

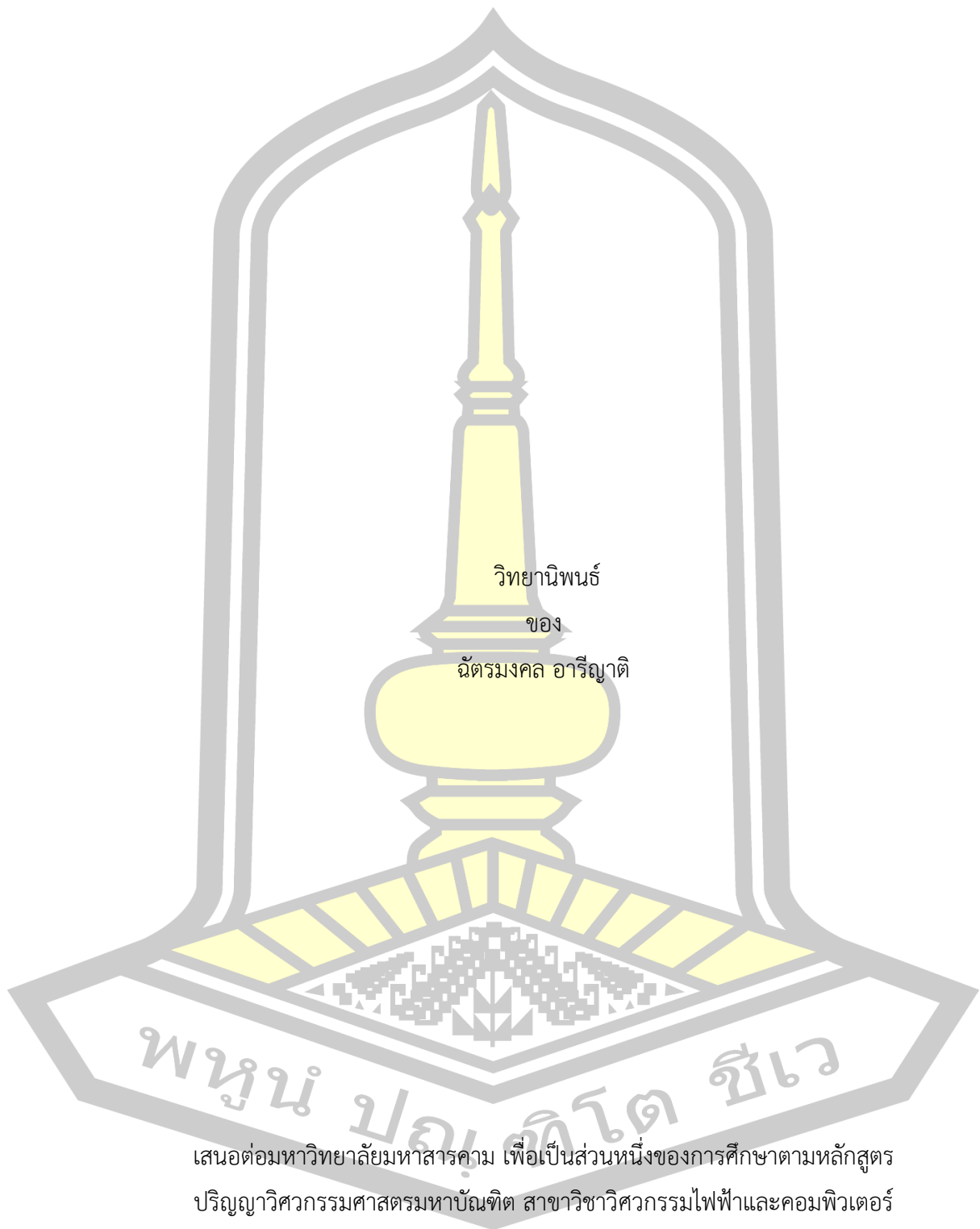
การควบคุมความถี่ไหลหลายแหล่งจ่ายโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองด้วยวิธีหามารุก

วิทยานิพนธ์
ของ
ฉัตรมงคล อารีญาติ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
กรกฎาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การควบคุมความถี่ไหลหลายแหล่งจ่ายโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองด้วยวิธีหามาตรก



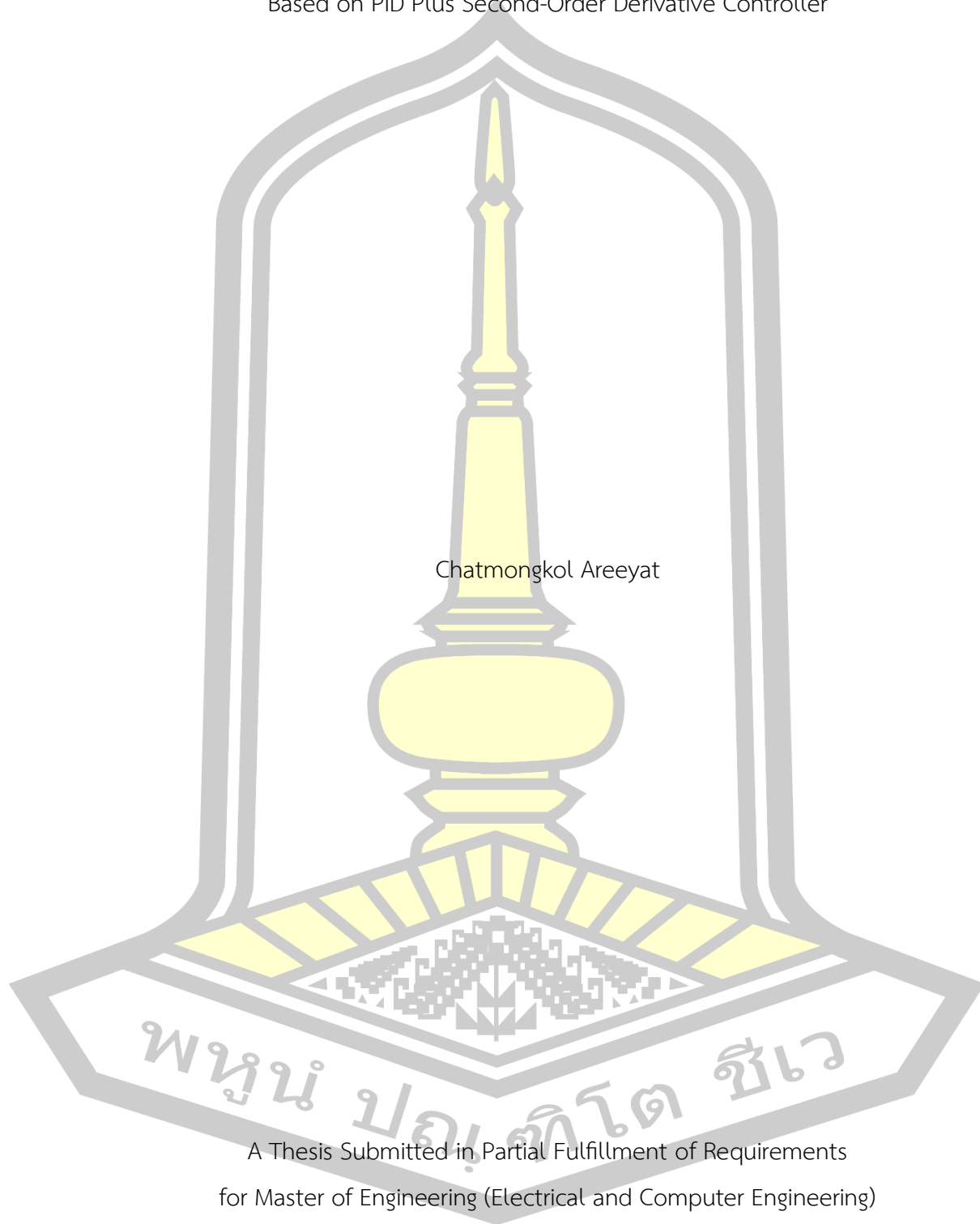
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กรกฎาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Chess Optimizer for Load Frequency Control of Multi-Source Renewable Energy
Based on PID Plus Second-Order Derivative Controller

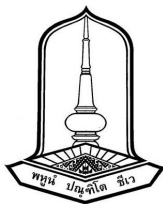
Chatmongkol Areeyat



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

July 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายฉัตรมงคล อารีญาติ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. บัญชา วัฒนะ)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. นิวัตร อังควิษณุพันธ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การควบคุมความถี่โหลดหลายแหล่งจ่ายโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองด้วยวิธีหามากรุก

ผู้วิจัย ฉัตรมงคล อาริญาติ

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมความถี่โหลดแบบไม่เชิงเส้นของระบบไฟฟ้าหลายแหล่งจ่ายสามพื้นที่ โดยแบ่งเป็นสามพื้นที่ โดยมีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ มีค่าการจำกัดอัตราการผลิตอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที สำหรับพื้นที่ 1 และ 3 ซึ่งพื้นที่ 3 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม สำหรับพื้นที่ 2 เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานลมและพลังงานน้ำ โดยที่โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมีข้อจำกัดอัตราการผลิตอยู่ที่ 370 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที เสนอใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง และใช้วิธีหามากรุกที่มีแรงบิดล้าจากเกมกระดานหามากรุก อาศัยการใช้กลยุทธ์ การวางแผน และการพยากรณ์ รวมไปถึงการเข้าใจในสถานการณ์ นำมาประยุกต์ใช้หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จากการเปรียบเทียบ พบว่าตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิม และวิธีหามากรุกให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีอื่น ๆ ในแง่ของโอเวอร์ชูตในทุกพื้นที่ และอันเดอร์ชูตในบางพื้นที่ นอกจากนี้วิธีหามากรุกยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าในสถานการณ์ที่มีการโหลดแบบสุ่มเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ

คำสำคัญ : วิธีการหามากรุก, ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง, การควบคุมความถี่โหลด, ระบบไฟฟ้าหลายแหล่งจ่าย, โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ พลังงานความร้อนและพลังงานหมุนเวียน

พจน ปรณ จิตโต ชีเว

TITLE	Chess Optimizer for Load Frequency Control of Multi-Source Renewable Energy Based on PID Plus Second-Order Derivative Controller		
AUTHOR	Chatmongkol Areeyat		
ADVISORS	Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2025

ABSTRACT

This paper proposes load frequency control for a nonlinear multi-source power system divided into three areas, with thermal reheat power plants and a generation rate constraint of 5% per minute for areas 1 and 3, where area 3 has a wind turbine generator. For Area 2, it is a hydropower plant with a generation rate constraint of 370 percent per minute combined with a wind turbine generator. That is proposed to use a PID controller plus second-order derivatives and a chess-inspired algorithm based on the game of chess, utilizing strategies, planning, forecasting, and understanding the situation to find the controller parameters. Comparative analyses indicate that the PID plus second-order derivatives controller outperforms the conventional PID controller, while the chess-inspired approach demonstrates superior outcomes compared to other techniques for overshoot in all areas and undershoot in some areas. The chess algorithm exhibits enhanced efficacy in random load scenarios relative to other techniques.

Keyword : Chess algorithm, PID plus second-order derivative, Load frequency control, Multi-source power system, Hydro-thermal and renewable energy

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้เปรียบเสมือนเสาหลักและแสงสว่างนำทางบนเส้นทางแห่งการเรียนรู้และการวิจัย ท่านได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำที่ลึกซึ้ง รอบคอบ และสร้างสรรค์มาโดยตลอด ไม่เพียงแต่ให้ความรู้เชิงวิชาการอันกว้างขวาง หากยังมอบแรงบันดาลใจและสนับสนุนข้าพเจ้าอย่างอบอุ่นในทุกย่างก้าว ท่านเป็นแบบอย่างที่สำคัญของความทุ่มเท ความเสียสละ และจริยธรรมในการวิจัยที่ข้าพเจ้าตั้งใจจะยึดถือเป็นแนวทางต่อไป

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่ได้กรุณาสละเวลาเข้าร่วมในกระบวนการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิด และมุมมองใหม่ ๆ ที่มีคุณค่าต่อการพัฒนาผลงานวิจัยของข้าพเจ้าเป็นอย่างยิ่ง คำแนะนำของท่านช่วยให้ข้าพเจ้ามองเห็นจุดแข็งและจุดที่ควรปรับปรุง พร้อมทั้งขยายวิสัยทัศน์ให้กว้างไกลยิ่งขึ้น

ขอแสดงความขอบคุณอย่างยิ่งต่อรองศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิฐพันธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา วัฒนะ ในฐานะคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับความเมตตาและความใส่ใจที่ท่านทั้งสองได้มอบให้ ความรู้ ความเชี่ยวชาญ และข้อเสนอแนะของท่านเป็นแรงสนับสนุนสำคัญที่ช่วยผลักดันให้ข้าพเจ้าพัฒนาผลงานนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทุกคำแนะนำของท่านล้วนเป็นประโยชน์ทั้งในแง่เนื้อหาวิชาการและในมุมมองของการคิดวิเคราะห์อย่างรอบด้าน

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับความรู้ แรงบันดาลใจ และการสนับสนุนทั้งด้านวิชาการและกำลังใจที่มีคุณค่าอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของข้าพเจ้าในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณรายได้ประจำปี 2567 การได้รับโอกาสและทรัพยากรที่จำเป็นจากมหาวิทยาลัยแห่งนี้ ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่เอื้ออำนวยให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณตนเองที่ไม่ย่อท้อต่ออุปสรรค พยายาม มุ่งมั่น และอดทน จนสามารถก้าวข้ามขีดจำกัดและบรรลุเป้าหมายได้สำเร็จ ทั้งนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วม ไม่ว่าจะโดยตรงหรือทางอ้อม ที่เป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในครั้งนี้

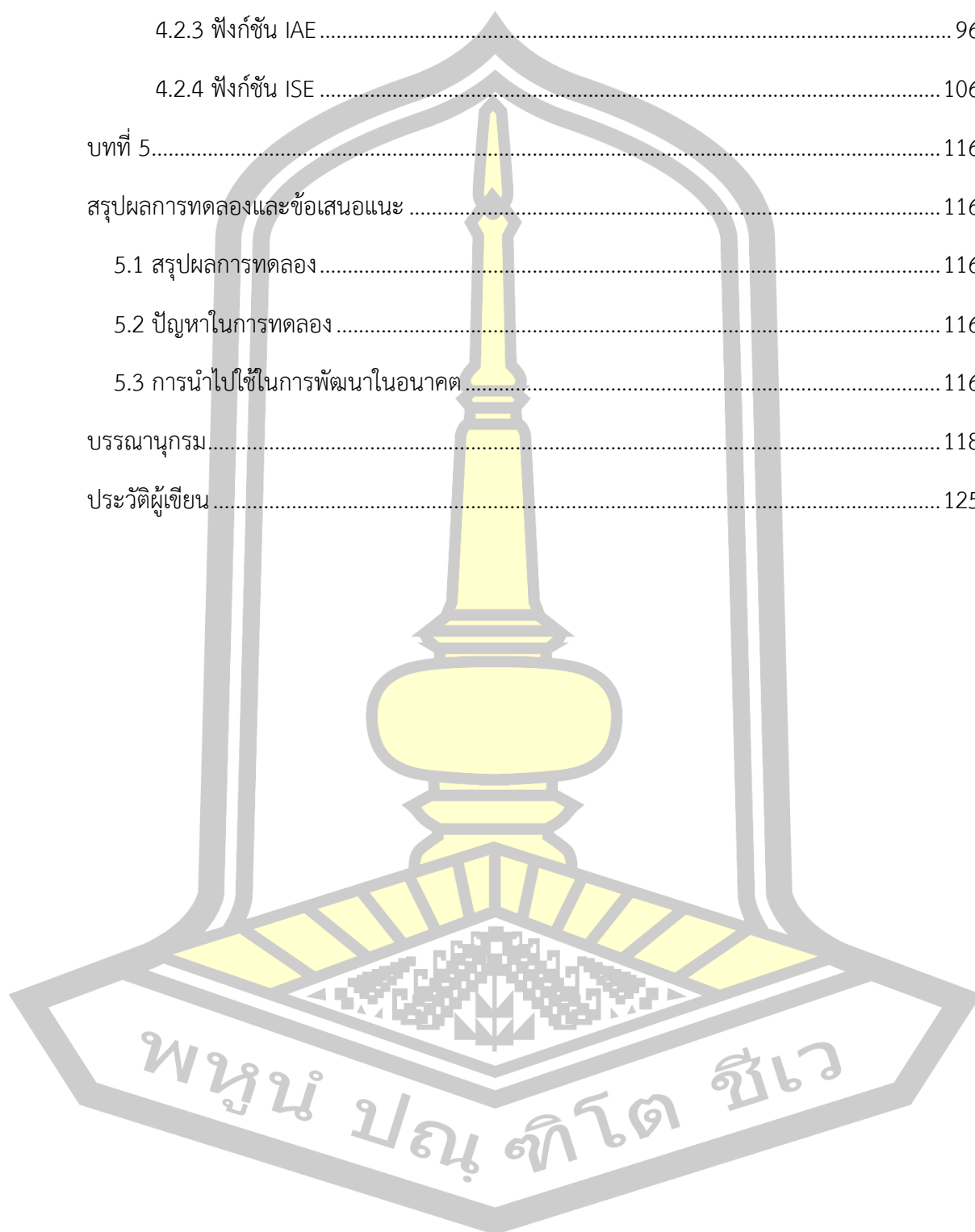
ฉัตรมงคล อารีญาติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2.....	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 การเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่.....	4
2.2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ (Reheat Thermal Power Plant).....	5
2.2.2 โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Hydropower Plant).....	7
2.2.3 โรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ (Gas Power Plant).....	9
2.2.4 โรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power Plant).....	12

2.2.5 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Power Plant).....	13
2.3 ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง.....	15
2.4 การควบคุมความถี่โหลด	17
2.5 วิธีหามาตรก.....	19
2.6 วิธีแมลงช้าง	21
2.7 วิธีอีบีบีไปเดมัส.....	23
2.8 วิธีหมาป่าสี่เท้า.....	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3.....	29
วิธีการดำเนินการ.....	29
3.1 แบบจำลองการควบคุมความถี่ของโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่.....	29
3.2 ขอบเขตการค้นหาของพารามิเตอร์.....	29
3.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	32
3.4 สถานการณ์จำลอง.....	32
3.5 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมความถี่โหลด	33
บทที่ 4.....	34
ผลการทดลองและอภิปรายผล	34
4.1 ผลการทดลองการเปรียบเทียบตัวควบคุม	36
4.1.1 ฟังก์ชัน ITAE.....	36
4.1.2 ฟังก์ชัน ITSE	46
4.1.3 ฟังก์ชัน IAE.....	56
4.1.4 ฟังก์ชัน ISE	66
4.2 ผลการทดลองการเปรียบเทียบวิธีการ.....	76
4.2.1 ฟังก์ชัน ITAE.....	76

4.2.2 ฟังก์ชัน ITSE	86
4.2.3 ฟังก์ชัน IAE	96
4.2.4 ฟังก์ชัน ISE	106
บทที่ 5.....	116
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	116
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	116
5.2 ปัญหาในการทดลอง.....	116
5.3 การนำไปใช้ในการพัฒนาในอนาคต.....	116
บรรณานุกรม.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	125



สารบัญตาราง

หน้า

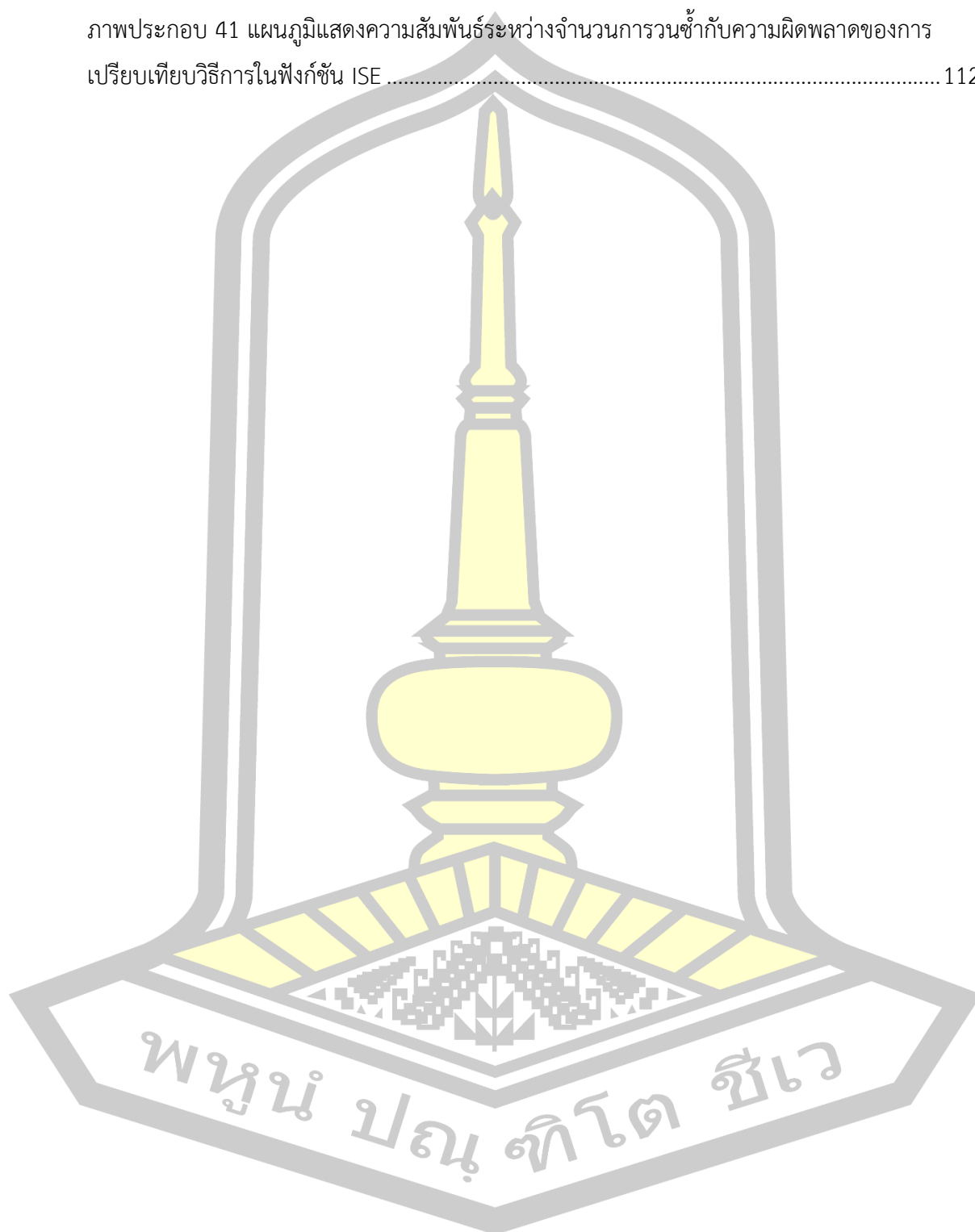
[illegible]

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 การเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่ด้วยสายส่ง	5
ภาพประกอบ 2 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ	6
ภาพประกอบ 3 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ	8
ภาพประกอบ 4 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ	10
ภาพประกอบ 5 โรงไฟฟ้าพลังงานลม	13
ภาพประกอบ 6 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	14
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง	16
ภาพประกอบ 8 แผนภาพการควบคุมความถี่โหลด	18
ภาพประกอบ 9 ผังงานของวิธีหามาตรุก	20
ภาพประกอบ 10 ผังงานของวิธีแมลงช้าง	22
ภาพประกอบ 11 ผังงานวิธีฮิบโปโปแตมัส [6]	24
ภาพประกอบ 12 ผังงานวิธีหมาป่าสี่เท้า	26
ภาพประกอบ 13 แบบจำลองโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่ 3 ที่	30
ภาพประกอบ 14 การเชื่อมต่อสายส่งของแต่ละพื้นที่	31
ภาพประกอบ 15 พลังงานลมสูงสุดที่ผลิตได้ในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)	34
ภาพประกอบ 16 พลังงานลมสูงสุดที่ผลิตได้ในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)	34
ภาพประกอบ 17 โหลดโปรไฟล์ขั้นบันไดของกรณีศึกษาที่ 1 (p.u.)	35
ภาพประกอบ 18 โหลดโปรไฟล์ขั้นบันไดแบบสุ่มของกรณีศึกษาที่ 2 (p.u.)	35
ภาพประกอบ 19 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 1	38
ภาพประกอบ 20 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 2	41

ภาพประกอบ 40 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 2 111

ภาพประกอบ 41 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการ
เปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ISE 112



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control) [1] เป็นระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดย การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติทำหน้าที่ควบคุมการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าหลายแหล่งในโครงข่าย (Interconnected Power System) [2] เพื่อให้ความถี่ไฟฟ้าและการแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าระหว่างพื้นที่อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยระบบจะตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น เช่น ความเบี่ยงเบนของความถี่ (Δf) และกำลังไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนผ่านสายส่ง (ΔP_{tie}) แล้วปรับกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านั้น การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ มีเป้าหมายหลักในการรักษาความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในค่าที่กำหนด ลดข้อผิดพลาดจากการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า และเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดสรรกำลังผลิตเพื่อรองรับความต้องการโหลดที่เปลี่ยนแปลง ระบบนี้มีความสำคัญต่อการรักษาความเสถียรและประสิทธิภาพของโครงข่ายไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยเฉพาะในระบบที่มีพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีความไม่เสถียรสูง อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติต้องใช้เทคโนโลยีและการควบคุมขั้นสูงเพื่อให้สามารถปรับตัวได้อย่างเหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้า

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) [3-7] เป็นวิธีการที่มักจะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางศาสตร์ต่าง ๆ ในปัจจุบันทั้งด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ ช่วยในการแก้ปัญหาซับซ้อนในเชิงปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ เช่น การออกแบบการทดลองที่ช่วยลดต้นทุนและเวลาในการวิจัยในทางวิศวกรรมศาสตร์ การจัดการทรัพยากร และการวางแผนเส้นทางการขนส่ง การนำไปประยุกต์ใช้ในปัญหาเหล่านี้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในระบบที่ซับซ้อนให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

ในวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) ของระบบที่ซับซ้อน เช่น การควบคุมระบบไฟฟ้า การออกแบบโครงสร้าง หรือการจัดการทรัพยากร วิธีการขั้นสูงได้รับความนิยมอย่างมาก เช่น วิธีฮิปโปโปแตมัส (Hippopotamus Optimization Algorithm, HOA) [8] วิธีแมลงช้าง (Ant Lion Optimizer, ALO) [9] วิธีการหมากรุก (Chess Algorithm, CA) [10] และวิธีหมาป่า

สีเทา (Grey Wolf Optimizer, GWO) [11],[7],[12] เนื่องจากสามารถจัดการกับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) และมีหลายมิติ (Multi-dimensional Problems) ได้ดี

ลักษณะการใช้โหลดทางไฟฟ้าในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และคาดเดาได้ยาก อาจเกิดได้จากปัจจัยหลายประการ เช่น พฤติกรรมของผู้ใช้ไฟฟ้า แหล่งพลังงานงานหมุนเวียนที่ไม่มี ความแน่นอน โหลดแบบพลวัต (Dynamic Load) โหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลกระทบ โดยตรงต่อความถี่ของระบบ และอาจทำให้เกิดความเบี่ยงเบนของความถี่ไฟฟ้าหลังจากเกิดการ เปลี่ยนแปลงในระบบ เช่น การสูญเสียโหลด การเพิ่มหรือลดกำลังผลิตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการควบคุม ความถี่โหลดจึงเป็นกระบวนการสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหน้าที่รักษาเสถียรภาพของความถี่ไฟฟ้า สมดุลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และความต้องการใช้ไฟฟ้า [13] รวมถึงการควบคุมการไหลของ พลังงานระหว่างพื้นที่

ปัญหาที่พบในกระบวนการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี [14, 15] คือการ ปรับค่าอัตราขยาย K_p , K_i และ K_d ต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้ความชำนาญ ใช้วิธีทดลองปรับค่า ซึ่งใน บางครั้งอาจจะได้ค่าที่ไม่เหมาะสมที่สุดอีกและยังใช้เวลานาน ในปัจจุบันมีการคิดค้นและพัฒนานิเวศการ ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมหลายวิธี โดยวิธีที่เป็นที่ยอมรับได้แก่ วิธีของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method) [16] ซึ่งเหมาะสำหรับกรณีที่ระบบมีลักษณะเป็นระบบเชิงเส้นที่มีความ เฉื่อย (Linear and sluggish systems) หรือ ระบบที่สามารถสร้างการตอบสนองแบบเสถียร (Stable response) โดยในการแก้ปัญหาค้นหาปรับค่าพารามิเตอร์ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) หรือ มีอันดับสูง (High order) จึงจำเป็นต้องใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลข หรือการใช้วิธีการ ขั้นสูงเนื่องจากระบบเหล่านี้มีพฤติกรรมที่ซับซ้อน การตอบสนองที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ง่าย และ การออกแบบตัวควบคุมมักไม่สามารถใช้วิธีการแบบดั้งเดิมได้โดยตรง

การประยุกต์ใช้อ่อนพวนอันดับสอง (Double Derivative Gain) [17] ทำงานร่วมกับตัว ควบคุมพีไอดี ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมระบบ โดยเฉพาะในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างรวดเร็วและมีความซับซ้อน ข้อดีคือช่วยลดการสั่นสะเทือนของระบบ (Oscillation) เพิ่ม ประสิทธิภาพ และสามารถลดเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (Settling Time) ทำให้ระบบสามารถตอบสนอง ต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การใช้อัตราขยายอนุพันธ์อันดับสองมี ข้อเสียคือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดการควบคุมที่ผิดพลาด และในการปรับ จูนค่าพารามิเตอร์จะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์ K_{dd} เพิ่มเข้ามาในตัว ควบคุม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมระบบพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ในการควบคุมความถี่โหนดของระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่

1.2.2 ประยุกต์ใช้วิธีการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีหามากรุกกับควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองสำหรับการควบคุมความถี่โหนด

1.2.3 ศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพความถี่โหนดของระบบไฟฟ้าหลายแหล่ง ในกรณีโหนดมีค่าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม

1.2.4 เปรียบเทียบตัวควบคุมของวิธีการหามากรุกกับวิธีการอื่น ๆ ได้แก่ วิธีแมลงช้าง วิธีฮิปโปโปเตมัส และวิธีหมาป่าสีเทา

1.2.5 เปรียบเทียบตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์ความเสถียรของความถี่ระบบ เมื่อพารามิเตอร์อินพุตเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดแบบสุ่ม

1.3.2 เปรียบเทียบผลของการทดสอบวิธีการหามากรุกโดยใช้เกณฑ์ด้านสมรรถนะ เปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ได้แก่ วิธีแมลงช้าง วิธีฮิปโปโปเตมัส และวิธีหมาป่าสีเทา

1.3.2 เปรียบเทียบผลของการทดสอบตัวควบคุมโดยใช้เกณฑ์ด้านสมรรถนะ เปรียบเทียบกับตัวควบคุมอื่น ๆ ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอ

1.3.3 ใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และออกแบบตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับอนุพันธ์อันดับสอง สำหรับแบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลายแหล่ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พัฒนาตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองที่มีประสิทธิภาพ

1.4.2 ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่และประสิทธิภาพในการการควบคุมความถี่โหนด

1.4.3 ประยุกต์วิธีการหามากรุกในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

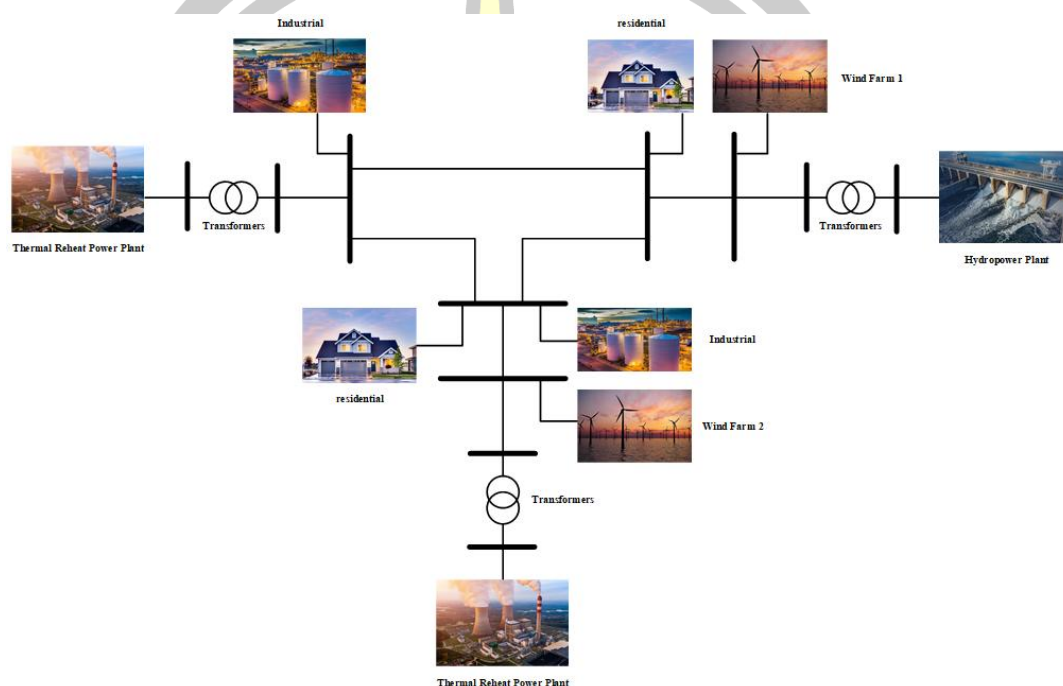
2.1 กล่าวนำ

การควบคุมความถี่โหลด (Load Frequency Control) [18-22] ในโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่ เป็นกระบวนการสำคัญในระบบพลังงานไฟฟ้าที่ออกแบบมาเพื่อรักษาความเสถียรของความถี่ไฟฟ้า และความสมดุลระหว่างการผลิตและการบริโภคพลังงานในเครือข่ายที่มีหลายพื้นที่เชื่อมโยงกัน (Interconnected Areas) [23, 24] การควบคุมนี้ทำงานโดยใช้กลไกปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ เพื่อชดเชยความผันผวนของโหลดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทันที กระบวนการนี้แบ่งออกเป็นหลายระดับ ได้แก่ การควบคุมเบื้องต้น (Primary Control) ที่ตอบสนองทันทีต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ การควบคุมรอง (Secondary Control) ที่มุ่งเน้นการปรับค่าความถี่และกำลังไฟฟ้าส่งผ่านระหว่างพื้นที่ให้กลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ และการควบคุมตติยภูมิ (Tertiary Control) ซึ่งใช้ในการปรับแผนการผลิตในระยะยาวเพื่อลดต้นทุนการผลิต การควบคุมการควบคุมความถี่โหลด ในระบบที่มีหลายพื้นที่จึงต้องอาศัยการออกแบบระบบควบคุมที่ซับซ้อน เพื่อรับมือกับความไม่แน่นอนของโหลด การเปลี่ยนแปลงของกำลังผลิตจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน และข้อจำกัดทางเทคนิคของระบบเครือข่ายไฟฟ้า โดยการใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีหามาร์กมี เป้าหมายในการรักษาความเสถียรภาพของระบบ และเพิ่มความน่าเชื่อถือในการจ่ายไฟฟ้าในระดับสากล

2.2 การเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่

ในการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่ [25] เป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยสร้างความมั่นคง และเสถียรภาพของพลังงานไฟฟ้า โดยการเชื่อมต่อผ่านสายส่งแรงสูงผ่านเครือข่ายที่เชื่อมโยงกันกับแหล่งผลิตพลังงานที่หลากหลายรูปแบบ เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ โรงไฟฟ้าพลังงานแก๊ส รวมถึงพลังงานหมุนเวียน (พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์) [26] เชื่อมต่อกับพื้นที่ที่ต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งระบบนี้ยังช่วยเรื่องการกระจายพลังงานจากพื้นที่ที่มีการผลิตไฟฟ้าเกินความต้องการไปยังพื้นที่ที่มีความต้องการสูง เพิ่มความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการโดยการลดความเสี่ยงจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ไม่คงที่ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หรือโรงไฟฟ้าพลังงานลม และ

ช่วยในหลักเศรษฐศาสตร์โดยการจํัดลำดับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำเดินเครื่องก่อน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า แต่การเชื่อมต่อกันของโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่ก็มีความท้าทายหลายด้าน เช่น การสูญเสียพลังงานในสายส่ง และความซับซ้อนในการควบคุมระบบเพื่อรักษาสมดุลของแรงดันไฟฟ้าและความถี่



ภาพประกอบ 1 การเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่ด้วยสายส่ง

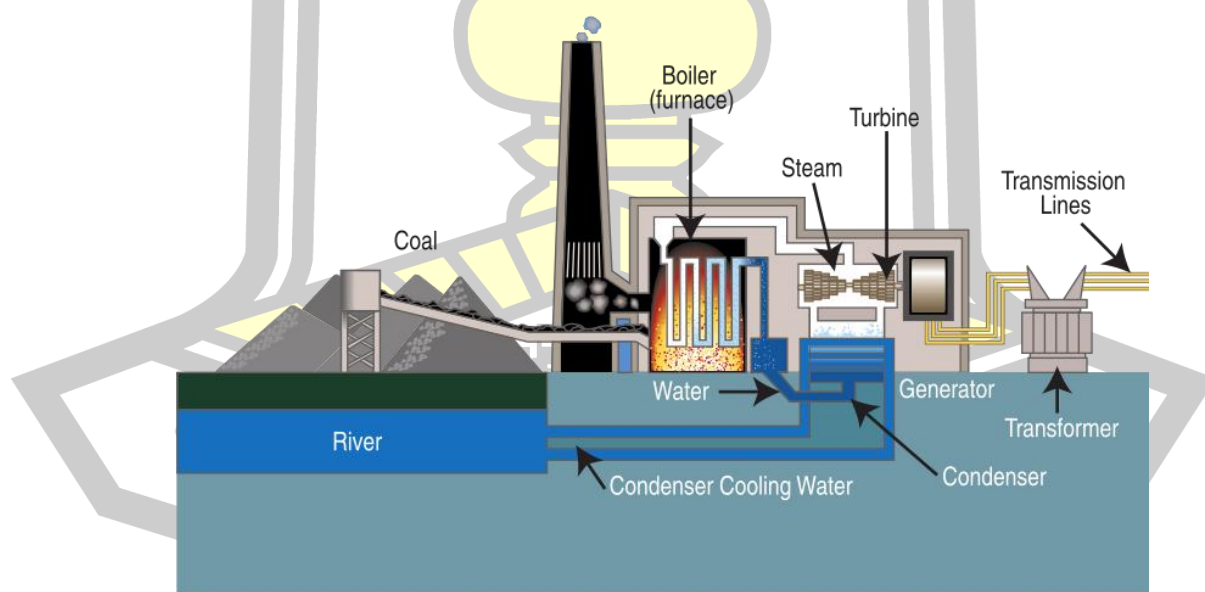
2.2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ (Reheat Thermal Power Plant)

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ [27] คือ โรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการแปลงพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ชีวมวลหรือเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ ไปเป็นพลังงานกล ซึ่งต่อมาจะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีขั้นตอนหลายขั้นตอนที่เชื่อมโยงกันเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการลดการสูญเสียพลังงานในส่วนของการขยายตัวของไอน้ำในกังหันความดันสูง และกังหันความดันต่ำโดยมีการอุ่นไอน้ำกลับก่อนนำไปขยายตัวอีกครั้ง

หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ

1. การผลิตไอน้ำ น้ำถูกป้อนเข้าสู่หม้อน้ำ (Boiler) หรือหม้อไอน้ำ (Steam Generator) และถูกให้ความร้อนจนเกิดเป็นไอน้ำที่มีแรงดันและอุณหภูมิสูง จากนั้นไอน้ำที่มีคุณสมบัติดังกล่าวจะถูกส่งไปยังกังหันความดันสูงเพื่อเริ่มกระบวนการผลิตพลังงาน
2. การขยายตัวครั้งแรกในกังหันแรงดันสูง (High-Pressure Turbine) ไอน้ำแรงดันสูงขยายตัวผ่านกังหันแรงดันสูง และทำให้เกิดการหมุนของกังหันเพื่อผลิตพลังงานกล หลังจากการขยายตัว ไอน้ำจะมีแรงดันและอุณหภูมิลดลง
3. การอุ่นไอน้ำกลับ (Reheating) ไอน้ำที่ออกจากกังหันแรงดันสูงถูกส่งกลับไปยังหม้อน้ำอีกครั้งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยไม่ต้องเพิ่มแรงดัน
4. การขยายตัวครั้งที่สองในกังหันแรงดันต่ำ (Low-Pressure Turbine) ไอน้ำที่ถูกอุ่นกลับจะถูกส่งไปยังกังหันแรงดันต่ำเพื่อทำการขยายตัวอีกครั้ง กระบวนการนี้ช่วยเพิ่มพลังงานกลที่ผลิตได้จากไอน้ำ ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป
5. การควบแน่นไอน้ำ (Condensation) ไอน้ำที่ผ่านการขยายตัวในกังหันแรงดันต่ำจะถูกส่งไปยังคอนเดนเซอร์ (Condenser) เพื่อควบแน่นกลับเป็นน้ำ จากนั้นน้ำที่ได้จะถูกส่งกลับไปยังหม้อน้ำเพื่อเริ่มกระบวนการใหม่



ภาพประกอบ 2 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนตัวควบคุมความเร็วรอบของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ (Thermal Governor) แสดงดังสมการ (1)

$$G_g(s) = \frac{1}{1+sT_G} \quad (1)$$

2. ฟังก์ชันถ่ายโอนกังหันไอน้ำของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ (Thermal Steam Turbine) แสดงดังสมการ (2)

$$G_T(s) = \frac{1}{1+sT_T} \quad (2)$$

3. ฟังก์ชันถ่ายโอนการอุ่นย้อนกลับของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ (Thermal Reheat) แสดงดังสมการ (3)

$$G_R(s) = \frac{1+sK_RT_R}{1+sT_R} \quad (3)$$

โดยที่	T_g	คือ	ค่าคงที่เวลาของตัวควบคุมความเร็วรอบ (วินาที)
	T_T	คือ	ค่าคงที่เวลาของกังหันไอน้ำ (วินาที)
	T_R	คือ	ค่าคงที่เวลาของการอุ่นย้อนกลับ (วินาที)
	K_R	คือ	อัตราขยายของการอุ่นย้อนกลับ

2.2.2 โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Hydropower Plant)

โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ [2] ใช้พลังงานจากการไหลของน้ำในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการแปลงพลังงานศักย์ในน้ำเป็นพลังงานจลน์ และส่งต่อไปยังกังหันน้ำซึ่งจะถูกแปลงเป็นพลังงานกล และสุดท้ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานกลนั้นให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า

หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

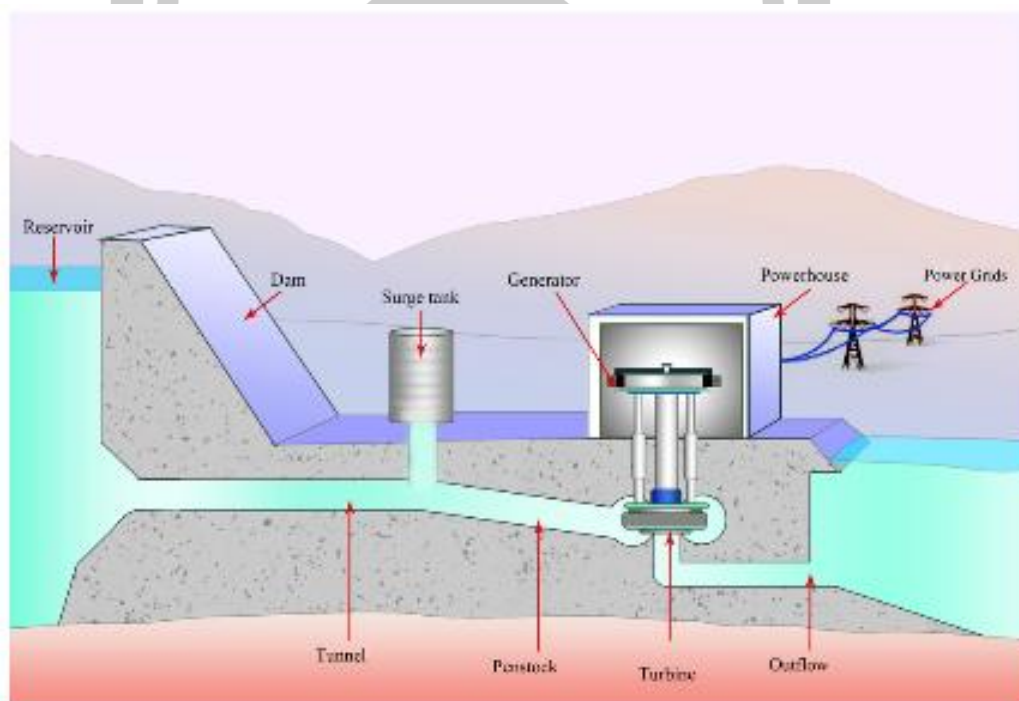
1. การกักเก็บน้ำ น้ำถูกกักเก็บในอ่างเก็บน้ำที่ตั้งอยู่ด้านบนของเขื่อนเพื่อสร้างพลังงานศักย์ โดยพลังงานนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับจุดต่ำสุดในระบบพลังงานศักย์นี้เป็นแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

2. การปล่อยน้ำผ่านท่อแรงดัน น้ำจากอ่างเก็บน้ำจะถูกส่งผ่านท่อแรงดัน ซึ่งช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ของน้ำขณะที่น้ำเคลื่อนที่ลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง ท่อแรงดันนี้ยังทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลและทิศทางของน้ำก่อนเข้าสู่กังหันน้ำ

3. การขับเคลื่อนกังหันน้ำ น้ำที่ไหลมาจากท่อแรงดันจะชนกับใบพัดของกังหันน้ำ ทำให้เกิดการหมุนของกังหัน น้ำจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ของมันให้กลายเป็นพลังงานกลซึ่งถูกส่งผ่านไปยังระบบต่อไป

4. การผลิตพลังงานไฟฟ้า พลังงานกลที่เกิดจากการหมุนของกังหันน้ำจะถูกถ่ายโอนไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านเพลลา โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานกลนี้ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ด้วยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าและส่งพลังงานไฟฟ้านี้ไปยังระบบส่งกำลัง

5. การระบายน้ำกลับสู่ธรรมชาติ น้ำที่ผ่านการขับเคลื่อนกังหันน้ำจะถูกระบายลงสู่พื้นที่ต่ำกว่า เช่น แม่น้ำเพื่อกลับเข้าสู่ระบบธรรมชาติ กระบวนการนี้ไม่มีการปนเปื้อนของน้ำ และน้ำที่ระบายออกสามารถนำกลับมาใช้ในรอบถัดไปของการผลิตพลังงานได้ ทำให้เป็นระบบที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพประกอบ 3 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนตัวควบคุมความเร็วรอบของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Hydraulic Governor) แสดงดังสมการ (4)

$$G_g(s) = \frac{1}{1+sT_{H1}} \quad (4)$$

2. ฟังก์ชันถ่ายโอนตัวชดเชยการลดลงชั่วคราวของแรงดันของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Transient Drop Compensation) แสดงดังสมการ (5)

$$G_{TD}(s) = \frac{1+sT_{H2}}{1+sT_{H3}} \quad (5)$$

3. ฟังก์ชันถ่ายโอนกังหันน้ำของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Hydraulic Turbine) แสดงดังสมการ (6)

$$G_T(s) = \frac{1 - sT_{H4}}{1 + 0.5sT_{H4}} \quad (6)$$

โดยที่	T_{H1}	คือ	ค่าคงที่เวลาของตัวควบคุมความเร็วรอบ (วินาที)
	T_{H2}	คือ	ค่าคงที่เวลาของการรีเซ็ตกังหันไอน้ำ (วินาที)
	T_{H3}	คือ	ค่าคงที่เวลาของตัวชดเชยการลดลงชั่วคราว (วินาที)
	T_{H4}	คือ	ค่าคงที่เวลาที่น้ำเริ่มไหลไปยังกังหัน (วินาที)

