

การออกแบบตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ด้วยอัลกอริทึมการผสมเกสรดอกไม้ สำหรับควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยการเชื่อมโยงโรงไฟฟ้าสามพื้นที่

The Flower Pollination Algorithm Optimized a (1 + PI)-PI-PID Controller for Automatic Generation Control of a Three-Area Interconnected Power System

เรื่องยศ เกตุรักษา^{1*}, โสภา แซ่เฮ้ง² และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ (ศาลายา)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ (ศาลายา)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์

* ผู้รับผิดชอบบทความ
ruangyos.k@rmutr.ac.th

Received: 21 May 2026

Revised: 14 Aug 2026

Accepted: 19 Aug 2026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติแบบสามพื้นที่ที่ใช้ตัวควบคุมแบบ (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่มีค่าเกนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ถูกค้นหาด้วยอัลกอริทึมการผสมเกสรดอกไม้ ซึ่งตัวควบคุมที่นำเสนอมีหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าของระบบ และรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ตัวควบคุมที่นำเสนอยังควบคุมแหล่งจ่ายพลังงานเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการโหลด ผลการจำลองจะพิจารณาการตอบสนองทางพลวัตใน 3 กรณี คือ พบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในกรณีที่ 1 การเบี่ยงเบนกำลังในสายส่งของสามพื้นที่มีค่าอัตราการพุ่งเกินสูงสุด เท่ากับ 0.25 p.u. 0.10 p.u. และ 0.17 p.u. ตามลำดับ และเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ภายใน 13-16 วินาที สำหรับกรณีที่ 2 เมื่อเกิดการรบกวนจากโหลดอย่างกะทันหันระบบสามารถกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้ภายใน 18 วินาที และกรณีที่ 3 ในการควบคุมความถี่พื้นที่ Area 3 มีการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดอยู่ในช่วง -0.14 Hz ถึง 0.10 Hz และสามารถระงับการแกว่งกลับสู่ความถี่มาตรฐาน (0 Hz) ได้รวดเร็วภายในเวลาเพียง 5 วินาที

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ ตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี อัลกอริทึมการผสมเกสรดอกไม้ เสถียรภาพระบบไฟฟ้า ค่าเบี่ยงเบนความถี่

Abstract

This paper presents a three-area Automatic Generation Control (AGC) model utilizing an optimized (1+PI)-PI-PID controller. The optimal gain parameters for the controller are determined through the Flower Pollination Algorithm (FPA). The proposed control scheme is designed to compensate for system power imbalances and maintain overall electrical grid stability. Furthermore, the proposed methodology regulates energy sources to satisfy load demands effectively. The simulation results evaluated across three scenarios show high performance of the proposed controller. In Case 1, the tie-line power deviations achieve peak overshoots of 0.25 p.u., 0.10 p.u., and 0.17 p.u. for Areas 1, 2, and 3, respectively, with settling times between 13-16 seconds. In Case 2, under sudden load disturbances, the system stabilizes within 18 seconds.

Finally, in Case 3, the proposed control scheme successfully dampens frequency oscillations in Area 3 (ranging from -0.14 Hz to 0.10 Hz) and restores the nominal frequency within 5 seconds.

Keywords: AGC, (1+PI)–PI–PID controller, FPA, Electrical grid stability, Frequency deviation

1. บทนำ

ระบบไฟฟ้าที่ดีต้องมีความเสถียร เชื่อถือได้ และสามารถจ่ายพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลดได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นระบบไฟฟ้าจึงต้องมีการเชื่อมโยงกันเป็นแบบหลายพื้นที่ด้วยสายส่ง เนื่องจากกรณีที่พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งมีความต้องการโหลดสูงกว่าปกติ หรือพื้นที่นั้นไม่สามารถจัดหาพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการโหลดในพื้นที่ของตนเองได้ พื้นที่ที่ถูกเชื่อมต่อกันอยู่เป็นโครงข่ายจะสามารถให้ความช่วยเหลือในการจัดหาพลังงานที่เพียงพอได้ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือระบบไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพนั้น คือระบบที่มีขีดความสามารถในการกลับคืนสู่จุดปฏิบัติการที่สมดุลได้ หลังจากที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการดำเนินงานของระบบไฟฟ้า เพื่อใช้ในการควบคุมการจ่ายพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด โดยวัตถุประสงค์หลักของการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติมีดังต่อไปนี้

- การรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้า
- เพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่าย ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและต้นทุน
- เพิ่มความปลอดภัย

