การควบคุมแบบอัตราส่วน (Proportional Control หรือ K_p)

องค์ประกอบนี้ทำหน้าที่ตอบสนองต่อค่าความคลาดเคลื่อน (Error) โดยการคูณค่าความคลาดเคลื่อนด้วยค่าคงที่ K_p (Proportional Gain) การควบคุมแบบ P ช่วยลดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงและค่าที่ต้องการ แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถลดความคลาดเคลื่อนได้จนถึงศูนย์

- การควบคุมแบบการสะสม (Integral Control หรือ K_i)

องค์ประกอบนี้ทำหน้าที่สะสมค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงเวลา เพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการควบคุมแบบ P ค่าคงที่ K_i (Integral Gain) จะถูกใช้ในการคูณกับการสะสมของค่าความคลาดเคลื่อน การควบคุมแบบ I ช่วยให้ระบบสามารถลดความคลาดเคลื่อนจนถึงศูนย์ แต่หากตั้งค่ามาไม่ถูกต้อง อาจทำให้เกิดการสั่นไหวหรือโอเวอร์ชูต (Overshoot)

- การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control หรือ K_d)

องค์ประกอบนี้ทำหน้าที่ตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ช่วยลดการสั่นไหวและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบ ค่าคงที่ K_d (Derivative Gain) จะถูกใช้ในการคูณกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อน การควบคุมแบบ D ช่วยลดเวลาในการตอบสนองและเพิ่มความเสถียรให้กับระบบ

สมการของระบบควบคุมพีไอดี

สมการทั่วไปของระบบควบคุม PID สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

- เมื่อ $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุมที่ส่งไปยังระบบ (Input)
 $e(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ต้องการและค่าจริง
 K_p คือ ตัวคูณสำหรับส่วน Proportional
 K_i คือ ตัวคูณสำหรับส่วน Integral
 K_d คือ ตัวคูณสำหรับส่วน Derivative

ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี

ตาราง 6 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี

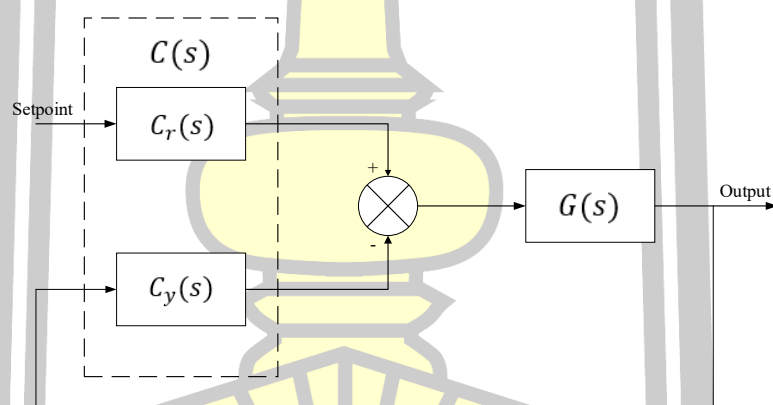
หัวข้อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ความเรียบง่าย	- โครงสร้างของระบบ PID ง่ายต่อการออกแบบและปรับแต่ง เหมาะสำหรับการควบคุมระบบทั่วไป	- ขาดความยืดหยุ่นในการปรับแต่งการตอบสนองต่อ setpoint และ disturbance อย่างอิสระ
ความสามารถในการควบคุม	- สามารถควบคุมได้ดีในหลายระบบ ด้วยการปรับสัดส่วน Proportional , Integral , และ Derivative	- ไม่สามารถปรับค่าการตอบสนองต่อ setpoint และ disturbance แยกกันได้
ลดความผิดพลาดใน steady state	- ส่วนสัดส่วนเชิงอินทิกรัล (Integral) สามารถลดความผิดพลาดใน steady state ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ	- อาจทำให้การตอบสนองช้าลง หรือเกิดการสั่นได้ หากปรับพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม
ลดการสั่นและปรับปรุงความเสถียร	- ส่วนสัดส่วนเชิงดิฟเฟอเรนเชียล (Derivative) ช่วยลดการสั่นและทำให้ระบบมีความเสถียรขึ้น	- การตั้งค่า Derivative ไม่เหมาะสมอาจทำให้ระบบเกิดการสั่นหรือไม่เสถียรได้
การใช้งานแพร่หลาย	- ระบบ PID ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการควบคุมหลาย	- อาจไม่เพียงพอสำหรับระบบที่ซับซ้อนหรือระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อย ๆ

ตาราง 7 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี (ต่อ)

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ต้นทุนต่ำ	- การออกแบบและติดตั้งระบบ PID ทำได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับระบบควบคุมที่ซับซ้อนกว่า	- อาจไม่เหมาะสมกับระบบที่มี disturbance สูง หรือระบบที่ต้องการความยืดหยุ่นในการปรับแต่งพารามิเตอร์

2.2.2 ระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ (2DOF-PID Controller System)

ระบบควบคุมแบบพีไอดีที่มีสององศาอิสระ (2DOF-PID) เป็นการขยายและพัฒนา ระบบควบคุมพีไอดีแบบทั่วไปให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดยระบบ 2DOF-PID ช่วยให้สามารถควบคุม กระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านการตอบสนองที่เร็วและความแม่นยำในการลดความ ผิดพลาดจากการควบคุมที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรในระบบ โครงสร้างของตัวควบคุมจะถูกแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 บล็อกโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ [16]

องค์ประกอบของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ

- สัดส่วนเชิงสัดส่วน (Proportional Gain หรือ K_p)

ส่วนสัดส่วนเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการตอบสนองของระบบเมื่อมีความผิดพลาด (Error) ระหว่างค่า setpoint และค่าที่วัดได้ (Process Variable) โดยค่าควบคุมที่เกิดจากส่วนนี้จะ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความผิดพลาด ยิ่งค่า K_p สูง การตอบสนองของระบบจะยิ่งเร็วขึ้น แต่ถ้าสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการสั่น (oscillation) หรือความไม่เสถียรในระบบได้ [16]

- สัดส่วนเชิงอินทิกรัล (Integral Gain หรือ K_i)

สัดส่วนอินทิกรัลใช้ในการลดความผิดพลาดในระยะยาว (steady-state error) โดยการสะสมความผิดพลาดในช่วงเวลาหนึ่งและปรับค่าออกให้กับตัวควบคุมเพื่อแก้ไขความผิดพลาดอย่างต่อเนื่อง ค่า K_i ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำให้ค่าที่วัดได้ตรงกับค่า setpoint แต่การปรับที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการตอบสนองช้าหรือการสั่น

- สัดส่วนเชิงดิฟเฟอเรนเชียล (Derivative Gain หรือ K_d)

ส่วนดิฟเฟอเรนเชียลใช้เพื่อลดการสั่นของระบบ โดยทำการคาดการณ์แนวโน้มของความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในอนาคต การเพิ่ม K_d จะช่วยให้ระบบมีการตอบสนองที่ราบรื่นขึ้นและช่วยลดการสั่น

- ตัวแปรน้ำหนักของ Setpoint (β)

ใน 2DOF-PID, β เป็นตัวแปรที่กำหนดน้ำหนักของสัญญาณ setpoint ที่ใช้ในสัดส่วนเชิงสัดส่วน การปรับค่า β จะช่วยในการควบคุมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของ setpoint โดยตรง

- ตัวแปรน้ำหนักของ Disturbance (γ)

γ เป็นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการตอบสนองของสัดส่วนเชิงสัดส่วนต่อ disturbance การปรับค่า γ จะช่วยให้ระบบสามารถลดผลกระทบจากความผิดพลาดที่เกิดจาก disturbance ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- ฟิลเตอร์ความถี่ต่ำ (Low-pass Filter หรือ N)

ระบบ 2DOF-PID มักใช้ฟิลเตอร์ความถี่ต่ำในส่วนของดิฟเฟอเรนเชียล เพื่อกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่อาจเกิดจากการวัดค่าหรือ disturbance ซึ่งช่วยลดปัญหาการตอบสนองที่ไม่เสถียรจาก noise

- สัญญาณป้อนกลับ (Feedback Loop)

เช่นเดียวกับระบบ PID ทั่วไป ระบบ 2DOF-PID จะมีการป้อนกลับของข้อมูลกระบวนการ (Process Variable) มาเปรียบเทียบกับ setpoint เพื่อคำนวณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและทำการปรับค่าออกเพื่อควบคุมกระบวนการให้เหมาะสม

สมการของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ

จากภาพประกอบ 6 สามารถเขียนสมการแสดงได้ดังสมการ 2 และ 3 ดังนี้

$$C_r = \beta \cdot K_p + \frac{K_i}{s} + \gamma \cdot \frac{K_d}{N+1} \cdot s \quad (2)$$

$$C_y = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d}{N+1} \cdot s \quad (3)$$

ดังนั้น สมการในรูปแบบทั่วไปจะได้ดังสมการ 4

$$u = K_p(a \cdot r - y) + K_i \frac{1}{s} (r - y) + K_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} (b \cdot r - y) \quad (4)$$

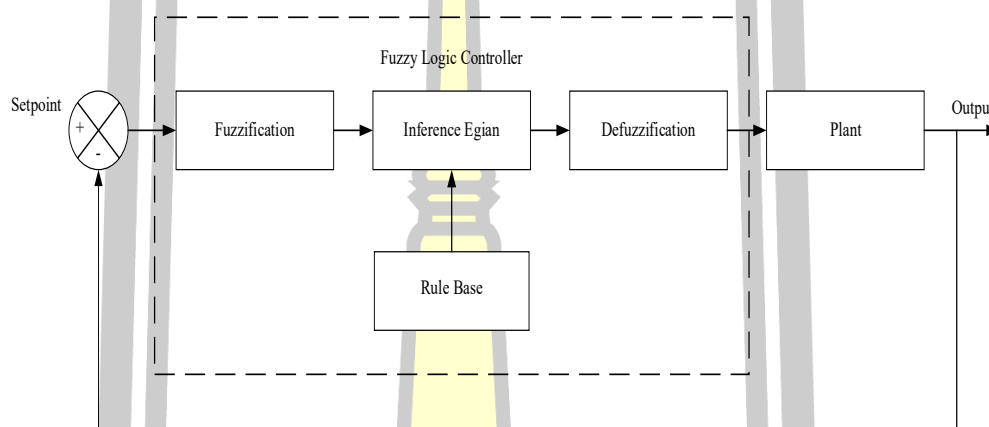
ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ

ตาราง 8 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ความยืดหยุ่น	- สามารถปรับการตอบสนองต่อ setpoint และ disturbance ได้อย่างอิสระ	- มีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้น เช่น β และ γ ทำให้ซับซ้อนขึ้น
การลดผลกระทบจาก disturbance	- สามารถลดผลกระทบจาก disturbance ได้อย่างมีประสิทธิภาพ	- ไม่จำเป็นหากระบบมี disturbance น้อย
การตอบสนอง	- การตอบสนองต่อ setpoint รวดเร็วและแม่นยำ	- การปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมต้องใช้การคำนวณและการจำลองที่ซับซ้อน
ความเสถียรของระบบ	- ลดการสั่นและเพิ่มเสถียรภาพด้วยพารามิเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียลและฟีดเตอร์ความถี่ต่ำ	- อาจต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นในการคำนวณและจำลองระบบ
ความเหมาะสมในการใช้งาน	- เหมาะกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง setpoint บ่อยหรือเจอ disturbance บ่อย	- อาจเกินความจำเป็นสำหรับระบบที่ disturbance ต่ำ หรือต้องการการควบคุมแบบพื้นฐาน
การออกแบบ	- เพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมในกระบวนการที่ซับซ้อน เช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง	- การออกแบบและปรับแต่งระบบต้องใช้ความรู้และประสบการณ์สูง

2.2.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller System)

หลักการของ FLC นั้นได้รับความนิยมเพราะสามารถจัดการกับระบบที่ซับซ้อน ซึ่งไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แน่นอนได้ ระบบ FLC สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมที่ต้องการการตัดสินใจที่ยืดหยุ่นและคำนึงถึงปัจจัยที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากนั้น ตัวควบคุมลอจิกฟัซซี่ก็ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงเรื่อยมา โดยมีการนำไปใช้ในหลากหลายสาขา เช่น หุ่นยนต์, ยานยนต์, และการควบคุมพลังงาน เป็นต้น



ภาพประกอบ 7 บล็อกโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) [17]

จากภาพประกอบ 7 ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) ใช้หลักการของฟัซซี่เซต (Fuzzy Sets) และฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีความไม่แน่นอนหรือความซับซ้อนสูง

องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก [17]

- กระบวนการฟัซซี่ฟิเคชัน (Fuzzification)

เป็นขั้นตอนแรกของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ที่ใช้ในการแปลงข้อมูลเชิงตัวเลข (Crisp Values) ที่ได้จากเซ็นเซอร์หรืออินพุตจากระบบจริงให้กลายเป็นค่าฟัซซี่ (Fuzzy Values) ข้อมูลนี้จะถูกแปลงให้สอดคล้องกับฟัซซี่เซต ซึ่งแต่ละเซตจะถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function) เช่น เซต "สูง", "ต่ำ", หรือ "ปานกลาง"

- ตัวอนุมานฟัซซี่ (Inference Engine)

ตัวอนุมานฟัซซี่ใช้ในการประมวลผลกฎต่าง ๆ ในฐานกฎ (Rule Base) เพื่อกำหนดค่าการควบคุมของระบบ โดยตัวอนุมานจะใช้ข้อมูลที่ถูกฟัซซี่ฟิเคชันแล้ว เพื่าคำนวณผลลัพธ์ที่เหมาะสมตามกฎที่มีอยู่

ฐานกฎฟัซซี่ (Rule Base) ฐานกฎประกอบด้วยกฎเชิงตรรกะ (If-Then Rules) ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อกำหนดวิธีการตอบสนองของระบบตามข้อมูลอินพุตที่ได้รับ กฎเหล่านี้อาจถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญหรือได้รับจากประสบการณ์ของระบบ เช่น

If อุณหภูมิ "สูง" and ความดัน "ต่ำ" Then ปรับค่าควบคุมลง

- กระบวนการดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification)

ขั้นตอนนี้เป็นการแปลงค่าฟัซซี่ (Fuzzy Values) ที่ได้จากการคำนวณกลับมาเป็นค่าตัวเลขเชิงปริมาณ (Crisp Values) ที่สามารถใช้ในการควบคุมจริงได้ กระบวนการนี้ทำให้ข้อมูลที่ได้จากฟัซซี่ลอจิกสามารถนำไปใช้ในการปรับค่าเอาต์พุตที่เป็นตัวควบคุมระบบจริง

- ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function)

ฟังก์ชันสมาชิกเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแปลงค่าตัวเลขเชิงปริมาณให้เป็นค่าฟัซซี่ โดยกำหนดระดับของความเป็นสมาชิกของอินพุตในฟัซซี่เซต เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular), ฟังก์ชัน trapezoidal (Trapezoidal) ซึ่งจะบอกว่าค่าตัวเลขเชิงปริมาณนั้นมีระดับการเป็นสมาชิกของแต่ละเซตมากน้อยเพียงใด

- ตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต (Input and Output Variables)

ตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของระบบฟัซซี่จะถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า โดยตัวแปรอินพุตอาจเป็นค่าที่วัดได้จากระบบ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือความเร็ว ส่วนตัวแปรเอาต์พุตคือค่าที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ เช่น อัตราการจ่ายวาล์วหรือแรงบิดของมอเตอร์

ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมฟัซซี่

ตาราง 9 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมฟัซซี่

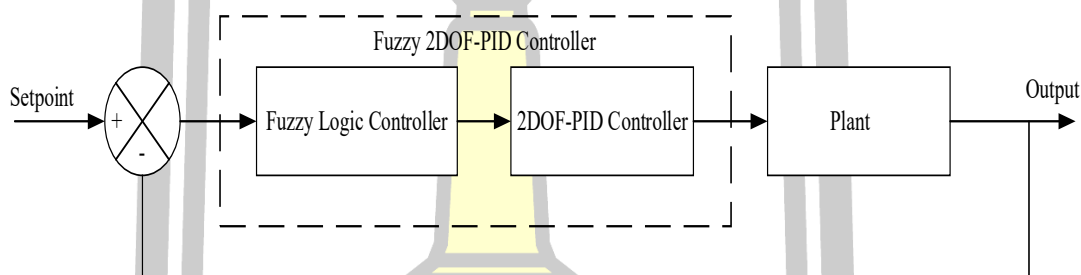
หัวข้อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
การจัดการกับความไม่แน่นอน	- ระบบฟัซซี่ลอจิกสามารถจัดการกับข้อมูลที่ไม่แน่นอนหรือไม่ชัดเจนได้ดี ทำให้เหมาะกับระบบที่ซับซ้อน	- ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำแบบเชิงตัวเลขเหมือนกับการควบคุมแบบคลาสสิก เช่น PID