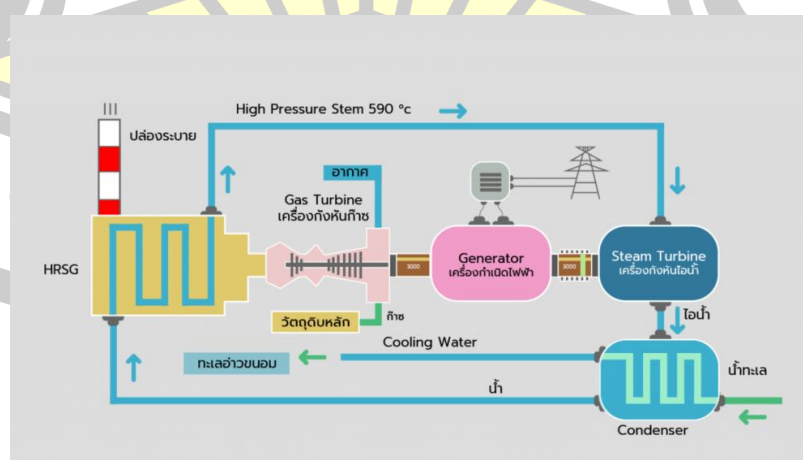
2.2.3 โรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ (Gas Power Plant)

โรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ [2] หรือโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักในกระบวนการผลิตไฟฟ้า เริ่มจากการดูดอากาศเข้าสู่ระบบผ่านคอมเพรสเซอร์เพื่อเพิ่มความดัน จากนั้นอากาศแรงดันสูงจะถูกผสมกับก๊าซธรรมชาติในห้องเผาไหม้เพื่อสร้างก๊าซร้อนแรงดันสูง ก๊าซร้อนนี้ถูกส่งไปยังใบพัดของกังหันก๊าซ ซึ่งแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล เพลากังหันที่หมุนจะเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ในบางระบบ ก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกยัง

สามารถนำไปใช้ในระบบ Combined Cycle เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โรงไฟฟ้าชนิดนี้เด่นในด้านการเริ่มต้นและหยุดการทำงานที่รวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูง และปล่อยมลพิษต่ำเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ

หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ

1. การดูดอากาศเข้าสู่ระบบ อากาศจากภายนอกถูกดูดเข้ามาผ่านระบบกรองอากาศ (Air Filter) เพื่อลดสิ่งสกปรกที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบกังหัน จากนั้นอากาศจะถูกส่งเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ (Compressor) เพื่อเพิ่มความดัน
2. การอัดอากาศ คอมเพรสเซอร์จะทำหน้าที่อัดอากาศที่ดูดเข้ามาให้มีความดันสูงและถูกส่งต่อไปยังห้องเผาไหม้
3. การเผาไหม้เชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติจะถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้และผสมกับอากาศที่อัดด้วยแรงดันสูง การเผาไหม้เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นจนกลายเป็นก๊าซร้อนแรงดันสูง
4. การขับเคลื่อนกังหัน ก๊าซร้อนแรงดันสูงถูกส่งเข้าสู่กังหันก๊าซ (Gas Turbine) กังหันจะแปลงพลังงานจลน์และพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนให้กลายเป็นพลังงานกลโดยการหมุนของใบพัดกังหัน
5. การผลิตพลังงานไฟฟ้า เพลากังหันที่หมุนจะเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
6. การระบายก๊าซไอเสีย ก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงหลังจากผ่านกังหันจะถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ แต่ในบางกรณี โรงไฟฟ้าอาจติดตั้งระบบ HRSG (Heat Recovery Steam Generator) เพื่อนำความร้อนจากก๊าซไอเสียไปผลิตไอน้ำในโรงไฟฟ้าระบบ Combined Cycle



ภาพประกอบ 4 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังก๊าซ

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนตำแหน่งวาล์วของโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ (Valve Positioner) แสดงดังสมการ (7)

$$G_v(s) = \frac{1}{C_g + sB_g} \quad (7)$$

2. ฟังก์ชันถ่ายโอนตัวปรับความเร็วรอบของโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ (Governor) แสดงดังสมการ (8)

$$G_g(s) = \frac{1 + sX_g}{1 + sY_g} \quad (8)$$

3. ฟังก์ชันถ่ายโอนกระบวนการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้และการจ่ายเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ (Combustor & Fuel System) แสดงดังสมการ (9)

$$G_c(s) = \frac{1 - sT_f}{1 + sT_f} \quad (9)$$

4. ฟังก์ชันถ่ายโอนการปล่อยอากาศที่ผ่านการอัดจากคอมเพรสเซอร์ของโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ (Compressor Discharge) แสดงดังสมการ (10)

$$G_{CD}(s) = \frac{1}{1 + sT_{CD}} \quad (10)$$

โดยที่	B_g	คือ	ค่าคงที่เวลาของตำแหน่งกักเก็บก๊าซ (วินาที)
	C_g	คือ	ค่าคงที่ของตัวกำหนดตำแหน่งวาล์วกักเก็บก๊าซ
	X_g	คือ	ค่าคงที่นำของตัวปรับความเร็วรอบ (วินาที)
	Y_g	คือ	ค่าคงที่ล่าช้าของตัวปรับความเร็วรอบ (วินาที)
	T_f	คือ	ค่าคงที่เวลาของเชื้อเพลิง (วินาที)
	T_{CD}	คือ	ค่าคงที่เวลาของปริมาตรของคอมเพรสเซอร์ (วินาที)

2.2.4 โรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power Plant)

โรงไฟฟ้าพลังงานลม [28] คือระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่แปลงพลังงานจลน์ของลมให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านการหมุนของกังหันลม (Wind Turbine) ซึ่งใบพัดของกังหันจะหมุนเมื่อกระแสลมพัดผ่าน ทำให้เพลาคูที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หมุน และผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมา โดยโรงไฟฟ้าพลังงานลมถือเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดและยั่งยืน

อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด หรือ อัตราส่วนความเร็วรอบปลายใบพัด ซึ่งหมายถึงสัดส่วนระหว่างความเร็วของปลายใบพัดกังหันลม (Tip Speed) ต่อความเร็วลมที่พัดเข้ามา (Wind Speed) โดยคำนวณจากสมการ (11)

$$\lambda = \frac{R_{blade} W_{blade}}{V_w} \quad (11)$$

โดยที่ λ	คือ	อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด
R_{blade}	คือ	รัศมีของใบพัดกังหันลม (เมตร)
W_{blade}	คือ	ความเร็วเชิงมุมของใบพัด (เรเดียนต่อวินาที)
V_w	คือ	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)

ค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน C_p หาได้จากสมการ (12)

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.0184(\lambda - 3)\beta \quad (12)$$

โดยที่ β	คือ	มุมใบพัด (เรเดียน)
----------------	-----	--------------------

กำลังงานที่ผลิตได้จากลมแสดงได้ดังสมการ (13)

$$P_{WTG} = \frac{1}{2} \rho A_r C_p V_w^3 \quad (13)$$

โดยที่ ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัม/ตารางเมตร)
A_r	คือ	พื้นที่กวาดของใบพัด (ตารางเมตร)
C_p	คือ	สัมประสิทธิ์พลังงานตามสมการ (12)

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานลม

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกังหันลม แสดงดังสมการ

(14)

$$G_{WTG}(s) = \frac{K_{WTG}}{1+sT_{WTG}} \quad (14)$$

โดยที่ K_{WTG} คือ ค่าอัตราขยายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกังหันลม
 T_{WTG} คือ ค่าคงที่เวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกังหันลม (วินาที)



ภาพประกอบ 5 โรงไฟฟ้าพลังงานลม

2.2.5 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Power Plant)

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [1] เป็นระบบที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านกระบวนการ Photoelectric Effect จากนั้นอินเวอร์เตอร์ จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อนำไปใช้ในระบบส่งกำลัง พลังงานที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มแสงแดด อุณหภูมิ และประสิทธิภาพของแผง ระบบยังอาจรวมถึงเพื่อจัดเก็บพลังงานที่ไม่ได้ใช้งานทันที ทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงที่ไม่มีแสงแดด เช่น กลางคืนหรือวันที่มีเมฆมาก

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบ MPPT [1]

$$G_{MPPT}(s) = \frac{sB_{PV} + A_{PV}}{s^2 + sC_{PV} + D_{PV}} \quad (15)$$

โดยที่	A_{PV}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับแรงดันและกระแสเริ่มต้น
	B_{PV}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงดันและกระแส
	C_{PV}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมพลวัต
	D_{PV}	คือ	ค่าคงที่ในตัวหารซึ่งบ่งบอกถึงความเฉื่อยของระบบ



ภาพประกอบ 6 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิต (Generation Rate Constraint) [29] มีผลกระทบโดยตรงต่อการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิต มีต้นกำเนิดจากข้อจำกัดทางกลและเทอร์โมไดนามิกส์ของกังหันไอน้ำ และมักปรากฏในลักษณะความไม่เชิงเส้น (Nonlinear Behavior) ที่มีผลต่อการตอบสนองของระบบ หากไม่พิจารณาข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตในการออกแบบหรือจำลองระบบ อาจทำให้เกิดความ

แปรปรวนที่รุนแรงในระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงกำลังที่รวดเร็วเกินไปซึ่งอาจนำไปสู่การสึกหรอของ Governor และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง โรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ มีค่าข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตที่แตกต่างกัน โดยในโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ค่ามีค่าสูงถึง 270 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที สำหรับการเพิ่มกำลัง และ 360 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที สำหรับการลดกำลัง ขณะที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับจะมีค่าที่ต่ำกว่า ที่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วเกินไปในระบบ

ในระบบที่มีการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่ (Multi-Area Power Systems) ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตมีบทบาทสำคัญในการควบคุม และรักษาเสถียรภาพของระบบ เนื่องจากข้อจำกัดนี้จะส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างพื้นที่ผ่านสายส่ง และมีผลต่อความสามารถในการปรับตัวของโรงไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือเหตุการณ์ผิดปกติ เช่น การเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตในแต่ละพื้นที่ที่ต้องดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดของข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตเพื่อหลีกเลี่ยงความไม่เสถียรที่อาจเกิดขึ้น การพิจารณาข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตในการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้การควบคุมความถี่โหลดมีความแม่นยำ และคงเสถียรภาพของระบบในระยะยาว

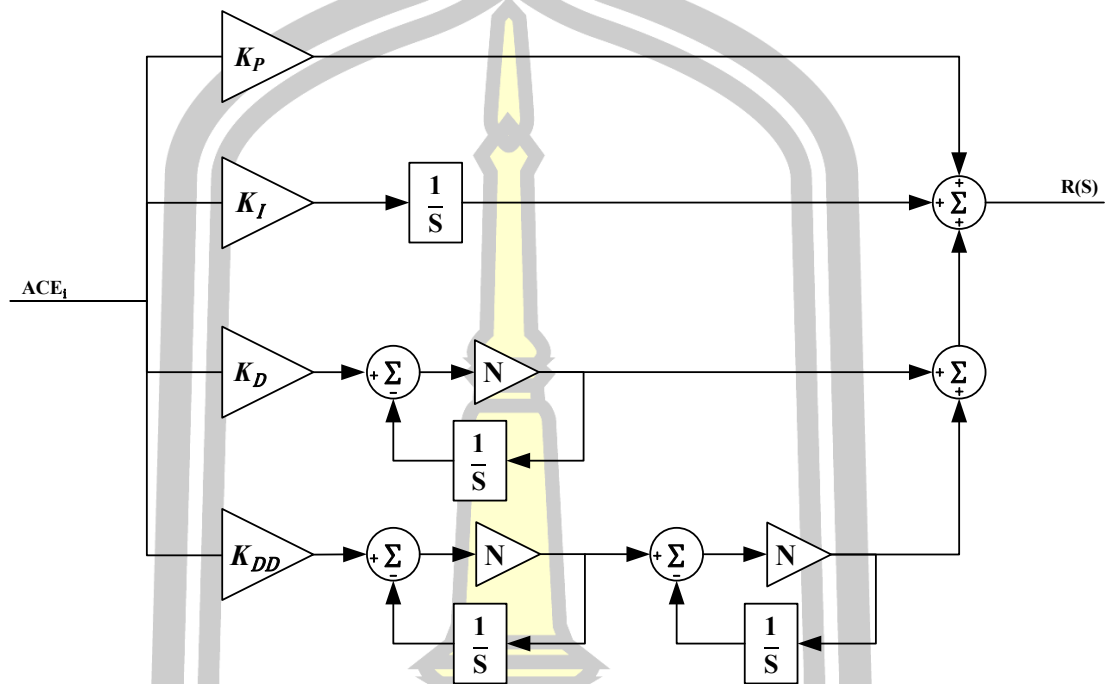
2.3 ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง

ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง [3, 17] เป็นการขยายการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี [19, 30, 31] โดยการเพิ่มอนุพันธ์อันดับสอง (Double Derivative) เข้าไปในระบบควบคุม เพื่อให้สามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและความเร่งของความผิดพลาดในระบบได้ดียิ่งขึ้น การเพิ่มอนุพันธ์อันดับสองจะช่วยลดปัญหาความผันผวนและการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นจากการตอบสนองของระบบที่ไม่เสถียร โดยเฉพาะในกรณีที่มีการกระตุ้นจากภายนอกหรือการเปลี่ยนแปลงที่ฉับพลัน ซึ่งการใช้ อนุพันธ์อันดับสอง ช่วยให้ตัวควบคุมสามารถคำนึงถึงความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดได้ แม่นยำยิ่งขึ้น ทำให้ระบบสามารถตอบสนองได้เร็วและเสถียรมากกว่าเดิม เหมาะสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือมีความผันผวนสูง

โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง ประกอบด้วย แสดงดังสมการ (16)

1. K_p (Proportional gain) คือ อัตราขยาย
2. K_i (Integral gain) คือ อัตราขยายปริพันธ์
3. K_d (Derivative gain) คือ อัตราขยายอนุพันธ์
4. K_{dd} (Double Derivative gain) คือ อัตราขยายอนุพันธ์อันดับสอง

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_{dd} \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (16)$$



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง

ข้อดีของตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง

1. ความแม่นยำสูง สามารถลดข้อผิดพลาดในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูง
2. ตอบสนองเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด ช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดที่รวดเร็ว ทำให้สามารถลดเวลา Settling Time ได้
3. ลดการสั่นไหว (Oscillation) ลดการแกว่งตัวของระบบในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดหรือมีการรบกวนในระบบ
4. ความยืดหยุ่นในการปรับพารามิเตอร์
5. ลด Overshoot

ข้อเสียของตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง

1. ซับซ้อนกว่าตัวควบคุมพีไอดีทั่วไป
2. ไวต่อสัญญาณรบกวน (Noise Sensitivity)

2.4 การควบคุมความถี่โหลด

การควบคุมความถี่โหลดเป็นกระบวนการที่สำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อรักษาความสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าและความต้องการโหลด [2, 32-35] โดยมีเป้าหมายหลักในการรักษาความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่กำหนด เช่น 50 Hz หรือ 60 Hz และควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่ง ให้มีเสถียรภาพ กระบวนการควบคุมความถี่โหลดแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ การควบคุมเบื้องต้น (Primary Control) ที่ใช้ Governor ปรับกำลังผลิตตอบสนองทันที เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง การควบคุมรอง (Secondary Control) ที่ใช้การคำนวณข้อผิดพลาดของระบบ (Area Control Error) เพื่อลดข้อผิดพลาด และคืนความถี่สู่ค่าที่ต้องการและการควบคุมเสริม (Tertiary Control) ที่ใช้ปรับการส่งพลังงานในระยะยาว

การควบคุมความถี่โหลด มีขั้นตอนที่ชัดเจนเพื่อรักษาสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าและความต้องการโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีกระบวนการดังนี้

1. การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบ เช่น โหลดเพิ่มขึ้นหรือความต้องการลดลง เซ็นเซอร์ในระบบจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้า (Δf) และกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่ง (ΔP_{tie}) สัญญาณเหล่านี้จะถูกส่งไปยังตัวควบคุมเพื่อการประมวลผล

2. การคำนวณข้อผิดพลาดของระบบ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (17) และ (18)

$$ACE = B \cdot \Delta f + \Delta P_{tie} \quad (17)$$

$$\Delta P_{tie,i} = 2\pi \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij} \Delta f_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij} \Delta f_j \right] \quad (18)$$

โดยที่ B คือ Bias Factor

Δf คือ การเบี่ยงเบนความถี่ไฟฟ้า

ΔP_{tie} คือ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง

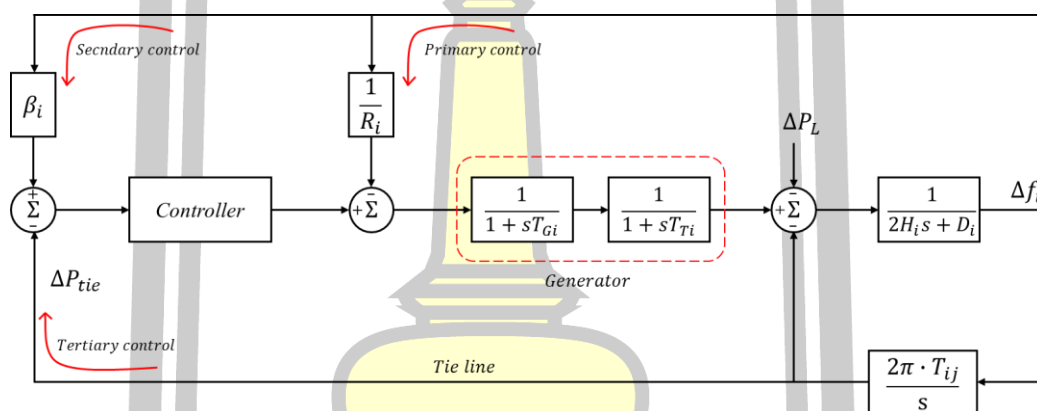
N คือ จำนวนพื้นที่

3. การตอบสนองเบื้องต้น เมื่อมีการเบี่ยงเบนความถี่ไฟฟ้าเกิดขึ้นตัวปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะตอบสนองทันทีโดยปรับกำลังกลที่ส่งไปยังกังหันไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง

4. การตอบสนองรอง การคำนวณข้อผิดพลาดของระบบที่คำนวณได้จะถูกใช้ในตัวควบคุม เพื่อปรับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปรับพฤติกรรมของระบบเพื่อคืนค่าความถี่ไฟฟ้า และสายส่งเพื่อให้กลับสู่ค่าปกติ

5. การควบคุมการส่งพลังงานระหว่างพื้นที่ หากมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งระบบจะปรับสมดุลระหว่างพื้นที่ที่เชื่อมต่อกันโดยใช้พารามิเตอร์ T_{ij} ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การชิงโครไนซ์ เพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า

6. การควบคุมเสริม สำหรับการเปลี่ยนแปลงในระยะยาว เช่น การเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าในบางพื้นที่ ระบบจะปรับค่าจุดตั้งค่า (Setpoint) เพื่อรักษาเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบในระยะยาว



ภาพประกอบ 8 แผนภาพการควบคุมความถี่โหลด

พูน ปณ ทิโต ชีเว

2.5 วิธีหมากรุก

วิธีหมากรุก [5] เป็นวิธีการการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการเล่นหมากรุกสากล โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของตัวหมากรุกแต่ละชนิด เช่น ราชา ราชินี เรือ อัศวิน และบาทหลวง ในการสำรวจพื้นที่การค้นหา (Search Space) และค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด วิธีการนี้เริ่มต้นด้วยการสร้างประชากรเริ่มต้นในรูปแบบตัวเบี้ย (Pawns) ซึ่งสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นในพื้นที่การค้นหา และทำการคำนวณค่าฟังก์ชันสมรรถนะ (Objective Function) เพื่อจัดลำดับคำตอบที่ได้

วิธีการนี้มีจุดเด่นที่ความยืดหยุ่นและความสามารถในการสำรวจพื้นที่การค้นหาได้อย่างหลากหลาย แต่ในทางกลับกัน การใช้งานในปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงอาจต้องการเวลาคำนวณที่เพิ่มขึ้น และความสำเร็จของวิธีการขึ้นอยู่กับข้อกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสม

ขั้นตอนการทำงานของวิธีหมากรุก

1. การตั้งค่าเริ่มต้น โดยการสุ่มตำแหน่งของตัวเบี้ย $n_p = 8$ ตัว

2. การค้นหาและสำรวจพื้นที่ โดยที่

ราชา (King) สามารถสำรวจพื้นที่รอบตัวในทุกทิศทาง

ราชินี (Queen) เคลื่อนที่ในแนวทแยง แนวตั้ง และแนวนอน

เรือ (Rook) สำรวจพื้นที่ในแนวตั้งและแนวนอน

อัศวิน (Knight) สำรวจโดยกระโดดไปยังตำแหน่งที่ห่างออกไปเป็นรูปตัว L

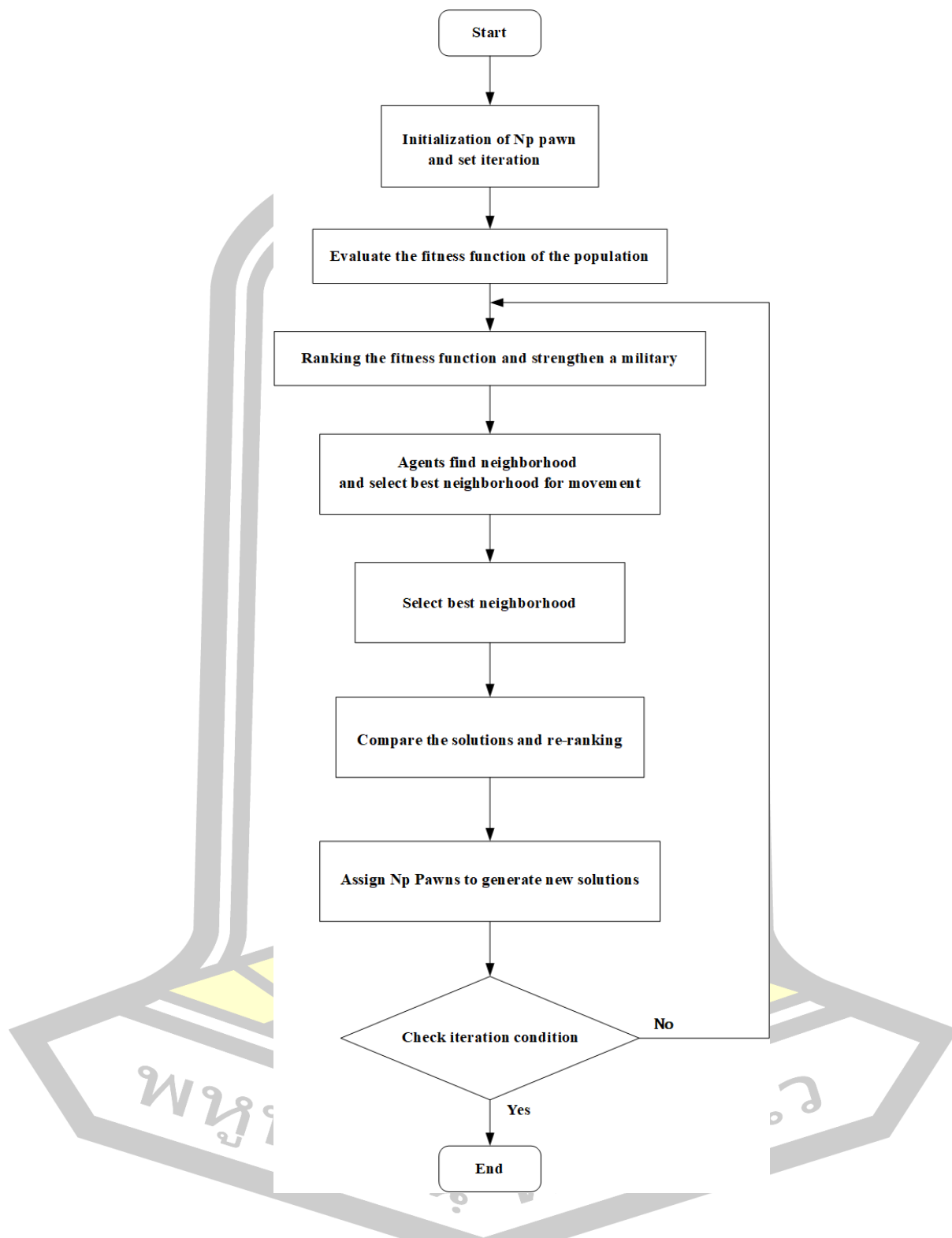
บาทหลวง (Bishop) สำรวจพื้นที่เฉพาะในแนวทแยง

ตัวเบี้ย (Pawn) เคลื่อนที่ทีละเล็กละน้อยในแนวตั้ง

3. การอัปเดตตำแหน่ง โดยการคำนวณค่าฟังก์ชันสมรรถนะของตำแหน่งใหม่ที่ตัวหมากรุกเคลื่อนที่ไป และตัวหมากรุกจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ดีที่สุดในการค้นพบ

4. การจัดลำดับใหม่ หลังจากตัวหมากรุกทั้งหมดเคลื่อนที่เสร็จจะมีการคำนวณค่าฟังก์ชันสมรรถนะใหม่แล้วจัดลำดับคำตอบจากดีที่สุดไปแย่ที่สุด และอัปเดตตำแหน่งของหมากรุกหลักตามลำดับใหม่

5. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด หากพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือครบจำนวนรอบที่กำหนดให้หยุดการทำงาน



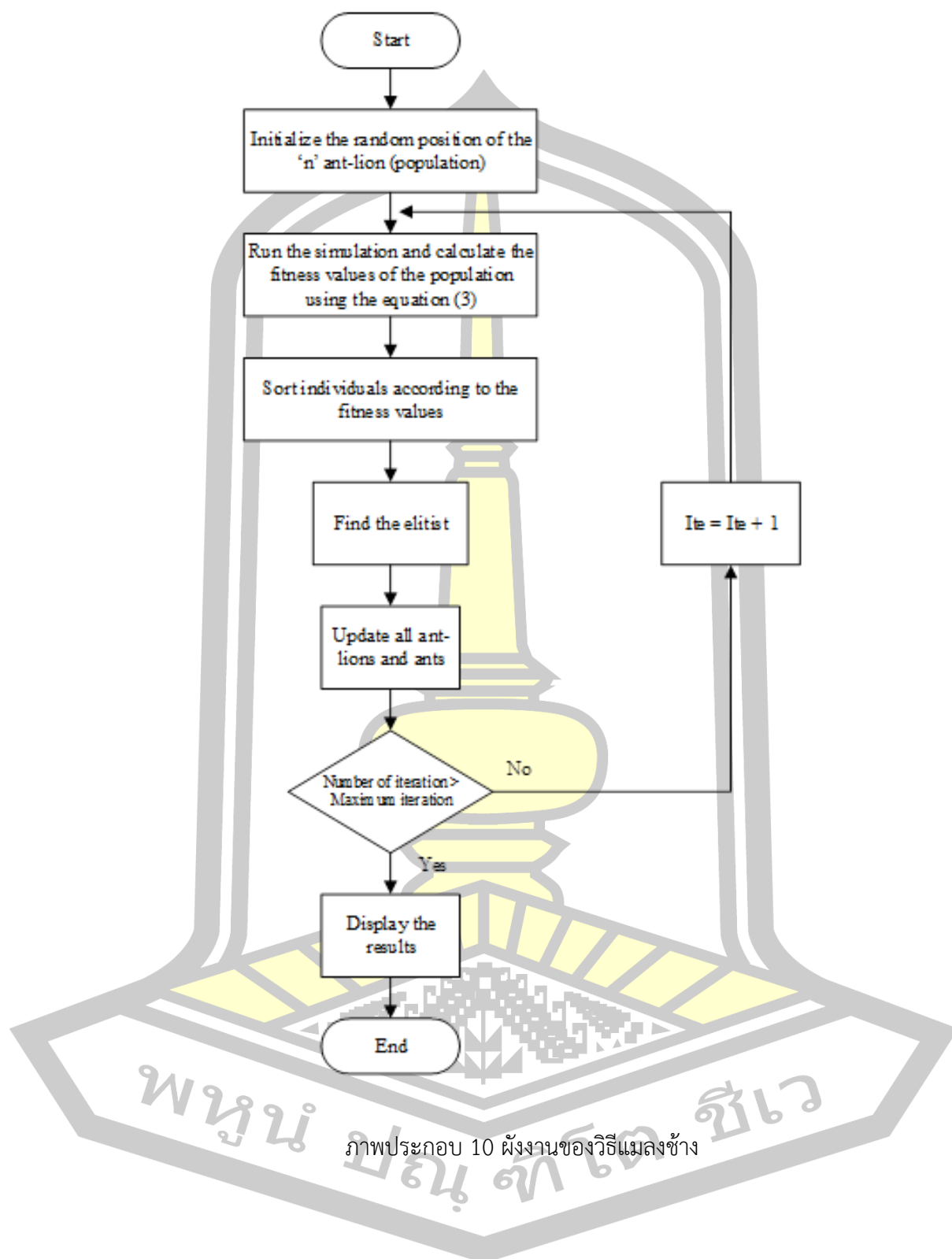
ภาพประกอบ 9 ผังงานของวิธีหมากรุก

2.6 วิธีแมลงช้าง

วิธีแมลงช้าง (Ant Lion Optimizer, ALO) [4, 36] เป็นอัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการล่าของตัวอ่อนแมลงช้างในธรรมชาติ โดยตัวอ่อนจะขุดหลุมรูปกรวยในทรายเพื่อดักจับมด เมื่อมดตกลงไปในหลุม ตัวอ่อนจะโยนทรายใส่เพื่อป้องกันไม่ให้เหยื่อหลบหนี และดึงเหยื่อลงไปได้ดินเพื่อกินเป็นอาหาร พฤติกรรมอันชาญฉลาดนี้ถูกจำลองเป็นกลไกการค้นหาในอัลกอริทึม ALO ซึ่งสามารถปรับสมดุลระหว่างการสำรวจ และการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนการทำงานของวิธีแมลงช้าง

1. กำหนดประชากรเริ่มต้น (Initialization) สุ่มสร้างประชากรของ “มด” (คำตอบ) และ “แมลงช้าง” (ผู้ล่า) ภายในขอบเขตการค้นหา
2. การประเมินผล (Evaluation) ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อวัดค่าความเหมาะสม (fitness) ของแต่ละคำตอบ
3. การเลือกแมลงช้าง (Antlion Selection) เลือกแมลงช้างโดยใช้วิธีวงล้อรูเล็ตต์ (Roulette Wheel) เพื่อจับคู่กับมดในการนำทาง
4. การเดินสุ่มของมด (Random Walk) มดแต่ละตัวจะเดินแบบสุ่มโดยอิงจากตำแหน่งของแมลงช้างและตำแหน่งที่ดีที่สุด (Elite)
5. การดักจับและกลืนเหยื่อ (Trapping and Catching Prey) หากมดมีค่าความเหมาะสมดีกว่าแมลงช้าง จะถือว่า “ถูกจับ” และแมลงช้างจะอัปเดตตำแหน่งของตนไปยังตำแหน่งของมดนั้น
6. การบีบขอบเขต (Boundary Shrinking) ค่อย ๆ ลดขอบเขตการเดินของมดลงตามจำนวนรอบ เพื่อจำลองการไถ่ลงหลุม และช่วยในการหาคำตอบที่แม่นยำขึ้น
7. การรักษาคำตอบที่ดีที่สุด (Elitism) เก็บตำแหน่งแมลงช้างที่ดีที่สุดไว้ตลอดเวลา เพื่อใช้ในการนำทางมดทุกตัวในการเดินรอบถัดไป
8. เงื่อนไขหยุด (Termination Condition) หยุดเมื่อครบจำนวนรอบ หรือได้ค่าคำตอบตามเป้าหมาย แล้วคืนผลลัพธ์ที่ดีที่สุด



2.7 วิธีฮิปโปโปแตมัส

วิธีฮิปโปโปแตมัส (Hippopotamus Optimization Algorithm, HO) [6] เป็นอัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการดำรงชีวิตของฮิปโปโปแตมัสในธรรมชาติ โดยเฉพาะกิจกรรมการหาอาหาร การเคลื่อนไหวในน้ำ และการตอบสนองต่อภัยคุกคาม กลไกเหล่านี้ถูกนำมาจำลองเป็นขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ค้นหา (Search Space)

วิธีฮิปโปโปแตมัสมีจุดเด่นคือการแบ่งการทำงานออกเป็น 3 เฟส ได้แก่ การสุ่มเดินหาอาหาร (Search for food), การประเมินแหล่งอาหาร (Evaluate food), และการเคลื่อนที่ไปยังแหล่งอาหารที่ดีที่สุด (Movement toward best food source) เพื่อให้สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และหลีกเลี่ยงการติดกับดักของค่าต่ำสุดในท้องถิ่น

ขั้นตอนการทำงานของวิธีฮิปโปโปแตมัส (HOA)

เฟสที่ 1 การค้นหาอาหารแบบสุ่ม (Phase 1: Random Food Search Phase)

1. ฮิปโปโปแตมัสแต่ละตัวจะเคลื่อนที่อย่างสุ่มในพื้นที่ค้นหาเพื่อแสวงหาแหล่งอาหารใหม่
2. การเคลื่อนที่นั้นควบคุมโดยพารามิเตอร์สุ่มและขอบเขตของปัญหา เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่การค้นหาให้กว้างที่สุด (exploration)
3. ใช้สมการตำแหน่งแบบสุ่ม

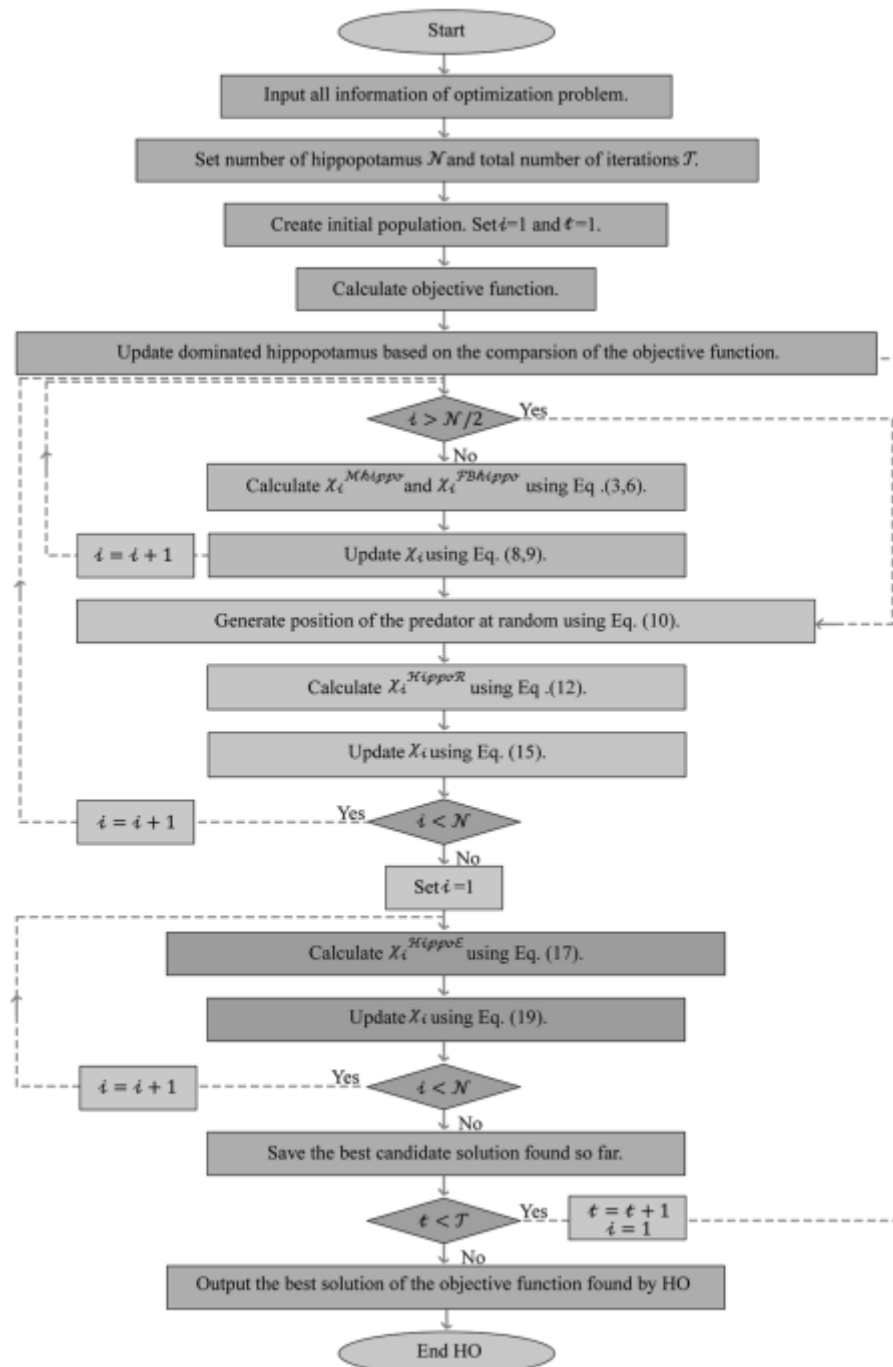
เฟสที่ 2 การประเมินแหล่งอาหาร (Phase 2: Evaluation of Food Source Phase)

1. ทำการประเมินตำแหน่งใหม่ที่ฮิปโปแต่ละตัวค้นพบ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (fitness function)
2. หากตำแหน่งใหม่นั้นมีค่าฟิตเนสดีกว่าเดิม ให้ทำการอัปเดตตำแหน่งของฮิปโป
3. หากไม่ดีกว่า ให้คงตำแหน่งเดิมไว้

เฟสที่ 3 การเคลื่อนที่ไปยังแหล่งอาหารที่ดีที่สุด (Phase 3: Move Toward the Best Food Source)

1. ฮิปโปทุกตัวจะค่อย ๆ เคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่พบ ณ ขณะนั้น (global best)
2. เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการค้นหา (exploitation)
3. การเคลื่อนที่ที่ถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์การเรียนรู้ และการลดขนาดการก้าว (step size decay)
4. สมการตำแหน่งถูกปรับด้วยน้ำหนักเฉลี่ยระหว่างตำแหน่งปัจจุบันกับ global best

เงื่อนไขการหยุด (Termination) กระบวนการทำซ้ำทั้ง 3 เฟสดังกล่าวจะสิ้นสุดเมื่อถึงจำนวนรอบสูงสุด หรือค่าฟิตเนสถึงเกณฑ์ที่กำหนดไว้



ภาพประกอบ 11 ฟังก์ชันวิธีฮิปโปเตมัส [6]

2.8 วิธีหมาป่าสีเทา

วิธีหมาป่าสีเทา [37] เป็นวิธีการการเพิ่มประสิทธิภาพที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรม การล่าของหมาป่าสีเทาในธรรมชาติ ซึ่งถูกคิดค้นและพัฒนาโดย Seyedali Mirjalil ในปี 2014 [11] วิธีการนี้มีพื้นฐานมาจากโครงสร้างลำดับชั้นทางสังคมของฝูงหมาป่า ซึ่งประกอบด้วย Alpha (α) ซึ่งเป็นผู้นำฝูงที่รับผิดชอบการตัดสินใจและการวางแผน Beta (β) เป็นรองผู้นำที่ช่วยสนับสนุน Alpha ในการบริหารฝูง Delta (δ) เป็นตัวช่วยรองจาก Beta และ Omega (ω) ซึ่งเป็นหมาป่าลำดับต่ำสุดที่ปฏิบัติตามคำสั่งของหมาป่าในระดับที่สูงกว่า กระบวนการล่าของหมาป่าสีเทาในวิธีการนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การติดตามเหยื่อ (Tracking) การล้อมเหยื่อ (Encircling) และการโจมตีเหยื่อ (Attacking) โดยในระหว่างกระบวนการล่าจะมีการอัปเดตตำแหน่งของหมาป่าภายในพื้นที่การค้นหาโดยใช้ตำแหน่งของ Alpha Beta และ Delta เป็นตัวอ้างอิง

ขั้นตอนการทำงานของวิธีหมาป่าสีเทา

1. เริ่มต้นกำหนดค่าตำแหน่งเริ่มต้นของหมาป่าในประชากรแบบสุ่ม
2. การล้อมเหยื่อ (Encircling Prey) หมาป่าจะล้อมเป้าหมายโดยการปรับปรุงตำแหน่งของพวกมันดังสมการ (21)

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \quad (21)$$

โดยที่	$\vec{X}_p(t)$	คือ	ตำแหน่งของเหยื่อ หรือคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบัน
	$\vec{X}(t)$	คือ	ตำแหน่งของหมาป่า
	$\vec{A}$	คือ	$2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}$ เวกเตอร์ที่ควบคุมการล้อม
	$\vec{C}$	คือ	$2\vec{r}_2$ เวกเตอร์ที่ปรับระยะห่าง
	$\vec{r}_1, \vec{r}_2$	คือ	เวกเตอร์สุ่มในช่วง [0,1]
	$\vec{a}$	คือ	พารามิเตอร์ที่ลดลงตลอดการทำซ้ำ

3. การอัปเดตตำแหน่งโดย Alpha Beta และ Delta และตำแหน่งของหมาป่าถูกปรับตาม Alpha Beta และ Delta ซึ่งเป็นตัวแทนของคำตอบที่ดีที่สุดโดยหาได้ด้วยสมการ (22)

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (22)$$

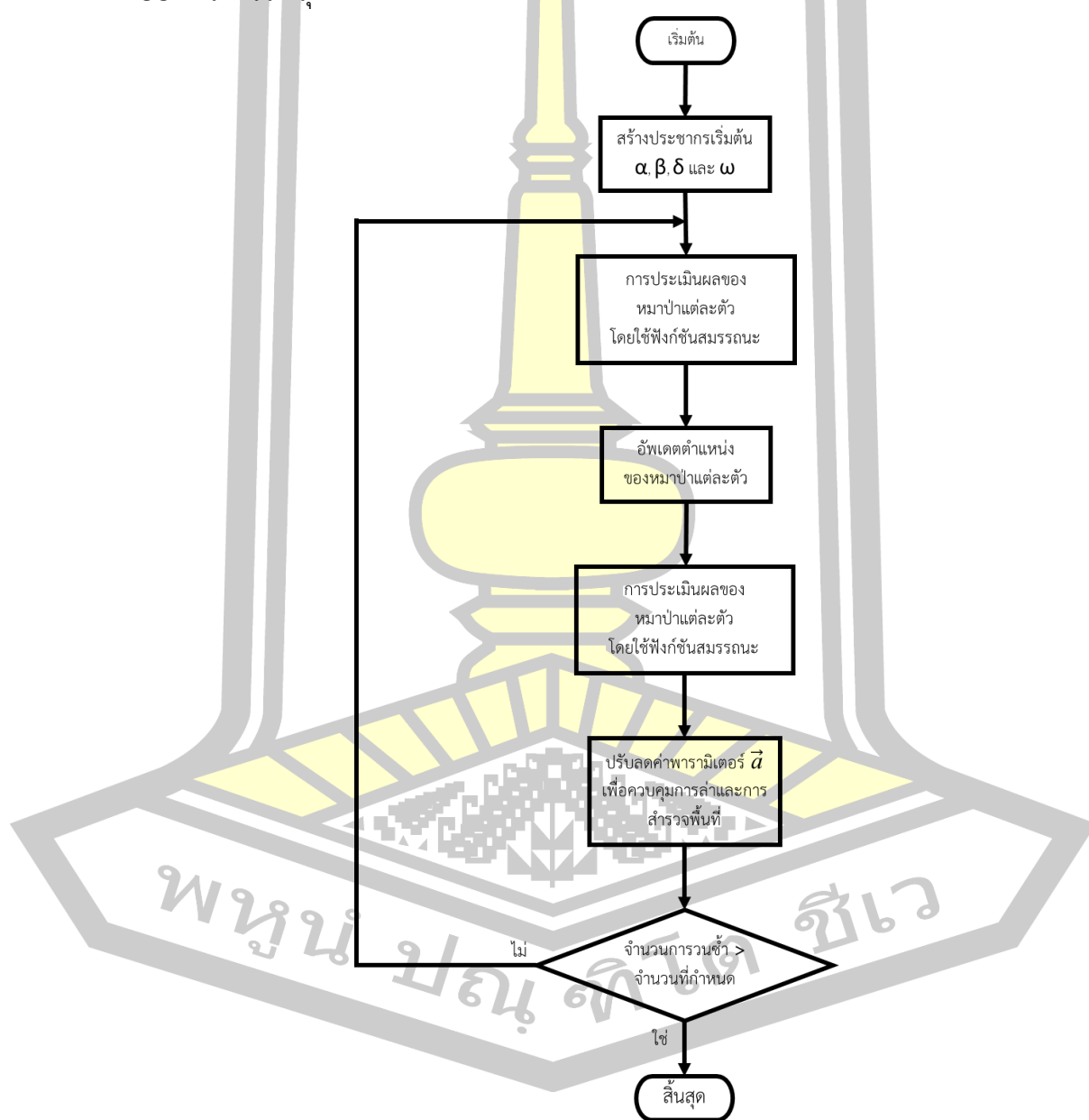
4. ค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด คำนวณค่าฟังก์ชันสมรรถนะสำหรับหมาป่าทุกตัว อัปเดต Alpha Beta และ Delta ตามค่าที่ดีที่สุด

5. ลดค่า $\vec{d}$ ตามลำดับขั้นตอน เพื่อควบคุมการล่าและการสำรวจพื้นที่

เมื่อ $|\vec{A}| > 1$ หมาป่าจะมุ่งหน้าไปยังเป้าหมายเพื่อโจมตี

เมื่อ $|\vec{A}| < 1$ หมาป่าจะสำรวจพื้นที่ที่ค้นหาใหม่เพื่อค้นหาเป้าหมายที่ดีกว่า

6. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด โดยที่จะหยุดเมื่อถึงจำนวนรอบที่กำหนดหรือพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด



ภาพประกอบ 12 ฟังก์ชันวิธีหมาป่าสี่เทา

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sitthisak และคณะ [38] ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการหมากรุก (Chess Algorithm) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันแบบสองพื้นที่ โดยมีเป้าหมายในการลดค่าข้อผิดพลาดสะสม เช่น Integral Time Absolute Error (ITAE) และ Integral Time Squared Error (ITSE) งานวิจัยได้ทดสอบระบบด้วย MATLAB/Simulink และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการ Particle Swarm Optimization (PSO) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Chess Algorithm มีความสามารถที่ดีกว่า PSO ในการลดค่าการสั่นสะเทือน (Overshoot) เวลาการเข้าสู่สถานะคงตัว (Settling Time) และข้อผิดพลาดในสถานะคงตัว การวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่า PID ที่ปรับพารามิเตอร์ด้วย Chess Algorithm มีเสถียรภาพสูงและสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบพลวัตได้ดี นอกจากนี้ CA ยังมีศักยภาพในการจัดการกับปัญหาที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้เหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างรวดเร็ว

Techatat Buranaudsawakul และคณะ [10] นำเสนอการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสององศาอิสระแบบพีไอดี (2-DOF PID) สำหรับการควบคุมความถี่โหลด โดยใช้ Chess Algorithm ซึ่งเป็นวิธีการการเพิ่มประสิทธิภาพที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการเล่นหมากรุกสากล วิธีนี้มุ่งเน้นการปรับสมดุลระหว่างการสำรวจ (Exploration) และการใช้ประโยชน์ (Exploitation) ของพื้นที่การค้นหา เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาพบว่า การใช้ Chess Algorithm สามารถลดค่า Overshoot Settling Time และ Error Criteria ต่าง ๆ เช่น IAE ISE ITAE และ ITSE ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับ Particle Swarm Optimization (PSO) ชี้ให้เห็นว่า Chess Algorithm มีความแม่นยำสูงกว่าในหลายตัวชี้วัด แม้ว่า PSO จะมีเวลาปรับเข้าสู่สถานะคงตัวที่รวดเร็วกว่าในบางกรณี การทดลองยังครอบคลุมการทดสอบความคงทนของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดและการรบกวนต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Chess Algorithm มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบ LFC ในระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่ได้อย่างดีเยี่ยม

