

การออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อ
เพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ในไมโครกริดแยกโดด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design of Virtual Inertia and Required Power Reserve for Photovoltaic System to
Enhance Frequency Stability in Isolated Microgrid



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ ต้องการสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพ เชิงความถี่ในไมโครกริดแยกโดด
โดย	นายณัฐนันท์ ชลิตตาภรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนวัช แสงสว่าง)

ณัฐนันท์ ชลิตตาภรณ์ : การออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่
ต้องการสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ในไมโครกริดแยก
โดด. (Design of Virtual Inertia and Required Power Reserve for
Photovoltaic System to Enhance Frequency Stability in Isolated Microgrid)
อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.พิสิษฐ์พล จีรพจนานุกรักษ์

ในปัจจุบัน มีการนำระบบเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความ
ต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในไมโครกริดที่มีกำลังการผลิตเพียงพอและสามารถเดิน
เครื่องแบบแยกโดดได้นั้น การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนระบบเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อเสถียรภาพและ
ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าต่ำลงเนื่องจากค่าความเฉื่อยของระบบลดลง เพราะ ระบบเซลล์
แสงอาทิตย์ไม่มีค่าความเฉื่อย นอกจากนี้ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะทำงานในโหมด
กำลังไฟฟ้าสูงสุด ทำให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถปรับเพิ่มกำลังไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อการ
เปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบค่าความเฉื่อย
เสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการโดยใช้ระบบอนุমানนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้ เพื่อเพิ่ม
ความสามารถของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ
ผลการทดสอบแสดงว่า ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกควบคุมด้วยวิธีที่เสนอต้องการความเฉื่อย
เสมือนและต้องการกำลังไฟฟ้าสำรองที่น้อยกว่าระบบที่ใช้การควบคุมความเฉื่อยเสมือนและ
กำลังไฟฟ้าสำรองแบบคงที่แต่ยังคงสามารถควบคุมการเบี่ยงเบนความถี่ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270083021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Frequency stability/ PV system/ Virtual inertia/ Required power reserve/ Adaptive neuro-fuzzy inference system

Nuttanan Chalittaporn : Design of Virtual Inertia and Required Power Reserve for Photovoltaic System to Enhance Frequency Stability in Isolated Microgrid. Advisor: PISITPOL CHIRAPONGSANANURAK, Ph.D.

In recent years, the usage of photovoltaic (PV) systems is increasing for responding to the continuously rising demand. In microgrids that have sufficient generation and are able to operate in an isolated mode, the increase of PV system penetration is the cause of lower system stability and security due to the lower system inertia because the PV systems have no inertia. In addition, typical PV systems operate in maximum power point tracking (MPPT) mode. Thus, PV generation cannot increase to respond to the system frequency deviation. This thesis proposes a design of virtual inertia and required power reserve by using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) to enhance the capability of PV systems for responding to the system frequency deviation. The results show that the PV system controlled by the proposed method requires less virtual inertia and power reserve than the system using constant virtual inertia and power reserve, whereas the system is still able to keep the frequency deviation within the specified range.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์พล จีรพจนานุกรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาเพื่อให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงได้ตรวจสอบและ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จเรียบร้อย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนวัช แสงสว่าง ที่ได้สละเวลา เพื่อตรวจสอบ ให้คำแนะนำ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเป็นฉบับสมบูรณ์และลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นิสิตรระดับบัณฑิตศึกษาสาขาในกลุ่มวิจัยพลังงานทุกท่านที่ให้ข้อคิดเห็น และเป็นกำลังใจให้กันเสมอมา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ อำนวยความสะดวกในการใช้งานอุปกรณ์และสถานที่ รวมถึงอำนวยความสะดวกในการติดต่อ ประสานงานและดำเนินงานต่าง ๆ เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และญาติพี่น้อง ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้

ณัฐนันท์ ชลิตตาภรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ญ	ญ
สารบัญรูป.....ฉ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 2	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน 2	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและการดำเนินงาน 3	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์..... 3	3
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 5	5
บทที่ 2 การตอบสนองเชิงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง..... 7	7
2.1 สมการการแกว่ง (Swing Equation)..... 7	7
2.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่..... 9	9
2.2.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและโหลด 9	9
2.2.2 แบบจำลองกังหันต้นกำเนิดกำลังและอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ 10	10
2.3 การควบคุมและการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง..... 12	12
2.3.1 การตอบสนองแบบปฐมภูมิ 13	13

2.3.2 การตอบสนองแบบทฤษฎี.....	14
2.4 ข้อกำหนดและดัชนีชี้วัดทางด้านความถี่ไฟฟ้าของระบบ.....	15
บทที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
3.1 หลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
3.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	18
3.1.2 อินเวอร์เตอร์.....	20
3.1.3 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
3.2 ผลกระทบที่เกี่ยวกับความถี่จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
3.3 การควบคุมกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
3.3.1 แนวคิดพื้นฐาน.....	25
3.3.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 4 หลักการพื้นฐานของฟัซซีเซต.....	30
4.1 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory).....	30
4.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function :MF).....	31
4.2.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular MF).....	31
4.2.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal MF).....	32
4.2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MF).....	33
4.2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบระฆัง (Generalized bell MF).....	34
4.3 ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี (Fuzzy Logic).....	34
4.3.1 ตัวแปรทางภาษา (Linguistic Variables).....	34
4.3.2 การอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference System: FIS).....	35
บทที่ 5 ระบบอนุมานนิเวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้.....	39
5.1 โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้.....	39
5.1.1 ชั้นที่ 1.....	40

5.1.2	ขั้นที่ 2	40
5.1.3	ขั้นที่ 3	41
5.1.4	ขั้นที่ 4	41
5.1.5	ขั้นที่ 5	41
5.2	การฝึกสอนระบบอนุมานนิเวศวิธีแบบปรับตัวได้	42
5.2.1	การประมาณค่าโดยวิธี Least-Squares Estimator	42
5.2.2	การประมาณค่าโดยวิธี Backpropagation	43
5.2.3	การฝึกสอนแบบ Hybrid Learning Algorithm	45
บทที่ 6	การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ ต้องการสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	46
6.1	การศึกษาผลกระทบของโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบโครงข่ายไฟฟ้า	46
6.1.1	ระบบทดสอบ	46
6.1.2	ผลการศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่ในระบบ	48
6.2	การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนสำหรับระบบเซลล์ แสงอาทิตย์	50
6.2.1	ระบบทดสอบ	50
6.2.2	ผลการศึกษาและออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน	52
6.3	การศึกษาความเป็นไปได้ในการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์ แสงอาทิตย์	54
6.3.1	ระบบทดสอบ	54
6.3.2	ผลการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์	56
บทที่ 7	การประยุกต์ใช้ ANFIS ในการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์	58
7.1	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการฝึกสอน ANFIS	58

7.2 การกำหนดข้อมูลขาเข้าของ ANFIS.....	59
7.3 การสร้าง ANFIS.....	61
7.3.1 การทดสอบโดยใช้ชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันในการคำนวณค่าความ เฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ.....	61
7.3.2 การทดสอบโดยใช้จำนวนฟังก์ชันเซตที่แตกต่างกันในการคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือนและ กำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ.....	62
บทที่ 8 ผลการทดสอบการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการโดยใช้วิธี ANFIS.....	64
8.1 ระบบทดสอบและพารามิเตอร์.....	64
8.2 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	66
8.2.1 การทดสอบที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพขณะที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้า ได้ในปริมาณต่าง ๆ.....	66
8.2.2 การทดสอบที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพขณะเกิดการรบกวนจากการเพิ่มขึ้นของความ ต้องการใช้ไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ.....	70
8.2.3 การทดสอบที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพในกรณีที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ เปลี่ยนไป.....	75
8.2.4 การทดสอบที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนด้วยวิธี ต่าง ๆ.....	79
บทที่ 9 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	83
9.1 สรุปผลงานวิจัย.....	83
9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	84
บรรณานุกรม.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	89

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดความถี่ไฟฟ้าในภูมิภาคยุโรป.....	15
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับเวลา ในภูมิภาคยุโรป	16
ตารางที่ 5.1วิธีการฝึกสอนแบบ Hybrid Learning Algorithm	45
ตารางที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ.....	47
ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบที่ใช้ศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	48
ตารางที่ 6.3 ผลกระทบทางด้านความถี่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์	50
ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน	52
ตารางที่ 6.5 ผลกระทบทางด้านความถี่ที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน.....	54
ตารางที่ 6.6 พารามิเตอร์ของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์	56
ตารางที่ 7.1 ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อ 7.3.1.....	62
ตารางที่ 7.2 ค่า RMSE ของค่าความเฉื่อยเสมือนจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.1	62
ตารางที่ 7.3 ค่า RMSE ของค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.1	62
ตารางที่ 7.4 ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อ 7.3.2.....	63
ตารางที่ 7.5 ค่า RMSE ของค่าความเฉื่อยเสมือนจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.2	63
ตารางที่ 7.6 ค่า RMSE ของค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.2.....	63
ตารางที่ 8.1 ลักษณะของ ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ	65
ตารางที่ 8.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 1	67
ตารางที่ 8.3 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 1.....	67
ตารางที่ 8.4 ผลการทดสอบที่ 1.....	69
ตารางที่ 8.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 2	71

ตารางที่ 8.6 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 2.....71

ตารางที่ 8.7 ผลการทดสอบที่ 2.....73

ตารางที่ 8.8 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 3.....75

ตารางที่ 8.9 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 3.....76

ตารางที่ 8.10 ผลการทดสอบที่ 3.....78

ตารางที่ 8.11 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 4.....79

ตารางที่ 8.12 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 480

ตารางที่ 8.13 ผลการทดสอบที่ 4.....82



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพการควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	9
รูปที่ 2.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	9
รูปที่ 2.3 แบบจำลองของโหลดทางไฟฟ้า.....	10
รูปที่ 2.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด.....	10
รูปที่ 2.5 แบบจำลองของกังหันต้นกำเนิดกำลัง	11
รูปที่ 2.6 กราฟลักษณะของรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	11
รูปที่ 2.7 แบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ	12
รูปที่ 2.8 แบบจำลองระบบควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	12
รูปที่ 2.9 แบบจำลองที่มีการตอบสนองแบบปฏิกิริยาและทุติยภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส... 14	14
รูปที่ 2.10 กราฟลักษณะรูปที่มีการปรับสัญญาณควบคุมอ้างอิง (ΔP_{ref})	14
รูปที่ 2.11 ข้อจำกัดทางด้านความถี่ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	17
รูปที่ 3.1 กราฟกระแสและแรงดันทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	19
รูปที่ 3.2 กราฟกระแสและแรงดันทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	19
รูปที่ 3.3 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	20
รูปที่ 3.4 การทำงานของวิธีการรบกวนและสังเกตเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด	21
รูปที่ 3.5 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบแยกตัวอิสระ	22
รูปที่ 3.6 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า	23
รูปที่ 3.7 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบผสม	23
รูปที่ 3.8 แบบจำลองการควบคุมกำลังการผลิตจากโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน.....	26
รูปที่ 3.9 แบบจำลองการควบคุมกำลังการผลิตจากกราฟลักษณะรูปเสมือน	27
รูปที่ 3.10 แบบจำลองการควบคุมกำลังการผลิตจากสมการการแกว่งและกราฟลักษณะรูป	28

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set) และฟัซซีเซต (Fuzzy set)	31
รูปที่ 4.2 กราฟความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular MF)	32
รูปที่ 4.3 กราฟความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal MF)	33
รูปที่ 4.4 กราฟความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MF)	33
รูปที่ 4.5 กราฟความเป็นสมาชิกแบบระฆัง (Generalized bell MF)	34
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงฟัซซีเซตโดย “ความเร็ว” เป็นตัวแปรทางภาษา	35
รูปที่ 4.7 แผนภาพโครงสร้างของระบบอนุมานแบบฟัซซี	36
รูปที่ 4.8 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani ด้วยตัวดำเนินการ Max-Min	37
รูปที่ 4.9 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno	38
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้	39
รูปที่ 5.2 โครงสร้างระบบแบบปรับตัวได้	44
รูปที่ 6.1 แผนภาพระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย	47
รูปที่ 6.2 แบบจำลองของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย	48
รูปที่ 6.3 ความถี่ไฟฟ้าของระบบเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์	49
รูปที่ 6.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์	49
รูปที่ 6.5 แผนภาพระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน	51
รูปที่ 6.6 แบบจำลองของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน	51
รูปที่ 6.7 ความถี่ของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน	52
รูปที่ 6.8 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน	53
รูปที่ 6.9 กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน	53

รูปที่ 6.10 แผนภาพระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์	55
รูปที่ 6.11 แบบจำลองของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	55
รูปที่ 6.12 ความถี่ต่ำที่สุดของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและอัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองต่างกัน.....	56
รูปที่ 6.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุดของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและอัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองต่างกัน.....	57
รูปที่ 7.1 แบบจำลองที่ใช้ในการพิจารณากำหนดข้อมูลขาเข้า ANFIS.....	59
รูปที่ 7.2 รูปแบบของ ANFIS	60
รูปที่ 8.1 แผนภาพของระบบทดสอบ.....	64
รูปที่ 8.2 แบบจำลองของระบบทดสอบ.....	65
รูปที่ 8.3 ลักษณะ ANFIS ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ.....	65
รูปที่ 8.4 ลักษณะ ANFIS ในการคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือน.....	66
รูปที่ 8.5 ความถี่ในการทดสอบที่ 1.....	68
รูปที่ 8.6 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 1.....	68
รูปที่ 8.7 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 1.....	69
รูปที่ 8.8 ความถี่ในการทดสอบที่ 2.....	72
รูปที่ 8.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 2.....	72
รูปที่ 8.10 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 2.....	73
รูปที่ 8.11 ความถี่ในการทดสอบที่ 3.....	76
รูปที่ 8.12 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 3.....	77
รูปที่ 8.13 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 3.....	77
รูปที่ 8.14 ความถี่ในการทดสอบที่ 4.....	80
รูปที่ 8.15 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 4.....	81

รูปที่ 8.16 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 4.....81



บทที่ 1 บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการดำเนินงาน ขั้นตอนการศึกษาและการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาในแต่ละส่วนของบทนำมีดังนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในหลายภาคส่วน เช่น ภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม และสาธารณูปโภคต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีความต้องการกำลังการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน รวมไปถึงการรณรงค์การใช้พลังงานอย่างยั่งยืน พลังงานหมุนเวียนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทในระบบไฟฟ้า แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 (PDP2018 Revision 1) [1] มีเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อลดมลภาวะที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก โดยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนโดยรวมจากร้อยละ 16.1 เป็นร้อยละ 26.3 ในปี พ.ศ. 2574 โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนหลักในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า โดยมีอัตราส่วนอยู่ที่ร้อยละ 27 ของแหล่งพลังงานหมุนเวียนทั้งหมดในปัจจุบัน และมีเป้าหมายที่จะเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 50 ในปี พ.ศ. 2574 รวมไปถึงการส่งเสริมจากภาครัฐในการทำระบบโครงข่ายไฟฟ้าแบบไมโครกริดที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในพื้นที่ห่างไกลระบบสายส่งเมื่อถูกตัดการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าภายนอก แต่ทว่าระบบโครงข่ายไฟฟ้าแบบไมโครกริดในสถานะแยกตัวอิสระนั้นมีเสถียรภาพทางด้านไฟฟ้าต่ำกว่าระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหรือระบบจำหน่าย เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไมโครกริดในสถานะแยกตัวอิสระ ศักยภาพในการรักษาเสถียรภาพไฟฟ้านั้นอาจจะไม่เพียงพอ จนเป็นเหตุให้เกิดไฟฟ้าดับในระบบไมโครกริดได้

ในบางไมโครกริดนั้น อาจจะใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเป็นหลัก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม เมื่อมีสัดส่วนของแหล่งพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบจะมีค่าต่ำลง [2] ซึ่งส่งผลโดยตรงกับเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบไฟฟ้า เนื่องจากกำลังการผลิตจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์โดยปกติแล้วจะถูกควบคุมให้อยู่ในโหมดผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) และไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเอง เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไมโครกริด แหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจึงไม่สามารถปรับเปลี่ยนการจ่ายไฟฟ้าเพื่อตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไมโครกริดได้ ส่งผลให้อาจเกิดการสูญเสียเสถียรภาพได้ง่าย การลดโอกาสที่จะเกิดเหตุขัดข้องทางไฟฟ้าโดยการควบคุมกำลัง

การผลิตของพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ยืดหยุ่น และไม่ซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเพิ่มขึ้น หรือ การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่ยังมีราคา ค่อนข้างแพงในตลาดปัจจุบัน

แหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะส่งผ่านไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เข้าสู่อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ การควบคุมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ นั้นสามารถทำได้ผ่านการควบคุมอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบันนั้นสามารถควบคุม กำลังไฟฟ้าให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบได้อย่างรวดเร็ว จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า ใน ระบบไมโครกริดนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าต่ำ เพราะฉะนั้นการทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจาก พลังงานแสงอาทิตย์มีโมเมนต์ความเฉื่อยเหมือน จะเป็นการช่วยเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบให้มี ค่ามากขึ้น [3],[4] โดยทั่วไปแล้วระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกำลังไฟฟ้าที่จุด กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) แต่ในการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนให้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องลดกำลังการผลิตลงไปส่วนหนึ่ง เพื่อเป็น กำลังไฟฟ้าสำรองในการตอบสนองเพื่อรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นใน ระบบ

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้ในการออกแบบโมเมนต์ความเฉื่อย เสมือนสำหรับแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการใช้ระบบอนุมานนิวโรฟuzzyแบบปรับตัว ได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System : ANFIS) มาช่วยในการกำหนดค่าความเฉื่อย เสมือนของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการให้เหมาะสมกับไมโครกริดนั้นเพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อออกแบบค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมกับการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าความเฉื่อยเสมือน
- 2) เพื่อออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ในไมโครกริด

1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน

- 1) พิจารณาระบบไมโครกริด ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส แหล่งผลิตไฟฟ้า จากพลังงานแสงอาทิตย์ และผู้ใช้พลังงานไฟฟ้า
- 2) พิจารณาการรบกวนทางไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ ความ ต้องการใช้ไฟฟ้าหรือการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสออกจากระบบ

- 3) ออกแบบการควบคุมโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนให้กับแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
- 4) ไม่พิจารณาผลกระทบทางด้านแรงดันของระบบ

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยในหัวข้อดังต่อไปนี้
 - 1.1 ศึกษาคุณลักษณะของระบบไฟฟ้าแบบไมโครกริด ปัญหา และผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบไมโครกริด
 - 1.2 ศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
 - 1.3 ศึกษาการเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ โดยการควบคุมแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและวิธีการกำหนดกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการใช้
- 2) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย
- 3) ออกแบบและจำลองระบบทดสอบไมโครกริด
- 4) ออกแบบค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองและค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมต่อระบบทดสอบ
- 5) ทดสอบการทำงานของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนในสถานะต่าง ๆ
- 6) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ระบบไมโครกริดมีเสถียรภาพทางด้านความถี่มากขึ้น โดยการควบคุมแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

เนื่องจากความต้องการไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กำลังการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีอยู่ไม่เพียงพอ รวมถึงการรณรงค์ด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเองเช่น แหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าสูงขึ้น [5] ซึ่งส่งผลให้ระบบไฟฟ้านั้นมีโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ งานวิจัย [6] กล่าวถึงปัญหาและ

ผลกระทบจากการที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้า จากพลังงานหมุนเวียนจำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ในการแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับ ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้านี้ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อย ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการ ตอบสนองต่อความถี่จำเป็นที่จะต้องทำงานได้รวดเร็วมากขึ้น เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ และใน รายงาน [7] ได้กล่าวถึงการสูญเสียเสถียรภาพทางไฟฟ้าจนกระทั่งมีการปลดวงจรของโหลดและเกิด ไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง โดยมีสาเหตุหลักมาจากการปลดอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ กับระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ

จากที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับการตอบสนองต่อความผิดปกติในระบบ อินเวอร์เตอร์เป็น อุปกรณ์หลักที่สำคัญที่มีความสามารถในการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้า กำลัง งานวิจัย [8-11] นำเสนอแนวคิดในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้มีพฤติกรรมคล้ายกับเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าซิงโครนัส (Virtual synchronous machine) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ให้แก่ระบบไฟฟ้า โดยสามารถจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนเพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบให้สูงขึ้น และ จำลองกราฟลักษณะรูปเสมือนเพื่อตอบสนองต่อความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน เมื่อระบบ ไฟฟ้าเกิดการรบกวนขนาดใหญ่จนส่งผลทำให้ความถี่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน อินเวอร์เตอร์ที่ถูก ควบคุมให้มีพฤติกรรมคล้ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ความถี่ ส่งผลให้ความรุนแรงของความผิดปกติลดลงและระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น

นอกจากการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้มีความสามารถในการตอบสนองเชิงความถี่แล้ว งานวิจัย [12],[13] ได้กล่าวถึงระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อย ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเชิง ความถี่ต่ำ จึงมีแนวคิดที่ว่าควรเปลี่ยนจุดทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จากจุดที่สามารถจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุด เป็นจุดทำงานที่สามารถเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตไฟฟ้าได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง ความถี่ขึ้นในระบบ (Power reserve) ในรายงาน [14] กล่าวถึงการให้บริการควบคุมความถี่ผ่าน ตลาดซื้อขายไฟฟ้า ทั้งในกรณีที่ควบคุมเพื่อรักษาความถี่ของระบบในสภาวะปกติ และในกรณีที่ ควบคุมสมดุลกำลังไฟฟ้าเมื่อระบบไฟฟ้ามีเหตุขัดข้องทำให้ต้องการกำลังไฟฟ้าอย่างเร่งด่วน การ ควบคุมความถี่โดยใช้กำลังไฟฟ้าสำรองจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาขายในตลาดซื้อขาย ไฟฟ้าในส่วนของบริการควบคุมการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ โดยมีอัตราค่าบริการตาม กำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการให้บริการ

การศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองและวิธีการเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่โดยใช้โมเมนต์ความ เฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการมีความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถใช้วิธีการทางพีชคณิต [15] ในการหาคำตอบได้ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การเพิ่มความแม่นยำใน การหาคำตอบที่ต้องการทำได้โดยการลดค่าความคลาดเคลื่อนของพีชคณิต โดยการปรับพีชคณิตนั้น จำเป็นจะต้องคำนึงถึงความซับซ้อนของระบบและความแม่นยำของระบบควบคุมกันไปด้วย

งานวิจัย [16] กล่าวถึงดัชนีชี้วัดทางด้านความถี่ที่ใช้ประเมินสถานะของระบบไฟฟ้า 2 รูปแบบคือ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด (Frequency nadir) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Rate of Change of Frequency : RoCoF) ในกรณีที่ความถี่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานไปถึงจุดวิกฤต จะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสูญเสียเสถียรภาพเชิงความถี่ นอกจากนี้หากความถี่ในระบบมีค่าต่ำอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ เนื่องจากเกิดภาวะฟลักซ์แม่เหล็กเกินในแกนเหล็กจนเกิดเป็นความร้อนสะสม ส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงาน เพื่อปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสออกจากระบบ และอาจทำให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 9 บทดังนี้

- 1) บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการดำเนินงาน ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- 2) บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการตอบสนองเชิงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง กล่าวถึง สมการการแกว่ง การจำลองระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาทางด้านความถี่ การควบคุมและการตอบสนองต่อความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ข้อกำหนดและดัชนีชี้วัดทางด้านความถี่
- 3) บทที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวถึง หลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบทางด้านความถี่จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และการควบคุมกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 4) บทที่ 4 หลักการพื้นฐานของฟิชชีเซต กล่าวถึง ทฤษฎีฟิชชีเซต ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟิชชี และตรรกศาสตร์ฟิชชี
- 5) บทที่ 5 ระบบอนุমানนิวโรฟิชชีแบบปรับตัวได้ กล่าวถึง โครงสร้างระบบอนุমানนิวโรฟิชชีแบบปรับตัวได้ และการฝึกสอนระบบอนุমানนิวโรฟิชชีแบบปรับตัวได้
- 6) บทที่ 6 การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวถึง การศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาและออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

7) บทที่ 7 การประยุกต์ใช้ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ในการ ออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการสำหรับระบบผลิต ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวถึง ปัจจัยที่ส่งผลต่อการฝึกสอน ANFIS การ กำหนดข้อมูลขาเข้าของ ANFIS และการสร้าง ANFIS

8) บทที่ 8 ผลการทดสอบการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ ต้องการโดยใช้วิธี ANFIS กล่าวถึง ระบบทดสอบ วิธีการทดสอบ ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

9) บทที่ 9 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต กล่าวถึง บทสรุปของการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ ต้องการโดยใช้วิธี ANFIS และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 การตอบสนองเชิงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

หลักการพื้นฐานที่เกี่ยวกับความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังมาจากการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งโครนส์ให้เพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มีค่าเท่ากับความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งความถี่ไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญที่บ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการควบคุมความถี่จะเกิดจากพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลัก โดยการตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษาความถี่ได้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การตอบสนองแบบปฐมภูมิ และการตอบสนองแบบทุติยภูมิ โดยหัวข้อแรกจะกล่าวถึงสมการการแกว่ง ซึ่งเป็นพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์ หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่ การควบคุมและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงข้อกำหนดทางด้านความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 สมการการแกว่ง (Swing Equation)

สมการการแกว่งเป็นสมการที่อธิบายถึงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์ ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์จะมีส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) และส่วนที่สามารถหมุนได้เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งหลักการการหมุนของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการนี้

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.1)$$

โดยที่ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโรเตอร์ต้นกำเนิดกำลัง (กิโลกรัม · ตารางเมตร)

θ_m คือ ระยะทางเชิงมุมของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงของสเตเตอร์ (เรเดียน)

T_m คือ แรงบิดทางกลจากต้นกำเนิดกำลังไฟฟ้า (นิวตัน · เมตร)

T_e คือ แรงบิดทางไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (นิวตัน · เมตร)

ในสภาวะปกติแรงบิดทางกลและแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากัน นั่นหมายความว่า ความเร็วรอบของโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมซึ่งโครนส์ตลอดเวลาที่แรงบิดทั้งสองมีค่าเท่ากัน จึงสามารถบอกความสัมพันธ์ของตำแหน่งโรเตอร์เทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์ได้จากสมการ

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.2)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.4)$$

โดยที่ ω_{sm} คือ ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (เรเดียน/วินาที)

δ_m คือ ระยะทางเชิงมุมของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์ (เรเดียน)

เมื่อนำสมการ (2.4) แทนในสมการ (2.1) และคูณด้วย ω_{sm} ทั้งสมการจะได้

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m\omega_m - T_e\omega_m \quad (2.5)$$

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.6)$$

โดยที่ ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (เรเดียน/วินาที)

P_m คือ กำลังทางกลจากต้นกำเนิดกำลัง (ต่อหน่วย)

P_e คือ กำลังทางไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อหน่วย)

โดยสมการดังกล่าวนี้จะละลายยกกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานหรือความหน่วงของแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์จากสมการพลังงานจลน์ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อย (H) ของตัวมันเอง ซึ่งเป็นการนิยามถึงอัตราส่วนของพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_m^2}{S_b} \quad (2.7)$$

โดยที่ H คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อย (วินาที)