ตาราง 10 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมฟuzzy (ต่อ)

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ความยืดหยุ่น	- ระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับปรุงหรือเพิ่มกฎ (rules) ในฐานกฎได้ง่ายตามสถานการณ์หรือการเปลี่ยนแปลง	- การออกแบบระบบต้องใช้ความเชี่ยวชาญในการสร้างกฎที่เหมาะสมและครอบคลุมทุกสถานการณ์
ใช้งานง่าย	- ง่ายต่อการออกแบบในแง่ของตรรกะ (logical) และไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน	- การออกแบบฐานกฎที่เหมาะสมและฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function) ต้องการการปรับแต่งที่ละเอียด
ความทนทานต่อความคลาดเคลื่อน	- ระบบสามารถทำงานได้ดีแม้ข้อมูลอินพุตไม่สมบูรณ์หรือมีความคลาดเคลื่อน	- การตั้งค่าฟังก์ชันสมาชิกผิดพลาดอาจทำให้ระบบควบคุมไม่เสถียรและประสิทธิภาพต่ำ
การจำลองพฤติกรรมเชิงมนุษย์	- ระบบฟuzzyลอจิกสามารถจำลองกระบวนการตัดสินใจแบบมนุษย์ได้ดี ทำให้เหมาะกับการควบคุมแบบอัตโนมัติ	- ไม่สามารถใช้งานได้ดีในสถานการณ์ที่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำหรือรวดเร็วสูง
การพัฒนาระบบอัตโนมัติ	- สามารถใช้พัฒนาเป็นระบบอัตโนมัติในกระบวนการต่าง ๆ ได้ดี เช่น ระบบควบคุมในโรงงาน	- ไม่สามารถใช้แทนที่การควบคุมแบบ linear หรือ non-linear ได้ในทุกสถานการณ์ โดยเฉพาะกรณีที่ซับซ้อนมาก
ประหยัดเวลาในการพัฒนา	- ไม่ต้องใช้สมการหรือการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ทำให้ลดเวลาการพัฒนาระบบลงได้	- ขาดความสามารถในการปรับแต่งเชิงตัวเลขเมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบอื่น เช่น PID หรือ 2DOF-PID

2.2.4 ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ (Fuzzy Logic 2DOF-PID Controller System)

ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ (Fuzzy Logic 2DOF-PID) เป็นการผสมผสานระหว่างหลักการควบคุมของ PID controller แบบสององศาอิสระ (2DOF-PID) เข้ากับ Fuzzy Logic เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการควบคุมและปรับปรุงการตอบสนองของระบบในการจัดการกับความไม่แน่นอนและความซับซ้อนของระบบที่ควบคุม องค์ประกอบของระบบนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ PID controller แบบสององศาอิสระและระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก โดยระบบทำงานในลักษณะที่ฟัซซี่ลอจิกถูกนำมาใช้ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของ PID controller เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองได้ดียิ่งขึ้นในสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อนสูง



ภาพประกอบ 8 บล็อกโครงสร้างระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ [18]

องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ

- Fuzzy Logic Controller

ระบบฟัซซี่ลอจิกจะใช้ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ระบบทำงานอยู่ โดยฟัซซี่ลอจิกจะใช้ฐานกฎ (rule base) ที่กำหนดไว้ในกาตัดสินใจ

- 2DOF-PID Controller

PID แบบสององศาอิสระจะถูกใช้งานเพื่อให้สามารถควบคุมการตอบสนองต่อ setpoint และ disturbance ได้อย่างแยกจากกัน โดยสามารถปรับค่า β และ γ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมระบบ

- การฟัซซี่ฟิเคชัน (Fuzzification)

ข้อมูลอินพุตที่ได้รับจากเซ็นเซอร์หรือกระบวนการควบคุมจะถูกแปลงให้เป็นค่าฟัซซี่ผ่านฟังก์ชันสมาชิกเพื่อทำการประมวลผลในระบบฟัซซี่ลอจิก

- ฐานกฎฟัซซี่ (Rule Base)

ฐานกฎในระบบฟัซซี่จะกำหนดวิธีการปรับค่า PID ให้เหมาะสมตามสภาวะของระบบ เช่น การเพิ่มหรือลดค่าพารามิเตอร์ ตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

- การดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของระบบฟัซซี่จะถูกแปลงกลับจากค่าฟัซซี่ให้เป็นค่าตัวเลข (crisp value) เพื่อนำไปใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของ PID controller

ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ

ตาราง 11 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ความแม่นยำในการควบคุม	- ฟัซซี่ลอจิกช่วยในการปรับค่าพารามิเตอร์ของ PID ให้เหมาะสมตามสถานการณ์จริง ทำให้การควบคุมมีความแม่นยำและเสถียรมากขึ้น	- การปรับแต่งพารามิเตอร์และการออกแบบกฎฟัซซี่ซับซ้อนและต้องการความเชี่ยวชาญสูงในการกำหนดฐานกฎที่เหมาะสม
จัดการความไม่แน่นอนได้ดี	- ระบบนี้มีความสามารถในการจัดการกับความไม่แน่นอนของระบบที่ควบคุม เช่น disturbance หรือการเปลี่ยนแปลงของระบบได้ดี	- อาจไม่เหมาะกับระบบที่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำมากในกรณีที่ไม่มี disturbance หรือความซับซ้อนสูงเกินไป
ความยืดหยุ่นสูง	- สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ได้อย่างยืดหยุ่นผ่านกฎของฟัซซี่ ทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดี	- ระบบฟัซซี่อาจเพิ่มความซับซ้อนในการคำนวณและการออกแบบเมื่อระบบมีความซับซ้อนสูงหรือตัวแปรหลายตัว
การแยกควบคุม setpoint และ disturbance	- 2DOF-PID สามารถแยกควบคุมการตอบสนองต่อ setpoint	- ความซับซ้อนในการคำนวณและการปรับแต่งตัวแปร

ตาราง 12 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบฟuzzyลอจิกพีไอดี แบบสององศาอิสระ (ต่อ)

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ปรับปรุงประสิทธิภาพในระบบที่ซับซ้อน	- ระบบนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมในกรณีที่ระบบมีความซับซ้อน เช่น ระบบหลายตัวแปรหรือระบบไม่เชิงเส้น	- ต้องการทรัพยากรคอมพิวเตอร์มากขึ้น เนื่องจากการคำนวณจากทั้ง PID และฟuzzyลอจิกอย่างต่อเนื่องในเวลาเดียวกัน
ประสิทธิภาพการควบคุมที่เสถียร	- ฟuzzyลอจิกช่วยลดการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วในพารามิเตอร์ PID ซึ่งทำให้การควบคุมมีความเสถียรมากขึ้น	- การออกแบบระบบที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้การตอบสนองของระบบช้าหรือไม่เสถียรหากไม่ได้ปรับแต่งพารามิเตอร์อย่างถูกต้อง

2.3 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

2.3.1 วิธีฝูงผึ้ง (Bee Optimization Algorithm)

วิธีฝูงผึ้ง (Bee Algorithm) เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ที่ได้แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการหาน้ำหวานของผึ้งในธรรมชาติ กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการแบ่งผึ้งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ผึ้งสอดแนม (Scout Bee) และ ผึ้งงาน (Employee Bee) โดยผึ้งแต่ละประเภทมีหน้าที่เฉพาะเจาะจงในการหาค่าตอบที่ดีที่สุด ซึ่งคำตอบในที่นี้ถูกแทนด้วย "แหล่งน้ำหวาน" ที่มีคุณภาพ [19]

- ผึ้งสอดแนม (Scout Bee)

หน้าที่หลักของผึ้งสอดแนมคือการค้นหาแหล่งน้ำหวานใหม่ ๆ ในพื้นที่ที่กำหนดไว้ (Search Space) ผึ้งสอดแนมจะทำการค้นหาโดยใช้วิธีการสุ่ม เพื่อหาแหล่งน้ำหวานหรือคำตอบที่เป็นไปได้ในบริเวณต่าง ๆ ของพื้นที่นั้น เมื่อพบแหล่งน้ำหวานที่น่าสนใจแล้ว ผึ้งสอดแนมจะบินกลับไปยังรังของผึ้งเพื่อแจ้งให้ผึ้งตัวอื่น ๆ ได้รู้

- การสื่อสารของผึ้ง

ผึ้งสอดแนมเมื่อกลับมาที่รังผึ้ง จะใช้การเต้นในลักษณะต่าง ๆ (Waggle Dance) เป็นสื่อกลางในการบอกผึ้งงานถึงปริมาณน้ำหวาน ทิศทาง และระยะทางของแหล่งน้ำหวานที่ค้นพบ การเต้นเหล่านี้นี้เป็นรูปแบบหนึ่งของการสื่อสารที่ช่วยให้ผึ้งงานสามารถรู้ถึงคุณค่าของแหล่งน้ำหวานนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- ผึ้งงาน (Employee Bee)

หลังจากที่ผึ้งงานได้รับข้อมูลจากการเต้นของผึ้งสอดแนม ผึ้งงานจะออกไปขนน้ำหวานจากแหล่งน้ำหวานที่ผึ้งสอดแนมค้นพบ โดยจำนวนผึ้งงานที่ไปทำงานในแต่ละแหล่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหวานและระยะทาง หากแหล่งน้ำหวานมีปริมาณมาก ผึ้งงานก็จะถูกส่งไปมากขึ้น แต่หากแหล่งน้ำหวานมีน้อย จำนวนผึ้งงานที่ไปก็จะน้อยลงตามไปด้วย

การทำงานเช่นนี้ในทางปฏิบัติ คือการค้นหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ในปัญหาที่ซับซ้อน โดยใช้การกระจายตัวของผึ้งในการค้นหาคำตอบที่หลากหลายพร้อมกัน และปรับตัวตามความคุ้มค่าของคำตอบที่พบ นอกจากนี้ วิธีฝูงผึ้งยังมีการนำไปใช้ในหลายสาขา เช่น วิศวกรรมระบบควบคุม การหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด หรือการแก้ปัญหาเชิงคณิตศาสตร์

ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้ง ต้องกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของวิธีฝูงผึ้ง ดังนี้

NC คือ จำนวนครั้งของการทำซ้ำ

n คือ จำนวนของผึ้งสอดแนม

m คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมาก จากการหาของผึ้งสอดแนม n_s ตัว

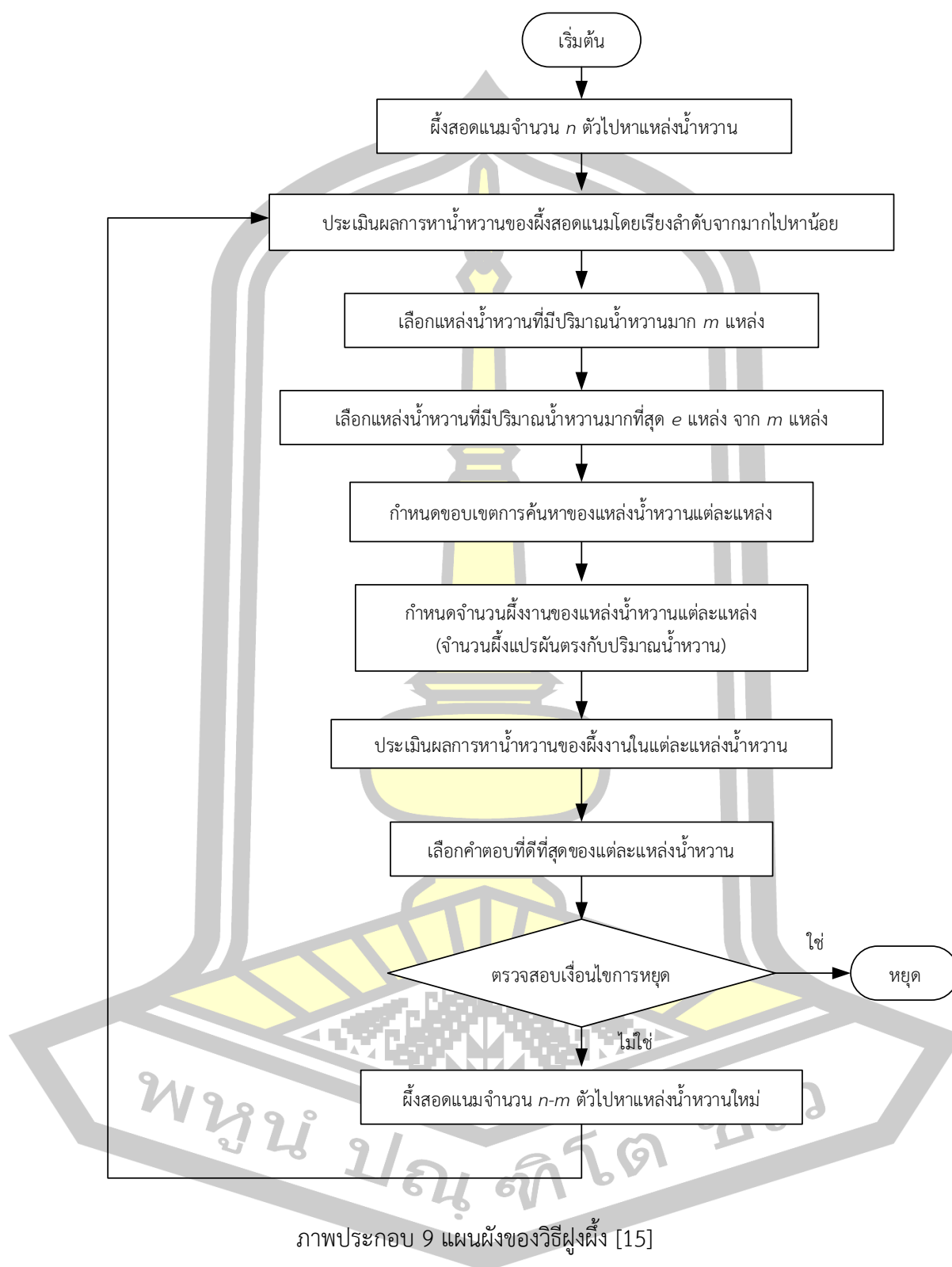
e คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมากที่สุด จากที่เลือกแล้ว m แหล่ง

n_{ep} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน e แหล่ง

n_{sp} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน $m-e$ แหล่ง

n_{gh} คือ ขนาดของขอบเขตในการค้นหาของแหล่งน้ำหวานแต่ละแหล่ง

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 9 แผนผังของวิธีฝัง [15]

ขั้นตอนการทำงานของวิธีผึ้งผึ้ง

ขั้นตอนที่ 1 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน n ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ $NC = 0$

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี m คำตอบ

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

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขอบเขตในการค้นหาบริเวณรอบ ๆ คำตอบ m คำตอบ

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน n_{ep} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ e คำตอบ และ ผึ้งงานจำนวน n_{sp} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ $m-e$ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

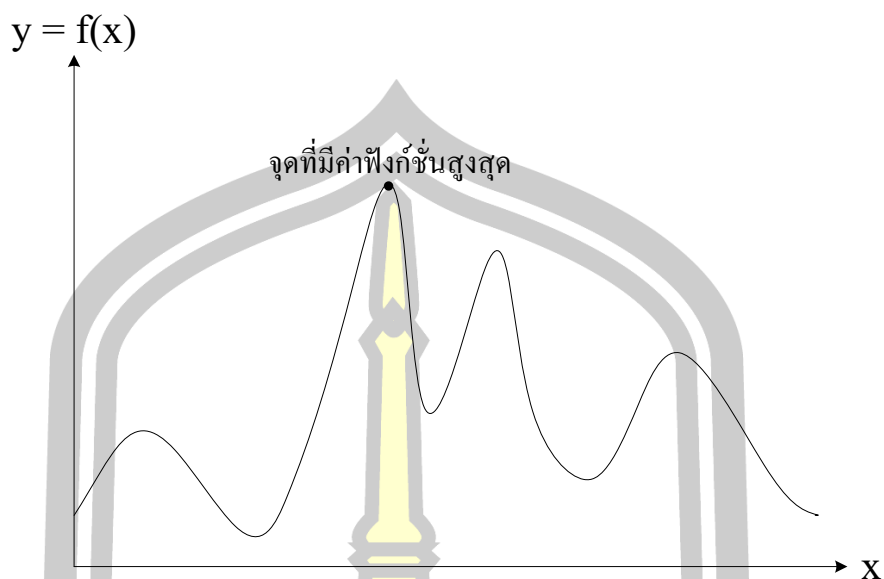
ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ $NC=NC+1$

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดให้ผึ้งสอดแนมจำนวน $n-m$ ตัว ค้นหาคำตอบใหม่

ขั้นตอนที่ 10 ได้คำตอบใหม่จากผึ้งสอดแนม แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2 ใหม่