Sahu และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมความถี่โหลด (Load Frequency Control) ในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน 5 พื้นที่ (Five-Area Power System) โดยใช้ตัวควบคุม PID เพื่อแก้ปัญหาความเบี่ยงเบนของความถี่และข้อผิดพลาดจากกำลังไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนระหว่างพื้นที่ การทดลองจำลองด้วย MATLAB/Simulink พบว่าตัวควบคุม PID ช่วยลดเวลาเข้าสู่สถานะคงตัว (Settling Time) และข้อผิดพลาดในสถานะคงตัว (Steady-State Error) ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวควบคุม PI และตัวควบคุม Integral โดยเฉพาะในกรณีที่ระบบมีการรบกวนโหลด (Load Disturbance) การทดลองยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุม PID ในการรักษาความถี่

และการปรับสมดุลพลังงานไฟฟ้าผ่าน Tie-Line ให้เหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนสูง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าตัวควบคุม PID มีข้อจำกัดในด้านความเร็วในการตอบสนอง จึงแนะนำให้พัฒนาตัวควบคุมขั้นสูงในอนาคตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการแก้ปัญหาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Mirjalili และคณะ [11] ได้นำเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วย Grey Wolf Optimizer (GWO) ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการล่าและลำดับชั้นทางสังคมของหมาป่าสีเทา (Grey Wolf) วิธีการนี้จำลองการล่าของหมาป่าผ่านการติดตาม (Tracking) การล้อมเป้าหมาย (Encircling Prey) และการโจมตี (Attacking Prey) การทดลองได้ทดสอบ GWO กับปัญหาเพิ่มประสิทธิภาพ 29 ฟังก์ชันมาตรฐานและเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ เช่น Particle Swarm Optimization (PSO) และ Differential Evolution (DE) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า GWO มีความสามารถที่โดดเด่นในการสำรวจพื้นที่ค้นหา (Exploration) หลีกเลี่ยงปัญหา Local Optimal และปรับตัวเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ GWO ยังถูกนำไปใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน เช่น การออกแบบสปริงแรงดึง/แรงอัด (Tension/Compression Spring) คานเชื่อม (Welded Beam) และถังแรงดัน (Pressure Vessel) ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า GWO มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการอื่นในด้านค่าใช้จ่ายต่ำและความรวดเร็วในการหาคำตอบที่เหมาะสม

Raju และคณะ [17] ได้นำเสนอการใช้ Ant Lion Optimizer (ALO) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID พร้อมอนุพันธ์อันดับสอง (PID + DD) สำหรับการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ ในระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อสามพื้นที่ (Three-Area Interconnected System) โดยระบบนี้มีข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (GRC) ที่ 3%/นาที ตัวควบคุม PID + DD มีประสิทธิภาพเหนือกว่าตัวควบคุม I PI และ PID ในแง่ของเวลาปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) การลดโอเวอร์ชูต (Overshoot) และการลดการสั่นสะเทือนของระบบ การศึกษาได้ทดสอบตัวควบคุม PID + DD ภายใต้สถานการณ์โหลดที่หลากหลาย รวมถึงรูปแบบโหลดแบบสุ่ม (Random Loading Pattern; RLP) และเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าความเฉื่อย (Inertia Constant) และขนาดหรือตำแหน่งของการรบกวน (SLP) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ปรับด้วย ALO มีความทนทานสูงและไม่จำเป็นต้องปรับค่าใหม่แม้ภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพอื่น ๆ เช่น Genetic Algorithm (GA) Particle Swarm Optimization (PSO) Differential Evolution (DE) และ Firefly Algorithm (FA) พบว่า ALO มีความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนและค่าผิดพลาดได้ดีกว่า ทั้งนี้ ALO ยังสามารถหลีกเลี่ยงปัญหา Local Optima ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในปัญหาที่ซับซ้อนในระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

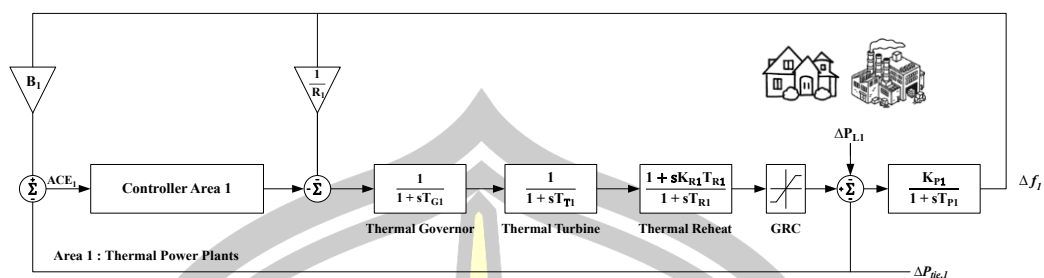
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่เข้าด้วยกันผ่านสายส่ง โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแต่ละตัวและใช้วิธีต่าง ๆ ได้แก่ วิธีหามาตรฐาน วิธีเชิงแมลงช้าง วิธีฮิวริสติก และวิธีหมาป่าสีเทา เพื่อใช้ควบคุมความถี่โหลดในหลัก ๆ หลายสถานการณ์

3.1 แบบจำลองการควบคุมความถี่ของโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่

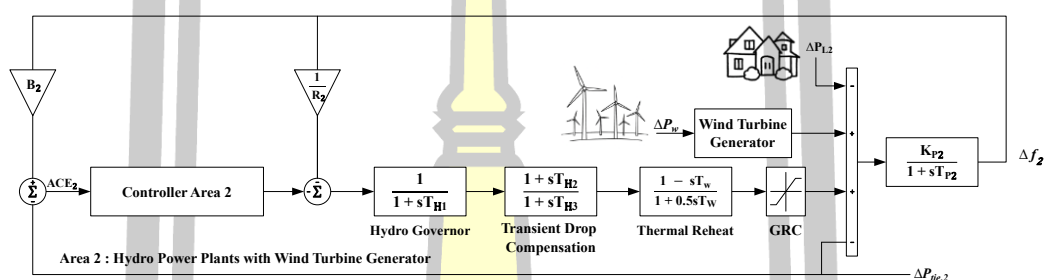
ในการศึกษานี้ ได้ใช้ระบบโรงไฟฟ้าแบบหลายพื้นที่ (three-area multi-source power system) ซึ่งแต่ละพื้นที่ประกอบด้วยแหล่งผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยพื้นที่ที่ 1 ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ พื้นที่ที่ 2 ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังน้ำร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานลม และพื้นที่ที่ 3 ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานลม สำหรับกำลังการผลิตสูงสุดของแต่ละพื้นที่กำหนดไว้ที่ 1,000 เมกกะวัตต์ 2,000 เมกกะวัตต์ และ 4,000 เมกกะวัตต์ ตามลำดับ หรือในอัตราส่วน 1:2:4 โดยโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทมีข้อจำกัดด้านอัตราการเปลี่ยนกำลังผลิตที่แตกต่างกัน กล่าวคือ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับจำกัดอัตราการเปลี่ยนกำลังผลิตที่ 5% ต่อ 1 นาที ขณะที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำจำกัดอัตราการเปลี่ยนกำลังผลิตที่ 370% ต่อ 1 นาที ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการจำลองระบบแสดงอยู่ในภาคผนวก

3.2 ขอบเขตการค้นหาของพารามิเตอร์

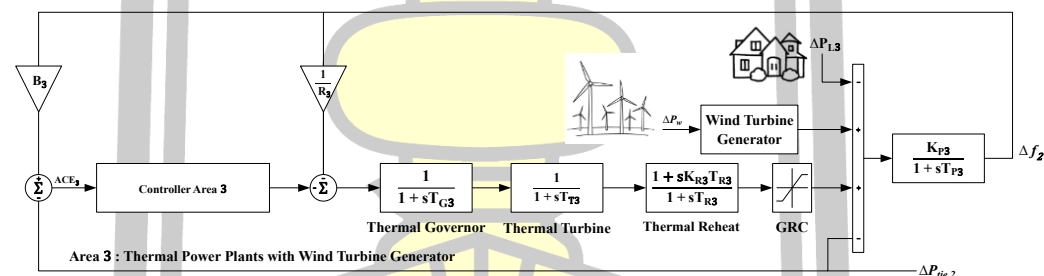
ในการทดลองนี้ ได้กำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา ได้แก่ K_p , K_i , K_d และ K_{dd} ให้อยู่ในช่วง $[0, 1]$ สำหรับทุกวิธีการที่ใช้ในการปรับจูน ไม่ว่าจะเป็นอัลกอริทึมหามาตรฐาน วิธีแมลงช้าง วิธีฮิวริสติก หรือวิธีหมาป่าสีเทา เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวิธีเป็นไปอย่างยุติธรรม จึงได้กำหนดจำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนประชากรเริ่มต้นให้เท่ากันในทุกกรณี ทั้งนี้เพื่อลดอคติที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของจำนวนรอบหรือขนาดประชากร อันจะส่งผลให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการค้นหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละวิธีได้อย่างเที่ยงตรงและยุติธรรม



(ก)



(ข)



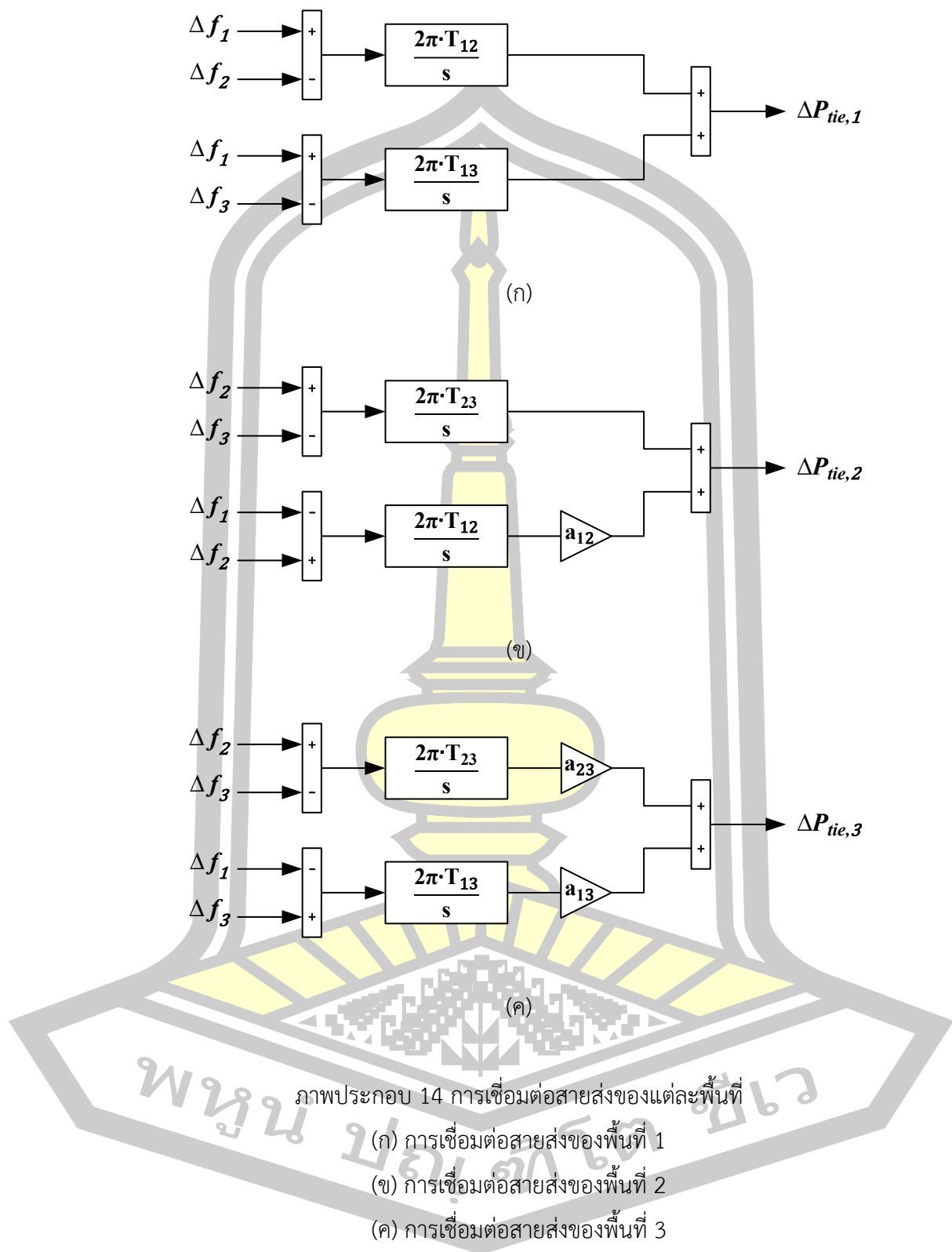
(ค)

ภาพประกอบ 13 แบบจำลองโรงไฟฟ้าหลายพื้นที่

(ก) พื้นที่ 1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับ

(ข) พื้นที่ 2 โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและพลังงานลม

(ค) พื้นที่ 3 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบมีการอุ่นย้อนกลับและพลังงานลม



3.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสองใช้เกณฑ์ดัชนีสมรรถนะหลายแบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Integral Absolute Error, IAE) ดังสมการ (23)

$$IAE = \int_0^{t_{sim}} |(\Delta f_i) + (\Delta P_{tie,i})| dt \quad (23)$$

2. ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error, ITAE) ดังสมการ (24)

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t |(\Delta f_i) + (\Delta P_{tie,i})| dt \quad (24)$$

3. ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (Integral Square Error, ISE) ดังสมการ (25)

$$ISE = \int_0^{t_{sim}} [(\Delta f_i)^2 + (\Delta P_{tie,i})^2] dt \quad (25)$$

4. ปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดกำลังสองคูณด้วยเวลา (Integral Time Square Error, ITSE) ดังสมการ (26)

$$ITSE = \int_0^{t_{sim}} t [(\Delta f_i)^2 + (\Delta P_{tie,i})^2] dt \quad (26)$$

3.4 สถานการณ์จำลอง

การทดลองนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมและการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานการณ์การจ่ายโหลดที่แตกต่างกันในระบบโรงไฟฟ้าพลังงาน 3 พื้นที่ ด้วยฟังก์ชันขั้นบันไดเป็นรูปแบบของโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สถานการณ์การทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณีในการทดลอง โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 ฟังก์ชัน

1. โรงไฟฟ้าพื้นที่ 1 จ่ายโหลดปกติโดยใช้ฟังก์ชันขั้นบันได โดยพื้นที่ 2 และ 3 ไม่มีโหลด
2. โรงไฟฟ้าพื้นที่ 1 จ่ายโหลดปกติโดยใช้ฟังก์ชันขั้นบันไดแบบสุ่ม โดยพื้นที่ 2 และ 3 ไม่มี

โหลด

3.5 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมความถี่โหลด

การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากระบบควบคุมความถี่โหลดเป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยประเมินประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยตัวชี้วัดหลัก เช่น Maximum Overshoot, Minimum Undershoot, Settling Time และ Steady-State Error ซึ่งตัวชี้วัดเหล่านี้ช่วยให้สามารถประเมินว่าระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือการรบกวนได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ โดยแต่ละตัวชี้วัดมีความสำคัญและการตีความผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ดังนี้

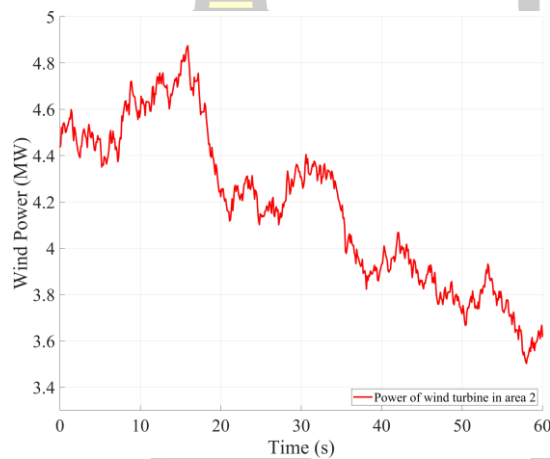
1. Maximum Overshoot คือ ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดในทิศทางบวกของความถี่หรือกำลังไฟฟ้าจากค่าที่ต้องการหลังจากเกิดการรบกวน ระบบที่มี Maximum Overshoot ต่ำจะแสดงถึงประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี ลดความเสี่ยงต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบ
2. Minimum Undershoot คือ ค่าความเบี่ยงเบนต่ำสุดในทิศทางลบของความถี่หรือกำลังไฟฟ้าจากค่าที่ต้องการหลังจากเกิดการรบกวน การมี Minimum Undershoot ในระดับต่ำแสดงถึงความสามารถในการควบคุมไม่ให้ระบบเกิดการตกต่ำมากเกินไปหลังเกิดการเปลี่ยนแปลง
3. Settling Time คือ ระยะเวลาที่ระบบใช้ในการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) หลังจากเกิดการรบกวน โดยค่าที่ต่ำจะสะท้อนถึงการตอบสนองที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ
4. Steady-State Error คือ ความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่กำหนดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ระบบที่ดีควรมี Steady-State Error ใกล้ศูนย์ เพื่อให้มั่นใจว่าความถี่และกำลังไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง

พูน ปณ จิต ชเว

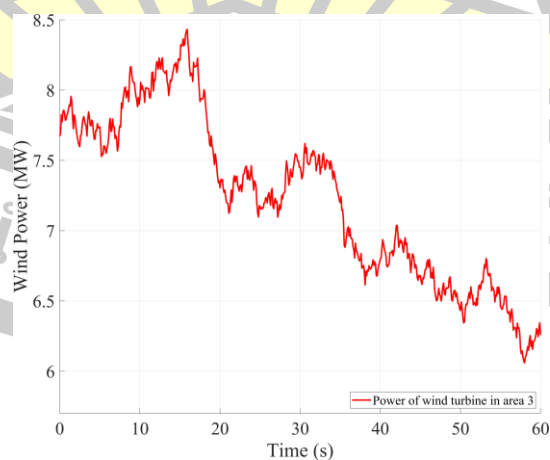
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

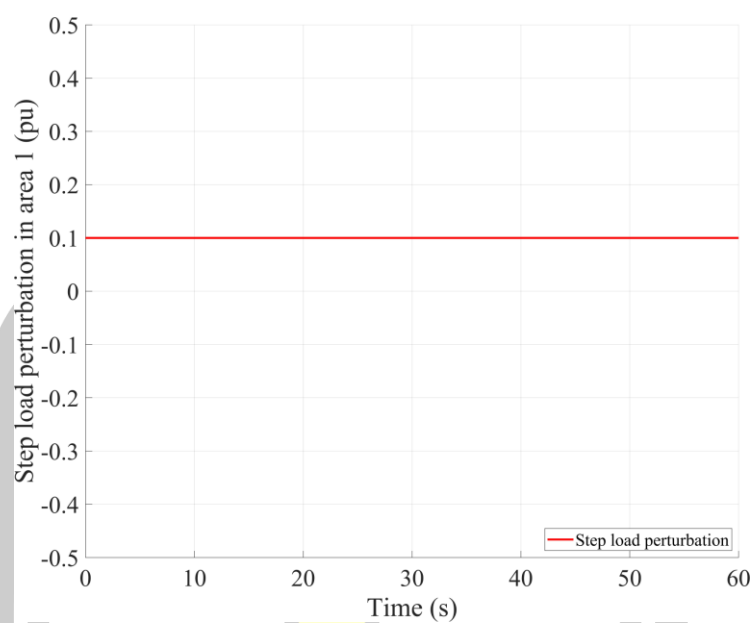
ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษาคือ โหลดโปรไฟล์แบบขั้นบันไดขนาด 0.1 p.u. แสดงดังภาพประกอบ 17 และโหลดโปรไฟล์ขั้นบันไดแบบสุ่มขนาด 0.01 p.u. ถึง 0.05 p.u. แสดงดังภาพประกอบ 18 พลังงานลมสูงสุดที่ผลิตได้ในพื้นที่ 2 และ 3 แสดงดังภาพประกอบ 15 และ 16 สำหรับเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่นี่จะพิจารณาที่การเบี่ยงเบนที่อยู่ในช่วง ± 0.001 เฮิร์ซ หรือ ในช่วง 49.999 ถึง 50.001 เฮิร์ซ



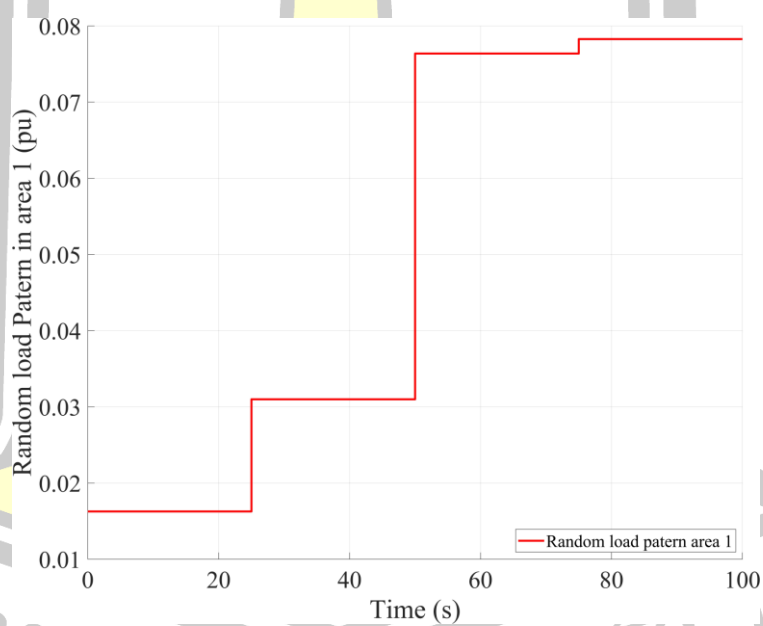
ภาพประกอบ 15 พลังงานลมสูงสุดที่ผลิตได้ในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 16 พลังงานลมสูงสุดที่ผลิตได้ในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 17 โหลดโปรไฟล์ขั้นบันไดของกรณีศึกษาที่ 1 (p.u.)

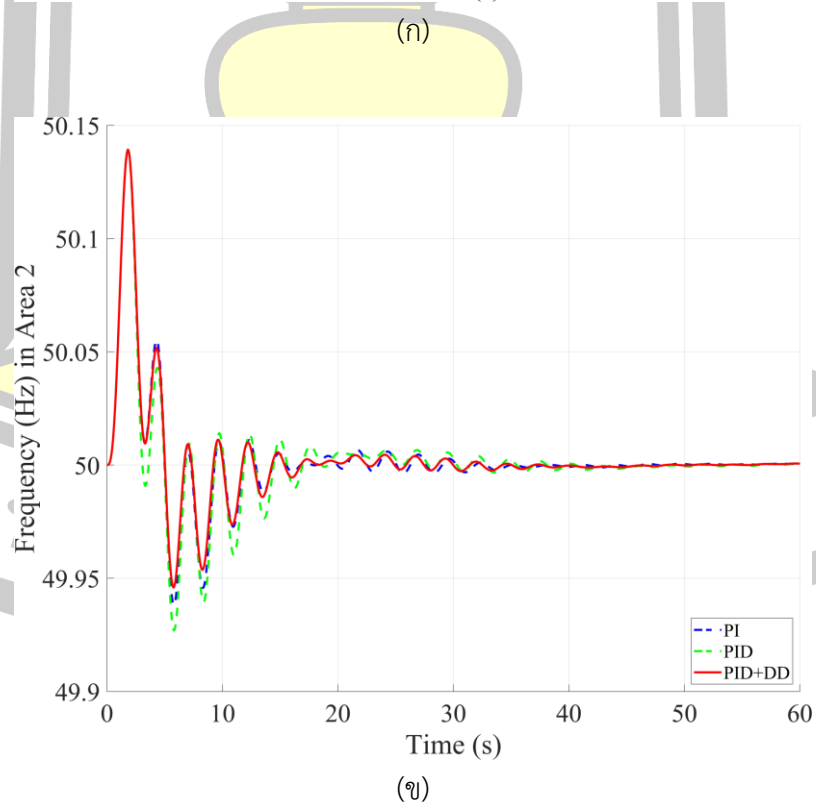
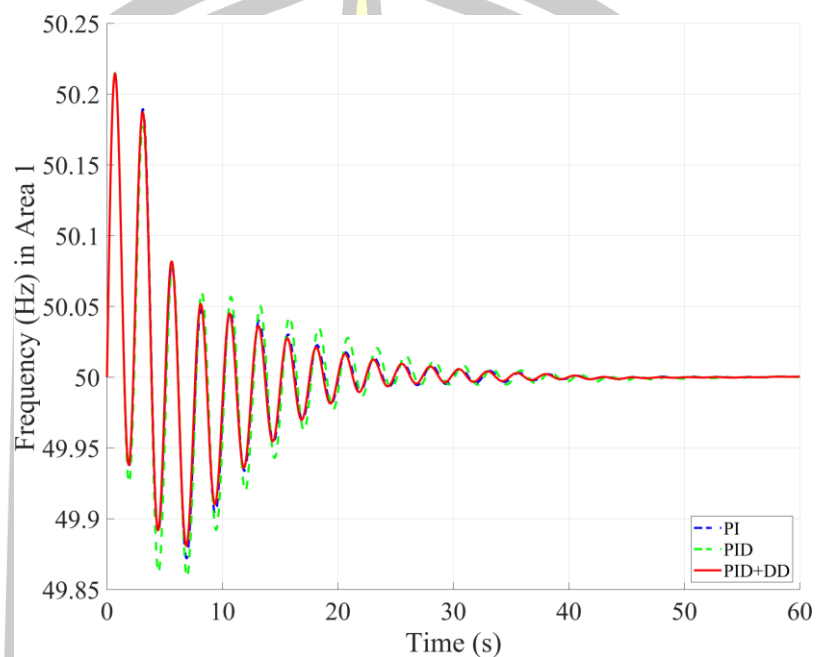


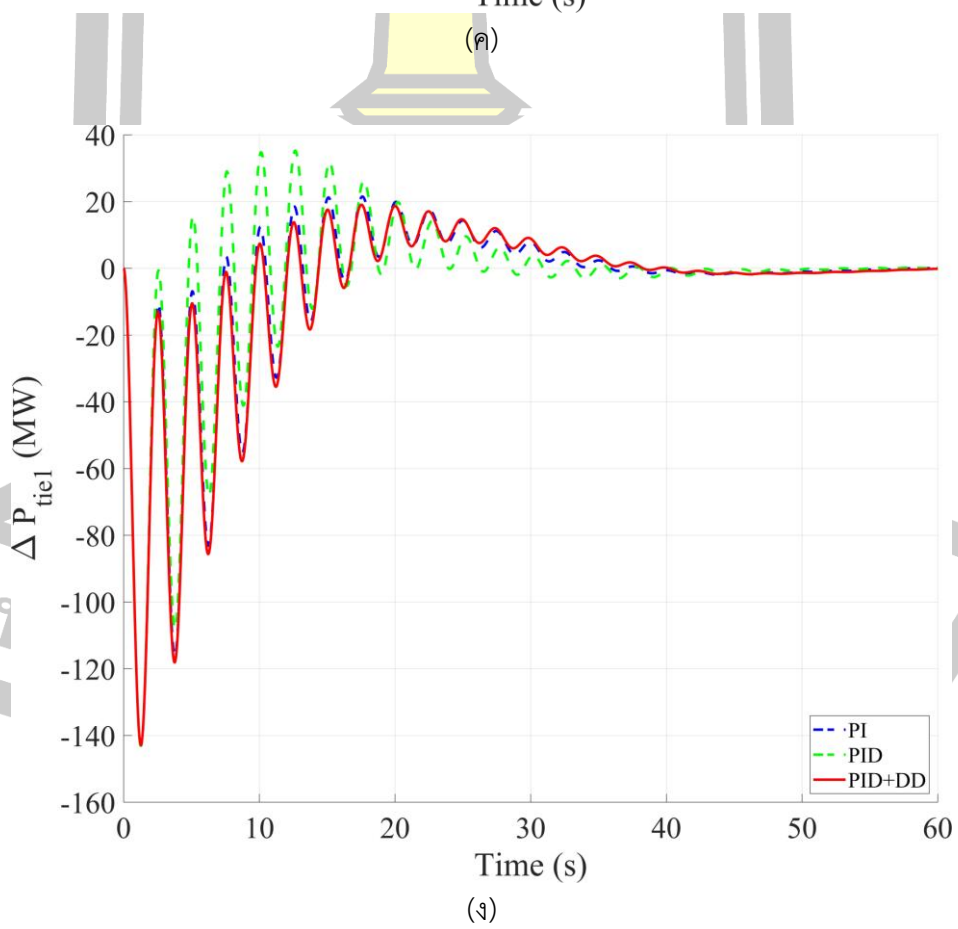
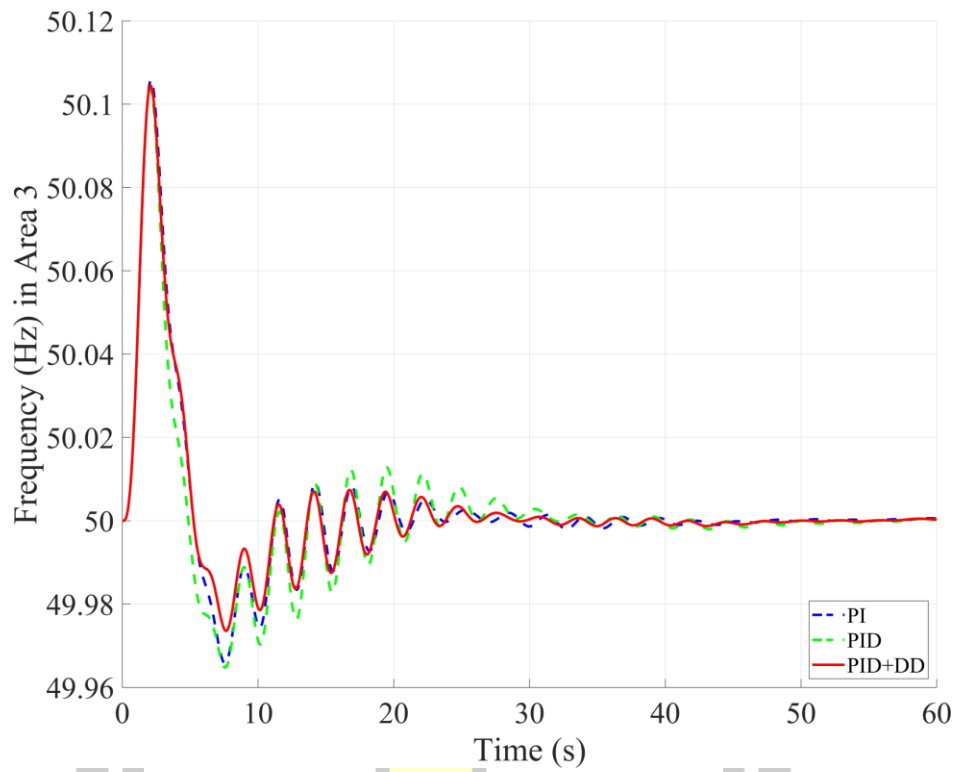
ภาพประกอบ 18 โหลดโปรไฟล์ขั้นบันไดแบบสุ่มของกรณีศึกษาที่ 2 (p.u.)

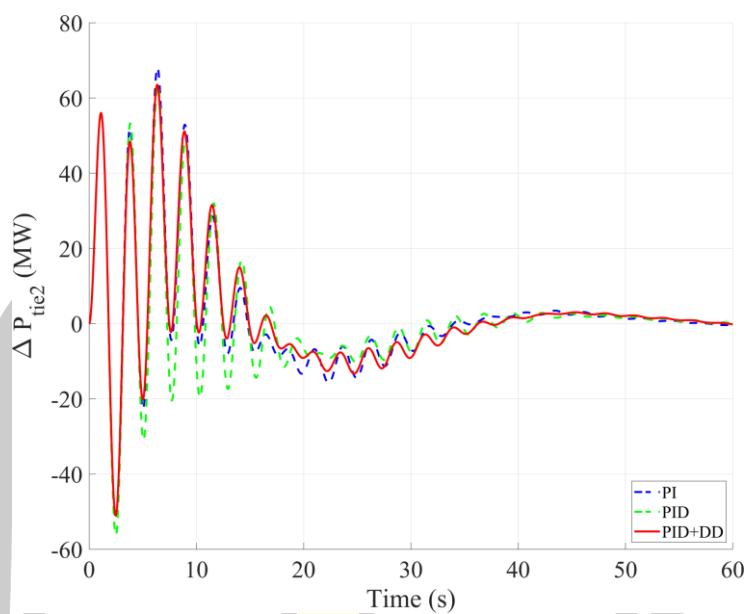
4.1 ผลการทดลองการเปรียบเทียบตัวควบคุม

4.1.1 ฟังก์ชัน ITAE

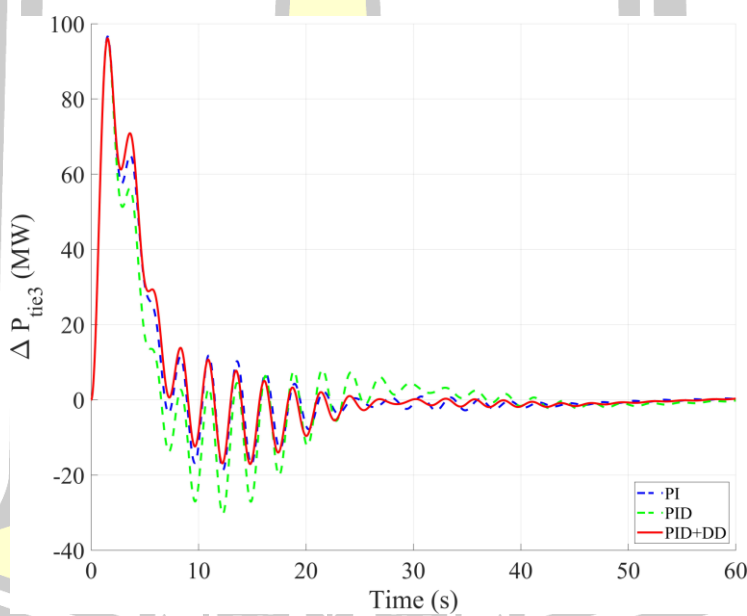
กรณีศึกษาที่ 1







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 19 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรตซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรตซ์)

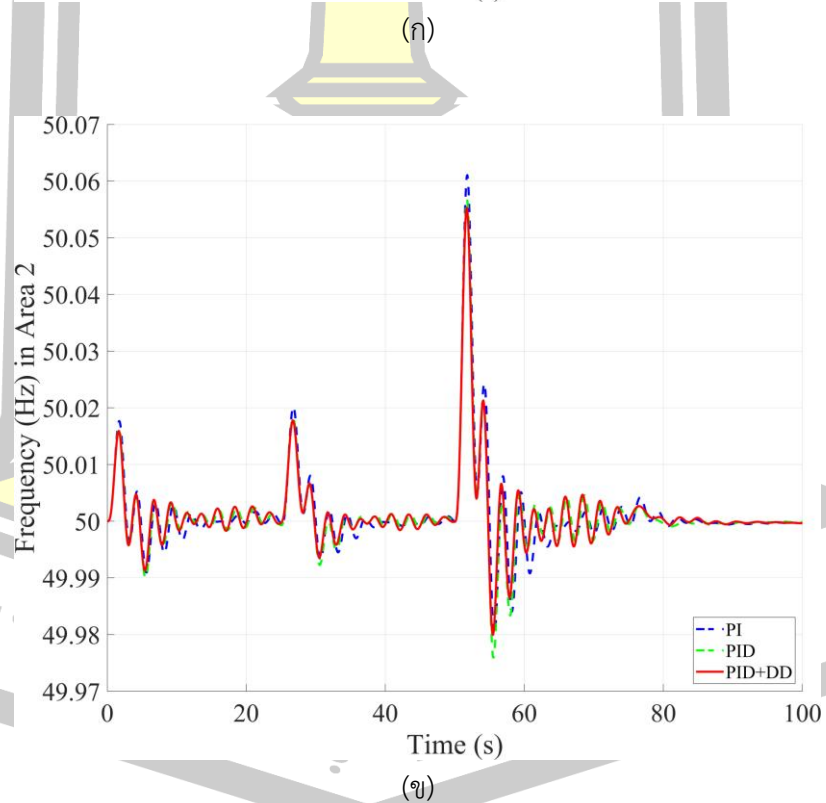
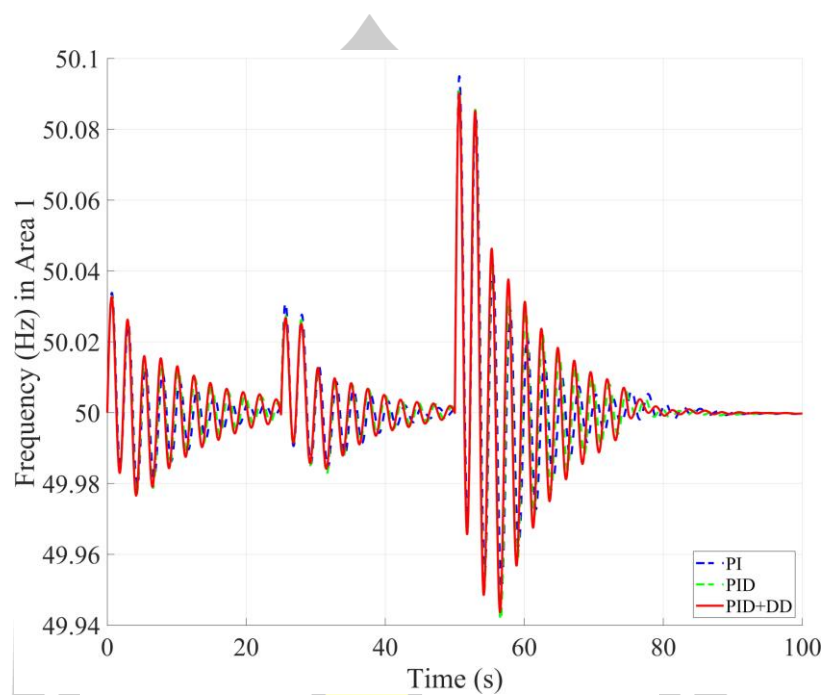
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรตซ์)

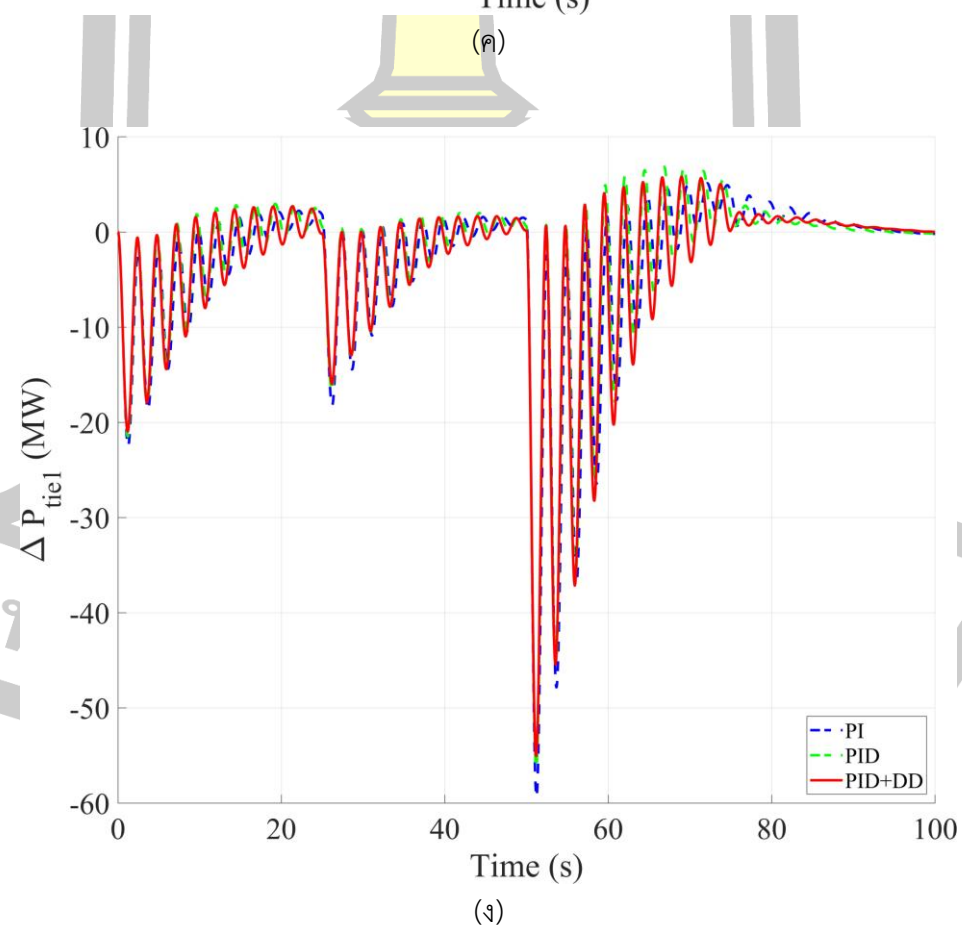
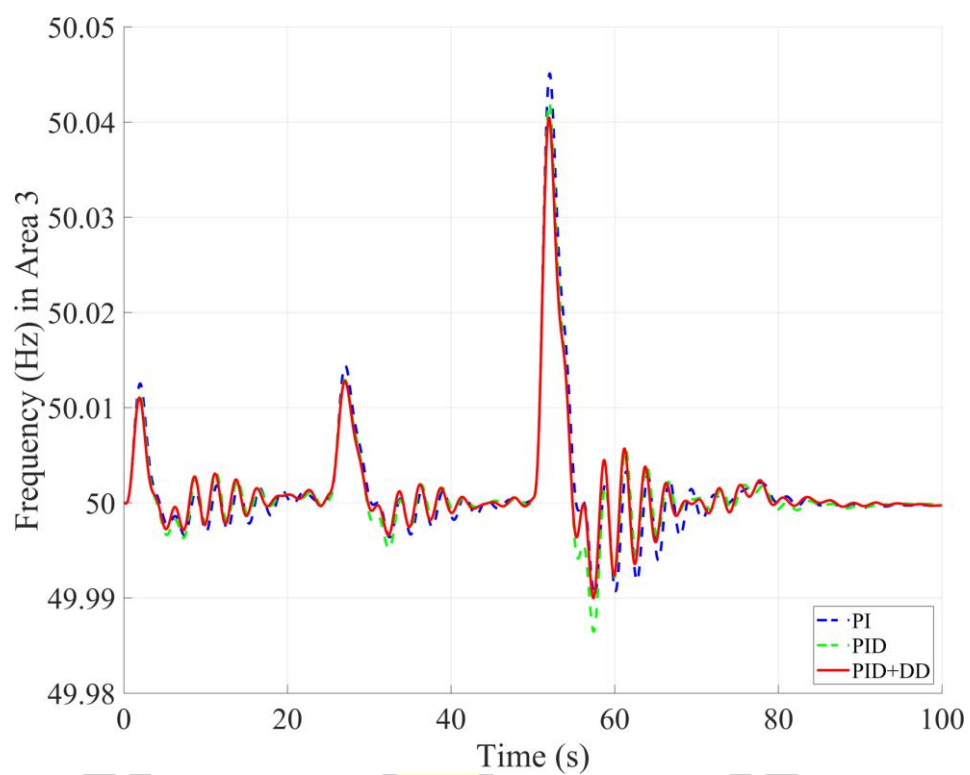
(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

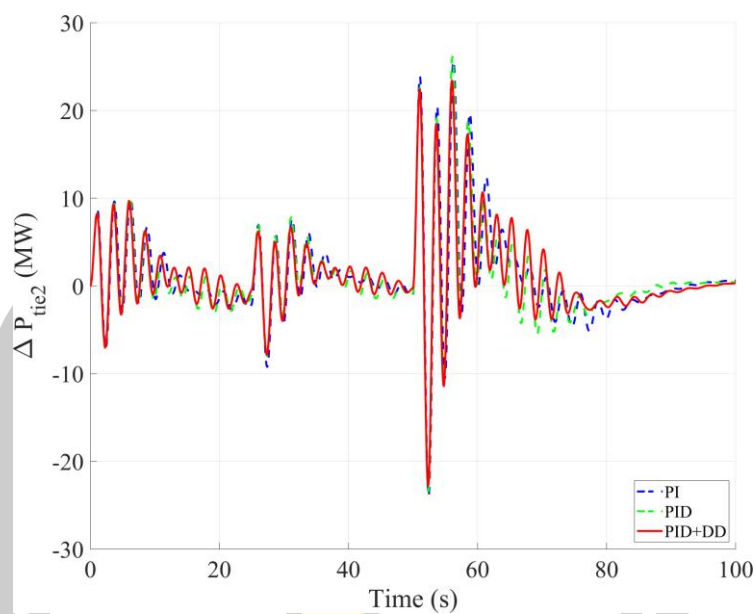
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

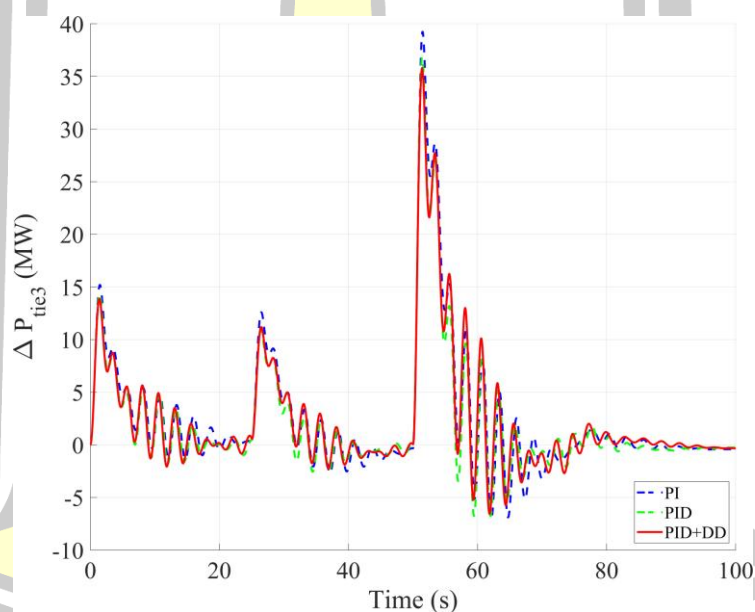
กรณีศึกษาที่ 2







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 20 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 2