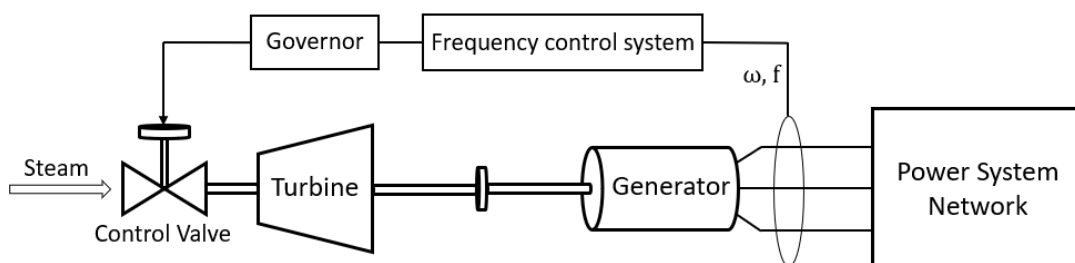
S_b คือ พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (โวลต์ · แอมแปร์)

เมื่อนำสมการ (2.7) แทนในสมการ (2.6) แล้วจัดรูปจะได้สมการ

$$2H \frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_e \quad (2.8)$$

2.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่

แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังนี้จะประกอบไปด้วยแบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการตอบสนองต่อความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังรูปที่ 2.1 [17]



รูปที่ 2.1 แผนภาพการควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.2.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและโหลด

จากสมการที่ 2.8 เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยการทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้

$$2H \frac{d\Delta\omega_m}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2.9)$$

โดยที่ $\Delta\omega_m$ คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง

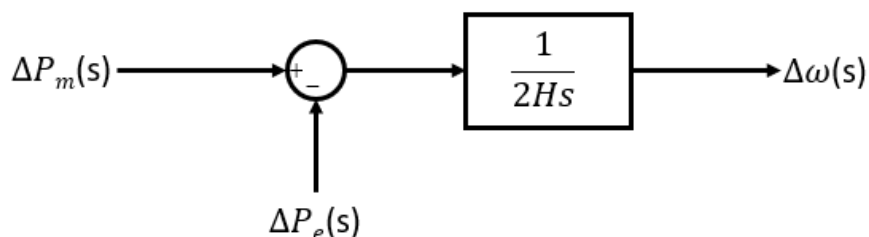
ΔP_m คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังทางกลจากต้นกำเนิดกำลัง

ΔP_e คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังทางไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อทำการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) สมการที่ 2.9 จะได้

$$\Delta\omega(s) = \frac{1}{2Hs} (\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)) \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 สามารถเขียนแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

โหลดทางไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ โหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ไฟฟ้าของระบบและโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ไฟฟ้าของระบบ โดยความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้ง 2 กลุ่มสามารถอธิบายได้ดังสมการ

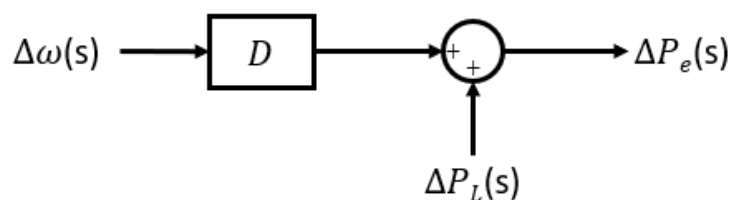
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (2.11)$$

โดยที่ ΔP_L คือ การเปลี่ยนแปลงของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่

D คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความถี่

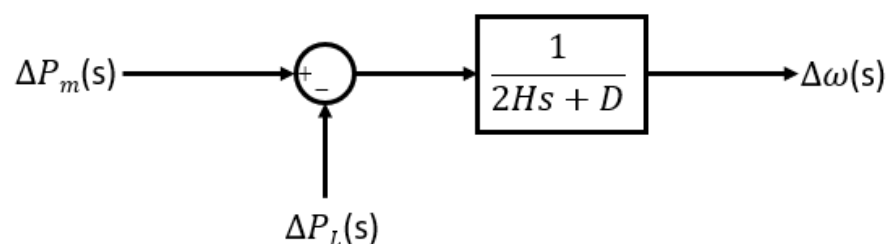
$\Delta\omega$ คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบ

เมื่อทำการแปลงลาปลาซสมการที่ 2.11 เพื่อนำมาเขียนแบบจำลองของโหลดทางไฟฟ้าจะได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของโหลดทางไฟฟ้า

เมื่อนำแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและแบบจำลองของโหลดทางไฟฟ้ามารวมเข้าด้วยกันแล้วทำการลดรูปจะได้ดังรูปที่ 2.4

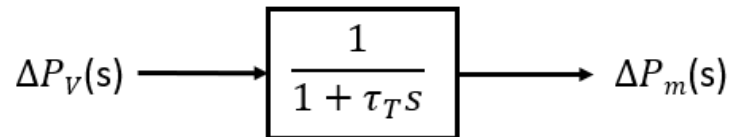


รูปที่ 2.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

2.2.2 แบบจำลองกักหนันทันกำเนิดกำลังและอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ

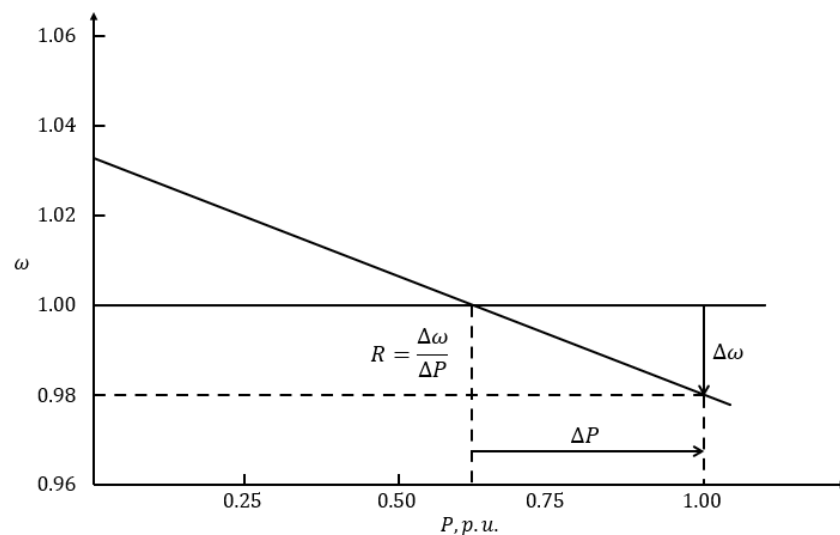
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะทำงานได้ต้องมีต้นกำเนิดกำลังทางกลโดยใช้กังหันซึ่งมีอยู่หลายประเภทเช่น แก๊ส ใช้น้ำ เป็นต้น และส่วนที่ควบคุมความเร็วรอบโดยเปลี่ยนแปลง

กำลังทางกล การเปลี่ยนแปลงกำลังทางกลจากกังหันต้นกำเนิดกำลังไปตามอุปกรณ์ควบคุมความเร็วจะไม่เกิดในทันทีทันใด โดยจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลา (τ_T) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของกังหันแต่ละประเภท แบบจำลองของกังหันต้นกำเนิดกำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของกังหันต้นกำเนิดกำลัง

ในสถานะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังของโหลดทางไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสจะรับหรือจ่ายพลังงานจลน์ซึ่งเก็บอยู่ในรูปของการหมุนของโรเตอร์ส่งผลให้ความเร็วรอบและความถี่ไฟฟ้านั้นเบี่ยงเบนไปจากค่ามาตรฐาน ในการทำงานนั้นอุปกรณ์ควบคุมความเร็วจะถูกออกแบบมาให้ทำงานตามกราฟดังรูปที่ 2.6 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะรับสัญญาณความถี่มาแปลงเป็นสัญญาณคำสั่งเพื่อเพิ่มหรือลดกำลังทางกลของกังหันต้นกำเนิดกำลังโดยการปรับตำแหน่งของวาล์วน้ำหรือกำหนดตำแหน่งการเปิดปิดประตูสำหรับควบคุมการไหลของน้ำ (ΔP_v) ซึ่งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะมีค่าคงที่ทางเวลาค่าหนึ่ง (τ_g)



รูปที่ 2.6 กราฟลักษณะของดรู๊ปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ความชันของกราฟในรูปที่ 2.6 แสดงถึงค่าของดรู๊ป เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามกราฟ โดยการทำงานของ

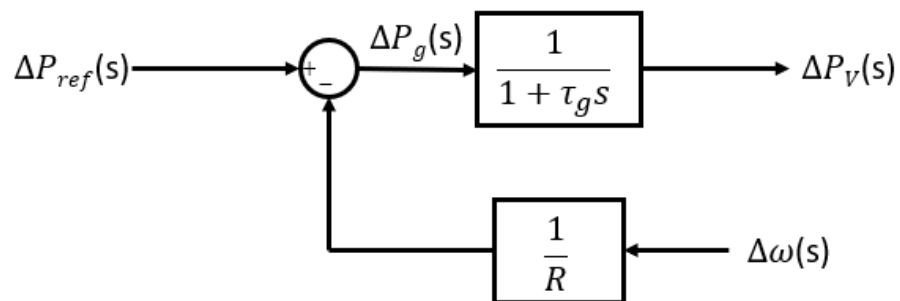
อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.12 และแบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega \quad (2.12)$$

โดยที่ ΔP_g คือ การเปลี่ยนแปลงสัญญาณคำสั่งที่ส่งให้กับอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ

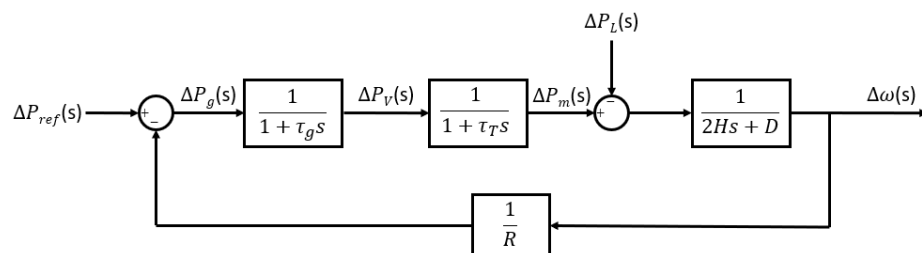
ΔP_{ref} คือ การเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมอ้างอิงเครื่องของกำเนิดไฟฟ้า

R คือ ค่าลักษณะดรูปของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ

เมื่อนำแบบจำลองของแต่ละอุปกรณ์มารวมกันจะได้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดทางไฟฟ้าที่มีการควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบตามกราฟลักษณะดรูปซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบจำลองระบบควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.3 การควบคุมและการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลดทางไฟฟ้า หรือการปลดสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เพื่อควบคุม

ความถี่ไม่ทำให้เบี่ยงเบนมากเกินไปจนสูญเสียเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยการตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกแบ่งตามการทำงานของระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ 2 ประเภทดังนี้

2.3.1 การตอบสนองแบบปฐมภูมิ

การตอบสนองลักษณะนี้เกิดจากพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการควบคุมซึ่งเกิดในช่วงแรกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นในระบบ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรักษาสมดุลของกำลังทางกลจากต้นกำเนิดกำลังให้เท่ากับกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษาความถี่ของระบบ ซึ่งค่าความถี่หลังจากเข้าสู่สภาวะคงตัวจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่ามาตรฐานขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของการรบกวนที่เกิดขึ้น การตอบสนองเชิงความถี่ประเภทนี้สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบดังนี้

2.3.1.1 โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

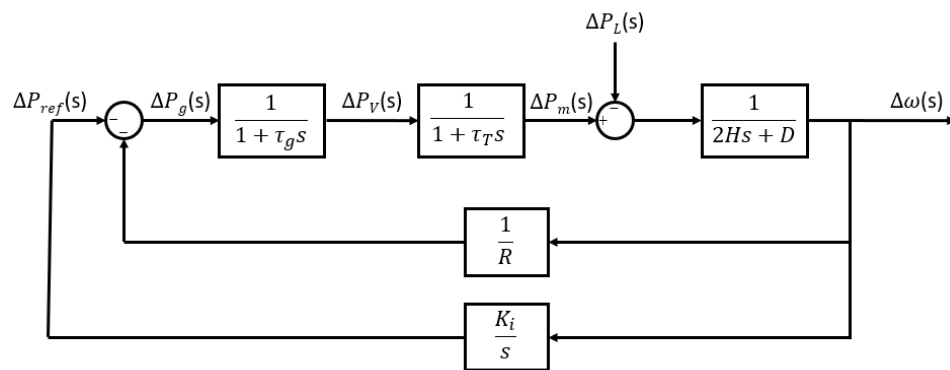
เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดทางไฟฟ้าในระบบ ส่งผลให้กำลังทางกลจากต้นกำเนิดกำลังไม่เท่ากับกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานจลน์ที่สะสมอยู่ในโรเตอร์จะถูกจ่ายในกรณีที่กำลังทางไฟฟ้าสูงกว่ากำลังทางกล ส่วนกรณีที่กำลังทางกลมากกว่ากำลังทางไฟฟ้า พลังงานส่วนเกินจะถูกสะสมไปที่โรเตอร์ ส่งผลให้ความเร็วรอบและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า เนื่องจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของโรเตอร์

2.3.1.2 ลักษณะद्रูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

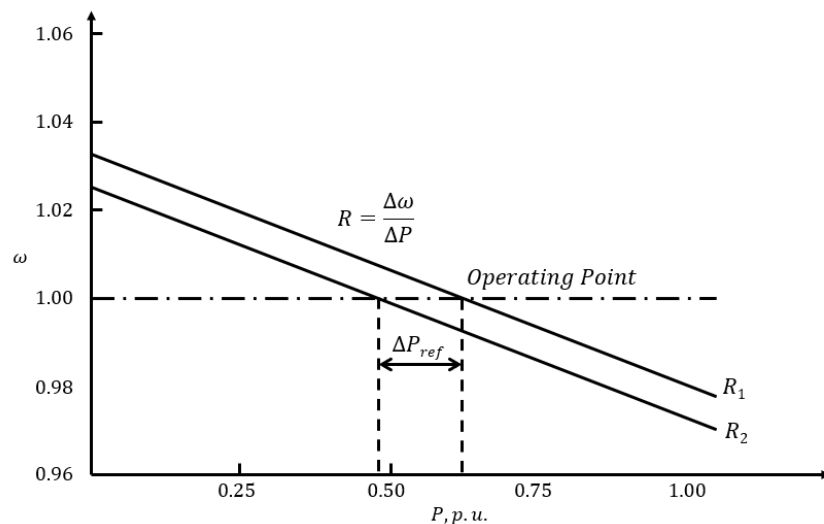
จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นไปตามกราฟลักษณะद्रูปซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกำลังผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่วไปความชันของกราฟลักษณะद्रูปจะมีค่าประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ นั่นหมายถึงเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไป 5-6 เปอร์เซ็นต์ กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลง 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความถี่ไฟฟ้าของระบบมีค่าลดลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตไฟฟ้ามากขึ้นโดยเป็นสัดส่วนตามกราฟลักษณะद्रูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษาความถี่ไฟฟ้าของระบบ

2.3.2 การตอบสนองแบบทุติยภูมิ

การตอบสนองแบบทุติยภูมินั้นเป็นการควบคุมให้ค่าความถี่ไฟฟ้าของระบบที่เบี่ยงเบนไปจากค่ามาตรฐานให้กลับเข้าสู่ความถี่มาตรฐานที่ตั้งค่าไว้ โดยเรียกว่า การควบคุมกำลังการผลิตอัตโนมัติ (Automatic Generation Control: AGC) ซึ่งทำได้โดยการรับค่าความถี่ที่เบี่ยงเบนแล้วนำมาเป็นสัญญาณป้อนกลับผ่านการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) โดยแบบจำลองของ AGC รวมกับแบบจำลองของระบบควบคุมความถี่แบบปฐมภูมิได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 การทำงานของ AGC นั้นจะเป็นการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยปรับสัญญาณควบคุมอ้างอิง (ΔP_{ref}) ของกราฟลักษณะดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แบบจำลองที่มีการตอบสนองแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส



รูปที่ 2.10 กราฟลักษณะครุรูปที่มีการปรับสัญญาณควบคุมอ้างอิง (ΔP_{ref})

2.4 ข้อกำหนดและดัชนีชี้วัดทางด้านความถี่ไฟฟ้าของระบบ

การตรวจจับความถี่ไฟฟ้าของระบบนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก หากความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานมากเกินไป จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งในส่วนของผู้ผลิตไฟฟ้าหรือผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น โดยประเทศไทยมีข้อกำหนดเกี่ยวกับการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งระบุถึงข้อกำหนดทางด้านความถี่ไว้อย่างชัดเจน เพื่อลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าและเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ระบบไฟฟ้า โดยทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเป็นผู้ควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่ที่ 50 ± 0.5 เฮิร์ตซ์ในสภาวะปกติ ส่วนในกรณีเกิดเหตุการณ์ที่ผิดปกติ ความถี่ไฟฟ้าของระบบสามารถเบี่ยงเบนเกิน 47.0-52.0 เฮิร์ตซ์ ต่อเนื่องไม่เกิน 0.1 วินาที สำหรับพลังงานหมุนเวียนประเภทลมหรือแสงอาทิตย์ หากความถี่ไฟฟ้าเกิน 51.0 เฮิร์ตซ์ จะต้องลดกำลังการผลิตลงร้อยละ 40 ต่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น 1 เฮิร์ตซ์ [18],[19] ในต่างประเทศได้มีข้อกำหนดทางด้านความถี่เอาไว้เช่นกัน เช่น ในภูมิภาคยุโรปได้มีการกำหนดความถี่มาตรฐานไว้ [20] ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดความถี่ไฟฟ้าในภูมิภาคยุโรป

ภูมิภาค	ความถี่ (เฮิร์ตซ์)	ระยะเวลาทำงาน
ภาคพื้นยุโรป	47.5-48.5	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่เกิน 30 นาที
	48.5-49.0	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่น้อยกว่ากรณีความถี่ 47.5Hz-48.5Hz
	49.0-51.0	ไม่จำกัด
	51.0-51.5	30 นาที
กลุ่มนอร์ดิก	47.5-48.5	30 นาที
	48.5-49.0	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่น้อยกว่า 30 นาที
	49.0-51.0	ไม่จำกัด
	51.0-51.5	30 นาที
สหราชอาณาจักร	47.0-47.5	20 วินาที
	47.5-48.5	90 นาที
	48.5-49.0	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่น้อย

		กว่า 90 นาที
	49.0-51.0	ไม่จำกัด
	51.0-51.5	90 นาที
	51.5-52.0	15 นาที
ไอร์แลนด์ และไอร์แลนด์เหนือ	47.5-48.5	90 นาที
	48.5-49.0	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่น้อยกว่า 90 นาที
	49.0-51.0	ไม่จำกัด
	51.0-51.5	90 นาที
กลุ่มบอลติก	47.5-48.5	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่เกิน 30 นาที
	48.5-49.0	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่น้อยกว่ากรณีความถี่ 47.5Hz-48.5Hz
	49.0-51.0	ไม่จำกัด
	51.0-51.5	ถูกกำหนดโดย TSO แต่ไม่เกิน 30 นาที

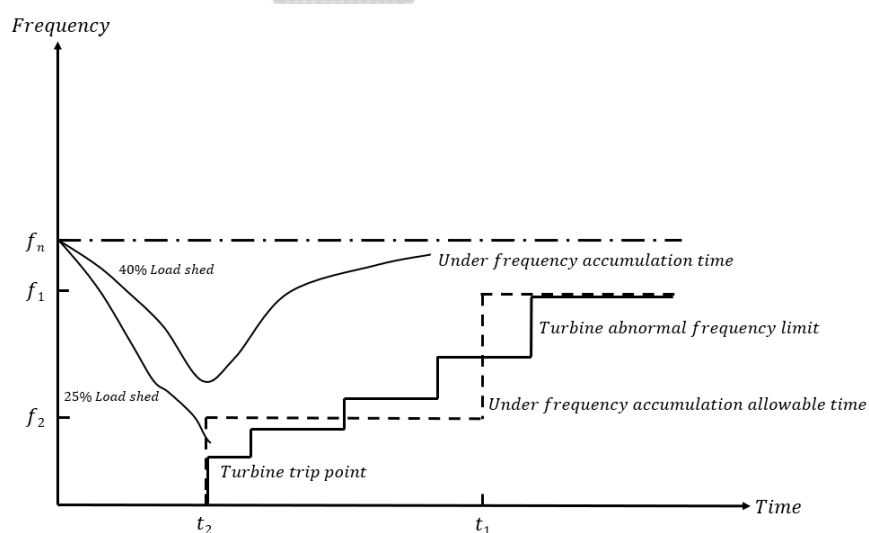
นอกเหนือจากการกำหนดค่าความถี่มาตรฐานแล้วยังมีการกำหนดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับเวลา (Rate of Change of Frequency: RoCoF) ที่เป็นตัวชี้วัดเสถียรภาพเชิงความถี่ของระบบ ในประเทศไทย ข้อกำหนดทางด้านอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับเวลาไม่ได้ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน แต่หลายประเทศในภูมิภาคยุโรปมีข้อกำหนดเป็นมาตรฐาน [21] ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับเวลา ในภูมิภาคยุโรป

ประเทศ	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับเวลาที่ยอมรับได้ (เฮิร์ตซ์/วินาที)
ออสเตรีย	2
เบลเยียม	2

เยอรมนี	2
เดนมาร์ก	2
ฝรั่งเศส	-
สหราชอาณาจักร	1
ไอร์แลนด์	1
เนเธอร์แลนด์	2
สเปน	2
อิตาลี	2.5

ในส่วนของการกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส เมื่อความถี่เบี่ยงเบนออกจากค่าความถี่มาตรฐาน จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานผิดปกติและอาจได้รับความเสียหายได้ ดังนั้นจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Frequency Relay : ANSI 81) เพื่อปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้น [22] โดยมีการตั้งค่าดังรูปที่ 2.11 อุปกรณ์นี้จะตรวจสอบทั้งค่าความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานและอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับเวลา



รูปที่ 2.11 ข้อกำหนดทางด้านความถี่ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ความถี่มาตรฐานอยู่ที่ 49.5-50.5 เฮิรตซ์ ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทย [18, 19]

บทที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

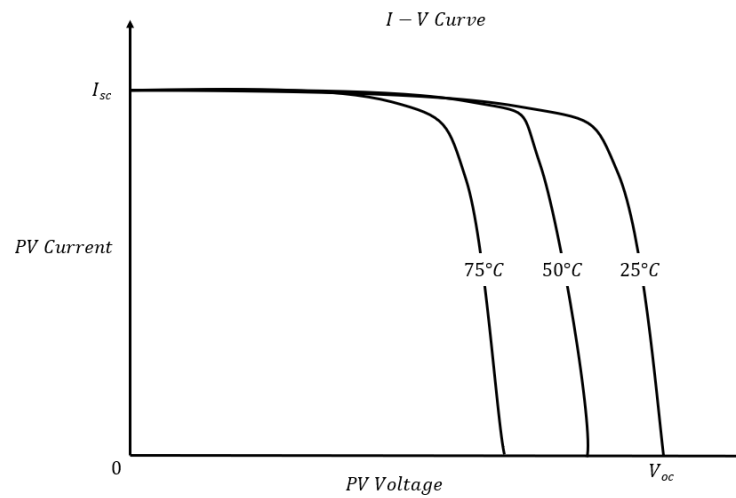
พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่ง ซึ่งในประเทศไทยนั้นนับว่าเป็นประเทศที่มีศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์สูงตลอดทั่วทั้งประเทศหากเปรียบเทียบกับประเทศอื่น ๆ [23] ดังนั้น จึงมีการเพิ่มขึ้นของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมนั้นไม่สามารถควบคุมกำลังการผลิตได้ จึงได้มีแนวคิดเกี่ยวกับการควบคุมกำลังการผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดขึ้นในระบบ เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบทางด้านความถี่จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และการควบคุมกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 หลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

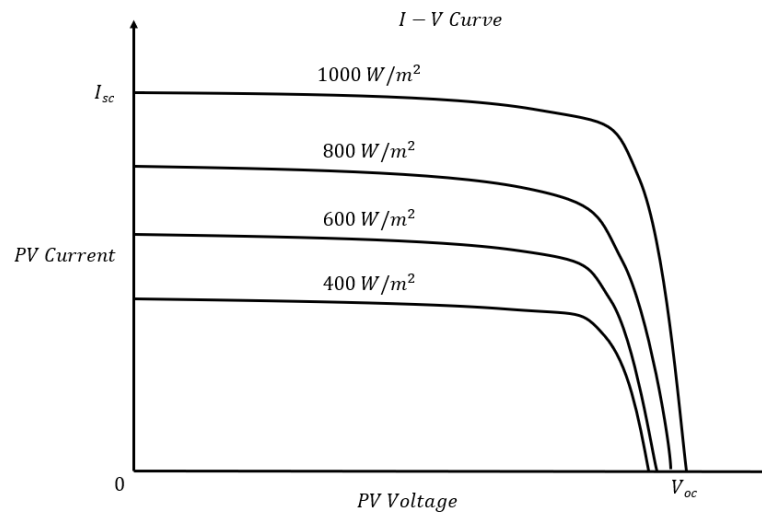
ในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะได้ไฟฟ้ากระแสตรงออกมา จึงต้องมีการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อนำไปเชื่อมต่อกับระบบ เมื่อนำมารวมกันจึงเรียกว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

3.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้เช่น ซิลิกอน (Si) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenite: GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride: CdTe) เป็นต้น [24] ในสภาวะปกติเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าได้โดยขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือ อุณหภูมิ และ ความเข้มแสง โดยเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าที่กระแสและแรงดันที่ค่าเฉพาะค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่าง ๆ [25] ดังรูป 3.1 และ 3.2

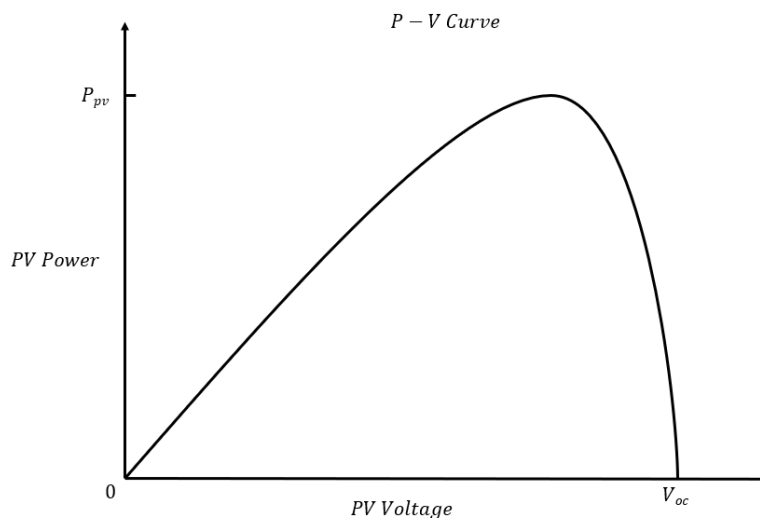


รูปที่ 3.1 กราฟกระแสและแรงดันทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 3.2 กราฟกระแสและแรงดันทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

จากกราฟแสดงให้เห็นถึงจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ โดยกำลังไฟฟ้าที่แรงดันทำงานแสดงดังรูปที่ 3.3



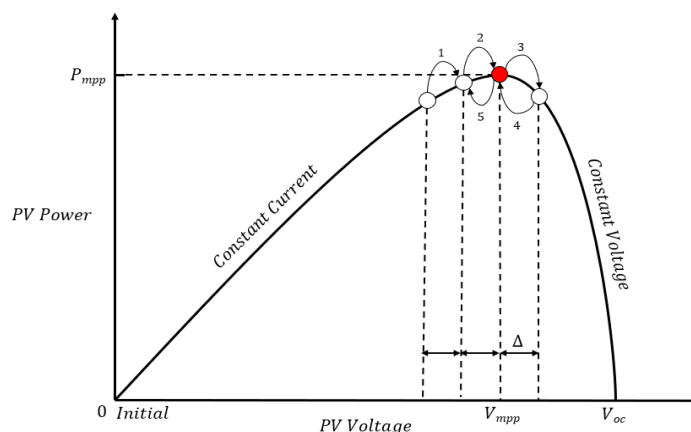
รูปที่ 3.3 กราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