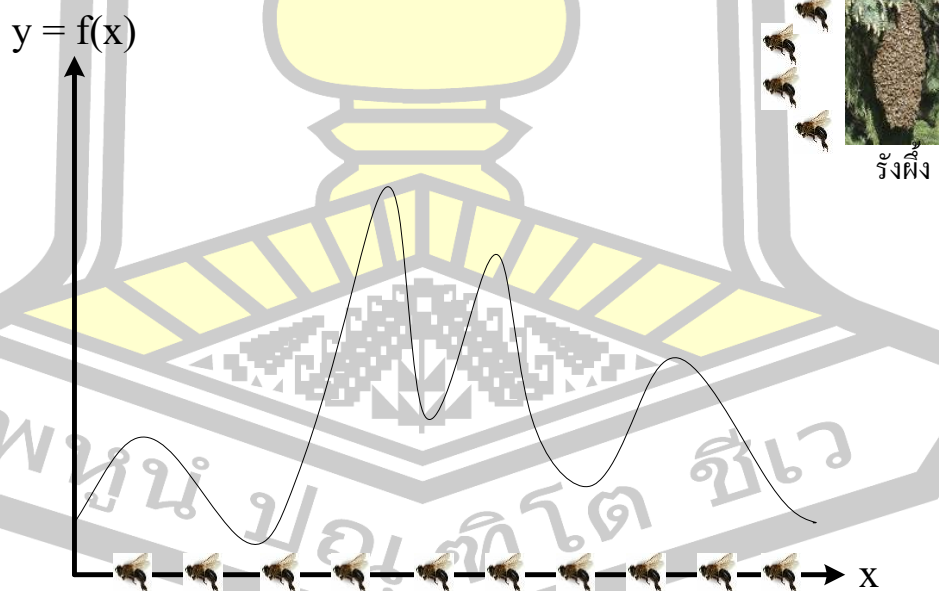
ตัวอย่างการใช้วิธีผึ้งผึ้งแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

วิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm) ถูกประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problems) โดยใช้หลักการเลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของผึ้ง ในที่นี้จะอธิบายพร้อมตัวอย่างเกี่ยวกับการหาค่ามากที่สุด (Maximum) ของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะซับซ้อน จะถูกแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 ฟังก์ชันในทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการหาค่าสูงสุด [14]

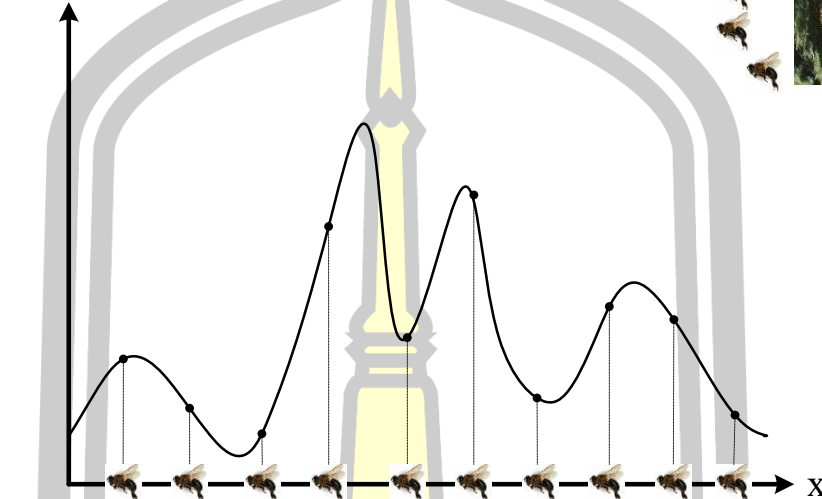
ขั้นตอนที่ 1 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน $n=10$ ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคืออยู่ในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ และกำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ $NC = 0$ แสดงในภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ผึ้งสอดแนม $n = 10$ ตัว สุ่มหาคำตอบเริ่มต้น [14]

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

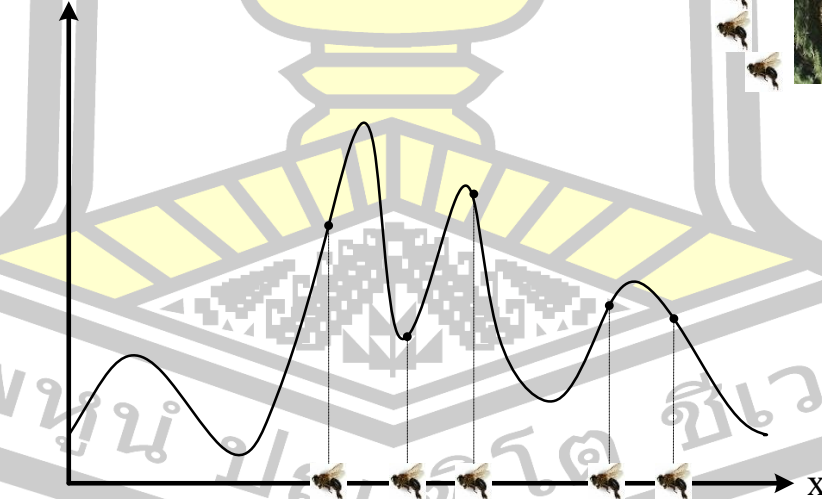
$$y = f(x)$$



ภาพประกอบ 12 ประเมินผลของคำตอบ แล้วจัดเรียงลำดับจากมากไปน้อยของฝูงผึ้ง [14]

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี $m=5$ คำตอบ

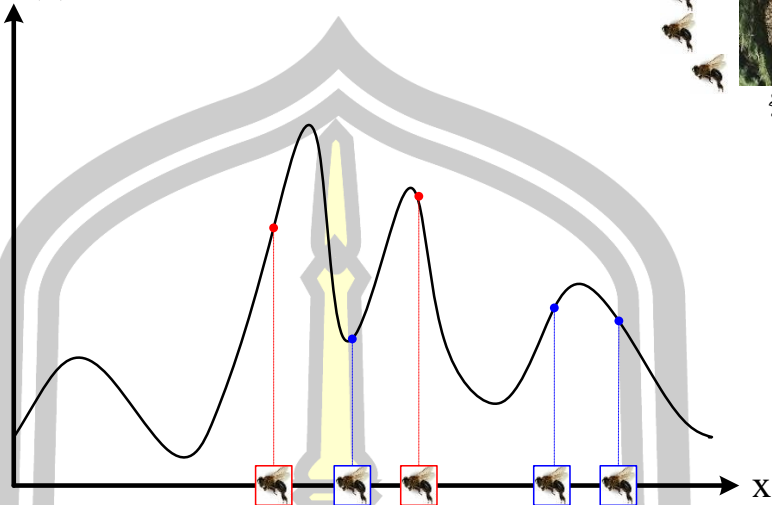
$$y = f(x)$$



ภาพประกอบ 13 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี $m=5$ คำตอบ [14]

ขั้นตอนที่ 4 คัดแยกคำตอบ $m=5$ คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด $e=2$ คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ด้อยลงมา $m-e=3$ คำตอบ

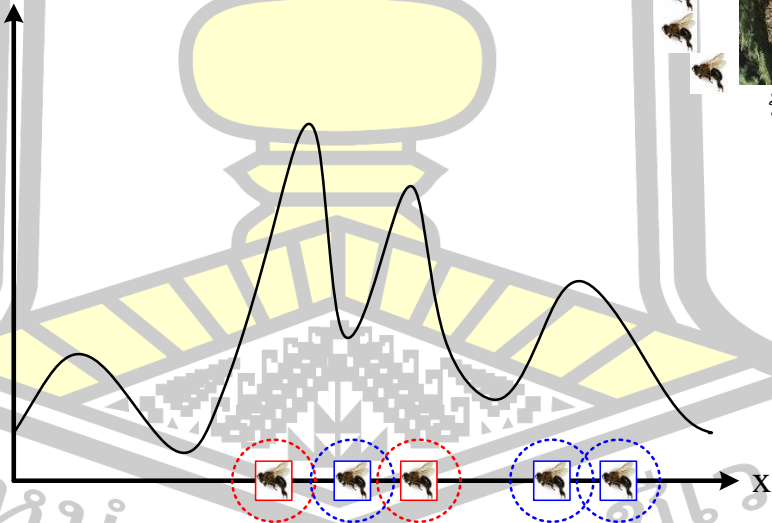
$$y = f(x)$$



ภาพประกอบ 14 คัดแยกคำตอบออกเป็น 2 กลุ่ม [14]

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขอบเขตในการค้นหาบริเวณรอบ ๆ $e=2$ คำตอบ และ $m-e=3$ คำตอบ

$$y = f(x)$$



ภาพประกอบ 15 กำหนดขอบเขตในการค้นหาบริเวณรอบ ๆ [14]

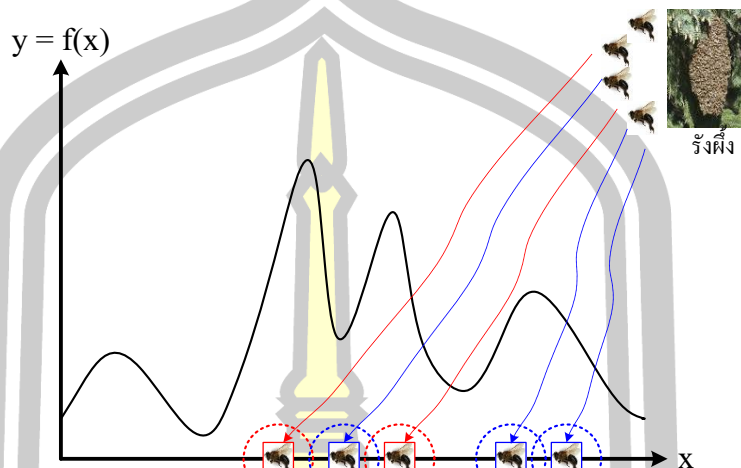


รังผึ้ง



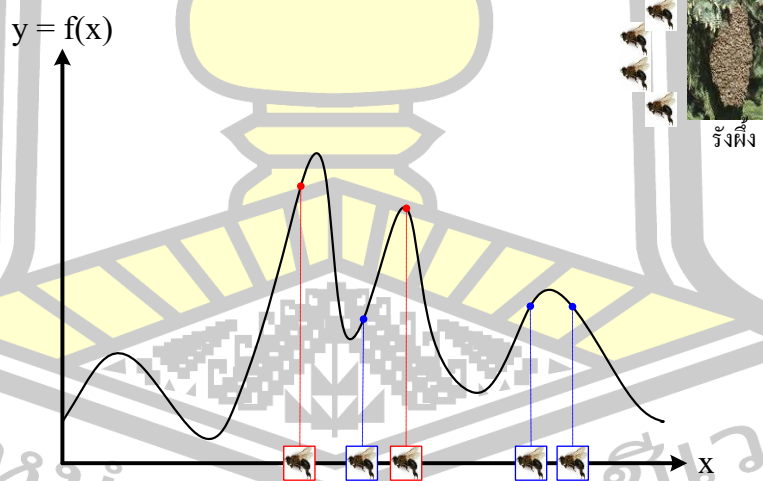
รังผึ้ง

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน n_{ep} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ e คำตอบ และ ผึ้งงานจำนวน n_{sp} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ $m-e$ คำตอบ



ภาพประกอบ 16 ผึ้งงานค้นหาคำตอบรอบ ๆ คำตอบ [14]

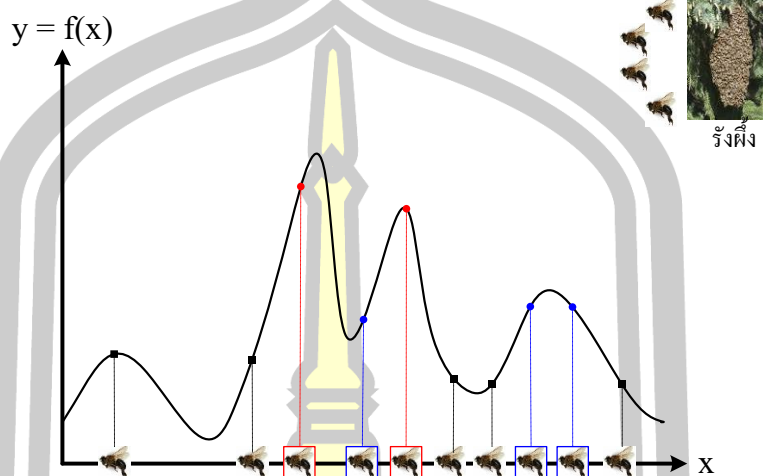
ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง



ภาพประกอบ 17 เลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง [14]

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ $NC = NC + 1$

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดให้ผึ้งสอดแนมจำนวน $n-m=5$ ตัว ค้นหาคำตอบใหม่ แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำไปเรื่อยจนได้คำตอบที่สูงที่สุด



ภาพประกอบ 18 ผึ้งสอดแนม $n-m=5$ ตัว สุ่มหาคำตอบเริ่มต้นใหม่ [14]

ข้อดีและข้อเสียของวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm)

วิธีผึ้งผึ้งมีข้อดีในเรื่องของความสามารถในการค้นหาคำตอบในพื้นที่ขนาดใหญ่และมีความยืดหยุ่นสูง แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาและความซับซ้อนในการปรับค่าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของวิธีผึ้งผึ้ง ได้ในตาราง 6

ตาราง 13 ข้อดีและข้อเสียของวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm)

ข้อดีของวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm)	ข้อเสียของวิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm)
- เลียนแบบการค้นหารธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพสูง - สามารถค้นหาได้ทั่วพื้นที่ (Global Search) - ปรับตัวได้ดีเมื่อมีข้อมูลเพิ่มขึ้น - สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายสาขา - การทำงานเป็นกลุ่ม (Parallelism) ทำให้ค้นหาได้รวดเร็ว	- อาจใช้เวลาคำนวณนานในปัญหาที่มีขนาดใหญ่ - อาจติดอยู่ในค่าที่ไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด (Local Optima) - ต้องปรับพารามิเตอร์หลายค่าให้เหมาะสม - ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้น - อาจมีความซับซ้อนในกระบวนการติดตั้งและใช้งาน

ตาราง 14 ข้อดีและข้อเสียของวิธีผึ้ง (Bee Algorithm) (ต่อ)

ข้อดีของวิธีผึ้ง (Bee Algorithm)	ข้อเสียของวิธีผึ้ง (Bee Algorithm)
- เหมาะสมกับปัญหาที่มีหลายจุดสูงสุด - การสื่อสารแบบกระจายช่วยให้การค้นหามีความยืดหยุ่น	- ไม่เหมาะกับปัญหาที่ฟังก์ชันมีความซับซ้อนมาก - การสื่อสารและการประเมินผลอาจมีข้อผิดพลาดได้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 D. Tripathy, B. K. Sahu, B. Patnaik and N. B. Dev Choudhury [20] นำเสนอการพัฒนาและออกแบบตัวควบคุม Fuzzy-2D-PID เพื่อควบคุมความถี่โหนดในระบบไฟฟ้าเชื่อมต่อบนหลายแหล่งที่มีสองพื้นที่ (Two-Area Multi-Source Power System) โดยใช้วิธี Spider Monkey Optimization (SMO) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม บทความเริ่มต้นด้วยการอธิบายความสำคัญของการควบคุมความถี่โหนด (LFC) ที่ช่วยให้การเชื่อมต่อนระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่สามารถรักษาระดับความถี่ที่เสถียรได้ โดยอาศัยการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ การควบคุมแบบ Fuzzy-2D-PID นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมความถี่และพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างพื้นที่ทั้งสอง (tie-line power flow) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ PID แบบเดิม

วิธี SMO ถูกใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม F2DPID โดยบทความนี้เน้นย้ำถึงความเหนือชั้นของตัวควบคุมที่พัฒนาเมื่อเทียบกับตัวควบคุมชนิดอื่น ๆ ในแง่ของประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ เช่น ค่า overshoot, undershoot และเวลาในการเข้าสู่ค่าคงที่ (settling time) โดยศึกษาทั้งในระบบที่ไม่มีความไม่เชิงเส้น (nonlinearity) และระบบที่มีความไม่เชิงเส้น เช่น การควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Governor Dead Band: GDB) และข้อจำกัดในการเพิ่มหรือลดการผลิต (Generation Rate Constraint: GRC)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุม F2DPID ที่ปรับค่าด้วยวิธี SMO ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในทุกเกณฑ์การประเมิน

2.4.2 R. K. Sahu, S. Panda and U. K. Rout [21] นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์การควบคุมความถี่โหนด (Load Frequency Control - LFC) โดยใช้ตัวควบคุม 2-DOF PID ที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม Differential Evolution (DE) เพื่อควบคุมระบบไฟฟ้าเชื่อมต่อหลายพื้นที่ที่มีความไม่เชิงเส้นของ Governor Dead-Band

ระบบที่ศึกษาประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังความร้อนสองพื้นที่ การออกแบบถูกสร้างเป็นปัญหาเพิ่มประสิทธิภาพ โดยใช้ DE เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม 2-DOF PID นอกจากนี้ มีการใช้ฟังก์ชันวัตถุที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ เช่น การลด overshoot และ settling time

การทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับวิธีการ Craziness-based Particle Swarm Optimization (CPSO) ที่มีการเผยแพร่ก่อนหน้านี้ พบว่า ตัวควบคุมที่พัฒนาใหม่นี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าในทุกเกณฑ์การประเมิน รวมถึงมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระบบ

2.4.3 H. Vatankhah Ghadim, M. Tarafdar Hagh and S. Ghassem Zadeh [22] นำเสนอระบบการอนุมานแบบฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เส้นโค้งเฟอร์มาต์ระดับสาม (Third-Order Fermat Curve-Based Fuzzy Inference System: TOFC-FIS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมเชิงฟัซซี่ (Fuzzy Logic Controller: FLC) ในการควบคุมความถี่โหลด (Load Frequency Control: LFC) ของระบบพลังงานไฟฟ้า โดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่ประเภท I (Type-I FLC) ในการควบคุมความถี่โหลด

ในบทความนี้ TOFC-FIS ได้รับการออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมความถี่ของระบบพลังงานสองเขตภายใต้สภาวะการดำเนินงานที่หลากหลาย จากนั้นระบบอนุมานฟัซซี่นี้ถูกปรับแต่งโดยใช้อัลกอริทึมเครือข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เพื่อสร้างระบบการอนุมานฟัซซี่เชิงประสาทแบบปรับตัว (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System: ANFIS) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบ TOFC-FIS ที่ถูกฝึกโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมนี้มีประสิทธิภาพในการควบคุม LFC ดีกว่าระบบควบคุมทั่วไปและระบบควบคุมอัจฉริยะอื่นๆ โดยสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนและเวลาการปรับตัวของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้บทความยังได้ทำการจำลองผลกระทบของตัวควบคุมฟัซซี่ที่ใช้ TOFC-FIS ในสถานะต่างๆ ของระบบพลังงาน เช่น การเปลี่ยนแปลงโหลด และการผสมผสานของแหล่งพลังงานหมุนเวียน

2.4.4 M. Barakat, A. Donkol, G. M. Salama and H. F. A. Hamed [23] นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ผสมกับตัวควบคุมเชิงเศษส่วนแบบ Proportional-Integral-Derivative (FOPID) เพื่อใช้ในระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control - AGC) ของระบบพลังงานที่เชื่อมโยงระหว่างโซลาร์เซลล์กับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

จุดประสงค์หลักคือการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมความถี่ของระบบพลังงานที่ประกอบด้วยโซลาร์เซลล์และเครื่องกำเนิดพลังความร้อนโดยใช้ตัวควบคุมแบบพหุโครงสร้าง (cascade controller) ที่ประกอบด้วย FOPID ที่ผสมผสานกับการควบคุมแบบฟัซซี่ โดยใช้

อัลกอริทึมน้ำ (Water Cycle Algorithm - WCA) เป็นตัวปรับจูนค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มความเสถียรและลดการสั่นสะเทือนของระบบภายใต้การรบกวนขนาดใหญ่

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่เสนอสามารถลดค่าความผิดพลาดและปรับปรุงการตอบสนองแบบไดนามิกได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบเดิม เช่น PI, PID และ FOPID แบบไม่ผสมผสาน โดยเฉพาะเมื่อเจอกับความไม่แน่นอนของระบบและสภาวะการทำงานที่ซับซ้อน

2.4.5 A. Daraz, H. Alrajhi, A. Basit, A. R. Afzal, A. N. M. Alahmadi and I. A. Khan [24] นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบเศษส่วนสั่งการ (FOPIDD2) ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ในการควบคุมความถี่โวลต์ (Load Frequency Control: LFC) ในระบบพลังงานแบบผสม (Hybrid Power System: HPS) ที่ประกอบด้วยพลังงานจากแหล่งทั่วไปและพลังงานหมุนเวียน รวมถึงยานพาหนะไฟฟ้าและระบบเก็บพลังงานด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitive Energy Storage: CES)

การวิจัยใช้ตัวควบคุม FOPIDD2 ร่วมกับอัลกอริทึมการปรับปรุงใหม่ที่เรียกว่า Squid Game Optimizer (SGO) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวควบคุมประเภทอื่นๆ เช่น PID, FOPID, และ PID2 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม FOPIDD2 ที่ปรับด้วย SGO มีความสามารถในการควบคุมความถี่และเสถียรภาพที่ดีกว่า โดยเฉพาะในระบบพลังงานที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ไม่แน่นอน

ในบทความยังมีการทดสอบตัวควบคุมนี้ ในสถานการณ์ที่ระบบมีการแปรผันของโหลดอย่างมากและความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยตัวควบคุม FOPIDD2 ที่พัฒนาใหม่นี้สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดี แม้ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก

ตาราง 15 สรุปข้อมูลจากบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและการออกแบบตัวควบคุมของงานวิจัยในหัวข้อต่าง ๆ

หัวข้อ	รายละเอียด
D. Tripathy et al. [14]	ชื่อเรื่อง: การพัฒนาตัวควบคุม Fuzzy-2D-PID สำหรับการควบคุมความถี่โวลต์ในระบบไฟฟ้าแบบสองพื้นที่ (Two-Area Multi-Source Power System) อัลกอริทึมที่ใช้: Spider Monkey Optimization (SMO) ผลลัพธ์: ตัวควบคุม Fuzzy-2D-PID มีประสิทธิภาพดีกว่า PID ดั้งเดิมในการควบคุมความถี่โวลต์และการถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นที่ ลด overshoot, undershoot, และ settling time ได้ดีกว่า โดยทดสอบทั้งในระบบที่มีและไม่มีค่าความไม่เชิงเส้น เช่น GDB และ GRC

ตาราง 16 สรุปข้อมูลจากบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและการออกแบบตัวควบคุมของงานวิจัยในหัวข้อต่าง ๆ (ต่อ)

หัวข้อ	รายละเอียด
R. K. Sahu et al. [15]	ชื่อเรื่อง: การออกแบบตัวควบคุม 2-DOF PID สำหรับการควบคุมความถี่โหลดในระบบพลังงานหลายพื้นที่ อัลกอริทึมที่ใช้: Differential Evolution (DE) ผลลัพธ์: ตัวควบคุม 2-DOF PID ที่ใช้ DE มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ Craziness-based Particle Swarm Optimization (CPSO) ในทุกเกณฑ์การประเมิน รวมถึงความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์
H. Vatankhah Ghadim et al. [16]	ชื่อเรื่อง: การพัฒนาระบบการอนุมานฟัซซีโดยใช้เส้นโค้งเฟอร์มาต์ระดับสาม (Third-Order Fermat Curve-Based Fuzzy Inference System: TOFC-FIS) ผลลัพธ์: TOFC-FIS ที่ปรับปรุงด้วยเครือข่ายประสาทเทียม (ANFIS) มีประสิทธิภาพในการควบคุมความถี่ดีกว่า FLC แบบทั่วไป ลดความคลาดเคลื่อนและเวลาการปรับตัวได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงโหลดและแหล่งพลังงานหมุนเวียน
M. Barakat et al. [17]	ชื่อเรื่อง: การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีผสม FOPID สำหรับ AGC ในระบบพลังงานที่เชื่อมโยงโซลาร์เซลล์และโรงไฟฟ้าพลังความร้อน อัลกอริทึมที่ใช้: Water Cycle Algorithm (WCA) ผลลัพธ์: ตัวควบคุมฟัซซีผสม FOPID สามารถลดค่าความผิดพลาดและปรับปรุงการตอบสนองแบบไดนามิกได้ดีกว่าตัวควบคุม PI, PID และ FOPID แบบไม่ผสมผสาน โดยเฉพาะในระบบที่มีความไม่แน่นอนสูง
A. Daraz et al. [18]	ชื่อเรื่อง: การพัฒนาตัวควบคุม FOPIDD2 สำหรับ LFC ในระบบพลังงานผสมที่รวมพลังงานทั่วไปและพลังงานหมุนเวียน อัลกอริทึมที่ใช้: Squid Game Optimizer (SGO) ผลลัพธ์: ตัวควบคุม FOPIDD2 ที่ใช้ SGO มีประสิทธิภาพดีกว่า PID, FOPID, และ PIDD2 โดยเฉพาะในระบบที่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ไม่แน่นอน มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดและพารามิเตอร์ของระบบ

บทที่ 3

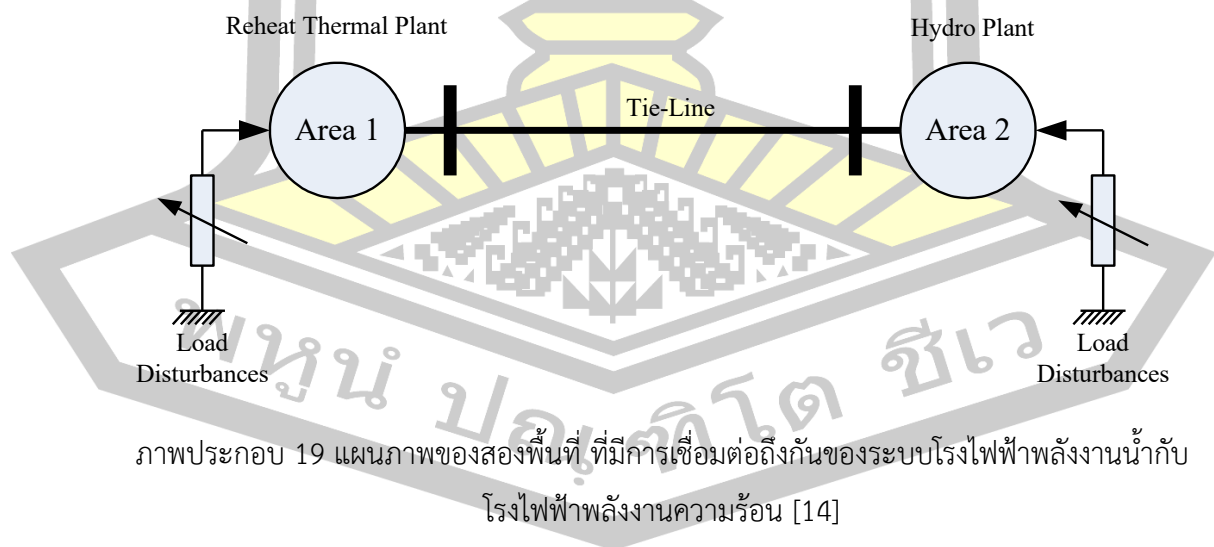
วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษา ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน พร้อมกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ รวมถึงการเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID กฎการควบคุม และพารามิเตอร์ที่ต้องปรับให้เหมาะสม โดยใช้วิธีฝูงผึ้ง

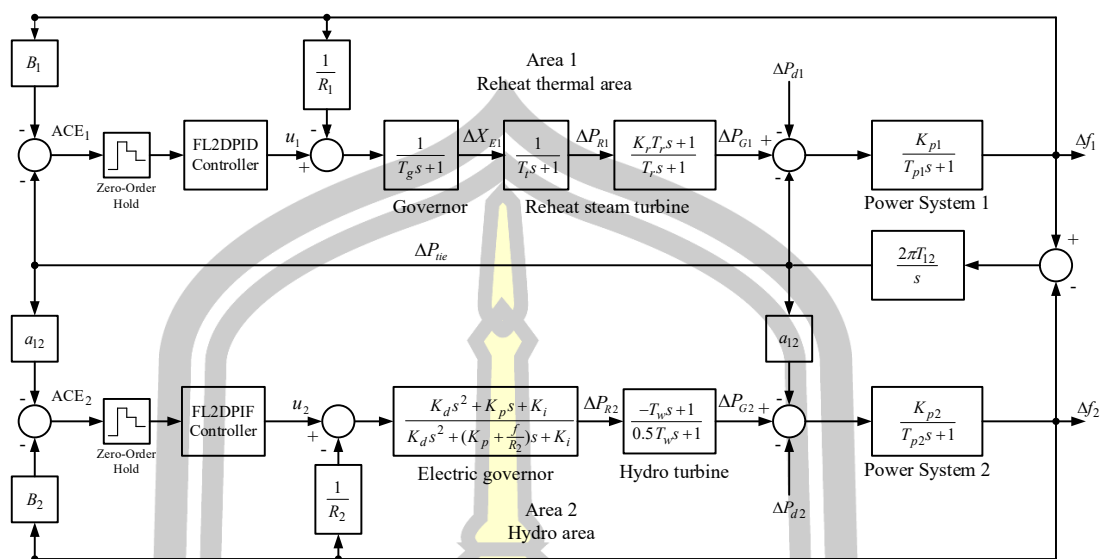
3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษา

3.1.1 ระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

การเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากำลังในแต่ละพื้นที่ควบคุมใช้สายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถูกตั้งค่าให้เชื่อมโยงกัน โดยภาพประกอบ 20 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ สมมติให้โหลดในทั้งสองพื้นที่เปลี่ยนแปลงเท่ากัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อกัน หมายถึง การเปลี่ยนโหลดในพื้นที่หนึ่งจะมีผลต่อความถี่เอาต์พุตและการไหลของกำลังไฟฟ้าบนสายส่งในพื้นที่อื่น ดังนั้น ระบบควบคุมในแต่ละพื้นที่ต้องใช้ข้อมูลจากทั้งสองพื้นที่เพื่อรักษาความถี่และให้ระบบอยู่ในสถานะอยู่ตัว (Steady State)



ภาพประกอบ 19 แผนภาพของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน [14]



ภาพประกอบ 20 แบบจำลองของสองพื้นที่ ที่มีการเชื่อมต่องันระหว่างระบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ กับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน [14]

พื้นที่สองพื้นที่ที่มีการเชื่อมโยงกันของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ซึ่งระบบนี้ประกอบด้วยกังหันไอน้ำแบบที่มีการใช้ความร้อนซ้ำ (Reheat Steam Turbine) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อน และกังหันน้ำ (Hydraulic Turbine) ซึ่งใช้พลังงานจากน้ำในการขับเคลื่อน โดยรายละเอียดการทำงานของระบบทั้งในโหมดที่ทำงานอย่างต่อเนื่อง (Continuous Mode) และไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Mode) ของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน รวมถึงการใช้ความร้อนซ้ำและการควบคุมความเร็วของระบบด้วยตัวควบคุมไฟฟ้า (Electric Governor) นั้นถูกนำเสนอในภาพประกอบ 21 นอกจากนี้ยังมีการระบุความหมายของสัญลักษณ์และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังไว้อย่างละเอียดดังตารางที่ 16 - 17 และตารางที่ 18

ตาราง 17 ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง

สัญลักษณ์	ความหมาย
f	Nominal system frequency
i	Subscript referred to area i (1, 2)
P_{ri}	Area rated power
H_i	Inertia constant
ΔP_{di}	Incremental load change

ตาราง 18 ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
ΔP_{Gi}	Incremental generation change
ΔP_{Ri}	Incremental governor change
ΔP_{tie}	Tie-line power
ΔX_{Ei}	Incremental change in governor value position
u_i	Control signal
T_{l2}	Synchronizing coefficient
K_r	Reheat constant
T_g	Steam governor time constant
T_t	Steam turbine time constant
T_r	Reheat time constant
B_i	Frequency bias constant
T_w	Water starting time
R_i	Governor speed regulation parameter
ACE_i	Area Control Error
K_d, K_p, K_i	Electric governor derivative, proportional and integral gains, respectively
J	Cost Index

ตาราง 19 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง

สัญลักษณ์	ค่าของพารามิเตอร์	สัญลักษณ์	จำนวน
f	60 Hz	T_r	10.0 sec
T_t	0.3 sec	T_w	10.0 sec
T_g	0.08 sec	K_r	0.5
K_p	1.0	K_d	4.0
K_i	5.0	H_i	0.5
R_i	2.4 Hz/p.u.MW	$P_{tie,max}$	200 MW
P_{ri}	2000 MW	D_i	8.33×10^{-3} p.u.MW/Hz

จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้ดังสมการที่ 5 – 7

และ 8

$$D_i = \Delta P_{Di} / \Delta f_i \quad (5)$$

และ

$$T_{pi} = 2H_i / (f \times D_i) \quad (6)$$

และ

$$K_{pi} = 1/D_i \quad (7)$$

และ

$$a_{12} = -P_{r1} / P_{r2} \quad (8)$$

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการปริภูมิสแตต (State Space Equation) ที่ถูกกล่าวถึงในที่นี่ ได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของโดเมนเวลาต่อเนื่อง (Continuous Time Domain) โดยรายละเอียดสมการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์นี้จะแสดงดังต่อไปนี้