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มักเชื่อมโยงระบบโรงไฟฟ้าพลังความร้อนเข้าด้วยกันเอง โดยมีงานวิจัยเพียงส่วนน้อยที่กล่าวถึงการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับระบบโรงไฟฟ้าพลังความร้อนเข้ากับโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งระบบย่อยทั้งพลังน้ำ และความร้อนมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันหลายประการ [1-4] อีกทั้งรูปแบบการปฏิบัติงานที่ใช

อาจจะอยู่ในโหมดต่อเนื่องด้วยตัวควบคุม และระบบทำงานอย่างต่อเนื่องในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง ในทางกลับกันการปฏิบัติงานของตัวควบคุมอาจอยู่ในโหมดไม่ต่อเนื่องก็ได้

ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายที่นำเสนอระบบไฟฟ้าที่การเชื่อมต่อถึงกันของโรงไฟฟ้าพลังน้ำกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังความร้อนเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการทำงานของกังหันไอน้ำแบบให้ความร้อนซ้ำ (Reheat steam turbine) กับเครื่องควบคุมความเร็วไฟฟ้า (Electric governor) ซึ่งอยู่ในรูปแบบอื่น ๆ ให้ศึกษา ซึ่งผลการจำลองที่ถูกเผยแพร่ [1-8] ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมการเบี่ยงเบนความถี่ ซึ่งข้อดีของตัวควบคุมแบบพีไอดีคือ มีโครงสร้างที่เรียบง่าย สามารถลดค่าผิดพลาดสะสมในสภาวะคงที่ (Steady-state error) ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สามารถลดการพุ่งเกิน (Overshoot) และปรับปรุงการตอบสนองให้เร็วขึ้นได้ [9] และในช่วงเวลาต่อมา ตัวควบคุมพีไอดีก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ [2, 6-8] แต่อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของตัวควบคุมพีไอดีคือ การค้นหาค่าเกนของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการนั้น ๆ ไม่ใช่เรื่องง่าย ในอดีตพบว่าการออกแบบเพื่อหาค่าเกนด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ [9] เป็นเพียงการคำนวณเพื่อหาค่าเกนอย่างหยาบ ๆ อีกทั้งต้องมีการปรับจูนค่าเกนที่ได้ในภายหลัง ซึ่งถือว่าค่าเกนที่ได้ยังไม่ได้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

ดังนั้นบทความนี้จึงขอนำเสนอแนวความคิด 2 อย่าง คือ แนวคิดที่ 1 การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของการเชื่อมโยงโรงไฟฟ้าสามพื้นที่ ที่มีทั้งขนาด และประเภทแหล่งการผลิตที่แตกต่างกัน โดยพื้นที่ Area 1 เป็นแหล่งผลิตพลังความร้อนขนาดกลาง พื้นที่ Area 2 เป็นแหล่งผลิตพลังความร้อนขนาดใหญ่ และพื้นที่ Area 3 เป็นแหล่งผลิตพลังน้ำขนาดเล็ก พร้อมทั้งพิจารณาการทำงานร่วมกับ ระบบกักเก็บพลังงานด้วยตัวเก็บประจุ (CES) และการตอบสนองภายใต้สภาวะโหลดรบกวนอย่างกะทันหัน ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ได้ครอบคลุม และสะท้อนระบบพลวัตของระบบไฟฟ้าจริงมากกว่างานวิจัยดั้งเดิม [3-8] ภายใต้โหมดปฏิบัติงานแบบต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง [3] อีกทั้งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่พบในอดีต มักใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบดั้งเดิม (Traditional PID Controller) ซึ่งมีข้อจำกัดในการปรับจูนค่าเกน และการตอบสนองต่อระบบที่มีความซับซ้อน และแนวคิด

ที่ 2 คือ การนำเสนอตัวควบคุม (1+พีโอ)-พีโอ-พีโอดี ซึ่งเป็นการผสมผสานลูกควบคุม 3 ระดับขั้นเข้าด้วยกัน คือ

- ลูกชั้นนอก (1+พีโอ) ทำหน้าที่ควบคุมสัญญาณ Area Control Error (ACE) ที่มีพลวัตช้าที่สุด
- ลูกชั้นกลาง พีโอ ทำหน้าที่ควบคุมพลวัตระดับปานกลาง
- ลูกชั้นใน พีโอดี ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับวาล์วไอน้ำ และวาล์วน้ำ เพื่อตอบสนองต่อการรบกวนที่มีพลวัตเร็วที่สุดได้อย่างทันท่วงที

