

การปรับปรุงเทคนิคการควบคุมความถี่ที่เหมาะสมสำหรับระบบ
สมาร์ตไมโครกริดโดยใช้การพยากรณ์กำลังไฟฟ้า



นายนิธกร จันท์หัวโทน

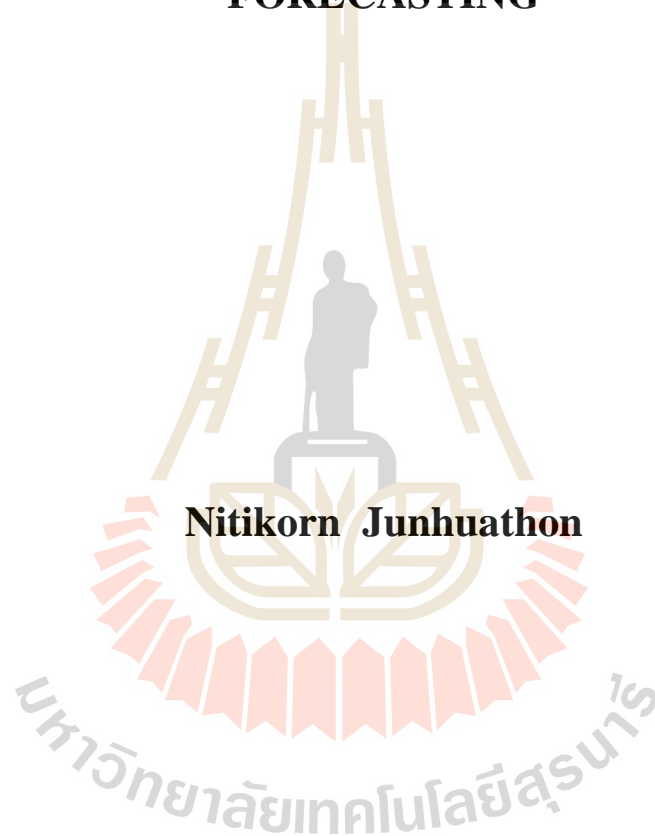
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**OPTIMAL FREQUENCY CONTROL TECHNIQUE
IMPROVEMENT FOR SMART MICROGRID
SYSTEM BY USING POWER
FORECASTING**

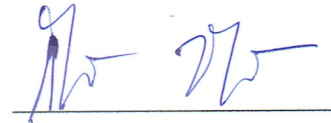


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2018**

การปรับปรุงเทคนิคการควบคุมความถี่ที่เหมาะสมสำหรับระบบสมาร์ต
ไมโครกริดโดยใช้การพยากรณ์กำลังไฟฟ้า

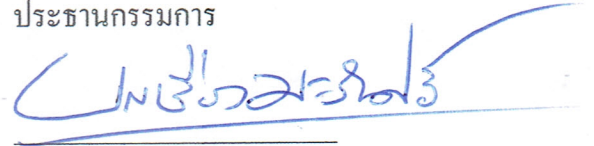
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กীরติ ชยะกุลคีรี)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



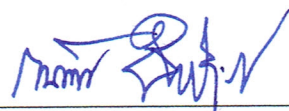
(รศ. ดร.กานท์ เกิดชื่น)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นิธกร จันทรหวัทน : การปรับปรุงเทคนิคการควบคุมความถี่ที่เหมาะสมสำหรับระบบ
สมาร์ตไมโครกริดโดยใช้การพยากรณ์กำลังไฟฟ้า (OPTIMAL FREQUENCY
CONTROL TECHNIQUE IMPROVEMENT FOR SMART MICROGRID SYSTEM
BY USING POWER FORECASTING) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 122 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดโดยใช้
ตัวควบคุมแบบฟัซซีร่วมกับการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงการควบคุมความถี่ของระบบให้
สามารถรักษาเสถียรภาพของความถี่ให้ดีขึ้น และสามารถทำให้ความถี่กลับสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น
เมื่อเกิดการรบกวนในระบบ นอกจากนี้ยังนำเสนอการควบคุมความถี่โหลดอีกสองวิธี คือ ตัว
ควบคุมพีไอ และตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งระบบควบคุมที่นำเสนอแบ่งออกเป็นสองส่วน ประกอบด้วย
การเลือกสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมด้วยการใช้ฟัซซีลอจิก และการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่
เปลี่ยนแปลงของระบบ โดยใช้ระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว สำหรับนำไปวิเคราะห์
ผลตอบสนองหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี และการจำลองมี 2 กรณี
ประกอบด้วย (1) กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และ (2) กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ เพื่อ
ศึกษาเสถียรภาพในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และเวลาเข้าสู่เสถียรภาพหลังจากการ
เปลี่ยนแปลงชั่วขณะ จากผลการจำลองระบบทำด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่ามีความ
แม่นยำของการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าสูง ส่งผลให้วิธีการควบคุมความถี่แบบฟัซซีลอจิกทำให้ระบบ
กลับเข้าสู่เสถียรภาพและลดแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งได้ดีที่สุด จากผลการจำลองพบว่าสามารถ
ลดค่าพุงเกินได้ถึง 86 เปอร์เซ็นต์ และลดเวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพได้ 27.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบ
กับตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ลดค่าพุงเกินได้ถึง 35.4 เปอร์เซ็นต์ และลดเวลาในการเข้าสู่
เสถียรภาพได้ 15.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

NITIKORN JUNHUATHON : OPTIMAL FREQUENCY CONTROL
TECHNIQUE IMPROVEMENT FOR SMART MICROGRID SYSTEM BY
USING POWER FORECASTING THESIS ADVISOR: ASST. PROF.
BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng., 122 PP.

FREQUENCY CONTROL/MICROGRID/POWER FORECASTING/LOAD
FREQUENCY CONTROLLER

This thesis addresses the designing of load frequency controller for a microgrid system using a fuzzy logic controller together with power forecasting to improve the system frequency controlling for maintaining the frequency stability and fast recovery of the system frequency to the stable point after subject to system disturbances. Furthermore, the PI and the PID controllers have been used as load frequency controllers. The proposed control system has been divided into two-part, i.e., the optimal controlling signal of the system using fuzzy logic and the power forecasting of the system using an adaptive neuro-fuzzy inference system. The results from both parts have been used to analyze the optimal controlling signal response using a fuzzy controller. The two simulation cases of power variable have been performing, including (1) continuously time and (2) transient condition to clarify the system stability via MATLAB/Simulink. The simulation results have confirmed the effectiveness of power forecasting. The proposed method can decrease the oscillation amplitude of 86 percent and decreases the setting time of 27.5 percent when compared with the PI controller.

Also, the proposed method can decrease the oscillation amplitude of 35.4 percent and decreases the setting time of 15.8 percent when compared with the PID controller, as well.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยอันได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจผู้วิจัยระหว่างการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางสำหรับการทำวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กานท์ เกิดชื่น อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่กรุณาให้คำแนะนำและสั่งสอนความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัชชัย กุลรวานิชพงษ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำแนะนำและสั่งสอนความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการ การใช้ชีวิต รวมทั้งการให้กำลังใจซึ่งกันและกัน

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่รักและเคารพ ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด รวมทั้งครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนความรู้ให้ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน จนทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถในการทำงานเป็นอย่างดี

นิชิกร จันท์หัวโทน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสังเขป.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ไมโครกริด.....	5
2.2.1 ข้อดีของไมโครกริด.....	7
2.2.2 ข้อเสียของไมโครกริด.....	8
2.2.3 หลักการทำงานพื้นฐานของไมโครกริด.....	10
2.3 องค์ประกอบของไมโครกริด.....	11
2.3.1 โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ.....	11
2.3.2 กังหันลม.....	21
2.3.3 โซลาร์เซลล์.....	25
2.4 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1	เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า.....	29
2.4.2	เสถียรภาพทางความถี่	29
2.5	การรักษาเสถียรภาพของระบบไมโครกริด.....	29
2.5.1	การควบคุมกำลังการผลิตโดยใช้ตัวควบคุม แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	30
2.5.2	การควบคุมโดยใช้หน่วยการควบคุมหลักของระบบไมโครกริด	33
2.5.3	การวางแผนการดำเนินการโดยการวิเคราะห์กำลังการผลิต ของแหล่งพลังงานหมุนเวียน	34
2.6	ปรีทศน์วรรณกรรม	35
2.7	เทคนิคการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า.....	41
2.7.1	การคาดการณ์โหลด	41
2.7.2	การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม.....	42
2.7.3	การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์	42
2.8	เทคนิคการควบคุมความถี่โหลด.....	43
2.8.1	พีชชีลลจิก.....	43
2.9	สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
3	วิธีการดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	52
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิทยานิพนธ์	52
3.2	ออกแบบระบบทดสอบ	52
3.2.1	ระบบโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ.....	53
3.2.2	ระบบกังหันลม	54
3.2.3	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	54
3.3	ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดี	54
3.3.1	พื้นฐานระบบควบคุมพีไอ และพีไอดี.....	54
3.3.2	การออกแบบตัวควบคุมระบบไฟฟ้าแบบพีไอ และพีไอดีควบคุมโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ.....	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3	การออกแบบตัวควบคุมระบบไฟฟ้าแบบพีไอดีควบคุมกึ่งหั่นลม	61
3.4	ออกแบบระบบควบคุมระบบไฟฟ้าโดยใช้การคาดการณ์	66
3.4.1	การออกแบบระบบการคาดการณ์ด้วยระบบประสาทฟัซซี่	66
3.4.2	การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก	71
3.5	สรุป	75
4	การจำลองและผลการจำลอง	77
4.1	กล่าววนำ	77
4.2	ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า	77
4.3	ผลการจำลองควบคุมระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา	81
4.3.1	การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ	81
4.3.2	ผลการการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ	84
4.3.3	ผลการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลด	85
4.4	ผลการจำลองควบคุมระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ	86
4.4.1	การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ	87
4.4.2	ผลการการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ	90
4.4.3	ผลการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลด	91
4.5	เปรียบเทียบผลการจำลอง	92
4.6	สรุป	93
5	การจำลองและผลการจำลอง	94
5.1	บทสรุป	94
5.2	ข้อเสนอแนะ	95
อ้างอิง	96
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก	100
ภาคผนวก ข	113
ประวัติผู้เขียน	122

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ระบบไมโครกริด 6
2.2	หลักการทำงานของระบบไมโครกริด 10
2.3	ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ 12
2.4	บล็อกกรวมไดอะแกรมของส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด 19
2.5	ไดอะแกรมของระบบชุดตัวควบคุมควบคุมความเร็ว..... 20
2.6	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความถี่โหลด ของระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าทั่วไป 21
2.7	โมเดลกั้นลมที่ควบคุมความเร็วพิทช์ได้..... 23
2.8	โมเดลการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ 26
2.9	ไดอะแกรมของระบบทดสอบ..... 28
2.10	การจำแนกชนิดของเสถียรภาพทางไฟฟ้า..... 28
2.11	รูปแบบทั่วไปสำหรับระบบควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็ก..... 31
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ..... 32
2.13	กราฟคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและความ 33
2.14	ตรรกะจริงเท็จ กับตรรกะแบบฟัซซี 44
2.15	โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี..... 45
2.16	ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก 46
2.17	ขั้นตอนที่ 1 การแปลงอินพุตสำหรับระบบฟัซซี 47
2.18	ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกฎของระบบ 47
2.19	ขั้นตอนที่ 3 การหาฟัซซีเอาต์พุต 48
2.20	ขั้นตอนที่ 4 การแปลงค่าฟัซซีให้กลับเป็นค่าปกติ..... 48
2.21	การจำแนกระบบกฎฟัซซี..... 50
3.1	บล็อกไดอะแกรมโปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ 53
3.2	บล็อกไดอะแกรมโปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบกั้นลม..... 53
3.3	บล็อกไดอะแกรมโปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบเซลล์แสงอาทิตย์..... 54

สารบัญรูป (ต่อ)

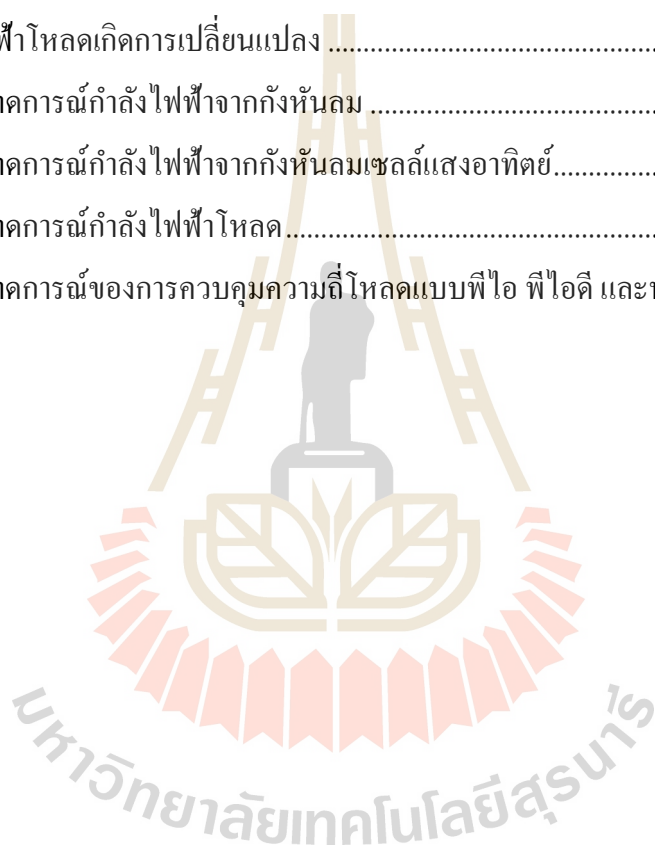
รูปที่	หน้า
3.4 การปรับเวลาในการตอบสนอง และพฤติกรรมชั่วขณะ ของตัวควบคุมพีไอดีของโรงไฟฟ้า.....	59
3.5 ค่าอัตราขยายและผลการตอบสนอง ของตัวควบคุมพีไอดีของโรงไฟฟ้า.....	59
3.6 การปรับเวลาในการตอบสนอง และพฤติกรรมชั่วขณะ ของตัวควบคุมพีไอของโรงไฟฟ้า	60
3.7 ค่าอัตราขยายและผลการตอบสนอง ของตัวควบคุมพีไอของโรงไฟฟ้า	60
3.8 การปรับเวลาในการตอบสนอง และพฤติกรรมชั่วขณะ ของตัวควบคุมพีไอของกังหันลม.....	61
3.9 ค่าอัตราขยายและผลการตอบสนอง ของตัวควบคุมพีไอของกังหันลม	61
3.10 โปรแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ	62
3.11 โปรแกรมในโปรแกรม MATLAB/Simulinkของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ	62
3.12 โปรแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี	63
3.13 โปรแกรมในโปรแกรม MATLAB/Simulinkของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ	63
3.14 โครงสร้างระบบประสาทฟuzzyแบบปรับตัว	65
3.15 ขั้นตอนการสร้างระบบการคาดการณ์โดยใช้ระบบประสาทฟuzzyแบบปรับตัว.....	66
3.16 ปัจจัยการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า.....	66
3.17 กระบวนการคาดการณ์โหลด.....	68
3.18 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของกระบวนการคาดการณ์โหลด	68
3.19 กระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	69
3.20 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของกระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์	69
3.21 กระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม.....	70
3.22 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของกระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม	70
3.23 ระบบควบคุมฟuzzy	71
3.24 กระบวนการวิเคราะห์หาขนาดการปรับอัตราขยาย	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของขนาดการปรับอัตราขยาย K_p	72
3.26 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของขนาดการปรับอัตราขยาย K_i	73
3.27 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของขนาดการปรับอัตราขยาย K_D	73
3.28 ไดอะแกรมรวมระบบของระบบควบคุมพีซีทดสอบ	76
4.1 ความเร็วลมที่ใช้สำหรับคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม	78
4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงจากกังหันลมและจากการคาดการณ์	78
4.3 ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์	79
4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงจากเซลล์แสงอาทิตย์และจากการคาดการณ์	79
4.5 อุณหภูมิที่ใช้สำหรับคาดการณ์โหลด	80
4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโหลดจริงและโหลดจากการคาดการณ์	80
4.7 ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงในเวลา 100 วินาที	81
4.8 ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในเวลา 100 วินาที	82
4.9 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในเวลา 100 วินาที	82
4.10 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลง	82
4.11 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง	83
4.12 กำลังไฟฟ้าโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง	83
4.13 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลง	84
4.14 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง	84
4.15 กำลังไฟฟ้าโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง	85
4.16 ผลการคาดการณ์ของการควบคุมความถี่โหลดแบบพีไอ พีไอดี และพีซีลอจิก	86
4.17 ผลการคาดการณ์ของการควบคุมความถี่โหลดแบบพีไอ พีไอดี และพีซีลอจิกแบบขยาย	86
4.18 ความเร็วลมเปลี่ยน	87
4.19 ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 อุณหภูมิเปลี่ยน.....	88
4.21 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลง.....	89
4.22 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง.....	89
4.23 กำลังไฟฟ้าโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง.....	89
4.24 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม.....	90
4.25 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเซลล์แสงอาทิตย์.....	90
4.26 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าโหลด.....	91
4.27 ผลการคาดการณ์ของการควบคุมความถี่โหลดแบบพีไอ พีไอดี และพีชซีลอจิก.....	92



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ปริทัศน์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 35
3.1	ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอย่างอิสระ 58
3.2	ตารางกฎพีชชีสำหรับการควบคุมความถี่โหลด 74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้นมาก โดยเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ตลอดจนการขยายตัวของภาคเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมล้วนจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไป ส่งผลให้หลาย ๆ ประเทศได้มุ่งหน้าสู่การใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้นเพื่อช่วยเสริมในด้านปริมาณของพลังงาน เนื่องจากการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนมีความผันผวน การใช้แหล่งพลังงานเหล่านี้ร่วมกันในระบบไฟฟ้า อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของแรงดันและความถี่ในระบบไฟฟ้า เนื่องจากข้อจำกัดของปริมาณพลังงานที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ทำให้ไม่สามารถควบคุมการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสม ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ระบบ ไมโครกริด เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมและเสริมสร้างเสถียรภาพของระบบให้เพิ่มขึ้นจากระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ระบบไมโครกริดคือ ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำหรือแรงดันระดับกลาง ที่ได้มีการรวมระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โหลดไฟฟ้า ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ระบบกักเก็บพลังงาน และระบบควบคุมอัตโนมัติเข้าไว้ด้วยกัน โดยส่วนประกอบต่าง ๆ สามารถ ทำงานสอดคล้องประสานกันเปรียบเสมือนเป็นระบบเดียวที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก แม้ในสถานะแยกตัวเป็นอิสระจากโครงข่ายไฟฟ้าหลักในสถานะฉุกเฉิน โดยหลักการสำคัญของการผลิตไฟฟ้าด้วยไมโครกริดคือการพยายามสร้างความสมดุลระหว่างการผลิตกำลังไฟฟ้าให้พอดีกับ ความต้องการใช้ภายในระบบ และใช้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักเพื่อเสริมความมั่นคง (Tabrizi et al., 2012)

ระบบไมโครกริดที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนสำหรับส่งให้กับ โรงงาน บ้านเรือน หรือเพื่อตอบสนองความต้องการด้านพลังงานของผู้บริโภคในด้านอื่น ๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงการรักษาเสถียรภาพในด้านต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ และเป็นที่รู้กันดีว่าในการส่งกำลังไฟฟ้านั้น ไฟฟ้าจะต้องถูกแปลงเป็นไฟฟ้าสามเฟสกระแสสลับเพื่อส่งจ่าย ในระหว่างการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน ระหว่างหน่วยผลิตและหน่วยบริโภค

ที่ต้องการใช้กำลังไฟฟ้าจะต้องถูกรักษาให้สมดุลเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบอยู่ในจุดสมดุล เพราะถ้าระบบเสียสมดุลมาก ระบบจะไม่สามารถทำงานต่อได้และส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เมื่อแรงดันหรือความถี่ถูกทำให้สูญเสียสมดุลและทำการปรับสมดุลใหม่ จุดสมดุลอาจจะเปลี่ยนจากจุดสมดุลเดิม ระบบไฟฟ้าที่ดีต้องมีทั้งแรงดันและความถี่และแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับสมดุลมาตรฐาน ในประเทศไทยมาตรฐานของความถี่และแรงดันอยู่ที่ 50 เฮิร์ต และ 220 โวลต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความต้องการใช้ไฟฟ้าและพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนนั้นไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะรักษาสมดุลทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนโดยปราศจากการควบคุม ถ้าหากเกิดความไม่สมดุลจะทำให้แรงดันและความถี่เปลี่ยนแปลงเป็นค่าต่าง ๆ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมเพื่อลดผลกระทบของการความไม่สมดุลนี้เพื่อรักษาความถี่และแรงดันให้อยู่ในค่ามาตรฐาน แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังเชิงซ้อนจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถควบคุมได้ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าจริง ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ ดังนั้นปัญหาของการควบคุมระบบไฟฟ้าสามารถแยกได้เป็นสองหัวข้อคือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อรักษาระดับของความถี่และการควบคุมกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนเพื่อรักษาระดับแรงดัน การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงถูกเรียกอีกอย่างว่า “การควบคุมความถี่โหลด” หน้าที่สำคัญที่สุดของการควบคุมความถี่โหลดคือการรักษาความถี่ให้คงที่แม้ว่ากำลังไฟฟ้าจริงจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากภาระทางไฟฟ้าเปลี่ยนหรือกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ ทำให้โรงไฟฟ้าหลักไม่สามารถตอบสนองได้อย่างทันทั่วทั้งที่ เพราะหากไม่มีการควบคุมจะทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพในช่วงนั้นไป ในปัจจุบันการใช้ระบบพลังงานหมุนเวียนมาสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อเชื่อมต่อแหล่งพลังงานหมุนเวียนเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก จะทำให้เกิดการรบกวนจากความไม่แน่นอนของพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนเพิ่มเข้ามาในระบบ เกิดจากกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรรมชาติต่าง ๆ จึงทำให้การควบคุมความถี่โหลดนั้นทำได้ยากขึ้นและมีประสิทธิภาพต่ำลง

ดังนั้นผู้เขียนวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาวิธีการลดผลกระทบจากความผันผวนที่เกิดขึ้นจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งผลการศึกษาจากปริทัศน์และวรรณกรรมต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงแนวทางที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริด โดยใช้การใช้การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในระบบร่วมกับการควบคุมแบบพีชชีลลิจิก โดยจะใช้การคาดการณ์เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นจากนั้นนำ

แนวโน้มนำที่ได้ไปเป็นอินพุตของระบบควบคุมฟิวส์ซีลจิกพร้อมกับค่ากำลังไฟฟ้าในขณะนั้น เพื่อหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสม และนำผลการควบคุมที่ได้ไปเปรียบเทียบกับระบบควบคุมพีไอ และพีไอดี

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคการควบคุมความถี่ของระบบไมโครกริด
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคนิคการควบคุมความถี่ที่โหลดโดยใช้การคาดการณ์กำลังไฟฟ้า
- 1.2.3 สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเทคนิคการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริด โดยใช้การคาดการณ์กำลังไฟฟ้า

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสังเขป

- 1.3.1 สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความถี่โหลดและผลกระทบของการติดตั้งแหล่งพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
- 1.3.2 ศึกษาการทำงานและโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริด
- 1.3.3 ศึกษาการใช้ฟิวส์ซีลจิกและการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าสำหรับนำมาปรับปรุงการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริด
- 1.3.4 จำลองวิธีการควบคุมโหลดโดยใช้ฟิวส์ซีลจิกร่วมกับการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า พร้อมทั้งนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีตัวควบคุมอัตโนมัติ และระบบที่ใช้ตัวควบคุมอัตโนมัติแบบพีไอ
- 1.3.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองและการคำนวณ
- 1.3.6 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา เขียนบทความวิจัยและนำเสนอข้อคิดเห็น
- 1.3.7 เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 พิจารณาการทำงานของระบบไมโครกริด ประกอบด้วย ที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม เซลล์แสงอาทิตย์ และโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน
- 1.4.2 การคาดการณ์ที่นำไปใช้ร่วมกับการวิเคราะห์มีความแม่นยำเป็นที่ยอมรับได้
- 1.4.3 พิจารณาระบบทั้งหมดในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน
- 1.4.4 สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมความถี่ได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิม และวิธีการควบคุมแบบพีไอ

1.4.5 ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองและตรวจสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการควบคุมความถี่ของระบบไมโครกริด

1.5.2 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าและการนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมความถี่โหลด

1.5.3 ได้เทคนิคการปรับปรุงการควบคุมความถี่โหลด โดยใช้แบบจำลองการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าของระบบไมโครกริด ที่ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนแบบผสมผสาน

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 5 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งได้จัดเรียงตามความเหมาะสมได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 อธิบายถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

บทที่ 3 อธิบายถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานของการวิจัยและการประยุกต์ใช้ทฤษฎี

บทที่ 4 แสดงผลที่ได้จากการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองของระบบที่ศึกษา

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของการวิจัย

ภาคผนวก ก พารามิเตอร์ของระบบทดสอบ

ภาคผนวก ข แสดงบทความทางวิชาการที่ได้ตีพิมพ์ระหว่างการศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

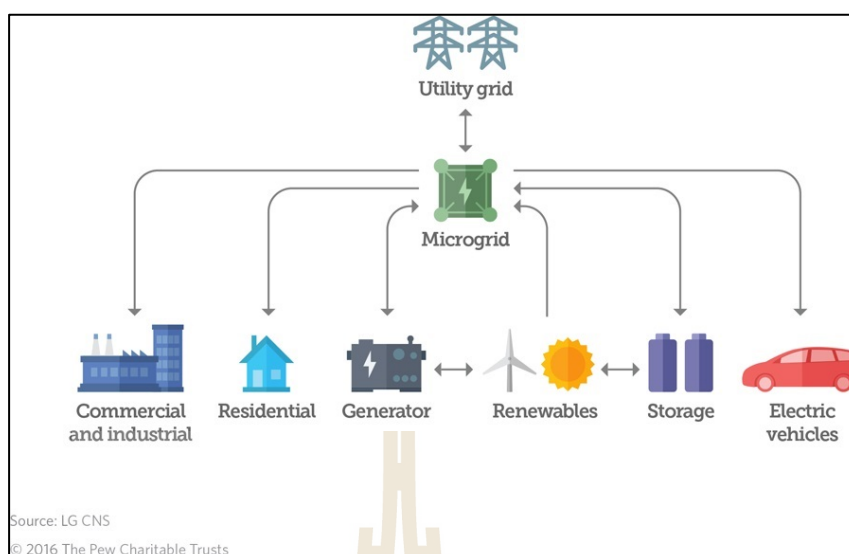
2.1 กล่าวนำ

จุดประสงค์ของระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ผ่านระบบสายส่งไปยังผู้บริโภค สำหรับโครงข่ายไฟฟ้าหลักจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำสำหรับจ่ายพลังงานหลักของระบบ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนตัวของตัวกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น ต้องสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคในขณะนั้น มิฉะนั้นอาจจะทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และโหลด ซึ่งอาจส่งผลเสียจนทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และโหลด หรือเรียกอีกอย่างว่า การควบคุมความถี่โหลด จึงมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการสนับสนุนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ การควบคุมความถี่โหลดหรือการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอัตโนมัติ เป็นกลไกที่ทำให้เกิดความสมดุลของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพ จุดประสงค์พื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอัตโนมัติในขณะที่เชื่อมกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักคือ การรักษาความถี่ของตัวควบคุมความถี่ของระบบให้เป็นศูนย์หรือใกล้เคียงกับศูนย์ที่สุด การรักษาความถี่ของระบบให้อยู่ที่ระดับคงที่ และการปรับค่าความถี่ให้กลับมามีอยู่ในจุดสมดุลเดิมแม้จะเกิดการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ

ระบบไมโครกริดในปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะเป็นระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็กภายในตัวเอง เพื่อให้สามารถทำงานต่อได้ถึงแม้จะขาดการเชื่อมต่อจากโครงข่ายไฟฟ้าหลัก เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ การทำงานและองค์ประกอบของระบบไมโครกริด การคาดการณ์กำลังไฟฟ้า

2.2 ไมโครกริด

ไมโครกริด คือ ระบบไฟฟ้าขนาดเล็กหรือขนาดกลาง ที่มีการรวมระบบผลิตไฟฟ้า ส่งจ่ายไฟฟ้าและควบคุมสั่งการเข้าไว้ด้วยกัน สามารถทำงานประสานเชื่อมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักหรือโครงข่ายอื่น ๆ และยังสามารถทำงานแยกตัวเป็นอิสระได้ โดยมีตัวควบคุมแบบอัตโนมัติที่ใช้ข้อมูลสารสนเทศส่งผ่านโครงข่ายในระบบเป็นตัววิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบไมโครกริด

แหล่งที่มา: <https://www.pewtrusts.org/en/research-and-analysis/issue-briefs/2016/02/why-and-how-microgrid-technology-is-a-good-power-source> (เข้าถึงเมื่อ 06/05/2019)

ในปัจจุบัน ทั่วโลกกำลังให้ความสำคัญเกี่ยวกับระบบไมโครกริดโดยเฉพาะการนำศักยภาพของแหล่งพลังงานหมุนเวียนมาใช้ เช่น การสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ฟาร์มกังหันลม ระบบไมโครกริดนี้จะตอบสนองความต้องการแหล่งพลังงานที่มั่นคง เชื่อถือได้โดยไม่ต้องพึ่งระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักในภาวะฉุกเฉิน และยังส่งผลให้ตลาดไมโครกริดทั่วโลกขยายตัว ในส่วนของประเทศไทย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีโครงการนำร่องพัฒนาระบบไมโครกริดที่ใช้ระบบสารสนเทศ ประมวลผล วิเคราะห์ และสั่งการให้เกิดการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าแบบอัตโนมัติภายใต้ชื่อโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะหรือสมาร์ทกริด ที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งเป็นจังหวัดที่ไม่มีทั้งระบบผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ และสายส่งแรงดันสูง โดย กฟผ. จะพัฒนาแหล่งผลิตไฟฟ้าในระบบสมาร์ทกริดนี้ ด้วยการขยายกำลังผลิตโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ฝายบ่อ จังหวัดแม่ฮ่องสอน จากกำลังผลิตติดตั้งขนาด 0.5 MW เพิ่มขึ้นเป็น 3.5 MW เพื่อเสริมแหล่งพลังงานน้ำและโรงไฟฟ้าดีเซลที่มีอยู่ในพื้นที่ ที่จะทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน (แบตเตอรี่) แบบลิเทียมไอออน ขนาด 1 MWh ซึ่งสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ถึง 4 MW ติดต่อกันเป็นเวลา 15 นาที โดยเฉพาะในช่วงเวลาฉุกเฉิน หรือช่วงที่เตรียมเดินเครื่องโรงไฟฟ้าดีเซลเสริม เพื่อให้สามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ป้องกันปัญหาไฟตกไฟดับ และเมื่อไมโครกริดขนาดเล็กมากไปเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักใด ๆ และเกิดการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงในไมโครกริด โครงข่ายไฟฟ้าหลักจะไม่ได้รับผลกระทบ อย่างไรก็ตาม ในอนาคตไมโครกริดมีแนวโน้มจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนทำ

ให้การแทรกซึมของกำลังไฟฟ้าจาก ไมโครกริดมีผลต่อเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้า ทำให้เสถียรภาพและความมั่นคงของโครงข่ายไฟฟ้าหลักต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ แม้ว่าจากไมโครกริดมีข้อดีมากมาย แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่เช่นกัน

2.2.1 ข้อดีของไมโครกริด

1) ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

ไมโครกริดที่ใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานเสริมในระบบมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าโรงไฟฟ้าพลังความร้อนขนาดใหญ่ทั่วไปที่ใช้ในโครงข่ายไฟฟ้าหลัก สามารถลดการปล่อยแก๊สต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ด้วยการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนมาจ่ายพลังงานไฟฟ้าในไมโครกริดเพื่อลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อน และการที่ผู้บริโภครู้สึกใกล้ชิดกับแหล่งกำเนิดพลังงาน ทำให้ผู้บริโภคได้ใกล้ชิดและทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับไมโครกริดมากขึ้นและยังทำให้สามารถปรับการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันอย่างมีประสิทธิภาพ