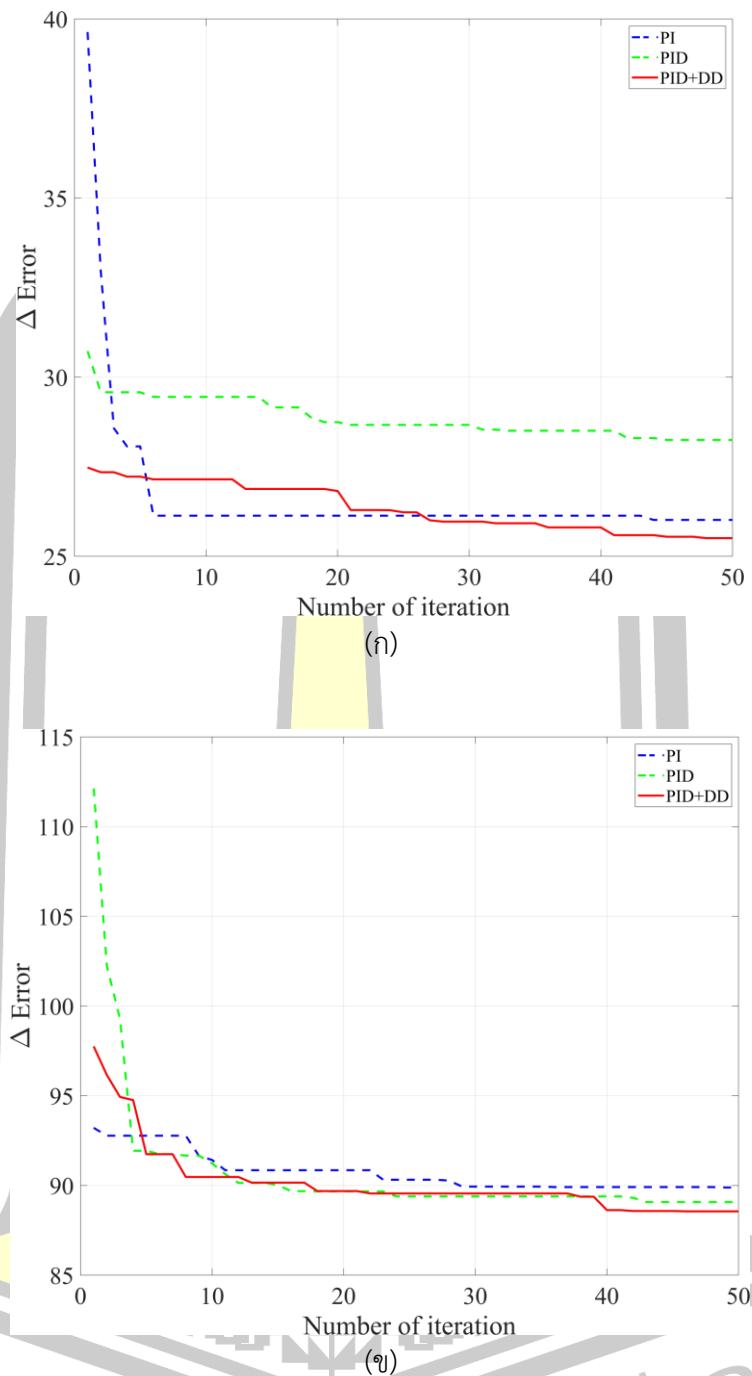
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 21 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE
(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 1

ชนิดตัวควบคุม	K_{PI}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.0618	0.2400	0.9875	0.2418	0.1318	0.9322	0.5836	0.8511	0.9880	0.2285	0.7692	0.5377
PID	0.0098	0.4140	0.1018	-	0.2666	0.7075	0.3175	-	0.9834	0.1964	0.5882	-
PI	0.0576	0.2644	-	-	0.2332	0.9925	-	-	0.7848	0.1733	-	-

ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 2

ชนิดตัวควบคุม	K_{PI}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.4138	0.1759	0.8804	0.6718	0.3278	0.9820	0.0453	0.2090	0.7648	0.1765	0.3873	0.4197
PID	0.3800	0.2276	0.9329	-	0.3116	0.9737	0.2552	-	0.7707	0.2933	0.4850	-
PI	0.1855	0.1957	-	-	0.3352	0.7913	-	-	0.9468	0.1668	-	-

ตาราง 3 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 1

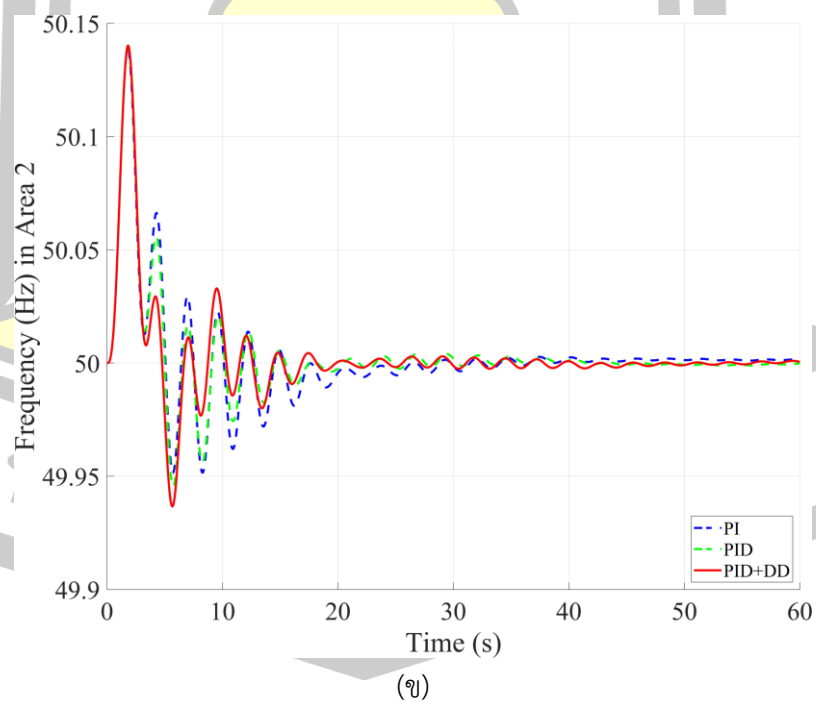
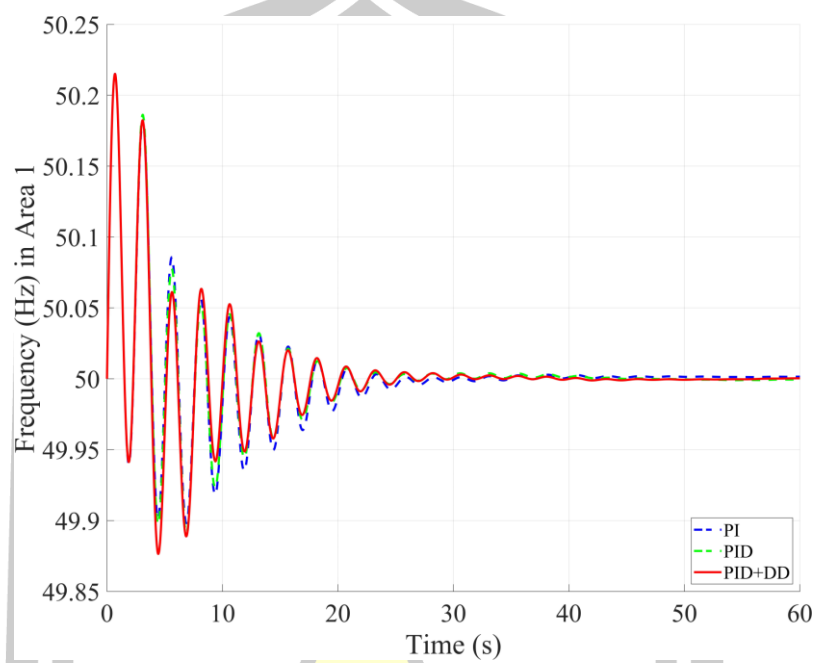
ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.2145	50.1391	50.1044	19.0561	63.5009	96.1156
	Undershoot	49.8808	49.9459	49.9736	-142.8668	-51.0418	-17.0647
	Settling time	23.3397	13.8194	15.6944	27.8488	11.9309	4.6398
	ITAE	25.5072					
PID	Overshoot	50.2149	50.1393	50.1038	35.2563	63.4280	96.0669
	Undershoot	49.8588	49.9270	49.9648	-143.0781	-56.2325	-30.3429
	Settling time	28.5581	16.3000	22.3697	23.1468	12.0139	4.3000
	ITAE	28.2478					
PI	Overshoot	50.2146	50.1392	50.1057	21.5090	68.0561	96.5969
	Undershoot	49.8721	49.9381	49.9658	-143.0661	-51.5155	-18.6591
	Settling time	25.7240	13.8000	15.7587	27.8163	11.9309	4.6199
	ITAE	26.0160					

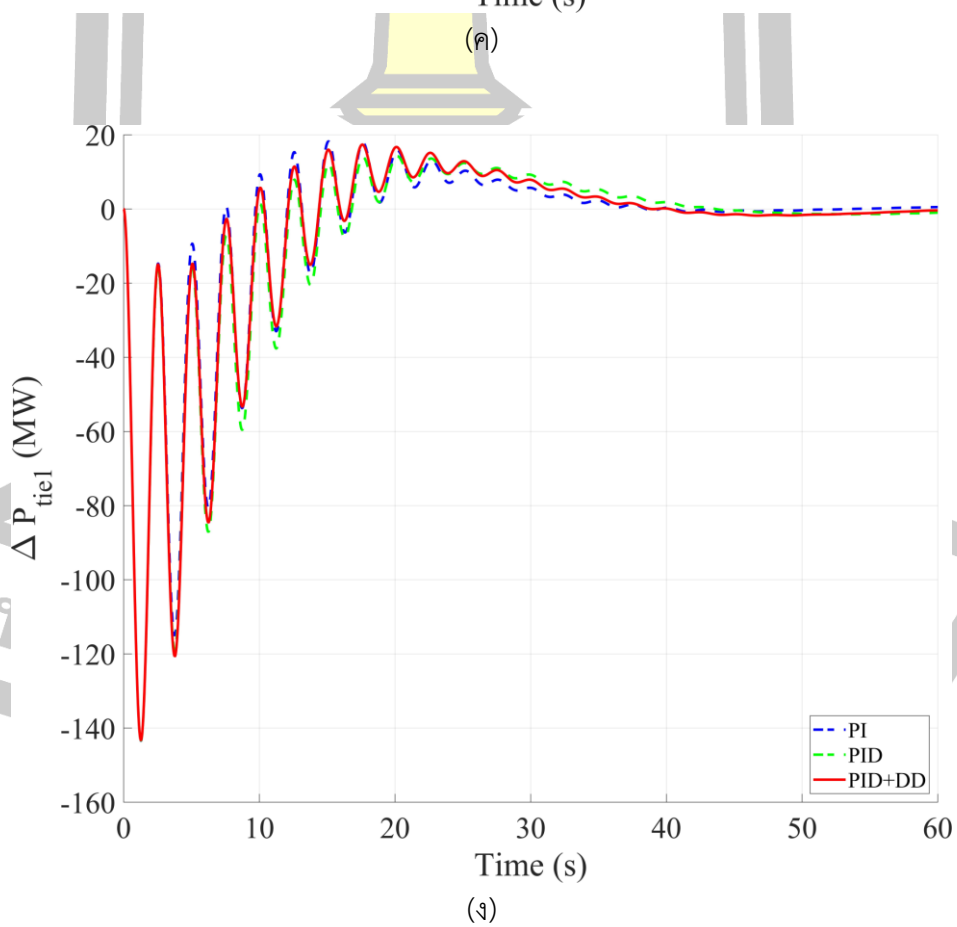
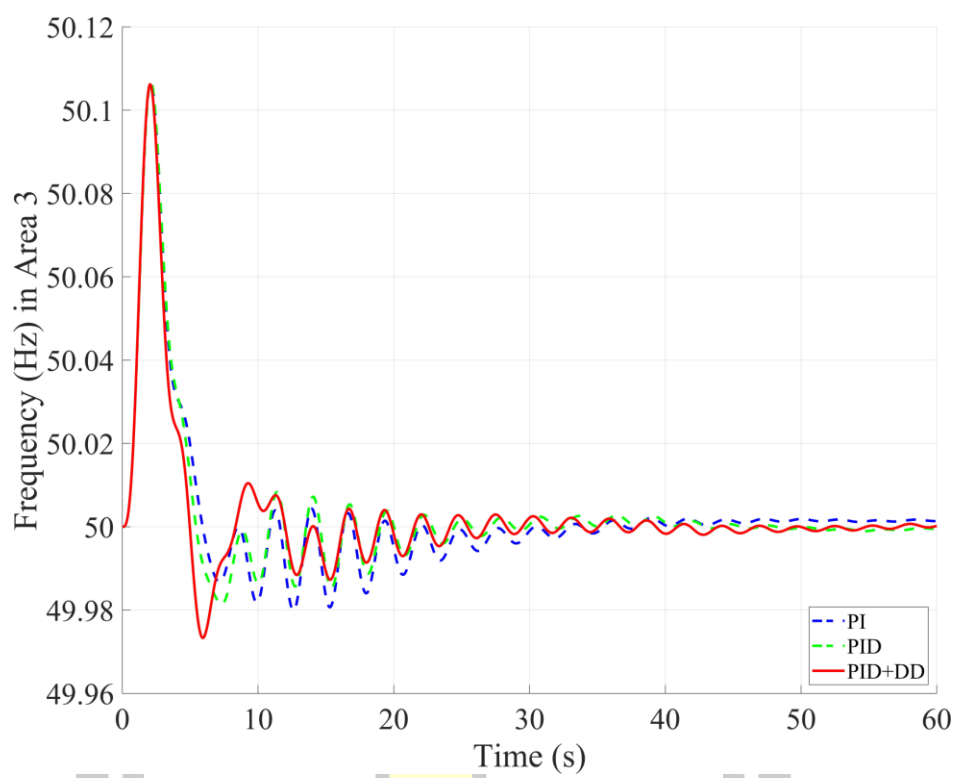
ตาราง 4 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 2

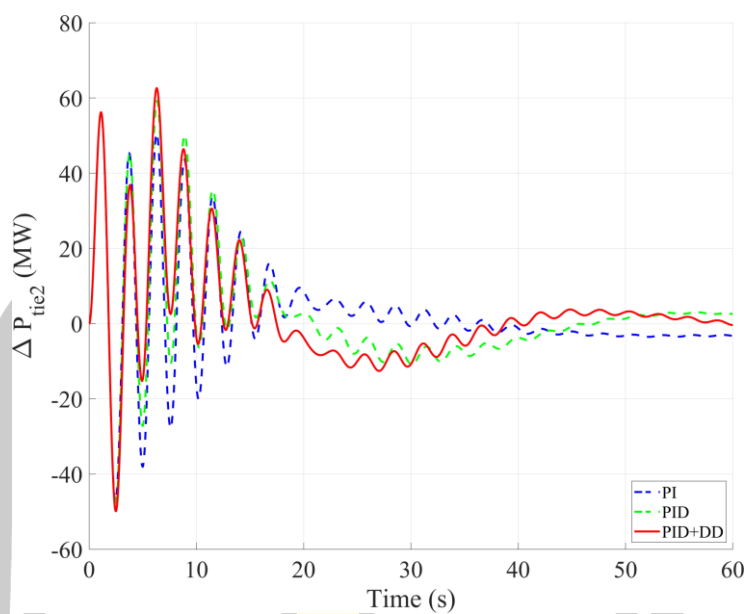
ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.0908	50.0563	50.0419	4.5818	25.6945	36.7097
	Undershoot	49.9462	49.9805	49.9884	-55.8819	-22.5097	-5.0278
	Settling time	81.1000	77.8490	78.8000	87.0490	78.8000	63.6467
	ITAE	88.0654					
PID	Overshoot	50.0910	50.0566	50.0419	7.1601	25.9306	36.7206
	Undershoot	49.9417	49.9759	49.9865	-56.0374	-23.1340	-7.0392
	Settling time	81.4000	77.5510	78.7510	84.5000	78.3000	64.9000
	ITAE	89.0791					
PI	Overshoot	50.0945	50.0609	50.0450	5.2397	25.4599	39.1433
	Undershoot	49.9507	49.9801	49.9902	-59.1707	-23.7012	-7.3825
	Settling time	85.4490	79.7000	78.9510	87.9000	83.3510	67.7268
	ITAE	89.8899					

4.1.2 ฟังก์ชัน ITSE

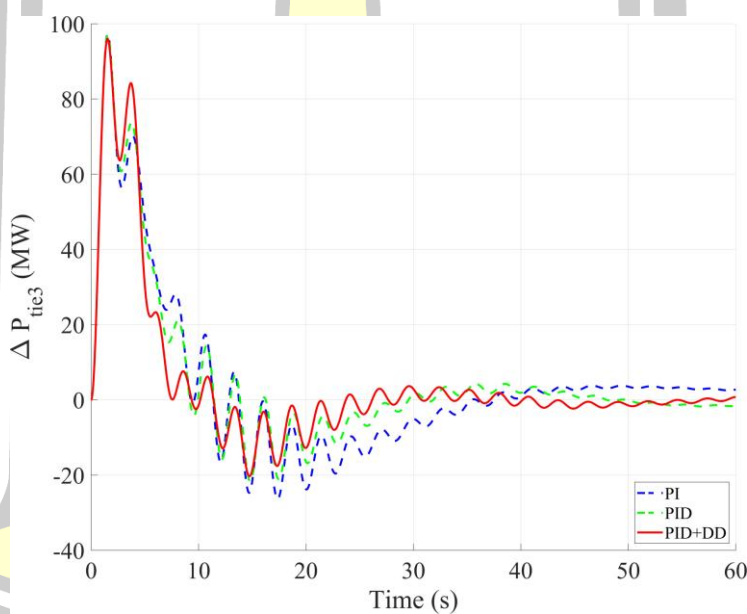
กรณีศึกษาที่ 1







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 22 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

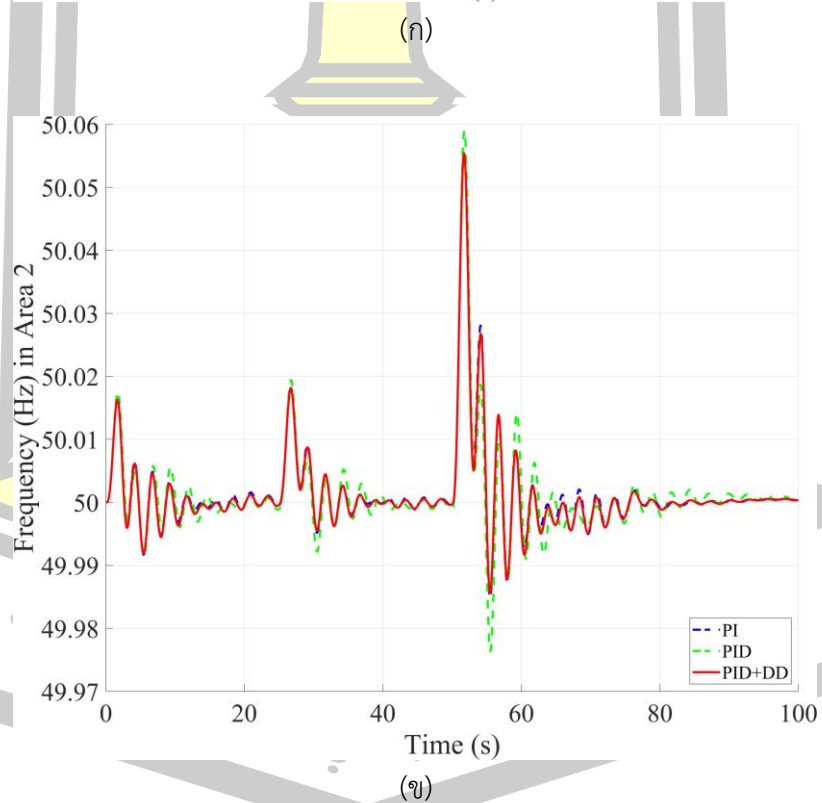
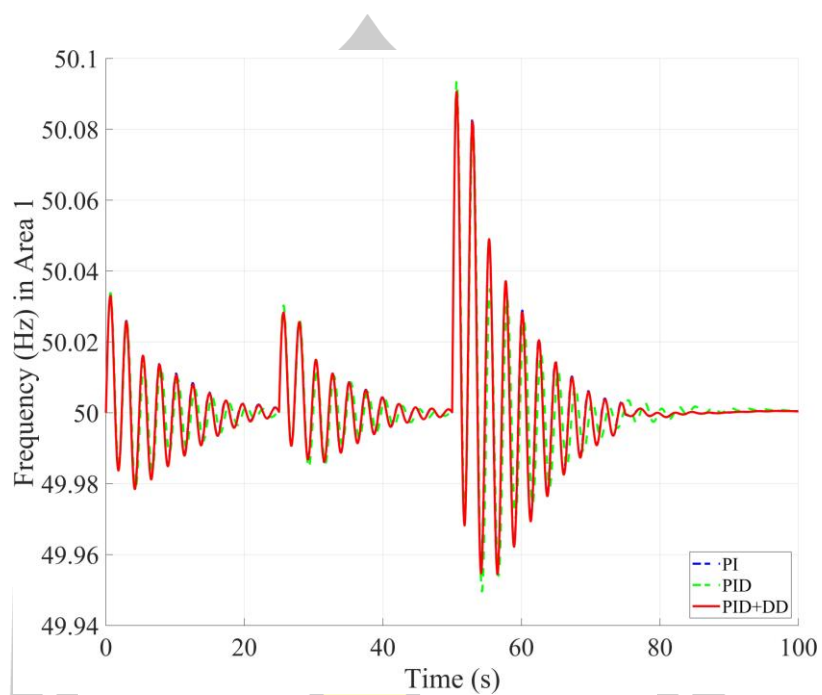
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

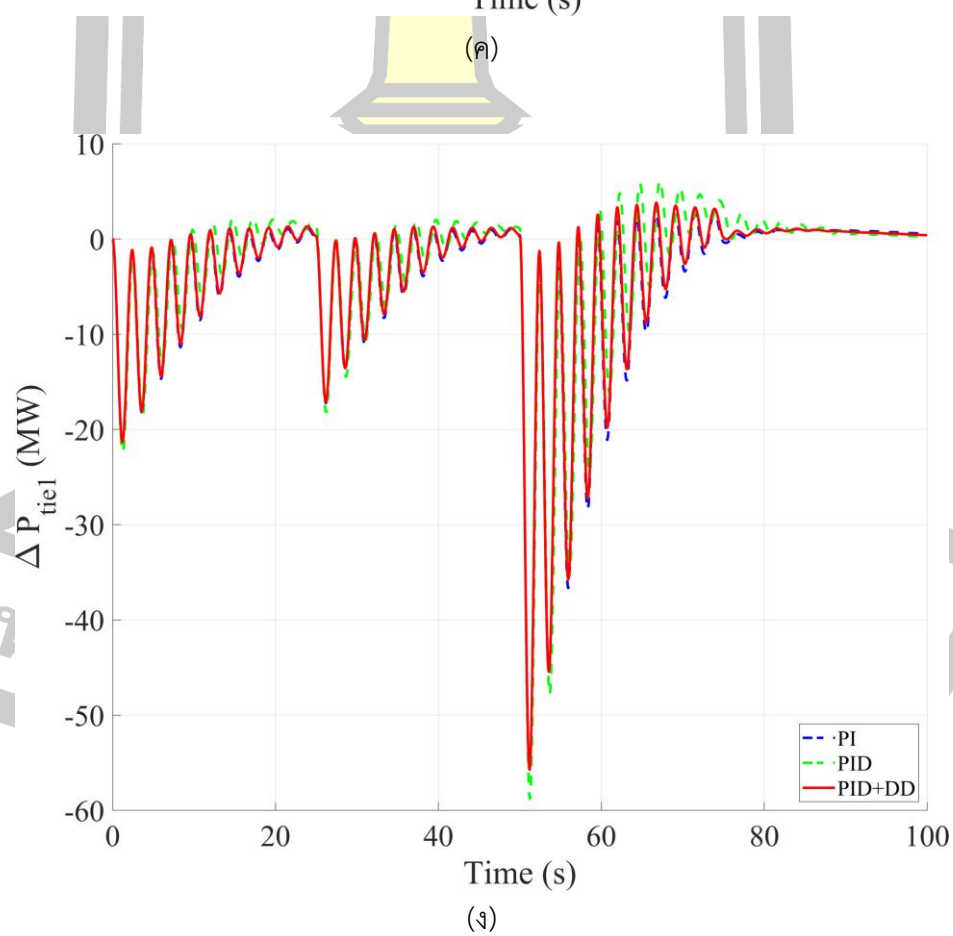
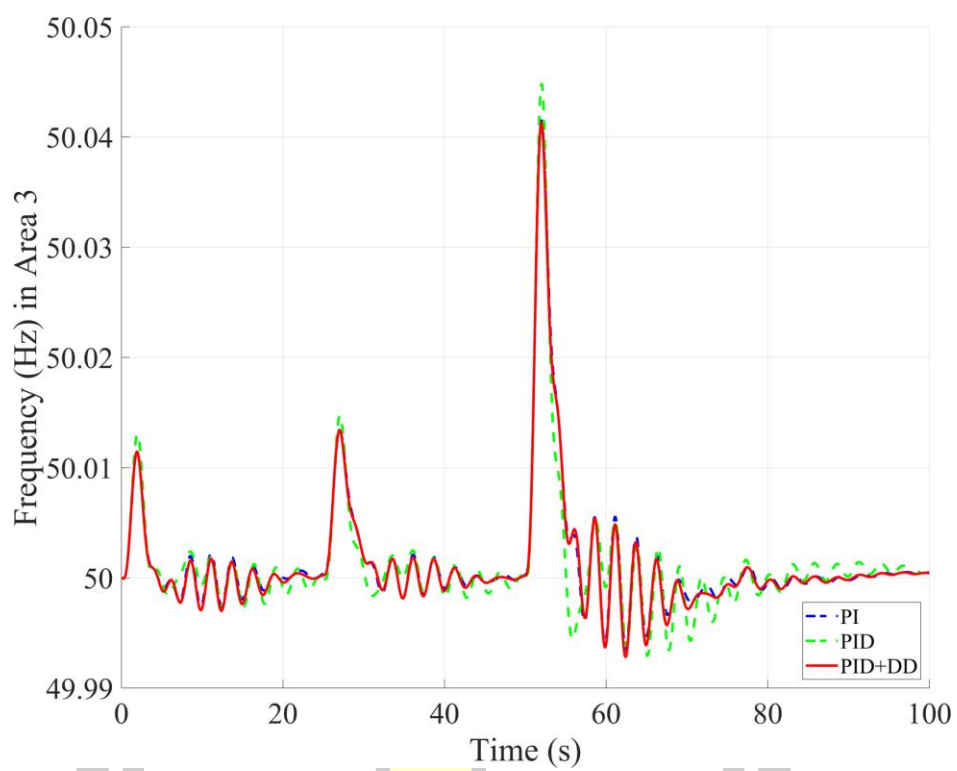
(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

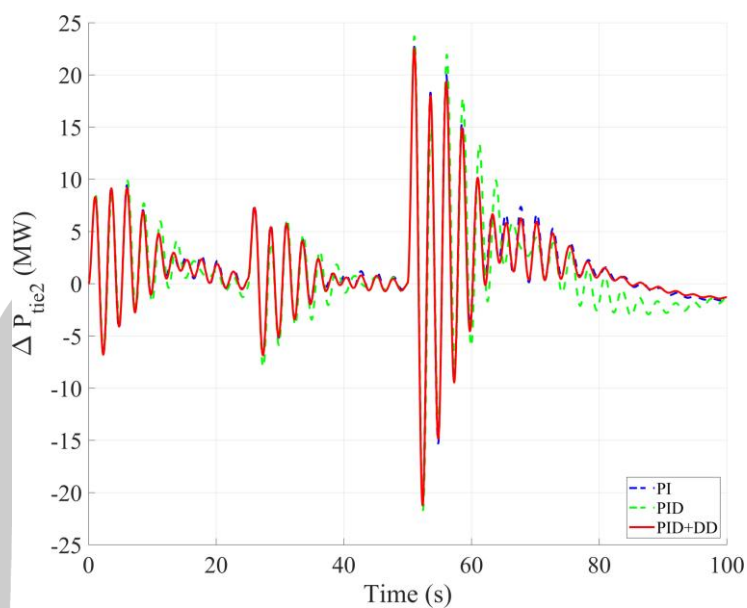
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

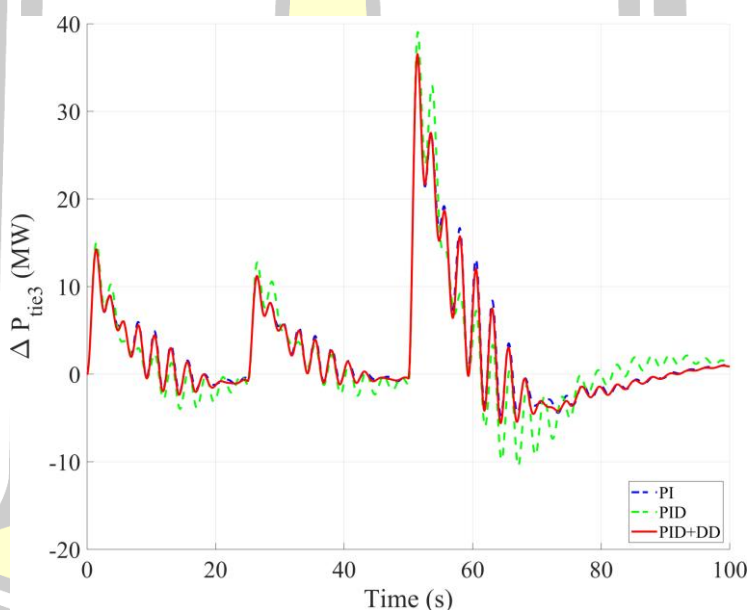
กรณีศึกษาที่ 2







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 23 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2

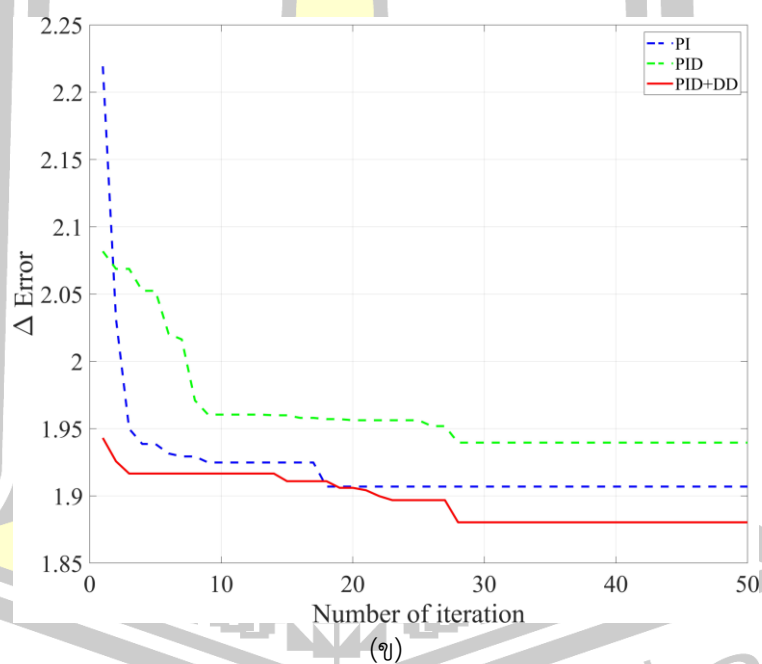
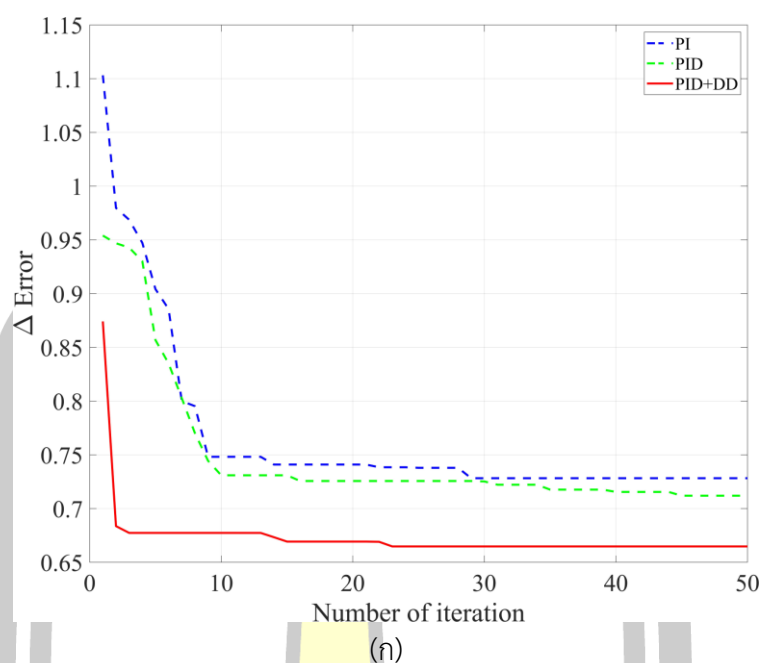
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 24 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITSE
(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1

ชนิดตัวควบคุม	K_{PI}	K_I	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.0008	0.2261	0.9624	0.9922	0.0117	0.9288	0.9919	0.9949	0.9921	0.1930	0.2194
PID	0.0208	0.2060	0.0089	-	0.1155	0.6211	-	0.8287	0.4410	0.8419	-
PI	0.0033	0.2341	-	-	0.0250	0.1558	-	0.8266	0.3299	-	-

ตาราง 6 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2

ชนิดตัวควบคุม	K_{PI}	K_I	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.4162	0.1863	0.8070	0.9386	0.1058	0.2304	0.9774	0.9870	0.2477	0.3617	0.0553
PID	0.1873	0.2107	0.6485	-	0.0260	0.3816	-	0.9388	0.8695	0.1781	-
PI	0.4367	0.1694	-	-	0.1151	0.2502	-	0.8587	0.2834	-	-

ตาราง 7 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1

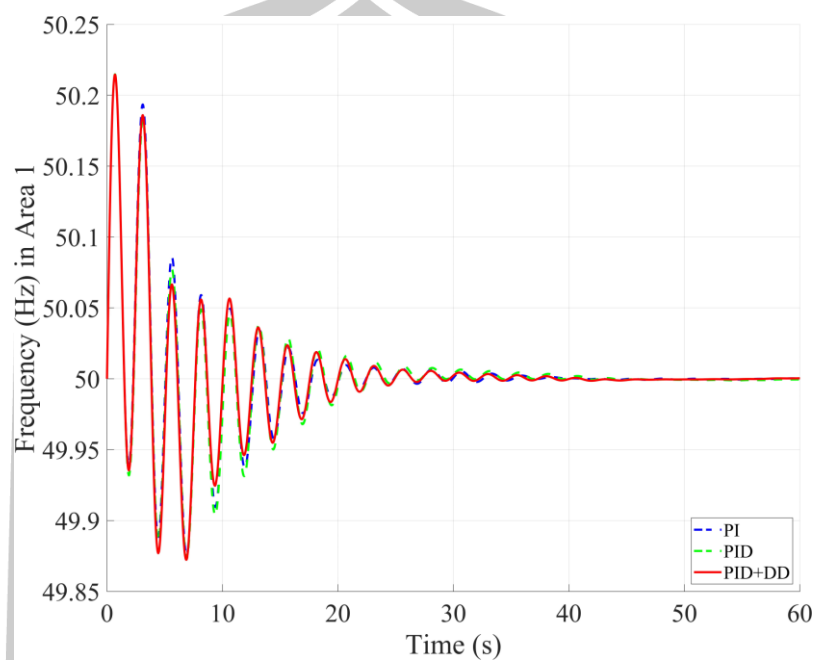
ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.2150	50.1402	50.1062	17.3819	62.6236	96.0303
	Undershoot	49.8765	49.9367	49.9733	-143.2181	-49.8591	-20.3082
	Settling time	19.8000	13.9662	15.6529	27.8457	14.2351	4.7485
	ITAE	0.6648					
PID	Overshoot	50.2149	50.1396	50.1068	14.2466	59.2278	96.9148
	Undershoot	49.8912	49.9454	49.9814	-143.3094	-48.3030	-21.6334
	Settling time	19.9000	14.0675	18.3000	28.0487	14.4311	5.1445
	ITAE	0.7120					
PI	Overshoot	50.2151	50.1386	50.1067	18.2304	55.9015	97.2114
	Undershoot	49.8982	49.9516	49.9799	-143.3725	-47.2139	-26.3471
	Settling time	22.4000	19.2000	20.9489	25.4223	14.4311	5.4778
	ITAE	0.7283					

ตาราง 8 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2

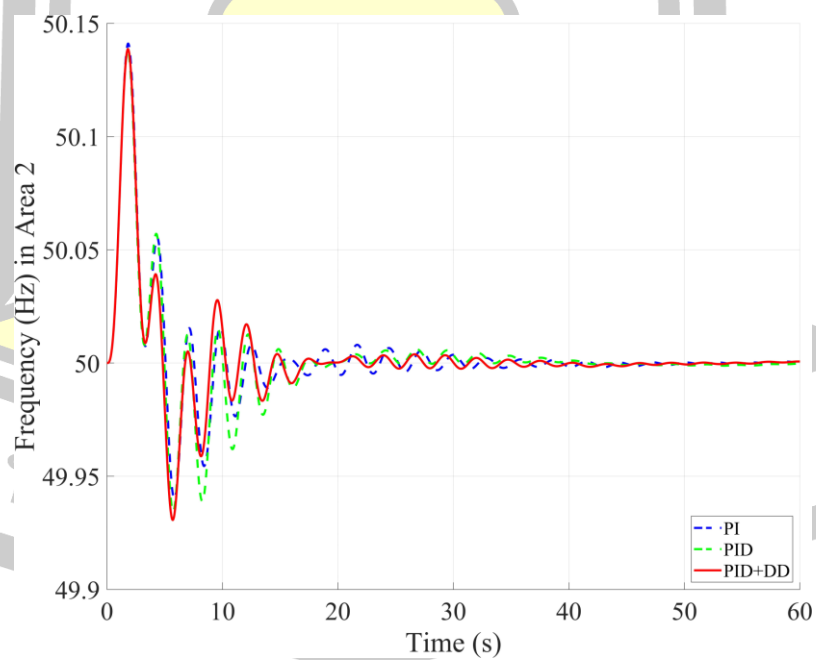
ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.0906	50.0554	50.0413	3.8066	22.5320	36.5228
	Undershoot	49.9546	49.9856	49.9928	-55.7140	-21.2230	-5.5907
	Settling time	81.2000	80.5494	81.7494	84.5494	78.3494	73.6506
	ITAE	0.6648					
PID	Overshoot	50.0935	50.0590	50.0448	6.0664	23.6968	39.0462
	Undershoot	49.9496	49.9764	49.9929	-58.7694	-21.6841	-10.4839
	Settling time	93.2000	95.7000	97.0506	87.5000	96.6506	75.6000
	ITAE	0.7120					
PI	Overshoot	50.0904	50.0553	50.0415	2.6836	22.6985	36.4207
	Undershoot	49.9544	49.9848	49.9935	-55.7297	-20.8373	-4.7590
	Settling time	81.3000	80.8000	82.0506	84.5000	78.6506	73.7000
	ITAE	0.7283					

4.1.3 ฟังก์ชัน IAE

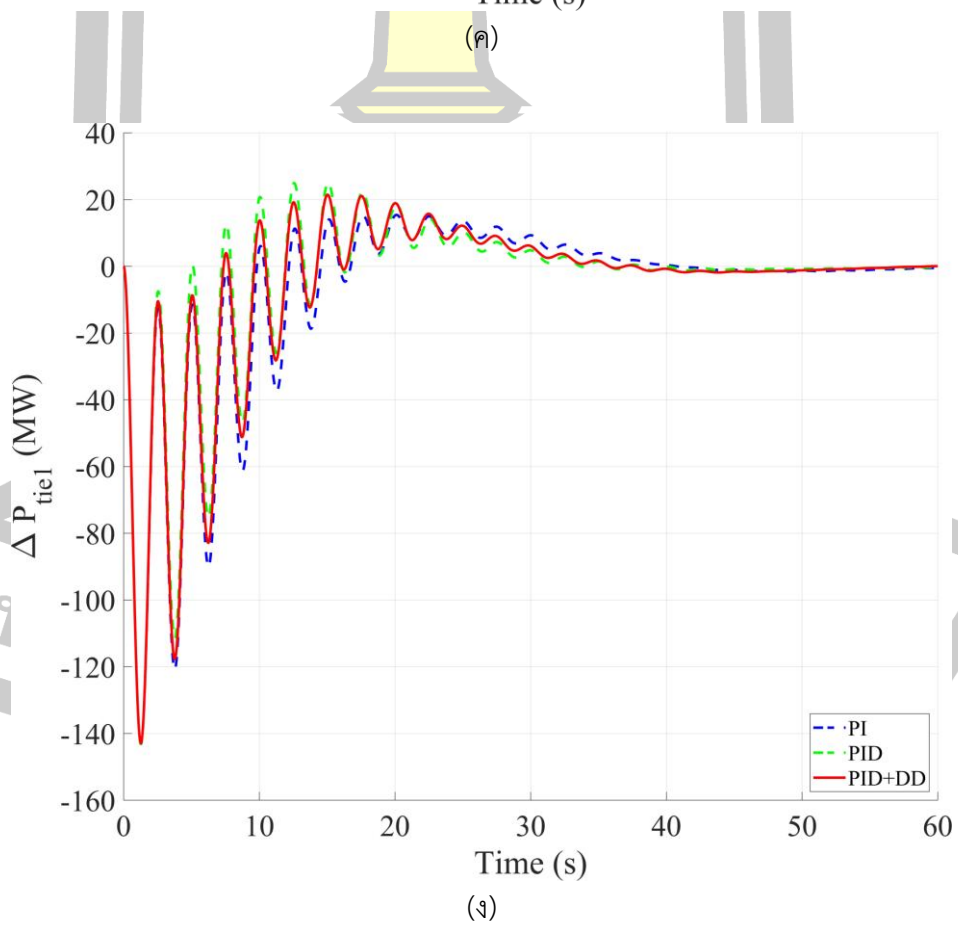
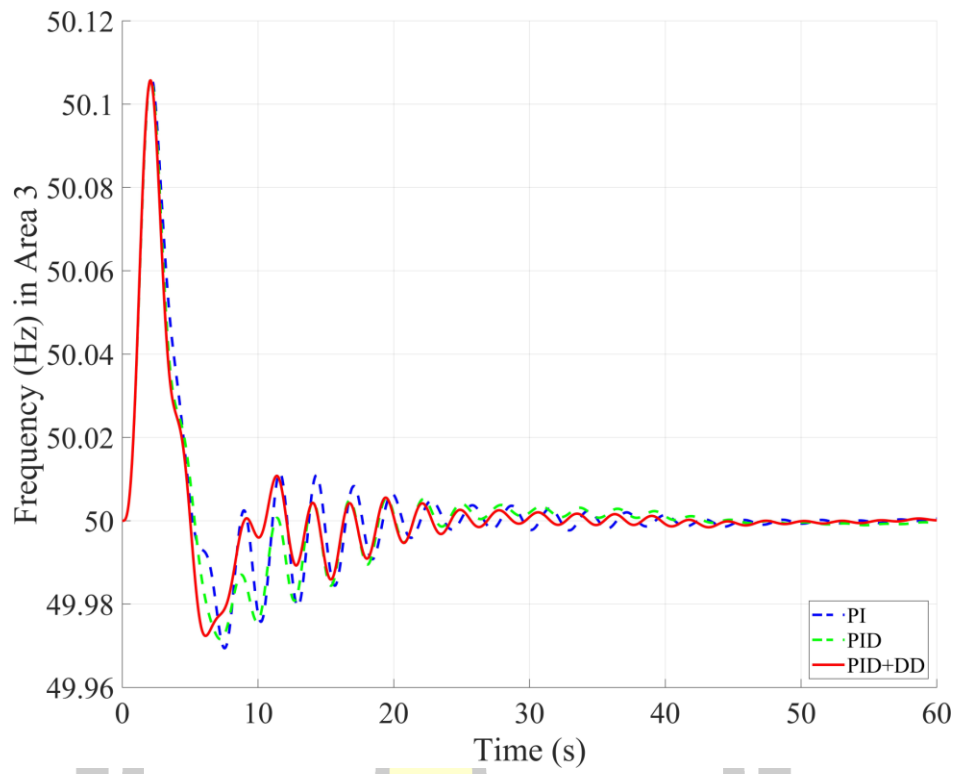
กรณีศึกษาที่ 1

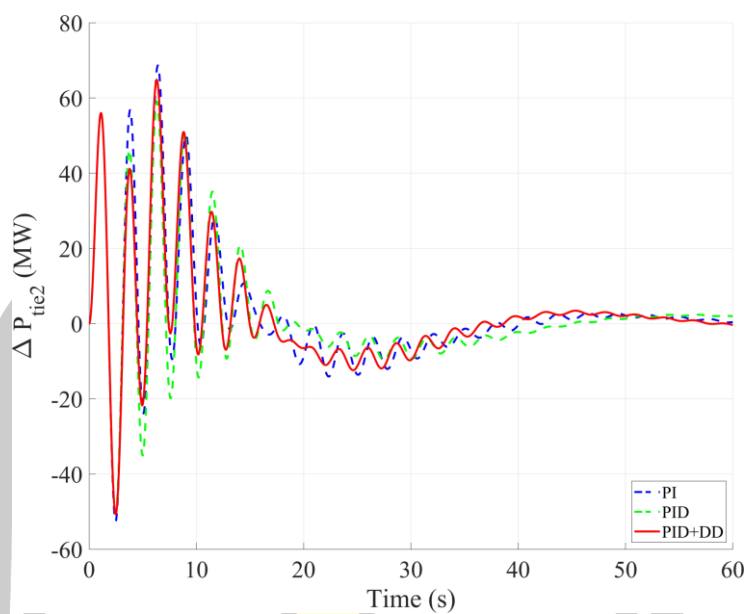


(ก)

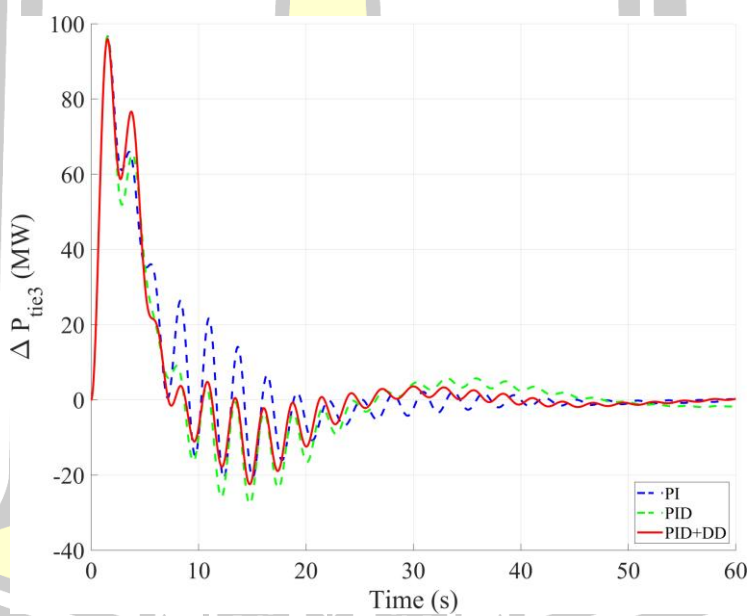


(ข)





(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 25 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรตซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรตซ์)