3.1.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ อินเวอร์เตอร์นั้นมีข้อดีในเรื่องการใช้เวลาในการตอบสนองน้อยจึงสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงรูปแบบการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบหลัก ๆ ดังนี้

3.1.2.1 รูปแบบการทำงานในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT)

ในระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในภาคอุตสาหกรรมจะมีความต้องการให้กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดตลอดเวลา เพื่อนำพลังงานที่ผลิตได้ไปใช้งานได้สูงสุด โดยวิธีการควบคุมโดยหาจุดทำงานที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีอยู่หลากหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น วิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb & Observe Algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์แบบวนซ้ำ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าอ้างอิงขึ้นมา [26] ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทำงานของวิธีการรบกวนและสังเกตเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.1.2.2 รูปแบบการทำงานในโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power Limitation Mode)

การทำงานในโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ถูกลดทอนลง แต่เป็นการช่วยรักษาแรงดันและความถี่ของระบบให้คงที่มากขึ้น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตน้อยลง โดยการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงนั้นสามารถกำหนดเป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงหรือร้อยละ โดยขึ้นอยู่กับระบบที่นำไปเชื่อมต่อ

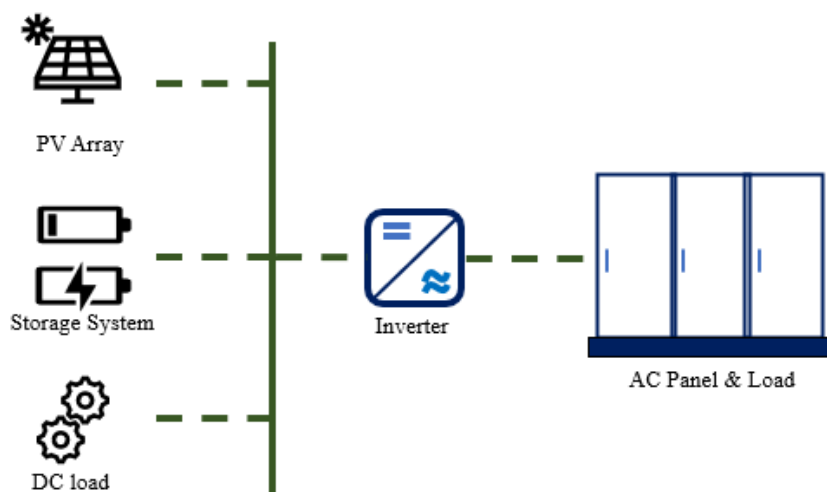
3.1.3 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 3

รูปแบบดังนี้

3.1.3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกตัวอิสระ (Photovoltaic Stand-alone System)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบนี้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้า ระบบดังกล่าวนี้จะมีระบบกักเก็บพลังงานที่ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพของระบบ รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบแยกตัวอิสระสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.5

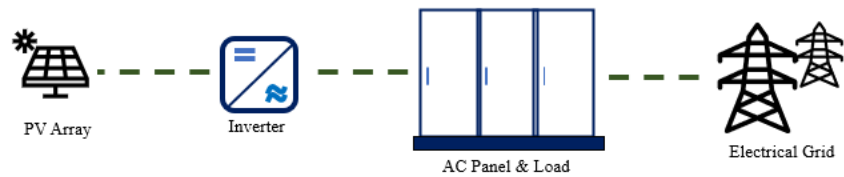


รูปที่ 3.5 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบแยกตัวอิสระ

รูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อของระบบแบบแยกตัวอิสระ ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดเล็กหรือปานกลางเท่านั้น โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะถูกนำมาชาร์จระบบกักเก็บพลังงาน จ่ายโหลดไฟฟ้ากระแสตรง หรือแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ ในระบบแยกตัวอิสระนั้นไม่สามารถรักษาความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานได้ดีเท่ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ สาเหตุมาจากรูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบแยกตัวอิสระมีแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเองเทียบกับแหล่งผลิตไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าต่ำ และเกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางไฟฟ้าได้ง่าย

3.1.3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Photovoltaic Grid-connected System)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบนี้จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าออกมาได้จะถูกนำมาจ่ายให้กับโหลดและหากว่าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดแทน ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้ารูปแบบนี้จึงมีเสถียรภาพทางไฟฟ้าสูงหากเปรียบเทียบกับแบบแยกตัวอิสระ โดยรูปแบบการเชื่อมต่อแสดงไว้ดังรูปที่ 3.6

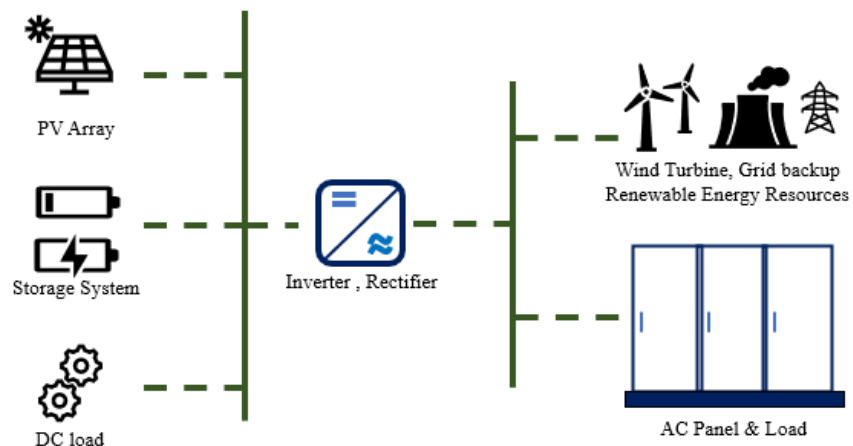


รูปที่ 3.6 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

รูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า โดยระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้นสามารถรักษาเสถียรภาพทางไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากเป็นระบบขนาดใหญ่และมีโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าทดแทนได้ในช่วงที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าสูง ทำให้ความถี่ทางไฟฟ้าเบี่ยงเบนน้อยเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ

3.1.3.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม (Photovoltaic Hybrid-connected System)

รูปแบบการเชื่อมต่อแบบผสมเป็นการนำรูปแบบการติดตั้งของทั้ง 2 รูปแบบมาใช้งานร่วมกัน โดยประสิทธิภาพการทำงานขึ้นอยู่กับการจัดการพลังงานในระบบ โดยรูปแบบการเชื่อมต่อแสดงไว้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบแบบผสม

รูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อของระบบแบบผสม โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะถูกนำมาจ่ายให้กับโหลดทางไฟฟ้า โดยทำงานร่วมกับแหล่งผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ ระบบก็เก็บพลังงาน และระบบโครงข่ายไฟฟ้า

3.2 ผลกระทบที่เกี่ยวกับความถี่จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่งผลกระทบต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในหลายด้าน เนื่องจากไม่สามารถควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าที่แน่นอนได้ และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นไม่ได้มีการตอบสนองต่อความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน สาเหตุมาจากการที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยและการตอบสนองตามลักษณะรูป การเพิ่มขึ้นของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าต่ำจากการที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเอง แต่สามารถผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ทำให้กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยรวมลดลง โดยมีการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสบางตัวออกจากระบบ [27] ส่งผลให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของแต่ละแหล่งผลิตไฟฟ้าแต่ละแหล่ง มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ 3.1

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{gen}} H_{gen,i} S_{gen,i}}{\sum_{i=1}^{N_{gen}} S_{gen,i} + \sum_{j=1}^{N_{PV}} S_{PV,j}} \quad (3.1)$$

โดยที่ H_{sys}	คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยโดยรวมของระบบ
$H_{gen,i}$	คือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
$S_{gen,i}$	คือ พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
$S_{PV,j}$	คือ พิกัดของแหล่งพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

การลดลงของค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นความถี่ไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเบี่ยงเบนไปมากตามสมการการแกว่ง นั้นหมายความว่าระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพที่ต่ำลง

3.3 การควบคุมกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

แนวคิดหลักในการควบคุมกำลังการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่นั้นมาจากการควบคุมและการตอบสนองเชิงความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไปตามความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง หลักการควบคุมกำลังการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน และหลักการควบคุมกำลังการผลิตโดยใช้กราฟลักษณะรูป

3.3.1 แนวคิดพื้นฐาน

ความถี่ไฟฟ้าของระบบที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานนั้นเกิดจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไม่เท่ากัน เมื่อเกิดการรบกวนในระบบ ดังนั้นการควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบจึงมีหลักการมาจากการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตให้เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ณ เวลาใด ๆ เมื่อระบบเกิดการรบกวน เช่น การเพิ่มขึ้นของโหลดทางไฟฟ้า การปลดวงจรของสายส่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เป็นต้น การตอบสนองทางด้านความถี่แบบปฐมภูมิและทุติยภูมิจะเริ่มทำงานโดยอัตโนมัติ เพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบไม่ให้เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานมากเกินไป และทำให้ความถี่ที่เบี่ยงเบนออกไปนั้นกลับสู่ค่ามาตรฐาน โดยการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิต เพื่อป้องกันไม่ให้ความถี่เบี่ยงเบนไปจนอุปกรณ์ป้องกันความถี่ต่ำหรือความถี่สูงทำงาน

ในระบบไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระนั้น การตอบสนองแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอาจไม่เพียงพอต่อการรักษาค่าความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่ในช่วงมาตรฐานได้ สาเหตุมาจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบและค่าความหน่วงโดยรวมของระบบมีค่าต่ำ จากการทำมีอัตราส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิมมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการควบคุมอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมกำลังการผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีการตอบสนองต่อความถี่ไฟฟ้าของระบบ นั่นคือการควบคุมด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน และการควบคุมด้วยกราฟลักษณะรูปเสมือน

ในทางปฏิบัตินั้นการควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้เพิ่มหรือลด ณ เวลาใด ๆ จำเป็นจะต้องมีการกำหนดจุดทำงานเพื่อลดกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเพื่อนำไปสำรองไว้ใช้เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ การลดลงของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้หมายถึงการเสียผลประโยชน์ทางการผลิตพลังงานไฟฟ้า แต่ในขณะเดียวกันการสำรองกำลังการผลิตไฟฟ้านั้นนับได้ว่ามีความจำเป็นในการเพิ่มเสถียรภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ เนื่องจากการสำรองกำลังไฟฟ้านั้นช่วยให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เพื่อรักษาค่าความถี่ไม่ให้เบี่ยงเบนออกจากมาตรฐานโดยใช้วิธีการควบคุมจากโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนหรือกราฟลักษณะรูปเสมือน

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนขาออกของอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถควบคุมแบบแยกอิสระกันได้ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงผ่านกระแสในแนวแกน d และควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนผ่านกระแสในแนวแกน q จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้มีการตอบสนองทางด้านความถี่ไฟฟ้าของระบบเพื่อรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่ไฟฟ้าไว้ได้โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิต ซึ่งทำได้โดยการ

ควบคุมสัญญาณกระแสไฟฟ้าในแกน d และเนื่องจากกระแสในแนวแกน q ใช้สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน กระแสในแนวแกน q จะไม่ถูกนำมาพิจารณา

3.3.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบผ่านการควบคุมอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีหลากหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

3.3.2.1 การควบคุมกำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน

งานวิจัย [28] ได้กล่าวถึงการควบคุมกำลังการผลิตจากสมการการแกว่ง ซึ่งเป็นพฤติกรรมตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบปฐมภูมิตามสมการที่ 3.2 และแผนภาพจำลองการควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.8

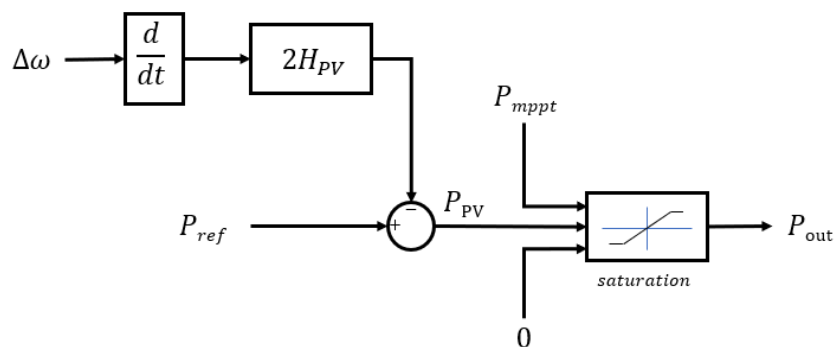
$$P_{PV} = P_{ref} - 2H_{PV} \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (3.2)$$

โดยที่ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

P_{ref} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตั้งค่าไว้

H_{PV} คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน

$\Delta\omega$ คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบ



รูปที่ 3.8 แบบจำลองการควบคุมกำลังการผลิตจากโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน

3.3.2.2 การควบคุมกำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กราฟลักษณะดรูปเสมือน

งานวิจัย [29],[30] เสนอวิธีการควบคุมโดยการจำลองกราฟลักษณะดรูปเพื่อเลียนแบบการตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบปฐมภูมิตามสมการที่ 3.3 และแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.9

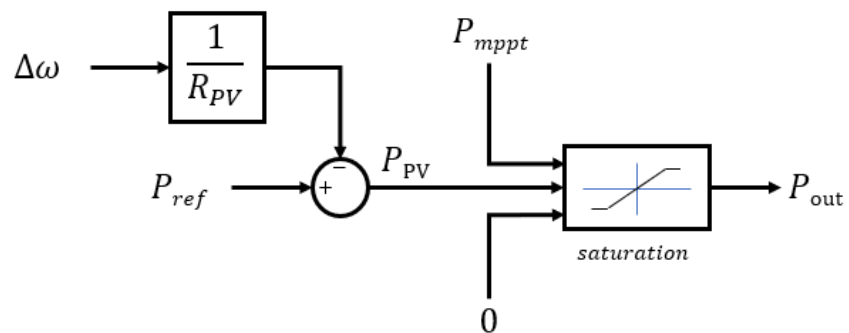
$$P_{PV} = P_{ref} - \frac{1}{R_{PV}} \Delta\omega \quad (3.3)$$

โดยที่ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

P_{ref} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตั้งค่าไว้

R_{PV} คือ ค่าลักษณะดรูปเสมือน

$\Delta\omega$ คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบ



รูปที่ 3.9 แบบจำลองการควบคุมกำลังการผลิตจากกราฟลักษณะดรูปเสมือน

3.3.2.3 การควบคุมกำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อยและลักษณะดรูปเสมือน

งานวิจัย [31],[32] เสนอวิธีการควบคุมโดยใช้การจำลองพฤติกรรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสผ่านสมการการแกว่งและกราฟลักษณะดรูปเสมือนรวมกัน โดยวิธีนี้เป็นวิธีการที่แสดงถึงการตอบสนองต่อความถี่ไฟฟ้าของระบบทั้งด้านความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานและอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบ นำมาซึ่งการเพิ่มสมรรถนะการตอบสนองต่อความถี่ให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยแสดงในสมการที่ 3.4 และแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.10

$$P_{PV} = P_{ref} - \left(\frac{1}{R_{PV}} \Delta\omega + 2H_{PV} \frac{d\Delta\omega}{dt} \right) \quad (3.4)$$

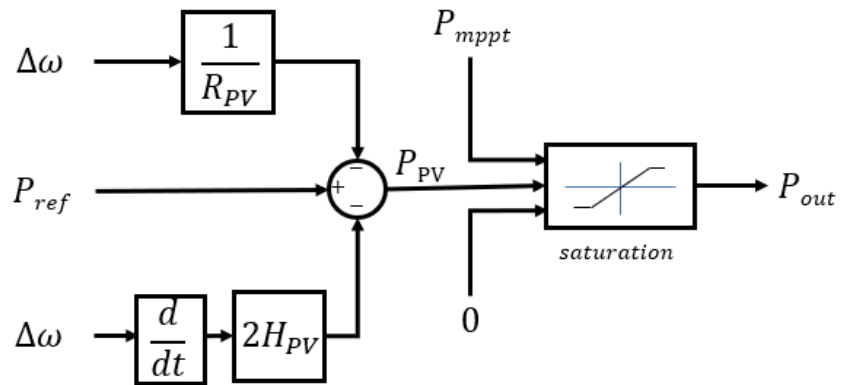
โดยที่ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

P_{ref} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตั้งค่าไว้

R_{PV} คือ ค่าลักษณะดรูปเสมือน

H_{PV} คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน

$\Delta\omega$ คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบ



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการควบคุมกำลังการผลิตจากสมการการแกว่งและกราฟลักษณะรูป

3.3.2.4 การควบคุมกำลังการผลิตสำรองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่

งานวิจัย [33] ได้กล่าวถึงการลดกำลังการผลิตแบบคงที่ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปเป็นกำลังไฟสำรองในช่วงที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบ โดยการกำหนดระดับการลดกำลังการผลิตดังสมการที่ 3.5

$$P_{ref} = P_{mppt}(1 - \sigma) \quad (3.5)$$

โดยที่

$$\sigma = \frac{P_{reserve}}{P_{mppt}}$$

P_{ref} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตั้งค่าไว้

P_{mppt} คือ กำลังไฟฟ้าที่โหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

σ คือ ระดับกำลังการผลิตสำรองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

$P_{reserve}$ คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าสำรอง

3.3.2.5 การควบคุมกำลังการผลิตสำรองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบปรับค่าได้

งานวิจัย [32] ได้กล่าวถึงการสำรองกำลังการผลิตโดยใช้ดัชนีชี้วัดจากค่าความอ่อนแอของระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้นคือ ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ การเพิ่มขึ้นของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าต่ำลง จากการที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีโมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเอง แต่สามารถผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ จึงทำให้ความต้องการกำลังการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสลดลง และมีการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสบางส่วนออกจากระบบ [27] ส่งผลให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของ

ระบบซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของแหล่งผลิตไฟฟ้าแต่ละแหล่ง มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ 3.1 โดยค่าอัตราส่วนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังสมการที่ 3.6

$$PV_{lv} = \frac{S_{PV}}{S_{gen} + S_{PV}} \quad (3.6)$$

โดยที่ PV_{lv} คือ อัตราส่วนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

S_{gen} คือ พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

S_{PV} คือ พิกัดของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์

ในงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้วิธีฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy logic) เพื่อหาค่ากำลังการผลิตสำรองแบบปรับค่าได้ตามความอ่อนแอของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการสำรองกำลังการผลิตที่ตอบสนองต่อเสถียรภาพทางด้านความถี่ได้อย่างตรงไปตรงมา และนำมาซึ่งการสำรองกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมในสภาวะต่าง ๆ

บทที่ 4 หลักการพื้นฐานของฟัซซีเซต

หลักการของฟัซซีเซตได้ถูกนำเสนอในปี 1965 โดย Professor L.A. Zadeh [34] โดยมีลักษณะเป็นเซตที่มีความคลุมเครือหรือมีขอบเขตที่ไม่แน่นอน จากหลักการของฟัซซีเซตนำไปสู่การประยุกต์ใช้ฟัซซีเซตในการตัดสินใจเลียนแบบตรรกะทางความคิดของมนุษย์ ซึ่งถูกแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการสร้างกฎของฟัซซี (Fuzzy rule) ค่าความเป็นสมาชิก (Membership) และระบบอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference System: FIS) ซึ่งหลักการดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมกันอย่างแพร่หลาย [35],[36]

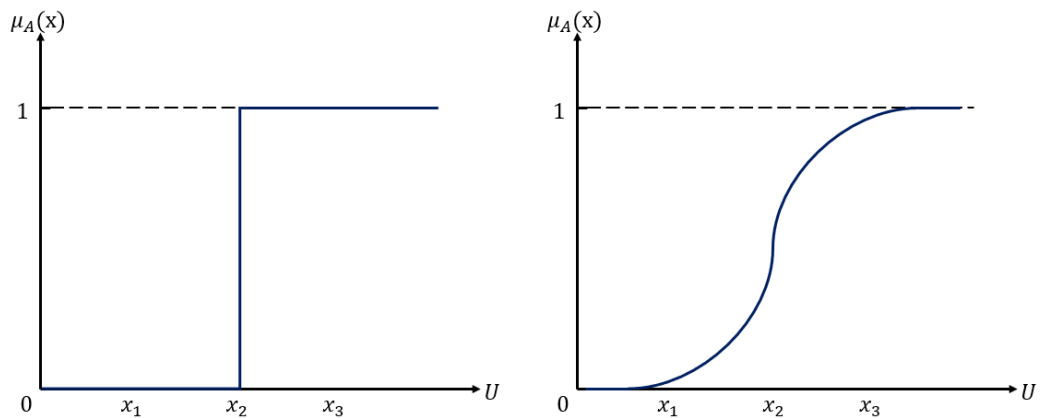
4.1 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory)

ทฤษฎีเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set theory) นั้นเป็นการจัดการกลุ่มของวัตถุ (Object) ที่มีความสอดคล้องกันตามนิยามของเซตนั้นนำมารวมไว้เป็นกลุ่มเดียวกันเพื่อแยกกลุ่มวัตถุต่าง ๆ ในขอบเขตที่เราสนใจออกเป็นสองกลุ่มคือ เป็นสมาชิกของเซต หรือ ไม่เป็นสมาชิกของเซตเท่านั้น ซึ่งจะถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอนและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทันที ณ เส้นแบ่งเซต

ในกรณีของเซตแบบดั้งเดิมหากกำหนดให้ U เป็นขอบเขตที่เราสนใจ โดยมี x เป็นองค์ประกอบของ U และกำหนดให้ $A \in U$ โดย A เป็นเซตแบบดั้งเดิม ฟังก์ชันคุณสมบัติของ A ใน U ($\mu_A(x)$) จะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้นตามสมการที่ 4.1

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , x \in A \\ 0 & , x \notin A \end{cases} \quad (4.1)$$

ฟัซซีเซต (Fuzzy set) จะมีลักษณะแตกต่างจากเซตแบบดั้งเดิมตรงที่มีความคลุมเครือของความเป็นสมาชิกภายในเซต นั้นหมายความว่าค่าความเป็นสมาชิกภายในเซต (Degree of membership) นั้นสามารถมีค่าเพิ่มขึ้นจากความไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจนไปจนถึงระดับที่มีความเป็นสมาชิกอย่างชัดเจน หรือในทางกลับกันค่าความเป็นสมาชิกสามารถลดลงอย่างความเป็นสมาชิกอย่างชัดเจนไปจนถึงไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจน และยังสามารถเป็นสมาชิกของเซตอื่นได้อีกด้วย



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set) และฟัซซีเซต (Fuzzy set)

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้ U เป็นเอกภพสัมพัทธ์ (Universe of discourse) เซต A สามารถแสดงได้ในลักษณะของเซตดังสมการที่ 4.2

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (4.2)$$

โดยที่ $\mu_A(x)$ คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตซึ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะบ่งบอกถึงระดับความเป็นสมาชิกของเซตที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0, 1]$ จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิมนั้นกำหนดให้มีค่าเป็น 0 กับ 1 เท่านั้น แต่ทว่าในฟัซซีเซตนั้นจะมีการกำหนดลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตได้ ซึ่งสามารถกำหนดฟังก์ชันได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับผู้ใช้ในการพิจารณาว่าลักษณะของฟังก์ชันใดเหมาะสมที่สุดในการใช้อธิบายองค์ประกอบหรือตัวแปรในเซตนั้น

4.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function :MF)

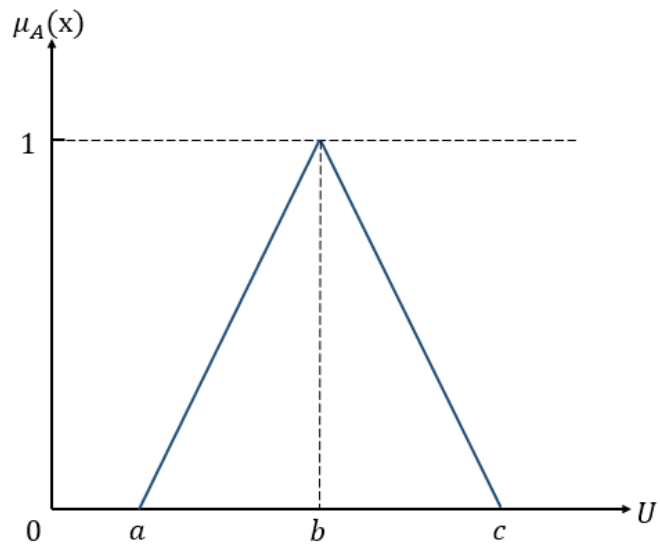
ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะแสดงคุณลักษณะของฟัซซีเซต เพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานฟัซซีเซตจึงแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในรูปแบบสูตรทางคณิตศาสตร์ ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตัวอย่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีดังนี้

4.2.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมจะถูกกำหนดลักษณะของเซตโดยพารามิเตอร์ $\{a, b, c\}$ ดังสมการที่ 4.3

$$\text{Triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4.3)$$

โดยสามารถเขียนกราฟแสดงความเป็นสมาชิกได้ดังรูปที่ 4.2



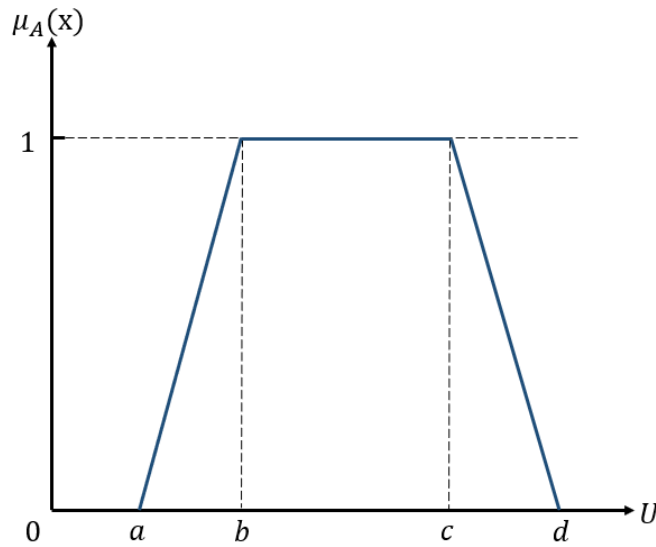
รูปที่ 4.2 กราฟความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular MF)

4.2.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมูจะถูกกำหนดลักษณะของเซตโดยพารามิเตอร์ $\{a, b, c, d\}$ ดังสมการที่ 4.4

$$Trapezoidal(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (4.4)$$

โดยสามารถเขียนกราฟแสดงความเป็นสมาชิกได้ดังรูปที่ 4.3



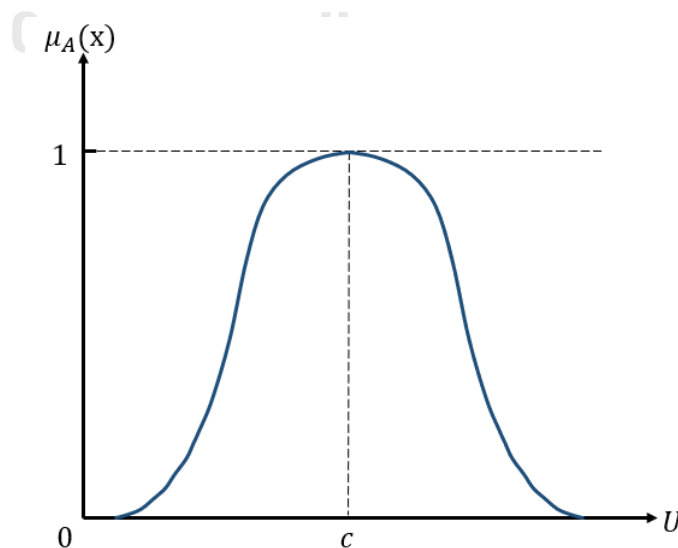
รูปที่ 4.3 กราฟความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal MF)