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Ld(t) \quad (9)$$

เมื่อ A คือ เมทริกซ์ระบบ B คือ เมทริกซ์ของสัญญาณอินพุต และ L คือ เมทริกซ์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกจัดให้อยู่ในรูปของสมการ โดยได้แสดงไว้ในตารางที่ 18 ส่วน $x(t)$, $u(t)$ และ $d(t)$ เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าการควบคุมและเวกเตอร์ของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าได้แสดงไว้ดังนี้

$$x(t) = [\Delta f_1 \quad \Delta P_{G1} \quad \Delta P_{R1} \quad \Delta X_{E1} \quad \Delta P_{tie} \quad \Delta f_2 \quad \Delta P_{G2} \quad \Delta P_{R2}] \quad (10)$$

$$u(t) = [u_1 \quad u_2]^T \quad (11)$$

$$d(t) = [\Delta P_{d1} \quad \Delta P_{d2}] \quad (12)$$

เมื่อ Δ คือ ค่าที่เปลี่ยนแปลงจาก ค่าปกติ ซึ่งตัวห้อย 1 ใช้สำหรับพื้นที่ของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนและตัวห้อย 2 ใช้สำหรับพื้นที่ของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

สัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาดการควบคุมพื้นที่ (Area Control Error: ACE) ที่ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 21 ดังสมการที่ 13 และ 14

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_{1(t)} \\ y_{2(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ACE_1 \\ ACE_2 \end{bmatrix} = cx(t) \quad (13)$$

$$ACE_i = \Delta P_{tie,j} + B_i \Delta f_i \quad i=1,2 \quad (14)$$

เมื่อ C คือ เมทริกซ์เอาต์พุต

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการใช้ตัวควบคุมทั้งหมด 4 รูปแบบ ประกอบด้วย 1) ตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม 2) ตัวควบคุม PID แบบฟัซซี่ลอจิกที่ปรับค่าเหมาะสม 3) ตัวควบคุมแบบ 2DOF-PID และ 4) ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID ซึ่งถูกนำเสนอเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุม โดยในงานวิจัยนี้ การควบคุมสัญญาณทั้งหมดจะอยู่ในโหมดการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้ สามารถเขียนสมการที่ใช้ในการควบคุมระบบดังกล่าวได้ดังนี้

$$u_i(z) = P(P_w \cdot r - y) + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} (r - y) + D \frac{1}{T_s} \frac{z-1}{z} (D_w \cdot r - y) \quad (15)$$

$$u_i(z) = P(P_w \cdot r - ACE_i) + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} (r - ACE_i) + D \frac{1}{T_s} \frac{z-1}{z} (D_w \cdot r - ACE_i) \quad (16)$$

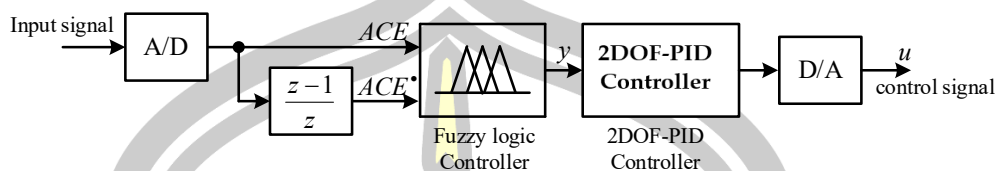
$$u_i(z) = P(P_w \cdot r - (\Delta P_{tie} - B_i \Delta F_i)) + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} (r - (\Delta P_{tie} - \Delta F_i)) + D \frac{1}{T_s} \frac{z-1}{z} (D_w \cdot r - (\Delta P_{tie} - B_i \Delta F_i)) \quad (17)$$

3.2 ตัวควบคุมที่ทำการศึกษา

3.1.2 ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID (Fuzzy Logic Two Degree of Freedom PID Controller : FL2DPID Controller)

ทฤษฎีของฟัซซี่เซต (Fuzzy set) และฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ได้รับการพิสูจน์ด้วยการใช้กฎของการแมปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Mapping) โดยการประยุกต์ใช้ฟัซซี่เซตทำให้เกิดการเริ่มต้นแนวทางที่เป็นระบบและสอดคล้องกับการใช้งานในระบบที่มีความไม่แน่นอนและไม่ชัดเจน ฟัซซี่เซตพัฒนาขึ้นโดยอิงกับระบบที่ใช้เหตุผล (Logical System) ที่เรียกว่าตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับวิธีการคิดและภาษารธรรมชาติของมนุษย์มากกว่าระบบที่ใช้เหตุผลแบบดั้งเดิม ปัจจุบัน ฟัซซี่ลอจิกถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้านของอุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ หนึ่งในนั้นคือปัญหาการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนและมีเงื่อนไขที่หลากหลาย วิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมอาจไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจได้ ในขณะเดียวกัน ความต้องการความคงทนและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังทำให้การใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกเป็นที่แพร่หลายในการแก้ไขปัญหาการควบคุม ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกพีไอ (Fuzzy Logic PI Controller) ที่ถูกใช้ในงานนี้ถูกแสดงในภาพประกอบที่ 22 ซึ่งเป็นการต่อแบบอนุกรมระหว่างตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกและตัวควบคุมพีไอบนแบบดั้งเดิม ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมีสัญญาณอินพุต 2 ค่า คือ ACE และ ACE• ส่วนสัญญาณเอาต์พุตมีเพียงค่าเดียว คือ y สัญญาณเอาต์พุตนี้จะถูกส่งเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอบนแบบดั้งเดิม และในที่สุดสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีไอบนแบบดั้งเดิม ซึ่งเรียกว่าสัญญาณควบคุม (u) จะถูกนำมาใช้ในการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโรงไฟฟ้า

พลังงานน้ำและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน การสร้างสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกฟิวเอิญกนิยามไว้ดังสมการ

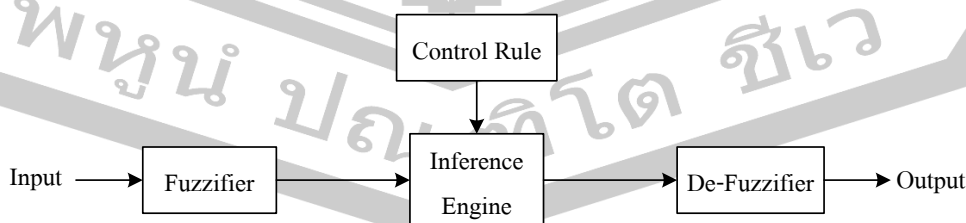


ภาพประกอบ 21 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID
ในโหมดการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง [14]

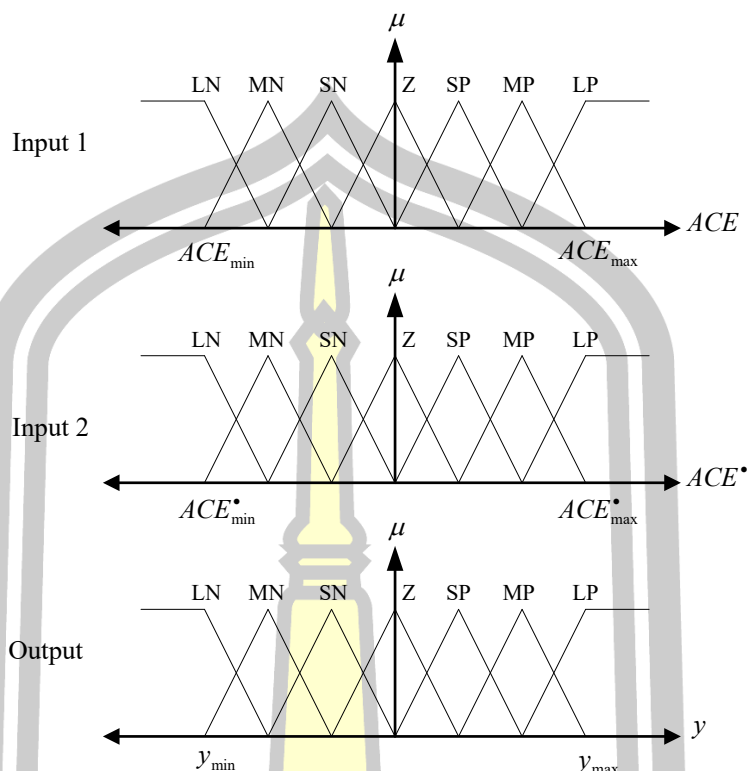
ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ ตัวทำให้ค่าคลุมเครือ (Fuzzifier), เครื่องอนุมานฟัซซี่ (Inference Engine), ฐานกฎควบคุม (Control Rule Base) และตัวกำจัดความคลุมเครือ (De-Fuzzifier) ซึ่งได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 23 ขั้นตอนการส่งผ่านค่าตัวเลขไปยังฟัซซี่เซตผ่าน Fuzzifier นั้นเรียกว่า "Fuzzification" โดยเป็นกระบวนการแปลงค่าจำนวนจริงให้เป็นค่าคลุมเครือในรูปของฟัซซี่เซต

หลักสำคัญของการควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกคือ Inference Engine ซึ่งทำหน้าที่จัดการกระบวนการอนุมานเชิงตรรกะโดยใช้กฎควบคุมที่อยู่ใน Rule Base ในการปรับปรุงค่าให้เหมาะสมกับสถานการณ์ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) และกฎการควบคุม (Control Rules) ใน Rule Base เป็นองค์ประกอบสำคัญในการคำนวณผลลัพธ์ของ Inference Process ที่เป็นค่าจากฟัซซี่เซต [18]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของฟัซซี่เซต แต่ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจำเป็นต้องให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าตัวเลขที่ชัดเจน เพื่อการใช้งานในเชิงปฏิบัติ ดังนั้นจึงต้องใช้กระบวนการ De-Fuzzification เพื่อแปลงค่าฟัซซี่ให้กลับเป็นค่าตัวเลข เรียกขั้นตอนนี้ว่า "Defuzzification" ซึ่งเป็นการกำจัดความคลุมเครือออกจากผลลัพธ์ของฟัซซี่เซต



ภาพประกอบ 22 องค์ประกอบของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก [23]



LN: large negative; MN: medium negative; SN: small negative; Z: zero;

SP: small positive; MP: medium positive; LP: large positive.

ภาพประกอบ 23 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวควบคุมพีซีลอจิก 2DOF-PID [25]

การออกแบบตัวควบคุมพีซีลอจิกสำหรับระบบควบคุมแบบ 2DOF-PID เป็นกระบวนการที่สำคัญ โดยมีเป้าหมายหลักคือการกำหนดค่าอัตราขยายของตัวควบคุม 2DOF-PID (2DOF-PID Gain) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) และกฎการควบคุม (Control Rules) ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการกำหนดค่าอัตราขยายพีไอนั้นสามารถทำได้ไม่ยากนัก แต่ในส่วนของการกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมมักจะมีข้อขัดข้องและท้าทายมากขึ้น ในการแก้ปัญหานี้ นักวิจัยได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการฝูงผึ้ง (Bee Colony Algorithm) เพื่อช่วยในการหาค่าอัตราขยายพีไเอ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และกฎการควบคุมที่เหมาะสม

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกพื้นฐานที่ใช้ในตัวควบคุมพีซีลอจิกแสดงดังในภาพประกอบ 24 โดยฟังก์ชันดังกล่าวประกอบด้วย 3 ชุด ได้แก่ ชุดอินพุต 2 ชุด และชุดเอาต์พุต 1 ชุด แต่ละฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะประกอบไปด้วยสมาชิกทั้งหมด 7 รูปแบบ โดยแบ่งเป็นสมาชิกรูปแบบสี่เหลี่ยม

คางหมู 2 รูป และรูปแบบสามเหลี่ยม 5 รูป ซึ่งเลือกตามการศึกษาของผู้วิจัยซึ่งได้ทำการทดสอบเพื่อหาจำนวนสมาชิกที่เหมาะสมที่สุด

ในส่วนของการกำหนดค่ากฎการควบคุมจะมีความซับซ้อนมากกว่าการหาค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เนื่องจากกฎการควบคุมจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบและระบบทางกายภาพที่ใช้ควบคุม ในกรณีที่ระบบมีสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต ค่าของกฎการควบคุมจะถูกนำเสนอในรูปแบบตาราง โดยตารางดังกล่าวจะแสดงค่าของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกฎการควบคุมสำหรับแต่ละเซลล์ ซึ่งเชื่อมโยงระหว่างอินพุตที่หนึ่งและอินพุตที่สอง

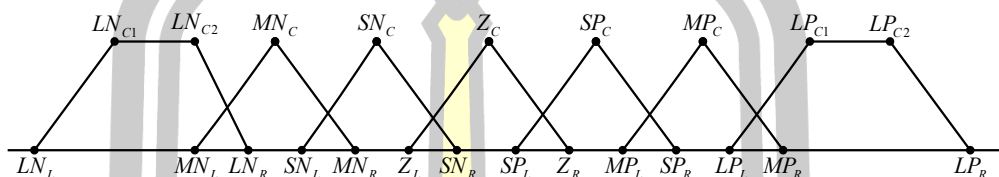
ค่าของกฎการควบคุมจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไข If-Then (ถ้าหากอินพุตที่ 1 และอินพุตที่ 2 มีค่าใดๆ ก็จะได้เอาต์พุตที่ 1 ตามตำแหน่งของอินพุตทั้งสอง) โดยในภาพประกอบ 25 แสดงกฎพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษานี้ ตัวอย่างเช่น หากพิจารณาจากแถวที่ 3 และคอลัมน์ที่ 4 ของภาพประกอบ 25 จะหมายถึงว่า ถ้า ACE มีค่าเป็น SN และ ACE• มีค่าเป็น Z เอาต์พุต y จะมีค่าเป็น SN

		ACE•						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
ACE	LN	LN	LN	LN	MN	MN	SN	Z
	MN	LN	LN	LN	MN	SN	Z	SP
	SN	LN	LN	LN	SN	Z	SP	MP
	Z	MN	MN	SN	Z	SP	MP	MP
	SP	MN	SN	Z	SP	LP	LP	LP
	MP	SN	Z	SP	MP	LP	LP	LP
	LP	Z	SP	MP	MP	LP	LP	LP

ภาพประกอบ 24 กฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID [26]

ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID [27] ที่มีการใช้ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมก่อนการปรับค่า จะถูกเรียกว่า ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID แบบเหมาะสม (Optimal FL2DPID Controller) เมื่อค่าอัตราขยายฟีดแบ็ก ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมได้ถูกปรับค่าให้เหมาะสมด้วยวิธีฟัซซี่ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก 2DOF-PID นั้น อัตราขยาย 2DOF-PID มีพารามิเตอร์ที่จะต้องปรับค่า 5 ค่า ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎการควบคุมมีจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องทำการปรับค่าหลายตัว สำหรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 26 คือ สมาชิกรูปสามเหลี่ยม (Triangular Membership) มีพารามิเตอร์ 3 ตัวคือ Left Base (L), Center (C) และ Right base (R) ส่วน

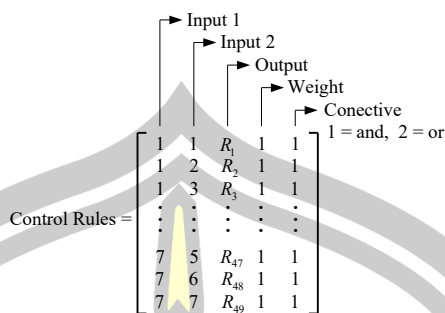
สมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูมีค่าพารามิเตอร์ 4 ตัว คือ Left Base (L), Centre1 (C_1), Centre2 (C_2) และ Right base (R) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู 2 รูป และมีสมาชิกรูปสามเหลี่ยม 5 รูป ดังนั้นจะมีจำนวนพารามิเตอร์ที่จะต้องปรับค่ารวมกันได้เท่ากับ 23 ตัว ($4+3+3+3+3+3+4 = 23$) แต่ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมีอินพุต 2 ค่า และเอาต์พุต 1 ค่า เมื่อรวมพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ต้องทำการปรับค่า ได้จำนวน 69 ตัว จากผลรวมดังนี้ $23+23+23 = 69$



ภาพประกอบ 25 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 1 ชุด [14]

กฎการควบคุมสำหรับตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่มีอินพุต 2 ค่าและเอาต์พุต 1 ค่า ถูกกำหนดในรูปแบบของเมทริกซ์ควบคุม ซึ่งมี n แถว และ 5 คอลัมน์ ตามที่แสดงในภาพประกอบ 27 เมื่อใช้กล่องเครื่องมือฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Toolbox) โดย n คือค่าผลรวมของค่าสมาชิกที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากอินพุตทั้งสอง ค่า สำหรับกรณีที่แต่ละอินพุตมีฟังก์ชันสมาชิก 7 ค่า จะได้ว่า $n = 7^2 = 49$ คอลัมน์ที่ 3 ของตารางกฎการควบคุมจะเป็นพารามิเตอร์ที่ป้อนค่าเอาต์พุต ซึ่งจะถูกปรับเปลี่ยนตามเงื่อนไขควบคุมเฉพาะ ปกติแล้วค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกแทนด้วยตัวเลขที่ระบุจากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ โดยค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละอินพุตจะต้องมี 7 ค่า ดังนั้น กฎการควบคุมจะถูกแทนด้วยตัวเลข 1-7 ซึ่งมีความหมายดังนี้: 1 หมายถึง LN (Large Negative), 2 หมายถึง MN (Medium Negative), 3 หมายถึง SN (Small Negative), 4 หมายถึง Z (Zero), 5 หมายถึง SP (Small Positive), 6 หมายถึง MP (Medium Positive), และ 7 หมายถึง LP (Large Positive)