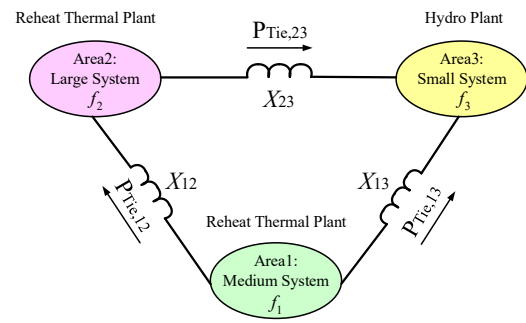
นอกจากนี้ ยังได้ประยุกต์ใช้วิธีการของอัลกอริทึมการผสมเกสรดอกไม้ม (FPA) [10] สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดให้กับตัวควบคุมแบบ (1+พีโอ)-พีโอ-พีโอดี เพื่อใช้ในการควบคุมเสถียรภาพของควมถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงกัน โดยบทความวิจัยนี้ ทำการจำลองระบบไฟฟ้าในแง่ของการตอบสนองทางพลวัตใน 3 กรณี คือ

- ผลกระทบที่มีต่อสายส่งเชื่อมโยงของสามพื้นที่
- ผลกระทบที่มีต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของสามพื้นที่
- ผลกระทบที่มีต่อค่าเบี่ยงเบนความถี่ของสามพื้นที่

2. ระบบไฟฟ้าการศึกษา

2.1 สายส่งเชื่อมโยง (Tie-lines)

ในการวิเคราะห์และจำลองระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ มักนิยมใช้แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกันซึ่งประกอบด้วยพื้นที่ควบคุมตั้งแต่สองพื้นที่ขึ้นไป เพื่อให้การจำลองมีความสมจริง ครอบคลุมความซับซ้อนของการจ่ายโหลด และการควบคุมความถี่ สำหรับบทความนี้ ทำการศึกษาระบบไฟฟ้าสามพื้นที่ ซึ่งประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal Power Plant) สองแห่ง โดยพื้นที่ Area 1 มีขนาดกลาง (Medium System) และพื้นที่ Area 2 มีขนาดใหญ่ (Large System) สุดท้าย โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro Power Plant) หนึ่งแห่ง เป็นพื้นที่ Area 3 มีขนาดเล็ก (Small System) โดยมีการเชื่อมโยงกันด้วยสายส่งเชื่อมโยง ในรูปแบบสามพื้นที่ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเชื่อมโยงกันด้วยสายส่งเชื่อมโยงของสามพื้นที่

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1 สามารถหาความสัมพันธ์การเชื่อมโยงกันด้วยสายส่งในพื้นที่ Area 1 กับอีกสองพื้นที่ ได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\Delta P_{Tie,1}(s) = \Delta P_{Tie,12}(s) + \Delta P_{Tie,13}(s) \quad (1)$$

$$\Delta P_{Tie,1}(s) = \frac{2\pi}{s} [(T_{12}\Delta f_1(s) + T_{13}\Delta f_1(s)) - (T_{12}\Delta f_2(s) + T_{13}\Delta f_3(s))] \quad (2)$$