4.2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียนจะถูกกำหนดลักษณะของเซตโดยพารามิเตอร์ $\{c, \sigma\}$ ดังสมการที่ 4.5

$$Gaussian(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (4.5)$$

โดยพารามิเตอร์ c แสดงถึงตำแหน่งของจุดกึ่งกลางยอด และ σ แสดงถึงความกว้างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน ซึ่งสามารถเขียนกราฟแสดงความเป็นสมาชิกได้ดังรูปที่ 4.4



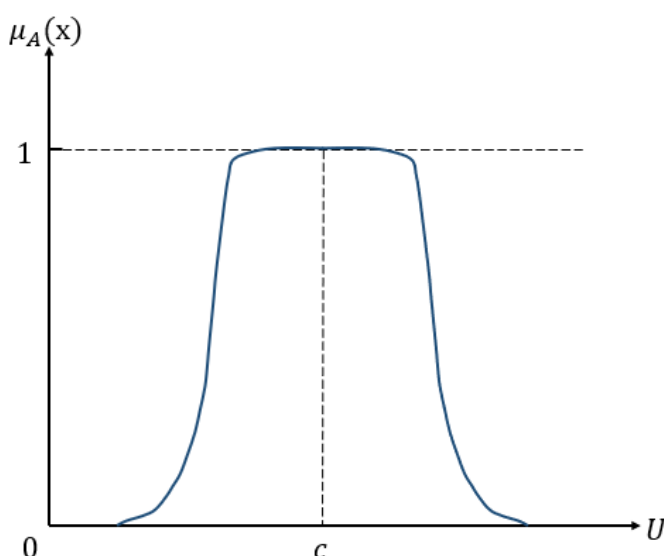
รูปที่ 4.4 กราฟความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MF)

4.2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบระฆัง (Generalized bell MF)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบระฆังจะถูกกำหนดลักษณะของเซตโดยพารามิเตอร์ $\{a,b,c\}$ ดังสมการที่ 4.6

$$Bell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (4.6)$$

โดยพารามิเตอร์ b มีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งสามารถเขียนกราฟความเป็นสมาชิกได้ดังรูปที่ 4.5



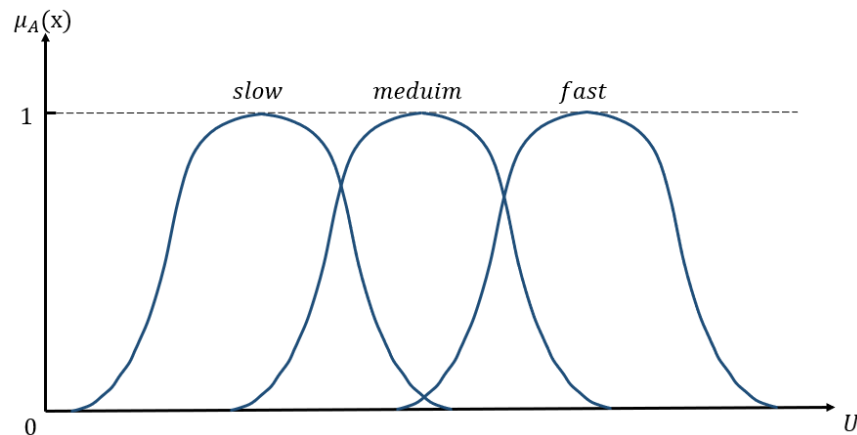
รูปที่ 4.5 กราฟความเป็นสมาชิกแบบระฆัง (Generalized bell MF)

4.3 ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี (Fuzzy Logic)

ตรรกศาสตร์เป็นกระบวนการหาคำตอบโดยใช้เหตุผล ซึ่งในตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมนั้นจะแบ่งนิพจน์ออกเป็นสองลักษณะคือ จริงและเท็จ โดยที่แทนค่าความจริงเท่ากับ 1 และเท็จเท่ากับ 0 เท่านั้น แต่ในทางตรรกศาสตร์แบบฟัซซีนี้นั้นค่าระหว่าง 0 กับ 1 จะถูกนำมาพิจารณาในการหาคำตอบซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าตรรกศาสตร์ดั้งเดิม

4.3.1 ตัวแปรทางภาษา (Linguistic Variables)

การนำเสนอแนวคิดของตัวแปรทางภาษาโดยใช้หลักการของตรรกศาสตร์แบบฟัซซีเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ระบบ จึงมีการกำหนดตัวแปรเป็นภาษามนุษย์และมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สอดคล้องกัน เช่น ตัวแปรทางภาษาคือ “ความเร็ว” ซึ่งประกอบด้วยค่าภาษา (Linguistic value) คือ “ช้า”, “ปานกลาง”, “เร็ว” เป็นต้น โดยค่าภาษาแต่ละค่าจะเป็นฟัซซีเซตที่มีลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างกัน โดยแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงฟังก์ชันเซตโดย “ความเร็ว” เป็นตัวแปรทางภาษา

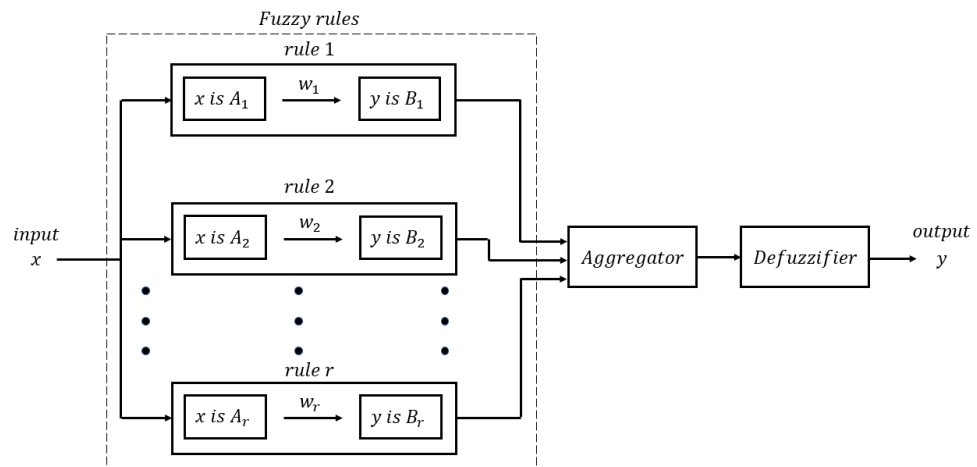
4.3.2 การอนุมานแบบฟuzzy (Fuzzy Inference System: FIS)

การประยุกต์ใช้ตรรกศาสตร์แบบฟuzzy นั้นถูกแสดงให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรทางภาษา (Linguistic variables) ดังนี้

if x is A then y is B

โดยที่ A และ B เป็นตัวแปรทางภาษา ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันเซตที่มีขอบเขต X และ Y ตามลำดับ โดย “x is A” ถูกเรียกว่าพริมิส (Premise) และ “y is B” ถูกเรียกว่าคอนซีควেন্ট (consequent) การอนุมานฟuzzy จะมีการกำหนดกฎของฟuzzy (Fuzzy rule) ขึ้นมา มากกว่าหนึ่งกฎเกณฑ์แล้วนำมารวมกันเพื่อพิจารณาผลที่ได้จากผลสรุป (Consequent) จากแต่ละกฎที่ถูกสร้างขึ้น

การอนุมานแบบฟuzzy เป็นโครงสร้างการคำนวณที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีฟังก์ชันเซต และกฎของฟuzzy โดยระบบอนุมานฟuzzy สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจเพื่อหาคำตอบจากค่าที่ป้อนให้กับระบบ โครงสร้างของระบบอนุมานฟuzzy ประกอบด้วยส่วนขาเข้า โครงสร้างกฎของฟuzzy และส่วนขาออก ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพโครงสร้างของระบบอนุมานแบบฟัซซี

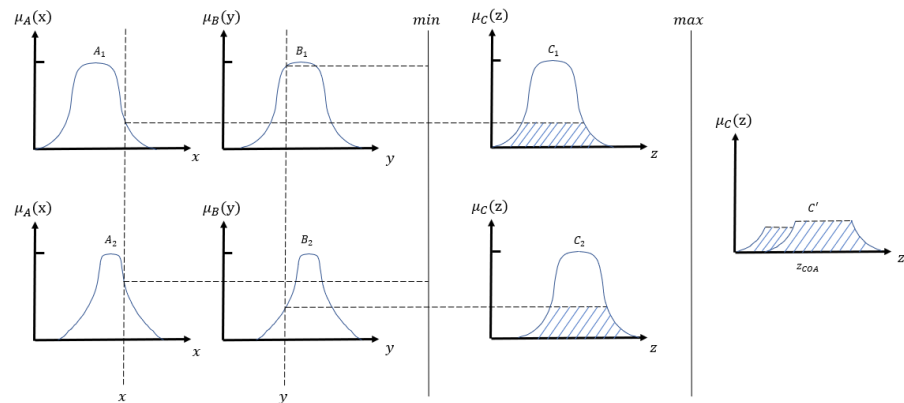
รูปที่ 4.7 แสดงถึงโครงสร้างของระบบอนุมานแบบฟัซซีที่มีส่วนขาเข้าซึ่งจะรับข้อมูลเข้ามาแล้วนำไปผ่านการแปลงโดยใช้กฎของฟัซซีจากนั้นจึงส่งข้อมูลขาออกเป็นค่าฟัซซี ในการประยุกต์ใช้งานจำเป็นที่จะต้องมีการแปลงกลับฟัซซี (Defuzzification) ให้ข้อมูลขาออกเป็นค่าแบบดั้งเดิม ซึ่งวิธีการแปลงกลับฟัซซีมีหลากหลายวิธีเช่น การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์กลางร่วมของพื้นที่ (Centroid of area) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.7

$$Z_{COA} = \frac{\int \mu(z)zdz}{\int \mu(z)dz} \quad (4.7)$$

ระบบอนุมานแบบฟัซซีมีหลายวิธี แต่ละมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันดังนี้

4.3.2.1 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani

ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani [37] มีการนำเสนอครั้งแรกในปี 1974 ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแบบพลวัต โดยใช้ค่าตัวแปรทางภาษาผ่านกฎของฟัซซี ตัวดำเนินการที่ถูกใช้เป็นตัวเชื่อมการร่วมกันและแจกแจงข้อมูลคือ Min และตัวดำเนินการ Max จะถูกใช้สำหรับรวมกลุ่มจากกฎต่าง ๆ ของฟัซซี ซึ่งเป็นการประมาณด้วยตัวดำเนินการ Max-Min ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani ด้วยตัวดำเนินการ Max-Min

รูปที่ 4.8 เป็นระบบอนุมานฟัซซีที่มีข้อมูลขาเข้าคือ x และ y ซึ่งแต่ละตัวประกอบด้วยฟัซซีเซต 2 เซต ซึ่งถูกนำไปอนุมานผ่านโครงสร้างกฎของฟัซซีจำนวน 2 กฎดังนี้

if "x is A_1 " and "y is B_1 " then "z is C_1 "

if "x is A_2 " and "y is B_2 " then "z is C_2 "

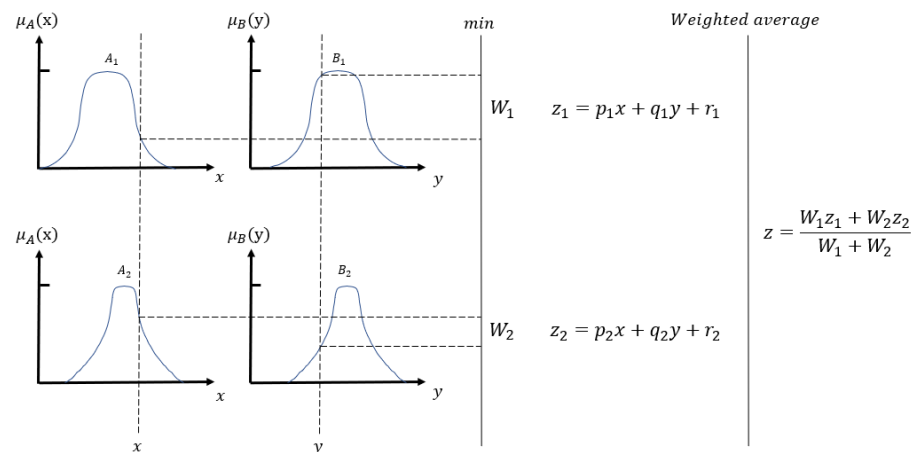
เมื่อผ่านตัวดำเนินการ Max-Min แล้วจะได้เป็นฟัซซีเซตขาออก (C') นั้นเอง โดยจะนำไปผ่านการแปลงกลับฟัซซีเพื่อแปลงค่าฟัซซีให้เป็นข้อมูลขาออกแบบดั้งเดิม

4.3.2.2 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno

ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno ได้ถูกนำเสนอโดย Sugeno, Takagi, และ Kang ซึ่งเป็นการปรับปรุงระบบอนุมานฟัซซีให้สามารถประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้อย่างเป็นระบบมากขึ้น และลดเวลาการแปลงกลับฟัซซีให้สั้นลง โครงสร้างกฎของฟัซซีนั้นจะถูกแสดงด้วยฟังก์ชันของตัวแปรขาเข้า ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

if "x is A_1 " and "y is B_1 " then $z = f(x,y)$

โดยที่ A และ B เป็นฟัซซีเซตซึ่งถูกระบุลักษณะได้ด้วยส่วนของพรีมิส และ $f(x,y)$ เป็นส่วนของคอนซีควนท์ที่ระบุถึงข้อมูลขาออก โดยที่ $f(x,y)$ เป็นสมการพหุนามของ x และ y ที่เป็นตัวแปรขาเข้า ซึ่งจะแสดงออกมาในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น โดยมีวิธีการนอมัลไลซ์เพื่อใช้ในการหาคำตอบ ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno แสดงไว้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno

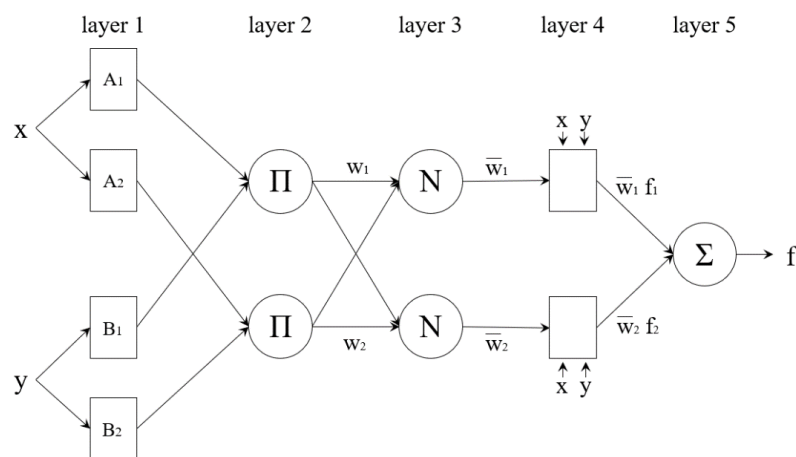
รูปที่ 4.9 เป็นระบบอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno ที่มีคอนซีควนท์เป็นสมการพหุนามลำดับที่ 1 โดยที่ข้อมูลขาเข้านั้นจะถูกนำไปผ่านกฎของฟัซซีเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักในการหาตัวแปรขาออกในแต่ละกฎ โดยข้อมูลขาออกจะหาได้จากการนำตัวแปรขาออกที่ได้จากกฎแต่ละกฎมาหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

บทที่ 5 ระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้

ระบบอนุมานฟuzzy (Fuzzy Inference System: FIS) เป็นระบบอนุมานค่าขาออกโดยอาศัยโครงสร้างกฎของฟuzzyในการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกซึ่งแทนปริมาณในฟuzzyเซตด้วยตัวแปรทางภาษา ต่อมาระบบอนุมานฟuzzyได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถในการเรียนรู้ได้ด้วยตัวมันเอง กล่าวคือ เป็นระบบที่สามารถปรับพารามิเตอร์ภายในระบบได้เมื่อมีการฝึกสอนระบบด้วยข้อมูลตัวอย่าง จึงเรียกระบบนี้ว่า ระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System: ANFIS) [38],[39] โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้เป็นการนำระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) มาใช้ร่วมกับระบบอนุมานแบบฟuzzy [40] ซึ่งระบบจะสร้างฟuzzyเซตเฉพาะจากชุดข้อมูลที่ถูกป้อนเข้า ระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้มีพื้นฐานมาจากระบบอนุมานฟuzzyแบบ Sugeno ซึ่งพารามิเตอร์ภายในระบบที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการฝึกสอนจะมีอยู่ 2 ส่วนคือ พรีมิสพารามิเตอร์ (Premise parameter) และ คอนซีควนท์พารามิเตอร์ (Consequent parameter) ที่อยู่ในฟuzzyเซตขาเข้าและสมการพหุนามขาออกตามลำดับ ซึ่งความถูกต้องของข้อมูลออกนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนชุดข้อมูลและจำนวนรอบที่ใช้ฝึกสอนรวมไปถึงโครงสร้างและจำนวนกฎที่ใช้ในระบบ โดยในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ และการฝึกสอนระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้

5.1 โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้

โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้มีพื้นฐานมาจากระบบอนุมานฟuzzyแบบ Sugeno โดยมีกระบวนการทำงานของระบบในรูปแบบของโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้น (layer) ต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของระบบอนุมานนิเวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้

รูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการทำงานของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ ซึ่งแบ่งเป็นชั้นต่าง ๆ ในแต่ละชั้นจะมีฟังก์ชันการคำนวณที่ถูกเรียกว่า (Node) ซึ่งแต่ละโหนดจะส่งข้อมูลออกจากโหนดในชั้นตัวเองไปเป็นข้อมูลขาเข้าของโหนดในชั้นถัดไป โดยรายละเอียดของโครงสร้างในแต่ละชั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.1.1 ชั้นที่ 1

ในชั้นที่ 1 เป็นโหนดที่มีการปรับค่าตัวแปรของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต ซึ่งลักษณะของฟuzzyเซตจะถูกกำหนดโดยพรีมิสพารามิเตอร์ โดยที่ข้อมูลขาออกชั้นที่ 1 แสดงดังสมการที่ 5.1

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{Ai}(x), \text{ for } i = 1, 2, \dots \\ O_{1,i} &= \mu_{Bi}(y), \text{ for } i = 3, 4, \dots \end{aligned} \quad (5.1)$$

โดยที่ $O_{1,i}$ คือ ข้อมูลขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 1

$\mu_{Ai}(x)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลขาเข้า x ในโหนดที่ i

$\mu_{Bi}(y)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลขาเข้า y ในโหนดที่ i

ข้อมูลขาออกของชั้นที่ 1 คือระดับความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต ซึ่งถูกกำหนดด้วยข้อมูลขาเข้า x และ y โดยที่ตัวแปรของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการฝึกสอนตามลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในรูปแบบต่าง ๆ

5.1.2 ชั้นที่ 2

โหนดในชั้นที่ 2 เป็นโครงสร้างที่ตายตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการฝึกสอน โดยข้อมูลขาออกคือผลคูณของสัญญาณขาเข้าทุกตัวที่ได้จากข้อมูลขาออกจากชั้นที่ 1 ซึ่งจำนวนโหนดในชั้นที่ 2 เท่ากับจำนวนกฎของฟuzzyที่ใช้ในระบบดังกล่าวดังสมการที่ 5.2

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{Am}(x)\mu_{Bm}(y), \quad m = 1, 2; \quad i = 1, \dots, 4 \quad (5.2)$$

โดยที่ $O_{2,i}$ คือ ข้อมูลขาออกสำหรับโหนดที่ i ในชั้นที่ 2

w_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับโหนดที่ i

$\mu_{Am}(x)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับข้อมูลขาเข้า x ในฟuzzyเซต m

$\mu_{Bm}(y)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับข้อมูลขาเข้า y ในฟuzzyเซต m

ข้อมูลขาออกในชั้นนี้เป็นค่าที่ถูกลูกอมัลไลซ์ ซึ่งบ่งบอกถึงระดับของกฎฟuzzyแต่ละกฎ

5.1.3 ชั้นที่ 3

โหนดในชั้นที่ 3 เป็นโครงสร้างที่ตายตัว โดยแต่ละโหนดจะมีการคำนวณอัตราส่วนระหว่างค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละกฎในโหนดนั้น ๆ กับผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งเรียกว่า การนอร์มัลไลซ์ (normalization) ข้อมูลขาออกแสดงดังสมการที่ 5.3

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_1}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (5.3)$$

โดยที่ $O_{3,i}$ คือ ข้อมูลขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 3
 w_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของโหนดที่ i
 \bar{w}_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์แล้ว

5.1.4 ชั้นที่ 4

ชั้นที่ 4 จะเป็นการนำข้อมูลขาเข้าที่ป้อนให้กับระบบมาคำนวณผ่านสมการพหุนามลำดับที่ 1 โดยประกอบไปด้วยคอนซีควนท์พารามิเตอร์ $\{p, q, r\}$ เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามการฝึกสอน ข้อมูลขาออกแสดงดังสมการที่ 5.4

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (5.4)$$

โดยที่ $O_{4,i}$ คือ ข้อมูลขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 4
 \bar{w}_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์แล้ว
 f_i คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณสมการพหุนามในโหนด i
 p_i, q_i, r_i คือ คอนซีควนท์พารามิเตอร์ในโหนดที่ 1

5.1.5 ชั้นที่ 5

ในชั้นที่ 5 เป็นโหนดที่ทำการรวบรวมทุกข้อมูลขาออกจากชั้นที่ 4 เพื่อส่งเป็นข้อมูลขาออกของระบบดังสมการที่ 5.5

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (5.5)$$

โดยที่ $O_{5,i}$ คือ ข้อมูลขาออกของโหนดที่ i ในชั้นที่ 5
 \bar{w}_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์แล้ว
 f_i คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณสมการพหุนามในโหนด i

5.2 การฝึกสอนระบบอนุมานนิวโรฟซีแบบปรับตัวได้

การฝึกสอน ANFIS ที่จะทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง จะต้องมีข้อมูลขาเข้าและข้อมูลออกตัวอย่าง (Training data) โดยระหว่างการฝึกสอน ANFIS นั้นจะทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในระบบทั้งพรีมิสพารามิเตอร์และคอนซีควนท์พารามิเตอร์ที่อยู่ในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ให้สามารถคำนวณข้อมูลขาออกให้ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตัวอย่างที่นำมาฝึกสอน

5.2.1 การประมาณค่าโดยวิธี Least-Squares Estimator

วิธีการประมาณค่าแบบลีสท์สแควร์เป็นลักษณะการจำลองเชิงเส้นของตัวแปรตั้งสมการที่ 5.6

$$y = \theta_1 f_1(u) + \theta_2 f_2(u) + \dots + \theta_n f_n(u) \quad (5.6)$$

โดยที่ $u = [u_1, \dots, u_p]^T$ คือ เวกเตอร์ของข้อมูลขาเข้า

f_1, \dots, f_n คือ ฟังก์ชันของข้อมูลขาเข้าที่ทราบค่าแล้ว

$\theta_1, \dots, \theta_n$ คือ คอนซีควนท์พารามิเตอร์ที่จะประมาณค่า

แบบจำลองเชิงเส้นนี้ถูกเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) หรือ ฟังก์ชันถดถอย (Regression function)

การฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลตัวอย่างเป็นการประมาณค่าตัวแปร θ_i ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออก ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ จากสมการที่ 5.6 สามารถเขียนโดยใช้เมตริกซ์ได้ใหม่เพื่อให้มีความกระชับมากขึ้นดังสมการที่ 5.7 โดยมีสมการเชิงเส้นอยู่ m สมการ

$$A \theta = y \quad (5.7)$$

โดยที่ $A = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \dots & f_n(u_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(u_m) & \dots & f_n(u_m) \end{bmatrix}$ คือ เมตริกซ์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของข้อมูล

$\theta = [\theta_1 \dots \theta_n]^T$ คือ เวกเตอร์คอนซีควนท์พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

$y = [y_1 \dots y_m]^T$ คือ เวกเตอร์ข้อมูลขาออก

ส่วนของการหาค่าเวกเตอร์คอนซีควนท์พารามิเตอร์สามารถทำได้ก็ต่อเมื่อ $m \geq n$ ในกรณีที่เมตริกซ์ A เป็นเมตริกซ์จัตุรัส ($m=n$) และไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน จะสามารถหาคำตอบได้โดยการอินเวิร์สเมตริกซ์ A ดังสมการที่ 5.8

$$\theta = A^{-1}y \quad (5.8)$$

แต่โดยปกติแล้วจะมีชุดข้อมูลมากกว่าจำนวนชุดตัวแปรที่ต้องการทราบค่า ทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้โดยตรงเนื่องจากมีค่าคลาดเคลื่อน จึงมีการรวมเวกเตอร์ของความคลาดเคลื่อนเข้าไปในสมการที่ 5.7 จะได้ดังสมการที่ 5.9

$$A\theta + e = y \quad (5.9)$$

จากสมการที่ 5.9 สามารถหาคำตอบของเวกเตอร์คอนซีควนท์พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ($\theta = \hat{\theta}$) ได้จาก Minimization ของค่ารวมความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 5.10

$$E(\theta) = \sum_{i=1}^m (y_i - a_i^T \theta)^2 = (y - A\theta)^T (y - A\theta) \quad (5.10)$$

โดยให้ $e = y - A\theta$ เป็นเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการประมาณค่าเวกเตอร์คอนซีควนท์พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่ดีที่สุด ซึ่งผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองจะอยู่ในรูปแบบควอดราติก (Quadratic) และมีค่าน้อยที่สุด โดยการประมาณค่าเวกเตอร์ที่ได้นั้นเรียกว่า “Least-Squares Estimator” ซึ่งได้จากการแก้สมการที่ 5.11

$$E(\theta) = (y^T - \theta^T A^T)(y - A\theta) = \theta^T A^T A \theta - 2y^T A \theta + y^T y \quad (5.11)$$

ต่อไปจึงทำการหาอนุพันธ์ของค่ารวมความผิดพลาดยกกำลังสองตามสมการที่ 5.12

$$\frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta} = 2A^T A \theta - 2A^T y \quad (5.12)$$

โดยกำหนดให้ $\frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta} = 0$ ที่ $\theta = \hat{\theta}$ จะได้ดังสมการที่ 5.13

$$A^T A \hat{\theta} = A^T y \quad (5.13)$$

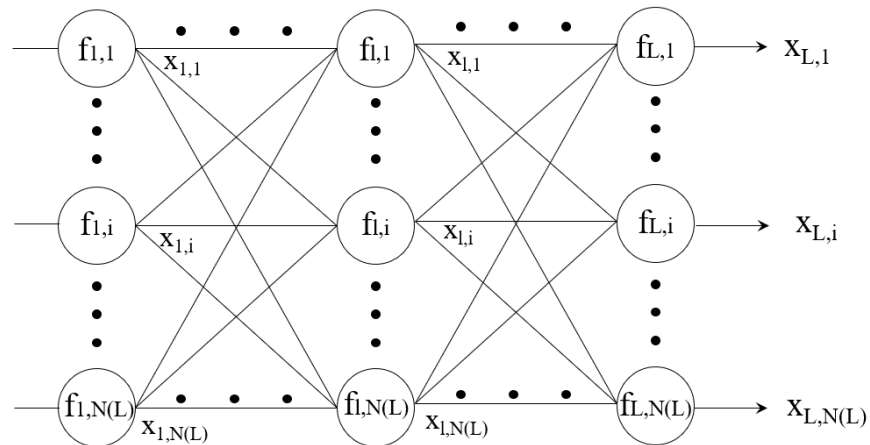
โดยที่ $A^T A$ ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (Non-singular matrix) จะได้คำตอบดังสมการที่ 5.14

$$\hat{\theta} = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (5.14)$$

5.2.2 การประมาณค่าโดยวิธี Backpropagation

วิธี Backpropagation ใช้ในการหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนกำลังสองเทียบกับพารามิเตอร์ที่ต้องการ เพื่อนำไปปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ในระบบ การหาค่าอนุพันธ์ลำดับของฟังก์ชันจะใช้วิธีการแพร่ย้อนกลับของสัญญาณความคลาดเคลื่อน