2) ลดปัญหาด้านการดำเนินงานและการลงทุน

ลดเงินลงทุนที่ต้องใช้ในการก่อสร้างระบบสายส่งและลดระยะทางจากโครงข่ายไฟฟ้าหลักกับโหลด สามารถปรับปรุง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบเพื่อแก้ปัญหาแรงดันตกในระบบไฟฟ้าได้ง่าย ลดความแออัดของกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในระบบส่งจำหน่าย ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากระยะทางของระบบส่งจำหน่ายประมาณ 3 % ลดมูลค่าการลงทุนของการขยายระบบสายส่งและระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยใช้การออกแบบระบบไมโครกริดที่เหมาะสม

3) คุณภาพของกำลังไฟฟ้า

ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือโดย การกระจายตัวของแหล่งกำเนิดพลังงาน สามารถควบคุมสมดุลระหว่างโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าย่อยในระบบ การลดผลกระทบของการส่งกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่และการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องในระบบ การลดเวลาหยุดทำงานและการปรับปรุงกระบวนการกลับมาทำงานใหม่ของระบบไฟฟ้าให้น้อยที่สุดโดยใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถเดินเครื่องได้เร็วเข้ามาช่วย

4) ประหยัดค่าใช้จ่าย

การลดต้นทุนของไมโครกริดสามารถทำได้โดยการการใช้ประโยชน์จากการนำความร้อนทิ้งระหว่างการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมไปใช้กับโหลดความร้อน นอกจากนี้การที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมตั้งอยู่ใกล้กับโหลด จึงไม่จำเป็นต้องสร้างระบบส่งจ่ายความร้อนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ประสิทธิภาพพลังงานโดยเพิ่มเป็น 80 % เมื่อเปรียบเทียบกับ

กับค่าสูงสุดของระบบพลังงานแบบดั้งเดิมคือ 40 % นอกจากนี้ยังสามารถประหยัดต้นทุนโดยการ
ใช้ประโยชน์จากการที่ระบบมีแหล่งกำเนิดพลังงานย่อยหลายแห่ง โดยใช้วิธีการ plug-and-play ทำ
ให้ค่าใช้จ่ายด้านระบบส่งจ่าย และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าลดลงเป็นอย่างมาก และช่วยลด การ
นำเข้าพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าหลักอีกด้วย

5) ประเด็นด้านการตลาด

ไมโครกริดมีข้อได้เปรียบทางการตลาด เพราะการพัฒนาของไมโครกริด
เป็นตัวผลักดันตลาดพลังงานทดแทนทำให้มีนโยบายสนับสนุนให้ประชาชนหรือผู้ประกอบการ
หันมาติดตั้งระบบพลังงานขนาดเล็กยิ่งขึ้น ทำให้มีโอกาสการขยายงานด้านการบริการและดูแล
รักษาให้ประชาชนในบริเวณนั้น มีการประยุกต์ใช้งานแหล่งกำเนิดพลังงานย่อย plug and play เพื่อ
จ่ายพลังงานในช่วงที่มีราคาพลังงานสูงทำให้ให้ราคาพลังงานในตลาดพลังงานลดลง ความสมดุล
ทางเศรษฐกิจที่เหมาะสมระหว่างการลงทุนเครือข่ายและการใช้ประโยชน์ ระบบจำหน่ายพลังงาน
แบบกระจายตัวมีแนวโน้มที่จะลดราคาพลังงานไฟฟ้าในระยะยาวลงประมาณ 10%

2.2.2 ข้อเสียของไมโครกริด

ถึงแม้ว่าไมโครกริดจะมีข้อดีมากมายที่ทำให้ไมโครกริดได้รับการพัฒนาอย่าง
แพร่หลาย แต่ก็มีหลายจุดที่ต้องได้รับการพัฒนาและข้อเสียต่าง ๆ เช่นกัน ดังนี้

1) ค่าใช้จ่ายของแหล่งพลังงานย่อยมีมูลค่าสูง

ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็กของไมโครกริดมี
มูลค่าสูง เป็นข้อเสียที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับแรก ซึ่งอาจจะลดปัญหานี้ได้ถ้าหากได้รับการ
สนับสนุนจากหน่วยงานรัฐหรือมีนโยบายสนับสนุนสำหรับผู้ที่ต้องการจะลงทุนติดตั้งแหล่งกำเนิด
พลังงานขนาดเล็กเพื่อส่งเสริมการลงทุน โดยอาจจะทำการสนับสนุนในช่วงแรกเพื่อลดผลกระทบ
มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่มาจากการผลิตไฟฟ้าโดยการเผาไหม้ ซึ่ง โลกมีเป้าหมายที่จะเพิ่มการผลิต
พลังงานทดแทนเป็น 20% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดภายในปี 2563 และลดการปล่อยแก๊ส
คาร์บอนลง 50% ภายในปี 2593

2) ปัญหาทางเทคนิค

ปัญหาทางเทคนิคส่วนมากที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวกับการขาดประสบการณ์ทาง
เทคนิคในการควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็กแบบ plug and play การควบคุมด้านนี้
จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์แบบเรียลไทม์และมีการจัดการในระบบไมโครกริดที่เหมาะสมและยัง
ต้องคำนึงไปถึงตำแหน่งของการติดตั้งที่เหมาะสมอีกด้วย ระบบการควบคุมนี้ต้องการเทคโนโลยี
การสื่อสารโทรคมนาคมและโปรโตคอลการสื่อสารในพื้นที่นั้น ๆ ในปัจจุบันกำลังมีการพัฒนา
เทคโนโลยีการสื่อสารสำหรับไมโครกริดโดยใช้มาตรฐาน IEC 61850 สำหรับในชนบทนั้น ยังขาด
โครงสร้างการสื่อสารที่เหมาะสมสำหรับดำเนินการควบคุมไมโครกริดทำให้การพัฒนาโครงสร้าง

การสื่อสารในชนบทเป็นความท้าทายอีกอย่างหนึ่งที่ต้องทำการพัฒนาก่อนจะมีการสร้างไมโครกริดในระบบไมโครกริด

3) ขาดมาตรฐานรองรับ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านไมโครกริดยังเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่ ทำให้ยังขาดมาตรฐานที่จะรองรับสำหรับการแก้ไขปัญหาการดำเนินงานและการป้องกัน ควรมีการบันทึกข้อมูลด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดพลังงานชนิดต่าง ๆ โปรโตคอลสำหรับการสื่อสาร การเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักเพื่อเข้าถึงตลาดพลังงาน ควรมีการบันทึกลงในมาตรฐาน การจดทะเบียนกฎระเบียบความปลอดภัยและการป้องกันควรถูกวางลงในมาตรฐาน เช่น G59/1 และ IEEE1547 ควรได้รับการประเมินและปรับโครงสร้างใหม่ให้สอดคล้องและเหมาะสมกับนิยามของไมโครกริดในปัจจุบัน

4) อุปสรรคด้านการจัดการและกฎหมาย

ในประเทศส่วนใหญ่ไม่มีกฎหมายและข้อบังคับมาตรฐานที่ควบคุมการทำงานของไมโครกริด รัฐบาลของบางประเทศกำลังส่งเสริมให้มีการจัดตั้งไมโครกริด พลังงานสีเขียว แต่กฎระเบียบมาตรฐานสำหรับการดำเนินการในอนาคตยังไม่ได้รับการกำหนดอย่างครอบคลุม

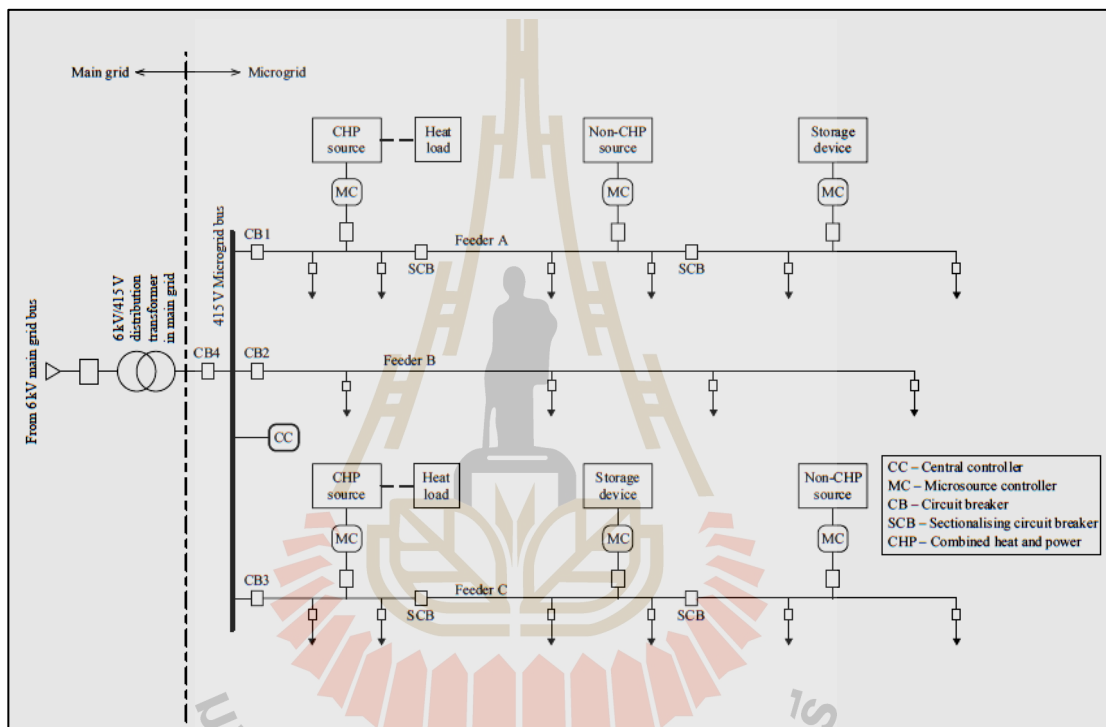
5) การผูกขาดตลาด

ถ้าไมโครกริดได้รับอนุญาตให้จ่ายพลังงานอย่างอิสระเพื่อลดภาระของการซื้อไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้าหลักในช่วงพีคหรือช่วงที่เกิดเหตุฉุกเฉิน ปัญหาก็คือใครจะเป็นผู้ควบคุมราคาพลังงานในช่วงเวลาดังกล่าวที่ไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลัก เนื่องจากโครงข่ายไฟฟ้าหลักจะถูกตัดการเชื่อมต่อและตลาดไฟฟ้าในปัจจุบันจะไม่สามารถควบคุมราคาพลังงานได้ ไมโครกริดอาจค้าปลีกพลังงานในราคาที่สูงมากซึ่งผูกขาดตลาดพลังงานในขณะนั้น ดังนั้น โครงสร้างพื้นฐานทางการตลาดที่เหมาะสมจะต้องได้รับการออกแบบและดำเนินการเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนของไมโครกริด

6) ปัญหาด้านการจัดการของไมโครกริด

ประเด็นการจัดการและการดำเนินงานที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับไมโครกริดมีดังนี้: สำหรับการรักษาคุณภาพไฟฟ้าต้องรักษาสมดุลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ใช้ไปกับผลิตได้ ในระยะสั้น ไมโครกริด ควรใช้งานแบบแยกตัวอิสระในพื้นที่ที่ไม่มีการจัดหาสาธารณูปโภคหรือโหมดเชื่อมต่อ กริดภายในเครือข่ายการกระจายยูทิลิตี้ขนาดใหญ่ ไมโครกริดควรสามารถเลือกโหมดการทำงานภายในกรอบการกำกับดูแลที่เหมาะสม การสร้างการจัดการและการเก็บรักษาพลังงานจะต้องได้รับการวางแผนอย่างเหมาะสม โดยคำนึงถึงความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สมดุลกับไมโครกริดและพลังงานระยะยาว การควบคุมการควบคุมดูแลและการเก็บข้อมูล

(SCADA) ตามหน้าที่การควบคุมและการป้องกันควรรวมอยู่ใน ตัวควบคุมหลัก และตัวควบคุมย่อยของไมโครกริด ต้องมีการเตรียมการสำหรับการวิเคราะห์ระบบผ่านฟังก์ชันการประเมินสถานะ การดำเนินการทางเศรษฐกิจควรมีความน่าเชื่อถือทำได้ด้วยการกำหนดเวลาการจ่ายโหลดไฟฟ้าที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา การรักษาความปลอดภัยของระบบจะต้องได้รับการบำรุงรักษาผ่านการวิเคราะห์ฉุกเฉินและการปฏิบัติการฉุกเฉิน เช่นการจัดการด้านอุปสงค์ การไหลของโหลด การเกาะหรือการปิดระบบของหน่วยใด ๆ



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของระบบไมโครกริด (Chowdhury, 2009)

2.2.3 หลักการทำงานพื้นฐานของไมโครกริด

รูปแบบไมโครกริดทั่วไปสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย ศูนย์กลางการควบคุมของไมโครกริด (Central Controller) ตัวควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานย่อย (Microsource controller) โรงไฟฟ้าขนาดย่อยชนิดต่าง ๆ (Source) เซอร์คิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ระบบกักเก็บพลังงาน (Storage) และโหลด (สัญลักษณ์ลูกศร) โดยอุปกรณ์เหล่านี้เชื่อมต่อกันเหมือนเป็นระบบย่อยระบบหนึ่งและเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักอีกที การติดตั้งแหล่งกำเนิดพลังงานย่อยสามารถติดตั้งใกล้กับโหลดทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลดลง และแหล่งกำเนิดพลังงานย่อยสามารถเชื่อมต่อและใช้งานได้ทันที มีเวลาในการเดินเครื่องที่น้อย หรือเมื่อเกิด

เหตุขัดข้องที่จุดใด ๆ ก็มีเบรกเกอร์สำหรับตัดจุดนั้น ๆ ออกจากระบบ และระบบในส่วนอื่น ๆ ก็ สามารถทำงานต่อได้อย่างเป็นปกติ

2.3 องค์ประกอบไมโครกริด

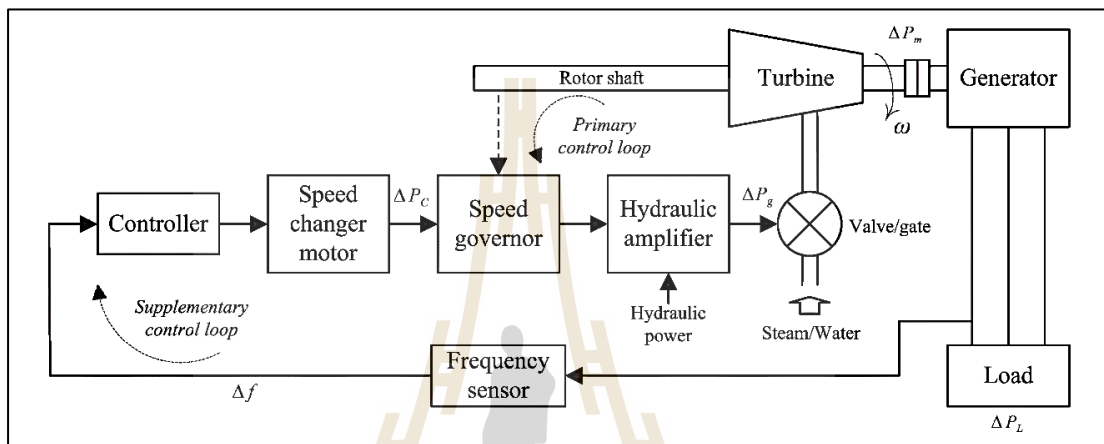
ระบบไมโครกริด สามารถจำแนกออกเป็นหลัก ๆ ได้ 2 ส่วน คือ 1) แหล่งกำเนิด ไฟฟ้าและโหลด 2) ระบบควบคุม แหล่งกำเนิดไฟฟ้าในไมโครกริด อาจจะเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จากพลังงานหมุนเวียนหรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบเดิมก็ได้ ซึ่งจะถูกเรียกอีกแบบว่าแหล่งกำเนิด พลังงานแบบกระจายตัว หรือแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก เป้าหมายสำคัญของไมโครกริด คือการใช้โรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนร่วมกับโรงไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพสูงเช่น โรงไฟฟ้าพลังงาน ความร้อนร่วม เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงและส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมในเวลาเดียวกัน แหล่งกำเนิด พลังงานแบบกระจายตัวในปัจจุบันมีตั้งแต่ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมขนาดเล็กที่ใช้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิง เซลล์เชื้อเพลิง และกังหันไอน้ำขนาดเล็ก ไปจนถึงการใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้า จากพลังงานหมุนเวียนเช่น ระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม และ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำขนาดเล็ก สำหรับการเลือกแหล่งกำเนิดพลังงานกระจายตัว ชนิดต่าง ๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และโทโพโลยีของภูมิภาคและความพร้อมใช้เชื้อเพลิงของ บริเวณที่จะทำการติดตั้ง ความเป็นไปได้ของเชื้อเพลิงชีวรูปและการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บ พลังงานชนิดต่าง ๆ เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาดใหญ่ มีแนวโน้มในการลงทุนสูงขึ้นทั่ว โลก ดังนั้นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่จำหน่ายในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะ นำเสนอเฉพาะประเภทที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนกังหัน ไอน้ำ กังหันลม และเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.1 โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำขนาดเล็กเป็นโรงไฟฟ้าที่มีแนวโน้มการใช้งานในไมโครกริด สูงสุดเนื่องจาก มีการสิ้นเปลืองใช้พลังงานไม่มาก ทำให้การติดตั้งวางรากฐานเครื่องง่าย มีอัตราส่วน มวลน้ำหนักต่อต้นกำลังน้อย ทำให้สร้างได้ขนาดกะทัดรัด ใช้พื้นที่บริเวณติดตั้งเครื่องไม่มาก ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องใช้งานต่ำ มีความเร็วรอบในการทำงานสูง สามารถต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้โดยตรงกับเพลลาของเครื่องกังหันได้เลย มีอัตราการผลิตสูง

จากการศึกษางานวิจัยแสดงให้เห็นว่ามีการผลักดันการประยุกต์ใช้กังหันขนาดเล็ก แบบใช้ไอน้ำเป็นระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในพื้นที่ต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก (Yousef, 2017) การพัฒนาอินเทอร์เฟซอินเวอร์เตอร์สำหรับการใช้งานร่วมกับกังหันขนาดเล็ก (Engineering Mechanics, 2018) การศึกษาถึงอำนาจความสะดวกของเทคโนโลยีผ่านผลการทดสอบที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาตัวกรองที่ใช้งานและกลไกการควบคุมแบบปรับตัวสำหรับ กังหันขนาดเล็กในระบบพลังงานไฮบริด(Diggavi, 2017) เป็นต้น การศึกษายังรวมถึงการพัฒนาแบบจำลองแบบไดนามิกสำหรับ กังหันขนาดเล็ก เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของพวกเขาในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักและโหมดแยกตัวอิสระ (Dong, 2016) จากสาเหตุที่ได้กล่าวไปส่งผลให้โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ น่าสนใจที่จะนำมาเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 2.3 ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

แหล่งที่มา : <https://media.springernature.com/> (เข้าถึงเมื่อ 28/3/2019)

โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำมีส่วนการทำงานหลายส่วนประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส กังหัน และ ชุดควบคุมความเร็วของกังหัน ดังรูปที่ 2.3 การพิจารณาสมมูลของความถี่โหลด จะพิจารณาจากการประยุกต์สมการการแกว่งของเครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส เริ่มจากเครื่องกังหันจะผลิตแรงบิด หรือทอร์ค โดยค่าแรงบิดนี้สามารถควบคุมได้โดยตรงจากการไหลของอากาศไปยังเครื่องกังหันด้วยชุดควบคุมควบคุม ซึ่งแรงบิดนี้จะเท่ากันและมีทิศทางต้านแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้า ($P_e = T_e \omega$) ในการทำงานชุดควบคุมวาล์ว (Controller) จะตรวจสอบความเร็วของเพลลา (ω) หรือความถี่ (f) ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดไว้เท่าไร เกินที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ แล้วจึงพยายามปรับให้กลับไปอยู่ที่ค่าที่ตั้งไว้ โดยการใช้วาล์วควบคุม (Speed changer motor) ซึ่งพิจารณาให้อยู่ในสถานะคงที่และเป็นกรณีของระบบสามเฟสสมมูล จะมีความสัมพันธ์ของแรงบิดคือ $T_e = T_m$ ในเครื่องจักรกลซิงโครนัสจะมีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วนที่ส่งผลต่อเสถียรภาพคือ โมเมนต์เชิงมุม และค่าความถี่ของคัง (Gupta, 2006) หาได้จากสมการที่ 2.1

$$H = \frac{KE}{G} = \frac{j\omega_s^2}{2G} \quad (2.1)$$

เมื่อ	H	คือ ค่าความเฉื่อยคงที่, (MJ/MVA)
	KE	คือ พลังงานจลน์สะสมในทวนส่วนที่หมุนที่ความเร็วซิงโครนัส, (MJ)
	G	คือ พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, MVA
	J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของทวนส่วนที่หมุน, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
	ω_s	คือ ความเร็วซิงโครนัสเชิงมุม, (rad/s)

จะได้สมการพลังงานสะสม

$$GH = \frac{j\omega_s^2}{2} = \frac{M\omega_s}{2}, M = j\omega_s \quad (2.2)$$

หรือ

$$M = \frac{2GH}{\omega_s} = \frac{GH}{\pi f} \quad \text{MJ}\cdot\text{s}/\text{rad}_m \quad (2.3)$$

$$M = \frac{2GH}{\omega_s} = \frac{GH}{\pi f} \quad \text{MJ}\cdot\text{s}/\text{rad}_e \quad (2.4)$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์เชิงมุม, MJ.s

ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะเป็นไปตามหลักการเคลื่อนที่แบบไดนามิก เขียนได้ดังสมการที่ 2.8

$$T_m = T_e + j \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (2.5)$$

เมื่อ T_m คือ แรงบิดทางกลของเครื่องกักกัน, Nm

T_e	คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าต้านกลับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, Nm
B	คือ สัมประสิทธิ์ของแรงบิดหน่วง, Nm-s
J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย, kg-m ²
ω_m	คือ ความเร็วเพลลาของโรเตอร์, rad/s

สำหรับแรงบิดหน่วง $B\omega_m$ เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดทานของแบร็ริงของโรเตอร์กับแรงปะทะหรือแรงเสียดทานต่าง ๆ เช่น แรงลมปะทะ หรือแรงบิดอื่น ๆ ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุน แต่เมื่อพิจารณาแรงบิดหน่วงกับแรงบิดอื่น ๆ แล้วแรงบิดหน่วงมีค่าน้อยกว่ามาก จึงสามารถตัดทอนของแรงบิดหน่วงออกได้เพราะมีค่าน้อย จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_m = T_e + j \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.6)$$

หรือ

$$T_m - T_e = j \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.7)$$

คูณสมการที่ (2.7) ด้วย ω_m จะได้

$$T_m \omega_m - T_e \omega_m = \omega_m j \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.8)$$

หรือ

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

เมื่อ	$P_m = T_m \omega_m$	คือ กำลังทางกลของเครื่องกั้น, W
	$P_e = T_e \omega_e$	คือ กำลังเนื่องจากแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, W

สำหรับสภาวะคงตัว คือ ไม่มีการรบกวนเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าทำให้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุนด้วยความเร็วคงที่ ดังนั้นทอม $d\omega_m / dt = 0$ ดังนั้นจะได้สมการในสภาวะคงตัวเป็นดังสมการที่ 2.10

$$P_m - P_e = T_m \omega_m - T_e \omega_m = 0 \quad (2.10)$$

สำหรับกรณีที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น มีการเปลี่ยนแปลงโหลด การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน หรือเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ จะทำให้กำลังทางกลที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_m และกำลังขาออก P_e มีค่าไม่เท่ากัน สมการที่ 2.10 จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิดเร่งในขณะนั้น เพื่อให้ระบบกลับคืนสู่สภาวะอยู่ตัวอีกครั้งหนึ่ง ถ้า P_a คือกำลังเร่ง หรือกำลังหน่วง ที่สมดุลกับค่าแรงบิดดังสมการ 2.11

$$P_a = P_m - P_e = T_a \omega_m \quad (2.11)$$

เมื่อ T_a คือ แรงบิดเร่งหรือแรงบิดหน่วง, Nm
 P_a คือ กำลังเร่งหรือกำลังหน่วง, MW

สำหรับแรงบิดเร่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ด้วยการหมุนสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.12

$$T_a = j\alpha \quad (2.12)$$

แทนสมการที่ 2.12 ลงในสมการที่ 2.10 และจากสมการที่ 2.2 จะได้สมการใหม่ดังสมการที่ 2.13

$$P_a = (j\omega)\omega_m = M\alpha = P_m - P_e \quad (2.13)$$

เมื่อ α คือ ค่าความเร่งเชิงมุม, rad/s^2

สำหรับความเร็วเชิงมุม ω_m สามารถเปลี่ยนเป็น ω_θ ได้ดังสมการ 2.14

$$\omega_e = \omega_m \times \frac{P}{2} \quad (2.14)$$

เมื่อ P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดย α หาได้จากสมการ 2.15

$$\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.15)$$

เมื่อ θ คือ การกระจัดเชิงมุมของโรเตอร์, rad

นำไปเขียนเป็นสมการของ θ ได้จากผลบวกกันของสองเทอม คือ ตำแหน่งของมุมโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา $\omega_s t$ เมื่อเทียบกับแกนหมุนอ้างอิงที่ความเร็วซิงโครนัส และมุมกำลัง δ ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสเทียบกับแกนหมุนอ้างอิง ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\theta = \omega_s t + \delta \quad (2.16)$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 2.16 เทียบกับเวลา t จะได้สมการที่ 2.17

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta}{dt} \quad (2.17)$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 2.17 เทียบกับเวลาอีกครั้ง จะได้สมการที่ 2.18 หรือที่เรียกกันว่าสมการการแกว่ง (Swing Equation)

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \omega_s + \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ $d\theta/dt$ จะมีค่าคงที่และเท่ากับความเร็วซิงโครนัสก็ต่อเมื่อ $d\delta/dt = 0$ ด้วยเหตุนี้เทอม $d\delta/dt$ จึงแสดงถึงความเร็วโรเตอร์ที่แตกต่างไป

จากความเร็วเชิงโคโรน่า ในหน่วยเรเดียนต่อวินาที และเมื่อแทนค่าความเร่งเชิงมุมจากสมการที่ 2.18 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้ดังสมการที่ 2.19

$$P_a = P_m - P_e = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2.19)$$

จากนั้นแทนค่า M ในสมการที่ 2.19 ด้วยสมการที่ 2.9 แล้วหารด้วยค่า G จะได้สมการการแกว่งที่มีค่าต่อหน่วยดังสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$P_{a(\text{pu})} = P_{m(\text{pu})} - P_{e(\text{pu})} = \frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2.20)$$

หรือ

$$P_a = P_m - P_e = \frac{2H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \text{ pu} \quad (2.21)$$

เมื่อ δ คือ มุมกำลังของเครื่องจักรกลเชิงโคโรน่า, เรเดียนทางไฟฟ้าจะได้

$$P_a = P_m - P_e = \frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \text{ pu} \quad (2.22)$$

เมื่อ	P_m	คือ กำลังทางกลของเครื่องกังหัน, pu
	P_e	คือ กำลังทางด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, pu
	P_a	คือ กำลังเร่งหรือกำลังหน่วง, pu
	H	คือ ค่าความเฉื่อยคงที่, MJ/MVA
	t	คือ เวลา, s
	f	คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า, Hz
	ω_s	คือ ความเร็วเชิงโคโรน่าเชิงมุม, rad/s

จากสมการที่ 2.22 หากมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta P_a = \Delta P_m - \Delta P_e = \frac{H}{180f} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} \quad (2.23)$$

หรือ

$$\frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e) = \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (2.24)$$

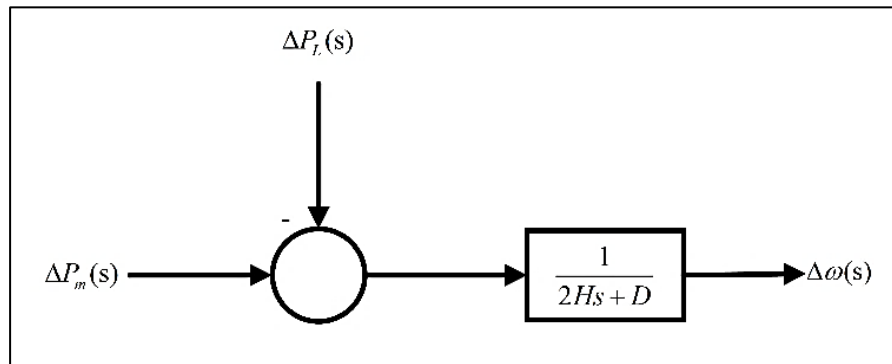
ทำการแปลงลาปลาซของสมการที่ 2.24 จะได้

$$\frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] = \Delta\omega(s) \quad (2.25)$$

ระบบไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิด มีทั้งโหลดประเภทความต้านทาน เช่น โหลดแสงสว่างและฮีตเตอร์ และมีโหลดประเภทความเหนี่ยวนำเช่น โหลดประเภทมอเตอร์ ซึ่งโหลดชนิดนี้จะเป็นโหลดประเภทที่เปลี่ยนแปลงความถี่โดยตรงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะความเร็วของโหลดและส่วนประกอบหลาย ๆ อย่างทางด้านระบบขับเคลื่อนโดยพิจารณาได้จากสมการ

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (2.26)$$

เมื่อ ΔP_L คือ การเปลี่ยนแปลงโหลดประเภทความต้านทาน
 ΔP_e คือ กำลังทางด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 $D\Delta\omega$ คือ การเปลี่ยนแปลงของโหลดประเภทเหนี่ยวนำที่มีผลต่อความถี่, D เป็นเปอร์เซ็นต์ของโหลดโหลดต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ สามารถนำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.4

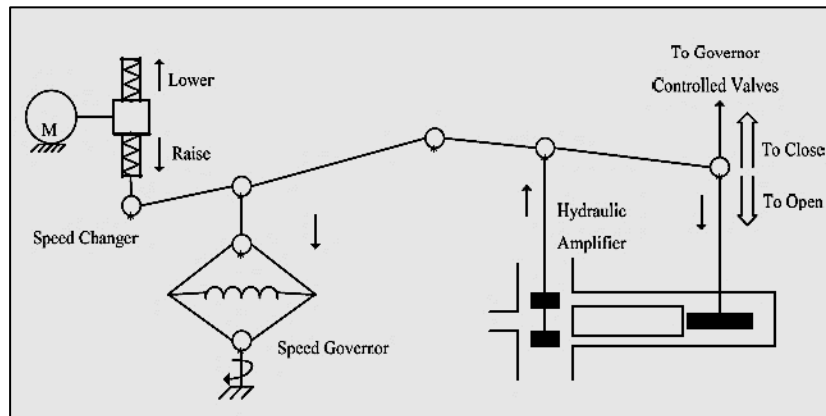


รูปที่ 2.4 บล็อกรวมไดอะแกรมของส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

ส่วนของแหล่งจ่ายระบบกำลังทางกลหรือที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นคือชุดขับเคลื่อนสำหรับจ่ายพลังงาน เช่น พลังงานจากกังหันไอน้ำ พลังงานจากกังหันในเขื่อน หรือจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงอื่น ๆ อย่าง ถ่านหิน นิวเคลียร์ แก๊ส เป็นต้น รูปแบบจำลองของกังหันที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงที่กำลังทางกลขาออก (ΔP_m) ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของกังหันไอน้ำ (ΔP_v) (Cutsem, 2018) ความแตกต่างของกันแต่ละชนิดจะส่งผลอย่างมากต่อคุณลักษณะสมบัติของกังหัน ในงานวิจัยนี้ใช้โมเดลจำลองโดยทั่วไปของชุดขับเคลื่อนสำหรับระบบกังหันไอน้ำแบบไม่ได้นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ สามารถประมาณการได้ด้วยค่าคงที่เวลาของระบบกังหัน (τT) ฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.27

$$G_r(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + \tau Ts} \quad (2.27)$$