กำหนดให้

f = ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ระบุ

i = ตัวห้อยที่อ้างถึงพื้นที่

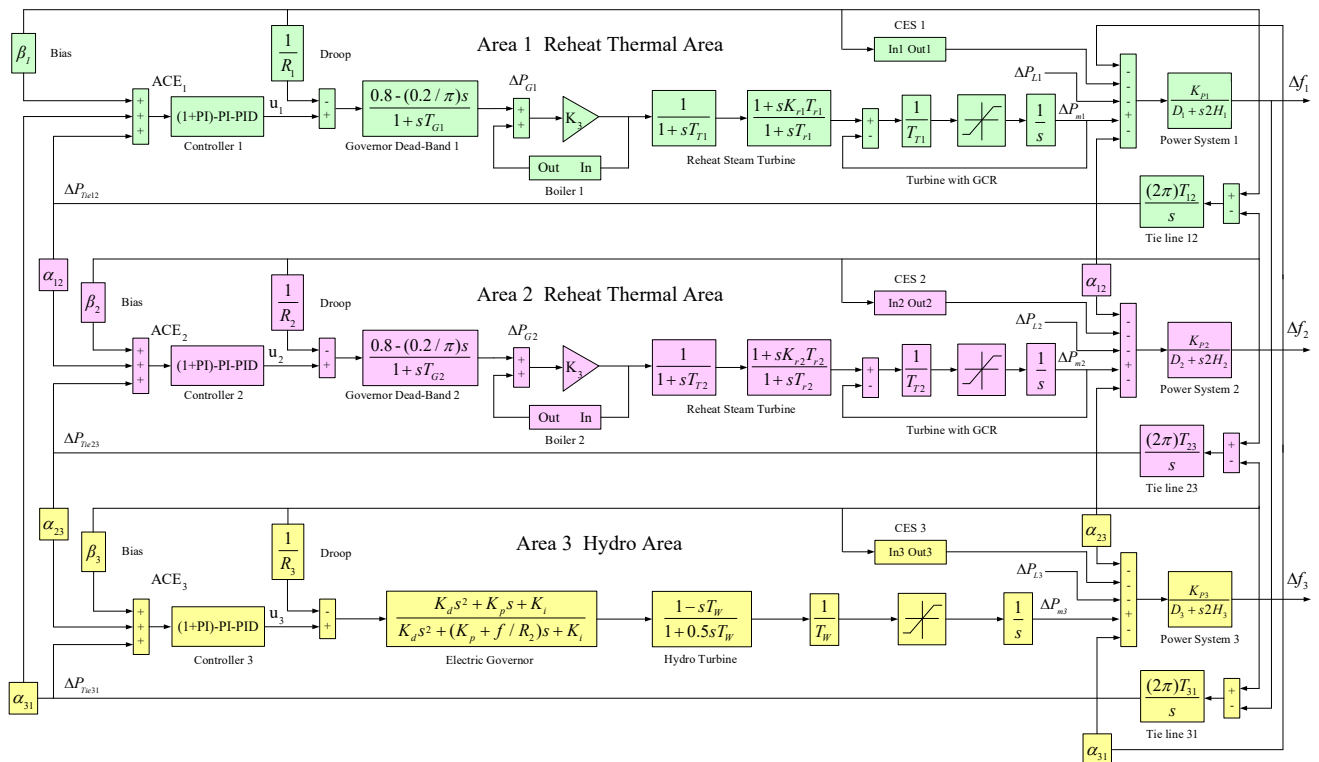
$\Delta P_{Tie,i}$ = ค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

T_i = ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงโคโรไนซ์

Δf_i = ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่

สำหรับแบบจำลองพลวัตของระบบที่มีการเชื่อมโยงสามพื้นที่ เพื่อใช้ในการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 2 และหากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งทั้งหมดระหว่างพื้นที่ Area 1 และพื้นที่ Area อื่น ๆ สามารถหาค่าเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ Area อื่น ๆ (j) [1-3] ได้ดังสมการที่ (3)

$$\Delta f_j(s) = \frac{1}{2H_j + D_j} \left[\sum_{i=1}^n \Delta P_{mi,j}(s) - \Delta P_{Lj}(s) - \Delta P_{Tie,j}(s) \right] \quad (3)$$



รูปที่ 2 แบบจำลองพลวัตที่ใช้ในการศึกษาระบบที่มีการเชื่อมโยงสามพื้นที่

จากสมการที่ (3) กำหนดให้

j = ตัวห้อยที่อ้างถึง Area อื่น ๆ

H = ค่าคงที่ความเฉื่อย

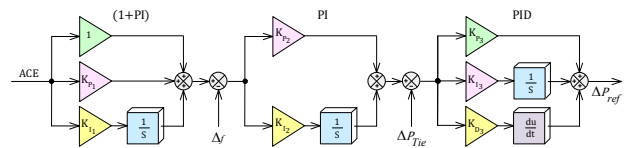
D = ค่าคงที่สัมประสิทธิ์ความหน่วง

ΔP_m = ค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตไฟฟ้า

ΔP_L = ค่าการเปลี่ยนแปลงโหลด

2.2 โครงสร้างตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี

โครงสร้างตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี [1] หรือตัวควบคุมที่มีการผสมผสานการจัดเรียงแบบ (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในบทความนี้ ซึ่งเทคนิคนี้ได้รวมเอาข้อดีของตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิมไว้ด้วยกัน ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีโครงสร้างที่ชัดเจน และสามารถแก้ไขจุดบกพร่องได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี

จากรูปที่ 3 ตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี เป็นตัวควบคุมแบบเรียงซ้อน 3 ระดับ โดยแต่ละส่วนทำหน้าที่ควบคุมพลวัตในระดับความเร็วที่แตกต่างกัน

2.2.1 ลูปชั้นนอก (Outer Loop) ตัวควบคุม (1+พีไอ)