ระบบโครงสร้างนิวโรฟซีไอใด ๆ ที่มีจำนวนชั้น L และ l แทนลำดับชั้นซึ่งมีจำนวนโหนดเท่ากับ $N(L)$ ฟังก์ชันในแต่ละโหนดคือ $f_{l,i}$ และข้อมูลขาออกของแต่ละโหนดคือ $x_{l,i}$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างระบบแบบปรับตัวได้

ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของข้อมูลชุดที่ p จากข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออก ตัวอย่างจำนวน P ชุด ($1 \leq p \leq P$) แสดงดังสมการที่ 5.15

$$E_p = \sum_{k=1}^{N(L)} (d_k - x_{L,k})^2 \quad (5.15)$$

โดยที่ d_k คือ ข้อมูลขาออกที่ k จากชุดข้อมูลตัวอย่าง

$x_{L,k}$ คือ ข้อมูลขาออกที่ k ที่ได้จากระบบ

ในการฝึกสอน ระบบจะทำการประมาณค่าย้อนกลับจากชั้นข้อมูลขาออกไปยังข้อมูลขาเข้า โดยเริ่มจากการกำหนดสัญญาณความคลาดเคลื่อน ($\varepsilon_{l,i}$) เท่ากับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของค่ารวมความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (E_p) เทียบกับข้อมูลขาออกที่ได้จากระบบ ($x_{L,k}$) ในโหนดที่ l และชั้นที่ l ซึ่งแสดงดังสมการที่ 5.16

$$\varepsilon_{l,i} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{l,i}} \quad (5.16)$$

จากสมการที่ 5.16 สัญญาณความคลาดเคลื่อนในโหนดที่ i บนชั้นที่ L สามารถแก้ได้โดยตรงดังสมการที่ 5.17

$$\varepsilon_{L,i} = -2(d_i - x_{L,i}) \quad (5.17)$$

ในส่วนของสัญญาณความคลาดเคลื่อนในชั้นต่อไปของระบบหาได้จากการใช้กฎลูกโซ่ (chain rule) ดังสมการที่ 5.18

$$\varepsilon_{l,i} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{l,i}} = \sum_{m=1}^{N(l+1)} \frac{\partial E_p}{\partial x_{l+1,m}} \frac{\partial f_{l+1,m}}{\partial x_{l,i}} = \sum_{m=1}^{N(l+1)} \varepsilon_{l+1,m} \frac{\partial f_{l+1,m}}{\partial x_{l,i}} \quad (5.18)$$

โดยกำหนดให้ α คือพรีมิสพารามิเตอร์ในโหนดที่ i และชั้นที่ l ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 5.19

$$\frac{\partial E_p}{\partial \alpha} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{l,i}} \frac{\partial f_{l,i}}{\partial \alpha} = \varepsilon_{l,i} \frac{\partial f_{l,i}}{\partial \alpha} \quad (5.19)$$

อนุพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับพรีมิสพารามิเตอร์สามารถแสดงดังสมการที่ 5.20

$$\Delta \alpha = \frac{\partial E_p}{\partial \alpha} = \sum_{p=1}^P \frac{\partial E_p}{\partial \alpha} \quad (5.20)$$

ซึ่งค่าอนุพันธ์ ($\Delta \alpha$) ที่ได้จากสมการที่ 5.20 จะถูกนำมาอัปเดตเพื่อหาค่าพรีมิสพารามิเตอร์จากการทำซ้ำจนได้ค่าที่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องดังสมการที่ 5.21

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta \alpha \quad (5.21)$$

5.2.3 การฝึกสอนแบบ Hybrid Learning Algorithm

การฝึกสอนระบบอนุมานนิเวศน์แบบปรับตัวได้นี้เป็นการเลียนแบบการเรียนรู้จากระบบโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งวิธีการฝึกสอนแบบไฮบริดนั้นจะแบ่งการฝึกสอนออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการฝึกสอนเพื่อกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์ โดยพิจารณาจากโครงสร้างของระบบอนุมานนิเวศน์โดยกำหนดให้ค่าพรีมิสพารามิเตอร์มีค่าคงที่ และกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์จากการประมาณค่าโดยวิธี Least-Square Estimator ไปจนถึงชั้นที่ 4 ส่วนที่สองเป็นการฝึกสอนเพื่อกำหนดค่าพรีมิสพารามิเตอร์ เมื่อทำการฝึกสอนและกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์เรียบร้อยแล้วจะกำหนดให้มีค่าคงที่ไว้ และฝึกสอนด้วยวิธี Backpropagation จะได้สัญญาณความคลาดเคลื่อนแล้วจึงทำการกำหนดค่าพรีมิสพารามิเตอร์ใหม่เพื่อนำไปฝึกสอนและกำหนดค่าคอนซีควนท์พารามิเตอร์ใหม่ในรอบถัดไป [40] โดยวิธีการเรียนรู้แบบไฮบริดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 วิธีการฝึกสอนแบบ Hybrid Learning Algorithm

Parameter	Forward pass	Backward pass
Premise Parameter	Fixed	Gradient Descent
Consequent Parameter	Least-Square Estimator	Fixed

บทที่ 6 การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาผลกระทบในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เกิดจากความถี่ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานในสถานะที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าแตกต่างกัน และการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ร่วมกับการควบคุมค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก

6.1 การศึกษาผลกระทบของโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบโครงข่ายไฟฟ้า

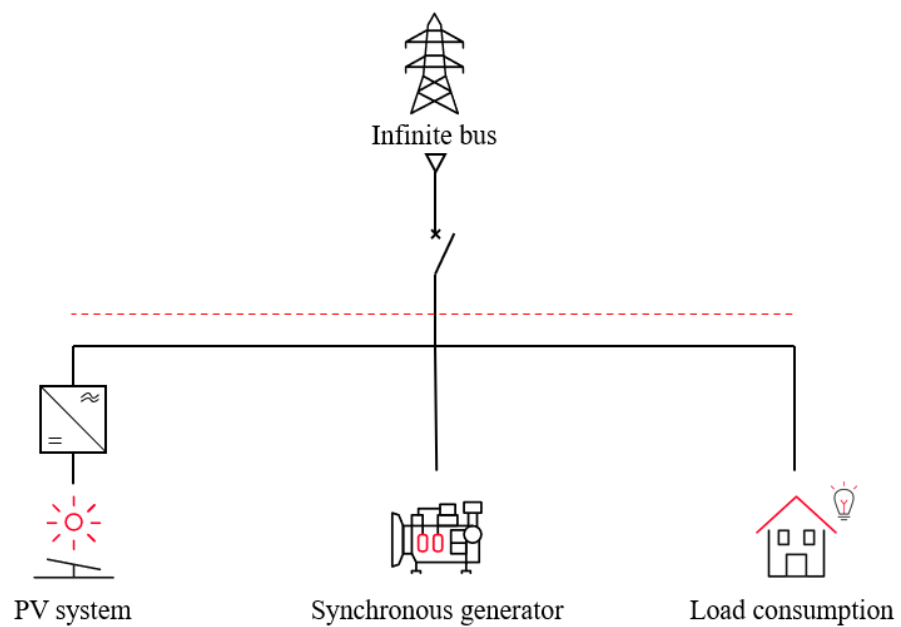
การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีบางเครื่องที่ไม่ได้ใช้งานต้องถูกปลดออกไป ทำให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าลดลง สาเหตุมาจากการนำระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้อินเวอร์เตอร์ที่ไม่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเองมาทำงานแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารี

6.1.1 ระบบทดสอบ

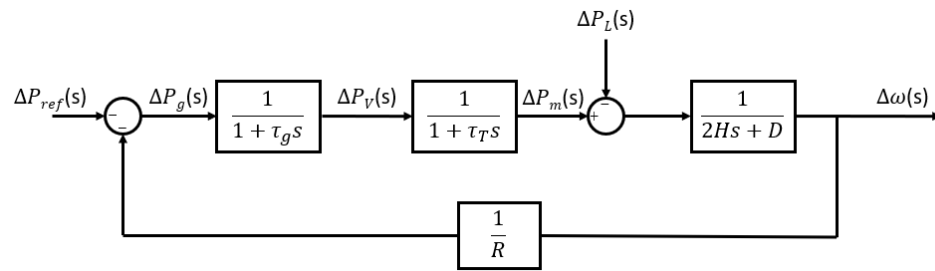
ระบบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบนี้ใช้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้า โดยค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบในขณะที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็น 5 วินาที และค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเข้ามาแทนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) โดยความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยถูกแสดงดังตารางที่ 6.1 และแผนภาพของระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.1 ส่วนแผนภาพแบบจำลองที่ใช้ศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่แสดงดังรูปที่ 6.2 โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ

สัดส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (วินาที)
0	5
10	4.5
20	4
30	3.5
40	3
50	2.5



รูปที่ 6.1 แผนภาพระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย



รูปที่ 6.2 แบบจำลองของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

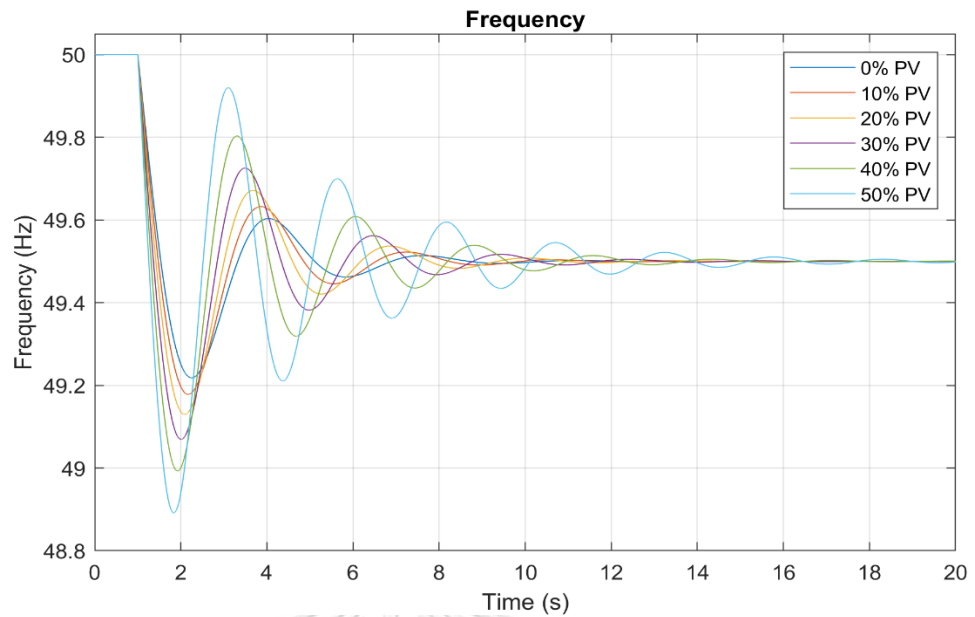
ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (τ_g)	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันต้นกำเนิดกำลัง (τ_T)	0.5 วินาที
ค่าคงที่ลักษณะรูป (R)	0.05
ค่าความหน่วงของระบบ (D)	0

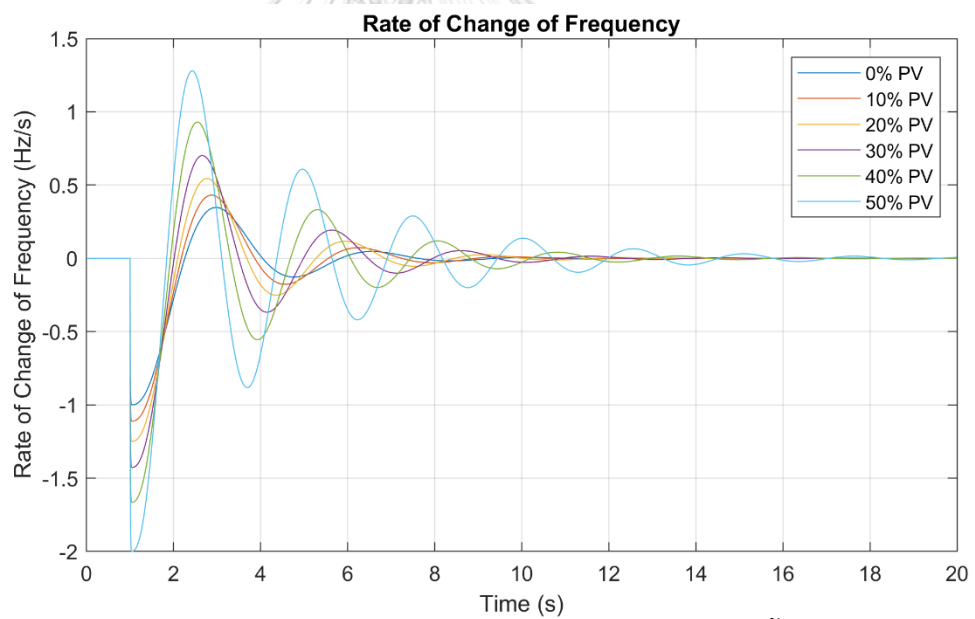
การทดสอบจะถูกจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้แบบจำลองรูปที่ 6.2 และค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 6.1 และ 6.2 โดยให้ระบบถูกรบกวนจากการเพิ่มขึ้นของโหลดทางไฟฟ้าขนาด 0.2 ต่อหน่วย ที่เวลา 1 วินาที

6.1.2 ผลการศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่ในระบบ

ในการศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่นั้น ตัวแปรที่ถูกนำมาพิจารณามี 2 ค่าคือ ค่าความถี่ไฟฟ้าของระบบ และ อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ ผลการศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่เมื่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยต่างกันถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 และผลการศึกษานั้นถูกสรุปไว้ดังตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ความถี่ไฟฟ้าของระบบเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 6.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 6.3 ผลกระทบทางด้านความถี่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

สัดส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความถี่ ณ จุดที่เกิดการเบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิร์ตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด (เฮิร์ตซ์ต่อวินาที)
0	49.22	1
10	49.18	1.11
20	49.13	1.25
30	49.07	1.43
40	48.99	1.67
50	48.89	2

จากรูปที่ 6.3 และ 6.4 และสรุปในตารางที่ 6.3 แสดงให้เห็นว่าในระบบที่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ความถี่จะเกิดการเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานมากกว่าในระบบที่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยสูง เช่นเดียวกับกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สูงขึ้นเมื่อค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าต่ำลง นั้นหมายความว่า การเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นทำให้เสถียรภาพทางด้านความถี่ไฟฟ้าของระบบลดลง

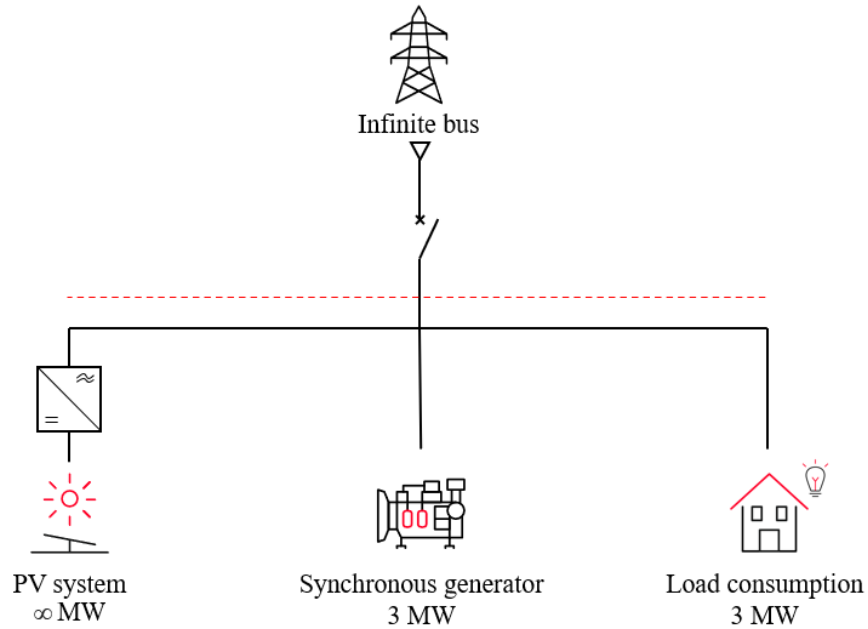
6.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อนำค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยมาปรับใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีแนวคิดมาจากการศึกษาผลกระทบจากหัวข้อที่แล้ว

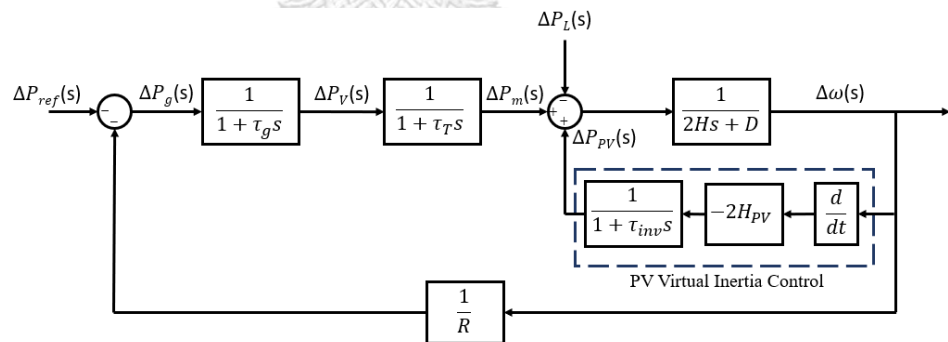
6.2.1 ระบบทดสอบ

ระบบที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ขนาดเล็กลง 3 เมกะวัตต์ จำนวน 1 เครื่อง เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่มากนั้นหมายความว่า มีกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองไม่จำกัด และถูกควบคุมให้มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนในตัวเอง โดยระบบทดสอบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าขนาด 3 เมกะวัตต์ ระบบทดสอบมีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักและมีความสามารถเดินเครื่องแบบแยกตัวอิสระได้ โดยแผนภาพระบบทดสอบถูกแสดงไว้ดัง

รูป 6.5 ซึ่งถูกนำมาทำแบบจำลองดังรูปที่ 6.6 และค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 6.4



รูปที่ 6.5 แผนภาพระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบค่าคงที่ไม่แน่นอนความเฉื่อยเสมือน



รูปที่ 6.6 แบบจำลองของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบค่าคงที่ไม่แน่นอนความเฉื่อยเสมือน

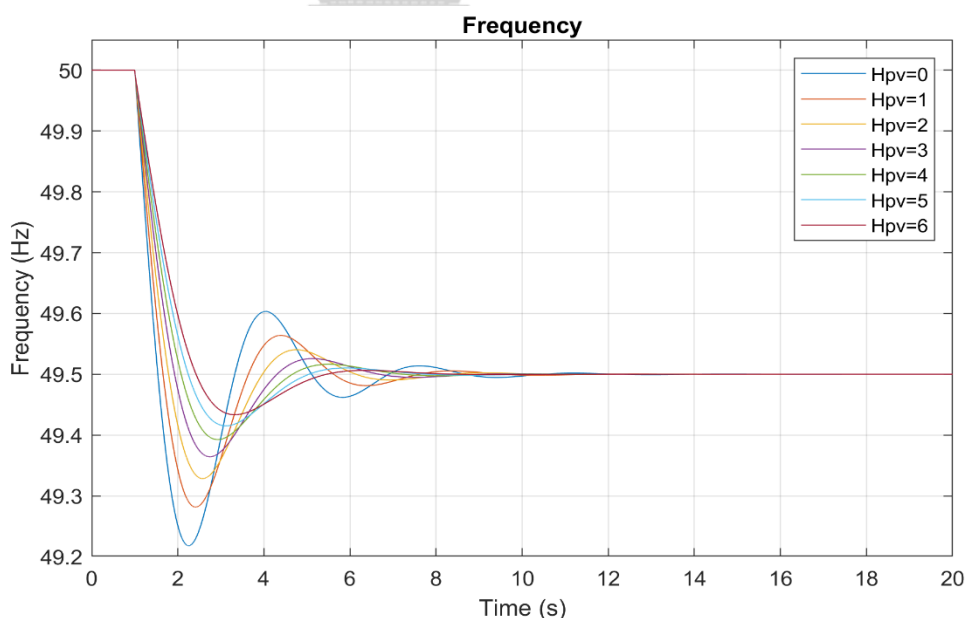
ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบค่าคงที่โมเมนต์
ความเฉื่อยเสมือน

ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (τ_g)	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันต้นกำเนิดกำลัง (τ_T)	0.5 วินาที
ค่าคงที่ลักษณะद्रูป (R)	0.05
ค่าความหน่วงของระบบ (D)	0
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H)	5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอินเวอร์เตอร์ (τ_{inv})	0.01 วินาที
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน (H_{pv})	0 – 6 วินาที

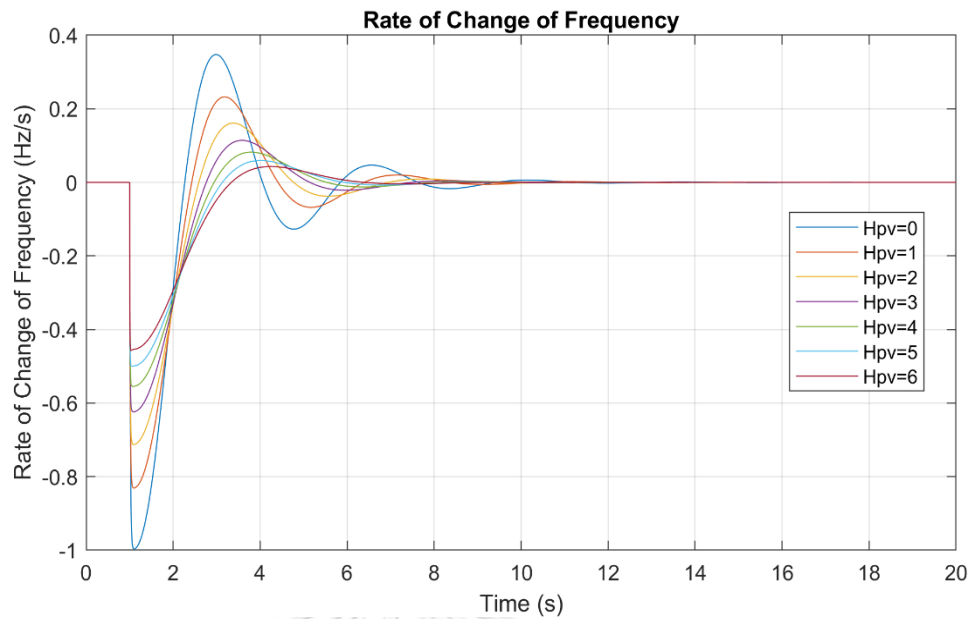
การทดสอบจะถูกจำลองโดยที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กเกิดการรบกวนจาก
โหลดทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นขนาด 0.2 ต่อหน่วย ที่เวลา 1 วินาที

6.2.2 ผลการศึกษาและออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน

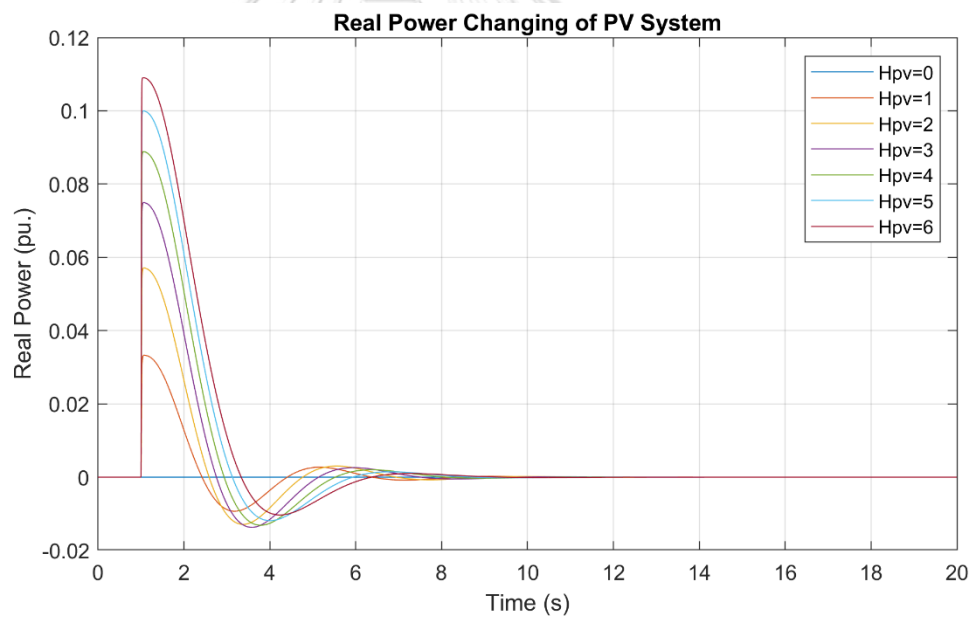
ผลจากการศึกษาการออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนถูกแสดงไว้ดังรูปที่
6.7 - 6.9 โดยที่ผลสรุปจะถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 6.5



รูปที่ 6.7 ความถี่ของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน



รูปที่ 6.8 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน



รูปที่ 6.9 กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน

ตารางที่ 6.5 ผลกระทบทางด้านความถี่ที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนต่างกัน

ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน (วินาที)	ค่าความถี่ ณ จุดที่เกิดการเบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด (เฮิรตซ์ต่อวินาที)	กำลังการผลิตสำรองสูงสุด (ต่อหน่วย)
0	49.22	1	0
1	49.28	0.83	0.033
2	49.33	0.71	0.057
3	49.36	0.62	0.075
4	49.39	0.55	0.089
5	49.42	0.50	0.100
6	49.43	0.46	0.109

จากรูปที่ 6.7 – 6.9 และตารางสรุปที่ 6.5 จะพบว่าในกรณีในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนในตัวเองจะมีค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 49.26 เฮิรตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุดเท่ากับ 1 เฮิรตซ์ต่อวินาที โดยที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้จ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยในขณะที่ความถี่เกิดการเบี่ยงเบน เมื่อทำการเพิ่มค่า H_{pv} ให้แก่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดการรับ-จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงตามสมการการแกว่ง โดยมีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนเป็นตัวกำหนด ส่งผลให้ค่าความถี่ ณ จุดต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่าน้อยลง ดังนั้นการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนให้แก่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้

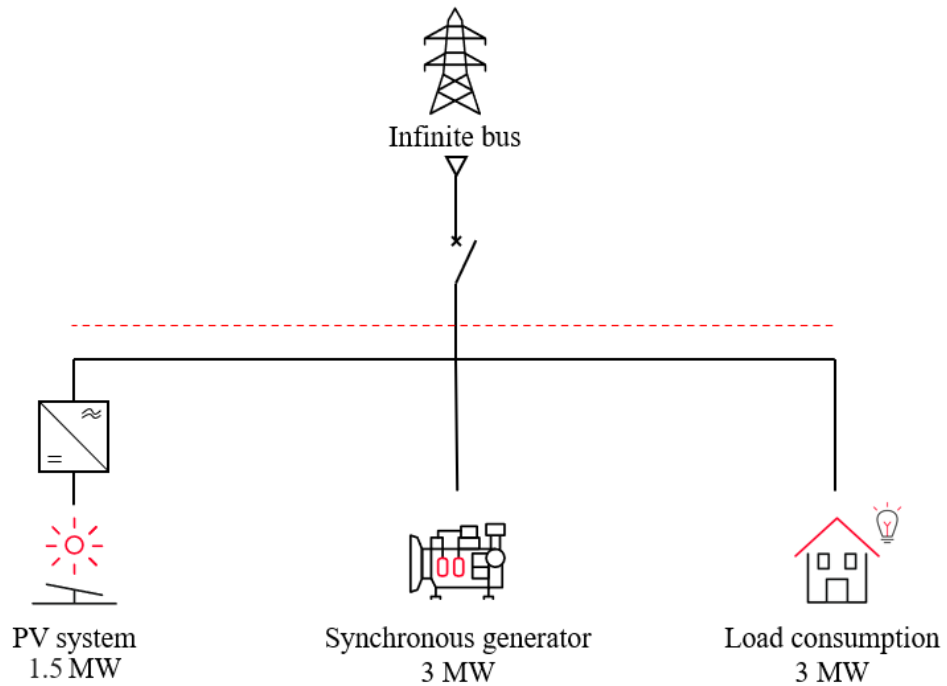
6.3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำเป็นต้องใช้เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่ไฟฟ้าของระบบเมื่อเกิดการรบกวนซึ่งทำให้ความถี่เบี่ยงเบนออกไปจากค่ามาตรฐาน