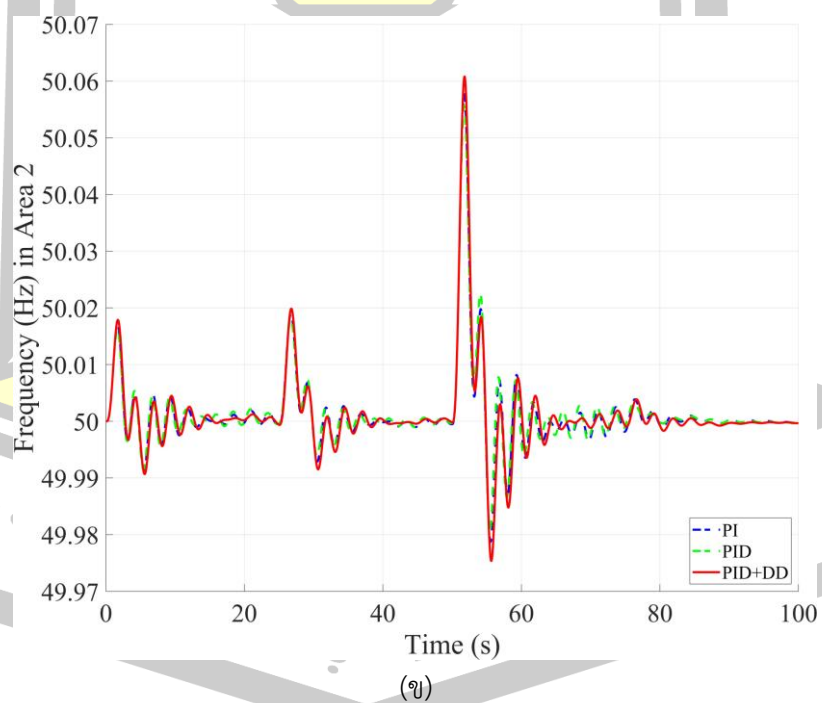
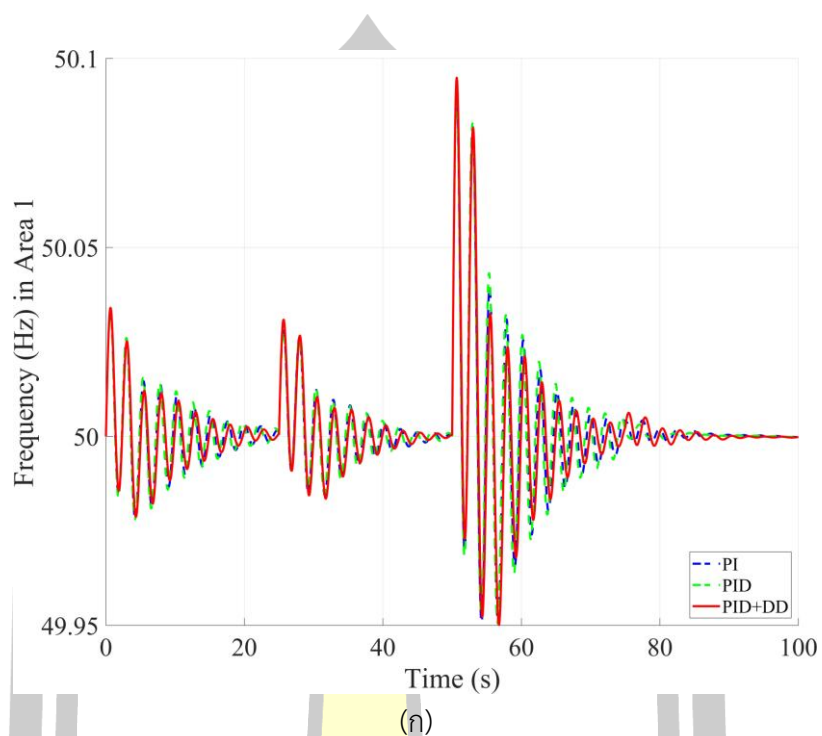
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรตซ์)

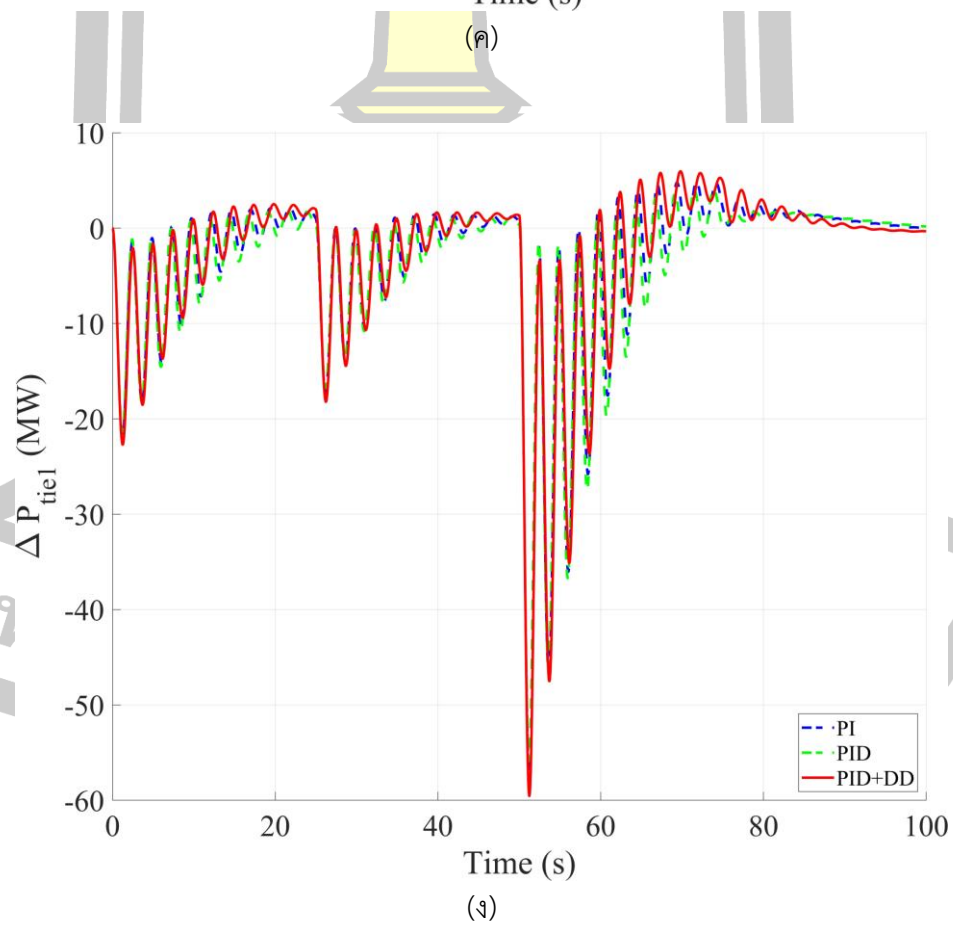
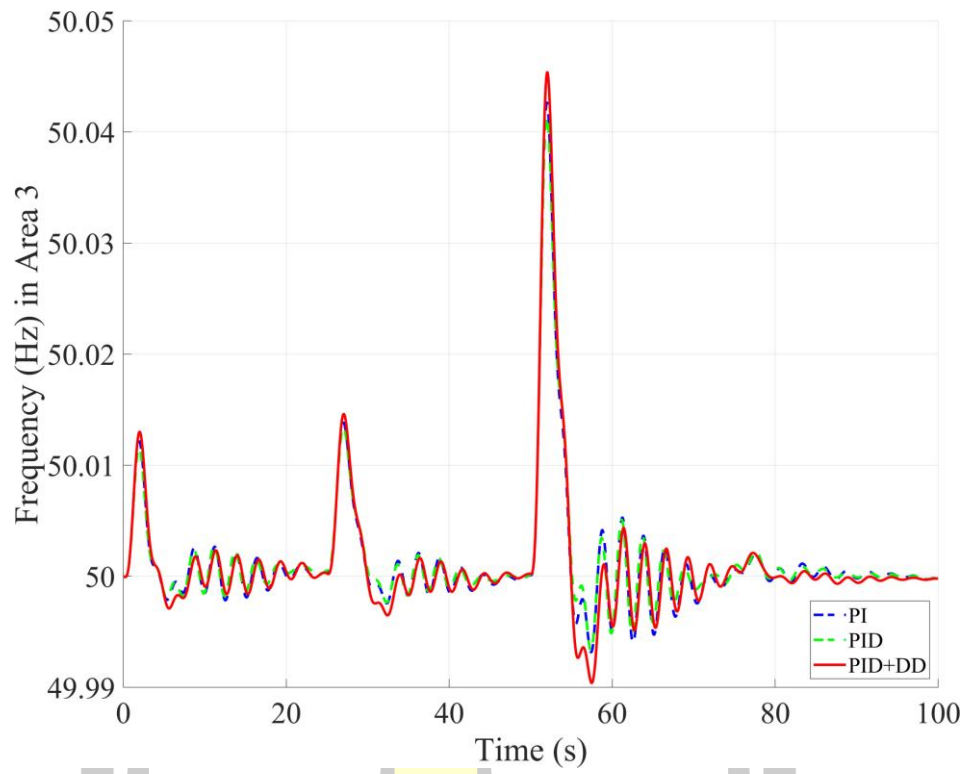
(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

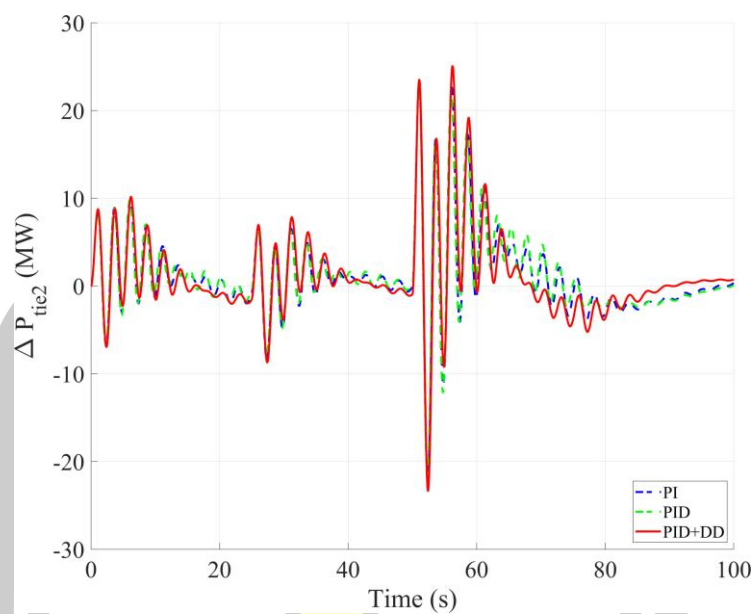
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

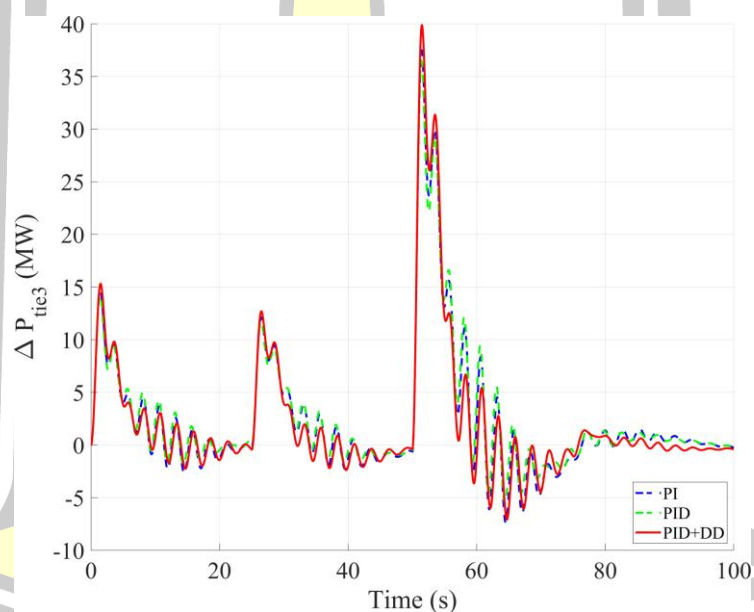
กรณีศึกษาที่ 2







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 26 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 2

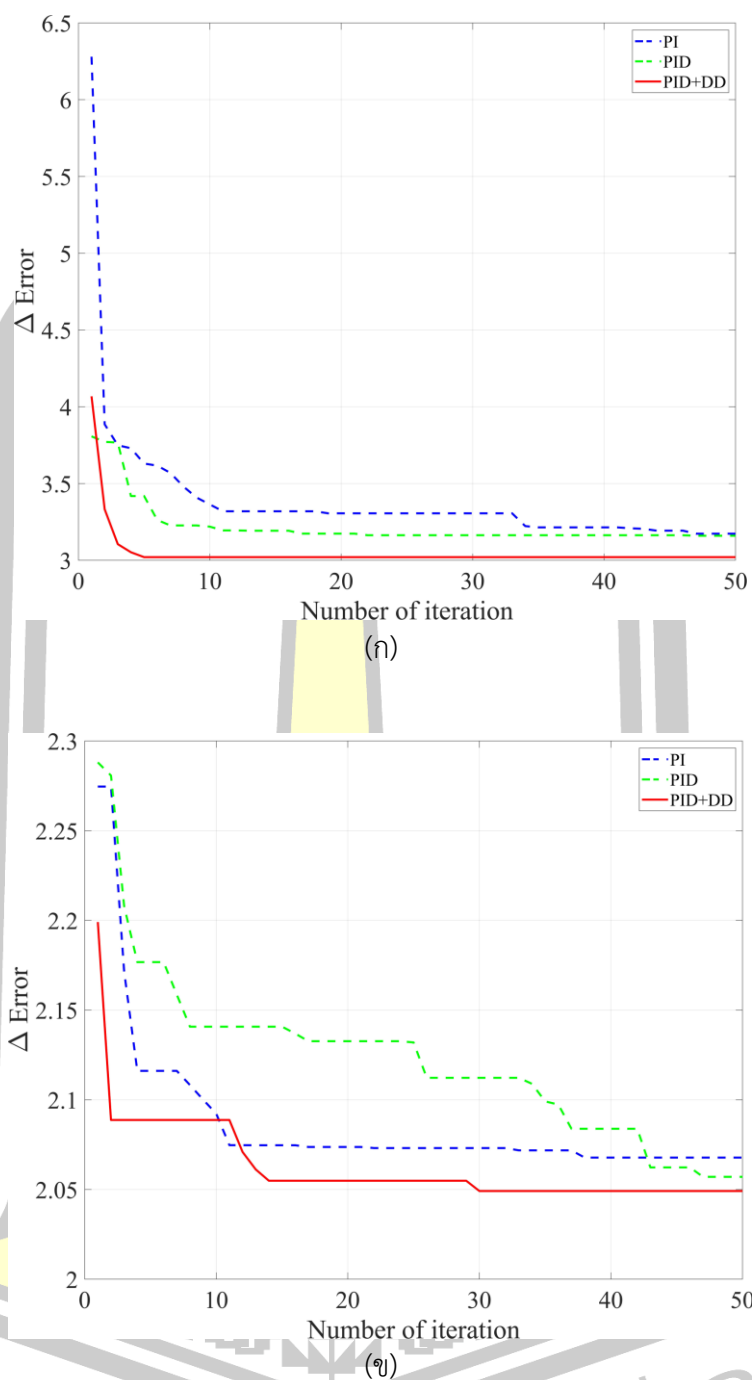
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 27 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE
(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 1

ชนิดตัวควบคุม	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.0649	0.2721	0.1879	0.0803	0.0252	0.9240	0.2990	0.0836	0.8763	0.6969	0.0323	0.5626
PID	0.0173	0.2366	0.9502	-	0.2524	0.8534	0.3045	-	0.9762	0.7717	0.3146	-
PI	0.1056	0.2018	-	-	0.2026	0.9080	-	-	0.8989	0.3922	-	-

ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 2

ชนิดตัวควบคุม	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.1283	0.2155	0.9700	0.7996	0.1369	0.9006	0.7912	0.3120	0.9855	0.4768	0.6615	0.8416
PID	0.4218	0.1808	0.3569	-	0.0833	0.6311	0.2635	-	0.9202	0.4356	0.6777	-
PI	0.3144	0.2003	-	-	0.1854	0.6443	-	-	0.9966	0.5270	-	-

ตาราง 11 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 1

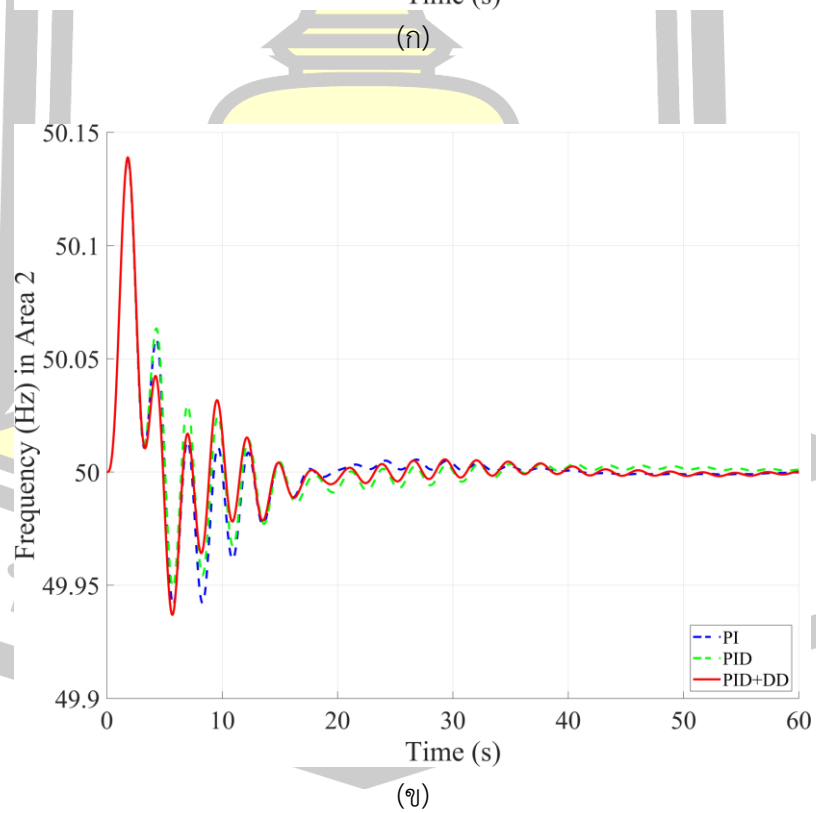
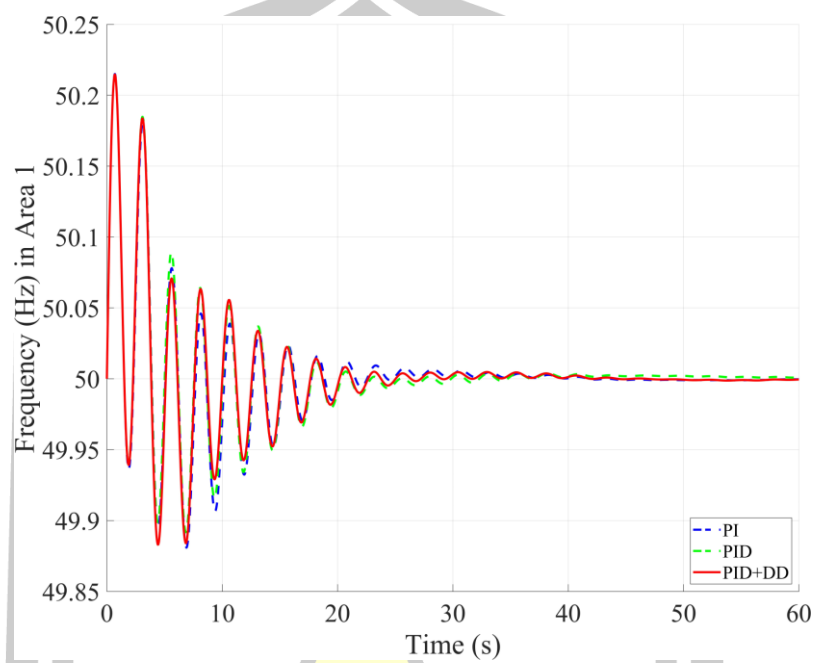
ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.2145	50.1387	50.1056	22.0580	64.6193	95.9289
	Undershoot	49.8728	49.9306	49.9721	-142.8240	-50.3553	-22.7786
	Settling time	23.1515	13.9116	15.7330	25.5000	11.8393	4.7409
	ITAE	3.0207					
PID	Overshoot	50.2149	50.1409	50.1058	18.4829	63.5178	96.0417
	Undershoot	49.8759	49.9358	49.9778	-143.1487	-51.3948	-24.7670
	Settling time	20.8000	14.1402	18.4000	27.7074	12.0186	4.7000
	ITAE	3.0718					
PI	Overshoot	50.2143	50.1394	50.1054	14.4075	64.5743	96.0930
	Undershoot	49.8828	49.9452	49.9773	-142.7218	-49.7437	-15.7748
	Settling time	20.7382	12.4779	15.6000	29.9337	11.9938	4.8626
	ITAE	3.0458					

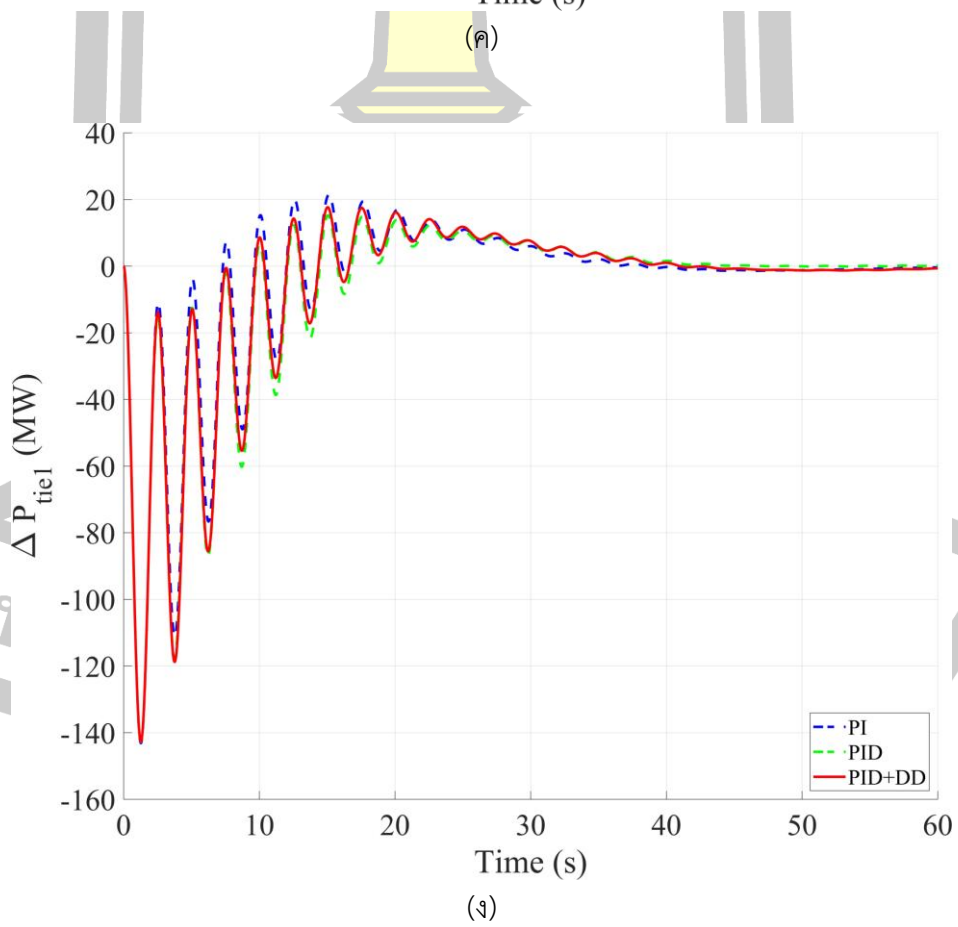
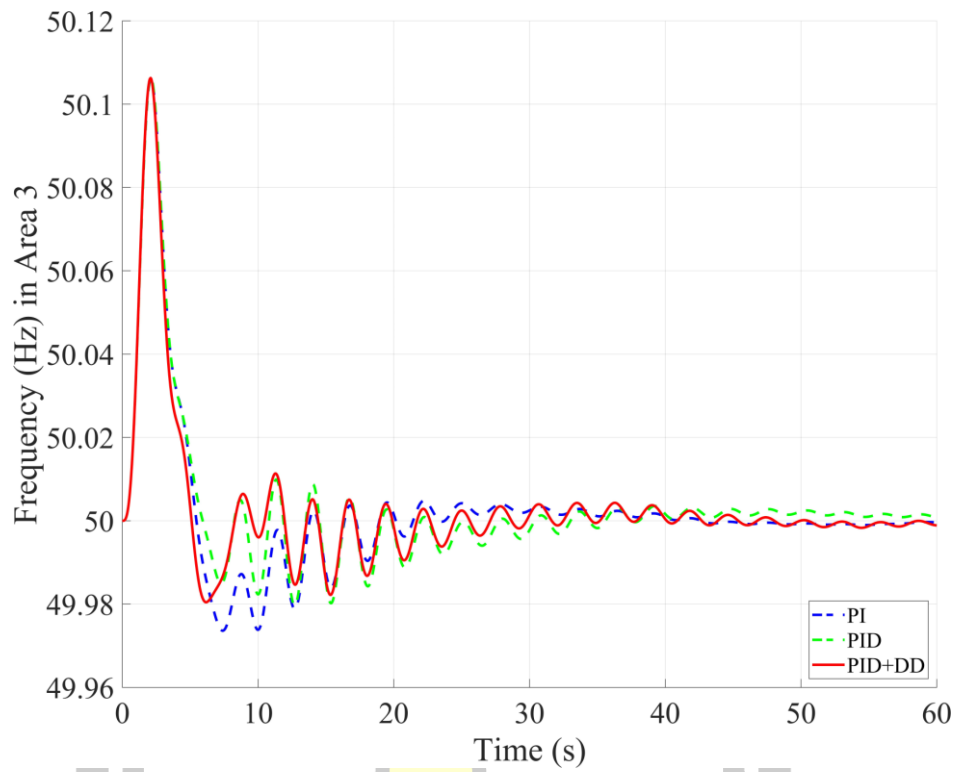
ตาราง 12 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 2

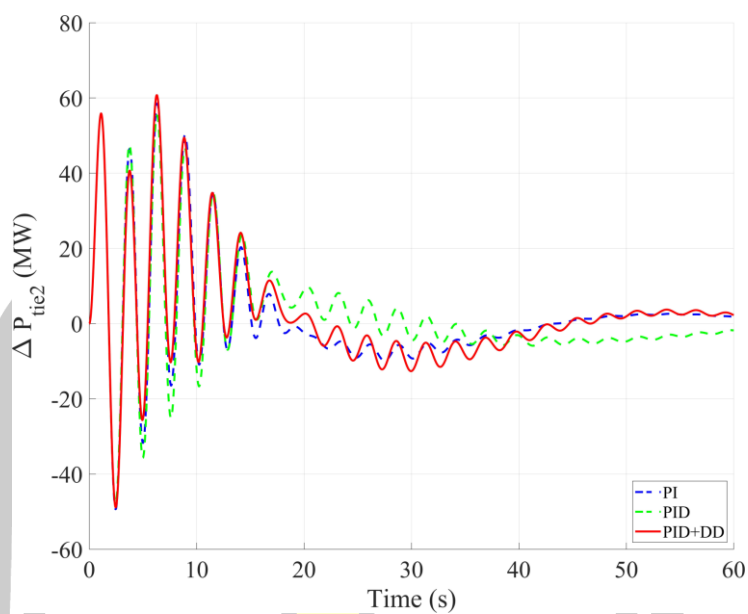
ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.0949	50.0608	50.0454	5.9611	25.0664	39.8664
	Undershoot	49.9501	49.9754	49.9904	-59.5384	-23.3463	-7.0773
	Settling time	85.5505	81.0000	78.3505	85.4000	83.0000	70.2000
	ITAE	2.0492					
PID	Overshoot	50.0908	50.0556	50.0414	4.0754	22.7169	36.4619
	Undershoot	49.9507	49.9810	49.9933	-55.8733	-21.3025	-5.5071
	Settling time	79.7000	79.2000	78.4000	89.5000	88.4495	67.2000
	ITAE	2.0571					
PI	Overshoot	50.0921	50.0577	50.0426	4.8867	23.2514	37.4869
	Undershoot	49.9506	49.9788	49.9932	-57.2103	-22.2706	-7.3722
	Settling time	85.2495	80.5000	83.6000	89.3000	88.2495	70.1458
	ITAE	2.0678					

4.1.4 ฟังก์ชัน ISE

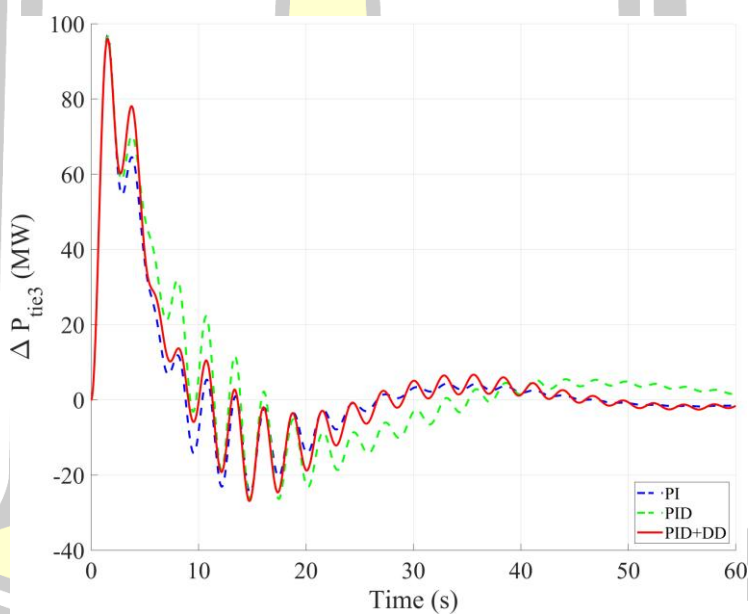
กรณีศึกษาที่ 1







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 28 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรตซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรตซ์)

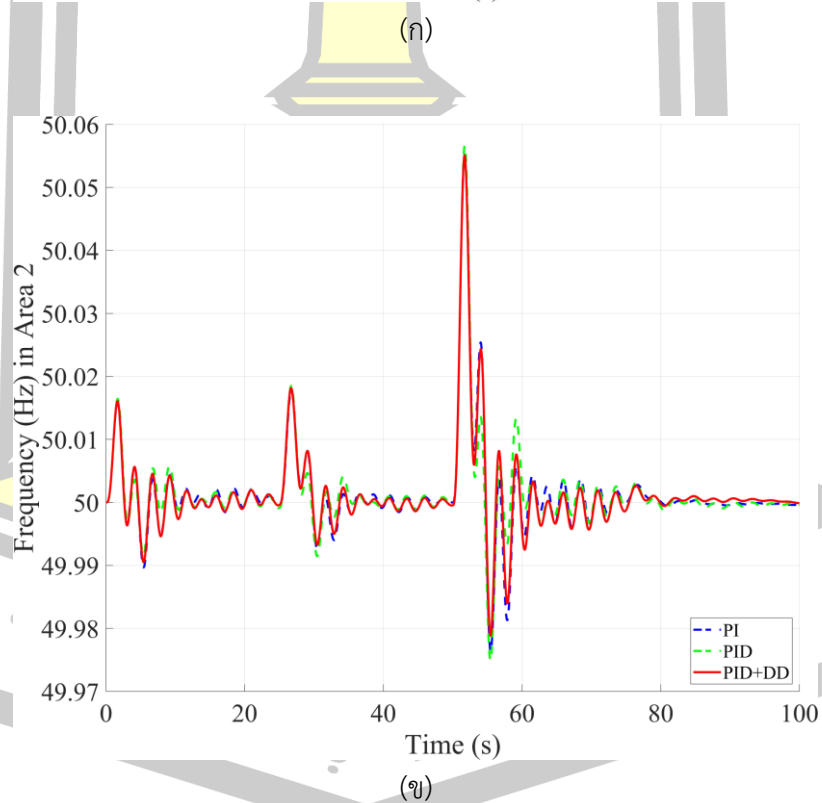
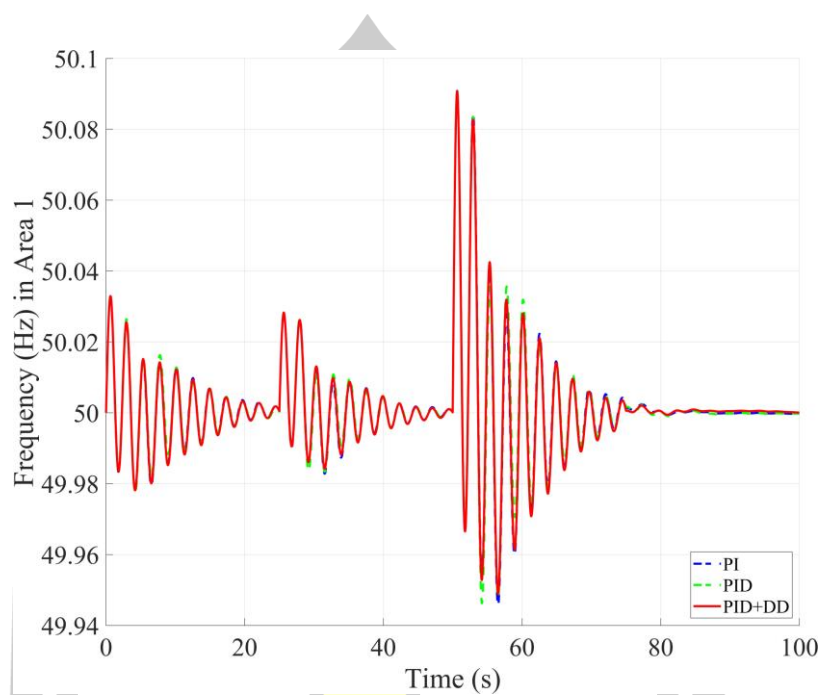
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรตซ์)

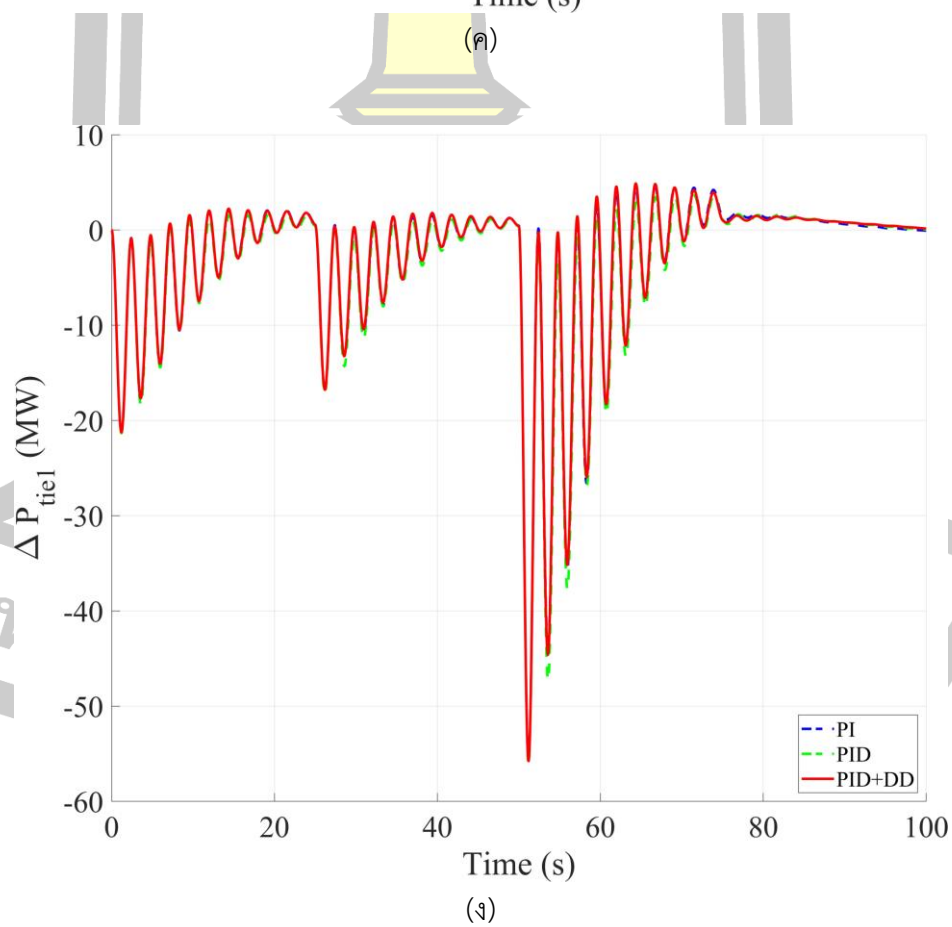
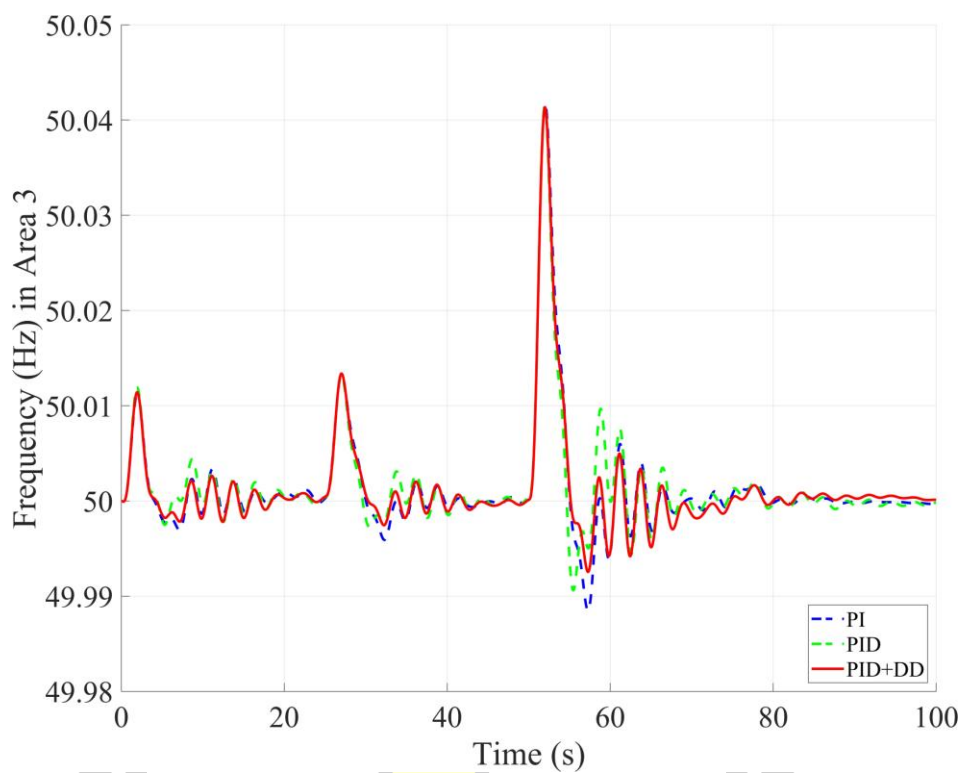
(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

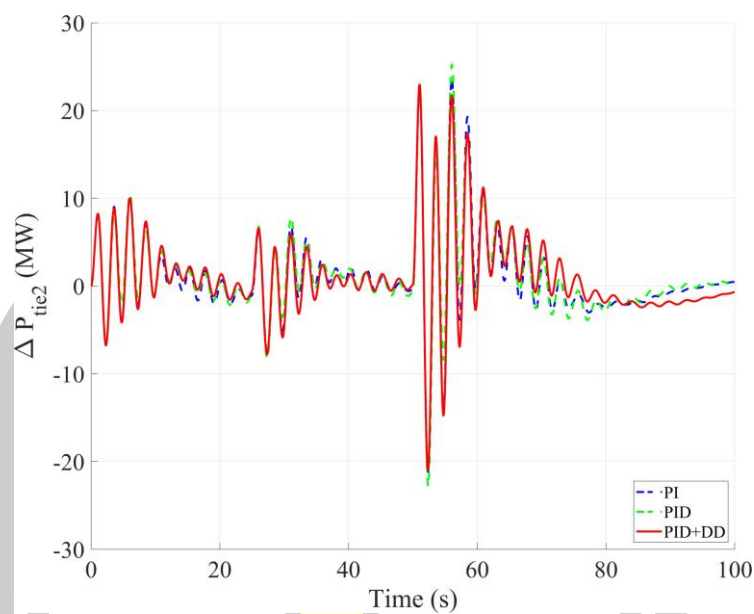
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

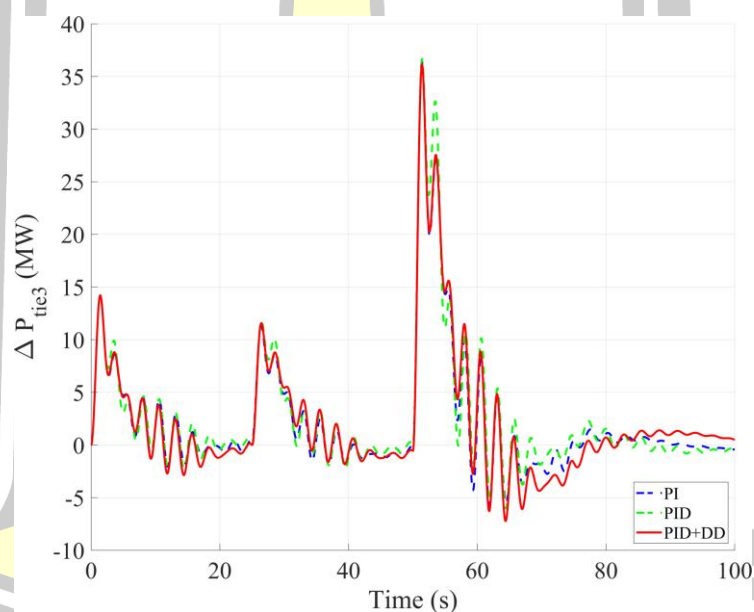
กรณีศึกษาที่ 2







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 29 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 2

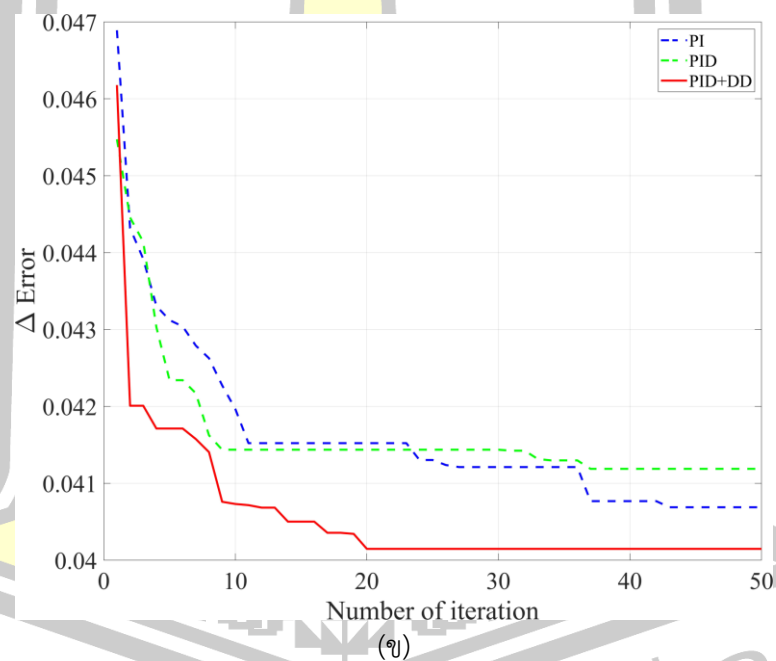
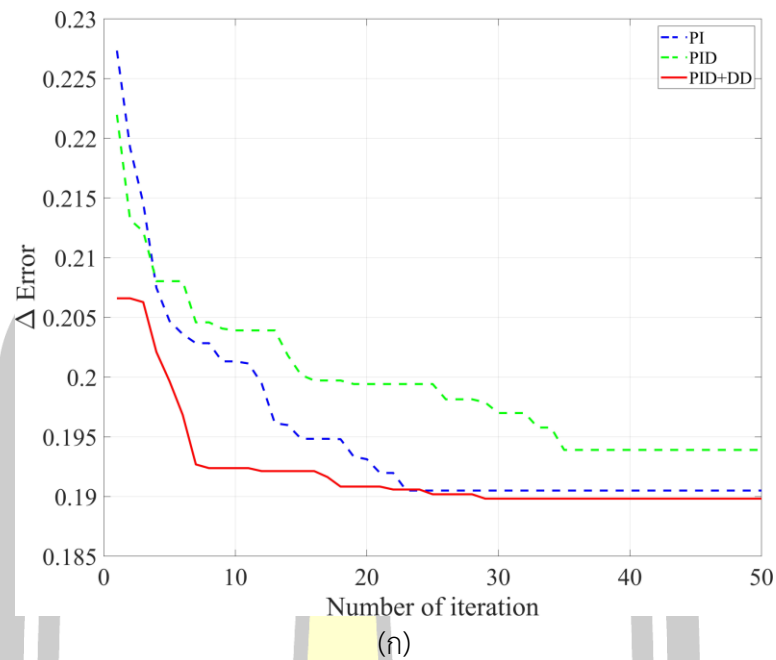
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ ... แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการ
เปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ITAE
(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 13 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 1

ชนิดตัวควบคุม	K_{PI}	K_I	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.0569	0.2358	0.4797	0.4783	0.1046	0.6485	0.4776	0.5043	0.8418	0.7827	0.7564	0.4743
PID	0.0613	0.2175	0.4180	-	0.2112	0.2570	0.2446	-	0.7986	0.3971	0.0970	-
PI	0.0100	0.2815	-	-	0.0566	0.5689	-	-	0.7891	0.2332	-	-

ตาราง 14 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 2

ชนิดตัวควบคุม	K_{PI}	K_I	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
PID+DD (เสนอ)	0.4274	0.2118	0.6992	0.1538	0.0238	0.4731	0.1972	0.1497	0.7628	0.4562	0.5811	0.6301
PID	0.4134	0.1806	0.7661	-	0.2335	0.9653	0.0793	-	0.9334	0.9250	0.3653	-
PI	0.4489	0.2077	-	-	0.0325	0.7461	-	-	0.5833	0.4215	-	-

ตาราง 15 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 1

ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.2145	50.1390	50.1063	17.6829	60.7533	96.0162
	Undershoot	49.8830	49.9370	49.9804	-142.7208	-48.8369	-26.8849
	Settling time	21.9000	16.5000	18.4000	25.6000	14.4417	4.9339
	ITAE	0.1898					
PID	Overshoot	50.2145	50.1388	50.1064	15.2525	55.7932	96.6069
	Undershoot	49.8918	49.9491	49.9796	-142.7861	-47.8963	-26.3427
	Settling time	22.1484	16.9000	21.1000	25.3181	14.5499	5.7701
	ITAE	0.1939					
PI	Overshoot	50.2150	50.1382	50.1061	21.4062	58.5505	96.9054
	Undershoot	49.8809	49.9413	49.9736	-143.1322	-49.3316	-24.6480
	Settling time	21.0516	16.4000	15.8516	25.5478	14.2000	4.8507
	ITAE	0.1905					

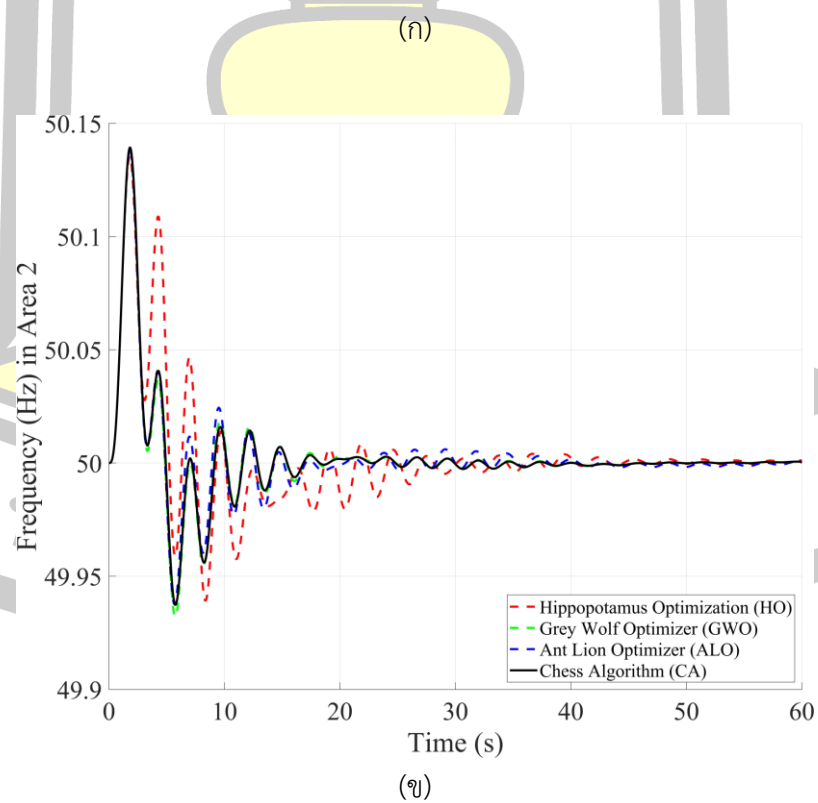
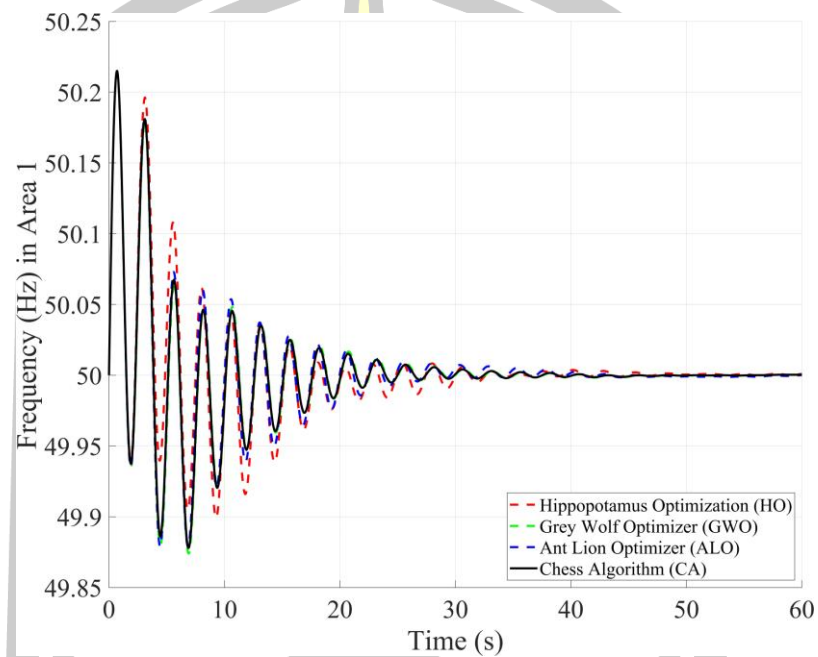
ตาราง 16 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบตัวควบคุมในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 2