ทำหน้าที่ควบคุมตัวแปรหลัก เช่น สัญญาณข้อผิดพลาดในการควบคุมพื้นที่ (Area Control Error; ACE) ซึ่งมีพลวัตที่ช้าที่สุด โดยสามารถหาความสัมพันธ์ในการควบคุม Area อื่น ๆ ได้จากสมการที่ (4)

$$ACE_j = \Delta f_j(s) + \Delta P_{Tie,j} \quad (4)$$

และทำหน้าที่สร้างสัญญาณ Setpoint ให้กลับตัวควบคุมลูปถัดไป

2.2.2 ลูปชั้นกลาง (Intermediate Loop) ตัวควบคุม พีโอ

ทำหน้าที่ควบคุมตัวแปรที่มีพลวัตปานกลาง โดยรับ Setpoint มาจากลูปชั้นนอก และสร้าง Setpoint ให้กับลูปชั้นใน

2.2.3 ลูปชั้นใน (Inner Loop) ตัวควบคุม พีไอดี

ทำหน้าที่ควบคุมตัวแปรที่มีพลวัตเร็วที่สุด และเชื่อมต่อโดยตรงกับ Actuator เช่น วาล์วไอน้ำ หรือวาล์วน้ำของกังหัน เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการรบกวนได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาตัวควบคุม (1+พีโอ)-พีโอ-พีไอดี ในโดเมน s สามารถหาทรานส์เฟรฟังก์ชันได้ดังสมการที่ (5) - (7)

$$G_{(I+PI)}(s) = 1 + K_{PI} + \frac{K_{II}}{s} \quad (5)$$

$$G_{(PI)}(s) = K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} \quad (6)$$

$$G_{(PID)}(s) = K_{P3} + \frac{K_{I3}}{s} + K_{D3}s \quad (7)$$

โมเดลแบบจำลองพลวัตของระบบที่ใช้ในการศึกษา มีการเชื่อมโยงสามพื้นที่ ในรูปที่ 2 มีค่ากำลังไฟฟ้าฐาน (System base) เท่ากับ 1500 MW และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกใช้งาน ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองพลวัตของระบบที่มีการเชื่อมโยงสามพื้นที่

Parameter Type	Area		
	Area1	Area2	Area3
K_s (s)	0.35	0.25	0.40
T_g (s)	0.07	0.05	0.06
T_t (s)	0.38	0.45	0.35
R (Hz/p.u.)	3.0	2.73	2.81
H (p.u.s)	0.083	0.100	0.0623
D (p.u./Hz)	0.015	0.017	0.014
β (p.u./Hz)	0.34	0.38	0.36
T (p.u./Hz)	$T_{12} = 0.2$	$T_{21} = 0.2$	$T_{31} = 0.25$
	$T_{13} = 0.25$	$T_{23} = 0.12$	$T_{32} = 0.25$

2.3 อัลกอริทึมการผสมเกสรดอกไม้ (Flower Pollination Algorithm; FPA)

FPA ได้รับการเสนอโดย Yang ในปี 2014 [10] เป็นเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristics) แบบอิงประชากร ซึ่งในบทความนี้จะใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดให้กับตัวควบคุม

(1+พีโอ)-พีโอ-พีไอดี โดย FPA จะทำการเลียนแบบการผสมเกสรตามธรรมชาติของดอกไม้ด้วยรูปแบบการผสมเกสรโดยอิงตามกฎเฉพาะ 4 ข้อ ดังต่อไปนี้

1. การผสมเกสรแบบไขว้ข้ามโดยสิ่งมีชีวิต คือการผสมเกสรวงกว้าง โดยอาศัยการสุ่มด้วยการบินแบบ Levy (กฎข้อที่ 1)
2. การผสมเกสรด้วยตัวเองโดยสิ่งไม่มีชีวิต คือการผสมเกสรเฉพาะที่ โดยอาศัยการสุ่มแบบเอกรูป (กฎข้อที่ 2)
3. ความคงที่ของดอกไม้ กำหนดค่าเท่าเทียมกันระหว่างดอกไม้แต่ละดอก (กฎข้อที่ 3)
4. การเลือกรูปแบบการผสมระหว่างการผสมเกสรแบบไขว้ข้าม และการผสมเกสรด้วยตัวเอง ซึ่งจะถูกกำหนดความน่าจะเป็นในการสลับตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือสมการ $p \in [0, 1]$ (กฎข้อที่ 4)

2.3.1 ประชากรเริ่มต้น (Initial Population Generation)

กำหนดให้สร้างกลุ่มประชากรดอกไม้เริ่มต้นแบบเอกรูป (Uniform Random Distribution) จำนวน $N = 50$ เกสร/ไขลูชั้น ภายในขอบเขตการค้นหาค่า (Upper and Lower Bounds) โดยกำหนดให้

- ค่าเกินสูงสุดของ พี = 100 ไโอ = 10 และ ดี = 0.1
- ค่าเกินต่ำสุดของ พี = 1×10^{-6} ไโอ = 1×10^{-6} และ ดี = 1×10^{-6}