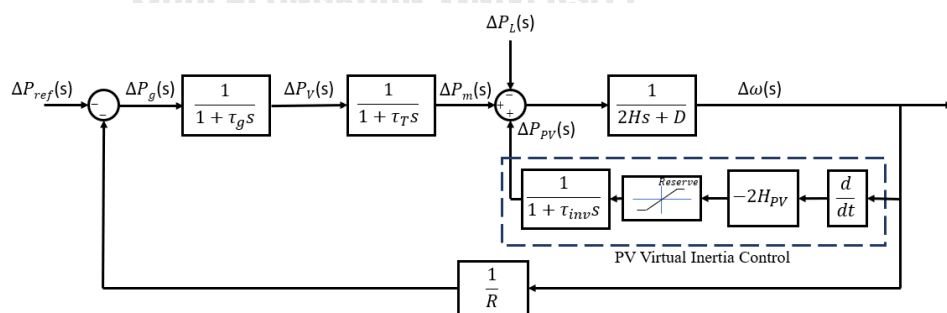
6.3.1 ระบบทดสอบ

การศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ระบบทดสอบเช่นเดียวกับในหัวข้อ 6.2 โดยที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

มีกำลังการผลิตเท่ากับ 1.5 เมกะวัตต์ โดยในการศึกษานี้จะกำหนดให้ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและอัตราส่วนของกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านความถี่ในแต่ละกรณี โดยระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.10 แบบจำลองระบบทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.11 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.6



รูปที่ 6.10 แผนภาพระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 6.11 แบบจำลองของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

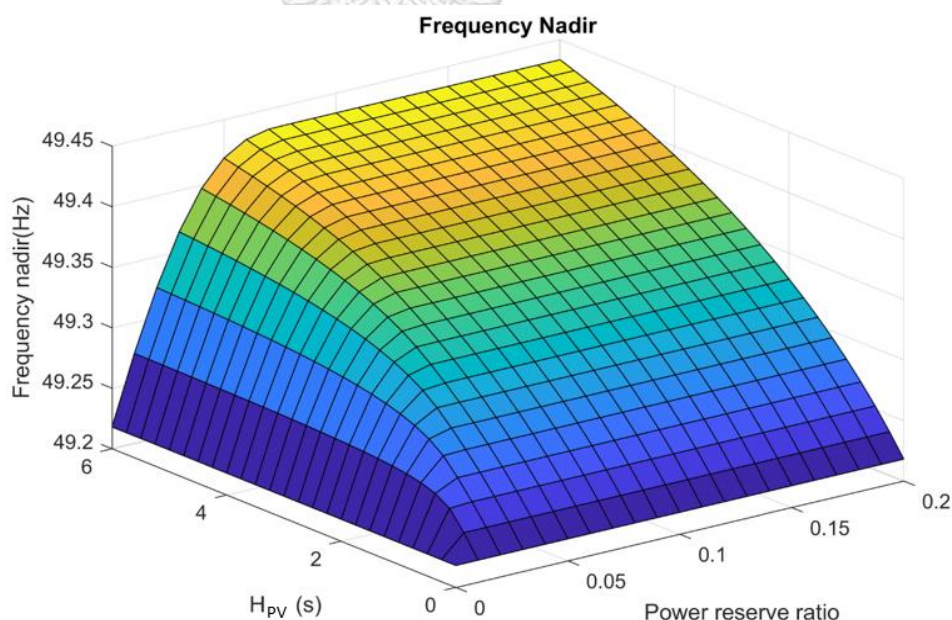
ตารางที่ 6.6 พารามิเตอร์ของระบบทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (τ_g)	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันต้นกำเนิดกำลัง (τ_T)	0.5 วินาที
ค่าคงที่ลักษณะรูป (R)	0.05
ค่าความหน่วงของระบบ (D)	0
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H)	5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอินเวอร์เตอร์ (τ_{inv})	0.01 วินาที
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน (H_{pv})	0 – 6 วินาที
อัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรอง (% Reserve)	0 – 20 เปอร์เซ็นต์

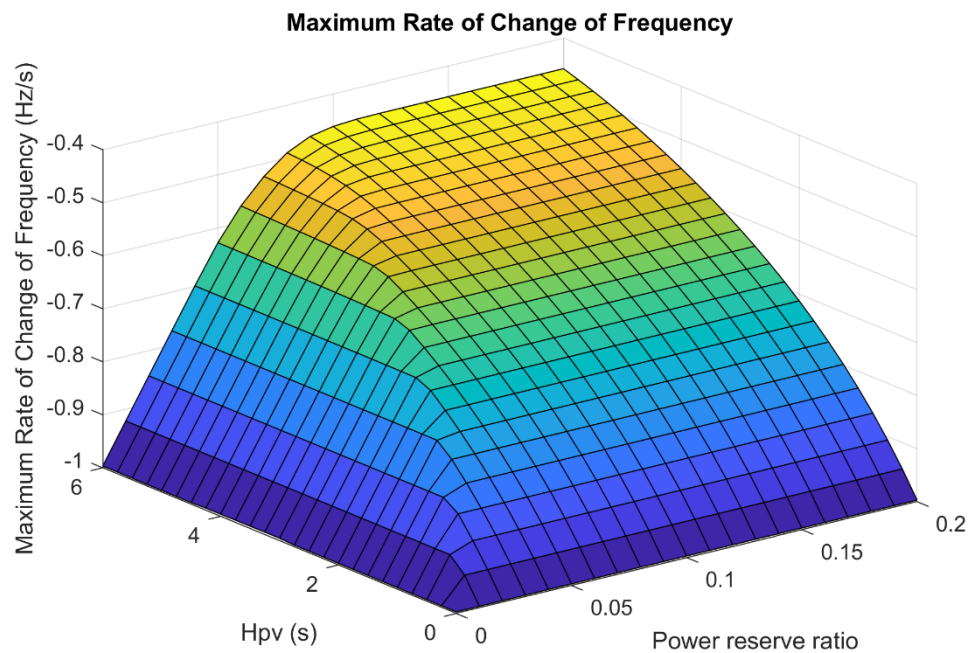
การทดสอบจะถูกจำลองโดยระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กเกิดการรบกวนจากโหลดทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นขนาด 0.2 ต่อหน่วย ที่เวลา 1 วินาที

6.3.2 ผลการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการศึกษาและการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 6.12 และ 6.13



รูปที่ 6.12 ความถี่ต่ำที่สุดของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและอัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองต่างกัน



รูปที่ 6.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุดของระบบที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน และอัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองต่างกัน

รูปที่ 6.12 และ 6.13 แสดงให้เห็นแนวโน้มของความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและอัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองต่าง ๆ เมื่อเพิ่มค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนจาก 0 ถึง 6 วินาที จะยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับไมโครกริดได้แต่ความสามารถในการช่วยระบบจะลดลงตามค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองจาก 0 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าจากทั้งความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่าคงที่เมื่ออัตราส่วนกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสำหรับระบบทดสอบนี้จึงเลือกใช้กำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในด้านการรักษาเสถียรภาพทางด้านไฟฟ้ารวมถึงการลดการสูญเสียพลังงานด้วย

บทที่ 7 การประยุกต์ใช้ ANFIS ในการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้า สำรองที่ต้องการสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

การออกแบบการควบคุมโดยใช้วิธี ANFIS นั้นจะแปลงตัวแปรขาเข้าของระบบเป็นตัวแปรขาออกได้โดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย ANFIS จะถูกฝึกสอนด้วยข้อมูลตัวอย่างเพื่อให้มีความสามารถในการคำนวณตัวแปรของระบบได้ ในขั้นตอนการฝึกสอน จำนวนพารามิเตอร์ในระบบและความสอดคล้องกันของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกกับข้อมูลตัวอย่างส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ด้วย [41]

การออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น การประยุกต์ใช้ ANFIS ในการหาค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมสำหรับสถานะต่าง ๆ ในไมโครกริด เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบ เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ปัจจัยที่ส่งผลต่อการฝึกสอน ANFIS การกำหนดตัวแปรขาเข้าของ ANFIS และการสร้าง ANFIS สำหรับการทดสอบ

7.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการฝึกสอน ANFIS

ในการอนุมานหาสถานะการทำงานของ ANFIS จะต้องใช้ข้อมูลฝึกสอนที่ครอบคลุมสถานะของระบบ และการกำหนดตัวแปรขาเข้าของ ANFIS นั้นจำเป็นต้องมีความสอดคล้องกับตัวแปรขาออกที่ต้องการ ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและจำนวนของฟuzzyเซตเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญสำหรับการฝึกสอน ANFIS ซึ่งมีส่วนในการบ่งบอกลักษณะของข้อมูลที่ใช้ โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาด้วยกันคือ จำนวนข้อมูลขาเข้าของ ANFIS จำนวนฟuzzyเซตของข้อมูลขาเข้า และจำนวนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต ซึ่งจากที่กล่าวมาปัจจัยทั้งหมดจะมีผลต่อจำนวนพรีมิสพารามิเตอร์ จำนวนกฎ และคอนซีควนท์พารามิเตอร์ใน ANFIS ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ 7.1 – 7.3

$$N_{pre} = N_f \sum_{k=1}^{N_{input}} m_k \quad (7.1)$$

$$N_{rule} = \prod_{k=1}^{N_{input}} m_k \quad (7.2)$$

$$N_{cons} = (N_{input} + 1) \times N_{rule} \quad (7.3)$$

โดย N_{pre} คือ จำนวนพรีมิสพารามิเตอร์ทั้งหมด
 N_{rule} คือ จำนวนกฎ

N_{cons} คือ จำนวนคอนซีควেন্টพารามิเตอร์

N_f คือ จำนวนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต

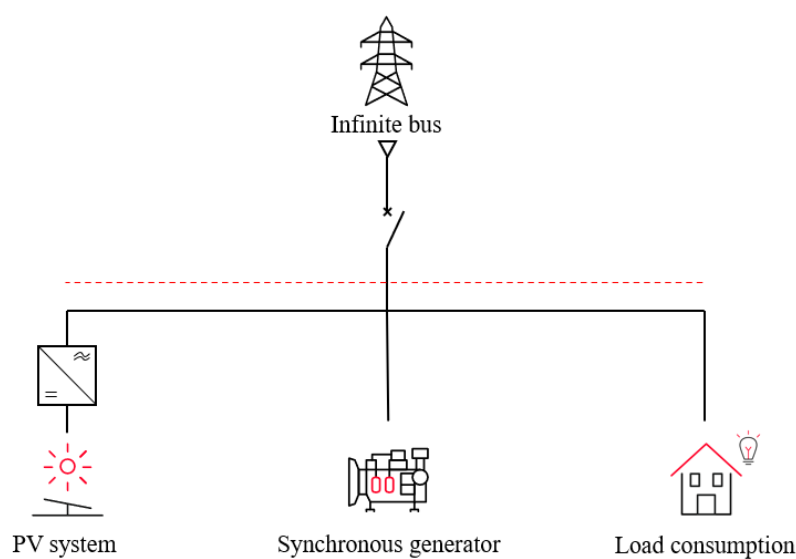
N_{input} คือ จำนวนข้อมูลขาเข้า

m_k คือ จำนวนฟuzzyเซตของข้อมูลขาเข้าแต่ละตัว

สมการที่ 7.1 – 7.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของจำนวนข้อมูลขาเข้าของ ANFIS และจำนวนฟuzzyเซตของข้อมูลขาเข้า กับจำนวนตัวแปรในระบบ ANFIS ซึ่งจำนวนตัวแปรในระบบจะส่งผลต่อความแม่นยำของระบบที่ถูกนำไปใช้งาน การเพิ่มจำนวนข้อมูลขาเข้าหรือจำนวนฟuzzyเซตเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้จำนวนตัวแปรในระบบ ANFIS มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการฝึกสอน ANFIS มากขึ้นไปด้วย ในทางตรงกันข้ามหากลดจำนวนข้อมูลขาเข้าหรือจำนวนฟuzzyเซต ถึงแม้จะทำให้ตัวแปรใน ANFIS น้อยลง และใช้เวลาฝึกสอนน้อยลง แต่อาจเกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้นจากความไม่สอดคล้องกันของข้อมูล

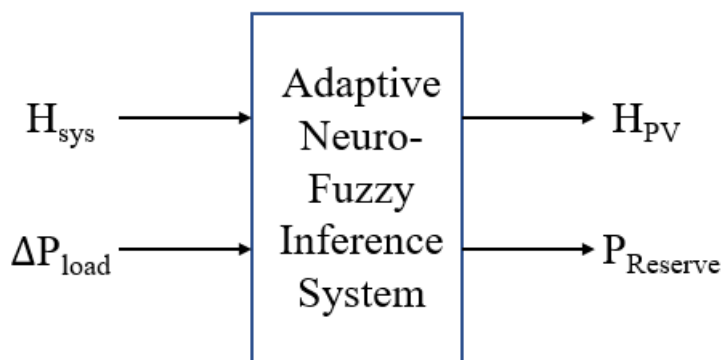
7.2 การกำหนดข้อมูลขาเข้าของ ANFIS

สำหรับการประยุกต์ใช้ ANFIS เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่โดยการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ จำเป็นที่จะต้องกำหนดข้อมูลขาเข้าของ ANFIS ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับข้อมูลขาออกที่ต้องการ เพื่อให้ ANFIS สามารถอนุมานสถานะในการทำงานของระบบไมโครกริดได้อย่างแม่นยำ โดยใช้การพิจารณาจากแบบจำลองของระบบไมโครกริด ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แบบจำลองที่ใช้ในการพิจารณากำหนดข้อมูลขาเข้า ANFIS

จากแบบจำลองระบบไมโครกริดที่จะทำการศึกษาค้นคว้าการตอบสนองต่อความถี่ของระบบ ตัวแปรที่มีผลต่อความเปลี่ยนแปลงความถี่คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ และ กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบ ดังนั้นจึงนำเสนอการกำหนดตัวแปรขาเข้าของ ANFIS จากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบและกำลังไฟฟ้าโหลดที่ยอมให้เปลี่ยนไปของระบบดังรูปที่ 7.2 เพื่อออกแบบค่าความถี่เสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่เหมาะสมสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 7.2 รูปแบบของ ANFIS

ระบบ ANFIS จะมีโหนดข้อมูลขาเข้าที่แสดงถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยมีขอบเขตของข้อมูลขาเข้าที่พิจารณาดังนี้

- 1) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H_{sys}) มีขอบเขตตั้งแต่ 1-6 s โดยเปลี่ยนแปลงไปที่ละ 0.5 s รวมทั้งหมด 11 สถานะ
- 2) ค่ากำลังไฟฟ้าโหลดที่ยอมให้เปลี่ยนไปของระบบ (ΔP_{load}) มีขอบเขตตั้งแต่ 0.05-0.2 pu โดยเปลี่ยนแปลงไปที่ละ 0.01 pu รวมทั้งหมด 16 สถานะ

โหนดข้อมูลขาออกที่แสดงถึงการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบมีขอบเขตของข้อมูลดังนี้

- 1) ค่าความถี่เสมือนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (H_{PV}) มีขอบเขตตั้งแต่ 0-6 s โดยเปลี่ยนแปลงไปที่ละ 0.1 s รวมทั้งหมด 61 สถานะ
- 2) ค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ($P_{Reserve}$) มีขอบเขตตั้งแต่ 0-10 % ของพิกัดสูงสุด โดยเปลี่ยนแปลงไปที่ละ 0.5 % รวมทั้งหมด 21 สถานะ

สำหรับการหาค่าของข้อมูลขาออกสำหรับการฝึกสอน ANFIS หาได้จากการวิเคราะห์ระบบไมโครกริดจากการจำลองในทุกสถานะของระบบรวมทั้งสิ้น 225,456 กรณี โดยในแต่ละกรณีจะทำการเก็บค่าข้อมูลขาออกที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยกำหนดให้เป้าหมายของการทดสอบคือ ความถี่ของไมโครกริดที่เบี่ยงเบนไปยังคงอยู่ในช่วงความถี่มาตรฐานตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ($49.5 \text{ Hz} < f < 50.5 \text{ Hz}$) [19]

7.3 การสร้าง ANFIS

การประยุกต์ใช้ ANFIS ในการหาค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ จำเป็นจะต้องสร้างชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนที่สอดคล้องกับระบบ ตัวแปรค่าขาออกที่ใช้ฝึกสอน ANFIS หาได้จากการวิเคราะห์ระบบทดสอบสำหรับชุดข้อมูลขาเข้าแต่ละชุด โดยค่าคงที่ไม่เมนต์ความเฉื่อยของระบบ และ กำลังไฟฟ้าโหลดของที่เปลี่ยนไป เป็นข้อมูลขาเข้า ส่วนข้อมูลขาออกคือ ค่าความเฉื่อยเสมือน และค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ โดยใช้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 176 ข้อมูลในการออกแบบ ANFIS ที่จะใช้ในการฝึกสอนจะทำการทดสอบโดยใช้ชุด ANFIS ที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากการฝึกสอนโดยใช้ ANFIS แต่ละแบบ โดยใช้ค่ารากของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error : RMSE) เป็นดัชนีชี้วัดความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลขาออกที่ได้จาก ANFIS กับข้อมูลขาออกตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไมโครกริดจากหัวข้อที่ 7.2 RMSE สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7.4

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Output_{i,ANFIS} - Output_{i,sample})^2} \quad (7.4)$$

การทดสอบที่ใช้มีดังนี้

1) การทดสอบโดยใช้ชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกัน โดยจะนำฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่นิยมใช้กันมากที่สุดมาทดสอบ เพื่อหาชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมในการคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ

2) การทดสอบโดยใช้จำนวนฟังก์ชันที่แตกต่างกัน เพื่อกำหนดจำนวนฟังก์ชันที่เหมาะสมในการคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ

7.3.1 การทดสอบโดยใช้ชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันในการคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากการใช้ลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ต่างกัน โดยกำหนด ANFIS จำนวน 3 ชุด ที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างกันแสดงดังตารางที่ 7.1 และผลการเปรียบเทียบค่า RMSE ของค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ ที่ได้จากการฝึกสอนโดย ANFIS ทั้ง 3 ชุด แสดงดังตารางที่ 7.2 และ 7.3

ตารางที่ 7.1 ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อ 7.3.1

ANFIS	จำนวน ข้อมูลขาเข้า	จำนวน ข้อมูลขาออก	ฟังก์ชัน ความเป็น สมาชิก	จำนวน ฟuzzyเซต	จำนวน กฎ	จำนวน พารามิเตอร์
1	2	1	คางหมู	6 6	36	156
2	2	1	ระฆัง	6 6	36	144
3	2	1	เกาส์เซียน	6 6	36	132

ตารางที่ 7.2 ค่า RMSE ของค่าความเฉื่อยเสมือนจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.1

ANFIS	RMSE
1	0.21448
2	0.21141
3	0.20922

ตารางที่ 7.3 ค่า RMSE ของค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.1

ANFIS	RMSE
1	0.001599
2	0.001597
3	0.001483

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ และพบว่า ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียนให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีค่า RMSE น้อยกว่า ANFIS รูปแบบอื่น

7.3.2 การทดสอบโดยใช้จำนวนฟuzzyเซตที่แตกต่างกันในการคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากการใช้จำนวนฟuzzyเซตของข้อมูลขาเข้าที่แตกต่างกัน โดยกำหนด ANFIS จำนวน 3 ชุด ที่มีจำนวนฟuzzyเซตของข้อมูลขาเข้าต่างกันแสดงดังตารางที่ 7.4 ผลการเปรียบเทียบค่า RMSE ของค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ ที่ได้จากการฝึกสอนโดย ANFIS ทั้ง 3 ชุด แสดงดังตารางที่ 7.5 และ 7.6

ตารางที่ 7.4 ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อ 7.3.2

ANFIS	จำนวน ข้อมูลขาเข้า	จำนวน ข้อมูลขาออก	ฟังก์ชัน ความเป็น สมาชิก	จำนวน ฟuzzyเซต	จำนวน กฎ	จำนวน พารามิเตอร์
1	2	1	เกาส์เซียน	3 3	9	39
2	2	1	เกาส์เซียน	6 6	36	132
3	2	1	เกาส์เซียน	12 12	144	480

ตารางที่ 7.5 ค่า RMSE ของค่าความเฉื่อยเสมือนจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.2

ANFIS	RMSE
1	0.30593
2	0.20922
3	0.00892

ตารางที่ 7.6 ค่า RMSE ของค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการจากการฝึกสอนในหัวข้อ 7.3.2

ANFIS	RMSE
1	0.002847
2	0.001483
3	0.000062

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการกำหนดจำนวนฟuzzyเซตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนฟuzzyเซตจะส่งผลให้การฝึกสอนใช้เวลามากขึ้นเนื่องจากพารามิเตอร์ในระบบที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง การกำหนดจำนวนฟuzzyเซตที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาทั้งในด้านความคลาดเคลื่อนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน จำนวนฟuzzyเซตที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้จะถูกนำไปใช้งานต่อไป

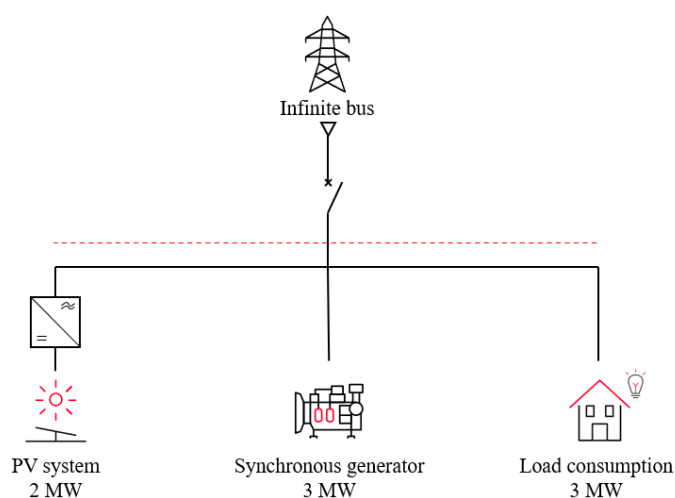
บทที่ 8 ผลการทดสอบการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ ต้องการโดยใช้วิธี ANFIS

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบให้มีค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธีการ ANFIS เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่ไฟฟ้าให้แก่ระบบไมโครกริดขณะแยกโดด โดยการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 4 การทดสอบ เนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วย ระบบทดสอบ วิธีการทดสอบ ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

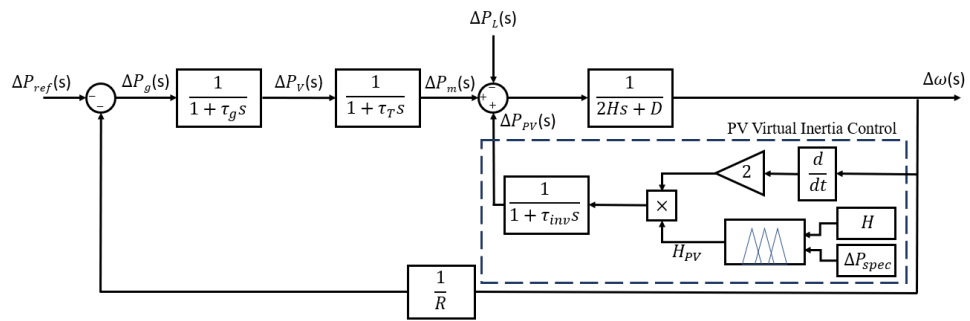
8.1 ระบบทดสอบและพารามิเตอร์

ระบบทดสอบที่ถูกนำมาใช้เป็นระบบไมโครกริดที่เดินเครื่องในลักษณะแยกโดด โดยมีการปลดจุดที่เชื่อมต่อระหว่างระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่และระบบไมโครกริดออก แบบจำลองระบบทดสอบถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 8.1 และ 8.2 โดยกำหนดให้ระบบทดสอบมีอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบดังนี้

- 1) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กำลังผลิตติดตั้ง 2 เมกะวัตต์ และสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าพิกัดในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.5 เมกะวัตต์ ซึ่งมีการควบคุมด้วยค่าความเฉื่อยเสมือนเพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ด้วยวิธี ANFIS
- 2) โรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกำลังผลิตติดตั้งขนาด 3 เมกะวัตต์ แอมแปร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าหลักของระบบไมโครกริดที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยในตัวเอง
- 3) ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด 3 เมกะวัตต์



รูปที่ 8.1 แผนภาพของระบบทดสอบ



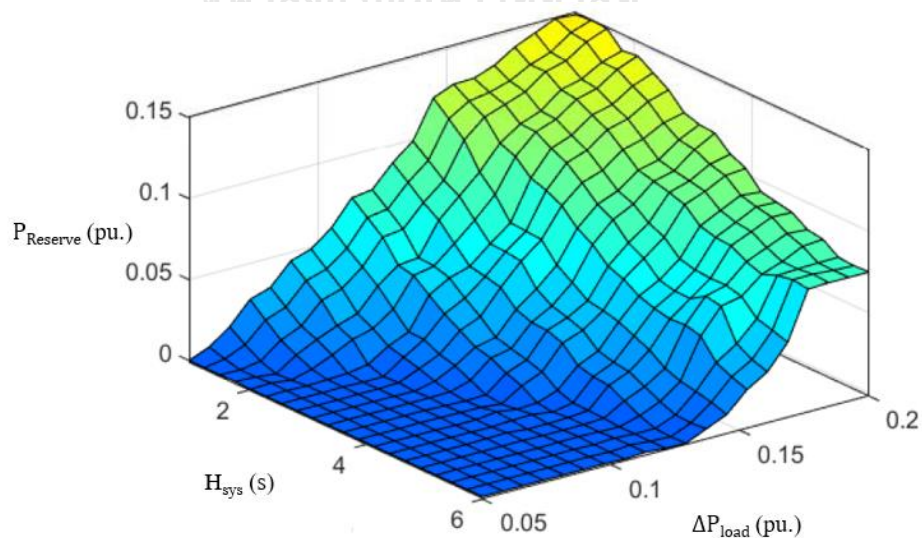
รูปที่ 8.2 แบบจำลองของระบบทดสอบ

โดยค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์เช่น ค่าคงที่ทางเวลาของกังหัน ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ แต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางกลของต้นกำเนิดกำลัง ในระบบทดสอบนี้เลือกใช้ลักษณะของต้นกำเนิดกำลังแบบกังหันไอน้ำเป็นต้นกำเนิดกำลัง

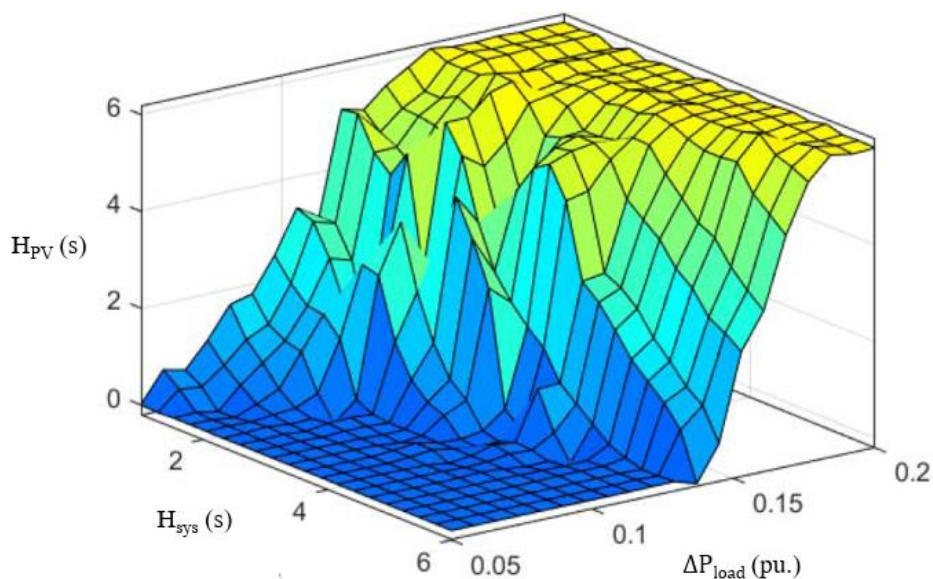
รูปแบบของระบบ ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 8.1 และกราฟแสดงลักษณะ ANFIS แสดงไว้ดังรูปที่ 8.3 และ 8.4