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน กำลังทางไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าทางกลในด้านขาเข้า ในกรณีที่กำลังงานเกิดไม่เพียงพอที่จะถูกจ่ายจากพลังงานสะสมในระบบการหมุน ดังนั้นพลังงานสะสมจะมีการลดลงในกรณีที่มีความเร็วของกังหันและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกโดยทั่วไปความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำการปรับด้วยชุดตัวควบคุมของกังหันไปควบคุมความถี่ทางด้านอินพุตของกังหันจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงกำลังทางกลทางด้านเอาต์พุตทำให้เกิดความเร็วที่สภาวะคงที่ใหม่ขึ้นมา การควบคุมเบื้องต้นจะใช้ชุดกำลังที่ควบคุมด้วยความเร็วโดยปัจจัยสำคัญของการหมุนคือชุดไฟลด์บอลและเตรียมการหมุนทางกลไว้ส่งผลให้ความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามรูปแบบของชุดตัวควบคุมที่ดีที่สุดใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบหลักในการควบคุมความเร็วดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไลอะแกรมของระบบชุดตัวควบคุมควบคุมความเร็ว

แหล่งที่มา: <https://onlyengineering.wordpress.com/tag/turbine/> (เข้าถึงเมื่อ 25/02/2562)

ชุดตัวควบคุมความเร็ว (Speed Governor) เมื่อมีการจับชุดไฟลด์ด้วยแรงเหวี่ยงผ่านฟันเฟืองที่แกนก้าน การเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงเป็นแนวตรงของชุดควบคุมทางกลซึ่งสมมาตรกัน การเชื่อมต่อทางกล (Linkage Mechanism) การเชื่อมต่อส่วนมากสำหรับกระบวนการจับชุดไฟลด์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อวาล์วควบคุมก้าน ชุดผลักดันไฮดรอลิกและการป้อนกลับไปใหม่จากกระบวนการที่ได้จากชุดวาล์วควบคุมก้าน ชุดผลักดันไฮดรอลิก (Hydraulic Amplifier) ต้องใช้แรงขับทางกลอย่างมากที่จะทำการเปิดปิดวาล์วก้านไอน้ำ ดังนั้นในการดำเนินการของชุดตัวควบคุมชุดผลักดันไฮดรอลิกจำเป็นต้องมีกำลังสูงเพื่อขับเคลื่อนไฮดรอลิก ชุดเปลี่ยนความเร็ว (Speed Change) ชุดเปลี่ยนความเร็วประกอบไปด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ที่สามารถดำเนินการทั้งปรับด้วยมือและปรับแบบอัตโนมัติ สำหรับโหลดที่ความถี่ทั่ว ๆ โดยจะปรับหรือเซตให้ได้ก้านได้ความเร็วที่สามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สมดุลกับความต้องการ โหลดมีค่าเพิ่มขึ้น ในคุณลักษณะสภาวะอยู่ตัวของชุดควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ความชันของเส้นที่แทนด้วยช่วงปรับความเร็ว R ตัวควบคุมโดยปกติจะปรับความเร็วอยู่ในช่วง 5-6 เปอร์เซ็นต์ จากศูนย์จนถึงโหลดเต็มพิกัด ชุดตัวควบคุมความเร็วทางกลจะเป็นส่วนที่ทำการเปรียบเทียบกำลังด้านขาออก (ΔP_g) และความแตกต่างระหว่างค่ากำลังที่ตั้งไว้ (ΔP_{ref}) และค่ากำลังจากคุณลักษณะความเร็วของตัวควบคุม ($\Delta \omega / R$) ดังสมการที่ 2.28

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} = -\frac{1}{R} \Delta \omega \quad (2.28)$$

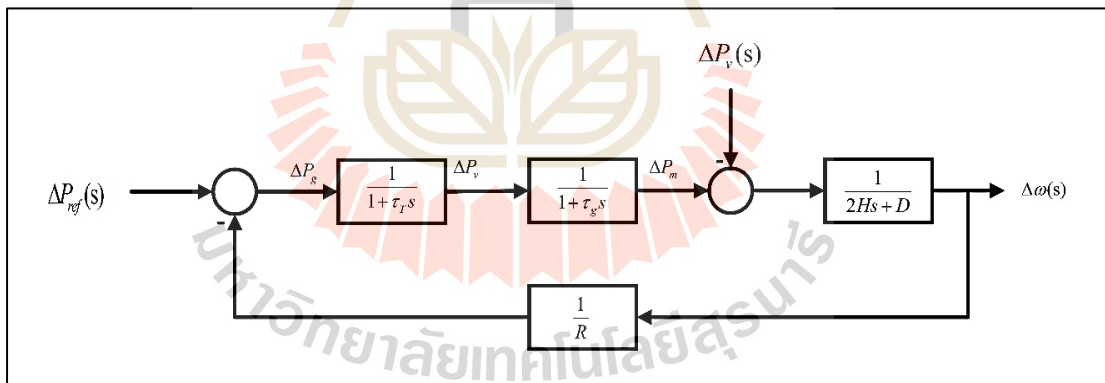
หรือเขียนในเทอมของความถี่ได้ดังนี้ เป็นการควบคุมชุดไฮดรอลิกได้ดังสมการที่ 2.29

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) = -\frac{1}{R} \Delta \omega(s) \quad (2.29)$$

การควบคุม ΔP_g เป็นการควบคุมชุดไฮดรอลิกโดยตรงซึ่งส่งผลกระทบต่อชุดควบคุมตำแหน่งของวาล์วควบคุมไอน้ำสมมติให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบให้พิจารณาค่าคงที่เวลาของชุดควบคุม (τ_g) จะได้ดังสมการที่ 2.30

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + \tau_g s} \Delta P_g(s) \quad (2.30)$$

จากสมการที่ 2.4 ถึง 2.30 ได้พิสูจน์เพื่อนำมาสรุปหาโมเดลการควบคุมความถี่โพลของระบบไมโครกริดที่ใช้กังหันขนาดไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความถี่โพลของระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าทั่วไป

2.3.2 กังหันลม

กังหันลมหรือระบบแปลงพลังงานเป็นพลังงานไฟฟ้า มีส่วนประกอบหลักคือ กังหันลม โดยเชื่อมแกนกังหันกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านระบบเกียร์ทดรอบ ส่วนหลักของกังหันลมแบ่งเป็นสองส่วนประกอบด้วย ใบพัด และกล่อง ในกล่องจะประกอบไปด้วยกลไกการส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยปกติใบพัดจะมีสองใบขึ้นไป กังหันลมจะรับพลังงานจลน์ของ

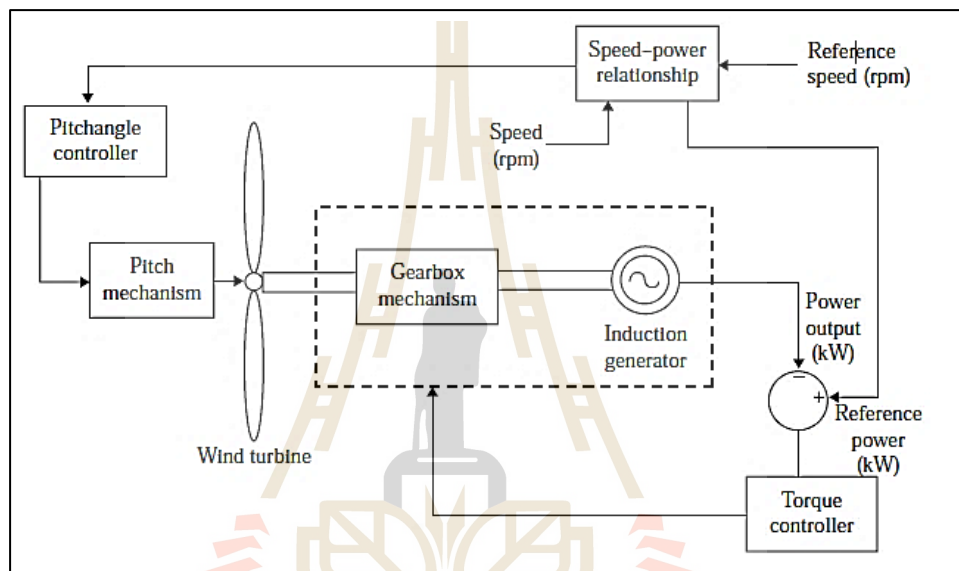
การไหลของลมผ่านใบพัดกังหันและถ่ายโอนพลังงานไปยังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านกลองเกียร์ จากนั้นเพลากำเนิดถูกขับเคลื่อนโดยกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ฟังก์ชันของกลองเกียร์คือการเปลี่ยนความเร็วการหมุนช้าลงของกังหันลมให้เป็นความเร็วการหมุนที่สูงขึ้นในด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะต้องรักษาแรงดันและความถี่เอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่กำหนดโดยใช้การวัดและส่งข้อมูลพารามิเตอร์ไปยังระบบควบคุม ขนาดกังหันเชิงพาณิชย์โดยเฉลี่ยของกังหันลมผลิตไฟฟ้า คือ 300 kW จนกระทั่งช่วงกลางทศวรรษที่ 1990 แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการพัฒนาและติดตั้งเครื่องจักรที่มีความจุสูงถึง 5 MW กำลังขับของกังหันลมถูกกำหนดโดยปัจจัยหลายประการ เช่นความเร็วลมขนาดและรูปร่างของกังหัน กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันเขียนได้ดังสมการที่ 2.31

$$P_{WG} = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (2.31)$$

เมื่อ	P_{WG}	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม (W)
	C_p	คือ สัมประสิทธิ์กำลังงาน
	ρ	คือ ความหนาแน่นอากาศ (Kg/m ³)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดรับลมของใบพัด (m ²)
	v	คือ ความเร็วลม (m/s)

ระบบการทำงานกังหันลมแบ่งเป็นสองประเภทคือ (1) กังหันลมความเร็วคงที่ และ (2) กังหันลมความเร็วเปลี่ยนแปลง ในปัจจุบันระบบการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการใช้อย่างแพร่หลายคือ กังหันลมความเร็วเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่า แนวโน้มที่จะเกิดความเครียดทางกลต่ำกว่า และมีเสียงเบากว่ากังหันลมความเร็วคงที่ ระบบกังหันลมที่ควบคุมความเร็วพิทช์โดยทั่วไปจะแสดงในรูปที่ 2.7 วิธีในการควบคุมการทำงานของกังหัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความเร็วและการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของใบพัด กลยุทธ์การควบคุมมักถูกใช้คือ กลยุทธ์การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและกลยุทธ์การจำกัดพลังงาน กลยุทธ์การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานจะถูกใช้เมื่อความเร็วลมต่ำกว่าค่าที่กำหนด กลยุทธ์นี้ปรับการรับพลังงานให้เหมาะสม โดยรักษาความเร็วคงที่ให้สอดคล้องกับ อัตราส่วนความเร็วปลายที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามหากความเร็วถูกเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความผันแปรของการไหลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจโอเวอร์โหลดสำหรับความเร็วลมที่สูงกว่าค่าเล็กน้อย(อ้างอิง) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น การควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็ว กลยุทธ์การจำกัดพลังงานใช้สำหรับความเร็วลมสูงกว่าค่าที่

ระบบกักเก็บลมความเร็วเปลี่ยนแปลงมีข้อดีหลายอย่างเช่น มีความสามารถในการดักจับพลังงานสูงและมีความเค้นเชิงกลน้อย มีประสิทธิภาพแอร์โรไดนามิกและมีแรงบิดในสภาวะชั่วคราวต่ำ ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบลดแรงกระแทกทางกล เนื่องจากระบบไฟฟ้าสามารถให้การหน่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ประสบปัญหาการชิงโครไนซ์หรือ แรงดันไฟฟ้าตกเนื่องจากการควบคุมไฟฟ้าที่มั่นคง อย่างไรก็ตามมีข้อเสียดังต่อไปนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกักเก็บความเร็วคงที่มีประสิทธิภาพไฟฟ้าต่ำกว่า และราคาแพงกว่าและบางครั้งต้องใช้กลยุทธ์การควบคุมที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.7 โมเดลกักเก็บลมที่ควบคุมความเร็วพิทช์ได้ (Chowdhury, 2009)

เมื่อพิจารณาการทำงานของกักเก็บลมจากโมเดลที่ 2.7 แล้วพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกักเก็บลมต้องพิจารณาจาก ชุดควบคุมการปรับมุมใบพัด (Pitchangle Controller) หัวขับกักเก็บ (Pitch Mechanism) ชุดเกียร์ (Gearbox Mechanism) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Induction Generator) รายละเอียดของแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) ชุดควบคุมการปรับมุมกักเก็บ (G_{PC})

ส่วนของการควบคุมกักเก็บจะเริ่มต้นโดยรับอินพุตเป็นความเร็วลมเข้ามา และหามุมที่ทำให้ได้ความเร็วที่เหมาะสม โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$G_{PC} = \frac{\Delta V_{OUT,PC}}{\Delta V_{IN,PC}} = \frac{K_{PC}}{1 + sT_{PC}} \quad (2.32)$$

- เมื่อ $V_{IN,PC}$ คือ ความเร็วลมก่อนการปรับมุม (p.u.)
 $V_{OUT,PC}$ คือ ความเร็วลมหลังการปรับมุม (p.u.)
 K_{PC} คือ ค่าคงที่อัตราขยายของชุดควบคุมการปรับมุมกังหัน (p.u.)
 T_{PC} คือ ค่าคงที่เวลาของชุดควบคุมการปรับมุมกังหัน (s)

2) ตัวขับเคลื่อนกังหัน (G_{PM})

หลังจากไปตัวปรับมุมกังหันแรงลมจะปะทะกับใบพัดทำให้เกิดแรงหมุนหรือแรงบิดเพื่อไปขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าในกังหัน โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$G_{PM} = \frac{\Delta \tau_{OUT,PM}}{\Delta V_{IN,PM}} = \frac{K_{PM}}{1 + sT_{PM}} \quad (2.33)$$

- เมื่อ $V_{IN,PC}$ คือ ความเร็วลมก่อนผ่านตัวขับเคลื่อนกังหัน (p.u.)
 $\tau_{OUT,PC}$ คือ แรงบิดที่ได้จากความเร็วลมไหลผ่านกังหัน (p.u.)
 K_{PC} คือ ค่าคงที่อัตราขยายของตัวขับเคลื่อนกังหัน (p.u.)
 T_{PC} คือ ค่าคงที่เวลาของตัวขับเคลื่อนกังหัน (s)

3) ชุดเกียร์ (G_{GB})

หลังจากได้แรงบิดจากตัวขับเคลื่อนกังหันแรงบิดนี้จะส่งไปยังชุดเกียร์เพื่อทำการสร้างแรงบิดให้มากยิ่งขึ้น โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$G_{GB} = \frac{\Delta \tau_{OUT,GB}}{\Delta \tau_{OUT,PM}} = \frac{K_{GB}}{1 + sT_{GB}} \quad (2.34)$$

- เมื่อ $\tau_{OUT,GB}$ คือ แรงบิดหลังจากผ่านชุดเกียร์ (p.u.)
 K_{GB} คือ ค่าคงที่อัตราขยายของชุดเกียร์ (p.u.)
 T_{GB} คือ ค่าคงที่เวลาของชุดเกียร์ (s)

4) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (G_{IM})

หลังจากได้แรงบิดจากตัวขับเคลื่อนแรงบิดนี้จะส่งไปยังชุดเกียร์เพื่อทำการสร้างแรงบิดให้มากยิ่งขึ้น โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$G_{IM} = \frac{\Delta P_{OUT,IM}}{\Delta \tau_{OUT,GB}} = \frac{K_{IM}}{1 + sT_{IM}} \quad (2.35)$$

เมื่อ $P_{OUT,IM}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (p.u.)

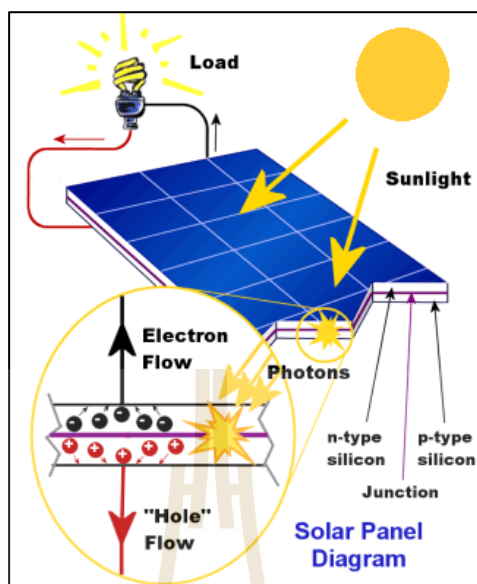
K_{IM} คือ ค่าคงที่อัตราขยายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (p.u.)

T_{IM} คือ ค่าคงที่เวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (s)

2.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์

การผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน ข้อได้เปรียบที่สำคัญของระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่หลายข้อ เช่น เป็นมิตรต่อธรรมชาติเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากลดการใช้เชื้อเพลิงที่มาจากการเผาไหม้ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ ค่าไฟฟ้าเกิดการลดลงอย่างมากของลูกค้านี้เนื่องจากความพร้อมเซลล์แสงอาทิตย์ อายุการใช้งานยาวนาน กว่า 30 ปีกับการบำรุงรักษาขั้นต่ำและ การทำงานแบบเงียบไม่เป็นมลภาวะทางเสียง จากประโยชน์เหล่านี้ทำให้ปัจจุบันระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการยอมรับจากรัฐบาลองค์กรด้านสิ่งแวดล้อมและองค์กรการค้าว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการจัดหาส่วนสำคัญของความต้องการพลังงานของโลกในลักษณะที่ยั่งยืนและทดแทนได้ ยิ่งไปกว่านั้นเนื่องจากการพัฒนาอย่างกว้างขวางของเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบัน ทำให้การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นที่ต้องการและมีการใช้งานทั่วโลกในฐานะระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เพื่อเพิ่มการกระจายตัวการผลิตไฟฟ้าในระดับท้องถิ่น

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถใช้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในไมโครกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังมีข้อเสียของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูงและประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ มีการศึกษาว่าการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดเล็กนั้นคุ้มค่ากว่าการติดตั้งขนาดใหญ่กว่า ซึ่งก็เป็นนัยสำคัญที่แสดงถึงประสิทธิภาพของการป้อนกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่วงจรลูกค้ำที่ระบบไฟฟ้าการกระจายตัวแรงดันต่ำ อย่างไรก็ตามลักษณะของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงไฟที่เหมาะสมจะถูกนำมาใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระดับความถี่ที่กำหนด ดังนั้นระบบเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นหนึ่งในระบบผลิตพลังงานแบบกระจายตัวที่มีศักยภาพสำหรับไมโครกริด



รูปที่ 2.8 โมเดลการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งที่มา: <https://www.nuthermgalway.ie/products/photovoltaic-pv-panels/> (เข้าถึงเมื่อ 15/3/2019)

การผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากการที่แสงตกลงบนพื้นผิวเซลล์ในรูปแบบของโฟตอนสร้างคู่อิเล็กตรอนและพาหะประจุไฟฟ้าที่ทางแยก p-n ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ผลิตโดยเซลล์แสงอาทิตย์ จะขึ้นกับการฉายรังสีที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิโดยรอบพื้นที่ผิวของมันโดยตรง ดังแสดงใน รูปที่ 2.8 แรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นถูกจำกัด โดยแรงดันไฟฟ้าคระหว่างรอยแยก p-n เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟขาออกของเซลล์เดี่ยวนั้นมีขนาดเล็กมากจึงมีการต่อแบบอนุกรม คือนำขั้วบวกของเซลล์แสงอาทิตย์แผงหนึ่งมาต่อกับขั้วลบอีกแผงหนึ่งไปเรื่อย ๆ จนได้แรงดันตามระบบที่ออกแบบไว้ การต่อแบบอนุกรมนี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่กระแสในระบบจะเท่าเดิม และการต่อแบบขนาน คือ การนำขั้วบวกของเซลล์แสงอาทิตย์แผงหนึ่งไปต่อกับขั้วบวกของเซลล์แสงอาทิตย์อีกแผงหนึ่ง และนำขั้วลบแผงหนึ่งไปต่อกับขั้วลบอีกแผงหนึ่ง การต่อแบบนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่แรงดันเท่าเดิม

พลังงานทางไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มแสงแดดเป็นหลัก (Dombia, 2009) โดยสามารถเขียนเป็นสมการที่ 2.36

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \left(\frac{J(t)}{J_{STC}} \right) [1 - \alpha \Delta T] \quad (2.36)$$

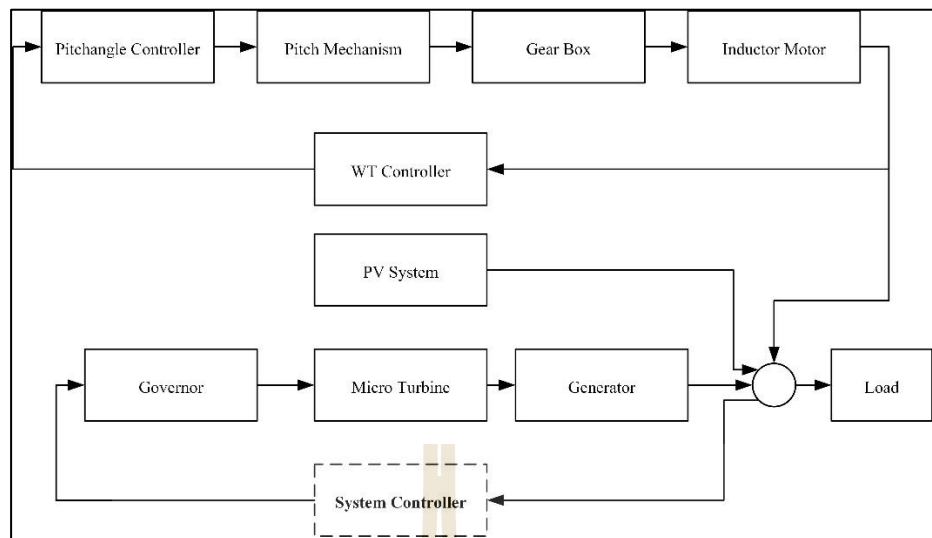
เมื่อ	P_{STC}	คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่ามาตรฐาน (w)
	J	คือ ค่าความเข้มแสง (w/m^2)
	J_{STC}	คือ ค่าความเข้มแสงที่ทดสอบในสภาวะมาตรฐาน (w/m^2)
	α	คือ สัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่ได้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
	T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นส่งผลไม่มากต่อปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยอ้างอิงจากสมการที่ 2.36 ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนหนึ่งตัวแปรได้ดังนี้

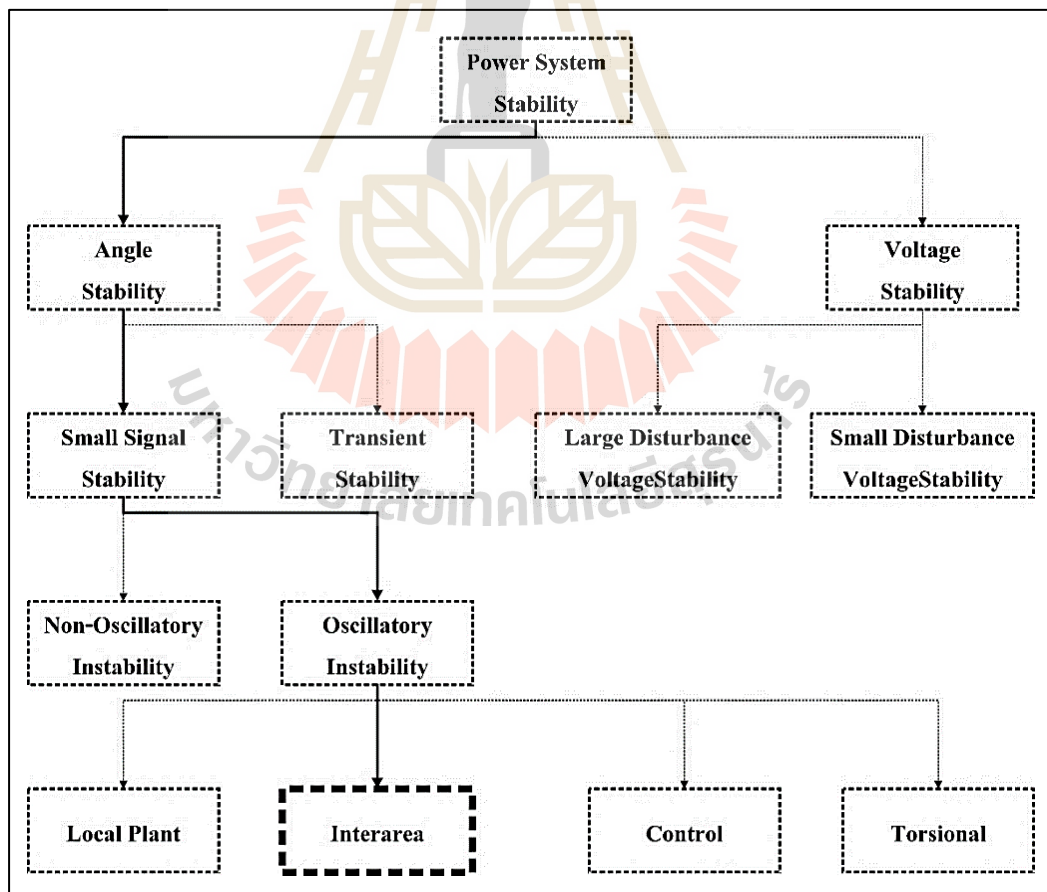
$$G_{PW} = \frac{\Delta P_{PV}}{\Delta J} = \frac{1}{1 + sT_{PV}} \quad (2.37)$$

เมื่อ	P_{PV}	คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (p.u.)
	J	คือ ความเข้มแสง (p.u.)
	T_{PV}	คือ ค่าคงตัวเวลา (s)

หลังจากที่ได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในไมโครกริดที่นิยมและระบบควบคุมของไมโครกริดมาแล้ว พบว่าโรงไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานหลัก และเพิ่มกังหันลม และเซลล์แสงอาทิตย์มาช่วยผลิตกำลังไฟฟ้าสนับสนุน ระบบดังกล่าว สามารถเขียนเป็นบล็อกอะแดรมได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ไลออะแกรมของระบบทดสอบ



รูปที่ 2.10 การจำแนกชนิดของเสถียรภาพทางไฟฟ้า (Kimbark, 1995)

2.4 เสถียรภาพในระบบไมโครกริด

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าคือ การที่ระบบไฟฟ้ามีความสมดุลระหว่างกำลังงานที่โหลดต้องการ กับความสามารถในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบรวมกัน ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (ทำงาน Synchronized กัน) เมื่อกำลังไฟฟ้าในระบบมีความผันผวนของ อาจจะทำให้ทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้น ถ้าระบบยังสามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ เรียกว่า “ระบบยังมีเสถียรภาพอยู่” ตัววัดเสถียรภาพของระบบ คือ ความถี่ และ แรงดันของระบบ (Kimbark, 1995) การจำแนกเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ เสถียรภาพทางมุมและเสถียรภาพทางแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10

2.4.1 เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า

เสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้า เป็นความสามารถของระบบในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ทุกโหนด หลังจากที่เกิดปัญหาขึ้นภายในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรักษาความสมดุลของกำลังไฟฟ้าระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ การขาดเสถียรภาพทางแรงดันนี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดันที่บัลลัดลงหรือเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการสูญเสียที่โหลดหรือการสูญเสียในสายส่ง

2.4.2 เสถียรภาพทางความถี่

เสถียรภาพทางความถี่ เป็นความสามารถของระบบในการรักษาความถี่ให้คงที่ หลังจากเกิดการเสียสมดุลระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับ โหลด และจะส่งผลกระทบต่อระบบเป็นอย่างมาก โดยประสิทธิภาพในการดำเนินการของระบบขึ้นอยู่กับ การควบคุมและฟื้นฟูความสมดุลระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับ โหลด สำหรับการขาดเสถียรภาพทางความถี่อาจจะทำให้แหล่งจ่ายหรือ โหลด ถูกตัดออกจากระบบเพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์

การรักษาเสถียรภาพของความถี่ โหลด เป็นการรักษาสสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และ โหลด หรือก็คือการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากแหล่งผลิตแบบกระจายตัวต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับ โหลดนั่นเอง เพื่อให้ไมโครกริดสามารถให้บริการควบคุมและบริการเสริมต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าชั่วคราวในอนาคต

2.5 การรักษาเสถียรภาพของระบบไมโครกริด

ระบบไมโครกริดจำเป็นต้องอย่างยิ่งต้องมีการจัดการความสมดุลระหว่างพลังงาน ซึ่งระบบการจัดการพลังงาน คือ ระบบการจัดการพลังงาน (Energy Manager Module) โดยได้รับการสนับสนุนจาก โมดูลประสานงานการป้องกัน (Protection Co-ordination Module) และ ตัวควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Source Controllers) เช่น ระบบกักเก็บลม ที่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน เนื่องจากความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ระบบการจัดการพลังงาน

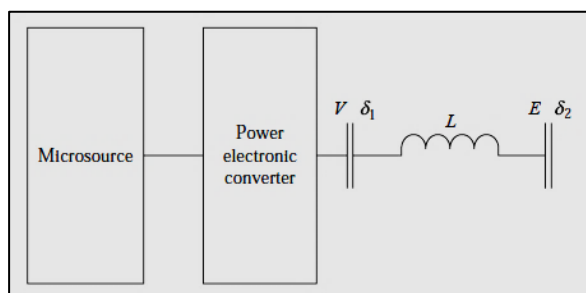
จะเป็นตัวควบคุมตัวควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอีกที่เนื่องจากในระบบอาจจะมีแหล่งกำเนิดพลังงานย่อยหลายตัว ทำให้จำเป็นต้องมีศูนย์กลางการควบคุมสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลรวมของทั้งระบบเพื่อให้เกิดความแม่นยำสูงสุด โดยระบบการจัดการพลังงานสามารถเลือกใช้ระบบการควบคุมธรรมดาหรือระบบควบคุมอัตโนมัติ และใช้ระบบโปรโตคอลการสื่อสารสำหรับเชื่อมต่อข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงสรุปได้ว่าการศึกษาเสถียรภาพในระบบไมโครกริด ประกอบด้วย การควบคุมกำลังการผลิตโดยใช้ตัวควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก การควบคุมโดยใช้หน่วยการควบคุมหลักของระบบไมโครกริด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 การควบคุมกำลังการผลิตโดยใช้ตัวควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบไมโครกริดนั้นจำเป็นต้องมีตัวควบคุมขนาดเล็ก (Micro Controller) เสมอ เพื่อดำเนินการอย่างราบรื่นและยืดหยุ่นของอุปกรณ์เหล่านี้และจัดการให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสม ในการทำงานของตัวควบคุมย่อยอาจทำงานโดยมีหรือไม่มีแทรกแซงจากตัวควบคุมกลาง (Central Controller) ของระบบจากกริดการทำงานของตัวควบคุมขนาดเล็กขึ้นอยู่กับอินเตอร์เฟซอิเล็กทรอนิกส์กำลังในแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน การใช้ตัวควบคุมย่อยมีข้อดีดังนี้ สามารถเพิ่มแหล่งกำเนิดไฟฟ้าย่อยตัวอื่น ๆ เข้ากับระบบโดยไม่มีการตัดแปลงในการกำหนดค่าเดิมระบบไมโครกริดที่มีอยู่ ระบบไมโครกริดสามารถเชื่อมต่อและตัดการเชื่อมด้วยกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักด้วยตัวมันเองอย่างรวดเร็ว สามารถช่วยแก้ไขแรงดันตกและความไม่สมดุลของระบบได้ สามารถจัดการความผิดพลาดที่จุดต่าง ๆ ได้โดยไม่ทำให้ระบบสูญเสียความมั่นคง และระบบไมโครกริดสามารถตอบสนองความต้องการของไดนามิกโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยโหมดการทำงานของตัวควบคุมขนาดเล็กมีดังนี้

1) การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

แหล่งกำเนิดพลังงานย่อยอาจแบ่งเป็น (1) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับกลุ่มแรก คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (50/60 HZ) ผ่านระบบอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่ส่วนที่สองคือแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ความถี่ที่ไม่ได้มาตรฐานจะถูกแก้ไขโดยแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านระบบคอนเวอร์เตอร์ก่อนและทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (50/60 HZ) ผ่านอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.11 ระบบควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็ก (Chowdhury, 2009)

รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบทั่วไปของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็กซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและตัวแปลงกำลังไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในระบบจะเป็นตัวควบคุมทั้งขนาด (V) และเฟสมุม (δ) ของแรงดันขาออก ($V\angle\delta$) ที่ขั้วแปลง (โนดที่ 1) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะเป็นตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าไปยังโนดที่เชื่อมต่อกับระบบไมโครกริด (โนด 2) ที่แรงดันไฟฟ้าของ ($E\angle\delta_2$) ผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) การไหลกำลังไฟฟ้าจริง (P) จะถูกควบคุมโดยการควบคุม เฟสมุม (δ) เมื่อ $\delta = \delta_1 - \delta_2$ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) จะถูกควบคุมโดยการควบคุมแรงดัน โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.38 และสมการที่ 2.39 ตามลำดับ

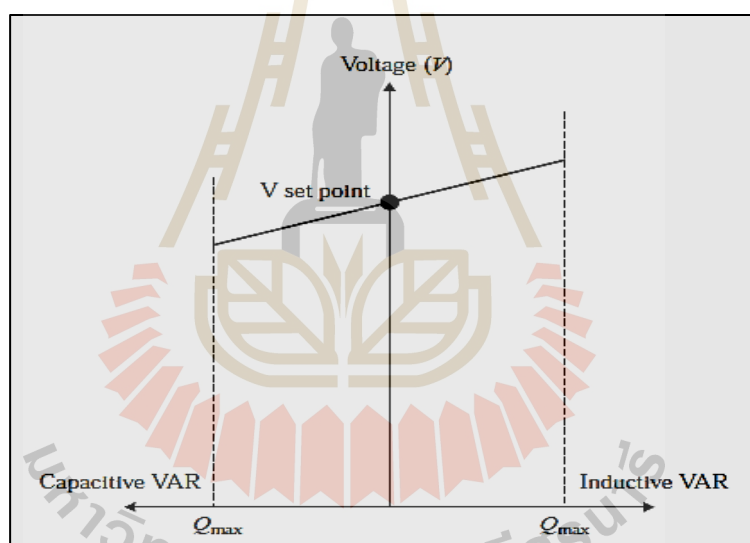
$$P = \frac{3VE}{2L} \sin \delta \quad (2.38)$$

$$Q = \frac{3VE}{2L} (V - E \cos \delta) \quad (2.39)$$

นอกเหนือจากการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแล้วการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของไมโครกริดที่โนดต่าง ๆ ยังจำเป็นสำหรับเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือโดยรวมของระบบไมโครกริด สำหรับระบบไมโครกริดที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวนมากอาจได้รับผลกระทบจากการเกิดปฏิกิริยาออสซิลเลชัน หากไม่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม ฟังก์ชันควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ ตัวควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็กจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการลดกระแสรีแอกทีฟขนาดใหญ่ในระบบไมโครกริด สำหรับโครงข่ายไฟฟ้าหลัก กระแสไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดจะถูกจำกัดโดยความต้านทานขนาดใหญ่ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว ในขณะที่ในกรณีของไมโครกริดปัญหาจะค่อนข้างเด่นชัด เนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ส่วนใหญ่มักจะติดตั้งใกล้โหลดทำให้มีความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดพลังงาน ณ จุดต่าง ๆ ทั่ว บางครั้งเมื่อกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจ่ายเกินหรือต่ำกำหนด อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพของแรงดันในระบบได้ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ($V-Q$) ที่มีลักษณะดัง แสดงในรูปที่ 2.12 ฟังก์ชันของตัวควบคุมแรงดัน คือ การเพิ่มแรงดันเมื่อแรงดันตกเนื่องจากมี โหลดประเภทตัวเหนี่ยวนำในระบบมากขึ้น และลดแรงดันเมื่อเกิดแรงดันเกินเนื่องจากมีค่า กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบสูงเกินไป ขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟถูกกำหนดโดยขนาด โวลต์แอมป์ (VAR, S) จากอินเวอร์เตอร์และกำลังไฟฟ้าจริง (P) ของไมโครโชนิคส์ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{\max} = \sqrt{(S^2 - P^2)} \quad (2.40)$$

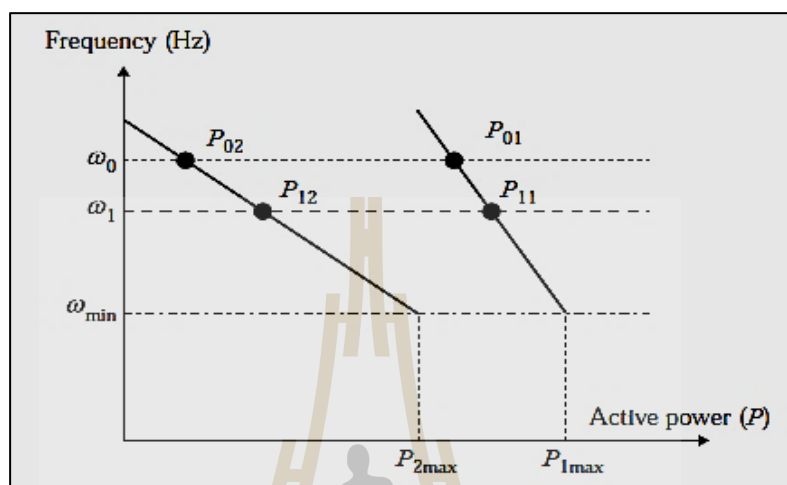


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Chowdhury, 2009)

2) การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและความถี่โดยรักษาสมดุลของโหลด

ตัวควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในไมโครกริด ช่วยให้การเปลี่ยนแปลง ที่ราบรื่นและอัตโนมัติระหว่างโหมดเชื่อมกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักและโหมดแยกตัวอิสระตามความ จำเป็น ระบบนี้จะคล้ายกับการทำงานของระบบจ่ายไฟแบบต่อเนื่อง ในระหว่างการเปลี่ยนไปใช้ โหมดสแตนด์ออล ตัวควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแต่ละตัวจะควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและ ความถี่ ($P-f$) เพื่อเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเพื่อให้เกิดความสมดุลของกำลังไฟฟ้าเมื่อ โหลด

เปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมจะทำกระบวนการนี้อัตโนมัติหลังจากได้รับข้อมูลจากติดตามโหลดที่เหมาะสมโดยไม่ต้องรอกำสั่งใด ๆ จาก ตัวควบคุมกลางของระบบ โดยคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและความถี่ ($P-f$) จะแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและความถี่ ($P-f$) (Chowdhury, 2009)

2.5.2 การควบคุมโดยใช้หน่วยการควบคุมหลักของระบบไมโครกริด

หน่วยการควบคุมของระบบไมโครกริดแบ่งเป็นหลัก ๆ สองส่วนหน่วย คือ ระบบจัดการพลังงาน และ ระบบประสานงานการป้องกัน ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) ระบบจัดการพลังงาน

ระบบการจัดการพลังงานจะรวมฟังก์ชันการควบคุมต่าง ๆ เพื่อควบคุมการทำงานของพลังงานที่เหมาะสมของระบบไมโครกริด ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ฟังก์ชันการควบคุมพารามิเตอร์สำคัญที่จำเป็นสำหรับการทำงานที่เหมาะสมของระบบไมโครกริด โดยจำนวนฟังก์ชันการควบคุมต่าง ๆ สามารถเพิ่มได้เสมอ เพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีและซับซ้อนยิ่งขึ้นแม้ว่าจะเพิ่มความซับซ้อนในการออกแบบ โดย ฟังก์ชันการทำงานที่พบได้บ่อยของระบบการจัดการพลังงาน เช่น ควบคุมแรงดัน ควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ควบคุมความเร็วของตัวขับเคลื่อนในกรณีที่ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบกักเก็บควบคุมความถี่

2) ระบบควบคุมการป้องกัน

ระบบควบคุมการป้องกัน โดยรวมของไมโครกริดจะแตกต่างจากระบบไฟฟ้าแบบปกติคือ ระบบไมโครกริดมีทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแบบสองทิศทางผ่านอุปกรณ์ป้องกันในระบบรัศมี เครือข่ายการกระจายแบบพาสซีฟกลายเป็น

แอ็คทิฟ เนื่องจากในระบบมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ระบบไมโครกริดมีความสามารถเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจร โดยเปลี่ยนจากโหมดเชื่อมต่อกกริดเป็นแยกตัวอิสระ โดยปกติจะใช้รีเลย์กระแสเกินสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าเกิน

2.5.3 การวางแผนการดำเนินการโดยการวิเคราะห์กำลังการผลิตของแหล่งพลังงานหมุนเวียน

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีช่วงของการดำเนินการที่ระบุและดัชนีประสิทธิภาพที่เฉพาะเจาะจงในแต่ละระดับการดำเนินการ นอกจากนี้ประสิทธิภาพยังขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายประการ เช่น พารามิเตอร์สภาพอากาศอายุของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าย่อย ลักษณะค่าเสื่อมราคา และกำหนดการบำรุงรักษา ลักษณะไดนามิกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำงานและการควบคุมระบบไมโครกริด เนื่องจากความผันแปรของโหลดและกำลังไฟฟ้าอื่น ๆ เพื่อประโยชน์ในการตอบสนองความต้องการ โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

1) การพยากรณ์อากาศ

สภาพอากาศและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและความต้องการพลังงาน (เช่น ความต้องการความร้อนสำหรับเครื่องทำความร้อนในครัวเรือนมีมากในฤดูหนาวมากกว่าในฤดูร้อน) ในทางตรงกันข้ามการปล่อย การทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กบางชนิดก็มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในท้องถิ่นและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นระบบควบคุมระบบไมโครกริดควรตรวจสอบสภาพอากาศอย่างต่อเนื่องโดยรวบรวมข้อมูลจากการพยากรณ์และรูปแบบสภาพอากาศในอดีตหรือจากสถานีตรวจอากาศในท้องถิ่น รูปแบบสภาพอากาศในระยะยาวอาจหาได้ง่ายจากข้อมูลสถิติ แต่ข้อมูลระยะสั้นจะต้องรวบรวมจากสถานีอากาศท้องถิ่นหรือเว็บไซต์ข้อมูลสถานีบริการอากาศในภูมิภาค

2) การคาดการณ์กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของแต่ละแหล่งกำเนิด

ในระบบไมโครกริดบางระบบมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลายประเภท ซึ่งบางประเภทไม่สามารถควบคุมกำลังการผลิต เช่น กังหันลม เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น แต่ระบบจัดการพลังงานจำเป็นจะต้องทราบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เพื่อควบคุมให้สมดุลกับความต้องการโหลด ในการสร้างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละระบบ จำเป็นต้องทราบรูปแบบโหลดในอดีตของพื้นที่นั้น ๆ สำหรับการวางแผนกลยุทธ์การสร้างและการควบคุมสำหรับระบบไมโครกริด

2.6 ปรัชญ์นัวรรณกรรม

ในส่วนของปรัชญ์นัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทางผู้เขียนได้ศึกษาผลกระทบของการติดตั้งพลังงานหมุนเวียนเข้ามาในระบบ การควบคุมความถี่โหลดด้วยวิธีการต่าง ๆ พร้อมทั้งความเหมาะสมในการใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อประยุกต์ร่วมกัน และเทคนิคการคาดการณ์พลังงานเพื่อนำมาประยุกต์ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปรัชญ์นัและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปี (ค.ศ)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Barba, de la Torre and Ordiales	ศึกษาปัญหาสำหรับการจัดการระบบไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียน พบว่าเมื่อมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดดังกล่าวจะทำให้การรักษาสมดุลระหว่างพลังงานที่ผลิตได้และความต้องการมากขึ้น ทำให้ต้องมีการจัดการที่เหมาะสมเพื่อรักษาประสิทธิภาพในการทำงานของระบบไฟฟ้า
2013	Lui, Lui, Ding, and Li	ศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวของระบบสายส่งที่ใช้พลังงานลมและพลังงานความร้อน พบว่าในระบบที่ใช้ไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานลมเข้ามาเสริมนั้นมีการรบกวนเล็กน้อย เนื่องจากพลังงานลมนั้นค่อนข้างมีความผันผวน และการรบกวนนี้จะส่งผลอย่างมากเมื่อเกิดความผิดปกติในสภาวะชั่วคราว
2015	Liu and Qian	นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการเลื่อน โหมด เพื่อควบคุมความถี่โหลดของระบบที่มีการเชื่อมต่อภายในและมีการติดตั้งระบบพลังงานลม โดยจะใช้โครงข่ายประสาทเพื่อประมาณการความไม่แน่นอน ผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการรบกวน วิธีการนี้สามารถทำให้ระบบกลับสู่เสถียรภาพได้
2018	Lehyeh, Al Hinti, Harb and Alsafasfeh	ศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในประเทศจอร์แดนที่มีการติดตั้งพลังงานหมุนเวียนอยู่ภายใน โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเรื่อง ความผิดปกติ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และการลดกำลังการผลิตอย่างกะทันหันของพลังงานหมุนเวียน โดยจะวิเคราะห์ด้วยการใช้โปรแกรม PSSE ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เป็นปัญหาอย่างมากในกรณีที่พลังงานหมุนเวียนลดอัตราการผลิตอย่างกะทันหันทำให้ความถี่ลดลงไปด้วย

ตารางที่ 2.1 ปรีทัศน์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี (ค.ศ)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	Yacar Arango and Wogrin	ศึกษาการใช้แบตเตอรี่แต่ละชนิดในกรณีที่ระบบได้รับผลกระทบด้านกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง และความมั่นคงของระบบไฟฟ้า เนื่องจากการใช้พลังงานแทนมากขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ผลสรุปที่ได้คือเมื่อมีการใช้พลังงานหมุนเวียนมากขึ้น ในระบบจะมีปัญหาด้านเสถียรภาพมากขึ้น แต่ว่าชนิดของแบตเตอรี่ยังไม่ส่งผลกับผลกระทบด้านนี้
2015	Sönmez and Ayasun	นำเสนอการคำนวณหาอัตราขยาย K_p และ K_r สำหรับการควบคุมแบบพีไอ เพื่อควบคุมความถี่โหนดของระบบไฟฟ้าแบบหนึ่งพื้นที่โดยพิจารณาค่าความหน่วงเวลาของอุปกรณ์ด้วย ผลสรุปคือการหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมนั้นช่วยให้ระบบสามารถเข้าสู่เสถียรได้ดีขึ้น
2016	Jagatheesan, Dey, Gaber, Hassanien and Kim	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความถี่โหนดสำหรับระบบหนึ่งพื้นที่ที่ใช้โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคเพื่อหาอัตราขยาย K_p และ K_r โดยให้โหนดมีการเปลี่ยนแปลง 1 % ผลที่ได้คือวิธีการที่นำเสนอสามารถทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพและลดการพุ่งเกิดได้ดีกว่าวิธีพื้นฐาน
2017	Pavani and Abhilash	นำเสนอการใช้ระบบควบคุมพีไอ พีไอดี และพีซีซีลอจิกเพื่อควบคุมความถี่โหนดของระบบไฟฟ้าที่ใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่น้อยที่สุด ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการควบคุมแบบพีซีซีลอจิกให้ผลลัพธ์ในการควบคุมดีกว่าทั้งในด้านความถี่ที่เปลี่ยนแปลงสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เสถียรภาพ

ตารางที่ 2.1 ปรีทัศน์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี (ค.ศ)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	Erol, Sezer and Ayasun	นำเสนอการผลกระทบและวิธีการกราฟพื้นฐาน เพื่อคำนวณหาอัตราขยาย K_p และ K_I สำหรับการควบคุมความถี่โหนดของระบบที่ใช้แหล่งพลังงานแบบผสมโดยพิจารณาค่าหนึ่งเวลาของการสื่อสารระหว่างข้อมูล จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสำหรับค่าอัตราขยายที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จะส่งผลต่อเสถียรภาพระบบเป็นอย่างมาก
2014	Janfeshan, Masoum and Deilami	นำเสนอการรักษาสมดุลระหว่างโหลดและพลังงานที่ผลิตได้เนื่องจาก เพราะถ้าหากไม่สมดุลกันจะทำให้ความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการใช้ระบบกักเก็บพลังงานเพื่อรักษาสมดุล และใช้การชาร์จหรือดิสชาร์จของพาหนะทางไฟฟ้าเพื่อช่วยลดผลกระทบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นไว้หลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงานและพาหนะทางไฟฟ้ารวมถึงการจัดการที่ดีแล้ว ระบบจะมีเสถียรภาพสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวอย่างเห็นได้ชัด
2015	Jain, Bhargava and Pal	นำเสนอข้อดีของการควบคุมความถี่ รวมถึงนำเสนอการควบคุมความถี่โหนดโดยใช้พีชชีลอจิก เนื่องจากการควบคุมความถี่แบบเดิมจะเป็นการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอซึ่งมีค่าอัตราขยายคงตัว ในงานวิจัยนี้จะใช้พีชชีลอจิกสำหรับปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมตามสถานการณ์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพีชชีสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดีทั้งด้านการพุ่งเกิน และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เสถียรภาพ
2017	Diggavi, Pinnapureddy and Rao	นำเสนอการควบคุมความถี่โหนดของระบบไฟฟ้าสามพื้นที่โดยใช้การควบคุมแบบพีชชีลอจิกเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโหนดจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบ การควบคุมแบบพีชชีลอจิกสามารถทำให้ระบบกลับเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วกว่า และสามารถลดค่าสูงสุดของการหน่วงลงได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอ

ตารางที่ 2.1 ปรีทัศน์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี (ค.ศ)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Kamble and Akolkar	นำเสนอการควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก เนื่องจากโดยส่วนมากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมักจะสร้างแยกจากระบบโรงข่ายไฟฟ้าหลักทำให้จำเป็นจะต้องมีระบบควบคุมที่น่าเชื่อถือ ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการควบคุมความถี่ไหลของระบบดังกล่าวโดยใช้การควบคุมพีชชีลอจิกผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้แนะนำเสนอสามารถรักษาความถี่ของระบบได้ดีขึ้น
2015	Chang, Chang and Miao	นำเสนอการคาดการณ์พลังงานลมในระยะสั้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับพีชชีลอจิก เพื่อคาดการณ์พลังงานลมที่มีความผันผวนในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่จะเข้าสู่ระบบอาจจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งผลการคาดการณ์ดังกล่าวมีความแม่นยำสูงและเชื่อถือได้
2015	Chen, Fellow and Chen	นำเสนอวิธีการคาดการณ์แบบใหม่โดยใช้พีชชีลอจิกและแนวโน้มความสัมพันธ์ของกลุ่มปัจจัยอนุพันธ์อันดับสองร่วมกับความน่าจะเป็น ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นผลที่น่าสนใจ ซึ่งมีค่าความแม่นยำสูงมาก
2016	Bajestani and Kamyad	นำเสนอการคาดการณ์โดยการพิจารณาขอบเขตที่เชิงเส้นและฟังก์ชันแบบถดถอย ซึ่งจะพิจารณาอยู่บนพื้นฐานของระบบประมวลผลแบบพีชชีลอจิก โดยจะนำไปเปรียบเทียบกับโมเดลการคาดการณ์ของได้หวนเพื่อความถูกต้อง ผลการจำลองที่ได้คือการคาดการณ์โดยใช้โมเดลที่ได้แนะนำไปนั้นมีความแม่นยำสูงที่สุด
2017	Zgurovsky and Zaychenko	นำเสนอการคาดการณ์ถึงความไม่แน่นอนของระบบไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและพีชชีลอจิกแบบมันดानी และชุกาโมโตะ ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการดังกล่าวมาคาดการณ์ความเสี่ยงที่จะเกิดในระบบไฟฟ้าของยูเครน พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีการแบบเดิม ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้โมเดลการคาดการณ์พีชชีลอจิกแบบมันดानीมีค่าความคาดเคลื่อนต่ำที่สุด

จากปริทัศน์และวรรณกรรม พบว่าแม้ว่าพลังงานหมุนเวียนจะมีข้อดีอยู่มาก แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่คือ ขาดเสถียรภาพเพราะแหล่งพลังงานหมุนเวียนนั้นไม่สามารถควบคุมได้ทำให้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง จะส่งผลกระทบต่อพลังงานทางไฟฟ้าที่ผลิตได้ด้วย จากการศึกษาของ Barba et al. (2012), Lui et al. (2013) และ Lui et al. (2015) พบว่าเมื่อติดตั้งแหล่งพลังงานหมุนเวียนเข้าไปในระบบไฟฟ้าแล้วจะทำให้รักษาสมดุลของระบบได้ยากขึ้น Lehyeh et al. (2018) พบว่าเป็นเมื่อพลังงานหมุนเวียนมีการลดอัตราการผลิตอย่างกระทันหันทำให้ความถี่ลดลงไปด้วย Yacar et al. (2018) พบว่าเมื่อมีการใช้พลังงานหมุนเวียนมากขึ้น ในระบบจะมีปัญหาด้านเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยที่กล่าวมาในย่อหน้านี้สามารถสรุปได้ว่า เมื่อในระบบมีการติดตั้งพลังงานหมุนเวียนเพิ่มเข้ามาจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเนื่องจากความผันผวนของระบบพลังงานหมุนเวียนขึ้น และจะส่งผลกระทบต่อความถี่ของระบบไฟฟ้า

สำหรับงานวิจัยด้านการควบคุมความถี่โหลดที่ผ่านมามีวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบพีไอ ระบบควบคุมแบบพีไอดี และพีซีลอลจิก ซึ่ง Sönmez et al. (2015) และ Jagatheesan et al. (2016) พบว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอที่มีค่าอัตราขยายที่เหมาะสมนั้นช่วยให้ระบบสามารถเข้าสู่เสถียรได้ดีขึ้น Pavani et al. (2017) นำเสนอการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลดของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีซีลอลจิก ซึ่งพบว่าตัวควบคุมพีซีลอลจิกให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีกว่า Erol et al. (2018) พบว่าเมื่อตัวควบคุมมีค่าอัตราขยายที่ไม่เหมาะสม จะส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เสถียรภาพของระบบอย่างเห็นได้ชัด จากการศึกษาปริทัศน์และวรรณกรรมเกี่ยวกับการควบคุมแบบพีไอ สรุปได้ว่าวิธีการควบคุมความถี่โหลดของระบบโดยใช้ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมความถี่โหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อมีค่าอัตราขยายที่เหมาะสม และเมื่อเทียบผลการควบคุมจากตัวควบคุมดังกล่าวกับตัวควบคุมแบบพีซีลอลจิกแล้ว พบว่าตัวควบคุมแบบพีซีลอลจิกมีประสิทธิภาพการควบคุมความถี่โหลดที่ดีกว่า

หลังจากที่ได้ศึกษาปริทัศน์และวรรณกรรมเกี่ยวกับการควบคุมความถี่โหลดแล้ว พบว่ามีหลายวิธีที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิธีที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมแบบพีซีลอลจิกซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วการควบคุมแบบพีซีลอลจิกที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าจะให้ประสิทธิภาพในการควบคุมดีกว่าทั้งในด้านการพุ่งเกิน และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เสถียรภาพ โดยได้มีงานวิจัยอีกหลายงานที่ได้นำเสนอการกับการควบคุมความถี่โหลดด้วยการควบคุมแบบพีซีลอลจิกดังนี้

Jain et al., (2015) และ Diggavi et al. (2017) นำเสนอผลการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลดโดยใช้ตัวควบคุมพีซีลอลจิก กับตัวควบคุมแบบพีไอซึ่งมีค่าอัตราขยายคงตัว พบว่าตัวควบคุมพีซีสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดีกว่าทั้งด้านการพุ่งเกิน และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เสถียรภาพ Kamble et al. (2017) พบว่าหลังจากใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอลจิกแล้วสามารถรักษา

ความถี่ของระบบ ได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม โดยการที่จะใช้วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้อินพุตและการตั้งกฎที่เหมาะสม ซึ่งสำหรับระบบที่ใช้พลังงานหมุนเวียนนั้นมีความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ผู้เขียนวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาการนำการคาดการณ์มาวิเคราะห์หาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นสำหรับนำมาเป็นอินพุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมุ่งเน้นไปที่การควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดที่มีพลังงานหมุนเวียนเป็นองค์ประกอบ โดยใช้การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงมาวิเคราะห์หาการควบคุมที่เหมาะสมซึ่งจะใช้ค่ากำลังไฟฟ้าที่การคาดการณ์ได้มาเป็นตัวแปรขาเข้าเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และเลือกโหมดการทำงานที่เหมาะสมของระบบในสถานะต่าง ๆ ซึ่งการคาดการณ์นั้นสามารถคาดการณ์ได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้ สนใจวิธีการคาดการณ์ด้วยโครงข่ายฟัซซีลอจิกแบบปรับตัว เนื่องจากเป็นวิธีการที่ยืดหยุ่นและมีสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุก ๆ ระบบ ซึ่งงานวิจัยที่ใช้ฟัซซีลอจิกสำหรับคาดการณ์มีดังนี้ Chang et al. (2015) พบว่าการใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟัซซีลอจิกสำหรับคาดการณ์กำลังไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพในการคาดการณ์สูงและเชื่อถือได้ Chang et al. (2015) พบว่าวิธีการคาดการณ์โดยใช้ฟัซซีลอจิกและแนวโน้มความสัมพันธ์ของกลุ่มปัจจัยอนุพันธ์อันดับสองร่วมกับความน่าจะเป็น มีความแม่นยำสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นต่อได้ Bajestani et al. (2016) พบว่าการคาดการณ์โดยการพิจารณาขอบเขตที่เชิงเส้นและฟังก์ชันแบบถดถอย ซึ่งจะพิจารณาอยู่บนพื้นฐานของระบบประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก มีความแม่นยำสูง Zgurovsky et al. (2017) พบว่าการคาดการณ์ถึงความไม่แน่นอนของระบบไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมการใช้โมเดลการคาดการณ์ฟัซซีลอจิกมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำลง

จากปริทัศน์วรรณกรรมทั้งหมดที่ได้ศึกษามา วิธีการควบคุมความถี่โหลดที่เหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาสำหรับควบคุมความถี่ของระบบไมโครกริดคือ วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ต่าง ๆ และใช้หลักการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละหน่วยของระบบไมโครกริด ที่ได้จากการคาดการณ์มาโดยจะใช้วิธีการคาดการณ์แบบระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว เนื่องจากเป็นวิธีการคาดการณ์ที่ยืดหยุ่นสามารถใช้ได้กับทุกระบบเพียงแต่มีข้อมูลในอดีตของระบบเพื่อป้อนให้กับระบบการเรียนรู้สำหรับสร้างโครงข่ายการวิเคราะห์ของระบบการคาดการณ์แบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว

2.7 เทคนิคการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า

เพื่อทราบรายละเอียดของสภาพอากาศที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอในการใช้พยากรณ์สภาพอากาศในอนาคตได้ประมาณ 3-4 ชั่วโมง ถือเป็น การคาดการณ์ในระยะสั้นมาก แต่การมีความสำคัญต่อผู้ควบคุมระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักให้สามารถบริหารจัดการระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและเพื่อรักษาความมั่นคงของโครงข่ายไฟฟ้าเป็นหลัก และการคาดการณ์ในปัจจุบันยังมีความสำคัญต่อผู้ควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำให้สามารถบริหารจัดการการผลิตไฟฟ้าของตนเองได้ รวมทั้งทำให้ทราบและเข้าใจถึงประสิทธิภาพและความสามารถของระบบผลิตไฟฟ้าของตนเองอย่างแท้จริงมากขึ้น โดยการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตได้จริงกับค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่น่าจะเป็น ซึ่งคำนวณโดยใช้ข้อมูลความเข้มแสงที่วัดได้ ณ ขณะนั้น โดยทั่วไปแล้วการคาดการณ์ปัจจุบันจะมีการดำเนินการทุก ๆ 10-15 นาที ระบบเก็บข้อมูลสภาพอากาศและระบบประมวลผลข้อมูลอัตโนมัติเป็นสิ่งสำหรับการดำเนินการคาดการณ์ปัจจุบัน โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) การคาดการณ์โหลด (2) การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม (3) การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การคาดการณ์ทั้งหมดจะใช้ระบบประสาทฟิวซีแบบปรับตัวสำหรับคาดการณ์ ซึ่งจะใช้ข้อมูลในอดีตมาป้อนให้ระบบประสาทฟิวซีแบบปรับตัวเรียนรู้และทำการสร้างแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์หาการคาดการณ์ที่แม่นยำ โดยตัวแปรต้นของแต่ละการคาดการณ์มีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 การคาดการณ์โหลด

พยากรณ์โหลด หรือ การพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้า คือ การคาดคะเนความต้องการไฟฟ้าในอนาคตว่าจะมีความต้องการใช้ไฟฟ้าในปริมาณเท่าใด เพื่อนำผลที่ได้จากการคาดคะเนไปวางแผนการผลิต และจัดหาไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ จากการศึกษา งานวิจัยเกี่ยวกับการคาดการณ์โหลด พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดเป็นอย่างมากคือ อุณหภูมิ โดยเขียนได้เป็นดังสมการที่ 2.41

$$P_{Load}(t+1) = f(P(t), temp) \quad (2.41)$$

เมื่อ P_{Load} คือ โหลด (kW)
 t คือ เวลา (s)
 $temp$ คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

2.7.2 การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม

ในการพยากรณ์พลังงานลมนั้น จะใช้แบบจำลองซึ่งสร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยความซับซ้อนของแบบจำลองนั้นมีตั้งแต่แบบจำลองซับซ้อนน้อยไปยังแบบจำลองซับซ้อนมาก ตัวอย่างเช่น Persistence Model ใช้หลักการที่ง่ายในการพยากรณ์ว่าพลังงานลมที่เกิดขึ้นในอนาคตเท่ากับพลังงานลมที่เกิดในปัจจุบัน เป็นต้น ในปัจจุบัน แบบจำลองพลังงานถูกจำลองขึ้นอย่างมากมายและซับซ้อน ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมคือ ความเร็วลม สามารถเขียนได้ดัง สมการที่ 2.42

$$P_{Wind}(t+1) = f(P_{Wind}(t), V_{wind}) \quad (2.42)$$

เมื่อ P_{Wind} คือ โหลด (kW)
 V_{Wind} คือ ความเร็วลม (m/s)

2.7.3 การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การคาดการณ์ระยะสั้น สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ในระยะเวลา 7 วันข้างหน้า โดยจะมีประโยชน์ต่อผู้ควบคุมระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก สามารถช่วยเป็นข้อมูลสนับสนุนในการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนและควบคุมระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาจะถูกประเมินอย่างละเอียดทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลาที่แตกต่างกัน นั้นหมายความว่าตัวแปรอุตุนิยมวิทยาและปรากฏการณ์ต่าง ๆ จะถูกมองจากมุมมองที่กว้างขึ้น ไม่เป็นข้อมูลในระดับท้องถิ่นเหมือนการคาดการณ์ในปัจจุบัน ทั้งนี้กระบวนการที่มักจะนำมาใช้ในการคาดการณ์ระยะสั้นคือ การใช้งานแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction: NWP) ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์คือ ความเข้มแสง ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.43

$$P_{Solar}(t+1) = f(P_{solar}(t), IRR) \quad (2.43)$$

เมื่อ P_{Solar} คือ โหลด (kW)
 IRR คือ ความเข้มแสง (kw/m^2)