2.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ในบทความนี้เลือกใช้ ITAE (ซึ่งเป็นที่ยอมรับที่สุดในระบบ AGC เนื่องจากลดทั้ง Overshoot และ Settling Time)

$$J = ITAE = \int_0^{t_{sim}} (|\Delta f| + |\Delta P_{tie,ij}|) dt \quad (8)$$

2.3.3 เกณฑ์การสิ้นสุด (Termination Criterion)

จำนวนรอบการทำซ้ำสูงสุด (Maximum Iterations) คือ 500 รอบ หรือเมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เข้าสู่ค่าลอยตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลงติดต่อกันตามเงื่อนไข

3. การทดลองและผลการทดลอง

ในส่วนนี้แสดงผลการจำลองที่ศึกษาด้วยโปรแกรม MATLAB และ Simulink (License No.#40904944) ซึ่งเป็นเครื่องมือใน

การวิจัย กำหนดให้ตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุด แสดงในตารางที่ 2 เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพตัวควบคุมที่นำเสนอ กำหนดให้โพลด์มีค่าเท่ากับ 0.01 p.u. โดยการทดลองมีการกำหนดสถานการณ์ 3 กรณีดังต่อไปนี้ คือ

กรณีที่ 1 ตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับสามพื้นที่ภายใต้การเบี่ยงเบนความถี่ของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

กรณีที่ 2 การตอบสนองแบบไดนามิกของระบบที่เชื่อมต่อกันสามพื้นที่ เนื่องจากการรบกวนจากโหลดอย่างกะทันหัน

กรณีที่ 3 นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพความมีเสถียรภายใต้ความเบี่ยงเบนของความถี่สำหรับสามพื้นที่

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดีที่เหมาะสมที่สุด

Optimization Technique	Controller Gains						
	K_{P1}	K_{I1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}
(1+PI)-PI-PID	6.5	6.5	4.79	5.21	-5.5	-5.5	-1.08

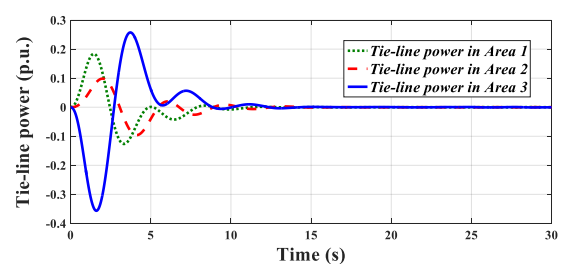
สำหรับการออกแบบตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุด ในตารางที่ 2 จะพบว่าอัตราขยายนั้น สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวก และค่าลบ โดยความหมายของอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีที่เป็นบวก เรียกว่า การกระทำโดยตรง (Direct Acting) ส่วนความหมายของอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีที่เป็นลบ เรียกว่า การกระทำผกผัน (Reverse Acting) โดยการออกแบบตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุด จะอาศัยชุดข้อมูลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังตารางที่ 3 เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วย FPA

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม FPA

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น
ขนาดของประชากร	50
จำนวนรอบการทำซ้ำ	500
ความน่าจะเป็น P	0.8
ค่าสูงสุด [P, I, D]	[100, 10, 0.1]
ค่าต่ำสุด [P, I, D]	[1×10^{-6} , 1×10^{-6} , 1×10^{-6}]

3.1 กรณีที่ 1 ตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุด กรณีที่มีการเบี่ยงเบนความถี่ของกำลังไฟฟ้าในสายส่งเชื่อมโยง (Tie-line power) ของสามพื้นที่

AGC โหมดจะทำหน้าที่ในการตรวจสอบ ความถี่ของระบบไฟฟ้า การสลับสายส่ง และการปรับปรุงผลกระทบที่มีต่อสายส่งเชื่อมโยง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของกำลังไฟฟ้าแสดงในสมการที่ (3) จะได้รับการชดเชยโดยตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุดที่นำเสนอ เพื่อการปรับสมดุลระบบ จนเกิดเสถียรภาพระบบไฟฟ้า โดยการนำค่าสะสมที่เกิดจากความไม่สมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Supply) การใช้ไฟฟ้า (Demand) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบ (Loss) มาร่วมพิจารณา จากผลการจำลองพบว่าพื้นที่ Area 3 เกิดการเบี่ยงเบนความถี่มากที่สุด เนื่องจากมีขนาดเล็ก จึงทำให้เกิดค่า Peak Overshoot = 0.18 p.u. และมีค่า Settling Time = 13 sec ถัดมาพื้นที่ Area 2 เกิดการเบี่ยงเบนความถี่อยู่ระดับกลาง เพราะอยู่ใกล้พื้นที่ Area 3 โดยมีค่า Peak Overshoot = 0.10 p.u. และมีค่า Settling Time = 14 sec และสุดท้ายพื้นที่ Area 1 เกิดการเบี่ยงเบนความถี่น้อยที่สุด เพราะมีขนาดใหญ่ จึงได้รับผลกระทบน้อยที่สุดในสามพื้นที่ โดยมีค่า Peak Overshoot = 0.25 p.u. และมีค่า Settling Time = 16 sec แสดงในรูปที่ 4