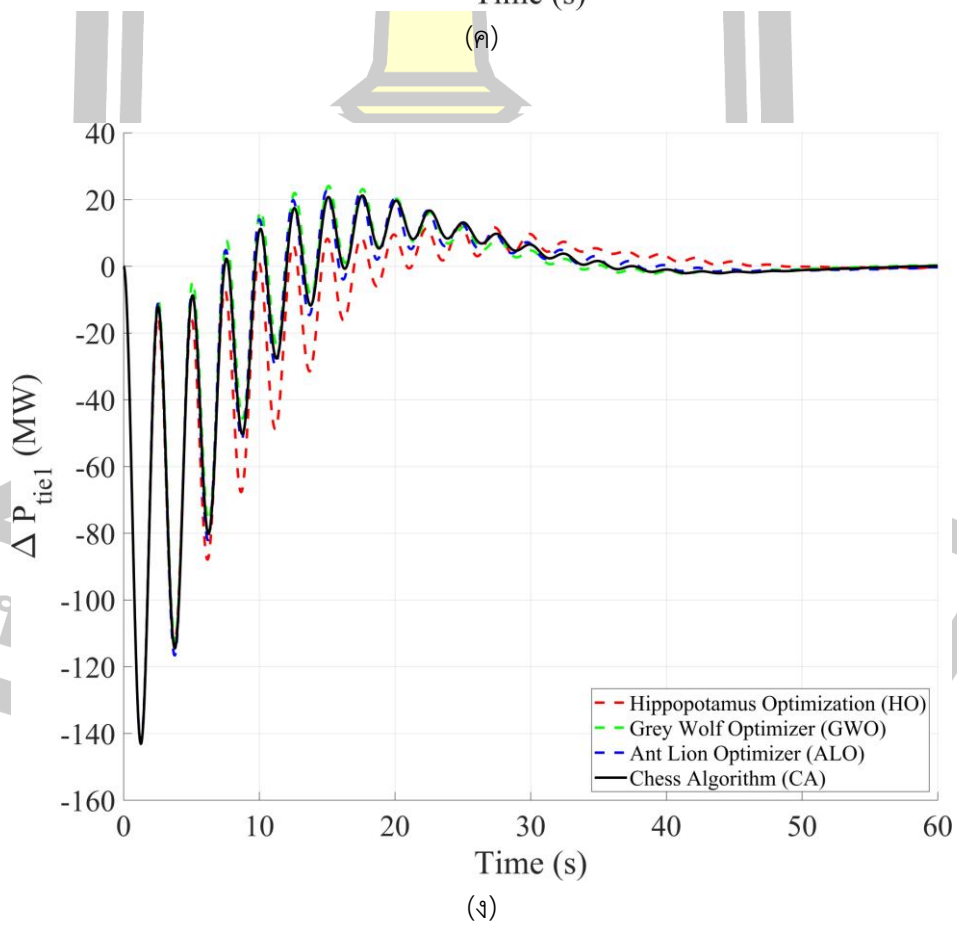
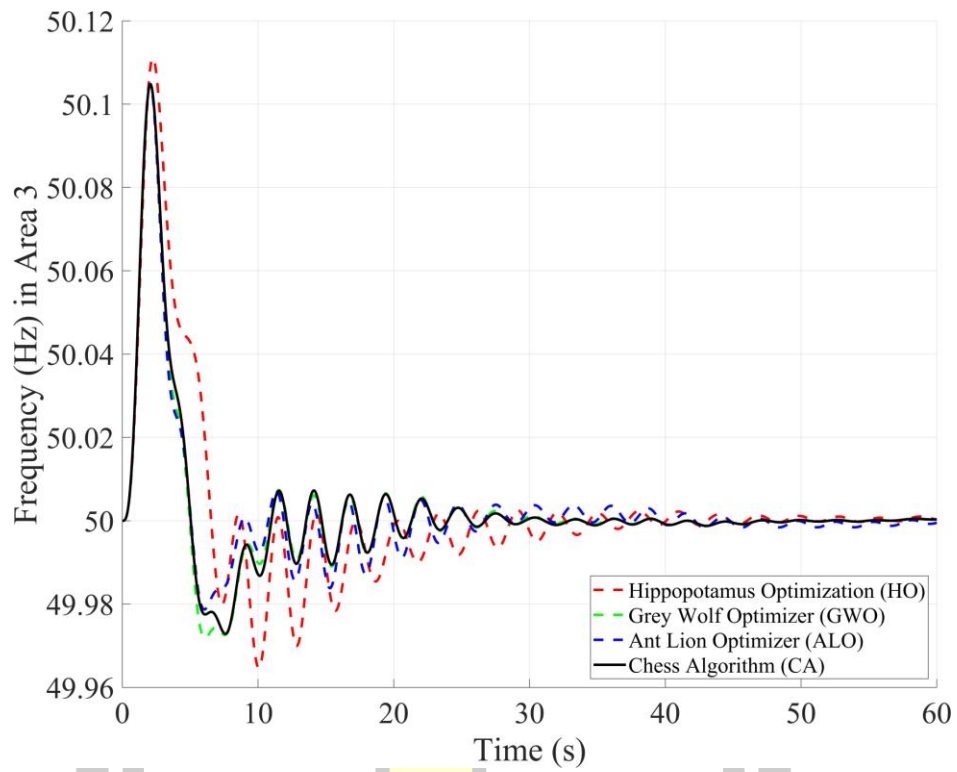
ชนิดตัวควบคุม	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
PID+DD (เสนอ)	Overshoot	50.0907	50.0551	50.0414	4.8924	22.9507	36.1566
	Undershoot	49.9489	49.9788	49.9925	-55.7601	-20.9885	-7.2289
	Settling time	77.9000	79.1000	78.2477	87.2000	91.4477	70.2477
	ITAE	0.0401					
PID	Overshoot	50.0911	50.0566	50.0414	3.6458	25.2352	36.6622
	Undershoot	49.9463	49.9749	49.9906	-56.0584	-22.8449	-6.0223
	Settling time	78.0477	80.9000	83.5000	87.4000	83.1523	64.8517
	ITAE	0.0412					
PI	Overshoot	50.0908	50.0549	50.0418	4.6395	23.7217	36.4011
	Undershoot	49.9455	49.9763	49.9885	-55.6132	-21.2003	-5.8478
	Settling time	78.1523	77.8477	78.7000	86.7523	83.7523	64.8517
	ITAE	0.0407					

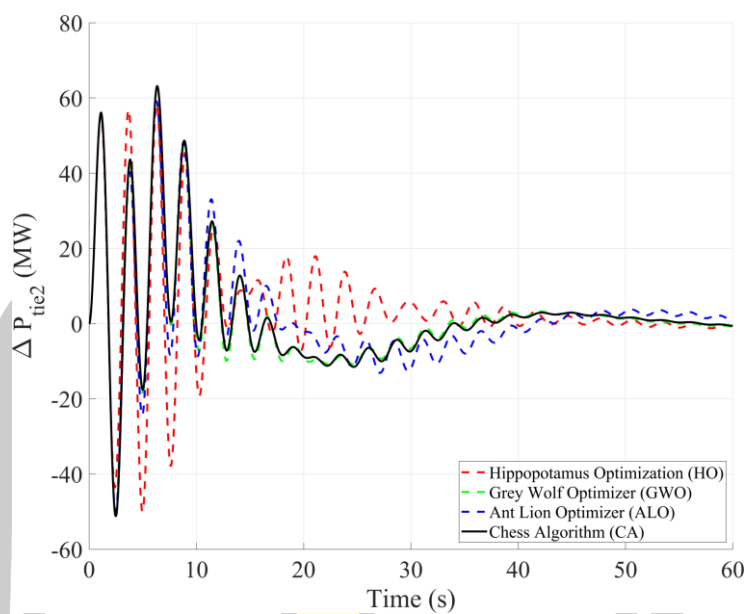
4.2 ผลการทดลองการเปรียบเทียบวิธีการ

4.2.1 ฟังก์ชัน ITAE

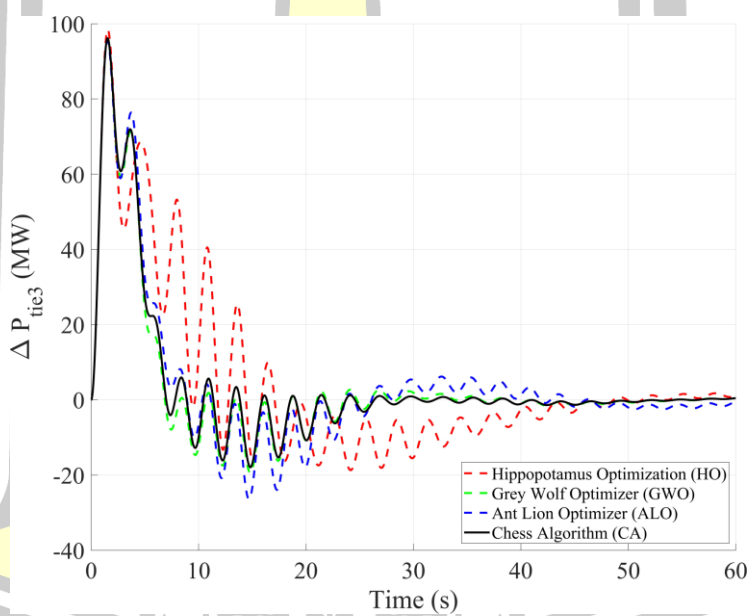
กรณีศึกษาที่ 1







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 30 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

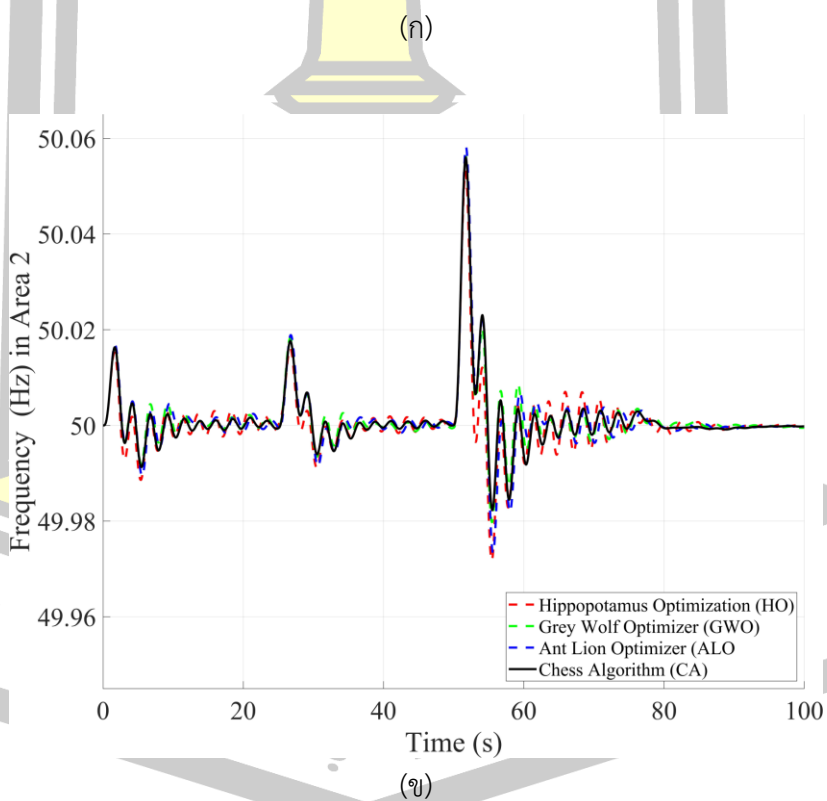
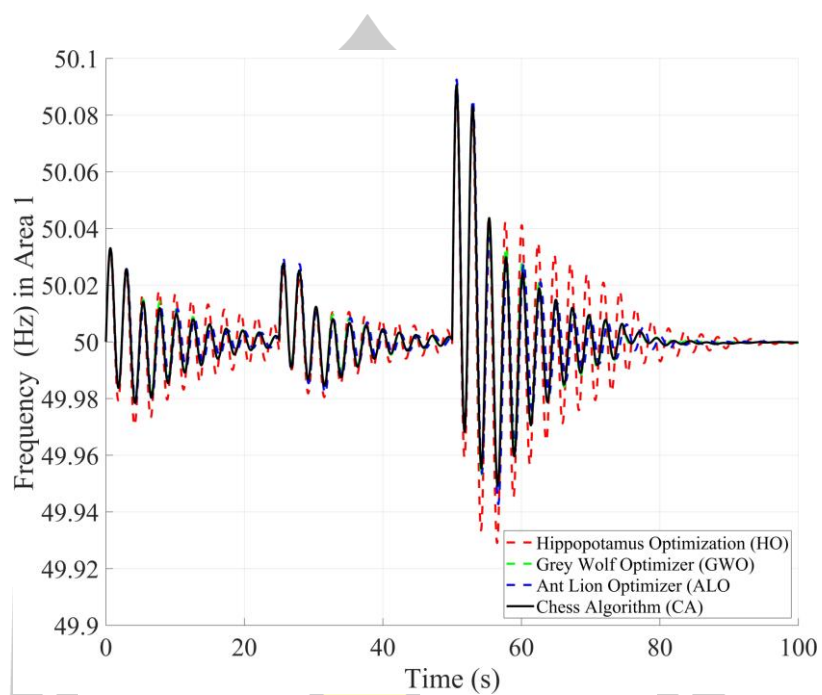
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

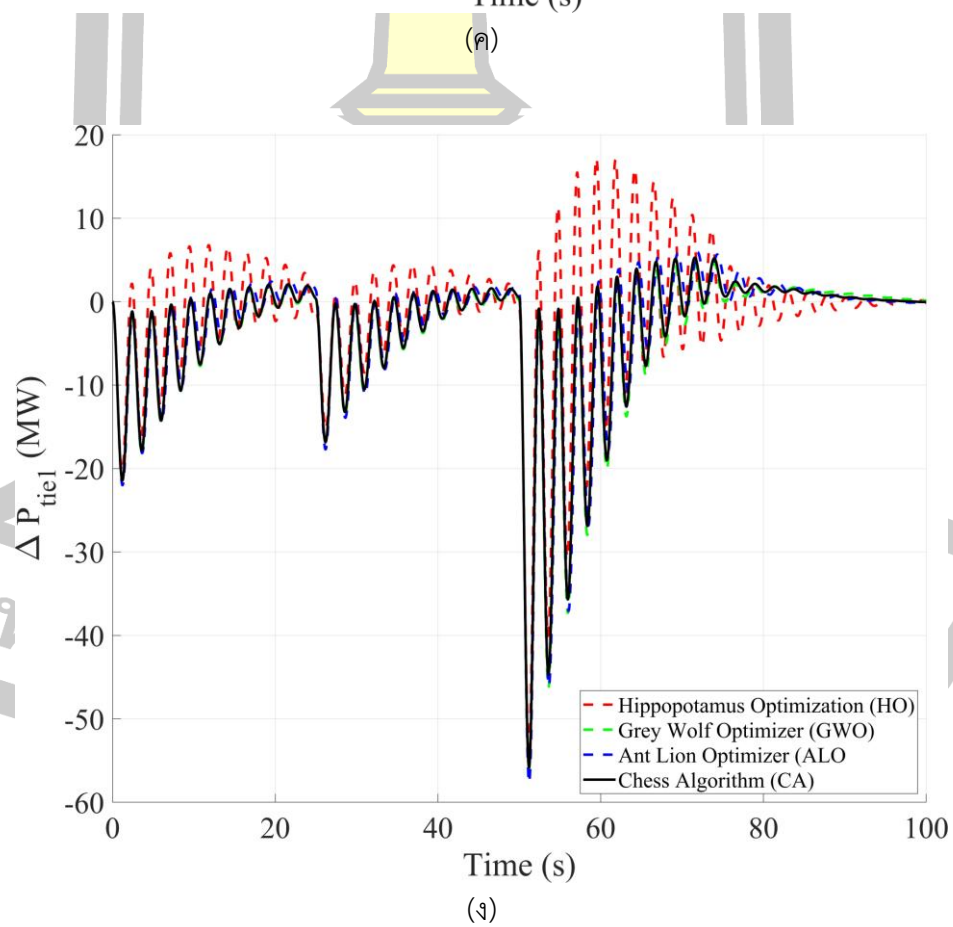
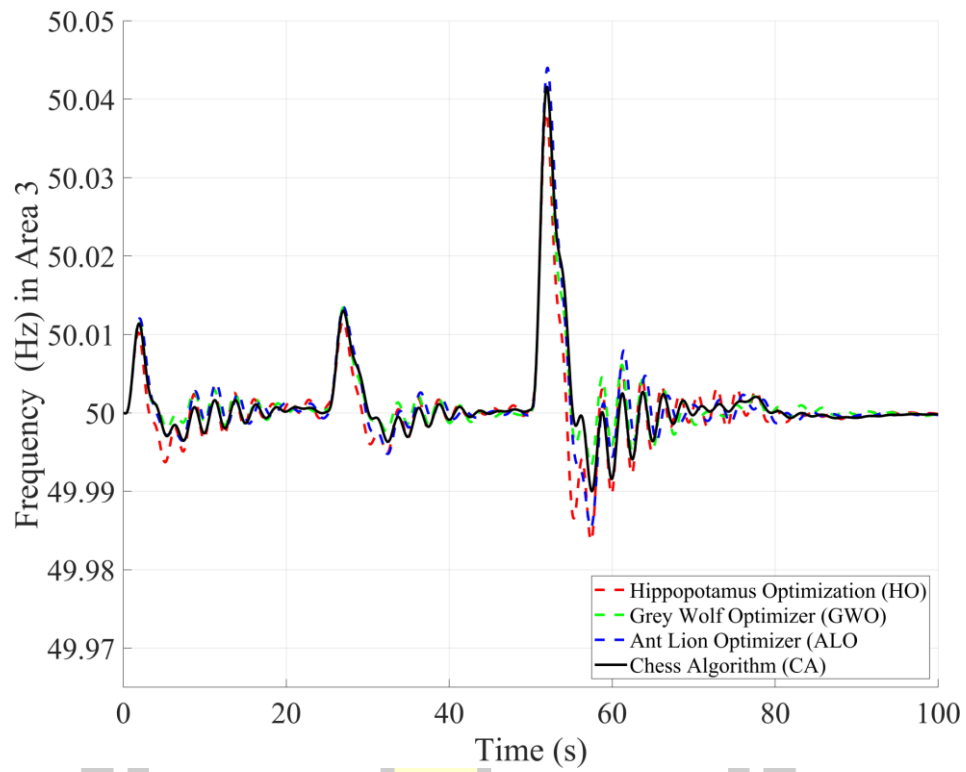
(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

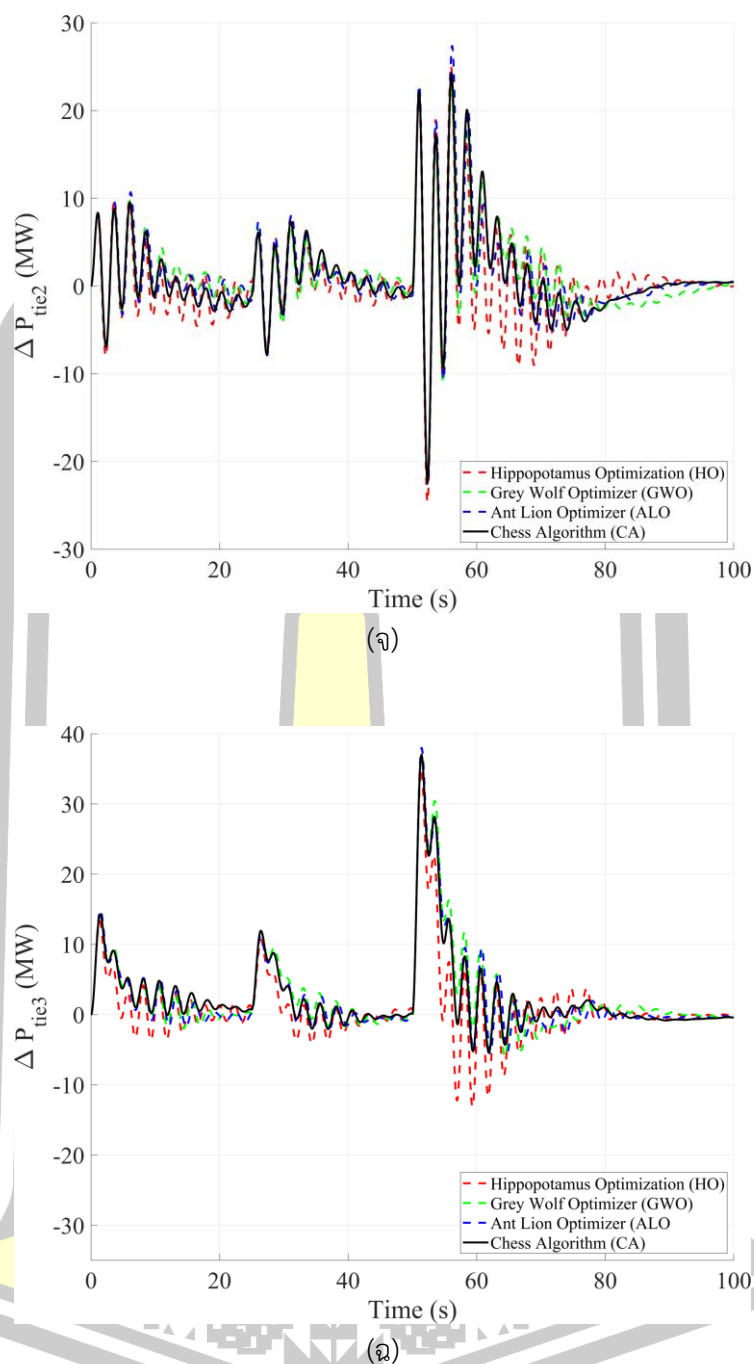
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

กรณีศึกษาที่ 2







ภาพประกอบ 31 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 2

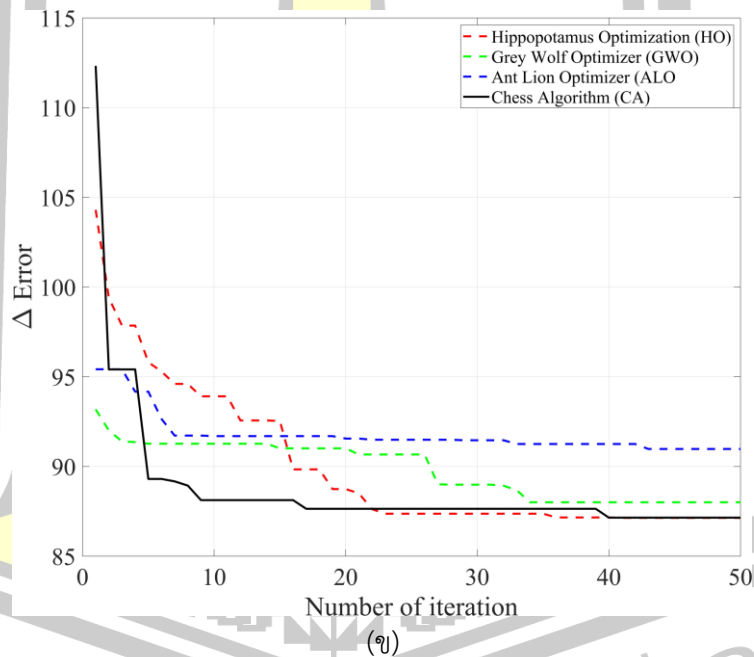
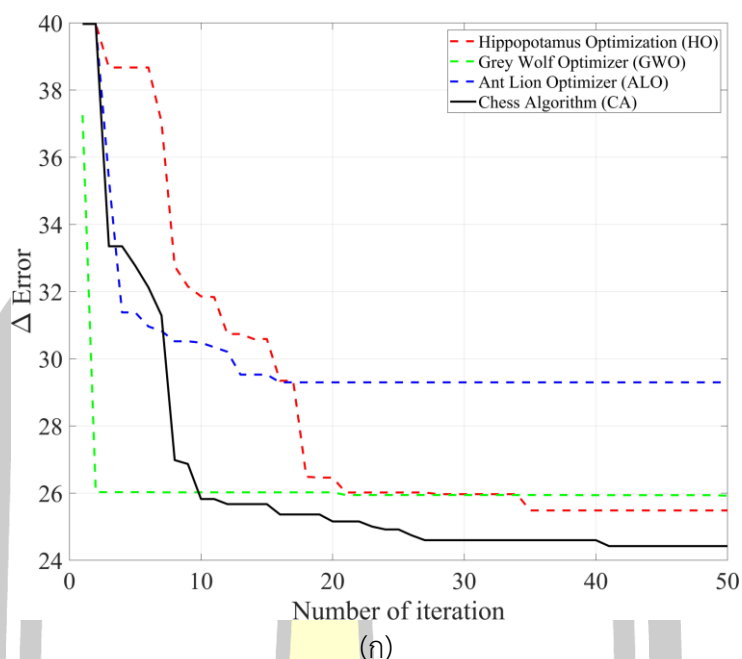
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรตซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรตซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรตซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 32 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITAE

(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 17 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 1

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.0164	0.2653	0.9399	0.8133	0.0628	1.0000	0.4408	0.2475	1.0000	0.4202	0.6401	0.0862
ALO	0.0858	0.2749	0.8473	0.7344	0.0178	0.7077	0.4609	0.0806	0.9489	0.7076	0.4488	0.8588
GWO	0.0081	0.2958	0.0108	0.9734	0.0101	0.9988	0.5884	0.0086	0.9923	0.5042	0.9940	0.4356
HO	0.1087	0.1907	0.0969	0.1558	0.0824	0.0715	0.0838	0.1469	0.0959	0.1088	0.0832	0.1000

ตาราง 18 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 2

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.3964	0.1982	0.5034	0.3549	0.0535	0.9759	0.9137	0.0639	0.9730	0.1277	0.7654	0.1499
ALO	0.2852	0.2026	0.3358	0.1047	0.3197	0.9980	0.3730	0.3218	0.6007	0.3720	0.4603	0.4528
GWO	0.3930	0.1793	0.6486	0.8496	0.0980	0.7209	0.1741	0.6239	0.9734	0.5428	0.8735	0.8858
HO	0.5756	0.4688	0.3196	0.2972	0.3313	1.0000	1.0000	0.6650	1.0000	0.2823	0.5167	1.0000

ตาราง 19 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 1

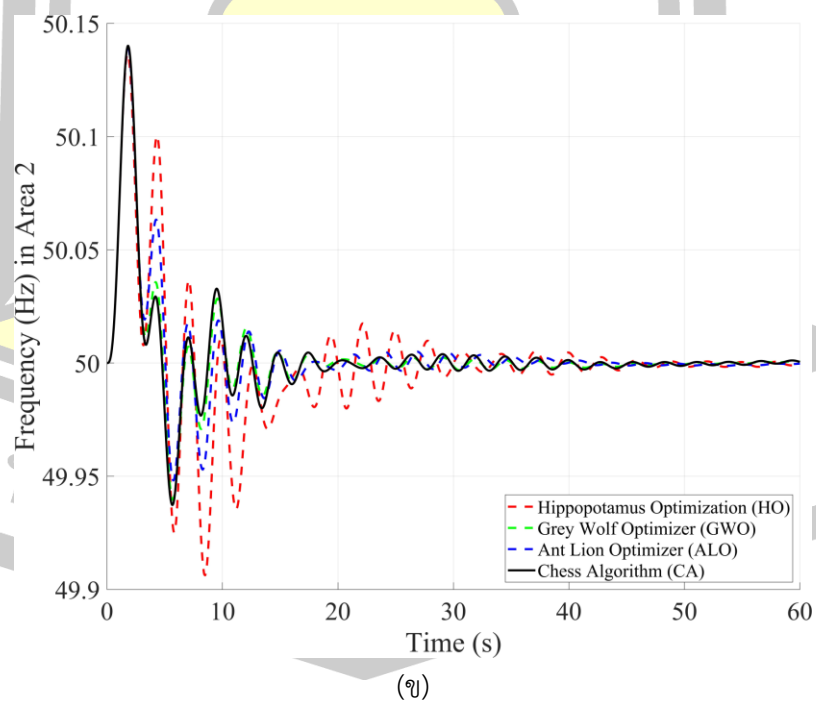
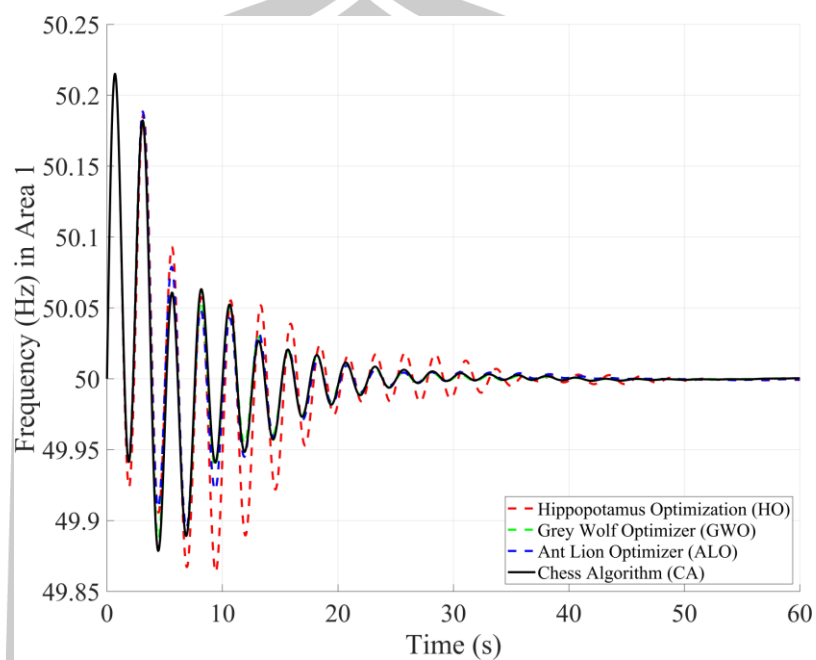
วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.2149	50.1393	50.1048	21.2321	63.1802	96.1561
	Undershoot	49.8780	49.9374	49.9728	-143.0719	-51.1625	-17.9228
	Settling time	44.8404	41.9000	43.4291	51.4203	48.5281	23.1471
	ITAE	87.1485					
ALO	Overshoot	50.2144	50.1383	50.1048	22.6224	59.1354	95.6089
	Undershoot	49.8789	49.9377	49.9787	-142.5427	-50.0126	-26.4029
	Settling time	56.3083	55.8145	57.0524	53.6197	59.0216	38.4420
	ITAE	90.9762					
GWO	Overshoot	50.2151	50.1391	50.1049	24.0824	62.9997	96.1245
	Undershoot	49.8740	49.9322	49.9719	-143.1394	-51.6639	-19.4303
	Settling time	45.0000	44.3000	43.4291	49.4000	48.1397	23.0843
	ITAE	88.0063					
HO	Overshoot	50.2143	50.1356	50.1110	12.1679	58.3433	98.4432
	Undershoot	49.8993	49.9393	49.9647	-143.0253	-49.9512	-18.6839
	Settling time	48.8000	N/A	58.9298	45.3463	44.6899	42.2378
	ITAE	87.1367					

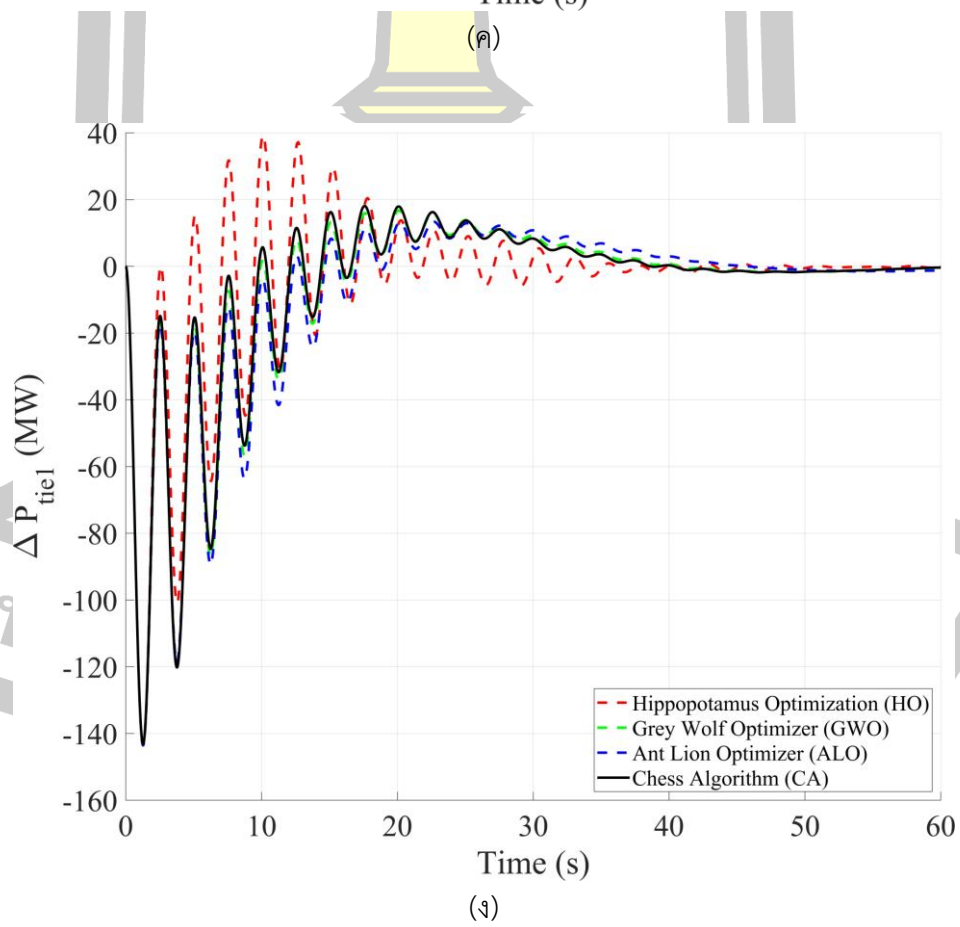
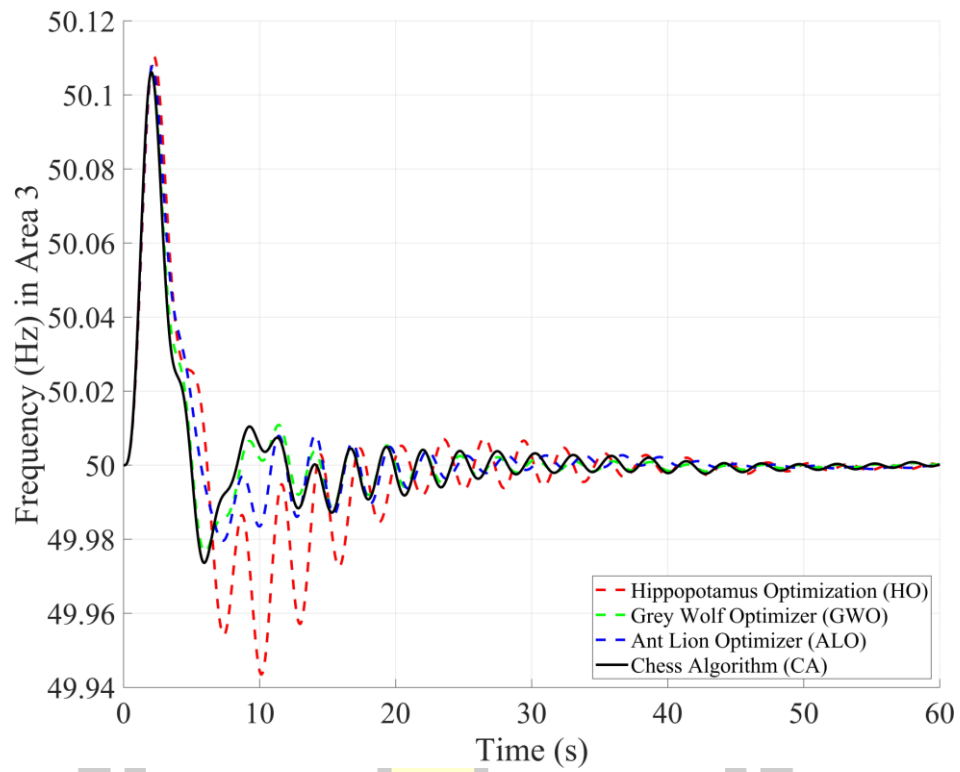
ตาราง 20 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITAE ในกรณีศึกษาที่ 2

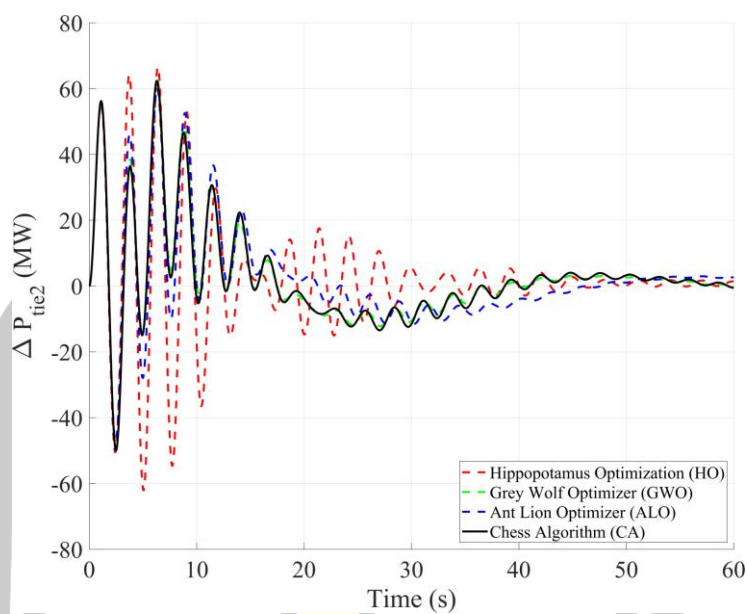
วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.0906	50.0560	50.0416	5.2827	24.1909	36.9991
	Undershoot	49.9492	49.9823	49.9900	-55.8241	-22.4016	-5.4512
	Settling time	81.0510	77.4000	78.5490	86.6000	80.1490	64.5383
	ITAE	87.1485					
ALO	Overshoot	50.0925	50.0582	50.0440	5.9441	27.3541	37.9863
	Undershoot	49.9428	49.9734	49.9854	-57.6755	-22.6603	-5.5094
	Settling time	83.8000	82.1000	80.5000	87.1000	78.5000	65.1000
	ITAE	90.9762					
GWO	Overshoot	50.0903	50.0562	50.0417	4.6480	22.7890	36.8011
	Undershoot	49.9493	49.9798	49.9933	-56.0360	-21.8197	-6.0084
	Settling time	84.5000	79.1490	78.3490	89.3000	86.0510	67.2592
	ITAE	88.0063					
HO	Overshoot	50.0870	50.0530	50.0383	17.1748	25.0370	34.8840
	Undershoot	49.9291	49.9718	49.9837	-53.4595	-24.5923	-13.1046
	Settling time	94.3000	86.3000	81.6000	89.0000	78.4510	66.8804
	ITAE	87.1367					

4.2.2 ฟังก์ชัน ITSE

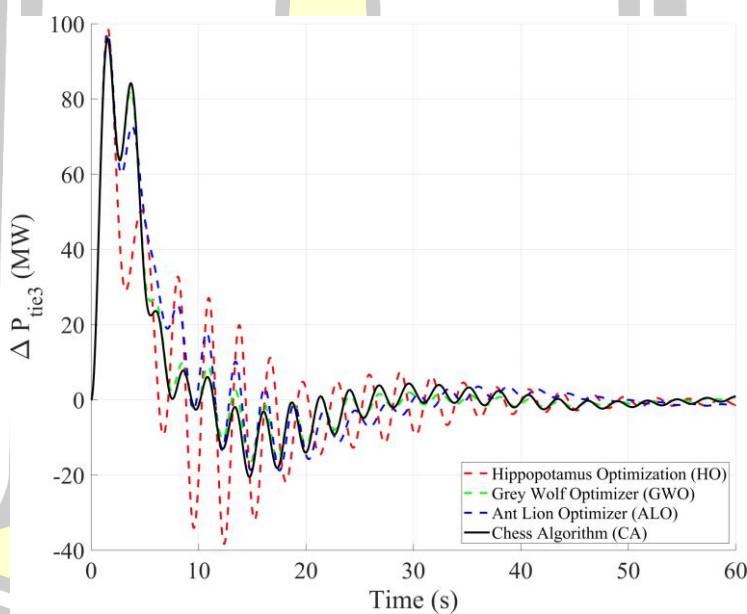
กรณีศึกษาที่ 1







(จ)



(ง)

ภาพประกอบ 33 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

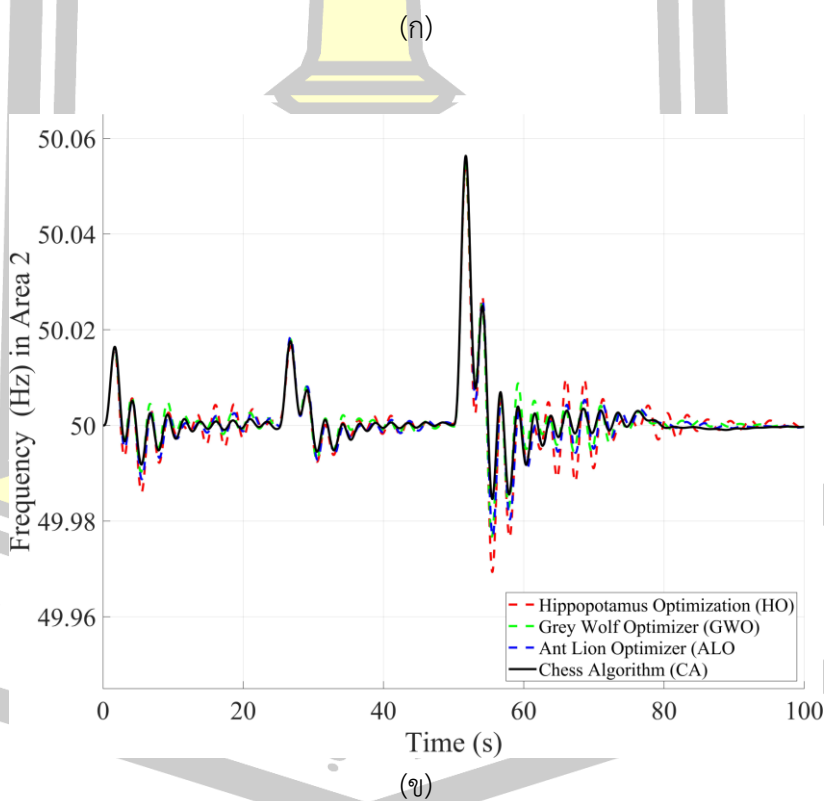
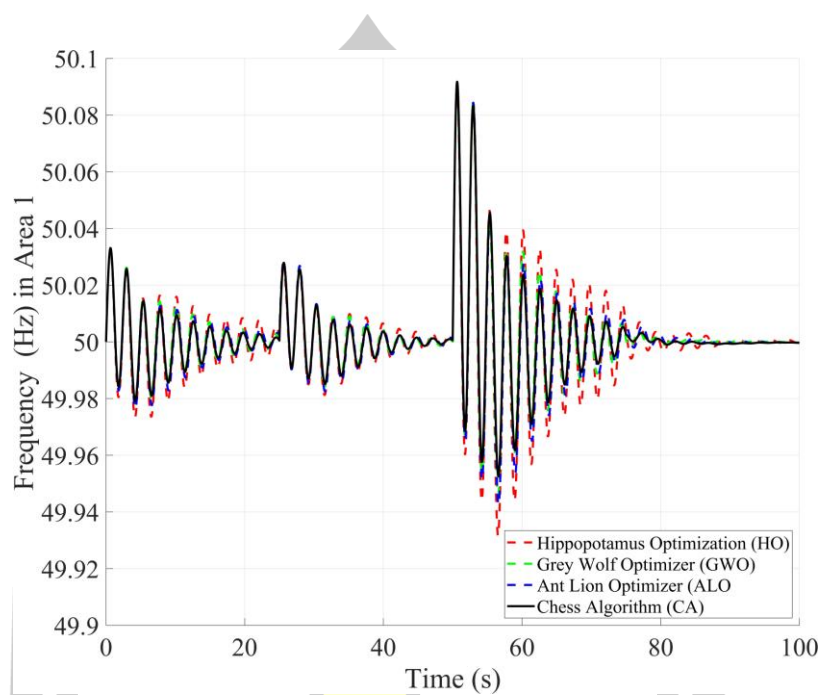
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