ตารางที่ 8.1 ลักษณะของ ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ

ANFIS	จำนวนข้อมูลขาเข้า	จำนวนข้อมูลขาออก	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	จำนวนฟัซซีเซต	RMSE
กำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ	2	1	เกาส์เซียน	12 12	0.00006
ความเฉื่อยเสมือน	2	1	เกาส์เซียน	12 12	0.00892



รูปที่ 8.3 ลักษณะ ANFIS ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ



รูปที่ 8.4 ลักษณะ ANFIS ในการคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือน

8.2 การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้วิธี ANFIS ในการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการเพื่อรักษาเสถียรภาพทางด้านความถี่ไฟฟ้าในไมโครกริดไม่ให้เบี่ยงเบนเกินค่ามาตรฐานข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า ($49.5 \text{ Hz} < f < 50.5 \text{ Hz}$) [19] โดยการทดสอบมีด้วยกัน 4 การทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบประสิทธิภาพขณะที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในปริมาณต่าง ๆ
- 2) การทดสอบประสิทธิภาพขณะที่เกิดการรบกวนจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ
- 3) การทดสอบประสิทธิภาพขณะที่เกิดการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางส่วนออกจากระบบส่งผลให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเปลี่ยนไป
- 4) การทดสอบประสิทธิภาพของการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนด้วยวิธีการต่าง ๆ

8.2.1 การทดสอบที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพขณะที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในปริมาณต่าง ๆ

การทดสอบนี้จะทดสอบความสามารถของการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS ในการเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบในกรณีที่กำลังไฟฟ้าในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนไป ระบบทดสอบมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 8.2 โดยการทำงานของระบบขณะเกิดการรบกวนมีลักษณะดังนี้

- 1) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 0.15 เมกะวัตต์(10 %) 0.18 เมกะวัตต์(12 %) 0.30 เมกะวัตต์(20 %) 0.75 เมกะวัตต์(50 %) และ 1.5 เมกะวัตต์(100 %) ตามลำดับ
- 2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผลิตกำลังไฟฟ้า 2.85 เมกะวัตต์ 2.82 เมกะวัตต์ 2.70 เมกะวัตต์ 2.25 เมกะวัตต์ และ 1.5 เมกะวัตต์ ตามลำดับ
- 3) ความต้องการใช้ไฟฟ้าเท่ากับกำลังการผลิตทั้งหมดในไมโครกริด

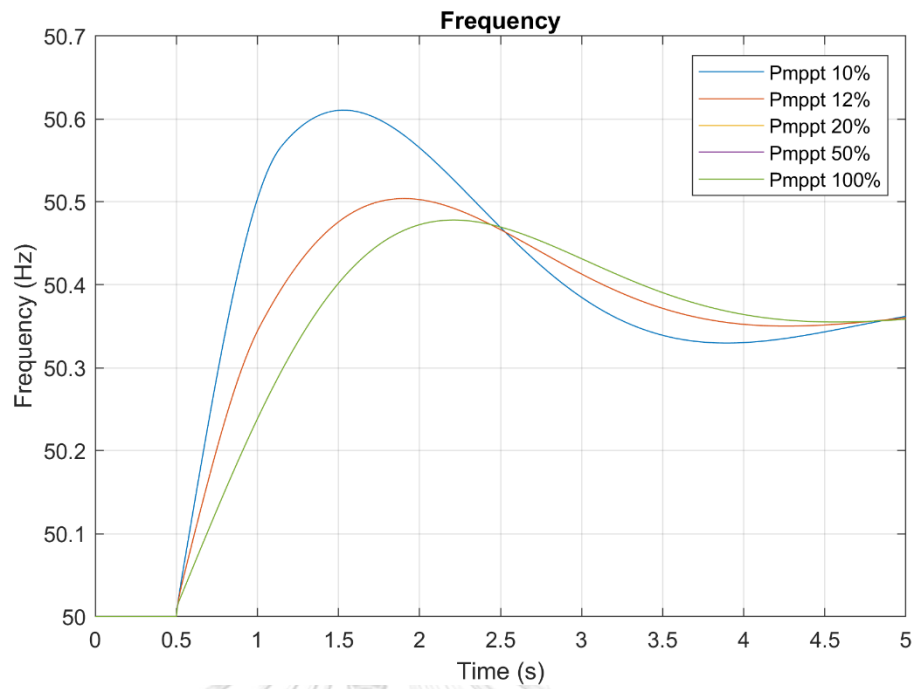
ตารางที่ 8.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 1

ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (τ_{ω})	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันต้นกำเนิดกำลัง (τ_T)	0.5 วินาที
ค่าคงที่ลักษณะรูป (R)	0.05
ค่าความหน่วงของระบบ (D)	0
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H)	2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอินเวอร์เตอร์ (τ_{inv})	0.01 วินาที
ค่ากำลังไฟฟ้าโหลดที่ยอมให้เปลี่ยนไปของระบบ (ΔP_{load})	0.15 เมกะวัตต์
กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน (S_{base})	1 เมกะวัตต์แอมแปร์

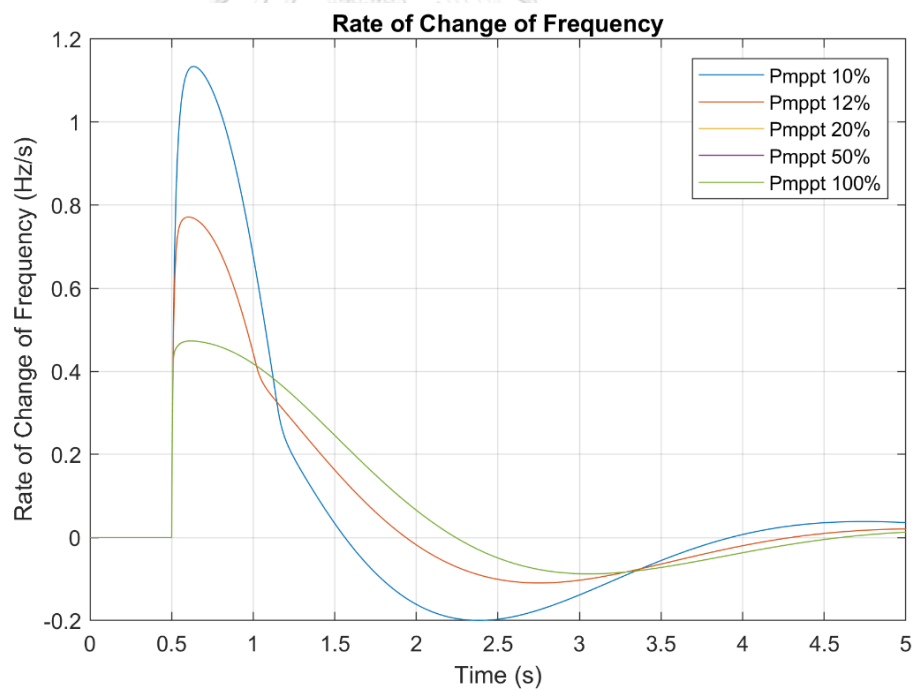
กำหนดให้ระบบทดสอบทำงานแบบแยกโดดและเกิดการรบกวนจากการลดลงของโหลดอย่างรวดเร็วที่ขนาด 0.15 ต่อหน่วย ที่เวลา 0.5 วินาที ผลการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS แสดงดังตารางที่ 8.3 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8.5 - 8.7 และสรุปไว้ดังตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.3 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 1

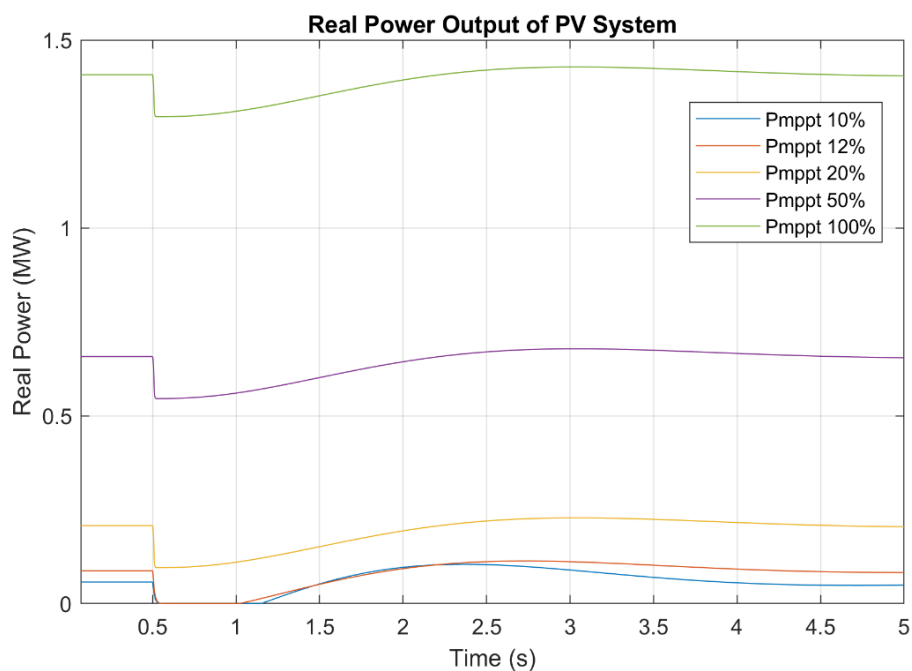
กำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุด MPP (เมกะวัตต์)	ค่าความเฉื่อยเสมือน (วินาที)	กำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ (เมกะวัตต์)
0.15 (10 % ของ P_{mppt} สูงสุด)	5.89	0.0924 (61.60 %)
0.18 (12 % ของ P_{mppt} สูงสุด)	5.89	0.0924 (51.31 %)
0.30 (20 % ของ P_{mppt} สูงสุด)	5.89	0.0924 (30.79 %)
0.75 (50 % ของ P_{mppt} สูงสุด)	5.89	0.0924 (12.32 %)
1.50 (100 % ของ P_{mppt} สูงสุด)	5.89	0.0924 (6.16 %)



รูปที่ 8.5 ความถี่ในการทดสอบที่ 1



รูปที่ 8.6 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 1



รูปที่ 8.7 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 1

ตารางที่ 8.4 ผลการทดสอบที่ 1

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (เมกะวัตต์)	ค่าความถี่ ณ จุด ที่เกิดการ เบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ความถี่สูงสุด (เฮิรตซ์ต่อวินาที)	กำลังไฟฟ้าของระบบ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ เปลี่ยนไปสูงสุด (เมกะวัตต์)
0.0576 (10 % P _{mppt})	50.610	1.134	0.0576
0.0876 (12 % P _{mppt})	50.504	0.772	0.0876
0.2076 (20 % P _{mppt})	50.478	0.473	0.112
0.6576 (50 % P _{mppt})	50.478	0.473	0.112
1.4076 (100 % P _{mppt})	50.478	0.473	0.112

จากรูปที่ 8.5 – 8.7 ก่อนเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ร้อยละ 10 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 0.0576 เมกะวัตต์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ร้อยละ 12 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 0.0876 เมกะวัตต์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ร้อยละ 20 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 0.2076 เมกะวัตต์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ร้อยละ 50 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 0.6576 เมกะวัตต์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ร้อยละ 100 สามารถจ่าย

กำลังไฟฟ้าได้ 1.4076 เมกะวัตต์ เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบเนื่องจากโหลดของผู้ใช้ ไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้ความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีการเพิ่มขึ้น และระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยการปรับลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

ตารางที่ 8.4 แสดงถึงการเบี่ยงเบนและอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่และกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไป กรณีกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 50.61 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 1.134 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.0576 เมกะวัตต์ กรณีกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 50.504 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.772 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.0876 เมกะวัตต์ กรณีกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 50.478 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.473 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.112 เมกะวัตต์ กรณีกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 50.504 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.772 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.112 เมกะวัตต์ กรณีกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 50.478 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.473 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.112 เมกะวัตต์

ผลการทดสอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสำรองกับกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้มีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าสำรองกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ขอบเขตการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากัน หากกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงจนสัดส่วนกำลังไฟฟ้าสำรองเกิน 50 เปอร์เซ็นต์แล้วจะทำให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยการเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพได้

8.2.2 การทดสอบที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพขณะเกิดการรบกวนจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความสามารถของการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS ในการเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบ เมื่อเกิดการรบกวน จากความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ระบบทดสอบมี

ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 8.5 โดยการทำงานของระบบขณะเกิดการรบกวนขึ้นในระบบมีลักษณะดังนี้

- 1) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.5 เมกะวัตต์
- 2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผลิตกำลังไฟฟ้า 1.5 เมกะวัตต์
- 3) ความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าเท่ากับกำลังการผลิตทั้งหมดในไมโครกริด

ตารางที่ 8.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 2

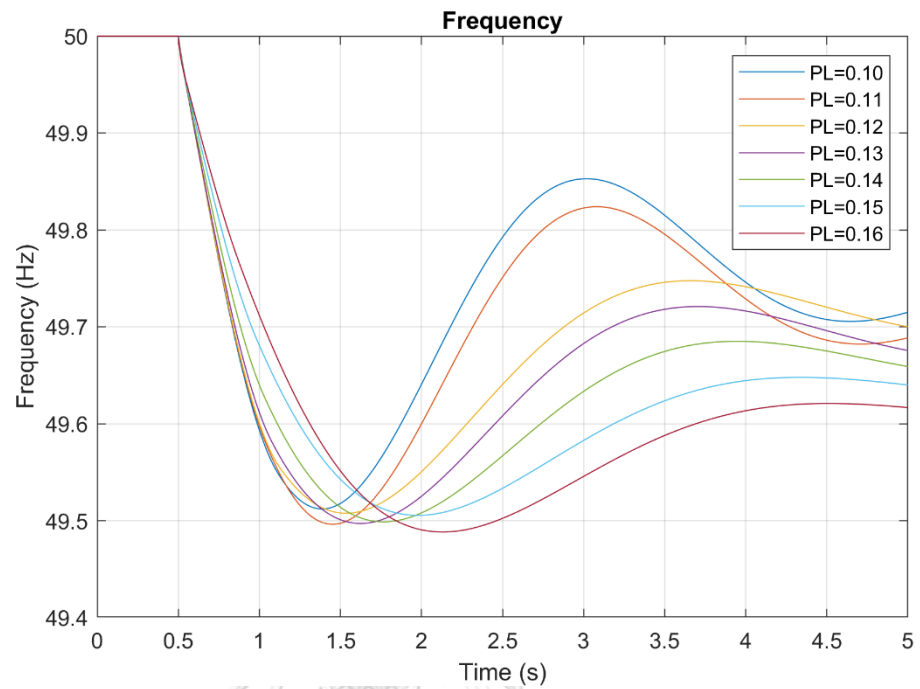
ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (T_g)	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันต้นกำเนิดกำลัง (T_T)	0.5 วินาที
ค่าคงที่ลักษณะรูป (R)	0.05
ค่าความหน่วงของระบบ (D)	0
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H)	2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอินเวอร์เตอร์ (T_{inv})	0.01 วินาที
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{mppt})	1.5 เมกะวัตต์
กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน (S_{base})	1 เมกะโวลต์แอมแปร์

กำหนดให้ระบบทดสอบทำงานแบบแยกโดด และเกิดการรบกวนจากการเพิ่มขึ้นของความถี่ของผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ 7 กรณีตั้งแต่ 0.10 เมกะวัตต์ จนถึง 0.16 เมกะวัตต์ ที่เวลา 0.5 วินาที เนื่องจากขนาดการรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงไป การทดสอบนี้จึงได้ปรับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้เปลี่ยนแปลงของระบบซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าของ ANFIS ให้มีค่าเท่ากับขนาดการรบกวนที่เกิดขึ้นด้วย ผลการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS แสดงดังตารางที่ 8.6 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8.8 - 8.10 และสรุปไว้ดังตารางที่ 8.7

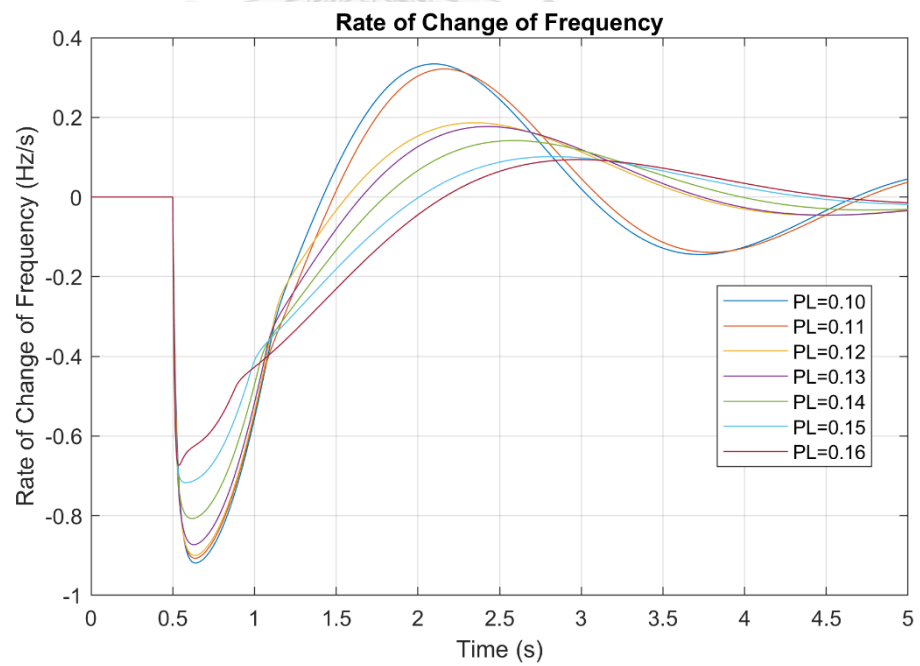
ตารางที่ 8.6 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 2

การรบกวนที่เกิดขึ้นในไมโครกริด (เมกะวัตต์)	ค่าความเฉื่อยเสมือน (วินาที)	ค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ (เมกะวัตต์)
0.10	2.2000	0.02505 (1.67 %)
0.11	2.2002	0.03615 (2.41 %)
0.12	4.6965	0.04665 (3.11 %)
0.13	4.4965	0.05895 (3.93 %)
0.14	5.0002	0.07455 (4.97 %)

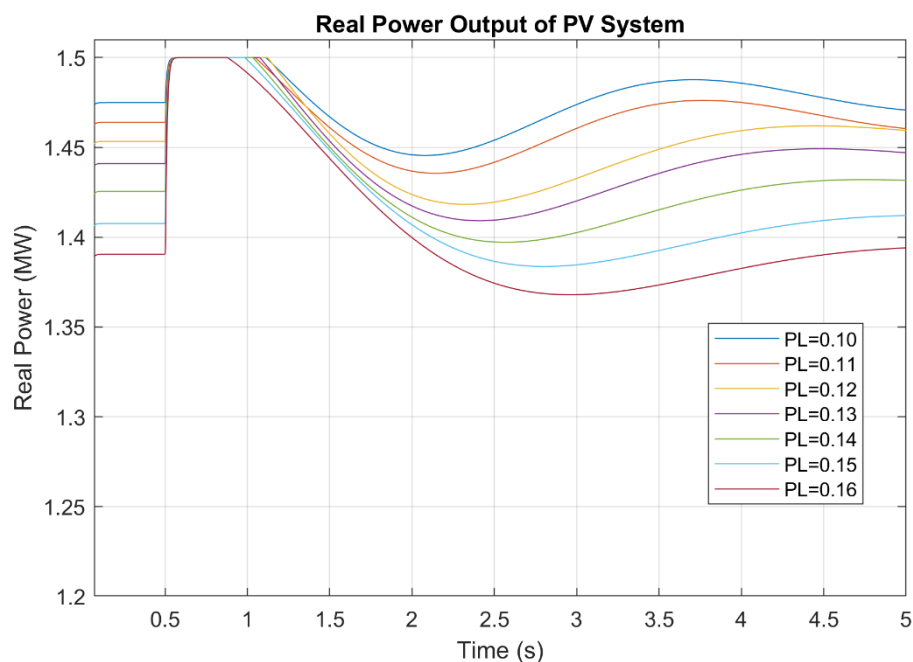
0.15	5.9000	0.09240 (6.16 %)
0.16	6.0000	0.10950 (7.30 %)



รูปที่ 8.8 ความถี่ในการทดสอบที่ 2



รูปที่ 8.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 2



รูปที่ 8.10 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 2

ตารางที่ 8.7 ผลการทดสอบที่ 2

การรบกวนที่เกิดขึ้นใน ไมโครกริด (เมกะวัตต์)	ค่าความถี่ ณ จุดที่เกิดการ เบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ สูงสุด (เฮิรตซ์ต่อวินาที)
0.10	49.512	0.9188
0.11	49.497	0.9070
0.12	49.508	0.8999
0.13	49.497	0.8728
0.14	49.499	0.8073
0.15	49.505	0.7170
0.16	49.488	0.6740

จากรูปที่ 8.8 – 8.10 ก่อนเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าโดยมีการลดกำลังการผลิตเพื่อนำไปเป็นกำลังไฟฟ้าสำรองซึ่งสัมพันธ์กับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้เปลี่ยนไปของระบบ นั้นหมายความว่า หากค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้เปลี่ยนไปของระบบมีค่ามาก ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะเพิ่มกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ เพื่อสำรองไว้ใช้ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเกิดการรบกวนที่ขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 8.7 แสดงถึงการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของไมโครกริดขณะที่เกิดการรบกวนขนาดต่าง ๆ ขึ้นในไมโครกริด กรณีที่เกิดการรบกวนขนาด 0.10 เมกะวัตต์ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.512 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.9188 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่เกิดการรบกวนขนาด 0.11 เมกะวัตต์ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.497 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.9070 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่เกิดการรบกวนขนาด 0.12 เมกะวัตต์ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.508 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.8999 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่เกิดการรบกวนขนาด 0.13 เมกะวัตต์ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.497 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.8728 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่เกิดการรบกวนขนาด 0.14 เมกะวัตต์ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.499 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.8073 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่เกิดการรบกวนขนาด 0.15 เมกะวัตต์ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.505 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.7170 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่เกิดการรบกวนขนาด 0.16 เมกะวัตต์ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.488 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.6740 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที

ผลการทดสอบที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS ในกรณีที่ขนาดของการรบกวนมีค่าต่าง ๆ สังเกตเห็นได้ว่า ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่มากขึ้นเมื่อการรบกวนมีขนาดใหญ่ขึ้น สังเกตได้จากค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความถี่ที่เบี่ยงเบนไปสูงสุดจะมีค่า 49.5 ± 0.05 เฮิร์ตซ์ตามที่กำหนดไว้ เนื่องจาก ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่ออกแบบด้วยวิธี ANFIS รับข้อมูลขาเข้าคือกำลังไฟฟ้าโหลดที่ยินยอมให้เปลี่ยนไปในระบบ เพื่อคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่เหมาะสมสำหรับสภาวะนั้น ๆ แต่ทว่าหากการรบกวนมีขนาดใหญ่มาก ณ สภาวะนั้น ดังที่แสดงในกรณีที่กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป 0.16 ต่อหน่วย จะเห็นได้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถช่วยรักษาความถี่ที่เบี่ยงเบนให้อยู่ในช่วงมาตรฐานได้ เนื่องจาก ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองนั้นไม่เพียงพอ

8.2.3 การทดสอบที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพในกรณีที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเปลี่ยนไป

การทดสอบนี้จะทดสอบความสามารถของการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS ในการเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบ ในกรณีที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบมีค่าเปลี่ยนไป ระบบทดสอบมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 8.8 โดยการทำงานของระบบขณะเกิดการรบกวนมีลักษณะดังนี้

- 1) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.5 เมกะวัตต์
- 2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผลิตกำลังไฟฟ้า 1.5 เมกะวัตต์
- 3) ความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าเท่ากับกำลังการผลิตทั้งหมดในไมโครกริด

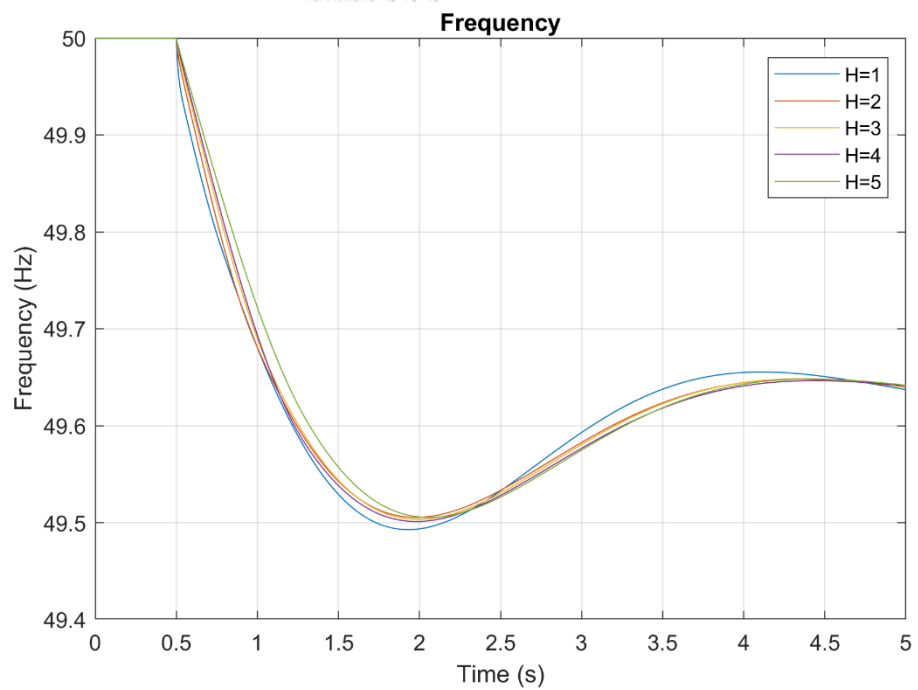
ตารางที่ 8.8 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 3

ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (T_g)	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันต้นกำเนิดกำลัง (T_T)	0.5 วินาที
ค่าคงที่ลักษณะรูป (R)	0.05
ค่าความหน่วงของระบบ (D)	0
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H)	1 - 5 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอินเวอร์เตอร์ (T_{inv})	0.01 วินาที
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้เปลี่ยนไปของระบบ (ΔP_{load})	0.15 เมกะวัตต์
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{mppt})	1.5 เมกะวัตต์
กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน (S_{base})	1 เมกะโวลต์แอมแปร์