เนื่องจากอินพุต 2 ค่า จะทำให้เกิดจำนวนกฎการควบคุม 49 ตัว ซึ่งเท่ากับจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องปรับเปลี่ยนตามกฎการควบคุมนี้ โดยพารามิเตอร์รวมสำหรับระบบควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่มีอินพุต 2 ค่าและเอาต์พุต 1 ค่าจะมีทั้งหมด 120 ตัว คำนวณจากผลรวมดังนี้: 2 (อินพุต 2 ค่า) + 69 (พารามิเตอร์เพิ่มเติม) + 49 (พารามิเตอร์จากกฎการควบคุม) = 120 พารามิเตอร์ สำหรับการควบคุมในโรงไฟฟ้าหนึ่งแห่ง และหากเป็นกรณีของระบบที่มีการเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้า 2 แห่ง จำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ต้องปรับค่า จะเพิ่มขึ้นเป็น 240 ตัว



ภาพประกอบ 26 โครงสร้างกฎการควบคุมตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก [14]

3.3 เงื่อนไขในการควบคุม

การจำลองการทำงานของตัวควบคุมทั้ง 4 ประเภท ซึ่งได้แก่ 1) ตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม 2) ตัวควบคุม PID ที่ใช้ฟัซซี่ลอจิกในการปรับค่าที่เหมาะสม 3) ตัวควบคุม 2DOF-PID และ 4) ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกแบบ 2DOF-PID ที่นำเสนอเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสองพื้นที่ ซึ่งประกอบไปด้วยการเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ตามที่แสดงในภาพประกอบ 21 การทดลองนี้มีการเปลี่ยนแปลงโหลดในแต่ละพื้นที่ที่ค่า 0.01 p.u.MW โดยใช้พารามิเตอร์ของระบบที่เหมือนกันทุกประการ

ในการจำลองการทำงาน ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับ Fuzzy Logic Toolbox โดยการทดลองนี้ดำเนินการบนเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ ที่ใช้ตัวประมวลผล CPU: Core i5-12400F, RAM: 16.0 GB DDR4-3200 และ GPU: NVIDIA GeForce RTX 4060 ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 11

สำหรับการปรับค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้น ใช้ค่าผิดพลาดสมบูรณ์อินทิกรัล (Integral Absolute Error: IAE) ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ในพื้นที่ที่ 1 และพื้นที่ที่ 2 รวมถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งที่เชื่อมต่อกันเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพ การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) J ทำตามสมการ 18 ที่กำหนดดังนี้

$$\text{Minimize } J = \int_0^{50} (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|) dt \quad (18)$$

เมื่อ Δf_1 คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ของพื้นที่ที่ 1

Δf_2 คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ของพื้นที่ที่ 2

ΔP_{tie} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมต่อ (Tie-Line) ระหว่างพื้นที่ที่ 1 กับพื้นที่ที่ 2

3.4 วิธีผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm)

วิธีการผึ้งผึ้ง (Bee Algorithm) เป็นเทคนิคในการค้นหาค่าที่เหมาะสมโดยเลียนแบบพฤติกรรมของผึ้งในธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการค้นหาค่าจะดำเนินการโดยใช้ตัวแทนคือ "ผึ้ง" ที่แบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ "ผึ้งสอดแนม" และ "ผึ้งงาน" โดยมีเป้าหมายเพื่อค้นหาคำตอบของปัญหาที่กำหนด ซึ่งในบริบทนี้ คำตอบจะถูกสมมติว่าเป็น "แหล่งน้ำหวาน" หน้าที่ของผึ้งสอดแนมคือการค้นหาแหล่งน้ำหวานโดยสุ่มภายในพื้นที่ที่เป็นไปได้สำหรับคำตอบ เมื่อตรวจพบแหล่งน้ำหวาน ผึ้งสอดแนมจะบินกลับมาที่รังเพื่อสื่อสารกับผึ้งตัวอื่นในฝูง โดยการสื่อสารนี้จะใช้การเต้นในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อแสดงถึงปริมาณของน้ำหวาน รวมถึงทิศทางและระยะทางของแหล่งน้ำหวานนั้น เมื่อได้รับข้อมูล ผึ้งงานจะออกไปปฏิบัติหน้าที่ในการขนย้ายและสะสมน้ำหวานจากแหล่งที่พบ โดยจำนวนผึ้งงานที่ถูกส่งออกไปจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหวานที่แหล่งนั้นมี และระยะทางจากรังถึงแหล่งน้ำหวาน

ก่อนที่จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีผึ้งผึ้ง ผู้วิจัยขอระบุมิติเตอร์สำคัญที่ใช้ในการดำเนินงานของวิธีนี้

NC คือ จำนวนครั้งของการทำซ้ำ

n คือ จำนวนของผึ้งสอดแนม

m คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมาก จากการหาของผึ้งสอดแนม n_s ตัว

e คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมากที่สุด จากที่เลือกแล้ว m แหล่ง

n_{ep} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน e แหล่ง

n_{sp} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน $m-e$ แหล่ง

n_{gh} คือ ขนาดของขอบเขตในการค้นหาของแหล่งน้ำหวานแต่ละแหล่ง

3.4.1 ขั้นตอนวิธีผึ้งผึ้งมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน n ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ และ กำหนดให้จำนวนรอบของการทำซ้ำ $NC = 0$

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี m คำตอบ

ขั้นตอนที่ 4 คัดแยกคำตอบ m คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด e คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ีรองลงมา $m-e$ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดขอบเขตในการค้นหามีรอบ ๆ คำตอบ m คำตอบ

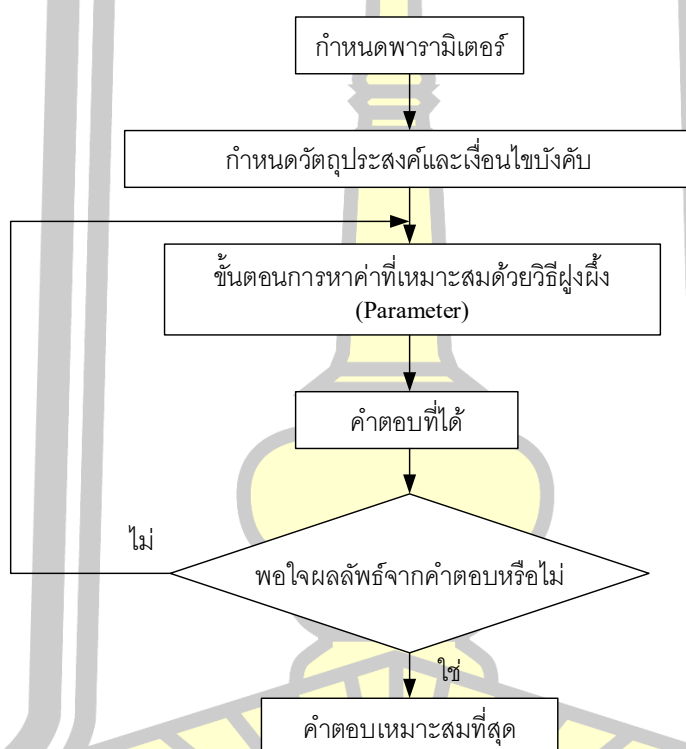
ขั้นตอนที่ 6 ให้ฟังก์ชันจำนวน n_{ep} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ e คำตอบ และ ฟังก์ชันจำนวน n_{sp} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ $m-e$ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของฟังก์ชันในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ $NC = NC + 1$

ขั้นตอนที่ 9 กำหนดให้ฟังก์ชันอดแนมจำนวน $n-m$ ตัว ค้นหาคำตอบใหม่

ขั้นตอนที่ 10 ได้คำตอบใหม่จากฟังก์ชันอดแนม แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2 ใหม่



ภาพประกอบ 27 แผนผังการประยุกต์ใช้วิธีฝูงผึ้ง เพื่อหาค่าที่เหมาะสม [14]

พูน ปณ จิตโต ชีเว

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของตัวควบคุมแต่ละแบบ

การจำลองเกี่ยวข้องกับระบบสองพื้นที่ที่เชื่อมโยงกันระหว่างโรงไฟฟ้าพลังน้ำและโรงไฟฟ้าพลังความร้อน โดยดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULATION 2021a บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสเปก CPU: Core i5-12400F, RAM: 16.0 GB DDR4-3200 และ GPU: NVIDIA GeForce RTX 4060

ในการตั้งค่าขอบเขตของตัวควบคุม กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อยู่ในช่วง $K_{min} \leq$ ค่าพารามิเตอร์ $\leq K_{max}$ โดยที่ $K_{min} = 0$ และ $K_{max} = 1$ นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าต่างๆ ได้แก่ NC = 30, n = 30, m = 50 และ e = 40 ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ถูกหาโดยใช้ ขั้นตอนวิธีฝูง (Swarm Approach) และแสดงรายละเอียดไว้ใน ตาราง 20

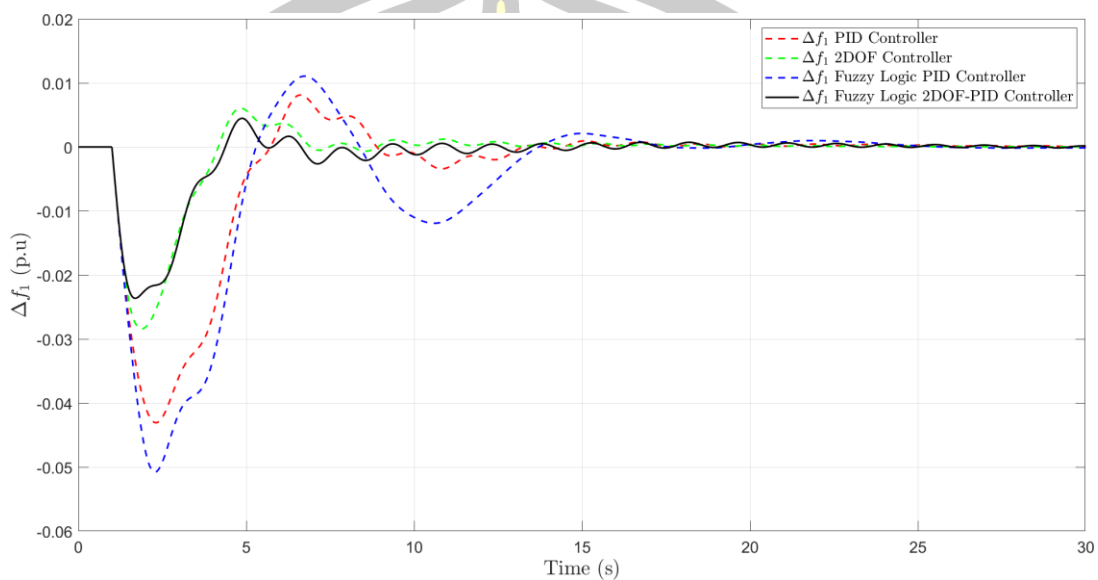
ตาราง 20 ตัวชี้วัดของการทดสอบระบบ Load Frequency Control (LFC) โดยใช้ตัวควบคุมประเภทต่างๆ

Controller	Reheat Thermal Area				Hydro Area			
	PID	2DPID	FLPID	FL2DPID	PID	2DPID	FLPID	FL2DPID
K_{PW}	-	0.8049	-	0.9086	-	0.0292	-	0.0000
K_{DW}	-	0.5169	-	0.6604	-	0.1266	-	0.1201
K_p	0.9828	0.5856	1.0000	0.3506	0.0231	0.2823	0.0000	0.2503
K_i	0.9981	0.2121	0.9253	0.7175	0.1326	0.5869	0.2363	0.2694
K_d	0.5533	0.5296	0.9095	0.4055	0.1626	0.8937	0.4609	0.5818
IAE Error	0.2560	0.1504	0.3906	0.1308	-	-	-	-

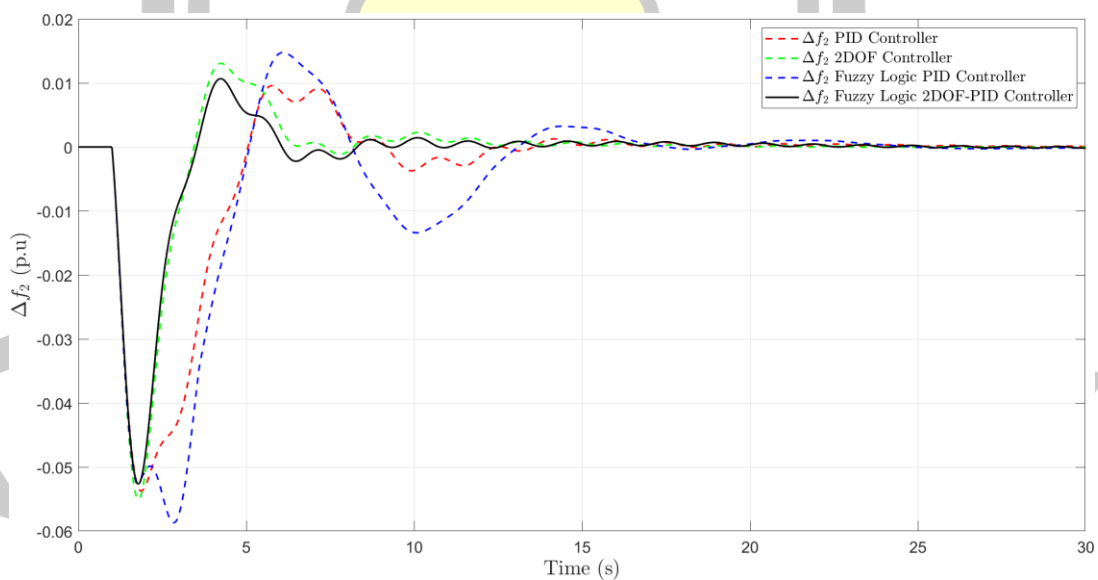
จากการสังเกตพบว่าได้ใช้วิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์และวัตถุประสงค์ด้านประสิทธิภาพที่เหมือนกัน โดยใช้ ค่า IAE (Integral of Absolute Error) เป็นตัวชี้วัดหลัก ทั้งนี้ ตัวควบคุม FL2DPID สามารถทำงานได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบเดิมในด้าน สมรรถนะเชิงพลวัต (Transient Performance) ซึ่งรวมถึง ค่า Overshoot, Undershoot และ Stall Time

ตาราง 21 แสดงดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแต่ละประเภท ขณะที่ภาพประกอบ 28-30 แสดงผลการเปรียบเทียบการจำลองในด้านการเปลี่ยนแปลงความถี่ของพื้นที่ที่ 1 และ 2 รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของการไหลของพลังงานในช่วงเวลาที่กำหนด

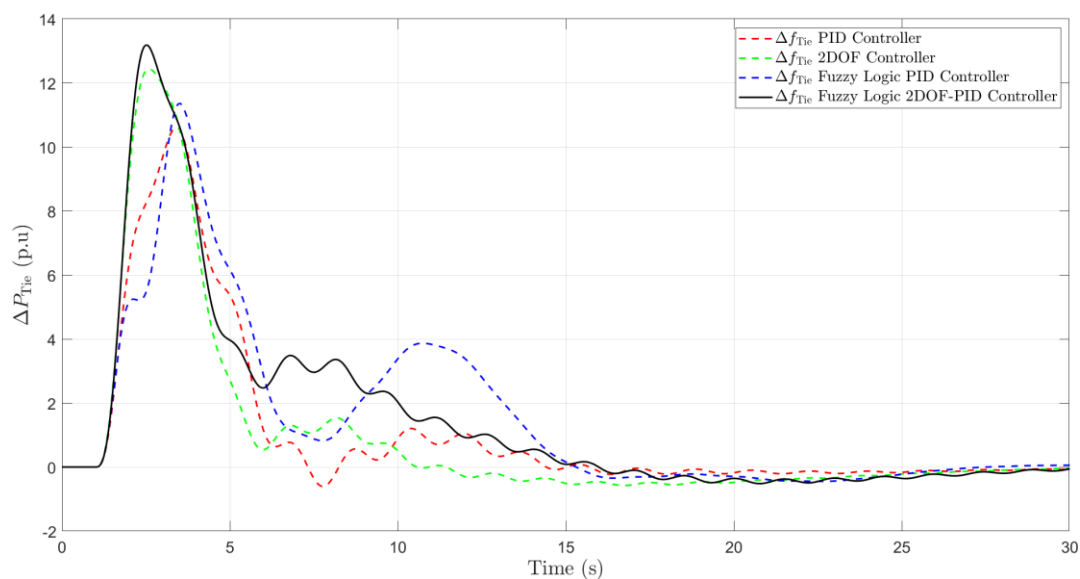
จากการวิเคราะห์การตอบสนองแบบพลวัต พบว่าการใช้ ตัวควบคุม FL2DPID ที่อิงกับ Bee Algorithm (BA-based FL2DPID Controller) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดแรงสั่นสะเทือนได้อย่างมาก ส่งผลให้สามารถ ลดแรงสั่นสะเทือนได้อย่างสมบูรณ์ (Complete Vibration Mitigation)