2.8 เทคนิคการควบคุมความถี่ไหล

การควบคุมความถี่ไหลคือการปรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้สอดคล้องกับโหลดในระบบ เพื่อให้ความถี่ของระบบอยู่ในสมมูลตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมความถี่ไหลแบบที่ใช้กันทั่วไป และวิธีการที่นำเสนอคือการควบคุมความถี่ไหลโดยใช้การคาดการณ์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวิธีการควบคุมความถี่ไหลที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธีการควบคุมความถี่แบบพีไอ และพีไอดี โดยจะทำการออกแบบค่าอัตราขยาย ให้เหมาะสมกับระบบ แต่สำหรับระบบไมโครกริดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เนื่องจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมในระบบ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นมีความผันผวนสูง ผู้เขียนวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาหาวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมความถี่ไหลของระบบไมโครกริด โดยการนำมาคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ จากนั้นนำการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่คาดการณ์ได้มาวิเคราะห์หาการควบคุมที่เหมาะสม โดยขั้นตอนการคาดการณ์และการวิเคราะห์หาการควบคุมที่เหมาะสมนั้น จะใช้ฟัซซีลอจิกมาเป็นเครื่องมือในการดำเนินการ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถปรับปรุงตามความเหมาะสมกับสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ง่าย

2.8.1 ฟัซซีลอจิก

เป็นระบบด้านคอมพิวเตอร์ที่ทำงานโดยอาศัยฟัซซีลอจิกที่คิดค้นโดย L. A. Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งเป็นผลงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก ฟัซซีลอจิกเป็นตรรกะที่อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริงที่ว่า ทุกสิ่งบนโลกแห่งความเป็นจริงไม่ใช่มีเฉพาะสิ่งมีความแน่นอนเท่านั้น แต่มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน (uncertain) อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือ (fuzzy) ไม่ใช่ชัดเจน (exact) สิ่งที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไป เซตของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอนเช่นนี้เรียกว่าฟัซซีเซต (Logic and Fuzzy Systems, 2010)

จากแนวความคิดของ Zadeh เกี่ยวกับความไม่แน่นอนได้มีการขยายแนวคิดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ มากมายจนนับไม่ถ้วน ได้มีนักวิจัยได้คิดค้นทฤษฎีเสริมกับแนวคิดเดิมจนทำให้ฟัซซีเซตโดดเด่นในวงการคอมพิวเตอร์ ถึงแม้ว่าฟัซซีเซตจะนำเสนอจากคนอเมริกัน แต่ประเทศอเมริกาก็ไม่ได้นำไปประยุกต์ใช้อย่างจริงจังในช่วงต้น ๆ แต่ประเทศญี่ปุ่นถึงเห็นคุณค่าของศาสตร์ด้านนี้ได้เป็นผู้บุกเบิกฟัซซีเซตทางการค้า โดยได้นำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้ามากมาย เช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้า หม้อหุงข้าว และอื่น ๆ อีกมากมาย ในยุคปัจจุบันประเทศสหรัฐอเมริกาได้ให้ความสำคัญกับศาสตร์นี้มากขึ้น โดยได้มีการทุ่มงบประมาณให้การวิจัยมากขึ้น และฟัซซีลอจิกถูกนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ มากมาย ตัวอย่างเช่น ในโครงการอวกาศ NASA และโครงการด้านการทหาร

1) แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับฟัซซีลอจิก

ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายในได้ความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean Logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial True) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง กับเท็จ ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.14

	Boolean Logic			Fuzzy Logic	
IF	TRUE	FALSE	IF	TRUE	FALSE
AND/OR	TRUE	FALSE	AND/OR	TRUE	FALSE
THEN	TRUE	FALSE	THEN	TRUE	FALSE

รูปที่ 2.14 ตรรกะจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบฟัซซี (ฟัซซีลอจิก) (Petal, 2012)

ความเป็นฟัซซี มีชื่อเรียกว่า มัลติวาลานซ์ (Multivalance) ซึ่งมีค่าที่ความเป็นสมาชิกมากกว่า 2 ค่า และแตกต่างกับไบวาลานซ์ (Bivalance) ที่มีความเป็นสมาชิกเพียง 2 ค่า ฟัซซีเซต เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สื่อถึง “ความไม่แน่นอน” ที่ไม่ใช่เพียง 2 กรณี จะสร้างและกำหนดรูปแบบ ของลักษณะความไม่แน่นอนที่เป็นความคลุมเครือ ความไม่ตายตัว รวมถึงความขาดข้อมูลบางส่วน โดยทฤษฎีของฟัซซีเซตจะใช้ลักษณะความหมายตัวแปร มากกว่าปริมาณของตัวแปร จากการศึกษาปัญหาทั่ว ๆ ไปจะแสดงถึงรูปแบบลักษณะการกระจายของปัญหา รูปที่ 2.13 เป็นการแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการตัดสินใจของปัญหาทั้งหมดมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นสิ่งที่แน่นอน ที่เหลือคือสิ่งที่ไม่แน่นอนซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอนที่มีลักษณะแบบสุ่ม และความไม่แน่นอนที่มีลักษณะเป็นฟัซซี หรือคลุมเครือ ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 40 เพราะปัญหาส่วนมากเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของมนุษย์ซึ่งจะตัดสินใจตามพื้นฐานความคิดของตนเป็นหลัก

2) รูปแบบกฎฟัซซี

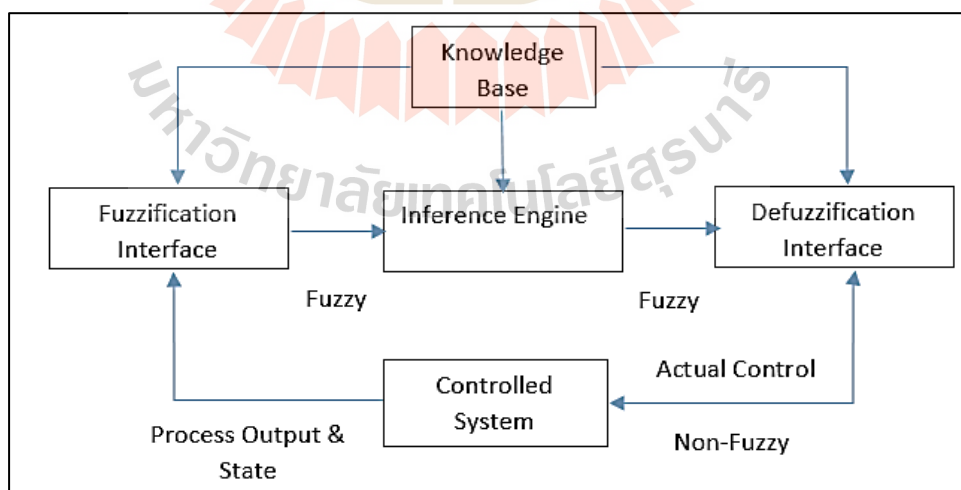
ในระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มีหลายวิธีการที่จะแสดงองค์ความรู้ของมนุษย์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ตรรกะ (Logic) เฟรม (Frames) โครงข่าย

ความหมาย (Semantic Nets) ภาววิทยา (Ontology) และกฎ (Rules) ซึ่งแบบหลังสุดเป็นวิธีหนึ่งที่น่าิยมใช้ในระบบฟัซซี

ในระบบฟัซซีองค์ความรู้สามารถแสดงในรูปประโยค ถ้า ข้อตั้ง (ข้อนำ) ดังนั้น ข้อยุติ (ข้อตาม) ข้อความข้างต้นเป็นที่รู้จักกันดีในนาม “รูปแบบฐานกฎถ้า-ดังนั้น” (IF-THEN Rule-Based Form) หรือ รูปแบบนิรนัย (Deductive Form) ในรูปแบบการแสดงอนุมาน หากทราบความจริง (ข้อตั้ง ข้อสมมุติฐาน หรือข้อนำ) แล้วสามารถอนุมาน หรือหาข้อสรุปความจริงอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่าข้อยุติหรือข้อตาม การแสดงรูปแบบองค์ความรู้นี้ เรียกว่า องค์ความรู้ตื้น (Shallow Knowledge) ซึ่งค่อนข้างมีความเหมาะสมในบริบทของภาษา เนื่องจากการแสดงประสบการณ์ของมนุษย์และองค์ความรู้เชิงศึกษาสำนัก (Heuristics) ในรูปแบบประโยคภาษามนุษย์ที่ใช้ในการสื่อสารทั่วไป แต่ไม่เป็นรูปแบบองค์ความรู้ที่ลึกล้ำ แบบที่เป็นการรู้เอง เป็นโครงสร้าง เป็นฟังก์ชัน หรือเป็นพฤติกรรมของวัตถุรอบ ๆ ตัวเรา อย่างที่เรียกว่า อุปนัย (Inductive)

3) โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบด้วย การแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี (Fuzzification) เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุต (Inference engine) เป็นการหาฟัซซีเอาต์พุตโดยการโดยกฎการควบคุมที่สร้างขึ้น (Knowledge Base) เปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุต (Defuzzification) ดังรูปที่ 2.15

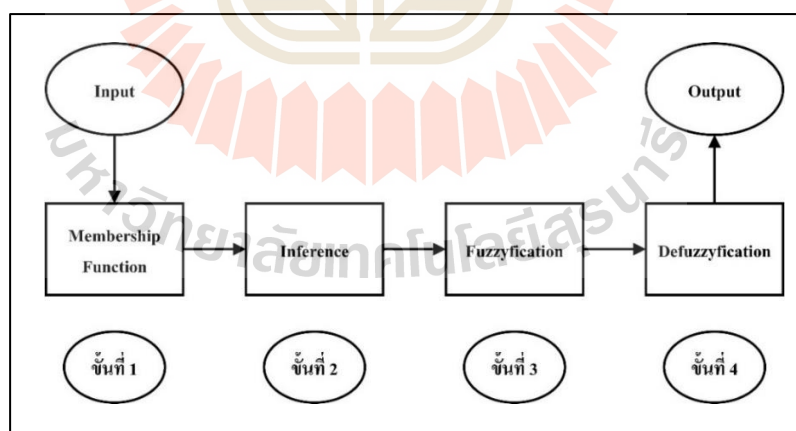


รูปที่ 2.15 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี (Sheikh, 2015)

ส่วนที่แปลงการอินพุตทั่วไปเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี (Fuzzification) หรือในรูปแบบเซตฟัซซีหรือเรียกว่าเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic Variable) ฐานความรู้ (Knowledge base) เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุมประกอบ 2 ส่วนคือ ฐานกฎ และฐานข้อมูล ฐานกฎ สำหรับกำหนดวิธีการควบคุม ซึ่งถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา (Linguistic rule) ฐานข้อมูล เป็นการจัดเตรียมส่วนที่จำเป็นเพื่อที่จะใช้ในการกำหนดกฎการควบคุม และการจัดการข้อมูลของตรรกศาสตร์ฟัซซีเครื่องอนุมาน หรือการตีความ (Inference Engine) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริงและกฎ เพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งการกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบส่วนที่แปลงการเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Defuzzification) เป็นการทำการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบฟัซซีให้เป็นค่าที่สรุปผลหรือค่าการควบคุมระบบ

4) ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิกมีรูปแบบการทำงานเป็น 4 ส่วนประกอบด้วย ขั้นที่ 1 การแปลงการอินพุต ขั้นที่ 2 การสร้างความสัมพันธ์ ขั้นตอนที่ 3 การหาฟัซซีเอาต์พุต เปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุต และ ขั้นตอนที่ 4 การเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุต



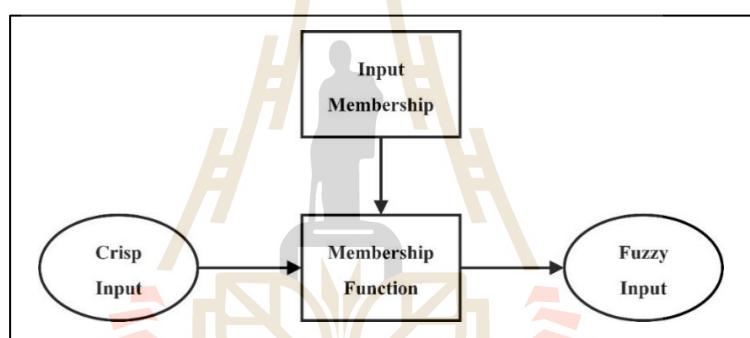
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับ

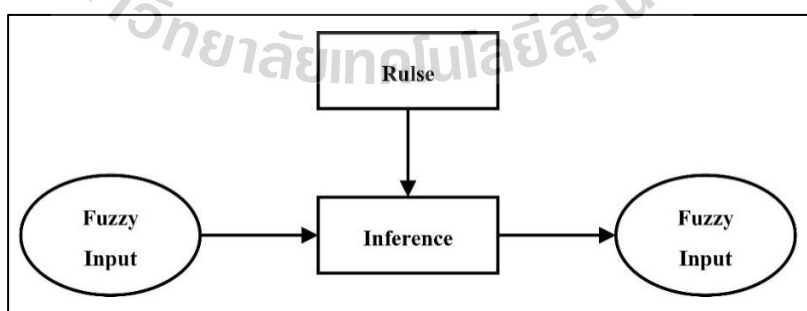
คุณลักษณะของแต่ละอินพุต และความสำคัญต่อเอาต์พุตที่น่าสนใจโดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษาสามัญ เพื่อให้เป็นพีชชการอินพุตดังแสดงในรูปที่ 2.17

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจจะมีการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If) และ (And) หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นากฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม รูปรูปที่ 2.18

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาพีชชเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับพีชชอินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผลดังรูปที่ 2.19



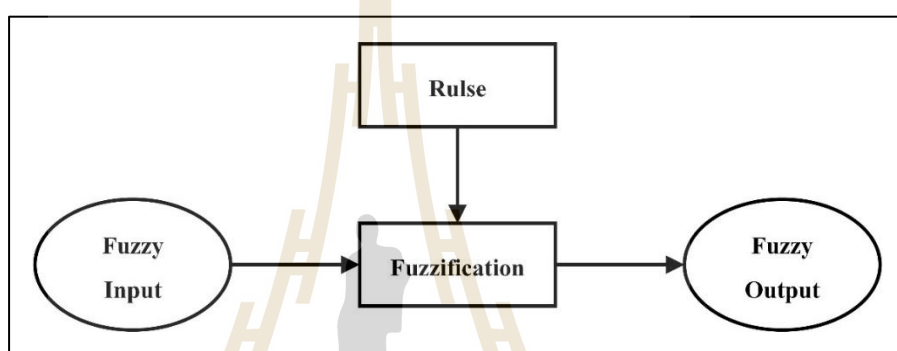
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนที่ 1 การแปลงอินพุตสำหรับระบบฟuzzy



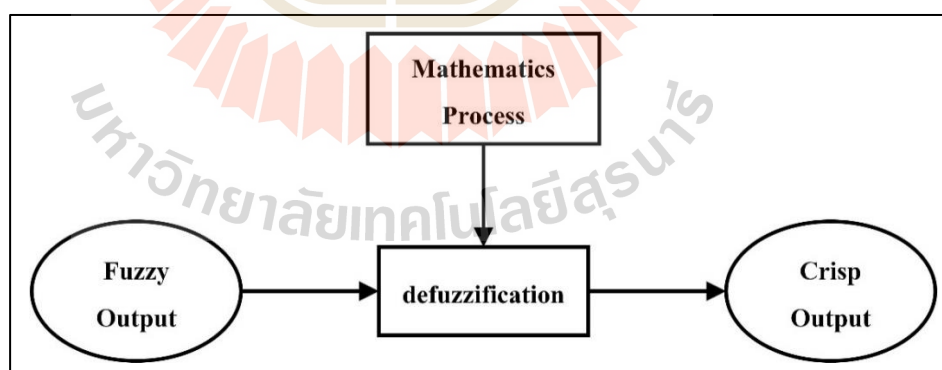
รูปที่ 2.18 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกฎของระบบ

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาฟัซซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซีอินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผลดังรูปที่ 2.19

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซี โดยจะเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุตตามรูปที่ 2.20 และด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมระบบในสถานการณ์นั้น ๆ



รูปที่ 2.19 ขั้นตอนที่ 3 การหาฟัซซีเอาต์พุต



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนที่ 4 การแปลงค่าฟัซซีให้กลับเป็นค่าปกติ

วิธีการแปลงค่าฟัซซีให้กลับเป็นค่าปกติ (Defuzzification) วิธีการที่เป็นเทคนิคการเลือกค่าสูงสุดหรือสรุปหาเหตุผลจากหลาย ๆ เซตมาเพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลาย ๆ แบบ และเลือกกระทำเพียงรูปแบบเดียว

วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์กลางถ่วงโดยรวมจะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการที่ 2.44

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (2.44)$$

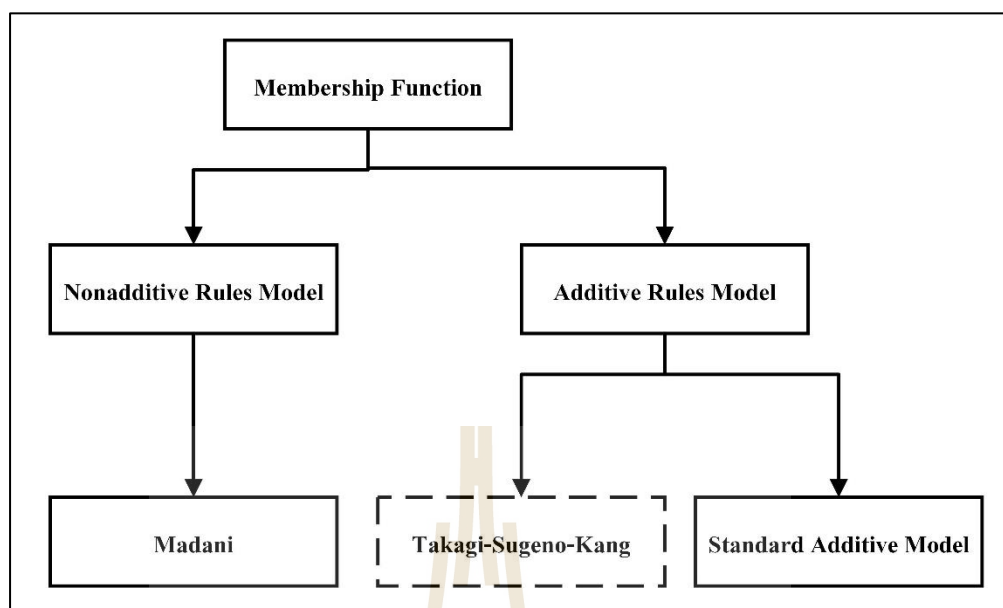
เมื่อ COG คือ ค่าของจุดศูนย์กลางถ่วง
 N คือ ค่าตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ i
 α_i คือ ค่าฟังก์ชันของเอาต์พุตในเซตฟังก์ชันตำแหน่งที่ i
 w_i คือ พนที่ได้โคงของเซตฟังก์ชันตำแหน่งที่ i

4) ชนิดของระบบกฎฟuzzy

ในการประมาณค่าฟังก์ชัน (Function Approximation) ระบบกฎฟuzzyที่ใช้มี 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ (1) รูปแบบ Madani (2) รูปแบบ Takagi-Sugeno-Kang และ (3) รูปแบบ Standard Additive Model รูปแบบ Madani คือการรวมผลการอนุมาน (Inference) ของกฎ โดยวิธีการซ้อนทับ (superimposition) จากกฎหลาย ๆ ข้อ ซึ่งไม่เป็นแบบบวกกัน จึงเรียกระบบแบบนี้ว่าเป็น nonadditive rule model แต่สำหรับ Takagi-Sugeno-Kang และ Standard Additive Model มีการอนุมานแบบรวมค่าน้ำหนัก จากหลาย ๆ กฎ เพื่อรวมเป็นข้อสรุปสุดท้าย จึงเรียกระบบแบบนี้ว่า additive rule model การจัดกลุ่มของระบบกฎแบบฟuzzyแสดงในรูปที่ 2.20

5) สรุปกระบวนการหาเหตุผลแบบฟuzzyลอจิก

ทฤษฎีการหาผลลัพธ์จากการประมาณ ได้ถูกนำเสนอโดย Zadeh ในปี ค.ศ. 1979 โดยทฤษฎีนี้จะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการให้เหตุผลในกรณีที่สภาพแวดล้อมของปัญหาที่มีความคลุมเครือ ซึ่งปัจจัยหลักของทฤษฎีนี้คือ การจัดองค์ประกอบของประโยคจากการใช้เซตฟังก์ชันเป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาเหตุผล โดยจัดข้อความให้อยู่ในรูปของประพจน์ และใช้ตัวเชื่อม 4 ตัว ได้แก่ “นิเสธ”, “และ”, “หรือ” และ “ข้อความ” เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละประพจน์



รูปที่ 2.21 การจำแนกระบบกฎฟัซซี

จุดเด่นของการให้เหตุผลแบบฟัซซีคือสามารถให้เหตุผลเชิงอนุมานได้ แม้ว่าเงื่อนไขของการต่อความจะสอดคล้องกันเพียงบางส่วน รูปแบบของกฎการหาเหตุผลแบบฟัซซีจะถูกแสดงในรูปแบบ ข้อนำ-ข้อตาม หรือรูปแบบถ้าแล้ว ซึ่งขั้นตอนในการออกแบบและพัฒนาระบบฟัซซีลอจิกสำหรับงานต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้ 1) กำหนดรายละเอียดของปัญหา ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 2) พิจารณาตัวแปรในระบบและทำการกำหนดตัวแปลภาษา เช่น ค่าความผิดพลาด, อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด เป็นต้น เมื่อตัวแปรเพิ่มขึ้น การกำหนดเงื่อนไขจะยิ่งมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น 3) ออกแบบและกำหนดค่าตัวแปรภาษาสำหรับระบบฟัซซี เช่น ค่าความเป็นบวก (P), ศูนย์ (Z), ลบ (N) ของตัวแปรค่าความผิดพลาดต่าง ๆ ยิ่งค่าที่กำหนดมีความละเอียด จะทำให้ระบบทำงานได้ราบเรียบยิ่งขึ้น 4) การออกแบบกฎฟัซซีเป็นส่วนที่สำคัญต่อการทำงานของระบบ ซึ่งการกำหนดในส่วนนี้ผู้กำหนดจำเป็นจะต้องรู้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตัวนั้น ๆ แล้ว จะส่งผลอย่างไรต่อระบบ 5) ทดสอบ ประเมินผล และปรับปรุงแก้ไขระบบฟัซซี ซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง เพียงปรับค่าที่ตัวแปรหรือกฎตามความเหมาะสม ทำให้ฟัซซีเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถลดความยุ่งยากในการทำงานและการปรับปรุงแก้ไขในการทำงานจริง

2.9 สรุป

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าและการควบคุมความถี่โวลต์นั้นพบว่า ถ้าหากมีการเพิ่มระบบพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้าสู่ระบบจะทำให้ระบบมีความเสี่ยงที่จะถูกรบกวนจากความผันผวนจากระบบพลังงานหมุนเวียนนั้น ทำให้การควบคุมความถี่โวลต์นั้นมีความสำคัญอย่างมากเพื่อที่จะรักษาให้ระบบมีเสถียรภาพอยู่เสมอ และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านการควบคุมความถี่โวลต์พบว่า ได้มีการนำเสนอหลายวิธี ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป แต่วิธีที่สามารถนำไปประยุกต์กับวิธีการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมความถี่โวลต์ของระบบไฟฟ้านั้นคือ การควบคุมแบบพีชชีลอจิก เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถปรับแต่งได้ง่าย และให้ประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี และในระบบที่ใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานนั้น ถ้าหากสามารถคาดการณ์ได้ว่าจะผลิตพลังงานได้เท่าใดในแต่ละช่วงจะทำให้ทราบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงและสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงได้ดี ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมความถี่โวลต์โดยการใช้การคาดการณ์มาประยุกต์ช่วย



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์และปรับปรุงการควบคุมความถี่โวลต์ของระบบไมโครกริดโดยใช้การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าโดยร่วมกับตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจากนั้นนำผลการควบคุมที่ได้หลังจากเกิดการรบกวนมาเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอ และการควบคุมพีไอดี ซึ่งขนาดของระบบได้กำหนดขึ้นดังแสดงในภาพผนวก ก. การจำลองระบบได้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ และทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมความถี่โวลต์ โดยนำค่าความถี่โวลต์ที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบหลังจากถูกรบกวนของแต่ละวิธีนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกัน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิทยานิพนธ์

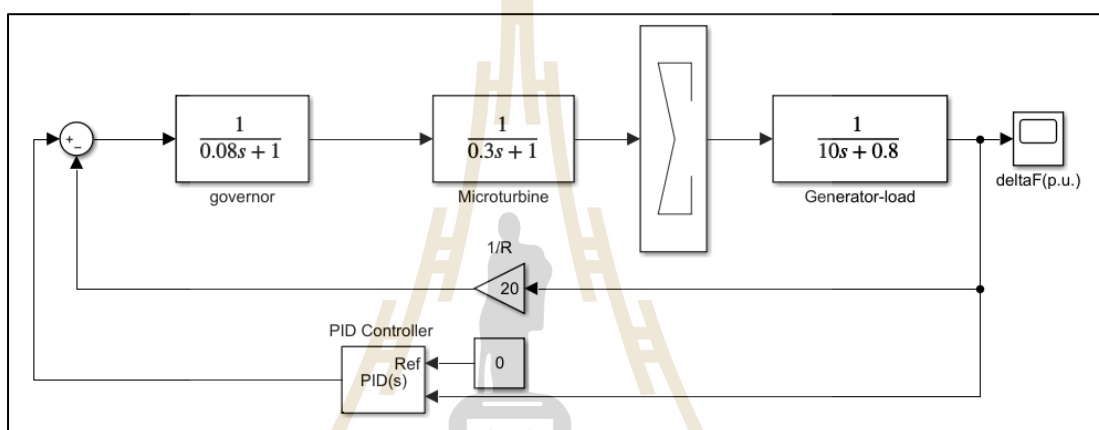
วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นเครื่องมือในการจำลองและวิเคราะห์การควบคุมความถี่โวลต์ของระบบไฟฟ้าไมโครกริดที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนมีขั้นตอนดังนี้ (1) ออกแบบระบบทดสอบ กำหนดข้อมูลพารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โวลต์ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ประกอบไปด้วยพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ (2) ออกแบบตัวควบคุมความถี่แบบ พีไอ และพีไอดี (3) ออกแบบระบบการคาดการณ์และระบบการควบคุมโดยใช้ระบบระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) (4) บันทึกค่าที่ได้จากการจำลองระบบทั้งในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม กรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ พีไอดี และกรณีที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์ (5) เปรียบเทียบผลการผลการควบคุมใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวและค่าลูกลิ้นสูงสุดทั้ง 3 วิธีการ

3.2 ออกแบบระบบทดสอบ

ระบบทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ กังหันลม เซลล์แสงอาทิตย์ และโวลต์ อุปกรณ์ที่จำเป็นจะถูกนำไปในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน เนื่องจากในงานวิจัยนี้พิจารณาในรูปแบบการตอบสนองเชิง ในหัวข้อที่ 3.2 นี้จะนำเสนอการออกแบบระบบทดสอบทั้งหมดเพื่อนำไปจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink แต่ละระบบมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ระบบโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

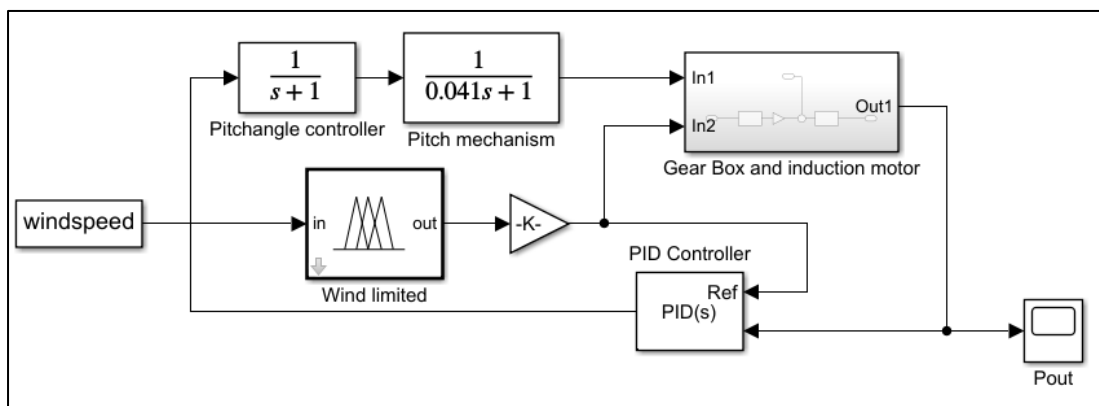
โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำประกอบด้วย กังหัน ตัวควบคุมความเร็วกังหัน ตัวควบคุมระบบบล็อกระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด ดังที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าแต่ละบล็อกจะมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงาน โดยพารามิเตอร์ของระบบโรงไฟฟ้ากังหันน้ำจะถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของการควบคุมความถี่โหลดของโรงไฟฟ้าแบบสามพื้นที่ (Diggavi, 2017) สามารถนำมาสร้างบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.1 และการออกแบบตัวควบคุมระบบโรงไฟฟ้ากังหันน้ำจะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 3.3.2



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมโปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

3.2.2 ระบบกังหันลม

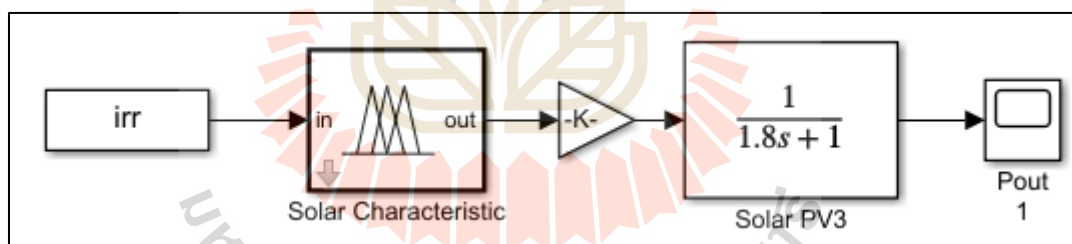
ระบบกังหันลมประกอบด้วย ชุดควบคุมการปรับมุมใบพัด (Pitchangle controller) หัวขับกังหัน (Pitch mechanism) ชุดเกียร์ (Gearbox mechanism) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Induction generator) และตัวควบคุม ดังที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าแต่ละบล็อกจะมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงาน โดยพารามิเตอร์ของระบบกังหันลมจะถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้าแบบหลายพื้นที่ที่มีกังหันลม (Koley, 2017) สามารถนำมาสร้างบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.2 และการออกแบบตัวควบคุมระบบกังหันลมจะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 3.3.3



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมโปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบกึ่งอัตโนมัติ

3.2.3 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะพิจารณาเพียงฟังก์ชันถ่ายโอนของแผนเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเท่านั้น จากรูปที่ 2.12 สามารถนำมาสร้างบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.3 งานวิจัยของการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้าแบบหลายพื้นที่ที่มีเซลล์แสงอาทิตย์ (Koley, 2017)



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรม โปรแกรม MATLAB/Simulink ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

3.3 ออกแบบตัวควบคุมระบบไฟฟ้าแบบพีไอ และพีไอดี

ตัวควบคุมแบบ พีไอ และ พีไอดี เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ พีไอดี ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ

3.3.1 พื้นฐานระบบควบคุมพีไอ และพีไอดี

วิธีคำนวณของ พีไอดี ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน(P), ปริพันธ์(I) และอนุพันธ์(D) ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไป, และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการโดยการปรับค่าคงที่ใน พีไอดี ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (oscillation) วิธี พีไอดี ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอนการประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ

ในงานวิจัยหลาย ๆ งานที่ผ่านมา มีการใช้ตัวควบคุมความถี่ไหลแบบ พีไอ และพีไอดี ควบคุมความถี่ไหลของระบบกันอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการควบคุมความถี่ด้วยตัวควบคุมดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมกับวิธีการที่ได้นำเสนอซึ่งสมการสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุม พีไอ และ พีไอดี สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ตามลำดับ

$$G_c(s) = P_{out} + I_{out} \quad (3.1)$$

$$G_c(s) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (3.2)$$

P_{out} , I_{out} และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม พีไอดี จากแต่ละเทอมซึ่งนิยามตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) สัดส่วน (P)