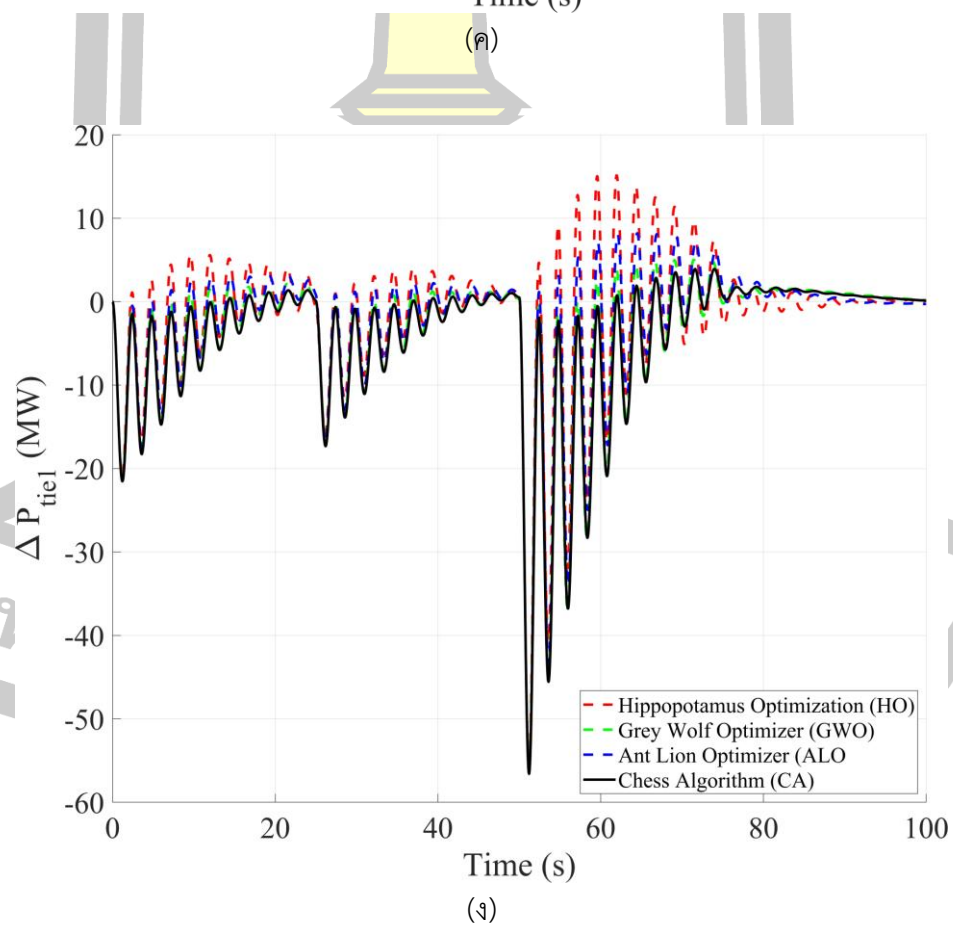
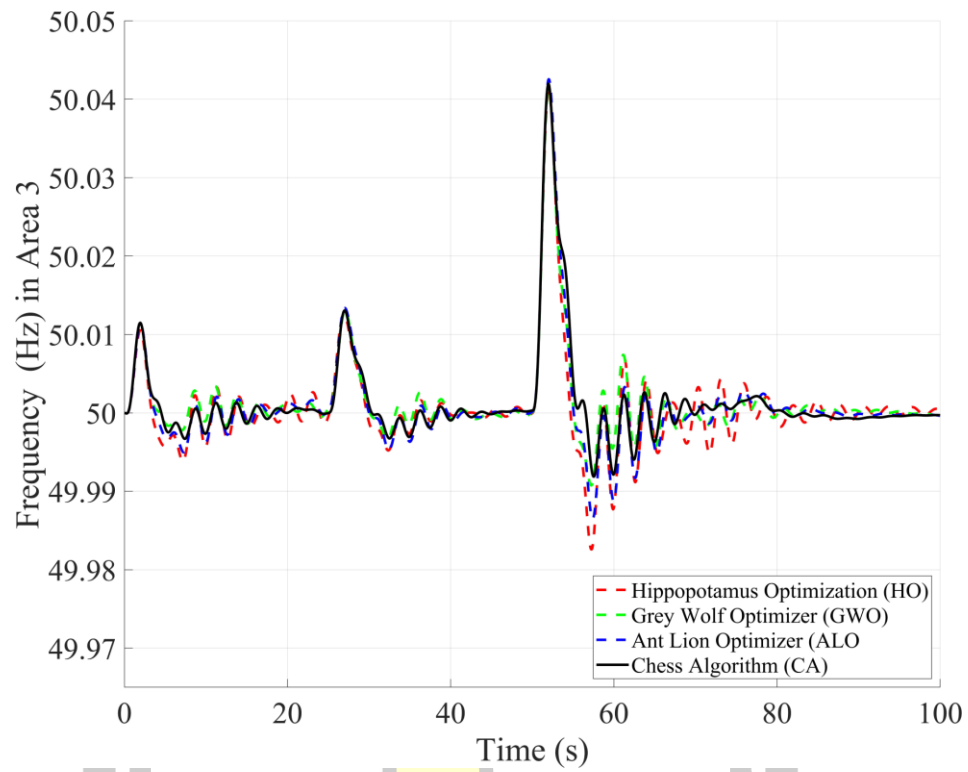
(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

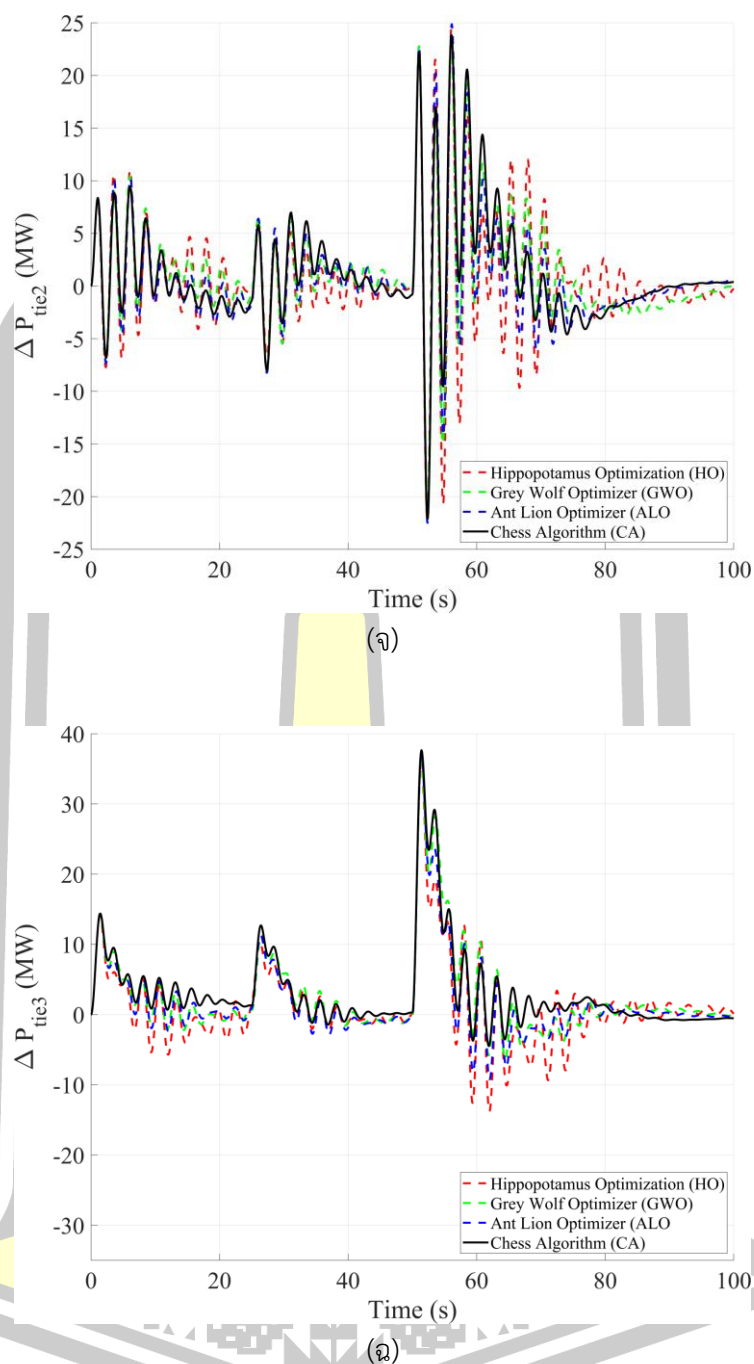
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

กรณีศึกษาที่ 2







ภาพประกอบ 34 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2

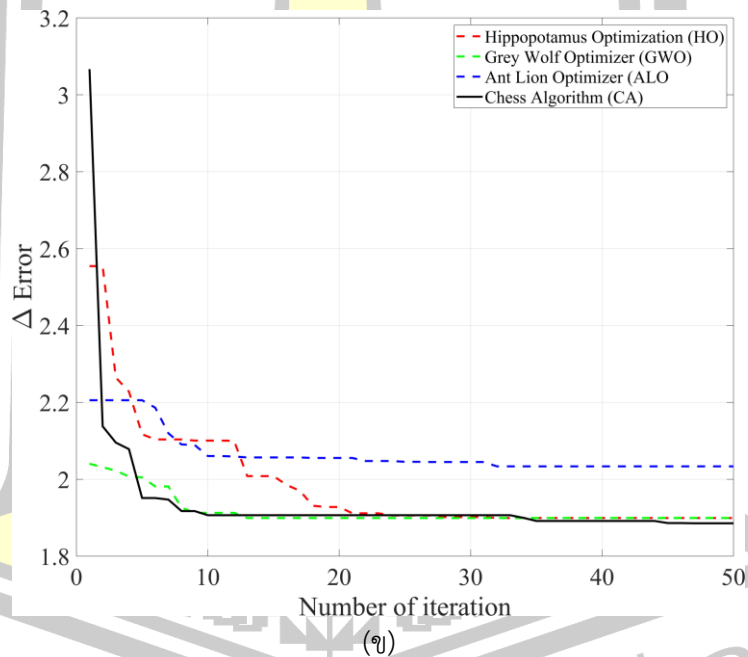
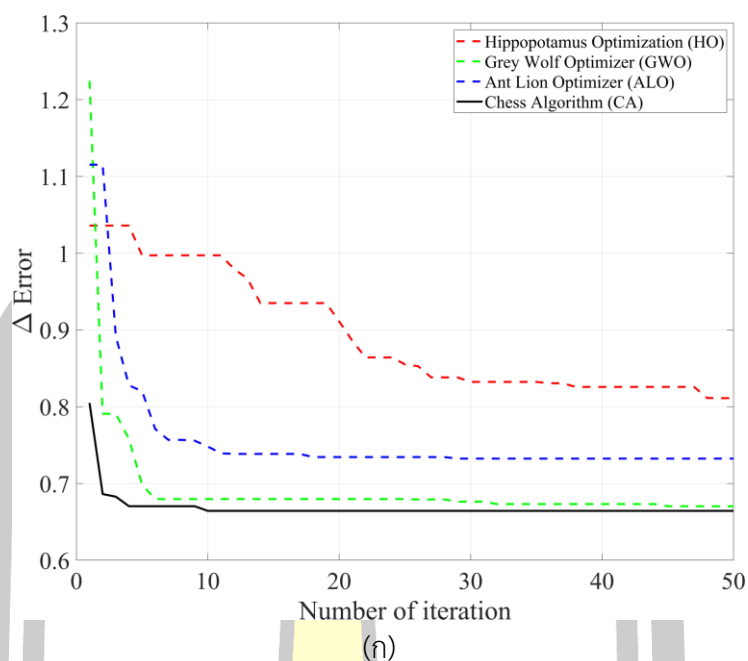
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 35 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITSE

(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 21 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.0050	0.2261	0.9649	0.9890	0.0085	0.9265	0.9959	0.9886	0.9964	0.9926	0.1807	0.2083
ALO	0.0120	0.1857	0.3868	0.1182	0.0977	0.6348	0.5471	0.4461	0.7179	0.3496	0.4790	0.8604
GWO	0.0030	0.2100	0.7874	0.0625	0.0045	0.9833	0.5688	0.3760	1.0000	0.7761	0.4957	0.4718
HO	0.0032	0.4010	0.2415	0.0185	0.2967	0.0031	0.0031	0.5184	0.0324	0.0312	0.1023	0.1379

ตาราง 22 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.3797	0.1688	0.9417	0.8861	0.0019	0.9549	0.2397	0.5825	0.9970	0.0783	0.3172	0.3288
ALO	0.3745	0.2587	0.3009	0.5930	0.3079	0.7039	0.4222	0.3961	0.5897	0.1826	0.7500	0.8463
GWO	0.4459	0.1867	0.9581	0.5938	0.0139	0.6257	0.4417	0.3447	0.6200	0.5099	0.0136	0.5767
HO	0.4811	0.3768	0.6548	0.4005	0.3868	0.3078	1.0000	0.4565	0.3224	0.3130	1.0000	0.2331

ตาราง 23 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีในการฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1

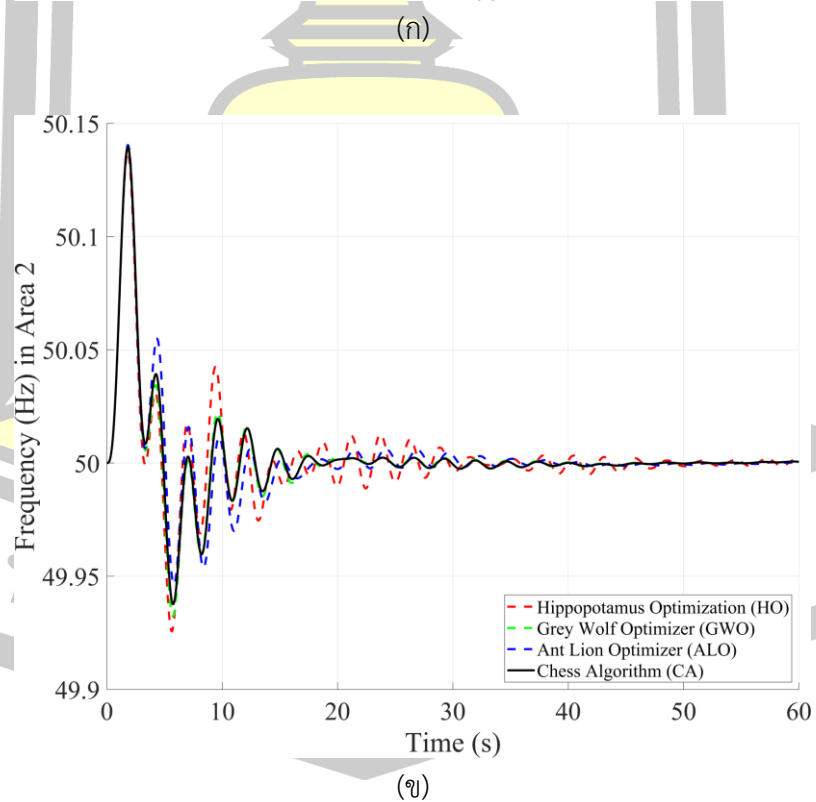
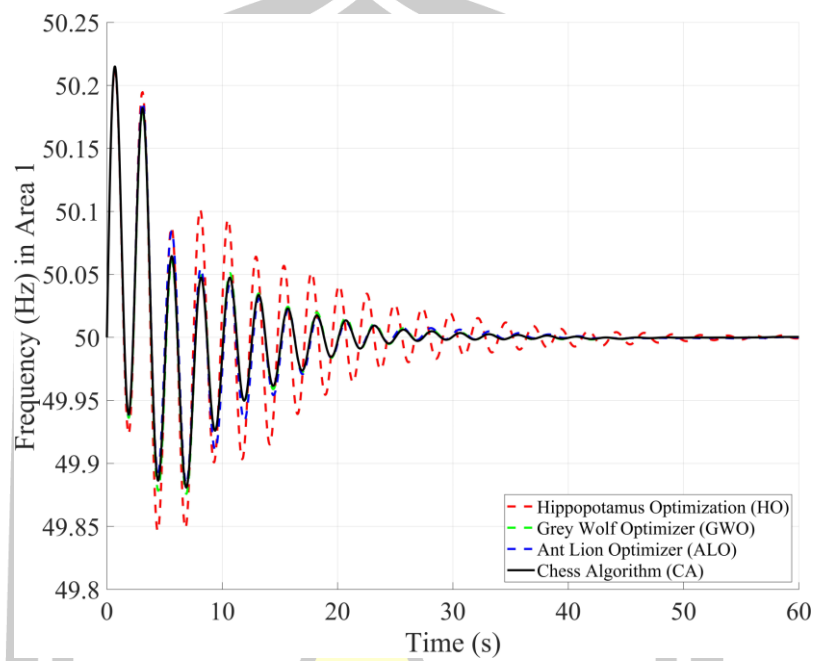
วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.2151	50.1401	50.1061	18.0746	62.3724	95.9994
	Undershoot	49.8786	49.9373	49.9736	-143.1902	-49.9562	-20.4740
	Settling time	44.9000	59.6000	54.0161	55.5726	55.8282	29.8000
	ITAE	0.6644					
ALO	Overshoot	50.2151	50.1393	50.1078	13.4013	60.2198	97.4055
	Undershoot	49.8948	49.9482	49.9796	-143.4950	-47.2027	-18.7879
	Settling time	41.6000	54.2532	55.2613	60.0000	60.0000	29.0000
	ITAE	0.7325					
GWO	Overshoot	50.2151	50.1401	50.1060	16.7484	62.8285	96.2724
	Undershoot	49.8873	49.9397	49.9765	-143.2927	-49.5597	-16.9324
	Settling time	44.6000	44.7516	45.9000	56.2610	53.3619	25.6598
	ITAE	0.6703					
HO	Overshoot	50.2150	50.1365	50.1103	39.1539	66.4881	98.7440
	Undershoot	49.8636	49.9063	49.9435	-143.5786	-62.0731	-38.2835
	Settling time	57.3000	59.4000	57.9203	47.2000	45.4000	36.4493
	ITAE	0.8112					

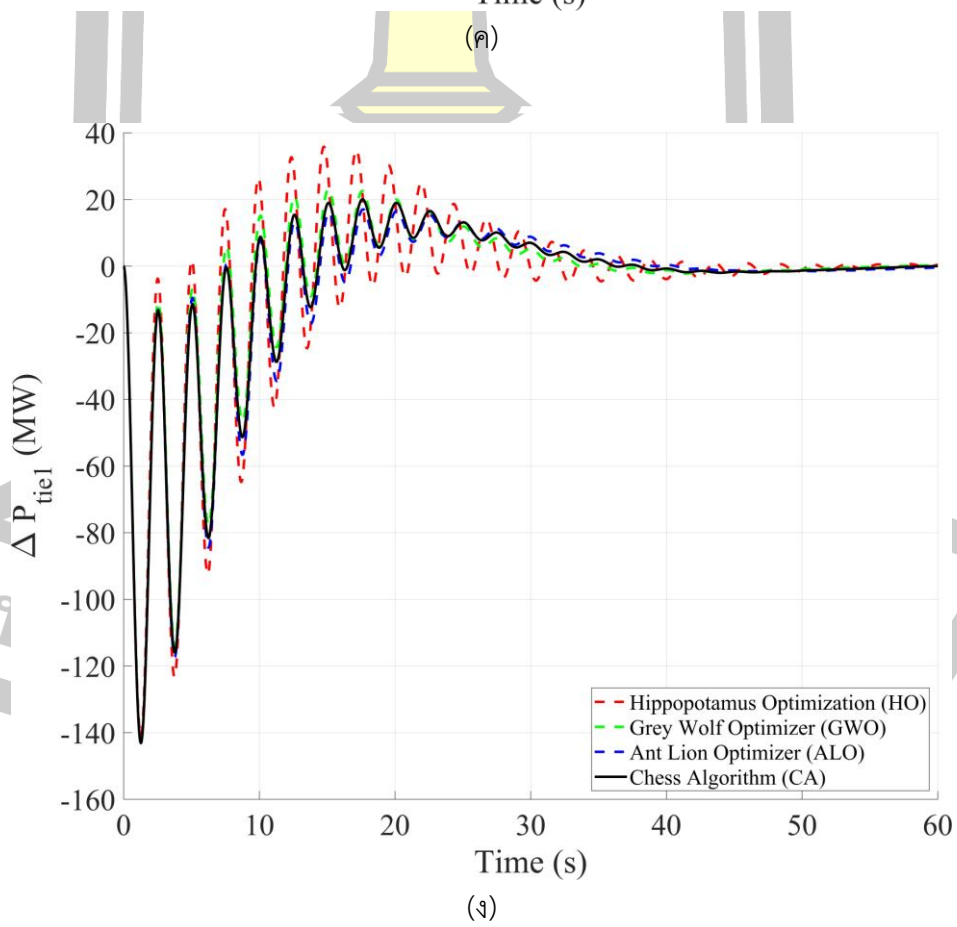
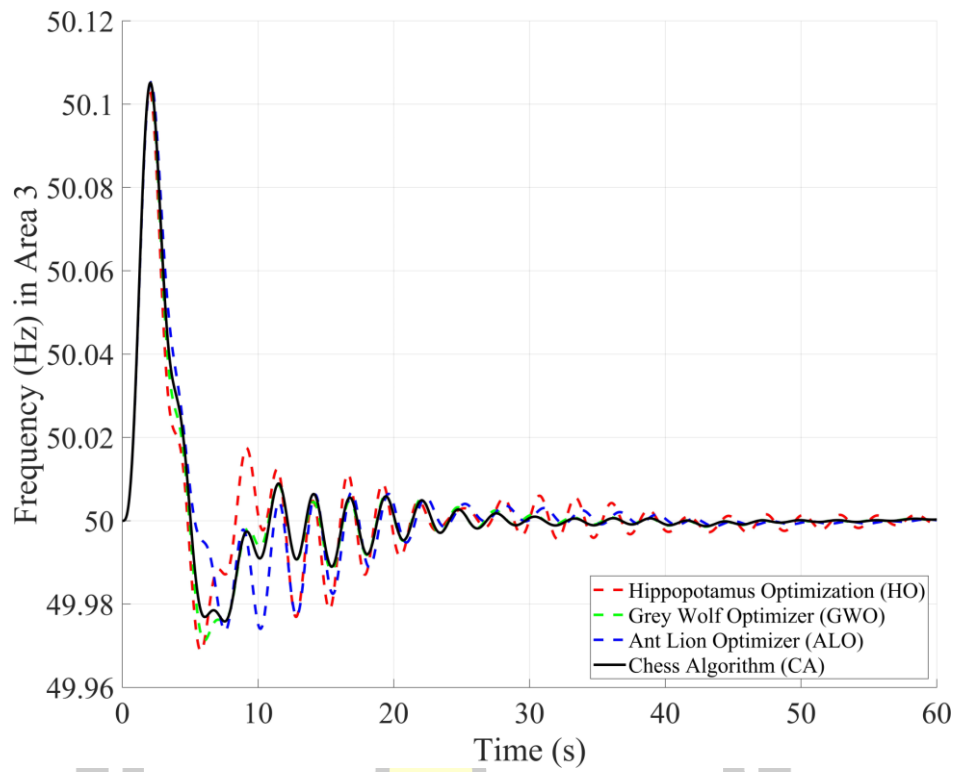
ตาราง 24 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีในการฟังก์ชัน ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2

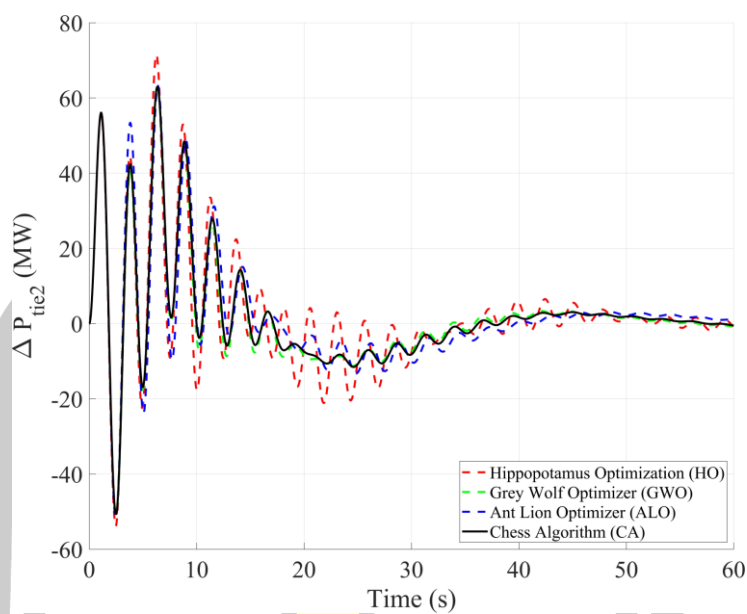
วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.0918	50.0563	50.0420	3.9335	23.8243	37.6573
	Undershoot	49.9526	49.9846	49.9919	-56.5937	-22.1234	-4.4843
	Settling time	79.7523	78.8000	78.6477	88.6477	80.6000	63.4210
	ITAE	1.8557					
ALO	Overshoot	50.0918	50.0564	50.0426	8.2048	24.8658	36.8851
	Undershoot	49.9426	49.9767	49.9865	-56.4340	-22.4842	-9.2205
	Settling time	84.8000	78.5000	79.1523	84.4000	81.4477	67.3624
	ITAE	2.0337					
GWO	Overshoot	50.0905	50.0550	50.0416	5.0264	23.4571	36.1514
	Undershoot	49.9459	49.9768	49.9908	-55.7179	-20.7271	-6.3745
	Settling time	79.6000	85.4000	78.6000	88.8477	88.9523	67.3624
	ITAE	1.8993					
HO	Overshoot	50.0897	50.0538	50.0412	15.1370	24.4223	35.9113
	Undershoot	49.9316	49.9694	49.9826	-55.0770	-22.2379	-13.7747
	Settling time	89.1000	95.2477	87.8000	83.6000	84.1523	74.3523
	ITAE	1.8994					

4.2.3 ฟังก์ชัน IAE

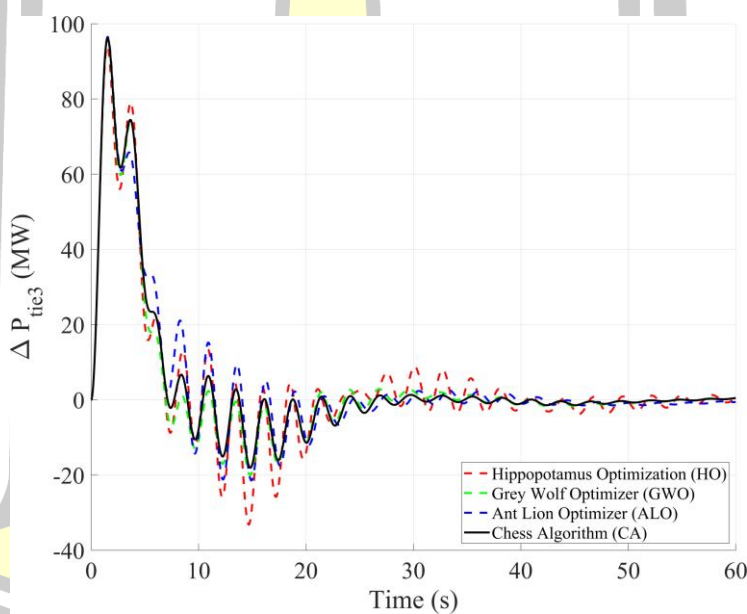
กรณีศึกษาที่ 1







(จ)



(ฉ)

ภาพประกอบ 36 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

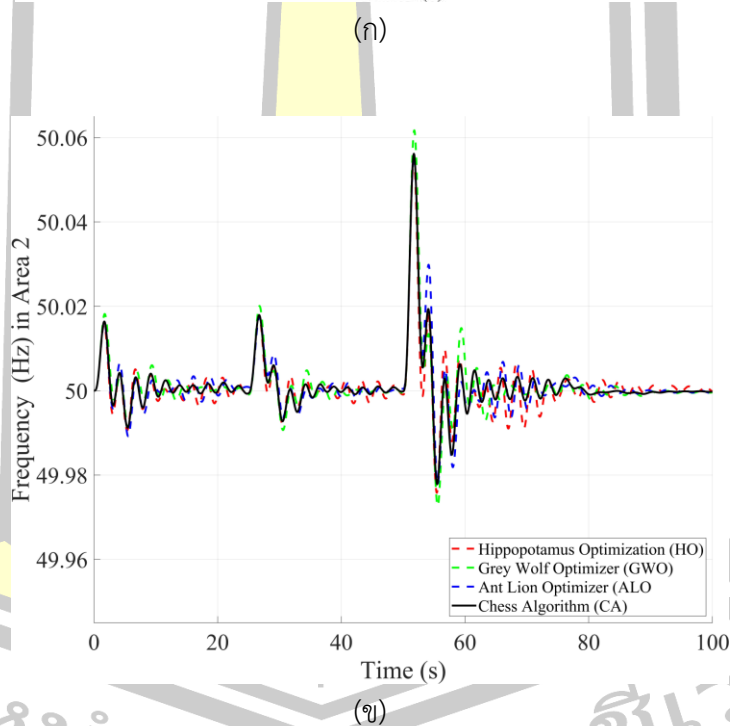
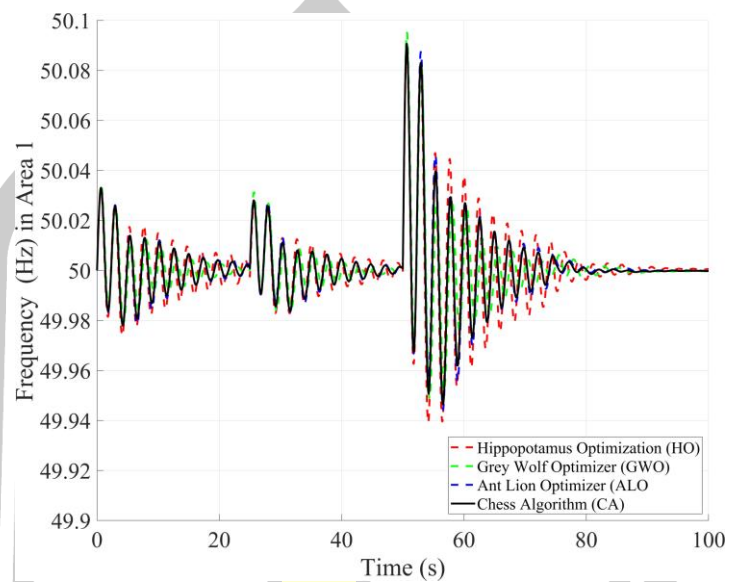
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

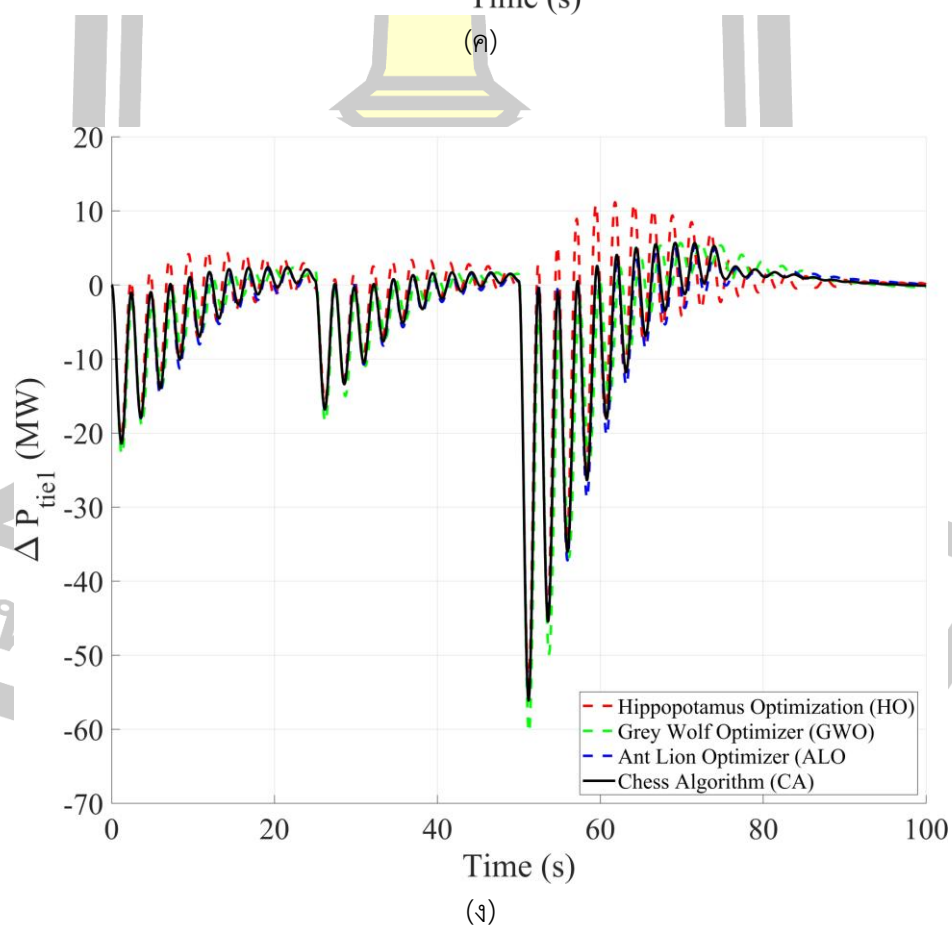
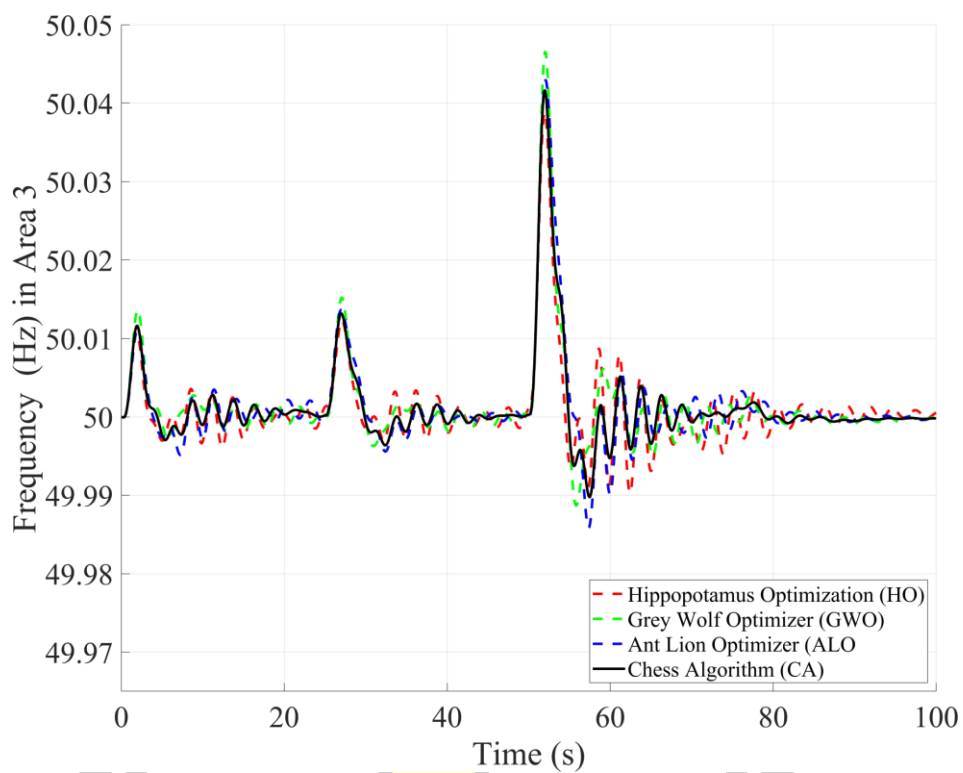
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

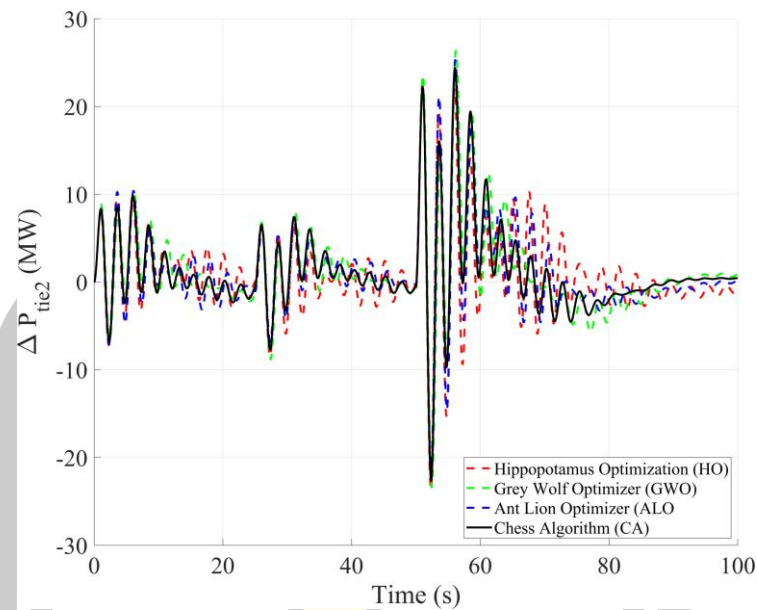
(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

กรณีศึกษาที่ 2

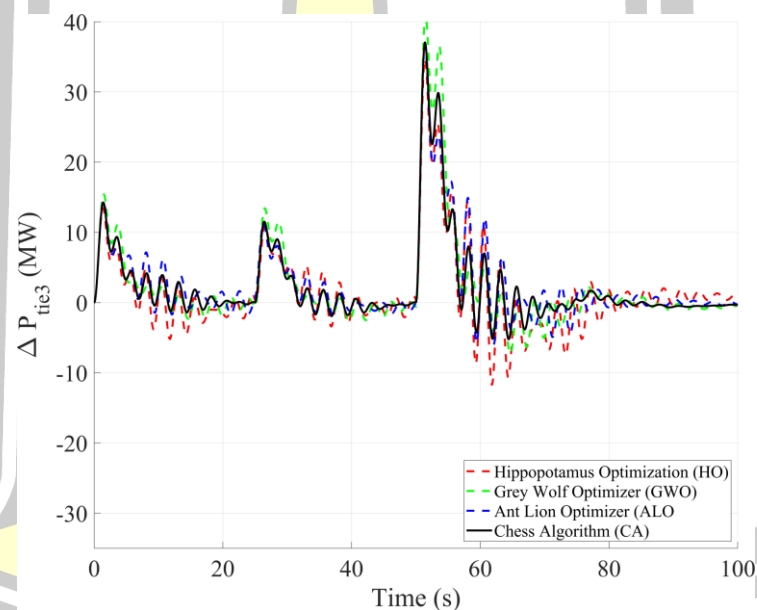


พหุ ประสิทธิภาพ





(จ)



(ง)

ภาพประกอบ 37 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 2

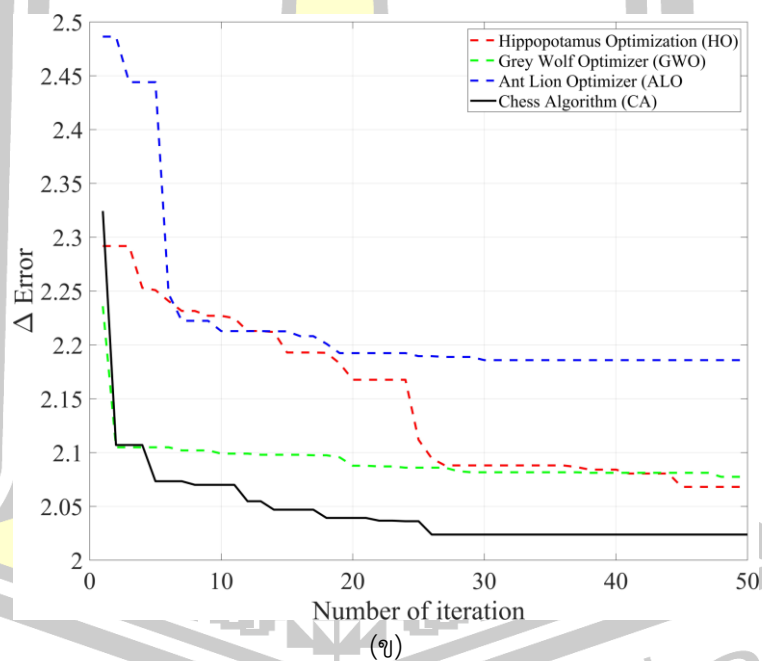
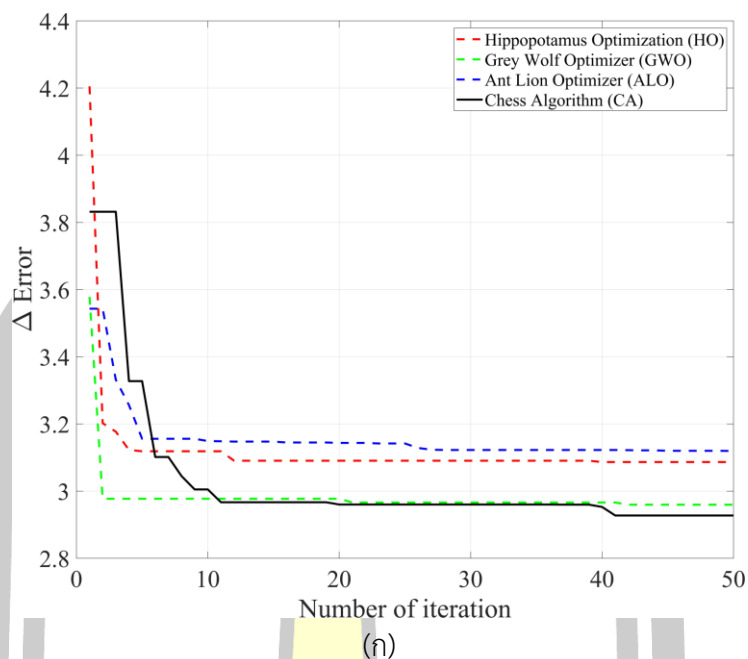
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรตซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรตซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรตซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 38 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน IAE

(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 25 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 1

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.0166	0.2505	0.1409	0.0000	0.0559	0.9925	0.0713	0.6612	1.0000	0.5154	0.1128	0.0140
ALO	0.0425	0.2392	0.7451	0.4980	0.3924	0.7610	0.0146	0.8785	0.9029	0.1754	0.7857	0.9850
GWO	0.0156	0.2854	0.0392	0.7858	0.0063	0.9963	0.1609	0.5918	0.9962	0.6142	0.2782	0.1498
HO	0.3972	0.4248	0.8676	0.3819	0.1697	0.9750	0.9223	0.7050	0.9344	0.9451	0.2518	0.3051

ตาราง 26 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 2

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.3935	0.2079	0.1646	0.3211	0.0442	0.9839	0.0580	0.1303	0.9777	0.4194	0.0653	0.3838
ALO	0.4254	0.1880	0.5859	0.9129	0.4144	0.6972	0.4558	0.7470	0.3708	0.2369	0.9378	0.2756
GWO	0.0912	0.1929	0.9866	0.9872	0.0181	0.9805	0.9909	0.9883	0.9935	0.9703	0.2565	0.3047
HO	0.5790	0.2934	0.5980	0.8426	0.4077	0.3443	0.4187	0.4577	0.9111	0.6317	0.3181	0.6517

ตาราง 27 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีในการในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 1

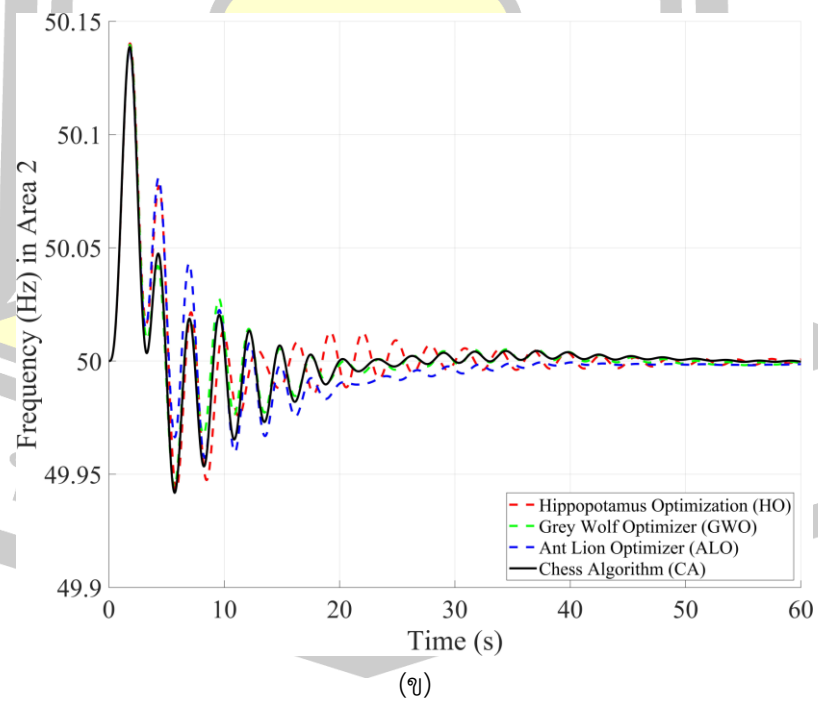
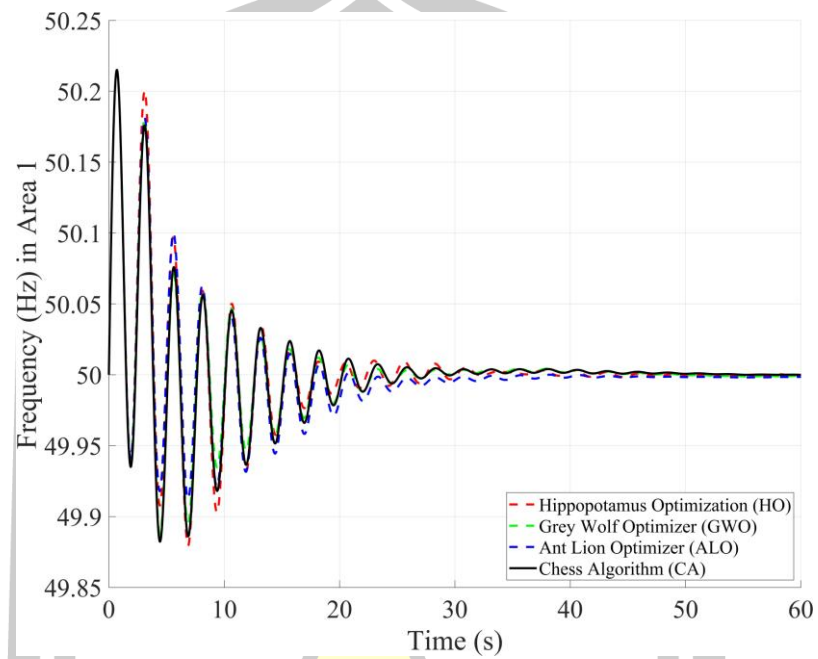
วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.2150	50.1396	50.1051	20.0432	62.9966	96.2104
	Undershoot	49.8809	49.9376	49.9758	-143.1011	-50.6345	-18.0542
	Settling time	44.8293	44.5380	43.4631	52.3719	48.8000	23.2516
	ITAE	2.9275					
ALO	Overshoot	50.2147	50.1404	50.1053	17.0423	63.2308	96.5059
	Undershoot	49.8836	49.9464	49.9735	-143.0013	-51.6711	-21.4394
	Settling time	38.9359	48.1511	46.6489	54.8481	54.9000	23.6000
	ITAE	3.1194					
GWO	Overshoot	50.2149	50.1392	50.1050	23.0885	63.0189	96.0210
	Undershoot	49.8758	49.9324	49.9712	-143.0371	-51.2969	-20.0310
	Settling time	44.9561	44.5127	45.7000	49.7511	48.4489	23.1000
	ITAE	2.9596					
HO	Overshoot	50.2125	50.1373	50.1030	35.8254	71.5044	94.0030
	Undershoot	49.8463	49.9257	49.9687	-141.1130	-53.8408	-33.1588
	Settling time	58.9358	60.0000	58.8821	52.2507	51.1829	35.7000
	ITAE	3.0866					