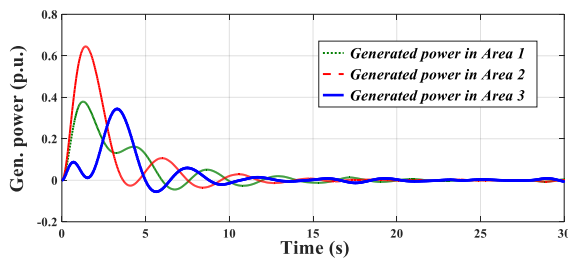


รูปที่ 4 การเบี่ยงเบนของกำลังในสายส่งสามพื้นที่

3.2 กรณีที่ 2 การตอบสนองแบบไดนามิกของระบบที่เชื่อมต่อกันสามพื้นที่ เนื่องจากการรบกวนจากโหลดอย่างกะทันหัน (Sudden load disturbance)

กำหนดให้แต่ละพื้นที่ได้รับผลกระทบที่แตกต่างกันจากการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างกะทันหัน โดยใช้ตัวควบคุม (1+พีไอ)-พีไอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุด ทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน

ด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitive Energy Storage; CES) เพื่อช่วยลดผลกระทบ ของการกลับเข้าสู่เสถียรภาพ พบว่าพื้นที่ Area 2 มีค่าการพุ่งเกินสูงสุด = 0.65 p.u. ในช่วงวินาทีที่ 1.5 และค่อนข้างแตกต่างจากพื้นที่อื่น ๆ เนื่องจากพื้นที่ Area 2 อยู่ใกล้พื้นที่ Area 3 ที่มีขนาดเล็กที่สุด จึงต้องช่วยลดการรบกวนจากโหลดอย่างกระทันหัน โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคง = 18 sec ดังรูปที่ 5 อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายภายใต้สายส่งเชื่อมโยง ทั้งสามพื้นที่ ยังมีหน้าที่คอยสนับสนุนซึ่งกันและกัน เพื่อนำพาระบบไฟฟ้ากลับสู่เสถียรภาพ หรือจุดสมดุลของกำลังไฟฟ้าอีกครั้ง

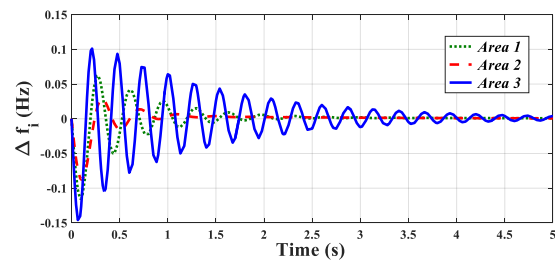


รูปที่ 5 การตอบสนองแบบไดนามิกของระบบที่เชื่อมต่อกันแบบสามพื้นที่ กรณีเกิดการรบกวนจากโหลดแบบกระทันหัน

3.3 กรณีที่ 3 การทดสอบความมีเสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency deviation) ในสามพื้นที่

การทดสอบความมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในสามพื้นที่ เงื่อนไขสำหรับการทดสอบคือ ทั้งสามพื้นที่จะได้รับโหลดที่มีขนาดเท่ากัน โดยใช้ตัวควบคุม (1+พีโอ)-พีโอ-พีไอดีที่เหมาะสมที่สุด ในการควบคุมเพื่อบรรเทาการเบี่ยงเบนความถี่ (Δf) สำหรับผลการจำลอง สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6 ซึ่งจะพบว่า ตัวควบคุม (1+พีโอ)-พีโอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุดที่นำเสนอด้วยขั้นตอนวิธีการของ FPA สามารถควบคุมความถี่ที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อนำพาระบบไฟฟ้าให้กลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อีกครั้ง โดยการ ทำงานของ AGC ในรูปการควบคุมรอง ซึ่งจะทำงานร่วมกับตัวควบคุม (1+พีโอ)-พีโอ-พีไอดี ที่เหมาะสมที่สุดที่นำเสนอร่วมกับ CES เพื่อบรรเทาปัญหาการแกว่งของระบบไฟฟ้า และเพื่อการกลับคืนสู่สภาวะเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังได้อีกครั้ง โดยจากการ