ภาพประกอบ 28 ความหลากหลายของควมถี่ในหมวดหมู่ของตัวควบคุมต่างๆ
ในโซนโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบ Reheat



ภาพประกอบ 29 ความหลากหลายของควมถี่ในระบบตัวควบคุมต่างๆ ในโซนโรงไฟฟ้าพลังน้ำ



ภาพประกอบ 30 ความหลากหลายของความถี่ในหมวดหมู่ของตัวควบคุมต่างๆ สำหรับทั้งสองพื้นที่

ตาราง 21 ค่า U_{SH} , O_{SH} และ T_s ของตัวควบคุมประเภทต่าง ๆ

Controller	Δf_1			Δf_2			ΔP_{Tie}		
	U_{SH}	O_S	T_s	U_{SH}	O_{SH}	T_s	U_{SH}	O_{SH}	T_s
PID	1.3272	7.0301	5.1330	4.8038	2.6942	5.1366	1.8064	3.1667	5.1500
2DOF-PID	2.6401	1.2375	5.1478	1.6920	4.0130	5.1503	7.5531	1.6272	5.1479
Fuzzy PID	1.6869	7.7342	5.1404	2.0475	8.1416	5.1458	2.0465	5.2067	4.4647
FL2DPID	1.1632	2.1964	5.1528	1.0766	2.1820	5.1529	0.7826	2.9880	5.1409

จากการตรวจสอบตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุม ซึ่งประกอบด้วย PID, 2DOF-PID, Fuzzy PID และ FL2DPID โดยพิจารณาถึงค่าการลดลงต่ำสุด (Undershoot), ค่าการเพิ่มขึ้นสูงสุด (Overshoot) และเวลาที่ระบบเข้าสู่สถานะคงที่ (Settling Time) พบว่าตัวควบคุมแต่ละประเภทมี ข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน

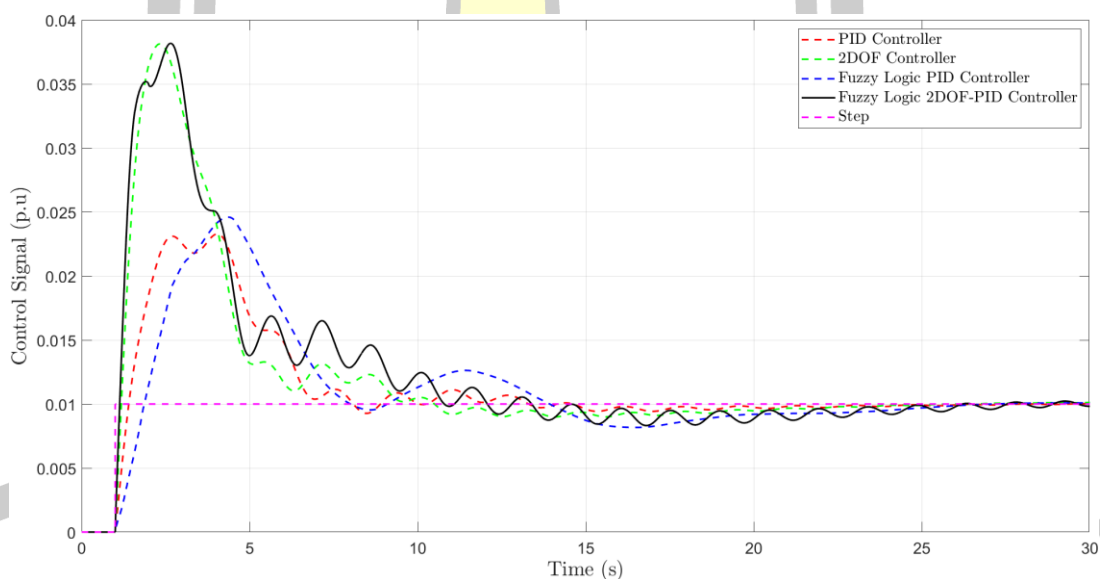
- PID Controller มีค่า Overshoot สูงมาก ในพารามิเตอร์ Δf_1 และ Δf_2 และมีค่า Undershoot สูงสุดในพารามิเตอร์ ΔP_{tie} ซึ่งส่งผลให้ระบบ มีความเสถียรต่ำกว่าตัวควบคุมอื่นๆ
- 2DOF-PID Controller สามารถลด Overshoot ในพารามิเตอร์ ΔP_{tie} ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ยังคงมี Overshoot ในค่าความถี่ Δf_1 และ Δf_2 ที่ไม่เหมาะสม ทำให้ไม่สามารถควบคุมระบบได้อย่างเต็มที่
- Fuzzy PID Controller แสดงให้เห็นถึง สมดุลของประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยสามารถลดค่าการลดลงต่ำสุด (Undershoot) ได้ในทุกพารามิเตอร์ อย่างไรก็ตาม ยังคงมี Overshoot ในพารามิเตอร์ Δf_2 ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจทำให้ระบบในพื้นที่ที่ 2 มีความไม่น่าเชื่อถือ

- FL2DPID Controller แสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมีค่า Undershoot และ Overshoot ต่ำที่สุดในเกือบทุกพารามิเตอร์ โดยเฉพาะในพารามิเตอร์ Δf_1 และ ΔP_{tie} ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าตัวควบคุมนี้สามารถ รักษาเสถียรภาพของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

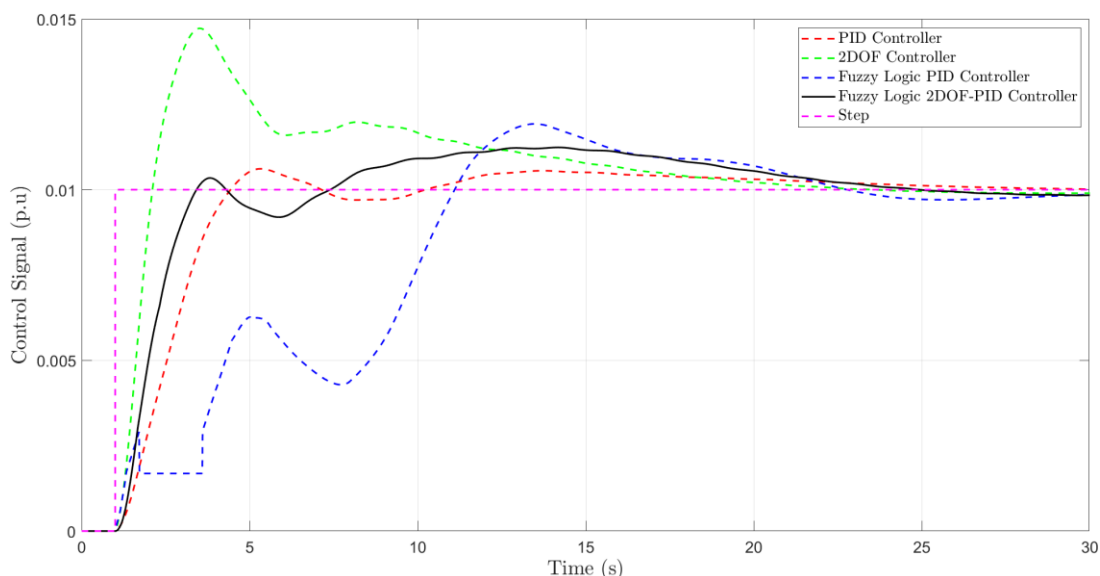
แม้ว่าเวลาที่ระบบเข้าสู่สถานะคงที่ของ FL2DPID Controller จะใกล้เคียงกับตัวควบคุมประเภทอื่นๆ แต่ยังคงแสดงให้เห็นถึง การปรับปรุงที่มีนัยสำคัญในบางกรณี ดังนั้น สำหรับระบบที่ต้องการความเสถียรสูงและต้องรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดที่ไม่แน่นอน ตัวควบคุม FL2DPID เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด

ในการจำลอง ได้มีการเพิ่ม ขอบเขตการตรวจสอบการทำงานของตัวควบคุม (Monitoring Scope) เพื่อช่วยวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวควบคุมและยืนยันผลลัพธ์ที่ได้ วิธีนี้ช่วยให้สามารถ ทำความเข้าใจลักษณะการตอบสนองของตัวควบคุมและเสถียรภาพของระบบได้อย่างลึกซึ้งขึ้น

วิธีการที่นำเสนอใช้การตรวจสอบค่าข้อมูลขอบเขต (Boundary Data Inspection) เพื่อทำการประเมินว่าตัวควบคุมทำงานได้ดีเพียงใด เมื่อเทียบกับ วิธีควบคุมมาตรฐาน จากกราฟในภาพประกอบ 31 – 32 พบว่าผลการทดสอบยืนยันว่าตัวควบคุมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการ ลดค่าความผิดพลาดและเพิ่มความเสถียรของระบบ



ภาพประกอบ 31 การตอบสนองของสัญญาณควบคุมในตัวควบคุมของพื้นที่ที่ 1



ภาพประกอบ 32 การตอบสนองของสัญญาณควบคุมในตัวควบคุมของพื้นที่ที่ 2

ภาพประกอบ 31 และ ภาพประกอบ 21 แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมประเภทต่างๆ ในสองพื้นที่ของระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการลด Overshoot, Settling Time และการลดความแกว่งของสัญญาณ

จากผลการทดลองพบว่า 2DOF-PID Controller (เส้นสีเขียว) มีค่า Overshoot สูงที่สุดในทั้งสองพื้นที่ ซึ่งอาจทำให้ระบบมีเสถียรภาพลดลง ขณะที่ PID Controller (เส้นสีแดง) และ Fuzzy Logic PID Controller (เส้นสีน้ำเงิน) สามารถช่วยลด Overshoot ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงแสดงพฤติกรรมการสั่น (Oscillatory Behavior) อยู่

ในทางกลับกัน Fuzzy Logic 2DOF-PID Controller (เส้นสีดำ) สามารถ ควบคุมสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยลดทั้ง Overshoot และการสั่นของสัญญาณ ทำให้ระบบสามารถเข้าสู่สถานะคงที่ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในพื้นที่ที่ 2 ซึ่งเป็นระบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำ พบว่าตัวควบคุม FL2DOF-PID มีประโยชน์อย่างมากในการ ลด Steady-State Error และเพิ่มเสถียรภาพของระบบ

การลดลงของ Overshoot และ Settling Time แสดงให้เห็นว่า FL2DOF-PID Controller สามารถ ปรับค่าพารามิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลง จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับ ระบบที่ต้องการความเสถียรสูงและการตอบสนองที่รวดเร็ว เมื่อเทียบกับตัวควบคุมอื่นๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบไฟฟ้าเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบภายใต้สถานการณ์โหลดที่เปลี่ยนแปลงได้

ตาราง 22 การเปรียบเทียบค่า RMAE และ MAE สำหรับตัวควบคุมประเภทต่างๆ ในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบ Reheat และโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

Controller	Reheat Thermal Area		Hydro Area	
	RMAE	MAE	RMAE	MAE
PID	0.0085	0.0063	0.0121	0.0094
2DOF-PID	0.0072	0.0057	0.0115	0.0087
Fuzzy PID	0.0069	0.0052	0.0102	0.0079
FL2DPID	0.0054	0.0041	0.0089	0.0065

ค่าความผิดพลาดรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMAE) และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ของวิธีการควบคุมที่แตกต่างกันในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบ Reheat และโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

ตาราง 22 แสดงค่าความผิดพลาด RMAE และ MAE สำหรับตัวควบคุมประเภทต่างๆ ซึ่งได้ทำการประเมิน ได้แก่ PID, 2DOF-PID, Fuzzy PID และ FL2DOF-PID

จากผลลัพธ์พบว่า FL2DOF-PID Controller มีค่าความผิดพลาด RMAE ต่ำที่สุดที่ 0.0054 และ MAE ต่ำที่สุดที่ 0.0041 ในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบ Reheat ซึ่งหมายความว่ามีความแม่นยำสูง และมีความเบี่ยงเบนจากค่าที่ต้องการน้อยที่สุด ตรงกันข้ามกับ PID Controller ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ RMAE = 0.0085 และ MAE = 0.0063 แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพน้อยกว่า และมีความแปรปรวนของข้อผิดพลาดสูงกว่า

สำหรับ พื้นที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydroelectric Area) ตัวควบคุม FL2DOF-PID ยังคงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่า ด้วยค่าความผิดพลาดต่ำที่สุดที่ RMAE = 0.0089 และ MAE = 0.0065 แสดงถึง ความสามารถในการลดข้อผิดพลาดของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ PID Controller ยังคงมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ RMAE = 0.0121 และ MAE = 0.0094 ซึ่งบ่งบอกถึงความผันผวนของการตอบสนองของระบบที่สูงกว่าตัวควบคุมประเภทอื่น

โดยสรุป FL2DOF-PID Controller มีประสิทธิภาพสูงสุดในทั้งสองพื้นที่ ซึ่งพิสูจน์ได้จากค่าความผิดพลาดที่ต่ำที่สุด (RMAE และ MAE ต่ำกว่า PID, 2DOF-PID และ Fuzzy PID) สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ลดความเบี่ยงเบนของสัญญาณ และเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมเมื่อเทียบกับวิธีการที่ใช้ PID แบบดั้งเดิม

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ตัวควบคุม FL2DOF-PID ที่นำเสนอสามารถปรับปรุงการควบคุมความถี่โหลด (LFC) ในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีขึ้นและเพิ่มเสถียรภาพของระบบเมื่อเทียบกับตัวควบคุมประเภทอื่น การใช้ Bee Algorithm (BA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรวม Fuzzy Logic และ 2DOF-PID ทำให้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งช่วยลดค่า Overshoot, Undershoot และ Settling Time ได้อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาจากค่าตัวชี้วัดข้อผิดพลาด พบว่า FL2DOF-PID Controller มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวควบคุม PID, 2DOF-PID และ Fuzzy PID แบบเดิม โดยค่าความผิดพลาดที่ต่ำที่สุด ได้แก่ RMAE (0.0054, 0.0089) และ MAE (0.0041, 0.0065) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมในการคงค่าตามจุดที่ตั้งไว้ด้วยข้อผิดพลาดที่น้อยมาก นอกจากนี้ FL2DOF-PID Controller ยังมีความยืดหยุ่นสูงในการจัดการกับสถานการณ์โหลดที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในระบบโรงไฟฟ้าพลังความร้อนและโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เน้นการจำลองผ่าน MATLAB/Simulink เป็นหลัก แม้ว่าผลลัพธ์จะน่าสนับสนุน แต่ยังคงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมโดยใช้ Hardware-in-the-Loop (HIL) เพื่อประเมินประสิทธิภาพในเวลาจริง (Real-time Performance) และจัดการกับปัญหาทางเทคนิค เช่น ความหน่วงของการสื่อสาร (Communication Latency) และข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ นอกจากนี้ จำเป็นต้องดำเนินการ ทดสอบสถานการณ์โหลดแบบสุ่ม (Random Load Variability Testing) เพื่อประเมินความทนทานของตัวควบคุมในสภาพการทำงานที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งจะช่วยให้สามารถนำไปใช้กับโครงข่ายไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ อาจพิจารณาใช้ อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกอื่นๆ เช่น Particle Swarm Optimization (PSO) และ Genetic Algorithm (GA) เพื่อเป็นทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุม เนื่องจาก Bee Algorithm ได้พิสูจน์แล้วว่าสามารถช่วยในการปรับค่าตัวควบคุมได้ดีขึ้น การศึกษาในอนาคตอาจทำการ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมเหล่านี้ เพื่อระบุวิธีที่ดีที่สุดในการปรับค่าตัวควบคุม FL2DOF-PID

โดยสรุป ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการปรับปรุงการจัดการความถี่โหลดในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและทดสอบเพิ่มเติมเพื่อให้มั่นใจว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมพลังงานไฟฟ้า