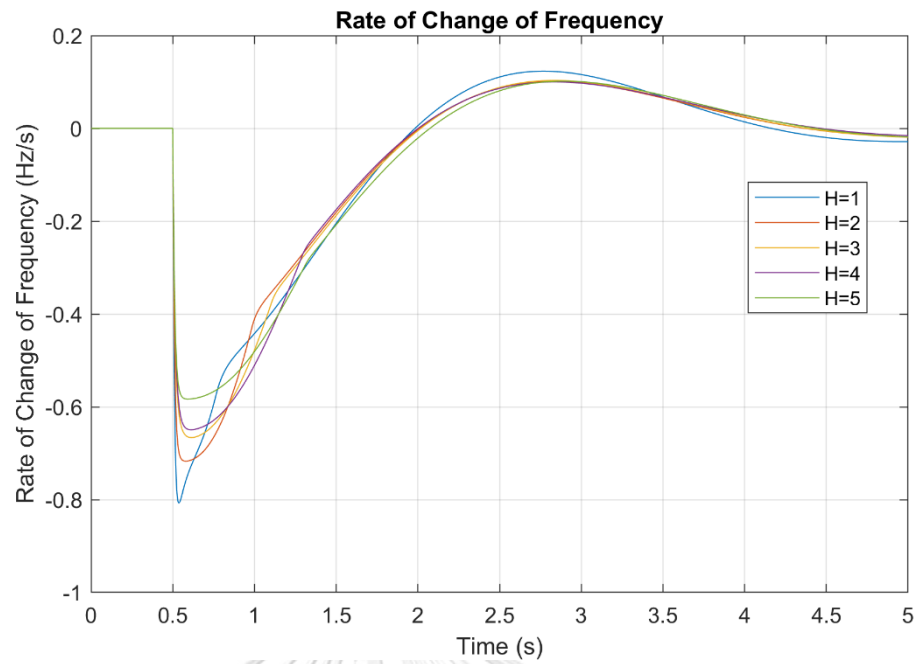
กำหนดให้ระบบทดสอบทำงานแบบแยกโดด และเกิดการรบกวนจากการเพิ่มขึ้นของความถี่การใช้ไฟฟ้าขนาด 0.15 เมกะวัตต์ ที่เวลา 0.5 วินาที เนื่องจากระบบมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกัน การทดสอบนี้จึงได้ปรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าของ ANFIS ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปสำหรับแต่ละกรณีด้วย ผลการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS แสดงดังตารางที่ 8.9 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8.11 - 8.13 และสรุปไว้ดังตารางที่ 8.10

ตารางที่ 8.9 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 3

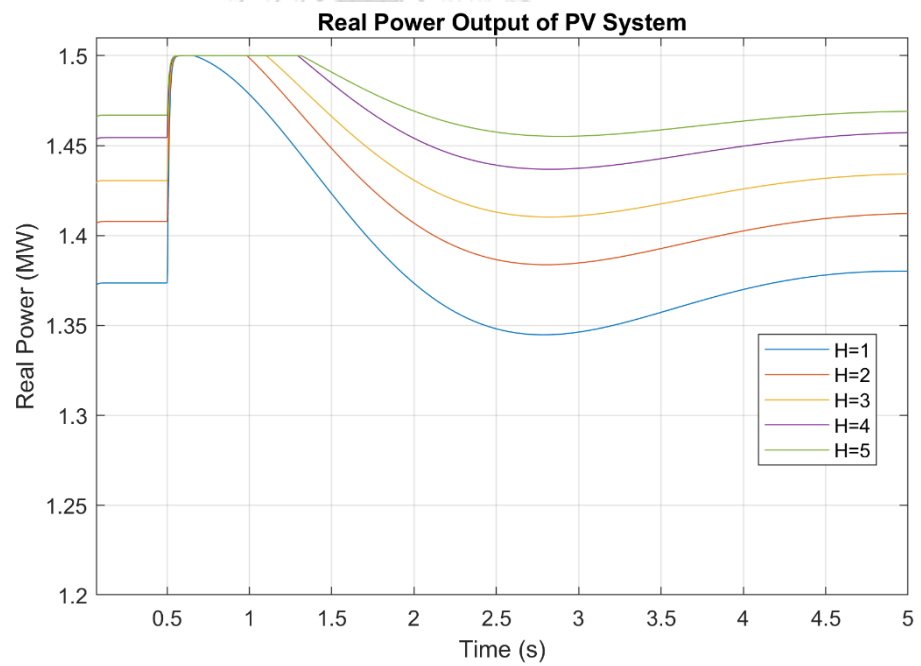
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (วินาที)	ค่าความเฉื่อยเสมือน (วินาที)	ค่ากำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ (เมกะวัตต์)
1	6.0	0.12150 (8.10 %)
2	5.9	0.09240 (6.16 %)
3	4.9	0.06945 (4.63 %)
4	4.4	0.04560 (3.04 %)
5	2.9	0.03300 (2.20 %)



รูปที่ 8.11 ความถี่ในการทดสอบที่ 3



รูปที่ 8.12 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 3



รูปที่ 8.13 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 3

ตารางที่ 8.10 ผลการทดสอบที่ 3

ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อย ของระบบ (วินาที)	ค่าความถี่ ณ จุดที่เกิดการ เบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิรตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ สูงสุด (เฮิรตซ์ต่อวินาที)
1	49.493	0.8072
2	49.505	0.7170
3	49.503	0.6663
4	49.501	0.6494
5	49.505	0.5834

จากรูปที่ 8.11 – 8.13 ก่อนเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าโดยลดกำลังการผลิตเพื่อนำไปเป็นกำลังไฟฟ้าสำรองซึ่งสัมพันธ์กับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ โดยเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบลดลง ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องสำรองกำลังไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อใช้ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ

ตารางที่ 8.10 แสดงถึงการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของไมโครกริดที่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเท่ากับ 1 วินาที ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.493 เฮิรตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.8072 เฮิรตซ์ต่อวินาที ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเท่ากับ 2 วินาที ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.505 เฮิรตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.7170 เฮิรตซ์ต่อวินาที ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเท่ากับ 3 วินาที ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.503 เฮิรตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.6663 เฮิรตซ์ต่อวินาที ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเท่ากับ 4 วินาที ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.501 เฮิรตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.6494 เฮิรตซ์ต่อวินาที ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเท่ากับ 5 วินาที ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.505 เฮิรตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.5834 เฮิรตซ์ต่อวินาที

ผลการทดสอบที่ 3 แสดงให้เห็นถึงผลการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS ในกรณีที่ระบบมีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยที่เปลี่ยนแปลงไประบบที่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบจะส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มีค่าสูงตามสมการการแกว่ง จึงทำให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีการตอบสนองต่อความถี่มากขึ้น สังเกตได้จากค่าความถี่เสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อทำให้ความถี่ที่เบี่ยงเบนไปยังคงมีค่าอยู่ในช่วง

49.5±0.05 เฮิร์ตซ์ สังเกตได้จากค่าความถี่เฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก การออกแบบด้วยวิธี ANFIS รับข้อมูลเข้าคือค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ เพื่อนำมาคำนวณค่าความถี่เฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่เหมาะสมสำหรับสภาวะนั้น ๆ ถ้าหากค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าต่ำมาก จากที่แสดงในกรณีที่โมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 1 วินาที จะเห็นได้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถช่วยรักษาความถี่ที่เบี่ยงเบนให้อยู่ในช่วงมาตรฐานได้ เนื่องจากค่าความถี่เฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าสำรองไม่เพียงพอ

8.2.4 การทดสอบที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของการออกแบบค่าความถี่เฉลี่ยด้วยวิธีต่าง ๆ

การทดสอบนี้จะทดสอบความสามารถในการเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบค่าความถี่เฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ ระบบทดสอบมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 8.11 โดยการทำงานของระบบขณะเกิดการรบกวนมีลักษณะดังนี้

- 1) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.5 เมกะวัตต์
- 2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ผลิตกำลังไฟฟ้า 1.5 เมกะวัตต์
- 3) ความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าเท่ากับกำลังการผลิตทั้งหมดในไมโครกริด

ตารางที่ 8.11 ค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบในการทดสอบที่ 4

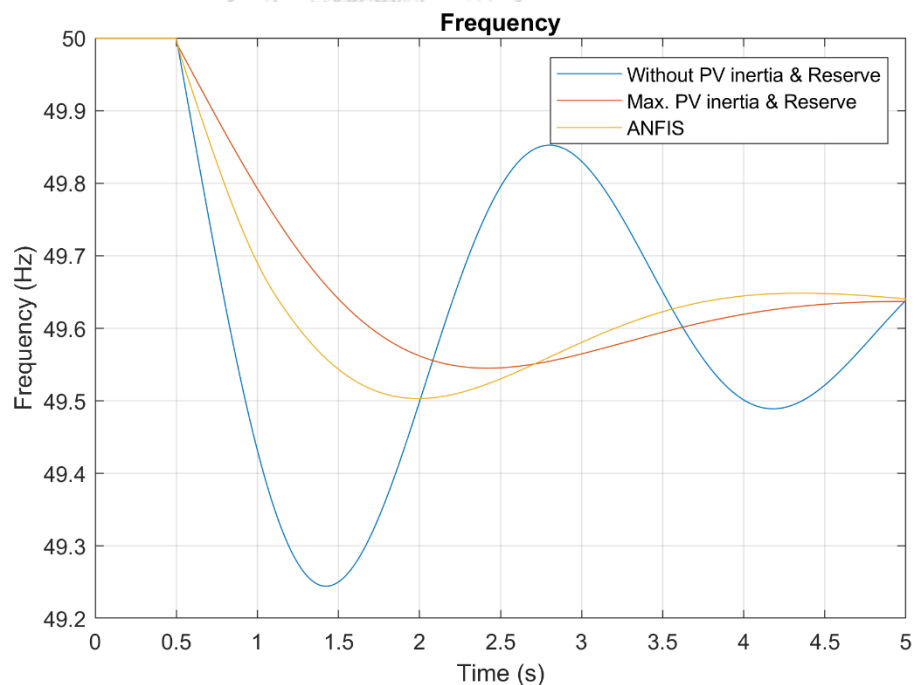
ค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (T_g)	0.2 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของกังหันต้นกำเนิดกำลัง (T_T)	0.5 วินาที
ค่าคงที่ลักษณะรูป (R)	0.05
ค่าความหน่วงของระบบ (D)	0
ค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H)	3 วินาที
ค่าคงที่ทางเวลาของอินเวอร์เตอร์ (T_{inv})	0.01 วินาที
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้เปลี่ยนไปของระบบ (ΔP_{load})	0.15 เมกะวัตต์
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{mppt})	1.5 เมกะวัตต์
กำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน (S_{base})	1 เมกะโวลต์แอมแปร์

กำหนดให้ระบบทดสอบทำงานแบบแยกโดด และเกิดการรบกวนจากการเพิ่มขึ้นของความถี่การใช้ไฟฟ้าขนาด 0.15 เมกะวัตต์ ที่เวลา 0.5 วินาที การทดสอบนี้ออกแบบค่าความถี่เฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS เปรียบเทียบกับการ

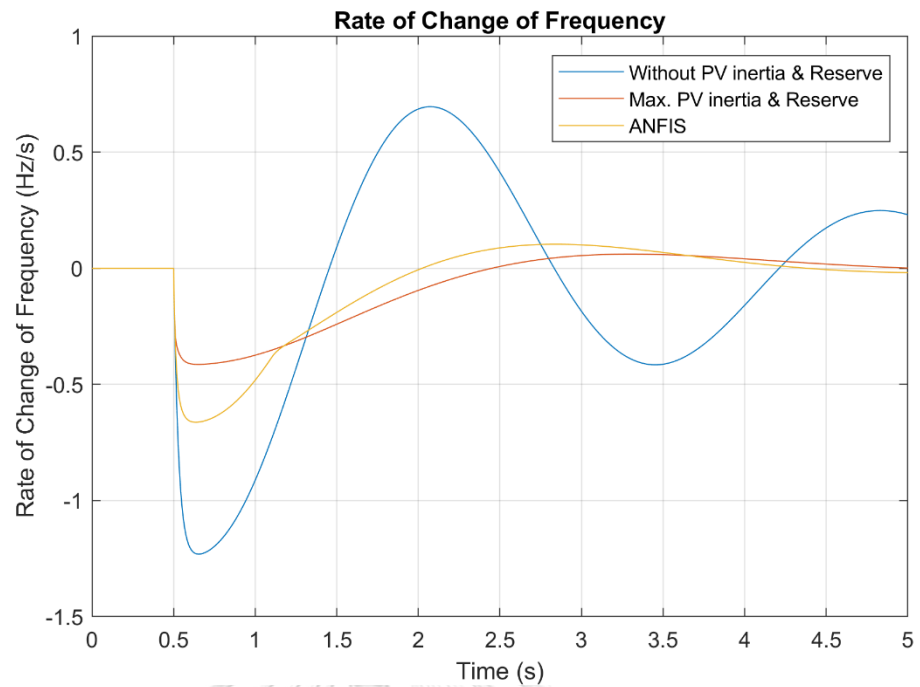
กำหนดให้ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองมีค่าเท่ากับค่าสูงสุด และกรณีที่ไม่มีค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรอง ผลการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการแสดงดังตารางที่ 8.12 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8.14 - 8.16 และสรุปไว้ดังตารางที่ 8.13

ตารางที่ 8.12 ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการทดสอบที่ 4

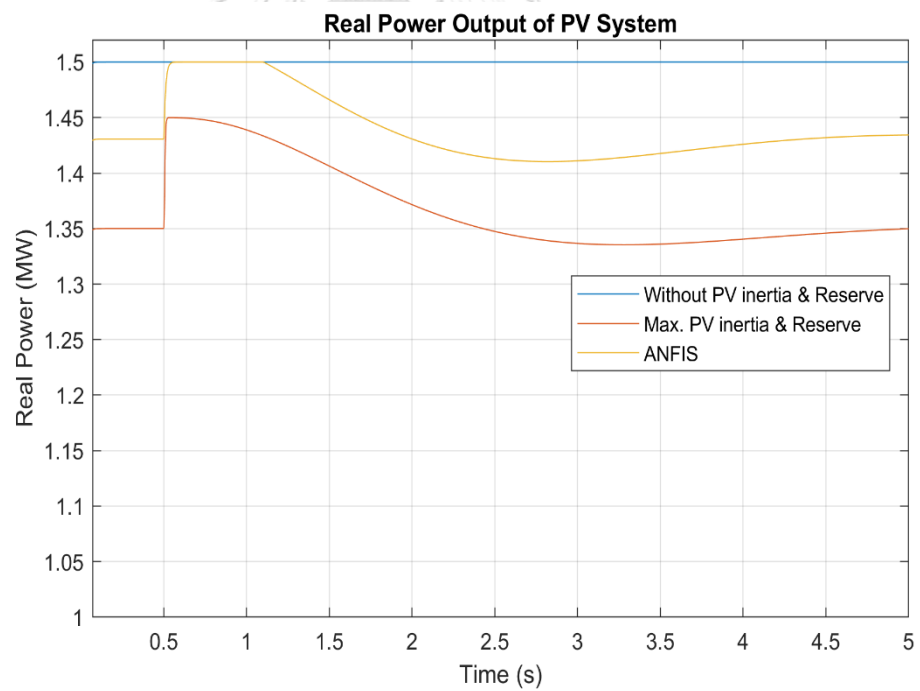
กรณี	ค่าความเฉื่อยเสมือน (วินาที)	กำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการ (เมกะวัตต์)
กรณีที่ 1 (ไม่มีค่าความเฉื่อยเสมือน และกำลังไฟฟ้าสำรอง)	0	0 (0.0 %)
กรณีที่ 2 (ค่าความเฉื่อยเสมือนและ กำลังไฟฟ้าสำรองสูงสุด)	6.0	0.15 (10.0 %)
กรณีที่ 3 (ANFIS)	4.9	0.06945 (4.63 %)



รูปที่ 8.14 ความถี่ในการทดสอบที่ 4



รูปที่ 8.15 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทดสอบที่ 4



รูปที่ 8.16 กำลังการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดสอบที่ 4

ตารางที่ 8.13 ผลการทดสอบที่ 4

กรณี	ค่าความถี่ ณ จุดที่เกิดการเบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิร์ตซ์)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด (เฮิร์ตซ์ต่อวินาที)
กรณีที่ 1 (ไม่มีค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรอง)	49.245	1.231
กรณีที่ 2 (ค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองสูงสุด)	49.545	0.414
กรณีที่ 3 (ANFIS)	49.503	0.663

จากรูปที่ 8.14 – 8.16 ก่อนเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ในกรณีที่ควบคุมให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลดกำลังการผลิตเพื่อนำไปเป็นกำลังไฟฟ้าสำรอง เพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ

ตารางที่ 8.13 แสดงถึงการเบี่ยงเบนความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของไมโครกริด ในกรณีที่ 1 ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.245 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 1.231 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่ 2 ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.545 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.414 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที กรณีที่ 3 ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 49.503 เฮิร์ตซ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงสุด 0.663 เฮิร์ตซ์ต่อวินาที

ผลการทดสอบที่ 4 แสดงให้เห็นถึงกรณีที่ออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธีต่าง ๆ ในกรณีที่ 1 สังเกตได้ว่าหากไม่มีความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรอง ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางด้านความถี่ได้ ส่วนกรณีที่ 2 ถึงแม้ว่าจะสามารถรักษาความถี่ไม่ให้เบี่ยงเบนเกินค่าความถี่มาตรฐานได้ แต่การเพิ่มค่าความเฉื่อยเสมือนหรือกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการโดยไม่จำเป็นถือว่าเป็นการเพิ่มการสูญเสียในระบบ แต่ในกรณีที่ 3 การใช้ ANFIS เพื่อคำนวณค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการที่เหมาะสมนั้น มีการลดทอนกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าและค่าความเฉื่อยเสมือนมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ 2 แต่ยังคงสามารถทำให้ค่าความถี่ไม่เบี่ยงเบนออกไปจากช่วงความถี่มาตรฐานได้เช่นเดียวกัน

บทที่ 9 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงบทสรุปของการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการด้วยวิธี ANFIS และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต โดยเนื้อหาในแต่ละส่วนมีดังนี้

9.1 สรุปผลงานวิจัย

ในระบบไมโครกริดที่มีค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำจะส่งผลให้เสถียรภาพเชิงความถี่ไฟฟ้าของระบบต่ำเช่นกัน โดยเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ความถี่จะเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานมาก และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าของระบบจะมีค่าสูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ ในการออกแบบค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าคงที่โมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพทางด้านความถี่เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการจำลองโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นที่จะต้องทำควบคู่ไปกับการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรอง เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วระบบเซลล์แสงอาทิตย์ถูกควบคุมให้ผลิตกำลังไฟฟ้า ณ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นในระบบ จึงไม่สามารถปรับเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้มีโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนตามที่ต้องการได้ จากการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองพบว่าในระบบไมโครกริดที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองถึงจุด ๆ หนึ่งแล้ว จะไม่สามารถเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ได้อีก เนื่องจากกำลังการผลิตไฟฟ้าที่สำรองไว้ไม่ได้ถูกนำไปใช้ ดังนั้นในสภาวะใด ๆ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกควบคุมให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนจะมีกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธี ANFIS ในการกำหนดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ โดยเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นในไมโครกริด ความถี่จะไม่เบี่ยงเบนออกไปเกินค่ามาตรฐาน โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับไมโครกริดที่เดินเครื่องแบบแยกโดดได้ด้วยวิธีการดังนี้

- 1) รวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ของไมโครกริด คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ (H_{sys}) ค่าความหน่วงของระบบ (D_{sys}) ค่าลักษณะद्रูปของระบบ และค่าคงที่ทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- 2) พิจารณากำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปสูงสุดจากการรบกวนที่มีขนาดใหญ่สุดที่มีโอกาสเกิดขึ้น โดยอาจกำหนดเป็นการปลดสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างไมโครกริดกับระบบ

ไฟฟ้าหลักขณะที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดไหลในสายส่ง การปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสขนาด
ใหญ่ที่สุดออกจากระบบ หรือการปลดโหลดที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

3) ออกแบบระบบทดสอบและทำการทดสอบ เพื่อเก็บข้อมูลความถี่ของระบบในสภาวะต่าง
ๆ ดังนี้

3.1) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเปลี่ยนไป

3.2) ขนาดของการรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบเปลี่ยนไป

4) ออกแบบการควบคุมระบบเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี ANFIS โดยนำข้อมูลที่เก็บค่าได้จาก
หัวข้อที่ 3 มาใช้ในการฝึกสอน เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่
เหมาะสม

5) ออกแบบขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จากการวิเคราะห์ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสำรองที่
ต้องการเพื่อรักษาเสถียรภาพเชิงความถี่ในหัวข้อที่ 4

9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธี ANFIS ในการออกแบบค่าความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้า
สำรองที่ต้องการโดยการเก็บข้อมูลตัวอย่างจากการทดสอบระบบไมโครกริดนั้น ๆ และประเภทของ
การรบกวนคือการเปลี่ยนแปลงของความถี่การใช้ไฟฟ้าและแหล่งผลิตไฟฟ้า หากต้องการออกแบบ
สำหรับระบบไมโครกริดอื่นหรือต้องการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการรบกวน เช่นการเกิดความผิดปกติใน
ระบบ จะต้องเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนให้เหมาะสมด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนและกำลังไฟฟ้าสำรองที่ต้องการโดย
พิจารณาเพียงแค่หลักการทางด้านไฟฟ้ากำลังเท่านั้น ในอนาคตหากมีการพิจารณาหลักการทาง
เศรษฐศาสตร์ด้วย จะทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของวิธีการนี้ได้อย่างรอบด้าน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการเพิ่มเสถียรภาพเชิงความถี่ด้วยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน
อย่างไรก็ตาม ในอนาคตอาจมีการออกแบบให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลักษณะรูปเสมือนเพื่อ
ทำงานร่วมกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือนด้วย

บรรณานุกรม

1. กระทรวงพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, "แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1". ตุลาคม 2563.
2. Rakibuzzaman Shah, et al., "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration.", Renewable and Sustainable Energy Reviews,, 2015. **41**: p. 1423-1436.
3. Pieter Tielens and Dirk Van Hertem, "The relevance of inertia in power system.", Renewable and Sustainable Energy Reviews,, 2016. **55**: p. 999-1009.
4. Nuttanan Chalittaporn and Pisitpol Chirapongsananurak, "Dynamic frequency support by photovoltaic system with virtual inertia control in microgrid.", in 2021 18th International Conference on Electrical Engineering, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2021.
5. Vikas Khare, S.N., Prashant Baredar, "Solar-wind hybrid renewable energy system: A review.". Renewable and Sustainable Energy Reviews,, 2016. **58**: p. 23-33.
6. Andreas Ulbig, T.S.B., Goran Andersson, "Impact of low rotational inertia on power system stability and operation.", IFAC Proceedings Volumes,, 2014. **47(3)**: p. 7290-7297.
7. A. Muir, J.L., "Final report on the august 14, 2003 blackout in the United states and Canada.", in U.S.-Canada Power System Outage Task Force. 2004.
8. J. Van de Vyver, J.D.M.D.K., Bart Meersman, Lieven Vandeveldel, Tine L. Vandoorn,, "Droop control as an alternative inertial response strategy for the synthetic inertia on wind turbines.", IEEE Transactions on Power Systems,, 2016. **31**: p. 1129-1138.
9. Nimish Soni, S.D., and Mukul C. Chandorkar,, "Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia.", IEEE Transactions on Power Delivery,, 2013. **28(3)**: p. 1830-1838.
10. Tamrakar, U., et al., *Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions*. Applied Sciences, 2017. **7(7)**: p. 654.

11. Thiesen, H., C. Jauch, and A. Gloe, *Design of a System Substituting Today's Inherent Inertia in the European Continental Synchronous Area*. *Energies*, 2016. **9**(8): p. 582.
12. Siyang Liao, J.X., Yuanzhang Sun, Yi Bao, and Bowen Tang,, "Wide-area measurement system-based online calculation method of PV systems de-loaded margin for frequency regulation in isolated power systems.". *IET Renewable Power Generation*, 2018. **12**(3): p. 335-341.
13. B. I. Craciun, T.K., D. Sera, and R. Teodorescu,, "Frequency support functions in large PV power plants with active power reserves.". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014. **2**(4): p. 849-858.
14. PJM board, P.m., PJM members committee,, "State of the market report for PJM.", in *Quarterly State of the Market Report for PJM*,. 2021.
15. Jang, J.-S.R., "Fuzzy inference systems.", in *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*,. 1997, Prentice-Hall,: USA,. p. 73-91.
16. American National Standards Institute, "IEEE guide for AC generator protection.",. 1993.
17. Hadi Saadat, "Power system analysis.",. McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering,. 1999.
18. การไฟฟ้านครหลวง, "ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า.",. พ.ศ. 2558.
19. การไฟฟ้าภูมิภาค, "ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า.",. พ.ศ. 2559.
20. Office Journal of the European Union, "Commission Regulation (EU) 2016/631.",. 2016.
21. Roland Brundlinger, "Grid codes in Europe - Overview on the current requirements in European codes and national interconnection standards.",. AIT Austrian Institute of Technology, Editor. 2019: Vienna, Austria,.
22. American National Standards Institute, "IEEE guide for abnormal frequency protection for power generating plants.",. 1993.
23. กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์ ชุดที่ 2". พ.ศ. 2557.

24. M. Aghaei, S.D., M. Imamzai, M. H. Pourdadaash, Y. H. Md. Thayoob,, "An overview of solar cells materials classification.", in *National Graduate Conference 2014*,. 2014: Tenaga Nasional Universiti, Putra jaya, Malaysia,.
25. Gilbert M. Masters, "Renewable and Effeicient electrical power system 2nd Edition.",. Wiley-IEEE Press,. 2013.
26. Y. Yang, K.A.K., F. Blaabjerg, A. Sangwongwanich,, "Advances in grid-connected photovoltaic power conversion systems.",. 2018.
27. B. Kroposki, B.J., Y. Zhang, V. Gevorgian, P. Denholm, Bri-Mathias Hodge, B. Hannegan,, "Achieving a 100% renewable grid.",, in *IEEE Power & Energy Magazine*. 2017.
28. M. Hadjikypris, V.E., G. E. Georghiou,, "Enhanced frequency response of inverter dominated low inertia power systems.",, in *1st International Conference on Energy Transition*,. 2019: The Mediterranean Area,.
29. Huanhai Xin, Y., Zhen Wang, Deqiang Gan, Taicheng Yang,, "A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage.",. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,, 2013. **4**: p. 985-993.
30. A. Hoke, E.M., D. Maksimovic,, "Real-time photovoltaic plant maximum power point estimation for use in grid frequency stabilization.",, in *IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*,. 2015: The University of British Columbia Vancouver,.
31. Zhang Jieten, Q.L., Rui Pestana, Luan Fengkui, Yang Libin,, "Dynamic frequency support by photovoltaic generation with "synthetic" inertia and frequency droop control.",, in *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*,. 2017.
32. Rijo Rajan, F.M.F., "Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system.",. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,, 2019. **110**: p. 171-183.
33. Z. Wang, D.L., R. Li, L. Zhang, C. Liu, X. Tian, Y. Li, Y. Su, J. He, "Research on the active power coordination control system for wind/photovoltaic/energy storage.",, in *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*,. 2017: Beijing, China,. p. 1-5.

34. Zadeh, L.A., "Fuzzy sets.", Information and Control. 1965.
35. Takashi Hiyama, K.T., "Current status of fuzzy system applications in power systems.", in *1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*,. 1999: Tokyo, Japan.
36. C. Kahraman, M.G., O. Kabak, "Application of fuzzy sets in industrial engineering : A topical classification.", in *Fuzziness and Soft Computing*. 2006, Springer. p. 1-55.
37. Tomohiro Takagi, M.S., "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control.". IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,, 1985. **15**(1): p. 116-132.
38. K. E. K. Vimal, S.V., "Application of artificial neural network for fuzzy logic based leanness assessment.", Journal of Manufacturing Technology Management, 2013. **24**(2): p. 274-292.
39. J.-S. R. Jang, "ANFIS : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems.", in *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*,. 1997, Prentice Hall,: USA,. p. 335-368.
40. Babuska, R., "Neuro-fuzzy methods for modeling and identification.", in *Fuzziness and Soft Computing*,, L.C.J. A. Abraham, J. Kacprzyk (eds) Recent Advances in Intelligent Paradigms and Applications,, Editor. 2003, Heidelberg.
41. J.-S. R. Jang, E.M., "Supervised learning neural networks", in *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. 1997, Prentice-Hall,: USA. p. 226-257.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐนันท์ ชลิตตาภรณ์
วัน เดือน ปี เกิด	29 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	ชลบุรี ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
ผลงานตีพิมพ์	N. Chalittaporn, P. Chirapongsananurak, "Dynamic Frequency Support by Photovoltaic System with Virtual Inertia Control in Microgrid.", 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON