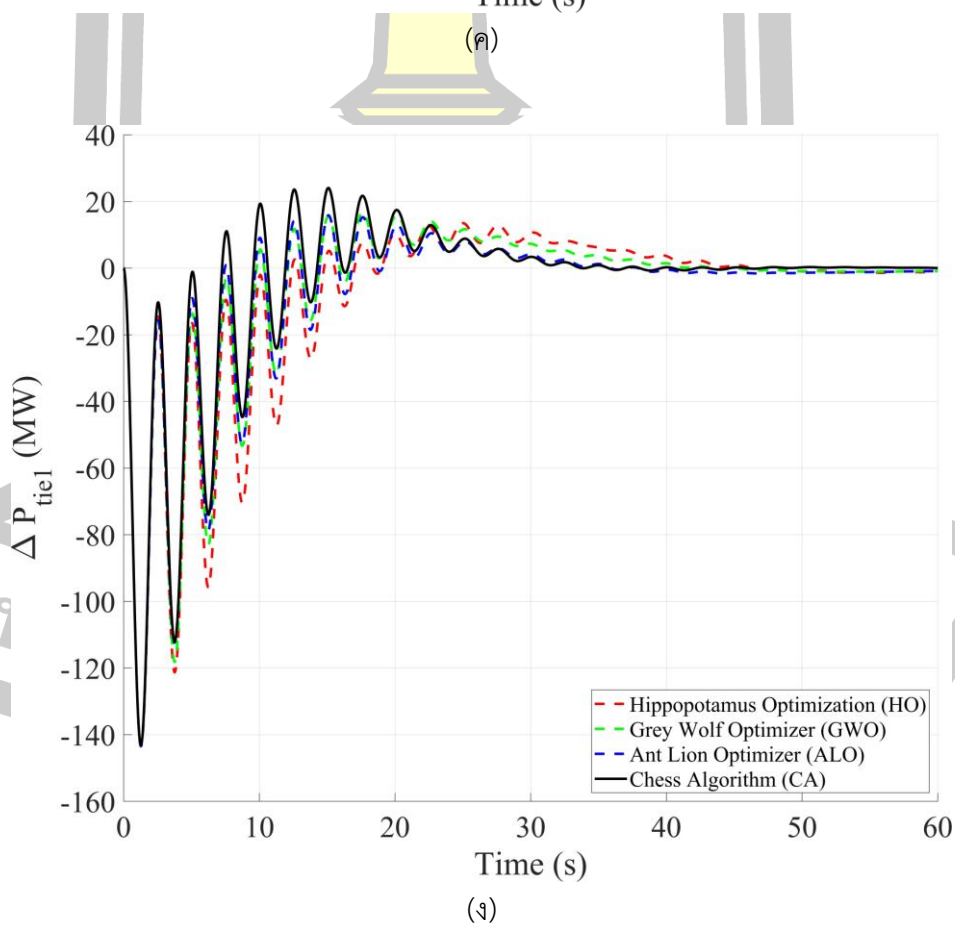
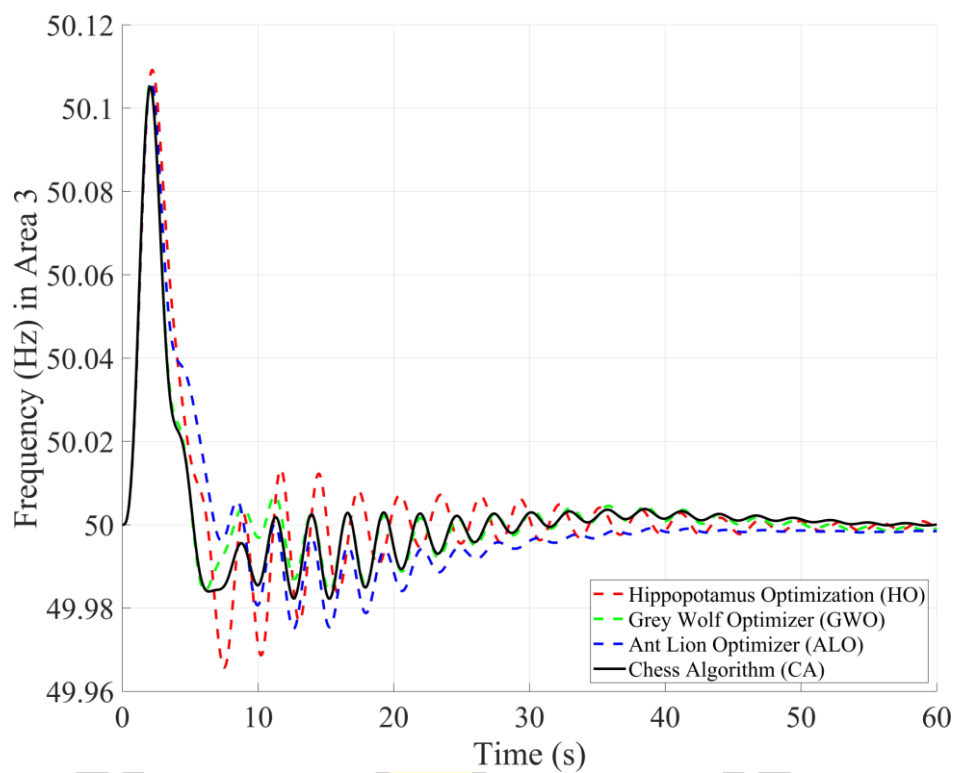
ตาราง 28 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีในการในฟังก์ชัน IAE ในกรณีศึกษาที่ 2

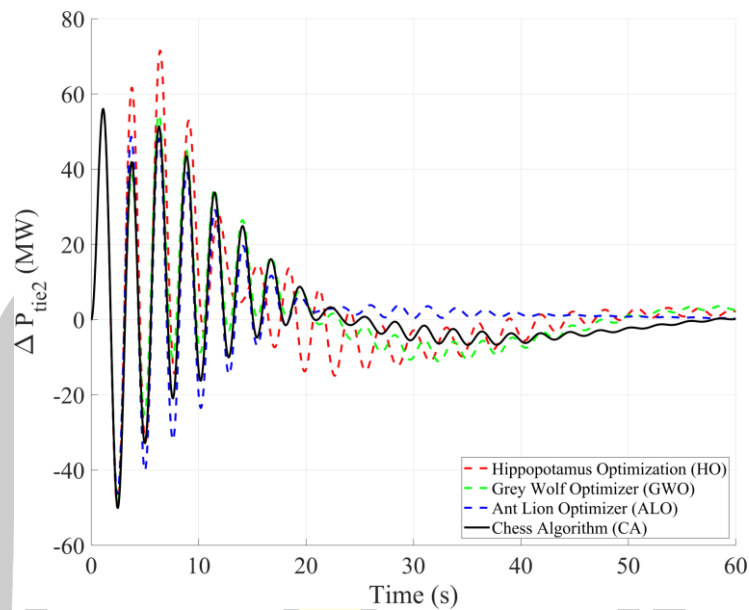
วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.0907	50.0561	50.0416	5.6848	24.3958	37.0523
	Undershoot	49.9464	49.9778	49.9898	-56.1188	-22.6355	-5.2351
	Settling time	81.2000	77.2000	78.4000	86.4000	80.0000	64.7247
	ITAE	2.0238					
ALO	Overshoot	50.0904	50.0557	50.0429	5.2589	25.2940	36.7065
	Undershoot	49.9444	49.9778	49.9859	-55.9958	-21.4284	-5.9758
	Settling time	84.6000	83.8498	79.5000	89.1502	84.7000	74.1475
	ITAE	2.1858					
GWO	Overshoot	50.0951	50.0617	50.0465	5.7212	26.3249	40.8189
	Undershoot	49.9489	49.9727	49.9887	-60.3995	-23.3856	-7.2846
	Settling time	85.5000	88.9000	78.0498	87.7502	85.4498	70.2439
	ITAE	2.0755					
HO	Overshoot	50.0878	50.0547	50.0388	11.1621	22.7594	34.6643
	Undershoot	49.9392	49.9758	49.9903	-54.0519	-23.6239	-11.6931
	Settling time	91.0498	96.3000	94.8498	85.4498	88.5000	76.1000
	ITAE	2.0681					

4.2.4 ฟังก์ชัน ISE

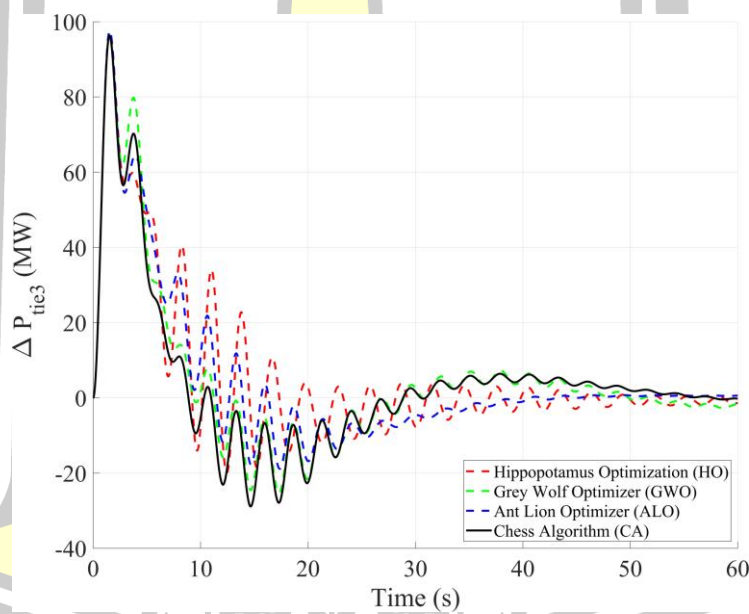
กรณีศึกษาที่ 1







(จ)



(ง)

ภาพประกอบ 39 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 1

(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

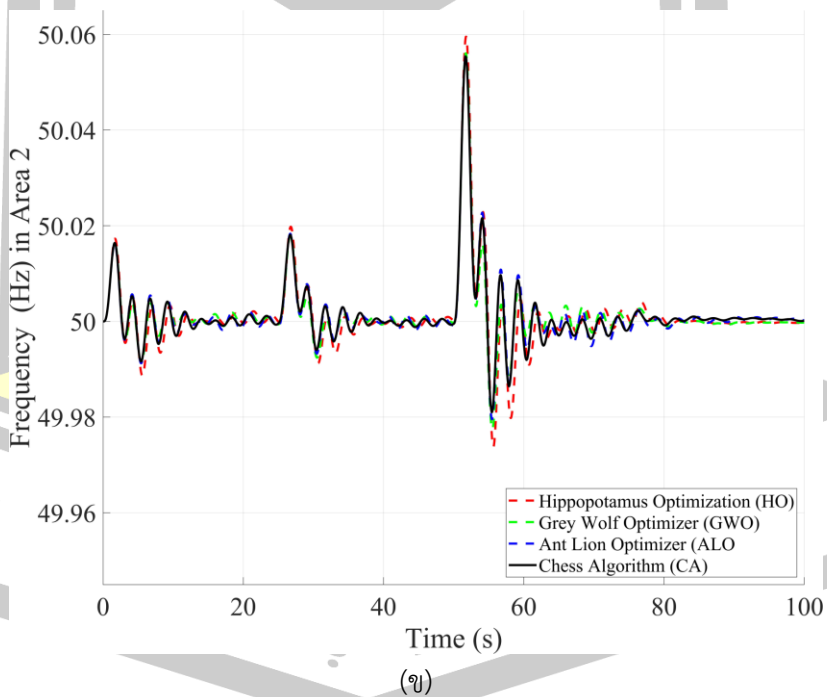
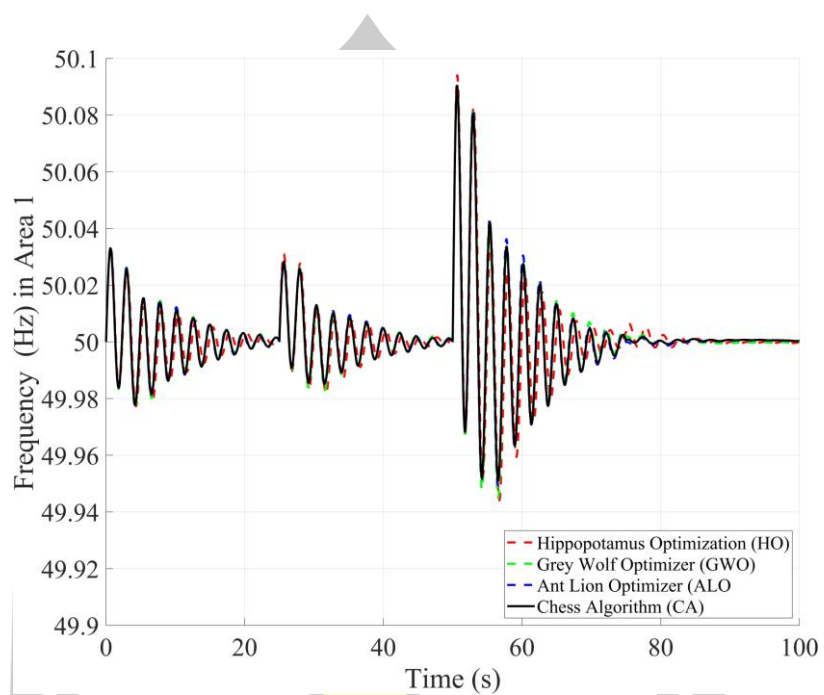
(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

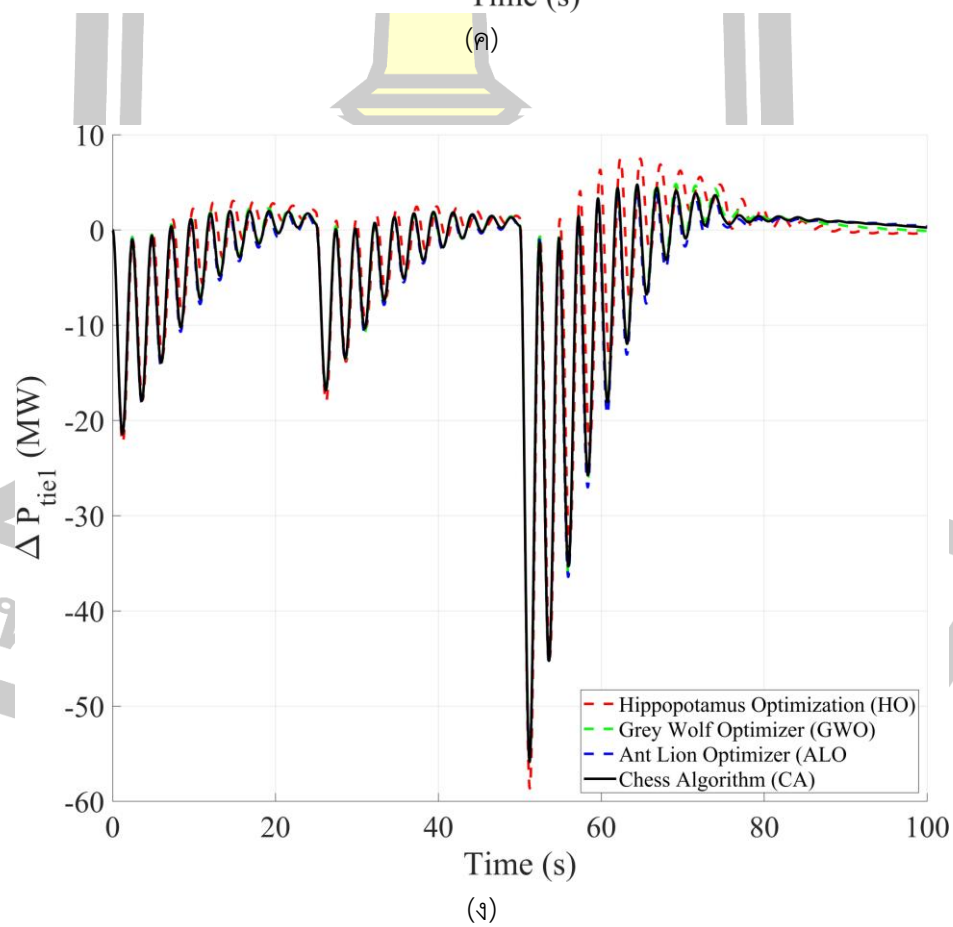
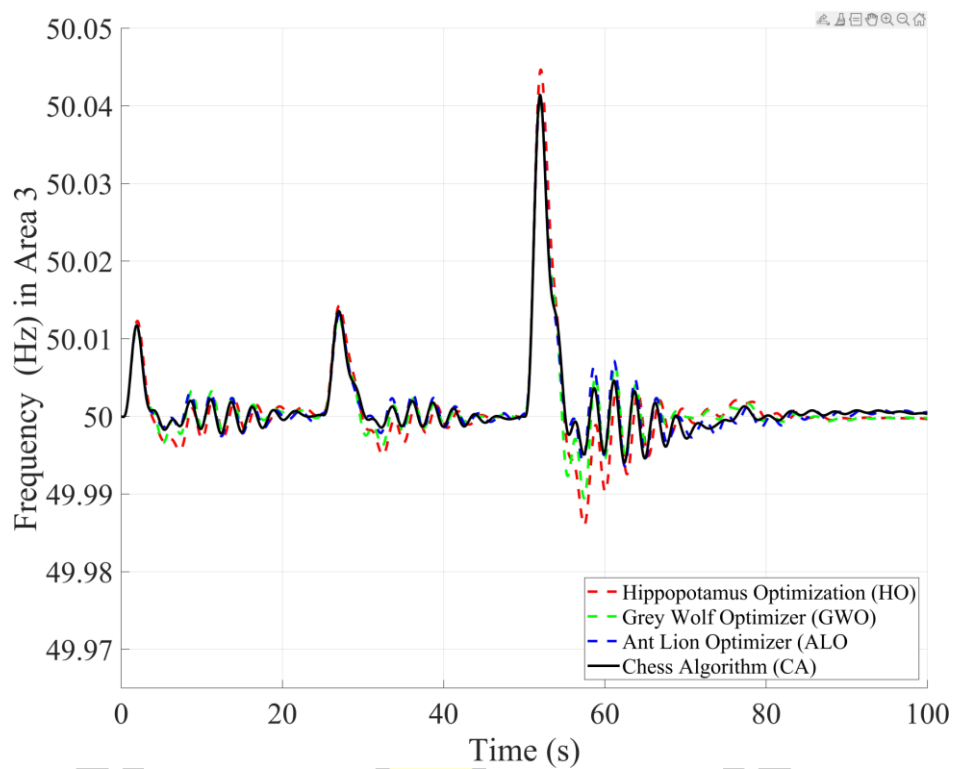
(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

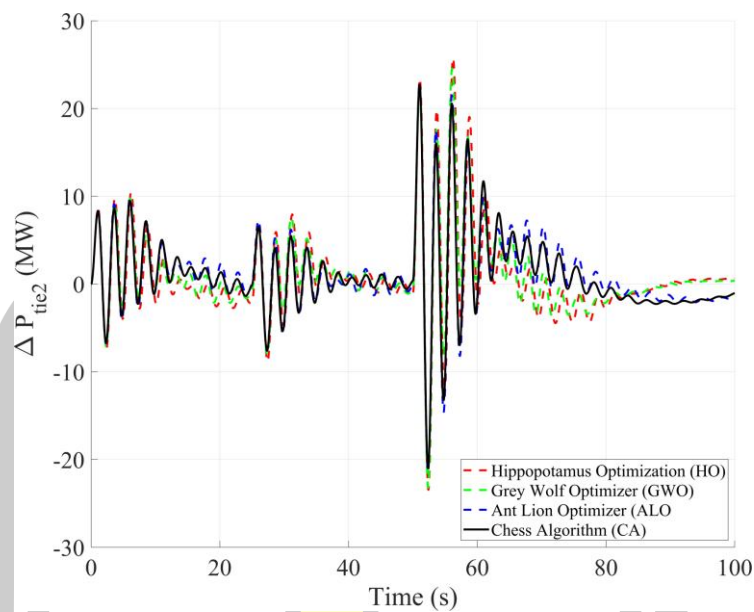
(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)

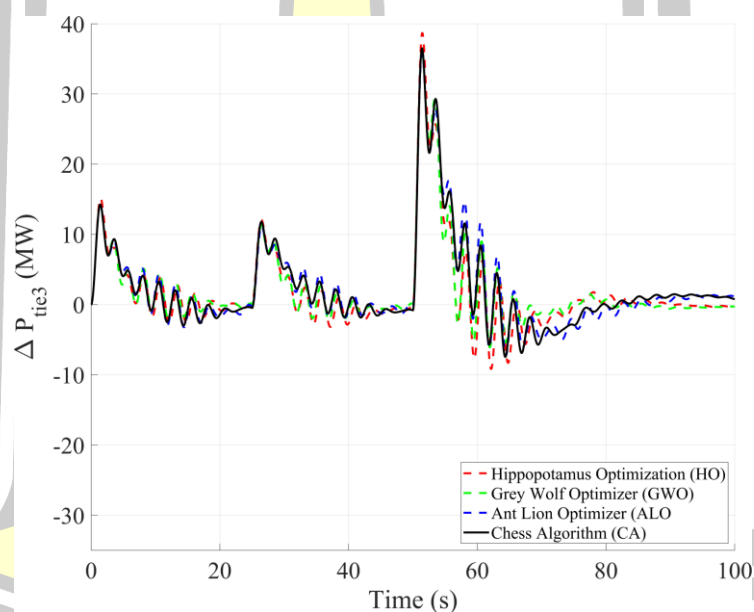
กรณีศึกษาที่ 2







(จ)



(ง)

ภาพประกอบ 40 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 2

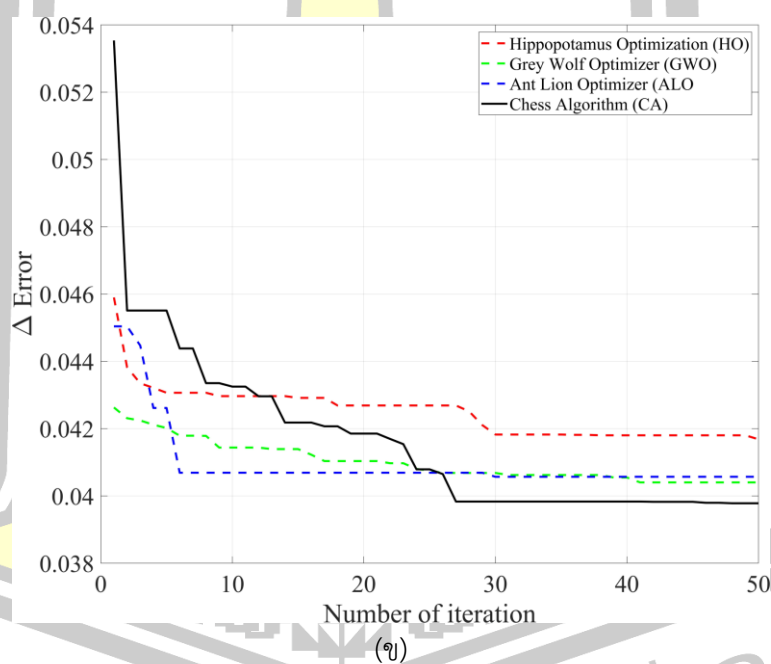
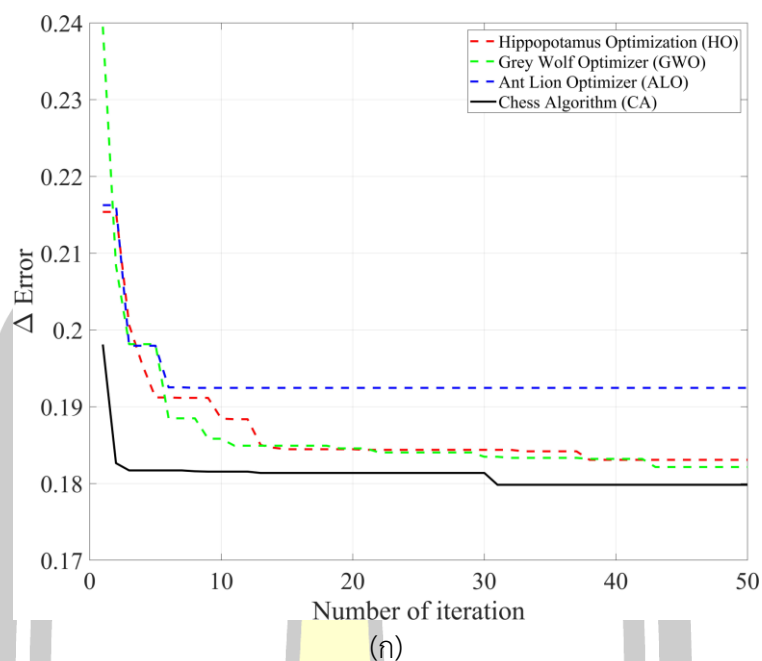
(ก) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 1 (เฮิรซ์) (ข) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 2 (เฮิรซ์)

(ค) การเบี่ยงเบนความถี่ในพื้นที่ 3 (เฮิรซ์)

(ง) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 1 (เมกกะวัตต์)

(จ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 2 (เมกกะวัตต์)

(ฉ) การเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของสายส่งในพื้นที่ 3 (เมกกะวัตต์)



ภาพประกอบ 41 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวนซ้ำกับความผิดพลาดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ISE

(ก) กรณีศึกษาที่ 1 (ข) กรณีศึกษาที่ 2

ตาราง 29 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 1

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.0030	0.2994	0.2028	0.8621	0.0038	0.3235	0.2654	0.3178	0.9904	0.5355	0.7580	0.3191
ALO	0.0050	0.2255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0131	0.0412	0.2749	0.7895	0.0000	0.9163	0.3275
GWO	0.0014	0.2253	0.1795	0.1157	0.0105	0.5229	0.0280	0.0060	0.9786	0.7913	0.1193	0.0294
HO	0.0994	0.1881	0.6757	0.7600	0.6307	0.6936	0.0473	0.5092	0.4077	0.1672	0.3627	0.4942

ตาราง 30 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเปรียบเทียบวิธีการในฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 2

วิธีการ	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{DD1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}	K_{DD2}	K_{P3}	K_{I3}	K_{D3}	K_{DD3}
CA (เสนอ)	0.3909	0.2077	0.5044	0.1322	0.0095	0.4147	0.5135	0.6229	1.0000	0.5264	0.0259	0.0059
ALO	0.4316	0.1935	0.3555	0.6905	0.1958	0.3487	0.3985	0.2509	0.8415	0.5565	0.6103	0.5219
GWO	0.4250	0.2119	0.3192	0.5263	0.3285	0.9931	0.4046	0.1852	0.9941	0.4620	0.1209	0.8786
HO	0.2005	0.2653	0.3582	0.7472	0.3226	0.7745	0.3909	0.9401	0.6922	0.2612	0.9930	0.3489

ตาราง 31 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีในการฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 1

วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.2150	50.1387	50.1051	24.0599	56.0474	96.3212
	Undershoot	49.8822	49.9418	49.9822	-143.1545	-50.0791	-28.8785
	Settling time	51.2576	51.0436	52.4753	33.1144	52.0000	46.4000
	ITAE	0.1798					
ALO	Overshoot	50.2150	50.1379	50.1065	15.8539	55.8206	97.6294
	Undershoot	49.9123	49.9573	49.9750	-143.4519	-46.3683	-18.8685
	Settling time	N/A	N/A	N/A	57.4000	39.3635	32.0418
	ITAE	0.1925					
GWO	Overshoot	50.2151	50.1396	50.1062	16.8029	56.1340	96.4088
	Undershoot	49.8876	49.9445	49.9840	-143.3121	-48.4321	-25.3522
	Settling time	58.9255	60.0000	59.9000	57.8000	60.0000	43.8497
	ITAE	0.1822					
HO	Overshoot	50.2142	50.1402	50.1092	13.4936	71.5428	97.4177
	Undershoot	49.8794	49.9430	49.9657	-143.0805	-49.8873	-19.9190
	Settling time	47.5000	56.4317	57.6118	59.4676	60.0000	36.2449
	ITAE	0.1831					

ตาราง 32 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบวิธีในการฟังก์ชัน ISE ในกรณีศึกษาที่ 2

วิธีการ	ผลลัพธ์	f_1	f_2	f_3	$P_{tie,1}$	$P_{tie,2}$	$P_{tie,3}$
CA (เสนอ)	Overshoot	50.0903	50.0554	50.0414	4.7757	22.7119	36.5079
	Undershoot	49.9510	49.9810	49.9940	-55.8543	-21.0112	-7.4564
	Settling time	84.8508	84.3492	77.7492	87.2508	93.8000	72.6508
	ITAE	0.0398					
ALO	Overshoot	50.0897	50.0556	50.0411	4.1026	22.9072	36.0111
	Undershoot	49.9495	49.9796	49.9936	-55.3886	-21.4551	-7.2667
	Settling time	81.4000	81.0000	82.2000	86.8000	94.2000	73.7492
	ITAE	0.0406					
GWO	Overshoot	50.0902	50.0560	50.0408	4.8894	24.5441	36.2915
	Undershoot	49.9451	49.9775	49.9895	-55.3834	-23.1864	-6.0927
	Settling time	81.2000	80.8000	78.4000	84.9000	80.1000	64.8000
	ITAE	0.0404					
HO	Overshoot	50.0940	50.0595	50.0447	7.5006	25.7476	38.6822
	Undershoot	49.9441	49.9737	49.9860	-58.6276	-23.4446	-9.1645
	Settling time	85.4508	79.6000	79.1000	82.7492	80.6000	67.9492
	ITAE	0.0417					

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง (PID+DD) ที่ได้รับการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีหามาตรุก ให้ผลลัพธ์ที่เหนือกว่าตัวควบคุมประเภทอื่น ๆ ได้แก่ พีไอดี (PID) และพีไอ (PI) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับเวลา เช่น ITAE และ ITSE ซึ่งตัวควบคุม PID+DD สามารถลดระยะเวลาที่ระบบใช้ในการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) ได้มากที่สุด นอกจากนี้ ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับเวลา เช่น IAE และ ISE ก็ยังพบว่าค่าความผิดพลาดของระบบ (Steady-State Error) ต่ำกว่าตัวควบคุมประเภทอื่นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบวิธีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID+DD โดยใช้วิธีต่าง ๆ ได้แก่ วิธีหามาตรุก วิธีแมลงช้าง วิธีฮิปโปโปเตมัส และวิธีหมาป่าสีเทา พบว่าวิธีหามาตรุกยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดทั้งในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับเวลา (ITAE และ ITSE) และฟังก์ชันที่ไม่เกี่ยวข้องกับเวลา (IAE และ ISE) โดยให้ค่าความผิดพลาด (Steady-State Error) และค่า Settling Time ที่ต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ปัญหาในการทดลอง

อย่างไรก็ตาม การทดลองในครั้งนี้นั้นยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การประเมินผลลัพธ์อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองจำลองที่อาจไม่สะท้อนความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าจริงทั้งหมด เช่น ความไม่แน่นอนของโหลดหรือการหน่วงเวลาที่อาจเกิดขึ้นในสถานการณ์จริง นอกจากนี้ การกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์และการตั้งค่าประชากรรวมถึงจำนวนรอบในการปรับจูน อาจมีผลต่อความสามารถในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด อีกทั้งยังไม่ได้มีการทดสอบกับระบบจริงหรือกรณีศึกษาที่หลากหลายมากพอ ดังนั้น ในการพัฒนาต่อไปควรพิจารณาปรับปรุงแบบจำลองให้สมจริงยิ่งขึ้น และทดลองในสถานะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากขึ้น

5.3 การนำไปใช้ในการพัฒนาในอนาคต

สำหรับการพัฒนาในอนาคต ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุพันธ์อันดับสอง (PID+DD) ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อยอดจากตัวควบคุมพีไอดี (PID) แบบดั้งเดิมนั้น มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบ

ที่มีความไม่แน่นอนสูงหรือมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น ระบบควบคุมแขนกลโรบอท หรือระบบควบคุมในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำและความเสถียรสูง วิธีหมากรุก ก็ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะในการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในระบบควบคุมความถี่ไหลด นอกจากนี้ วิธีการดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาอื่น ๆ ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสม เช่น การหาค่าการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบมีทิศทาง หรือการหาค่าที่เหมาะสมในระบบวิศวกรรมแขนงต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บรรณานุกรม

- [1] S. Ekinici, C. Ö, M. Ş. Ayas, D. Izci, M. Salman, and M. Rashdan, "Automatic Generation Control of a Hybrid PV-Reheat Thermal Power System Using RIME Algorithm," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 26919-26930, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367011.
- [2] T. Ali *et al.*, "Terminal Voltage and Load Frequency Control in a Real Four-Area Multi-Source Interconnected Power System With Nonlinearities via OBOO Algorithm," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 123782-123803, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3453755.
- [3] B. V. S. Acharyulu and V. S. S. A. K. Nayani, "Sea Lion Optimized PID + DD Controller for Load Frequency Control of a Hybrid Power System," *SN Computer Science*, vol. 4, no. 5, p. 567, 2023/07/29 2023, doi: 10.1007/s42979-023-02009-3.
- [4] S. Mirjalili, "The Ant Lion Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 83, pp. 80-98, 2015/05/01/2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.01.010>.
- [5] K. Pothiya and W. Sa-ngiamvibool, "Chess Algorithm Optimization Technique," Mahasarakham University, 2019.
- [6] M. H. Amiri, N. Mehrabi Hashjin, M. Montazeri, S. Mirjalili, and N. Khodadadi, "Hippopotamus optimization algorithm: a novel nature-inspired optimization algorithm," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 5032, 2024/02/29 2024, doi: 10.1038/s41598-024-54910-3.
- [7] S. Shukla and S. K. Jha, "Improved Grey Wolf Optimization Abetting Fuzzy Logic Controllers Used for Load Frequency Control in Two-Area Interlinked Reheat Thermal Power Plants applying Governor Dead Band and Generation Rate Constraint Non-Linearity," in *2024 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE)*, 24-25 Jan. 2024 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/IITCEE59897.2024.10467330.
- [8] D. Rasolomampionona, M. Klos, C. Cirit, P. Montegiglio, and E. E. D. Tuglie, "A

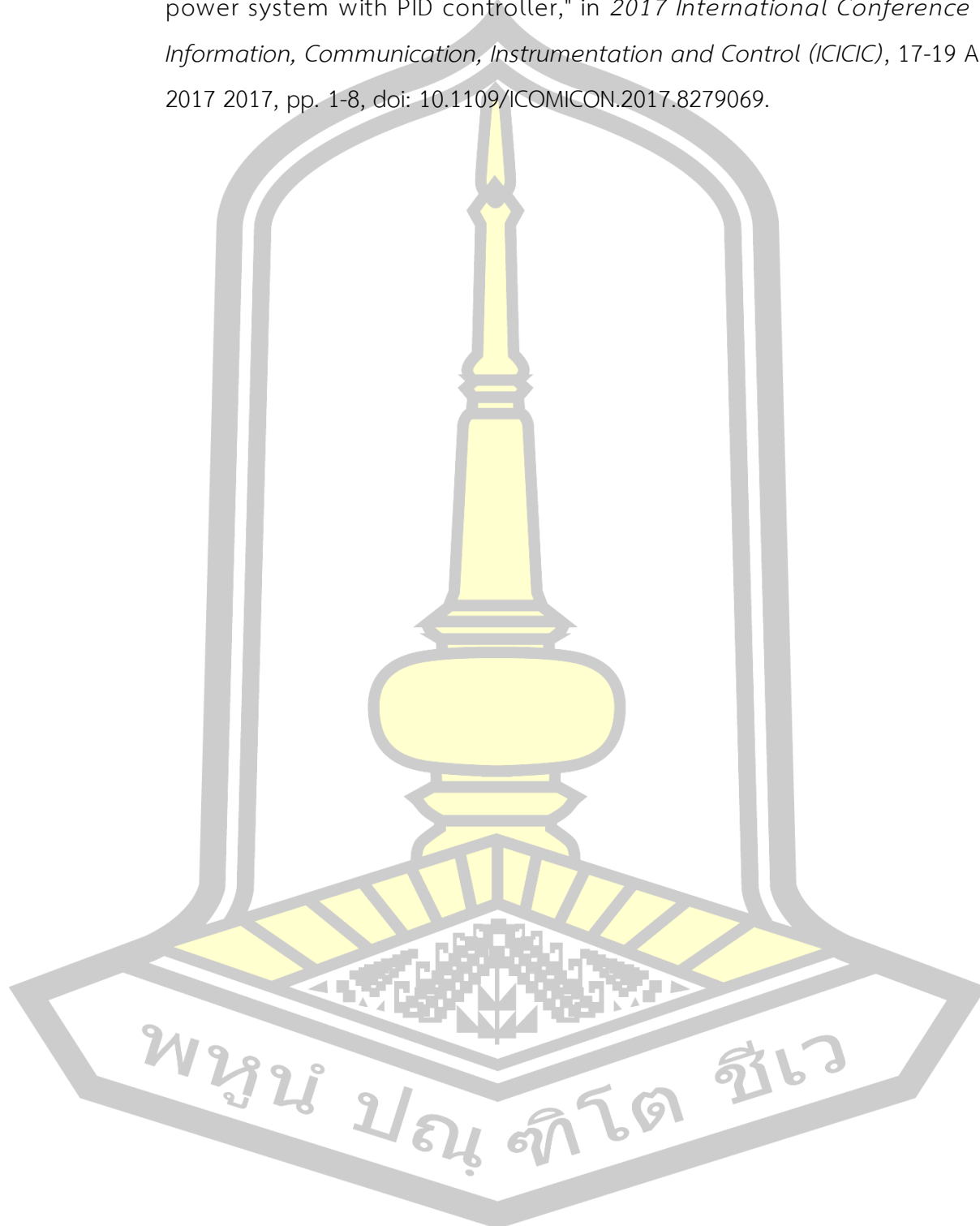
- new method for optimization of Load Frequency Control parameters in multi-area power systems using Genetic Algorithms," in *2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 28 June-1 July 2022 2022, pp. 1-9, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854535.
- [9] M. Omar, M. Soliman, A. M. A. Ghany, and F. Bendary, "Ant Colony Optimization based PID for single area load frequency control," in *2013 5th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 31 Aug.-2 Sept. 2013 2013, pp. 119-123.
- [10] T. Buranaudsawakul, K. Ardhan, S. Audomsi, W. Sa-Ngiamvibool, and R. Dulyala, "Optimal turning of a 2-DOF proportional-integral-derivative controller based on a chess algorithm for load frequency control," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Article vol. 15, no. 1, pp. 146-155, 2025, doi: 10.11591/ijece.v15i1.pp146-155.
- [11] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014/03/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- [12] D. Guha, P. K. Roy, and S. Banerjee, "Load frequency control of interconnected power system using grey wolf optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 27, pp. 97-115, 2016/04/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.10.004>.
- [13] G. Li, J. Zhang, X. Wu, and X. Yu, "Small-Signal Stability and Dynamic Behaviors of a Hydropower Plant With an Upstream Surge Tank Using Different PID Parameters," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 104837-104845, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3097500.
- [14] K. P. Sanoj and V. Dhanya Ram, "Optimal PID Controller Tuning for Multivariable Unstable Systems by Minimizing ITAE Criteria," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 57, pp. 391-396, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.05.067>.
- [15] T. Anderson *et al.*, "Frequency Regulation With Heterogeneous Energy Resources: A Realization Using Distributed Control," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 5, pp. 4126-4136, 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3071778.

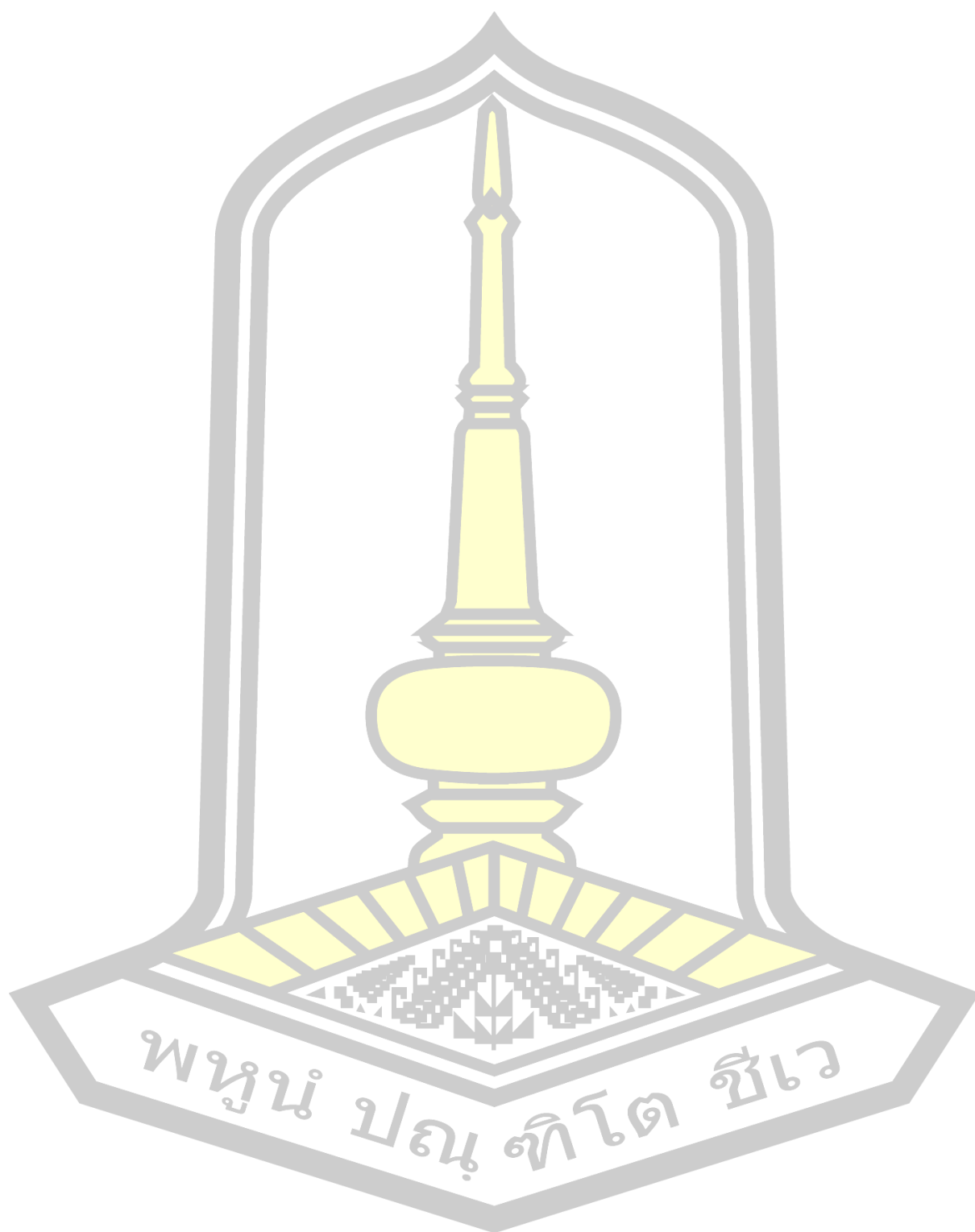
- [16] P. M. Meshram and R. G. Kanojiya, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor," in *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)*, 30-31 March 2012 2012, pp. 117-122.
- [17] M. Raju, L. C. Saikia, and N. Sinha, "Automatic generation control of a multi-area system using ant lion optimizer algorithm based PID plus second order derivative controller," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 80, pp. 52-63, 2016/09/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.037>.
- [18] A. Usman and B. Divakar, "Simulation Study of Load Frequency Control of Single and Two Area Systems," in *2012 IEEE Global Humanitarian Technology Conference*, 21-24 Oct. 2012 2012, pp. 214-219, doi: 10.1109/GHTC.2012.38.
- [19] B. Yang *et al.*, "Energy reshaping based passive fractional-order PID control design and implementation of a grid-connected PV inverter for MPPT using grouped grey wolf optimizer," *Solar Energy*, vol. 170, pp. 31-46, 2018/08/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.034>.
- [20] P. Dash, L. C. Saikia, and N. Sinha, "Comparison of performances of several Cuckoo search algorithm based 2DOF controllers in AGC of multi-area thermal system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 429-436, 2014/02/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.09.034>.
- [21] O. Elbaksawi, R. Fathy, A. A. Daoud, and R. A. A. El-aal, "Optimized load frequency controller for microgrid with renewables and EVs based recent multi-objective mantis search algorithm," *Results in Engineering*, vol. 26, p. 105472, 2025/06/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105472>.
- [22] P. A. Gbadega and Y. Sun, "Multi-area load frequency regulation of a stochastic renewable energy-based power system with SMES using enhanced-WOA-tuned PID controller," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, p. e19199, 2023/09/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19199>.
- [23] K. Pakdeesuwan *et al.*, "Improving Load Frequency Control in Power Systems by Optimizing PID Controllers with the Brown Bear Algorithm," in *Proceedings - IEEECON 2025: 2025 13th International Electrical Engineering Congress: Carbon*

- Neutrality: Challenges and Solutions Based on Sustainable Power of Nature*, 2025, doi: 10.1109/IEECON64081.2025.10987766. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105007135438&doi=10.1109%2fIEECON64081.2025.10987766&partnerID=40&md5=58ee63151af6722c7c6e163b7bb189df>
- [24] S. Ozumcan, A. Ozturk, M. Varan, and C. Andic, "A novel honey badger algorithm based load frequency controller design of a two-area system with renewable energy sources," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 272-279, 2023/11/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.002>.
- [25] S. Audomsi, S. Wattana, N. Uthathip, and W. Sa-ngiamvibool, "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*, Article vol. 18, no. 4, 2025, Art no. 915, doi: 10.3390/en18040915.
- [26] C. S. Rao, S. Santosh, and D. R. V, "Tuning optimal PID controllers for open loop unstable first order plus time delay systems by minimizing ITAE criterion," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 1, pp. 123-128, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.06.021>.
- [27] A. Hassan, M. M. Aly, A. Selim, A. Elmelegi, A. O. Aldhaibani, and E. A. Mohamed, "Optimal cascade 2DOF fractional order master-slave controller design for LFC of hybrid microgrid systems with EV charging technology," *Results in Engineering*, vol. 25, pp. 103647, 2025/03/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103647>.
- [28] R. Khadanga, A. Kumar, and S. Panda, "Frequency control in hybrid distributed power systems via type-2 fuzzy PID controller," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, 03/16 2021, doi: 10.1049/rpg2.12140.
- [29] S. R. Khuntia and S. Panda, "Comparative study of different controllers for automatic generation control of an interconnected hydro-thermal system with generation rate constraints," in *2010 International Conference on Industrial Electronics, Control and Robotics*, 27-29 Dec. 2010 2010, pp. 243-246, doi: 10.1109/IECR.2010.5720151.

- [30] H. Yu, Z. Guan, T. Chen, and T. Yamamoto, "Design of data-driven PID controllers with adaptive updating rules," *Automatica*, vol. 121, p. 109185, 2020/11/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2020.109185>.
- [31] K. J. Åström, C. C. Hang, and P. Persson, "Towards Intelligent PID Control," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 22, no. 13, pp. 53-58, 1989/09/01/ 1989, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040185-0.50014-2>.
- [32] M. M. Gulzar, M. Iqbal, S. Shahzad, H. A. Muqeet, M. Shahzad, and M. M. Hussain, "Load Frequency Control (LFC) Strategies in Renewable Energy-Based Hybrid Power Systems: A Review," *Energies*, vol. 15, no. 10, p. 3488, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3488>.
- [33] S. A. Hasen, Ö. Aydın, and S. Ayasun, "Design of an Optimal PI Controller for Time-Delayed Two-Area LFC-VID System," *2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, pp. 288-293, 2023.
- [34] X. Liu, S. Qiao, and Z. Liu, "A Survey on Load Frequency Control of Multi-Area Power Systems: Recent Challenges and Strategies," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2323, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/5/2323>.
- [35] M. Yin, Y. Xu, C. Shen, J. Liu, Z. Y. Dong, and Y. Zou, "Turbine Stability-Constrained Available Wind Power of Variable Speed Wind Turbines for Active Power Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 2487-2488, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2605012.
- [36] R. Pradhan, S. K. Majhi, J. K. Pradhan, and B. B. Pati, "Optimal fractional order PID controller design using Ant Lion Optimizer," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 281-291, 2020/06/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.10.005>.
- [37] J. Águila-León, C. Vargas-Salgado, D. Díaz-Bello, and C. Montagud-Montalvá, "Optimizing photovoltaic systems: A meta-optimization approach with GWO-Enhanced PSO algorithm for improving MPPT controllers," *Renewable Energy*, vol. 230, p. 120892, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120892>.
- [38] S. Audomsi *et al.*, "The development of pid controller by chess algorithm," *Engineering Access*, vol. 10, no. 1, pp. 46-50, 2024.

- [39] A. Sahu and L. B. Prasad, "Load frequency control of interconnected five-area power system with PID controller," in *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, 17-19 Aug. 2017 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICOMICON.2017.8279069.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายฉัตรมงคล อารีญาติ
วันเกิด	18 กรกฎาคม พ.ศ.2545
สถานที่เกิด	อำเภอหนองบัวระเหว จังหวัดชัยภูมิ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 292 หมู่4 บ้านหัวหนอง ตำบลหนองบัวระเหว อำเภอหนองบัวระเหว จังหวัดชัยภูมิ รหัสไปรษณีย์ 36250
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2564 มัธยมศึกษาตอนปลาย แผน วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนหนองบัวระเหววิทยาคาร พ.ศ.2567 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2568 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภิโต ชีเว