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) เทอมของสัดส่วนจะเขียนได้ดังสมการที่ 3.3

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (3.3)$$

เมื่อ P_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
 K_p คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด เวลา t

ผลอัตรายายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตรายายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย

2) ปริพันธ์ (I)

ผลจากเทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก reset) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตรายายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตรายายปริพันธ์ (K_I), เทอมของปริพันธ์จะเขียนได้ดังสมการที่ 3.4

$$I_{out} = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (3.4)$$

เมื่อ I_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
 K_I คือ อัตรายายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น)

3) อนุพันธ์ (D)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุก ๆ เวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตรายายอนุพันธ์ (K_D) ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์จะขึ้นกับอัตรายายอนุพันธ์, เทอมของอนุพันธ์จะเขียนได้ดังสมการที่ 3.5

$$D_{out} = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.5)$$

เมื่อ D_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

K_D คือ อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจาเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ ผลสรุปการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองจะแสดงในตารางที่ 3.1

โดยการออกแบบ ค่า K_p , K_I และ K_D จะใช้เครื่องมือ PID-Tuner ในโปรแกรม MATLAB สำหรับออกแบบ ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม พีไอ และพีไอดี มีดังนี้(1) สร้างแบบจำลองของระบบจากข้อมูลการทดสอบอินพุต เอาต์พุต (2) การสร้างแบบจำลองตัวควบคุม พีไอดี ใน MATLAB /Simulink โดยใช้บล็อกตัวควบคุม พีไอดี (3) ปรับจูนคอนโทรลเลอร์ พีไอดี โดยอัตโนมัติรับและปรับผลการตอบสนองของระบบที่ได้ออกแบบไว้ (4) ปรับจูนคอนโทรลเลอร์หลายตัวในโหมดแบทช์ (5) การปรับแต่งคอนโทรลเลอร์ พีไอดี อินพุตเอาต์พุตโดยรวมถึงโครงสร้างของตัวควบคุม พีไอดี หลายอินพุต

ตัวควบคุมแบบ พีไอ และ พีไอดี เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ พีไอดี ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ

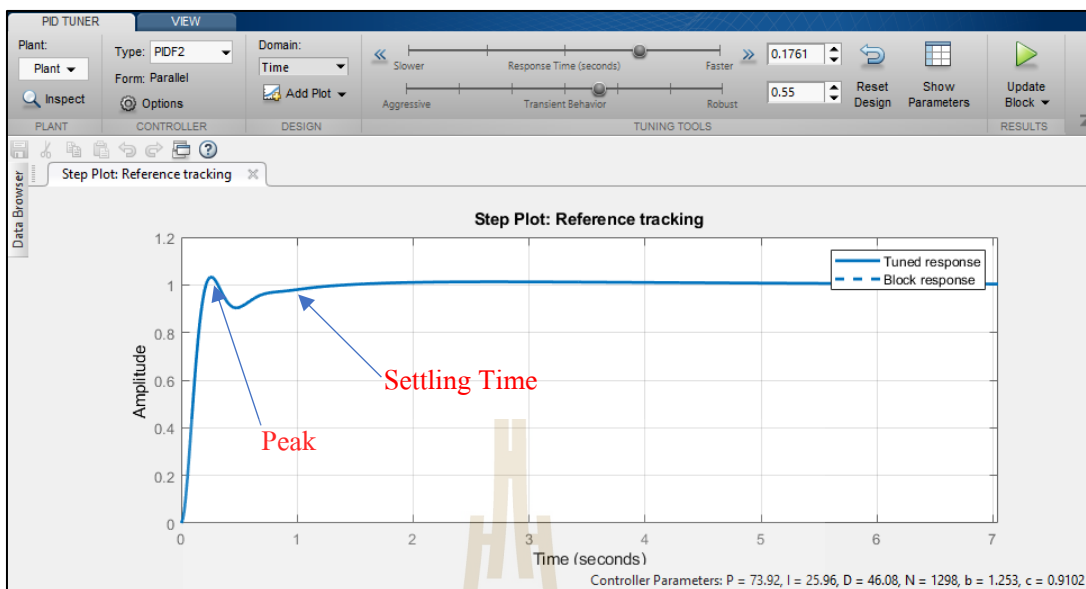
วิธีคำนวณของ พีไอดี ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน(P), ปริพันธ์(I) และ อนุพันธ์(D) ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไป, และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการโดยการปรับค่าคงที่ใน พีไอดี ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (oscillation) วิธี พีไอดี ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอนการประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ

ตารางที่ 3.1 ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอย่างอิสระ

ตัวแปร	ช่วงเวลายาวขึ้น	พุ่งเกิน	เวลาเข้าสู่สมดุล	ความผิดพลาดสถานะคงตัว	เสถียรภาพ
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ	ลด
K_d	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ไม่มีผล	ดีขึ้นถ้ามีค่าไม่มากเกินไป

3.3.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ และพีไอดีควบคุมโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอและพีไอดีเพื่อนำมาเปรียบเทียบ จึงได้ใช้ เครื่องมือ PID-Tuner ใน โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับออกแบบ เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับสำหรับนำมาหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในงานวิจัยของ Yadav ที่ได้ทำวิจัยไว้ในปี 2018 คือ การหาค่าอัตราขยาย K_p , K_i และ K_d ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมมอเตอร์กระแสตรง โดยขั้นตอนการใช้เครื่องมือ PID-Tuner จะเป็นบล็อกสำเร็จรูปสำหรับออกแบบอัตราขยาย K_p , K_i และ K_d เพื่อให้ได้ ผลการควบคุมตามต้องการผลการควบคุมที่ต้องพิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย ช่วงเวลายาวขึ้น (Rise time) เวลาเข้าสู่เสถียรภาพ (Settling time) และค่าที่เปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak) โดยการใช้คู่มือดังกล่าวจะมีการปรับเพียงสองจุดคือ เวลาในการตอบสนอง (Response time) และ พฤติกรรมชั่วขณะ (Transient behavior) ของตัวควบคุมพีไอดีในรูปที่ 3.4 และ การของตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 3.6 โดยขั้นแรกทำการปรับเวลาการตอบสนองให้ได้ค่าเวลายาวขึ้นและค่าเปลี่ยนแปลงให้มีค่าต่ำที่สุดโดยสามารถดูได้ที่ Show parameter ดังในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.7 ขั้นที่สองคือปรับค่าพฤติกรรมชั่วขณะ ให้มีเวลายาวขึ้นและเวลาเข้าสู่เสถียรภาพต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.4 จะแสดงกราฟผลการตอบสนองของระบบที่ถูกจำลองให้เกิดการรบกวนขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาอัตราขยายที่เหมาะสม ถ้าหากก่อนการปรับเทียบจะมีสองเส้นกราฟเปรียบเทียบกันระหว่าง ผลการตอบสนองก่อนปรับ (Block response) และผลการตอบสนองหลังปรับ (Tuned response) แต่ในกรณีนี้ผู้แต่งได้ทำการปรับไปใช้ (Update block) แล้ว จึงทำให้กราฟผลการตอบสนองก่อนปรับ (Block response) หลังจากปรับค่าอัตราขยายเสร็จแล้ว จะได้ค่าอัตราขยายที่เหมาะสม

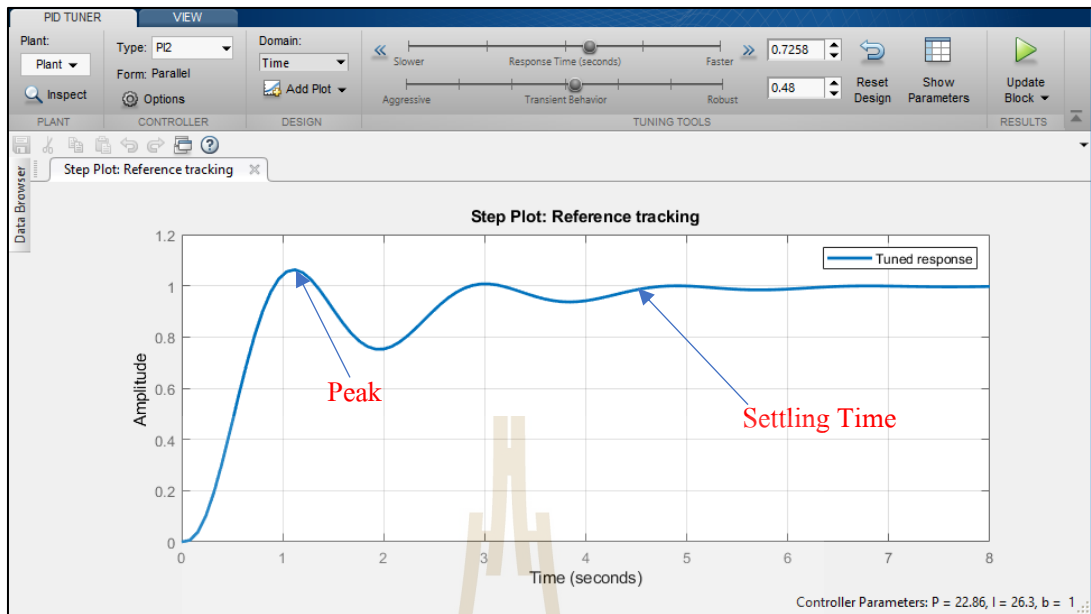


รูปที่ 3.4 การปรับเวลาในการตอบสนอง และพฤติกรรมชั่วขณะ ของตัวควบคุมพีไอดีของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	73.9171	73.9171
I	25.9615	25.9615
D	46.0793	46.0793
N	1297.8926	1297.8926
b	1.2528	1.2528
c	0.91015	0.91015
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.138 seconds	0.138 seconds
Settling time	0.999 seconds	0.999 seconds
Overshoot	3.29 %	3.29 %
Peak	1.03	1.03
Gain margin	39.8 dB @ 136 rad/s	39.8 dB @ 136 rad/s
Phase margin	55 deg @ 11.4 rad/s	55 deg @ 11.4 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

รูปที่ 3.5 ค่าอัตราขยายและผลการตอบสนอง ของตัวควบคุมพีไอดีของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

ผลการตอบสนองของกราฟในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย เวลาขาขึ้น (Rise time) เวลาเข้าสู่เสถียรภาพ (Settling time) และค่าพุ่งเกินสูงสุด (Peak) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.7 ตามลำดับ โดยจะแสดงค่าเปรียบเทียบระหว่าง ก่อนปรับ (Block) และหลังปรับ (Tuned)



รูปที่ 3.6 การปรับเวลาในการตอบสนอง และพฤติกรรมชั่วขณะ ของตัวควบคุมพีไอของ โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

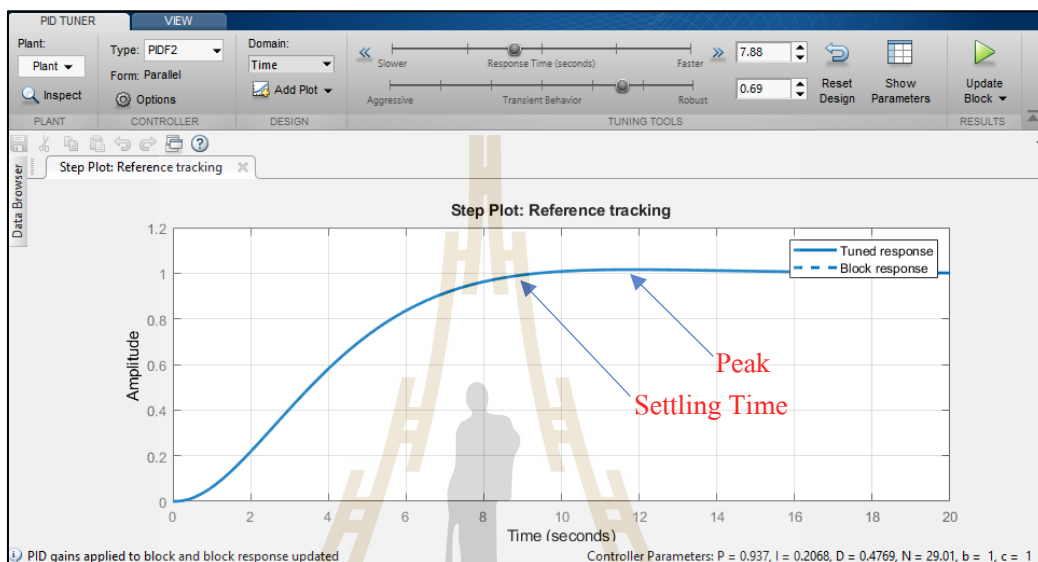
Controller Parameters	
	Tuned
P	22.8585
I	26.2978
D	n/a
N	n/a
b	1
c	n/a

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.566 seconds
Settling time	4.45 seconds
Overshoot	6.13 %
Peak	1.06
Gain margin	11.6 dB @ 5.31 rad/s
Phase margin	48 deg @ 2.76 rad/s
Closed-loop stability	Stable

รูปที่ 3.7 ค่าอัตราขยายและผลการตอบสนอง ของตัวควบคุมพีไอของ โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ

3.3.3 การออกแบบตัวควบคุมระบบไฟฟ้าแบบพีไอดีควบคุมกึ่งหั่นลม

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวควบคุมพีไอดีควบคุมกึ่งหั่นลม เนื่องจากงานวิจัยที่ได้ศึกษามามีการใช้ตัวควบคุมพีไอดีควบคุมกึ่งหั่นแล้วได้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี (Qi, 2010) โดยมีขั้นตอนการออกแบบเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2



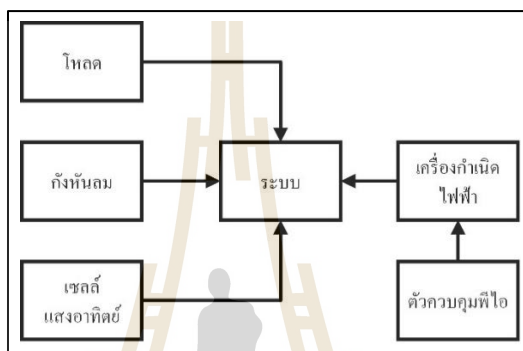
รูปที่ 3.8 การปรับเวลาในการตอบสนอง และพฤติกรรมชั่วขณะ ของตัวควบคุมพีไอของกึ่งหั่นลม

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.93704	0.93704
I	0.20683	0.20683
D	0.47694	0.47694
N	29.0052	29.0052
b	1	1
c	1	1

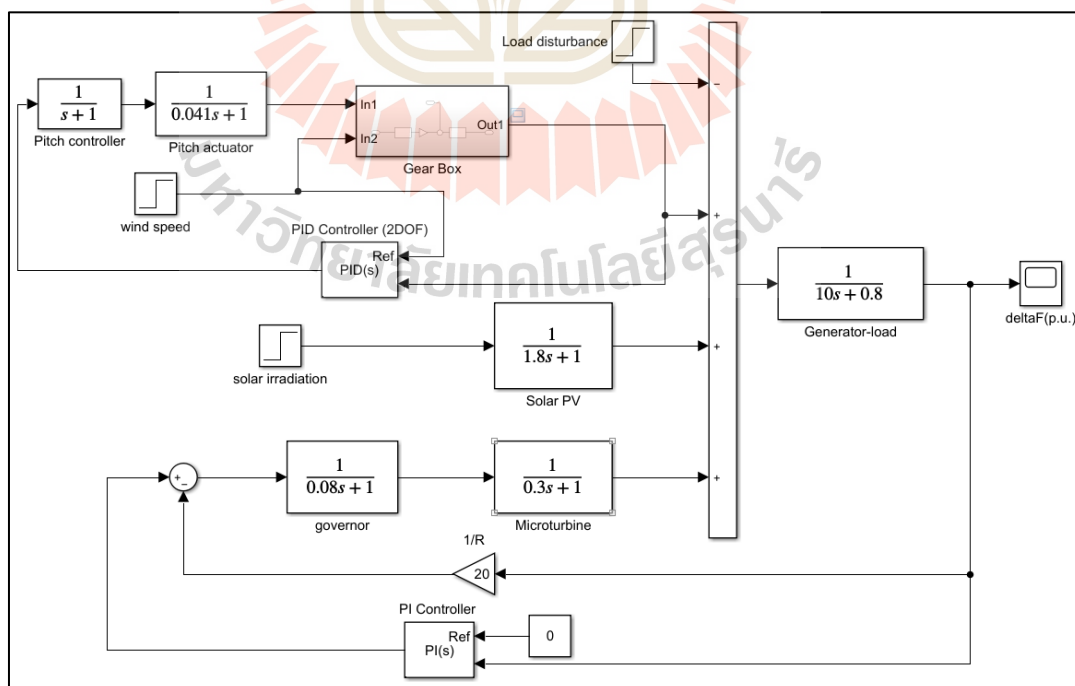
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	5.51 seconds	5.51 seconds
Settling time	8.52 seconds	8.52 seconds
Overshoot	1.56 %	1.56 %
Peak	1.02	1.02
Gain margin	31.5 dB @ 2.51 rad/s	31.5 dB @ 2.51 rad/s
Phase margin	69 deg @ 0.254 rad/s	69 deg @ 0.254 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

รูปที่ 3.9 ค่าอัตราขยายและผลการตอบสนอง ของตัวควบคุมพีไอของกึ่งหั่นลม

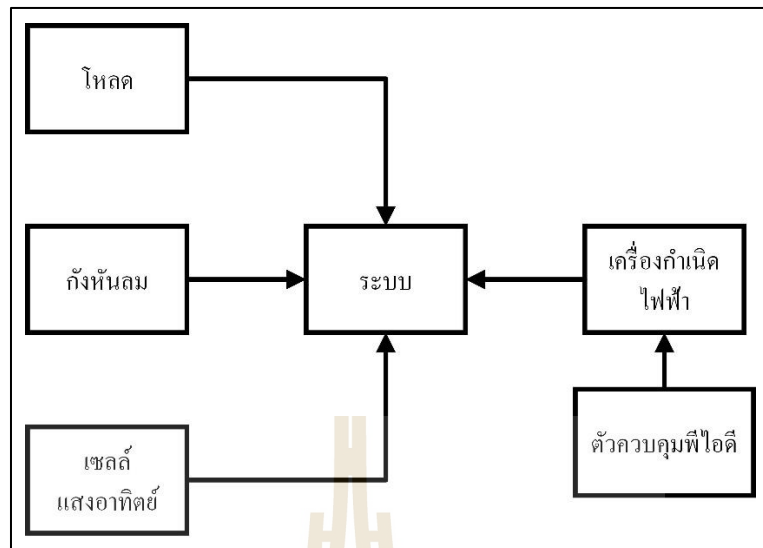
หลังจากที่ได้ออกแบบระบบแต่ละส่วนเรียบร้อยแล้ว นำมารวมกันจะได้เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ ประกอบด้วย โหลด กังหันลม เซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด และตัวควบคุมพีไอ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และบล็อกไดอะแกรมในโปรแกรม MATLAB/Simulinkแสดงในรูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีซึ่งแตกต่างจากระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอเพียงในส่วนของตัวควบคุมที่เปลี่ยนเป็นตัวควบคุมพีไอดีแสดงในรูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมในโปรแกรม MATLAB/Simulink 3.13 ตามลำดับ



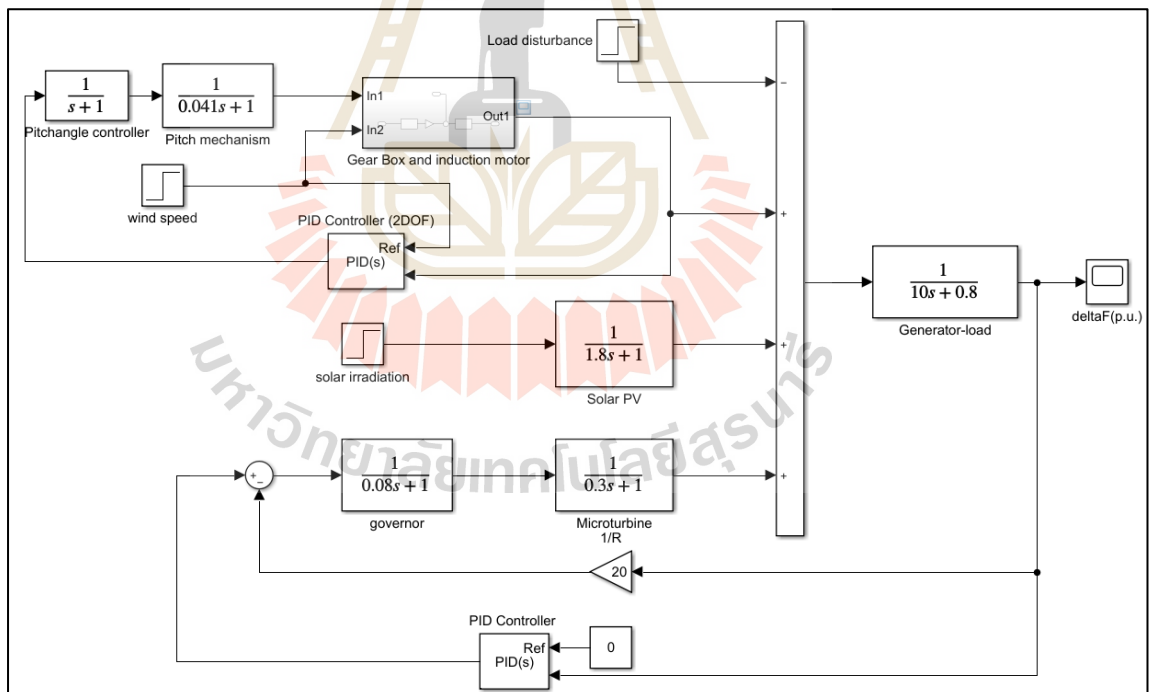
รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมใน โปรแกรม MATLAB/Simulinkของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 3.12 ไคอะแกรมของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 3.13 ไคอะแกรมใน โปรแกรม MATLAB/Simulink ของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ

3.4 ออกแบบระบบควบคุมระบบไฟฟ้าโดยใช้การคาดการณ์

จะใช้การควบคุมความถี่โหลดแบบฟัซซีลอจิก ร่วมกับการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าซึ่งการออกแบบนี้จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ การออกแบบระบบคาดการณ์และการออกแบบระบบควบคุมฟัซซีดังนี้

3.4.1 การออกแบบระบบการคาดการณ์ด้วยระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว

เนื่องจากในงานวิจัยนี้การคาดการณ์โดยใช้ระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว ดังนั้นในหัวข้อ 3.4.1 จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ทฤษฎีของระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัวและการออกแบบระบบคาดการณ์กำลังไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

1) ระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว

ทฤษฎีระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว (Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems) นั้นเป็นการใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) มาช่วยสร้างกฎเกณฑ์ฟัซซี จากกลุ่มข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเพื่อช่วยให้การสร้างระบบวินิจฉัยฟัซซีนั้นง่ายขึ้น และการวิเคราะห์ข้อมูลของระบบมีความแม่นยำมากขึ้น

การเรียนรู้ของระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว ที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการเรียนรู้เป็นเทคโนโลยีที่มาจากงานวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าฟังก์ชันจากชุดข้อมูล วิธีการของระบบโครงข่ายประสาทเทียม เป็นวิธีการที่จะทำให้ระบบเรียนรู้จากตัวอย่างต้นแบบแล้วฝึกให้ระบบได้รู้จักการคิดที่สามารถแก้ปัญหาที่กว้างขึ้นได้ ในโครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วย โหนด (Node) สำหรับอินพุต เอาต์พุต และการประมวลผลที่กระจายอยู่ในโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ได้แก่ ชั้นอินพุต ชั้นเอาต์พุต และชั้นซ่อน การประมวลผลของระบบโครงข่ายประสาทเทียมจะอาศัยการส่งการทำงานผ่านโหนดต่าง ๆ ในชั้นที่ได้กล่าวไปนี้

สำหรับการนำทฤษฎีฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม มีหลักการ คือ ส่วนประกอบหลักจะเป็นส่วนประกอบของฟัซซี คือมี ฟัซซีพีเคชั่น ฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ และ ดีฟัซซีพีเคชั่น ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในขั้นตอน การถ่ายทอดกลับ (Back Propagation) เพื่อใช้ในการปรับปรุงพารามิเตอร์ส่วนของ premise และพารามิเตอร์ส่วนของ consequent ของฟัซซี ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการเรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning Algorithm) โดยมีหลักการดังนี้

ขั้นที่ 1 ประกอบด้วยฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุตแต่ละตัว ซึ่งสามารถปรับค่าได้โดยตัวแปรในขั้นนี้เรียกอีกอย่างได้ว่า premise parameter

$$o_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad (3.6)$$

ขั้นที่ 2 เป็นการคำนวณหาความสัมพันธ์ของอินพุทเวกเตอร์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด

$$o_{2,i} = w_i(x, y) = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y) \quad (3.7)$$

ขั้นที่ 3 เป็นการ Normalize เพื่อหาค่าอินพุทเวกเตอร์ที่ได้จากขั้นที่ 2

$$o_{3,i} = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (3.8)$$

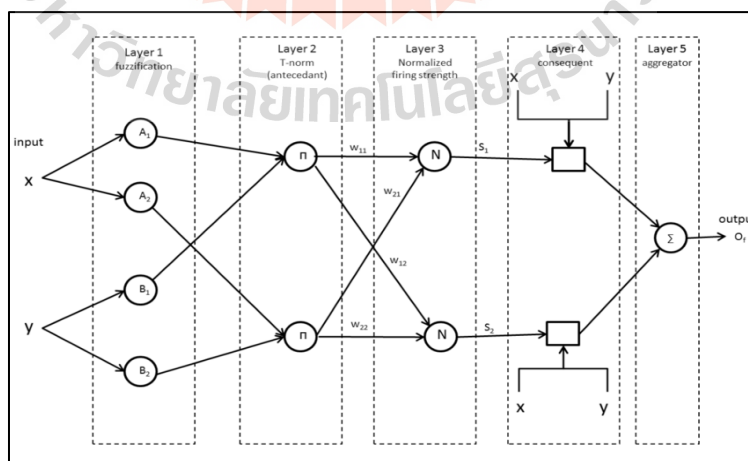
ขั้นที่ 4 เรียกว่า Standard Perceptron สามารถเขียนได้ตามสมการ

$$o_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (3.9)$$

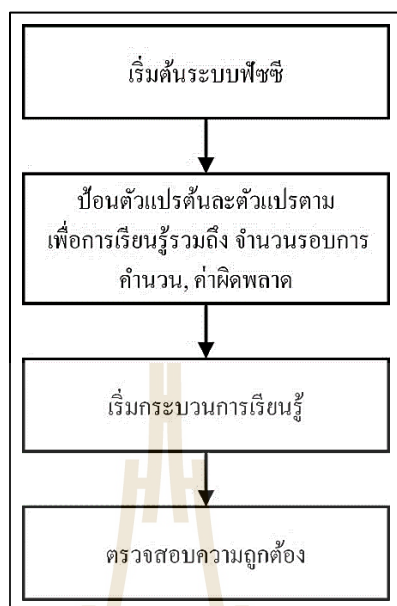
ขั้นที่ 5 เป็นการคำนวณเพื่อหาค่าเอาต์พุตออกมาเป็นจำนวนจริง ผลลัพธ์ที่ได้สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$o_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i \quad (3.10)$$

โดยโครงสร้างของระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัวแสดงในรูปที่ 3.12 และ โฟลวชาร์ตขั้นตอนการทำงาน of ระบบประสาทฟัซซีปรับตัวแสดงในรูปที่ 3.13



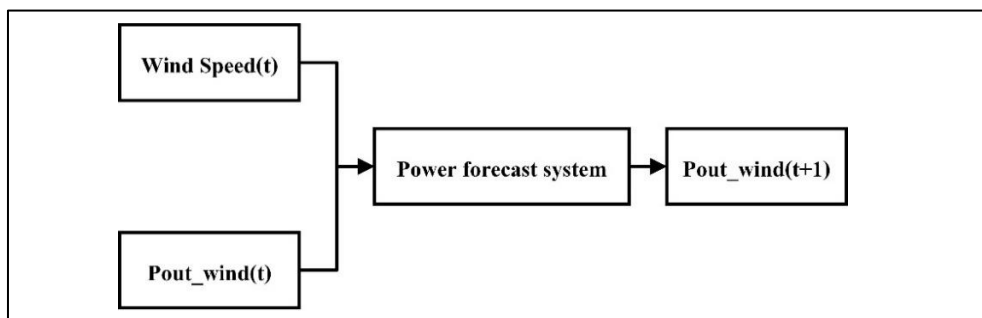
รูปที่ 3.14 โครงสร้างระบบประสาทฟัซซีแบบปรับตัว (Das, 2016)



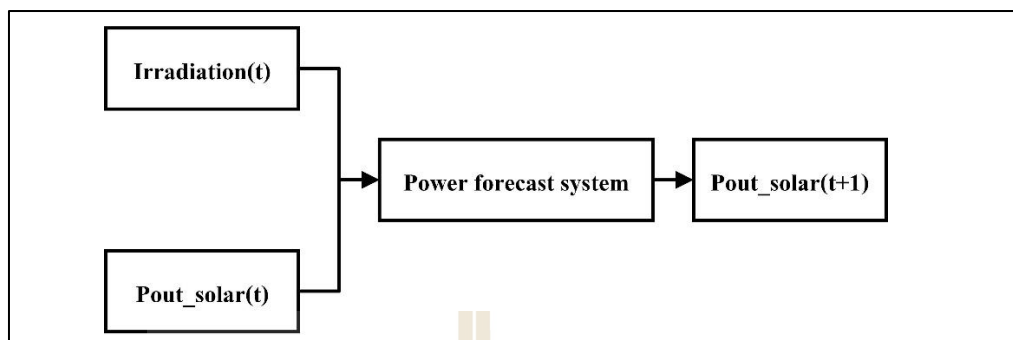
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการสร้างระบบการคาดการณ์โดยใช้ระบบระบบประสาทฟัซซี่แบบปรับตัว

2) การออกแบบระบบการคาดการณ์

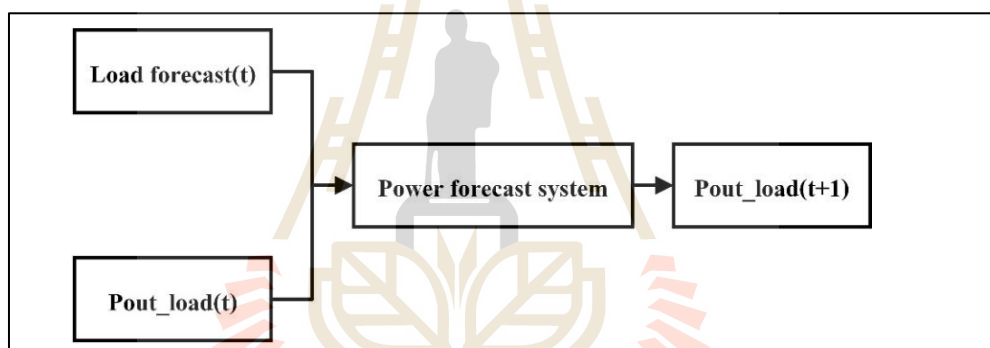
ในการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่จะนำเสนอโดยแต่ละระบบจะใช้ตัวแปรต้นสำหรับคาดการณ์ดังกล่าวไว้ในบทที่สอง ระบบการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมจะใช้ความเร็วลมและกำลังไฟฟ้าที่ได้ในอดีตเป็นตัวแปรต้น ระบบการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ใช้ความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าที่ได้ในอดีตเป็นตัวแปรต้น ระบบการคาดการณ์โหลดใช้อุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในอดีตเป็นตัวแปรต้น ระบบดังกล่าวสามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.16



(1)



(2)