บรรณานุกรม

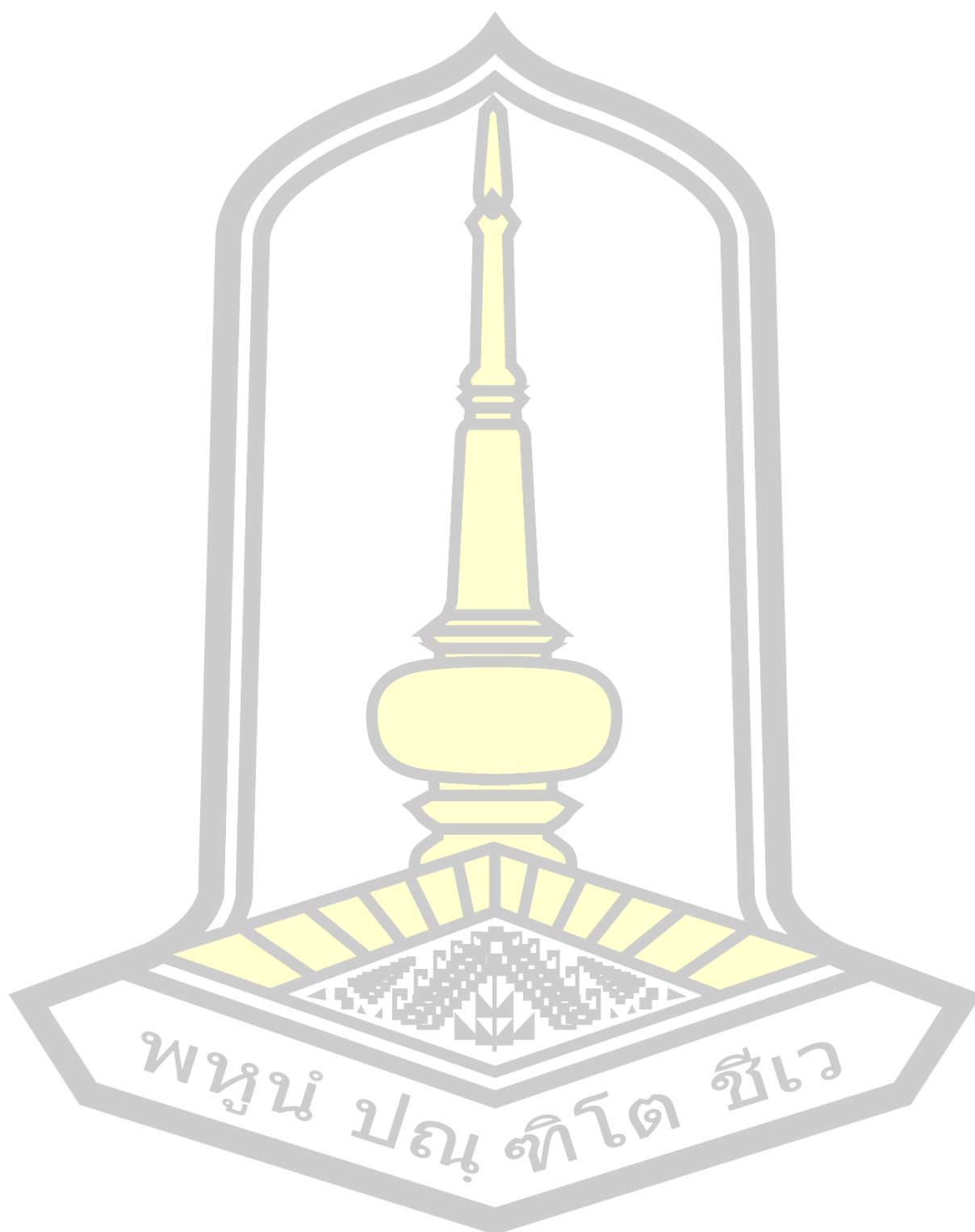
- [1] S. O. Bade, A. Meenakshisundaram, and O. S. Tomomewo, "Current Status, Sizing Methodologies, Optimization Techniques, and Energy Management and Control Strategies for Co-Located Utility-Scale Wind-Solar-Based Hybrid Power Plants: A Review," *Eng, Review* vol. 5, no. 2, pp. 677-719, 2024, doi: 10.3390/eng5020038.
- [2] H. Haes Alhelou, M. E. Hamedani-Golshan, R. Zamani, E. Heydarian-Forushani, and P. Siano, "Challenges and opportunities of load frequency control in conventional, modern and future smart power systems: A comprehensive review," *Energies*, Review vol. 11, no. 10, 2018, Art no. en11102497, doi: 10.3390/en11102497.
- [3] P. Gopi, S. V. Reddy, M. Bajaj, I. Zaitsev, and L. Prokop, "Performance and robustness analysis of V-Tiger PID controller for automatic voltage regulator," *Scientific Reports*, Article vol. 14, no. 1, 2024, Art no. 7867, doi: 10.1038/s41598-024-58481-1.
- [4] V. P. Meena, V. P. Singh, and J. M. Guerrero, "Investigation of reciprocal rank method for automatic generation control in two-area interconnected power system," *Mathematics and Computers in Simulation*, Article vol. 225, pp. 760-778, 2024, doi: 10.1016/j.matcom.2024.06.007.
- [5] P. Sreenivasan, L. Dhandapani, S. Natarajan, A. D. Adaikalam, and A. Sivakumar, "Improved load frequency control in dual-area hybrid renewable power systems utilizing PID controllers optimized by the salp swarm algorithm," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, Article vol. 15, no. 3, pp. 1711-1718, 2024, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1711-1718.
- [6] T. Varshney, A. V. Waghmare, V. P. Singh, V. P. Meena, R. Anand, and B. Khan, "Fuzzy analytic hierarchy process based generation management for interconnected power system," *Scientific Reports*, Article vol. 14, no. 1, 2024, Art no. 11446, doi: 10.1038/s41598-024-61524-2.
- [7] H. Choi, R. Elliott, D. Trudnowski, and D. Venkat, "Transient stability quantification of power systems with inverter-based resources via Koopman operator based

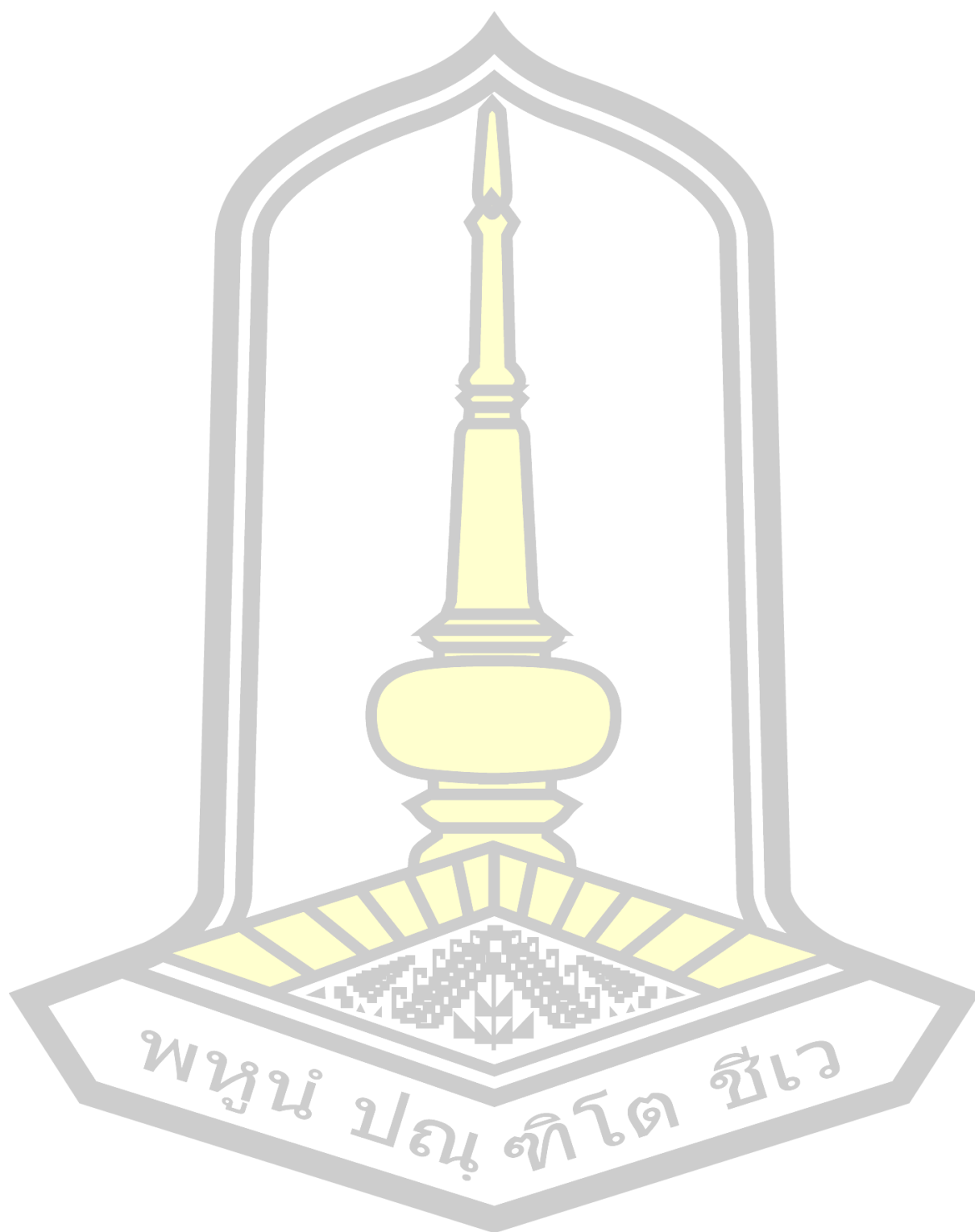
- machine learning approach," *Electric Power Systems Research*, Article vol. 237, 2024, Art no. 111035, doi: 10.1016/j.epsr.2024.111035.
- [8] R. Suvetha, J. J. Nieto, and P. Prakash, "Non-fragile output-feedback control for delayed memristive bidirectional associative memory neural networks against actuator failure," *Applied Mathematics and Computation*, Article vol. 485, 2025, Art no. 129021, doi: 10.1016/j.amc.2024.129021.
- [9] Y. Takabatake, Y. Kasai, E. Shoji, and T. Biwa, "Linear stability analysis of a combustor model with a delayed feedback tube," *Applied Energy*, Article vol. 376, 2024, Art no. 124249, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124249.
- [10] S. Prabaningtyas, S. Subchan, and I. Fitria, "An Optimal Control Problem of SECR Corruption Dynamic Model," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, Article vol. 45, no. 2, pp. 128-141, 2025, doi: 10.37934/araset.45.2.128141.
- [11] C. Li, Q. Zhao, and L. Wang, "The Impact Mechanism and Effect Evaluation of Digital Economy Development on Regional Carbon Emission Reduction: Evidence from Provincial Panel Data in China," *International Journal of Environmental Research*, Article vol. 18, no. 6, 2024, Art no. 99, doi: 10.1007/s41742-024-00651-0.
- [12] M. S. Mauludin, M. Khairudin, R. Asnawi, W. A. Mustafa, and T. S. Fauziah, "The Advancement of Artificial Intelligence's Application in Hybrid Solar and Wind Power Plant Optimization: A Study of the Literature," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, Article vol. 50, no. 2, pp. 279-293, 2025, doi: 10.37934/araset.50.2.279293.
- [13] D. Mazumdar, P. K. Biswas, C. Sain, F. Ahmad, and L. Al-Fagih, "A comprehensive analysis of the optimal GWO based FOPID MPPT controller for grid-tied photovoltaics system under atmospheric uncertainty," *Energy Reports*, Article vol. 12, pp. 1921-1935, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.08.013.
- [14] W. Sa-ngiamvibool, "Optimal Fuzzy Logic Proportional Integral Derivative Controller Design by Bee Algorithm for Hydro-Thermal System," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 1-1, 2017, doi: 10.1109/TII.2017.2647812.

- [15] S. Audomsi *et al.*, "The development of pid controller by chess algorithm," *Engineering Access*, Article vol. 10, no. 1, pp. 46-50, 2024. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85190369408&partnerID=40&md5=c0d8ef9c4f74284ccec421c0f81ecf57>.
- [16] M. N. S. Shahi, N. A. Orka, and A. Ahmed, "2DOF-PID-TD: A new hybrid control approach of load frequency control in an interconnected thermal-hydro power system," *Heliyon*, Article vol. 10, no. 17, 2024, Art no. e36753, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36753.
- [17] K. Ananda-Rao *et al.*, "MPPT Charge Controller using Fuzzy Logic for Battery Integrated with Solar Photovoltaic System," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, Article vol. 47, no. 2, pp. 171-182, 2025, doi: 10.37934/ARASET.47.2.171182.
- [18] M. Sariki and R. Shankar, "Optimal CC-2DOF(PI)-PDF controller for LFC of restructured multi-area power system with IES-based modified HVDC tie-line and electric vehicles," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 32, p. 101058, 2022/08/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.09.004>.
- [19] N. Micheal Mathavavisakan and K. Indhira, "Nonlinear metaheuristic cost optimization and ANFIS computing of feedback retrial queue with two dependent phases of service under Bernoulli working vacation," *International Journal of Modern Physics B*, Article vol. 38, no. 30, 2024, Art no. 2440004, doi: 10.1142/S0217979224400046.
- [20] D. Tripathy, B. K. Sahu, B. Patnaik, and N. B. Dev Choudhury, "Spider monkey optimization based fuzzy-2D-PID controller for load frequency control in two-area multi source interconnected power system," in *International Conference on Technologies for Smart City Energy Security and Power: Smart Solutions for Smart Cities, ICSESP 2018 - Proceedings*, 2018, vol. 2018-January, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSESP.2018.8376743. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85050070045&doi=10.1109%2fICSESP.2018.8376743&partnerID=40&md5=64436ae23cce9dbe3a96e8475195eaaf>

- [21] R. K. Sahu, S. Panda, and U. K. Rout, "DE optimized parallel 2-DOF PID controller for load frequency control of power system with governor dead-band nonlinearity," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Article vol. 49, no. 1, pp. 19-33, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.12.009.
- [22] H. Vatankhah Ghadim, M. Tarafdar Hagh, and S. Ghassem Zadeh, "Fermat-curve based fuzzy inference system for the fuzzy logic controller performance optimization in load frequency control application," *Fuzzy Optimization and Decision Making*, Article vol. 22, no. 4, pp. 555-586, 2023, doi: 10.1007/s10700-022-09402-2.
- [23] M. Barakat, A. Donkol, G. M. Salama, and H. F. A. Hamed, "Optimal Design of Fuzzy Plus Fraction-Order-Proportional-Integral-Derivative Controller for Automatic Generation Control of a Photovoltaic-Reheat Thermal Interconnected Power System," *Process Integration and Optimization for Sustainability*, Article vol. 6, no. 4, pp. 883-900, 2022, doi: 10.1007/s41660-022-00257-z.
- [24] A. Daraz, H. Alrajhi, A. Basit, A. R. Afzal, A. N. M. Alahmadi, and I. A. Khan, "Load frequency stabilization of distinct hybrid conventional and renewable power systems incorporated with electrical vehicles and capacitive energy storage," *Scientific Reports*, Article vol. 14, no. 1, 2024, Art no. 9400, doi: 10.1038/s41598-024-60028-3.
- [25] M. Alateeq and W. Pedrycz, "Logic-oriented fuzzy neural networks: A survey," *Expert Systems with Applications*, vol. 257, p. 125120, 2024/12/10/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125120>.
- [26] K. Zervoudakis and S. Tsafarakis, "Fuzzy Self-tuning Bees Algorithm for designing optimal product lines," *Applied Soft Computing*, vol. 167, p. 112228, 2024/12/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112228>.
- [27] J. R. Nayak, B. Shaw, B. K. Sahu, and K. A. Naidu, "Application of optimized adaptive crow search algorithm based two degree of freedom optimal fuzzy PID controller for AGC system," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 32, p. 101061, 2022/08/01/ 2022, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.09.007>.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสิทธิศักดิ์ อุดมศรี
วันเกิด	วันที่ 22 เดือนกันยายน พ.ศ. 2543
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสรรพสิทธิประสงค์ จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 112 หมู่ 4 บ้านหนองตอแก้ว ตำบลชีเหล็ก อำเภอเมือง อุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี รหัสไปรษณีย์ 34000 ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2562 มัธยมศึกษาตอนปลาย แผนก วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนเตรียม อุดมศึกษาพัฒนาการอุบลราชธานี พ.ศ. 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2568 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	- Audomsi, S., Pakdeesuwan, K., Chanthamat, E., Suwannata, N., Kaewhanam, N., Chatchanayuenyong, T., & Sa-ngiamvibool, W. (2024). The Development of PID Controller by Chess Algorithm. Engineering Access, 10(1), 46-50. - Audomsi, S., Wattana, S., Uthathip, N., & Sa-ngiamvibool, W. (2025). Development and Design of an Optimal Fuzzy Logic Two Degrees of Freedom-Proportional Integral Derivative Controller for a Two-Area Power System Using the Bee Algorithm. Energies, 18(4), 915.

พูน ปณ ทิโต ชเว