ทดลองพบว่าพื้นที่ Area 3 มีการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด โดยพุ่งลงไปที่ประมาณ -0.14 Hz ในช่วงเริ่มต้น และแกว่งกลับขึ้นมาสูงสุด = 0.10 Hz และยังสามารถระงับการแกว่ง และสามารถนำพาระบบกลับเข้าสู่ความถี่มาตรฐาน (0 Hz) ได้ภายในเวลา 5 sec ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6 การทดสอบความมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในสามพื้นที่

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ ศึกษาแบบจำลองพลวัตระบบที่มีการเชื่อมโยงสามพื้นที่ โดยมีสมมุติฐานว่า ตัวควบคุม (1+พีโอ)-พีโอ-พีไอดี ที่ถูกออกแบบด้วยอัลกอริทึมการผสมเกสรดอกไม์ จะให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้ในการควบคุมโรงไฟฟ้าสามแห่งที่มีการเชื่อมโยงกัน ด้วยระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า จากผลการจำลองที่ศึกษาพบว่า ตัวควบคุม (1+พีโอ)-พีโอ-พีไอดี ที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพเพื่อรับประกันว่า การผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติที่มีการเชื่อมโยงโรงไฟฟ้าสามพื้นที่นั้น สามารถรักษาความสมดุลและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ โดยสามารถควบคุมการเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าในสายส่งให้เข้าสู่สภาวะคงตัวได้ภายใน 13-16 วินาที อีกทั้งยังสามารถรับมือกับการรบกวนจากโหลดอย่างกระทันหัน โดยใช้เวลาในการรักษาสภาพคงตัวเพียง 18 วินาที และที่สำคัญที่สุดคือ สามารถบรรเทาการแกว่งของความถี่ (Δf) ในพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวสูง คือพื้นที่ Area 3 ให้กลับคืนสู่สภาวะปกติ (0 Hz) ได้ภายในเวลาเพียง 5 วินาที ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตจะประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่ นำเสนอกับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ โดยคำนึงถึงความคงทน (Robustness) เมื่อพารามิเตอร์ของระบบเกิดความไม่แน่นอน (Uncertainty)

5. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการและศูนย์การเรียนรู้ระบบอัตโนมัติ (Thai-German Institute) สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมและระบบอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ (สาขายา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สำหรับสถานที่ในการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. S. Iqbal et al., "A hybrid optimization algorithm based on cascaded (1+PI)-PI-PID controller for load frequency control in interconnected power systems," *Results in Engineering*, Vol. 24, 103624, 2024.
- [2] K. Hongesombut and R. Keteruksa, "Fractional order based on a flower pollination algorithm PID controller and virtual inertia control for microgrid frequency stabilization," *Electric Power Systems Research*, Vol. 220, 109381, 2023.
- [3] S. K. Bhagat, L. C. Saikia and N. R. Babu, "Effect of partial loading on a three-area hydro-thermal system integrated with realistic dish-Stirling solar thermal system, accurate model of high-voltage direct link considering virtual inertia and energy storage systems," *John Wiley Sons Ltd.*, 2021.
- [4] K. S. Lerch, A. Q. Al-Shetwi, C. Z. El-bayeh and M. B. Taha, "Automatic Generation Control of Multi-area Interconnected Power Systems Using ANN Controller," *IJETA*, Vol. 34, No. 1, 2020.
- [5] K. Alzaareer, T. Kerdphol, Y. Mitani and D. Turschner, "Frequency Stability Assessment on Virtual Inertia Control Strategy in Connected and Islanded Multi-Area Power Systems," *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2020.
- [6] P. C. Pradhan, R. K. Sahu and S. Panda, "Firefly algorithm optimized fuzzy PID controller for AGC of multi-area multi-source power systems with UPFC and SMES," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 19, 2016.
- [7] D. Porwal and R. Jain, "An Effect of PID Controller on Two Area Interconnected Power System Model using MATLAB Simulink," *International Journal of Scientific Development and Research (IJS DR)*, Vol. 1, No. 5, 2016.
- [8] K. Jagatheesan, B. Anand, N. Dey and Gaber, "Automatic Generation Control of Thermal-Thermal-Hydro Power Systems with PID Controller using Ant Colony Optimization," *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 18–34, 2015.
- [9] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for Automatic controllers," *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [10] X. S. Yang, M. Karamanoglu and X. He, "Flower pollination algorithm: a novel approach for multi-objective optimization," *Engineering Optimization*, Vol. 46, No. 9, pp. 1222–1237, 2014.