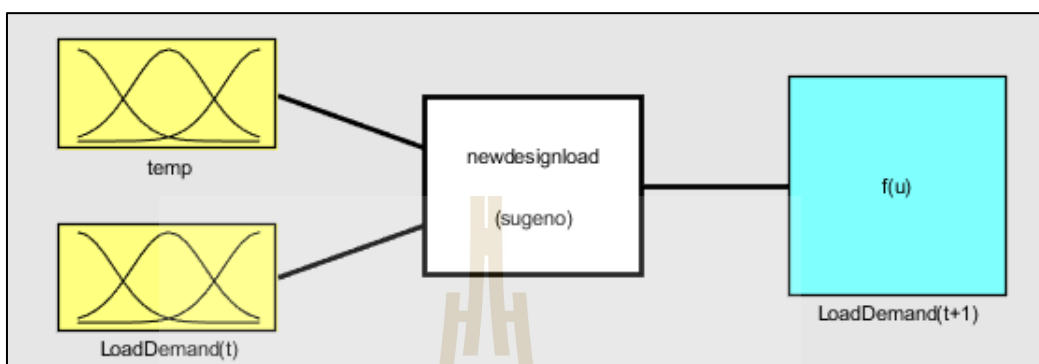


(3)

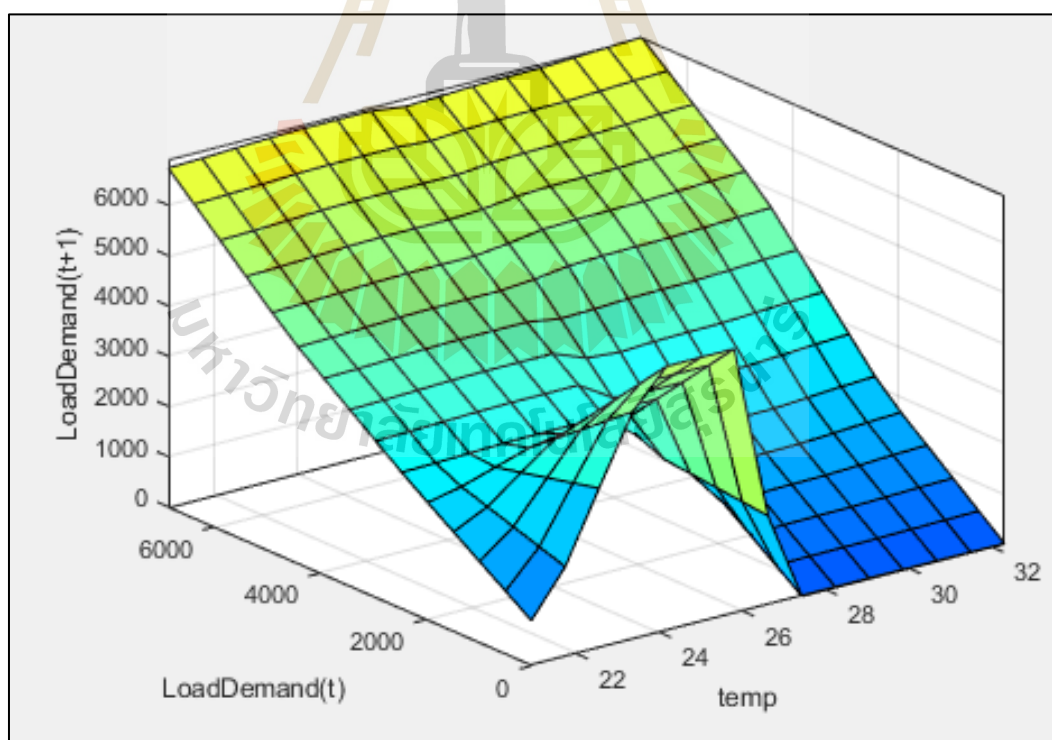
รูปที่ 3.16 ปัจจัยการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า (1) การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลม
(2) การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ (3) การคาดการณ์โหลด

หลังจากที่ได้ระบุตัวแปรต้นและผลการคาดการณ์ที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลทั้งตัวแปรต้นและตัวแปรตามไปสร้างระบบการคาดการณ์โดยใช้ระบบระบบประสาทฟuzzyแบบปรับตัวโดยเริ่มจากการสร้างระบบฟuzzy กำหนดตัวแปรต้นและตัวแปรตาม จากนั้นป้อนข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตามในอดีตให้กับระบบการเรียนรู้พร้อมทั้งกำหนดจำนวนรอบและค่าความผิดพลาดที่ต้องการและเริ่มการเรียนรู้ ระบบการเรียนรู้จะหยุดเมื่อถึงรอบที่กำหนดหรือค่าความผิดพลาดน้อยกว่าที่กำหนด เมื่อเสร็จขั้นตอนการเรียนรู้ จะได้ระบบการคาดการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.22

จากรูปที่ 3.17 การคาดการณ์โหลดจะใช้อุณหภูมิและโหลดในเวลา
 ขณะนั้นพิจารณาเพื่อหาโหลดในเวลาถัดไปโดยผ่านระบบฟัซซี่ ความสัมพันธ์ของ อุณหภูมิและ
 โหลดในเวลาขณะกับโหลดในเวลาถัดไปดังแสดงในรูปที่ 3.18

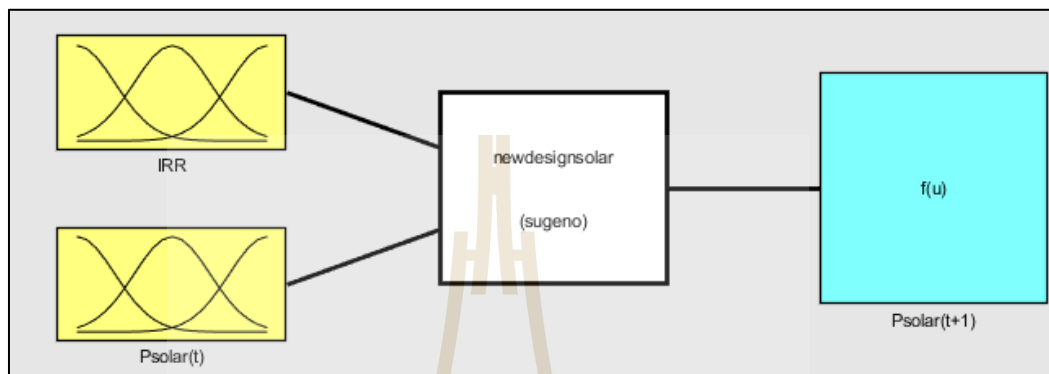


รูปที่ 3.17 กระบวนการคาดการณ์โหลด

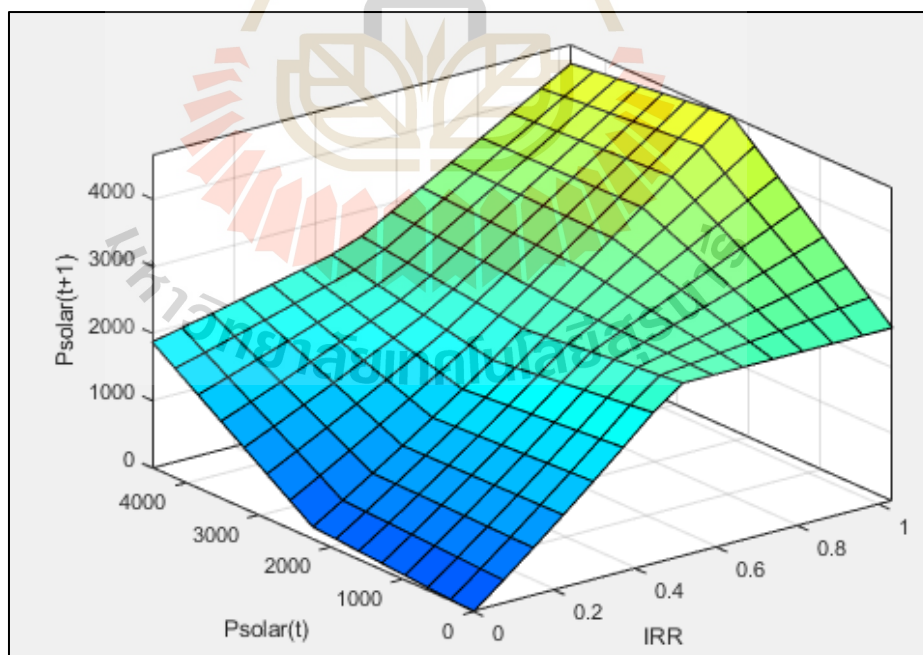


รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของกระบวนการคาดการณ์โหลด

จากรูปที่ 3.19 การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ความเข้มแสงและกำลังที่ผลิตได้ในเวลาขณะนั้นพิจารณาเพื่อหากำลังที่ผลิตได้ในเวลาถัดไปโดยผ่านระบบฟัซซี่ ความสัมพันธ์ของ ความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในเวลาขณะนั้นกับกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในเวลาถัดไปดังแสดงในรูปที่ 3.20

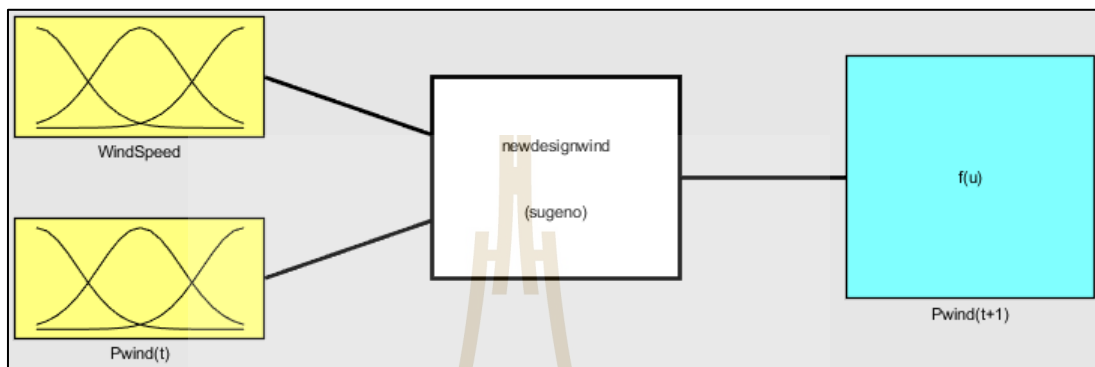


รูปที่ 3.19 กระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

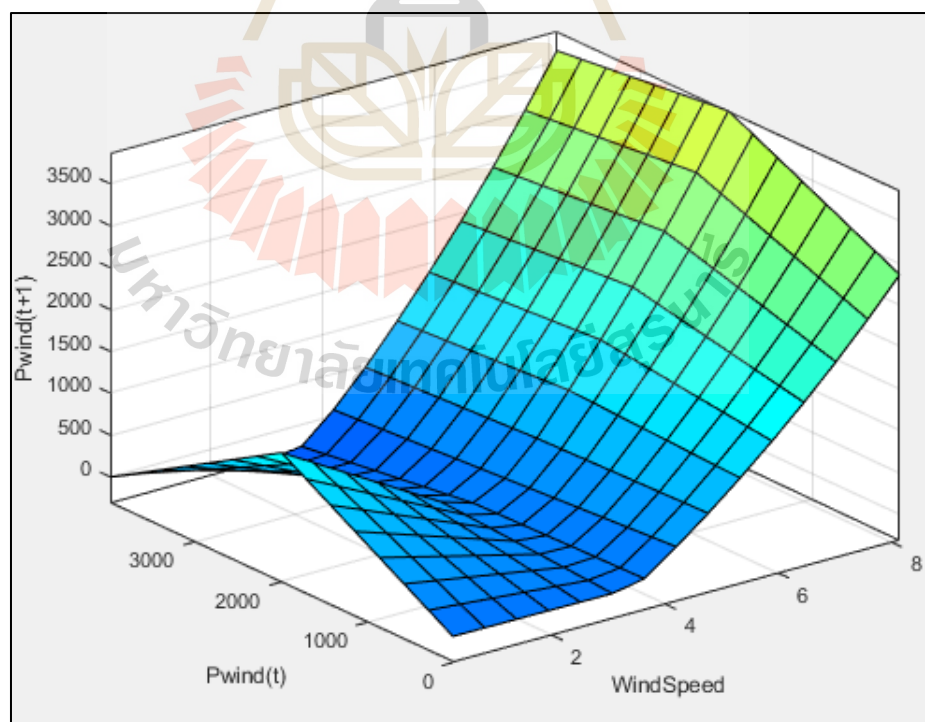


รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของกระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.21 การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมจะใช้ความเร็วลมและกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมในเวลานั้นพิจารณาเพื่อหาลำดับกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมในเวลาถัดไป โดยผ่านระบบฟัซซี่ ความสัมพันธ์ของ ความเร็วลมและกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมในเวลานั้นกับกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมในเวลาถัดมาแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 กระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม



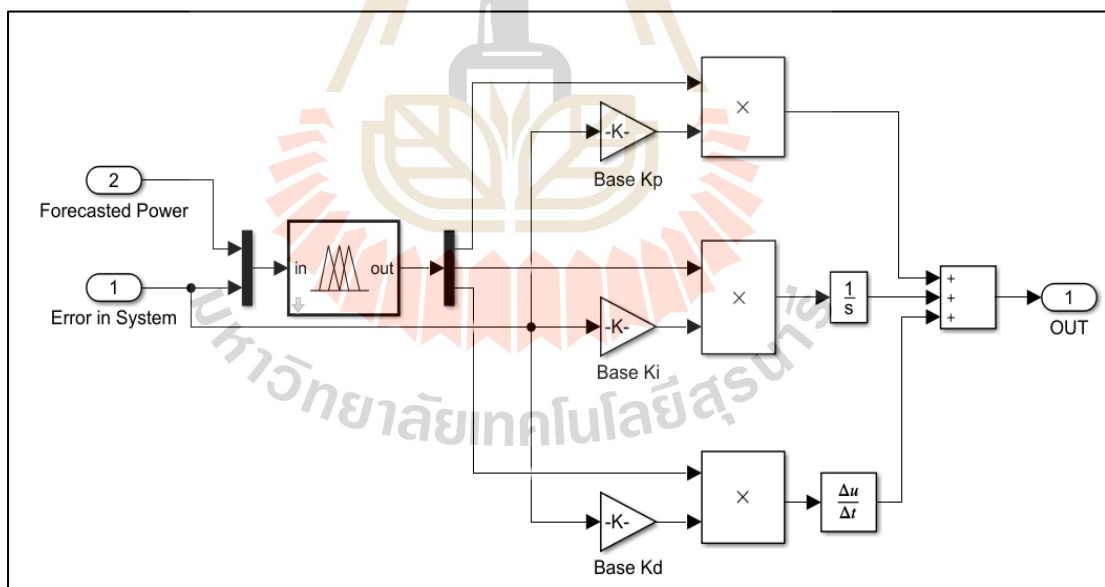
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของกระบวนการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม

3.4.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบพีชชีลอจิก

การออกแบบตัวควบคุมระบบพีชชีลอจิกจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนคือ (1) เป็นขั้นตอนการการสร้างตัวแปรให้ระบบพีชชี (2) เป็นขั้นตอนการสร้างกฎที่ใช้สำหรับวินิจฉัยผลลัพธ์ให้ระบบพีชชี ในการควบคุมความถี่โหลดในงานวิจัยนี้ จะใช้ผลตอบสนองค่าผิดพลาด (Error in system) และกำลังไฟฟ้าที่คาดการณ์ (Forecasted power) หาขนาดการปรับอัตราขยาย K_p , K_i และ K_d เหมาะสมกับสถานการณ์นั้น ๆ โดยผ่านการวิเคราะห์ของระบบพีชชี ไดอะแกรมใน โปรแกรม MATLAB/Simulink ของระบบควบคุมพีชชีจะแสดงในรูปที่ 3.23

1) การสร้างตัวแปรให้ระบบพีชชี

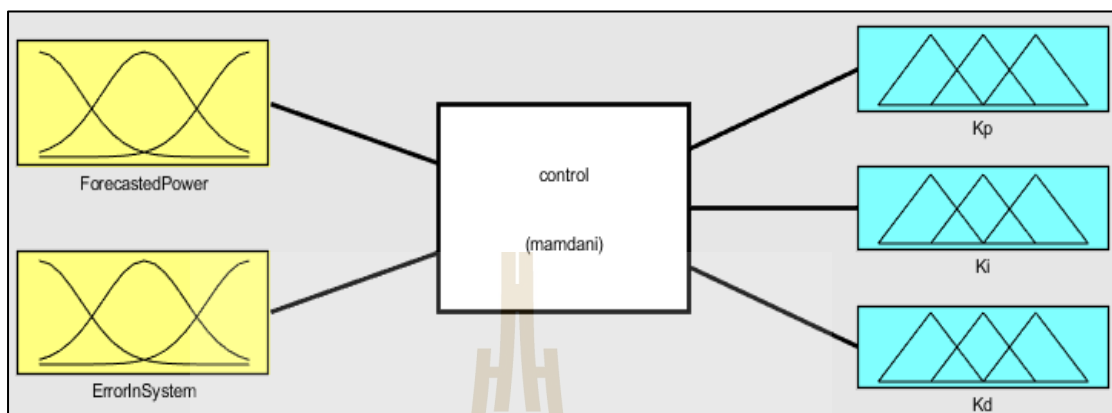
ในระบบควบคุมพีชชีจะพิจารณาทั้งหมด 5 ตัวแปรด้วยกัน ประกอบด้วย ผลตอบสนองค่าผิดพลาด (Error in system) กำลังไฟฟ้าที่คาดการณ์ (Forecasted power) เป็นสมาชิกในฝั่งตัวแปรต้น และ ขนาดการปรับอัตราขยาย K_p , K_i และ K_d เป็นตัวแปรตาม ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และความสัมพันธ์ระหว่าง ผลตอบสนองค่าผิดพลาด (Error in system) กำลังไฟฟ้าที่คาดการณ์ (Forecasted power) และขนาดการปรับอัตราขยาย K_p , K_i และ K_d จะแสดงในรูปที่ 3.24 ถึงรูปที่ 3.27



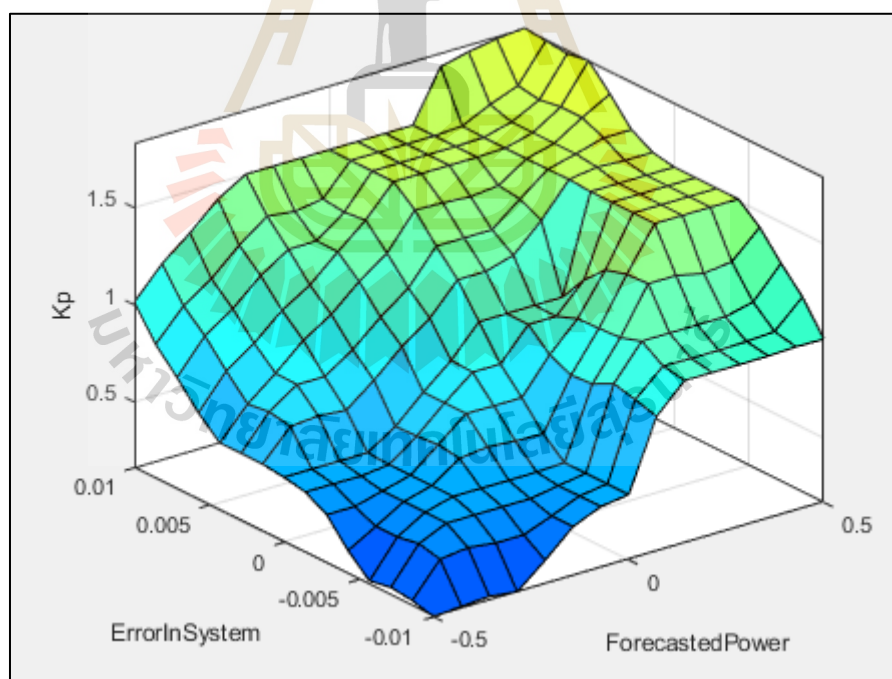
รูปที่ 3.23 ระบบควบคุมพีชชี

จากรูปที่ 3.24 การพิจารณาหาอัตราขยายสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมจะใช้ กำลังไฟฟ้าที่คาดการณ์ได้ (Forecasted power) และค่าผิดพลาดของของผลการตอบสนองของระบบใน

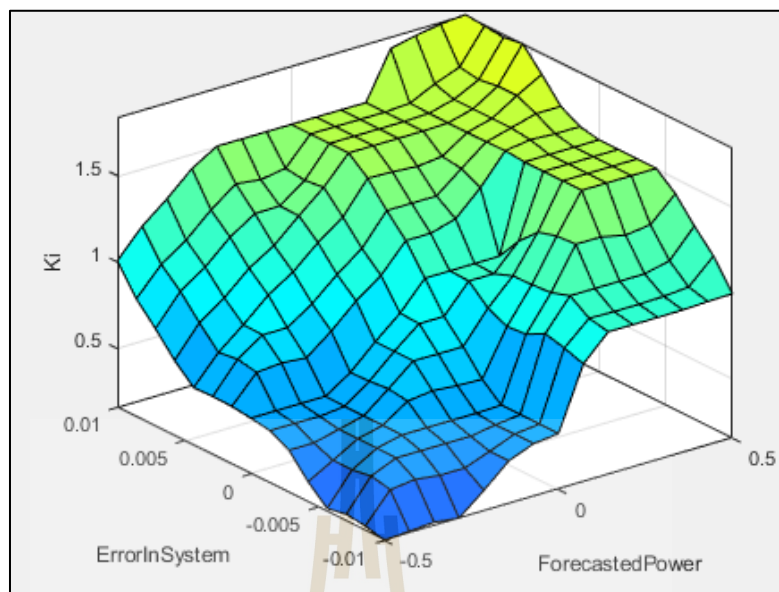
ขณะนั้น (Error) พิจารณาเพื่อหาขนาดการปรับอัตราขยาย K_p , K_I และ K_d โดยผ่านระบบฟuzzy ความสัมพันธ์ของ ปัจจัยดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.25 ถึงรูปที่ 3.27 ตามลำดับ



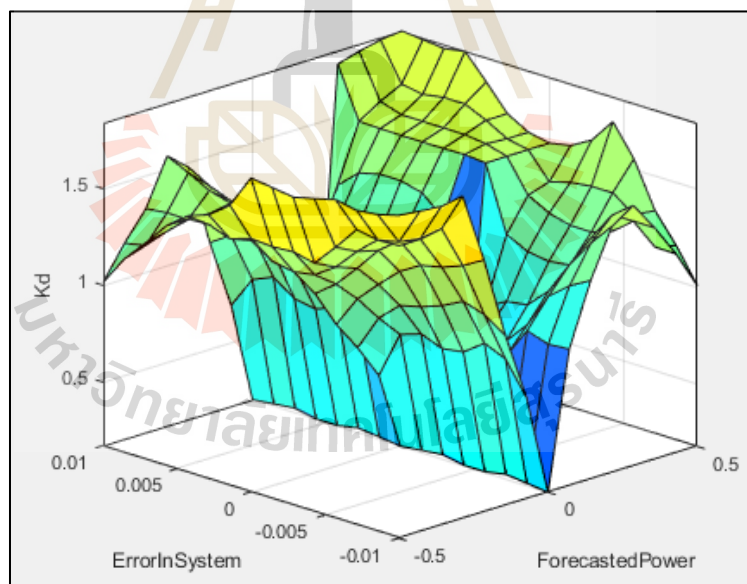
รูปที่ 3.24 กระบวนการวิเคราะห์หาขนาดการปรับอัตราขยาย K_p , K_I และ K_d



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของขนาดการปรับอัตราขยาย K_p



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของขนาดการปรับอัตราขยาย K_i



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ในรูปแบบพื้นผิวของขนาดการปรับอัตราขยาย K_d

2) การสร้างกฎให้ระบบฟuzzy

ตามสามกฎของระบบฟuzzyมีทั้งหมด 25 ข้อดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยอ้างอิงแนวโน้มความสัมพันธ์การปรับค่าอัตราขยาย K_p , K_i และ K_d จากงานวิจัยของ Ma, (2014) ที่

ใช้ระบบควบคุมฟuzzy พีไอดี เพื่อควบคุมเครื่องผสมของเหลวโดยจะใช้ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมในการออกแบบทั้งหมดเนื่องจากสามารถเข้าใจได้ง่าย ซึ่งผลการควบคุมจะถูกออกแบบจากการพิจารณาว่าควรปรับขนาดสัญญาณควบคุมมากหรือน้อยขึ้นกับค่าความผิดพลาดในขณะนั้นและกำลังไฟฟ้าที่คาดการณ์ได้ที่กำลังจะเกิดขึ้น

หลังจากได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองระบบควบคุมความถี่แบบฟuzzy โดยใช้การคาดการณ์มาทั้งหมดแล้ว ทำให้ทราบถึงรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบในระบบควบคุมที่ใช้ฟuzzyลอจิกสำหรับควบคุมความถี่นั้นประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนการคาดการณ์ ที่คาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลม และเซลล์แสงอาทิตย์ และโหลด อีกส่วนคือส่วนการวิเคราะห์หาอัตราขยายของสัญญาณควบคุม K_p , K_I และ K_D โดยใช้ข้อมูลจากการคาดการณ์มาช่วยในการวิเคราะห์ ไดอะแกรมรวมระบบของระบบทดสอบดังกล่าว จะแสดงในรูปที่ 3.26

ตารางที่ 3.2 ตารางกฎฟuzzyสำหรับการควบคุมความถี่โหลด

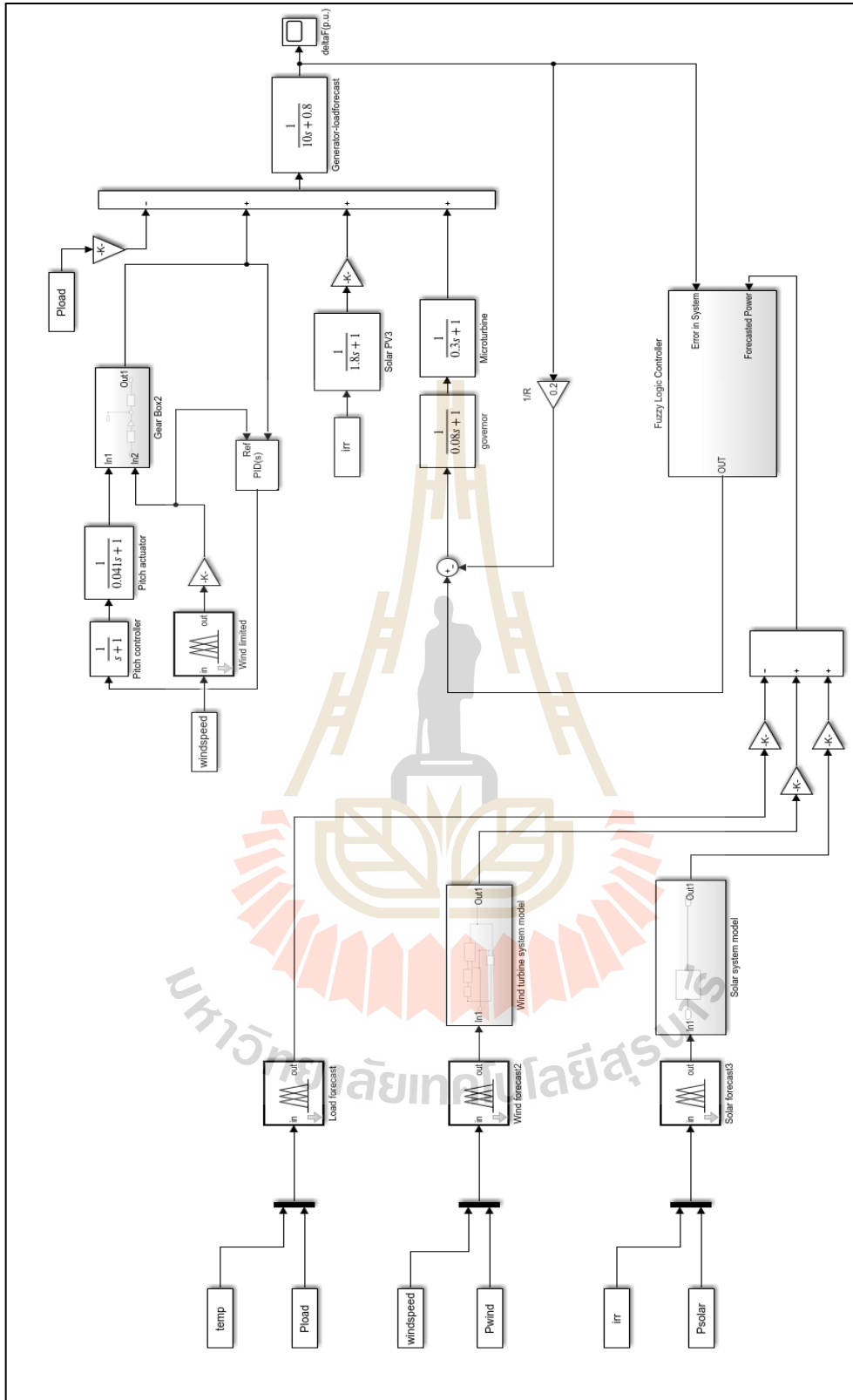
Error in system	Forecasted power	Gain of K_p	Gain of K_I	Gain of K_D
Negative big	Negative big	Very low	Very low	Very High
Negative big	Negative small	Very low	Very low	Very High
Negative big	Zero	Low	Low	Very High
Negative big	Positive small	Low	Low	High
Negative big	Positive big	Medium	Medium	Medium
Negative small	Negative big	Very low	Very low	Very High
Negative small	Negative small	Low	Low	High
Negative small	Zero	Low	Low	Medium
Negative small	Positive small	Medium	Medium	High
Negative small	Positive big	High	High	Very High
Zero	Negative big	Low	Low	Very Low
Zero	Negative small	Low	Low	Very Low
Zero	Zero	Medium	Medium	Very Low
Zero	Positive small	High	High	Very Low
Zero	Positive big	High	High	Very Low
Positive small	Negative big	Low	Low	Very High
Positive small	Negative small	Medium	Medium	High

ตารางที่ 3.2 ตารางกฎฟuzzyสำหรับการควบคุมความถี่โหลด (ต่อ)

Error in system	Forecasted power	Gain of K_p	Gain of K_I	Gain of K_D
Positive small	Zero	High	High	Medium
Positive small	Positive small	High	High	High
Positive small	Positive big	Very high	Very high	Very High
Positive big	Negative big	Medium	Medium	Medium
Positive big	Negative small	High	High	Very High
Positive big	Zero	High	High	Very High
Positive big	Positive small	Very high	Very high	Very High
Positive big	Positive big	Very high	Very high	Very High

3.5 สรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และจำลอง เพื่อนำผลการควบคุมความถี่โหลดที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ ซึ่งระบบที่ถูกทดสอบจะเป็นระบบไฟฟ้าแบบหนึ่งพื้นที่ ที่มีโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานประกอบด้วยกังหันลม และ โซลาร์เซลล์ซึ่งกำหนดให้ ซึ่งวิธีที่นำเสนอคือ การควบคุมความถี่โหลดโดยใช้การควบคุมแบบฟuzzyลอจิกร่วมกับการคาดการณ์โหลด ทำการเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมอัตโนมัติแบบพีไอ และกรณีที่ไม่มีการติดตั้งตัวควบคุมอัตโนมัติ โดยจะแสดงให้เห็นถึงทั้งกรณีที่มีการคาดการณ์ได้แม่นยำ และการคาดการณ์ที่เกิดความผิดพลาดเกินค่าที่กำหนด



รูปที่ 3.26 โครงสร้างระบบของระบบควบคุม

บทที่ 4

การจำลองและผลการจำลอง

4.1 กล่าวนำ

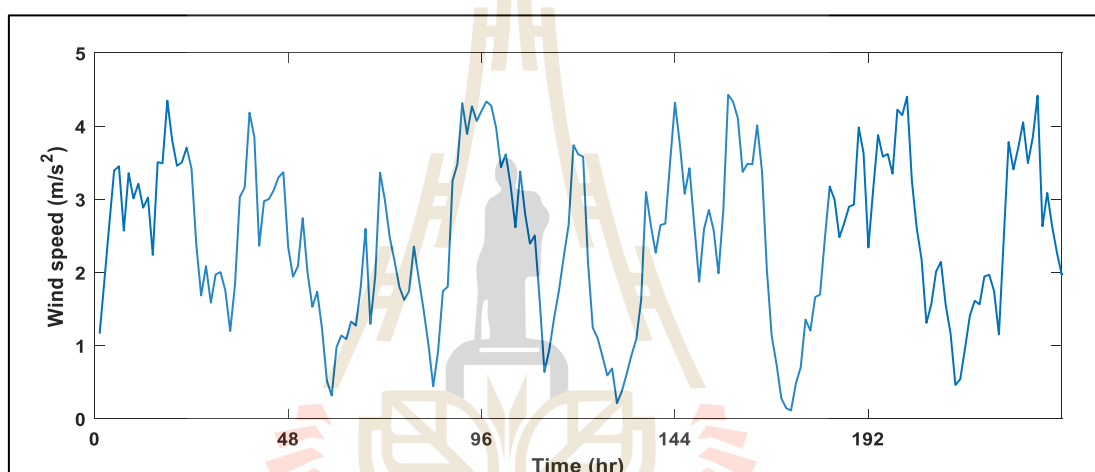
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการควบคุมความถี่โหลด โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จำลองเพื่อทดสอบและวิเคราะห์วิธีการควบคุมความถี่โหลดที่ใช้ฟuzzy logic ร่วมกับการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า กับวิธีการควบคุมความถี่โหลดแบบพีไอและพีไอดี ดังนั้น ในผลการจำลองส่วนแรกจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าในระบบ ก่อน และแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมความถี่โหลดของระบบที่มีพลังงานหมุนเวียน เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบจากค่าผลตอบสนองของเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ภาวะคงตัว และ ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นในการแกว่งโดยจะทำการจำลองเป็นเวลา 100 วินาที การจำลองจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ใช้การเปลี่ยนแปลงจากข้อมูลจริงมีการเปลี่ยนแปลงตลอด 100 วินาที แต่เนื่องจาก ข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงแบบรายวินาทีไม่สามารถหาตามจริงได้ ผู้แต่งจึงได้สมมติให้ข้อมูลราย ชั่วโมง กรณีที่สองจะให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียง 10 วินาทีแรกเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการ กลับเข้าสู่สภาวะของระบบควบคุมแต่ละระบบ

4.2 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้า

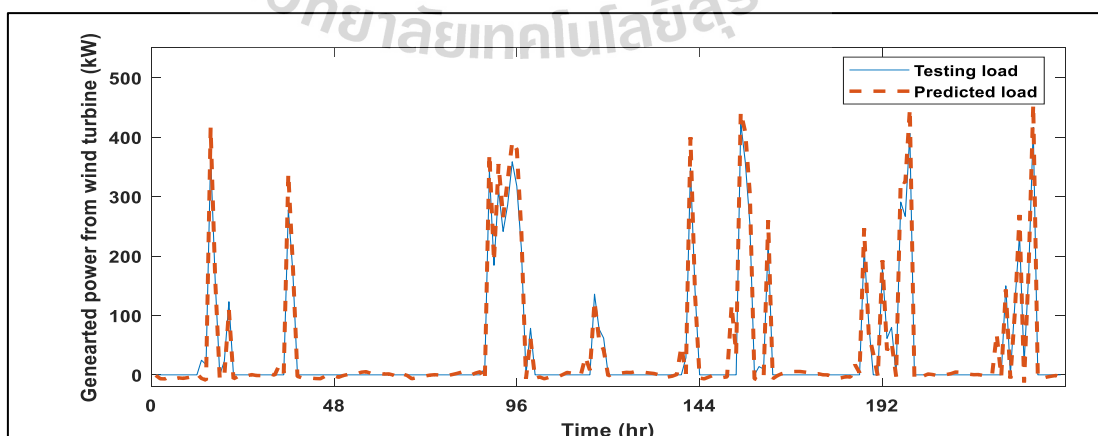
การจำลองการควบคุมความถี่โหลดด้วยตัวควบคุมฟuzzy logic ร่วมกับการคาดการณ์ กำลังไฟฟ้า ซึ่งในการควบคุมแบบฟuzzy logic นี้จะทำการแบ่งข้อมูลเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือการ คาดการณ์ข้อมูลเพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในระบบ ส่วนที่สองทำ การนำข้อมูลที่คาดการณ์ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าความผิดพลาดของระบบเพื่อปรับปรุงค่าการ ควบคุมที่เหมาะสมจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้นี้ไปใช้เป็นอินพุตสำหรับเลือกการควบคุมที่เหมาะสม ตามตารางกฎฟuzzy logic ที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อยืนยันผลของการคาดการณ์ว่ามีความแม่นยำทาง ผู้เขียนวิทยานิพนธ์จะทำการคาดการณ์โดยใช้ข้อมูลสำหรับสร้างระบบการเรียนรู้เป็นเวลา 1 ปี โดย คาดการณ์เป็นรายชั่วโมงเนื่องจากข้อมูลที่มีนั้นเป็นข้อมูลแบบรายชั่วโมงซึ่งข้อมูลที่ใช้จะเป็นชุด ข้อมูลจากฐานข้อมูล จากพื้นที่จำลองแห่งหนึ่งในจังหวัดนครราชสีมาในระบบคาดการณ์นี้จะใช้ ความเร็วลม ความเข้มแสงและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำหรับคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม แสดง ในรูปที่ 4.1 เซลล์แสงอาทิตย์ แสดงในรูปที่ 4.3 และ โหลดดังแสดงในรูปที่ 4.5 เป็นเวลา 240 ชั่วโมง หรือ 10 วัน เนื่องจากถ้าทำการคาดการณ์เป็นเวลานาน ทำให้แยกราชยะเฉลี่ยของเส้นกราฟได้ยาก

จะให้กำลังไฟฟ้าจริงและผลที่ได้จากการคาดการณ์ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลม กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์และ โหลด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ

จากผลการคาดการณ์ทั้งสามพบว่าผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมโดยใช้ระบบการคาดการณ์ประสาทพีชชีแบบปรับตัวได้มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 8.4 % ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 4.27 % ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 1.6 % จากการคาดการณ์ทั้งหมดพบว่าผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเนื่องจากพฤติกรรมการทำงานของกังหันลมนั้นไม่มีรูปแบบที่ค่อนข้างตายตัวคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์หรือโหลดทำให้คาดการณ์ได้ยากยิ่งขึ้น

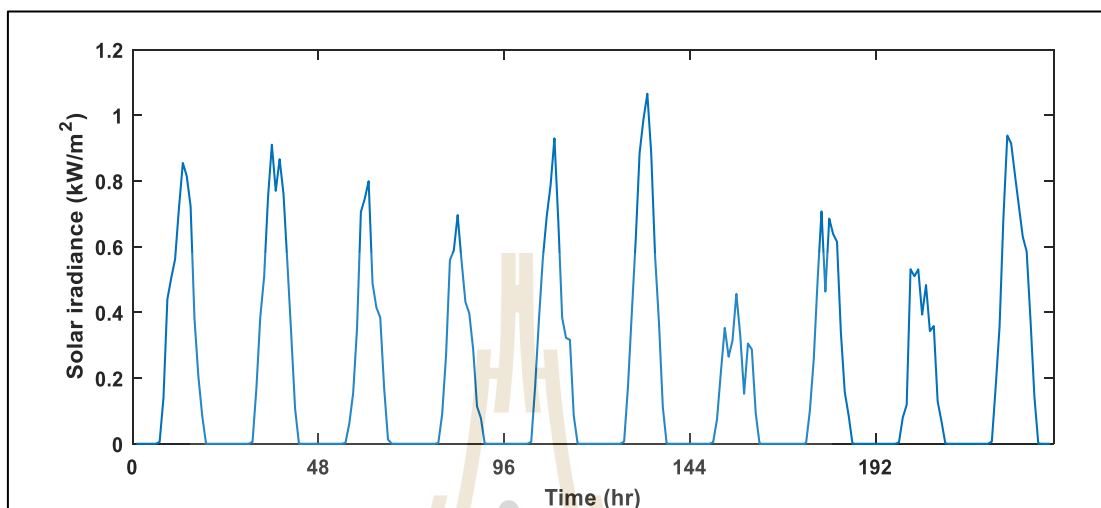


รูปที่ 4.1 ความเร็วลมที่ใช้สำหรับคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมในช่วงเวลา 10 วัน



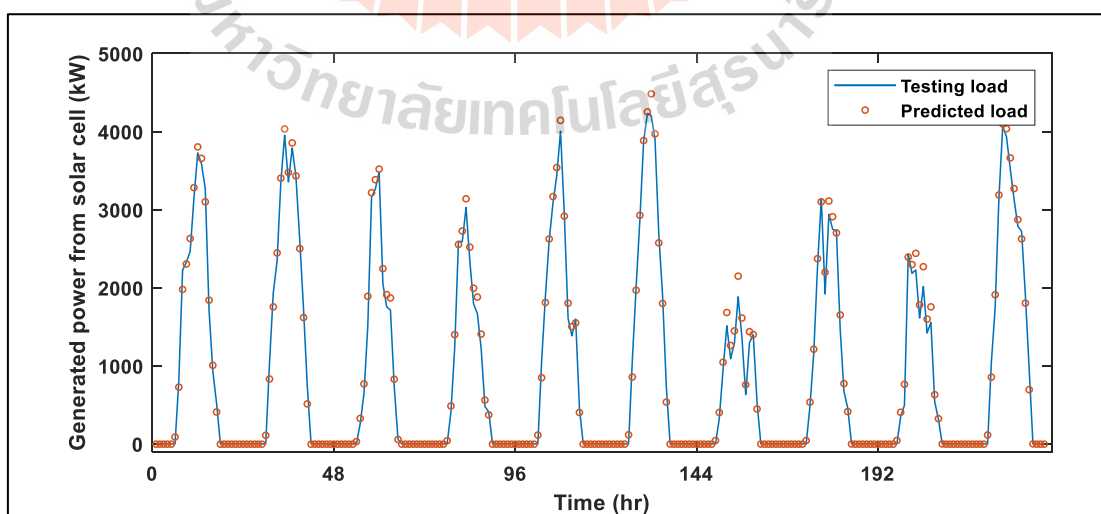
รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงจากกังหันลมและจากการคาดการณ์

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าผลการคาดการณ์เปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงจากกังหันลม และจากการคาดการณ์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 8.4 %

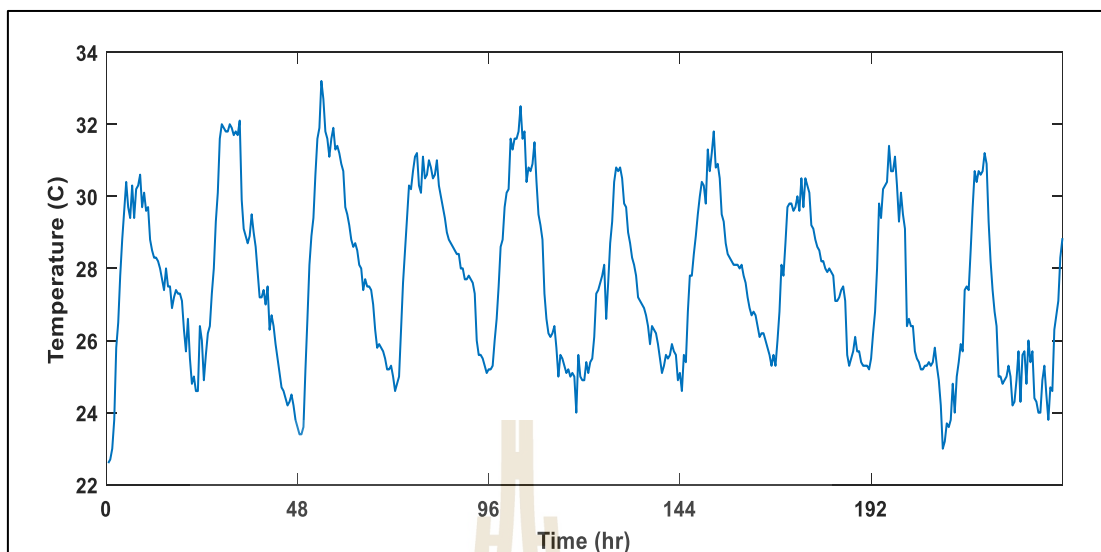


รูปที่ 4.3 ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 10 วัน

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าผลการคาดการณ์เปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงจากเซลล์แสงอาทิตย์และจากการคาดการณ์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.27 %

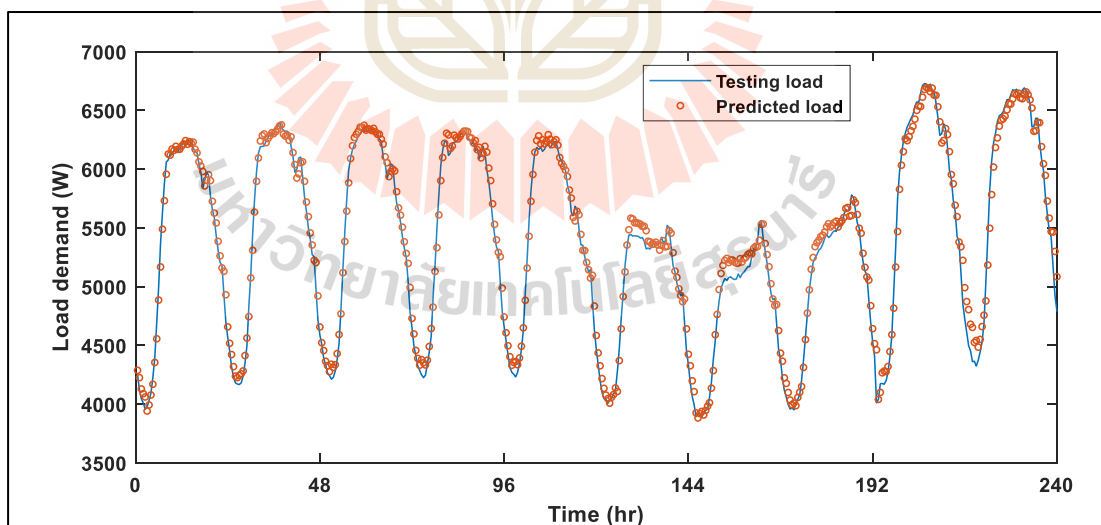


รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงจากเซลล์แสงอาทิตย์และจากการคาดการณ์



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิที่ใช้สำหรับคาดการณ์โหลดในระยะเวลา 10 วัน

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าผลการคาดการณ์เปรียบเทียบระหว่างโหลดจริงและโหลดจากการคาดการณ์พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.27 %



รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโหลดจริงและโหลดจากการคาดการณ์

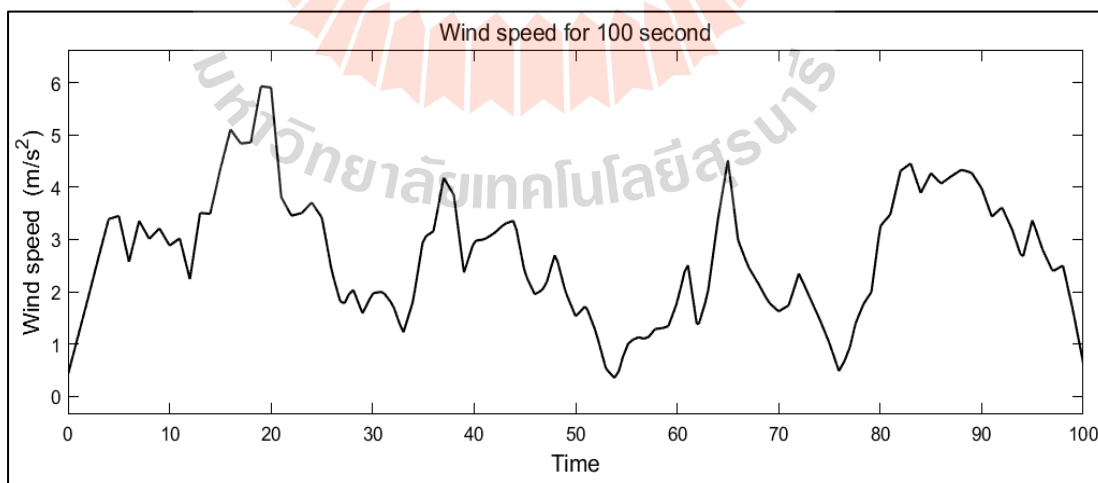
4.3 ระบบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ในกรณีที่ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมแบบใดสามารถรักษาเสถียรของระบบได้ดีกว่า ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ในหัวข้อนี้จะแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกคือลักษณะของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโหลด กังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่สองแสดงให้เห็นถึงผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้น และส่วนสุดท้ายแสดงผลการควบคุมความถี่โหลดของการควบคุมความถี่โหลด โดยใช้ตัวควบคุม พีไอ พีไอดี และการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกร่วมกับการคาดการณ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

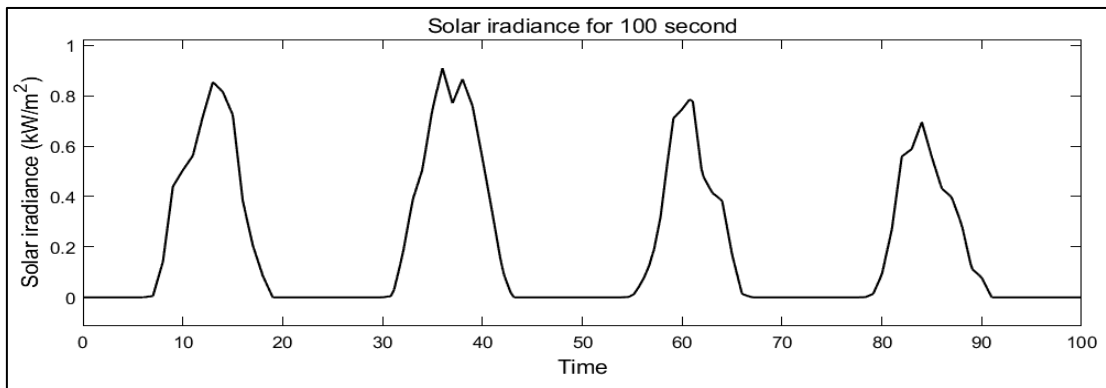
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ

การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกัน คือ กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ โหลด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งสามส่วนขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรรมชาติประกอบด้วย ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม ความเข้มแสง และ โหลดในรูปแบบสัญญาณที่ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน ดังรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ 10 MW มีค่าเท่ากับ 1 p.u.

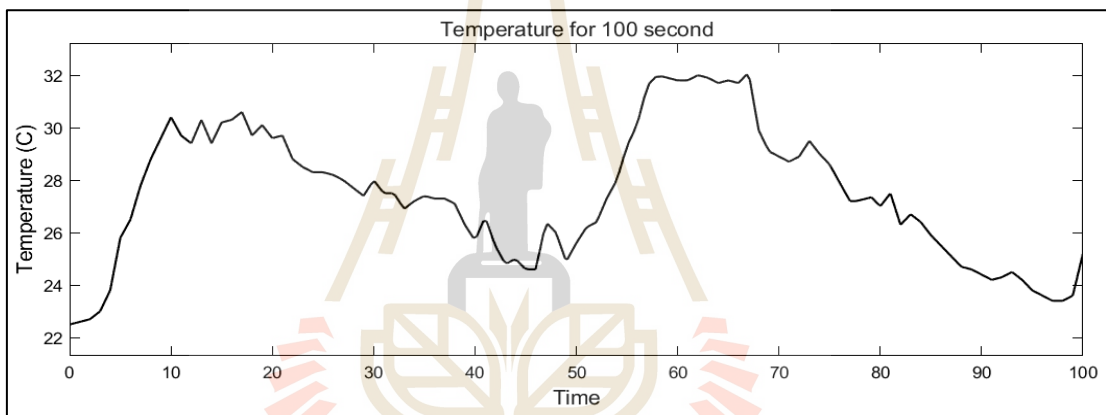
รูปที่ 4.7 แสดงความเร็วลมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเป็นเวลา 100 วินาทีโดยอยู่ในช่วง 0 ถึง 6 m/s^2 และรูปที่ 4.8 แสดงความเข้มแสงอาทิตย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเป็นเวลา 100 วินาทีโดยอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.85 kW/m^2 รูปที่ 4.9 แสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเป็นเวลา 100 วินาทีโดยอยู่ในช่วงประมาณ 22°C ถึง 32°C



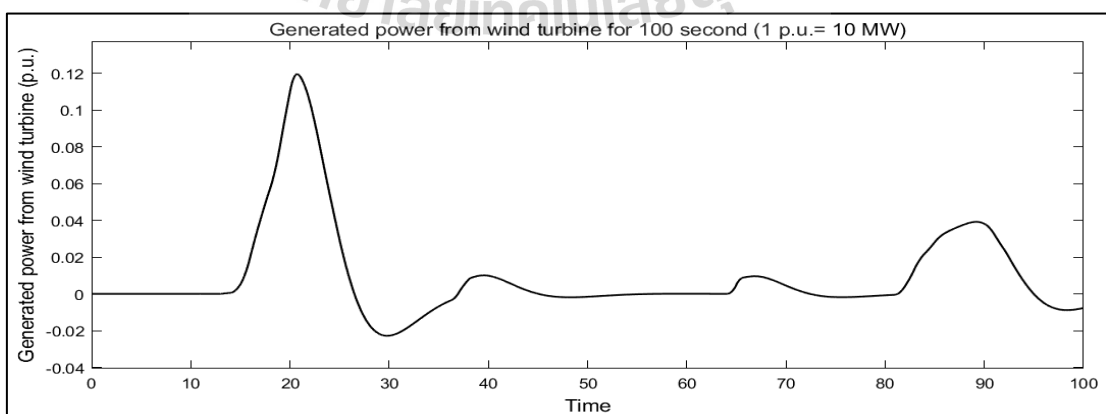
รูปที่ 4.7 ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงในเวลา 100 วินาที



รูปที่ 4.8 ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในเวลา 100 วินาที

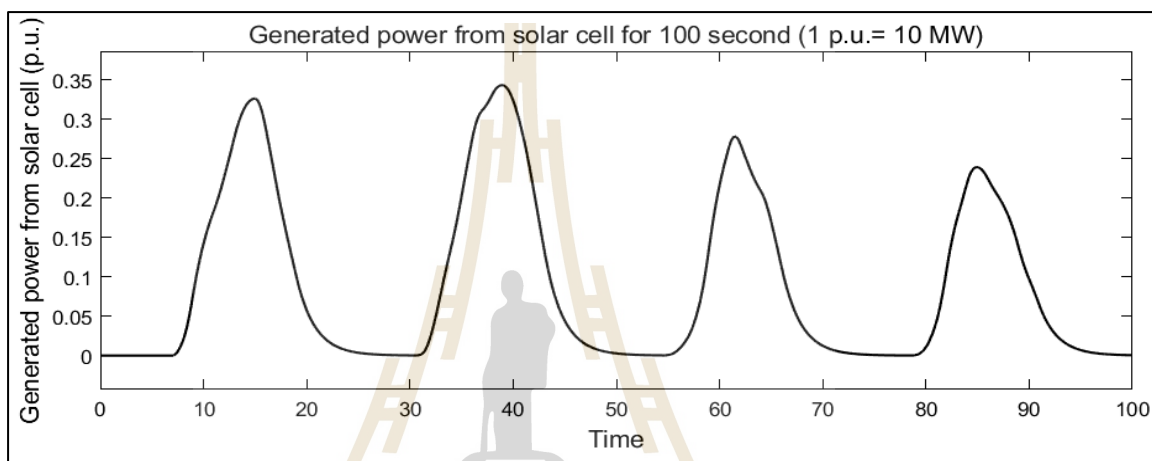


รูปที่ 4.9 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในเวลา 100 วินาที

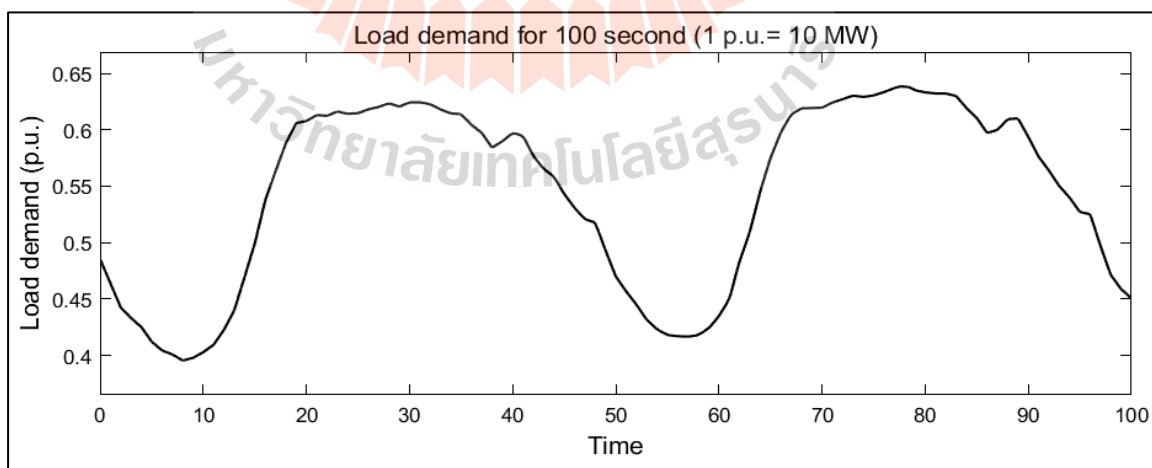


รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 4.7 จากรูปที่ 4.11 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 4.8 และจากรูปที่ 4.11 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของผลตอบสนองของโหลดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 4.8



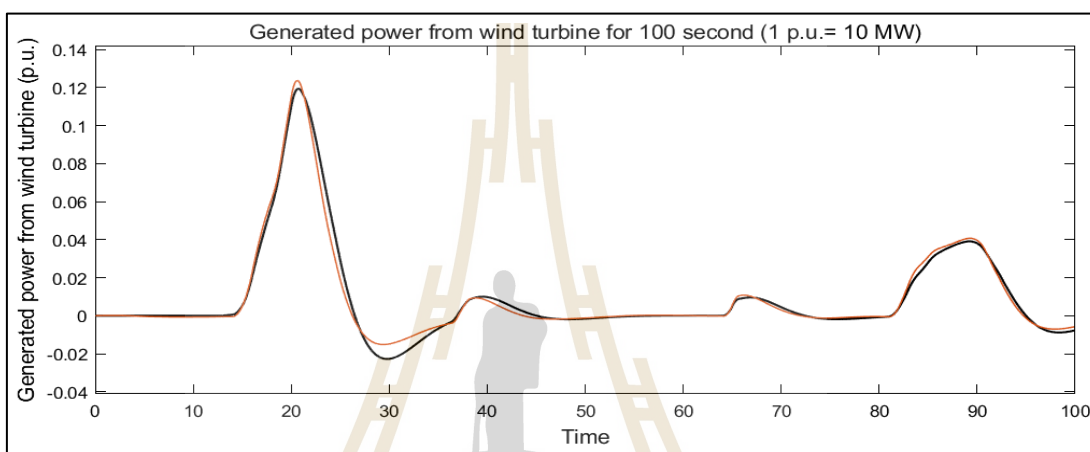
รูปที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง



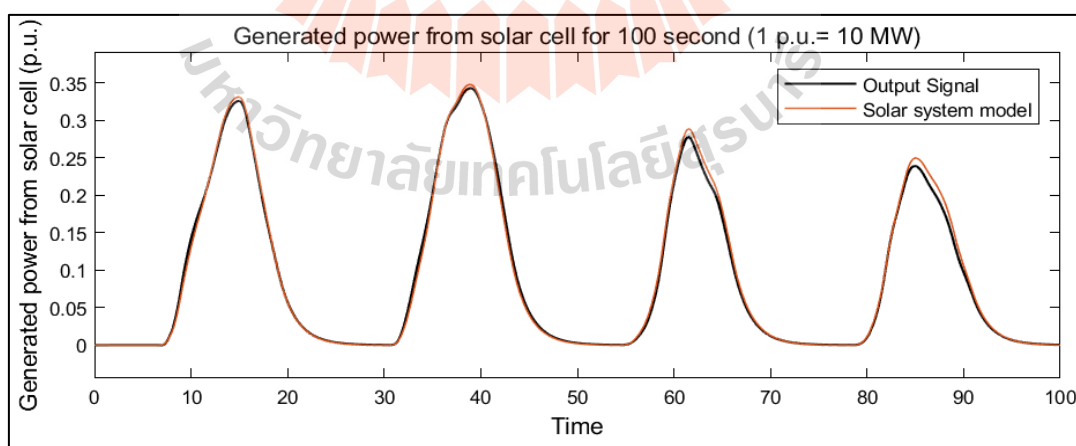
รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง

4.3.2 ผลการการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ

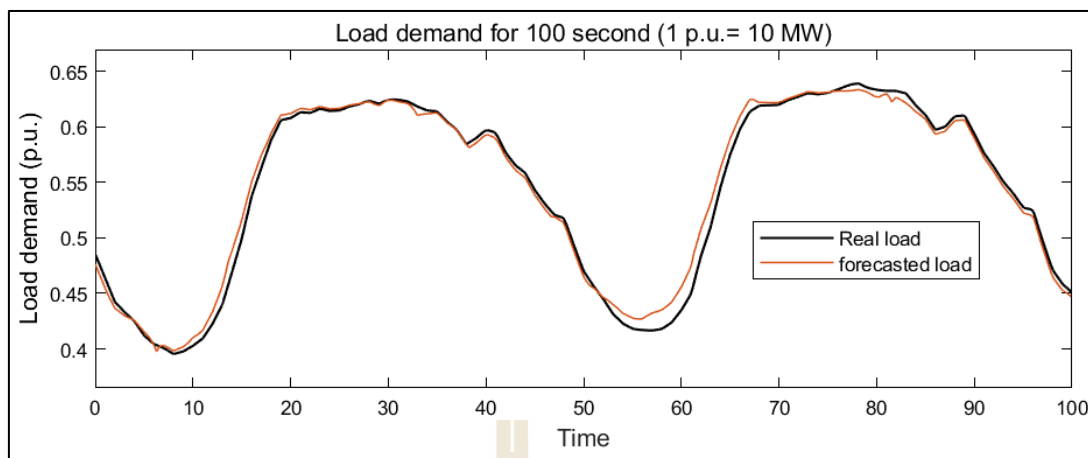
เนื่องจากระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจำเป็นต้องใช้ค่าที่ทำการคาดการณ์ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาอัตราขยายที่เหมาะสมในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการคาดการณ์ของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากส่วนต่าง ๆ ของระบบก่อน ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 4.13 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 4.14 ผลการคาดการณ์โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง



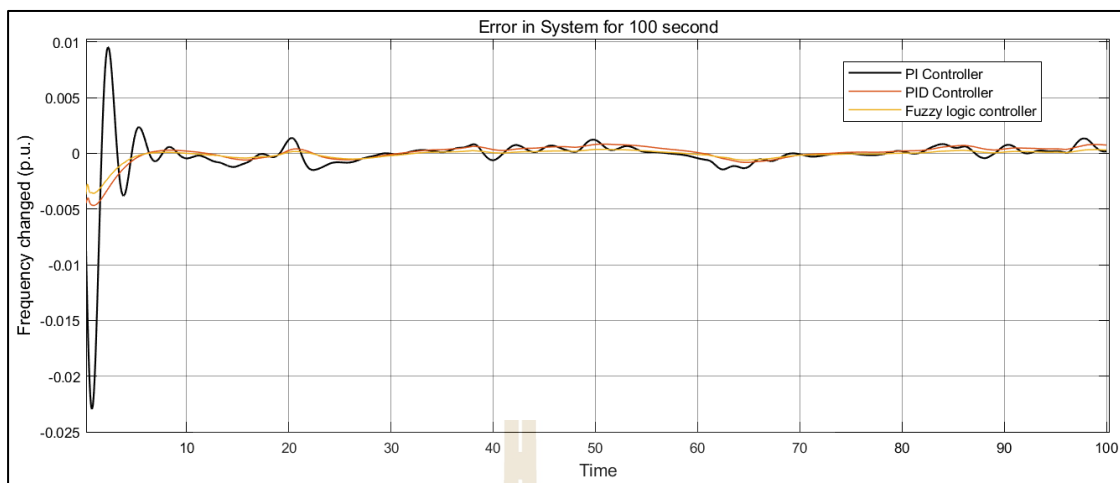
รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ผลการจำลองการคาดการณ์พบว่าค่าผลการคาดการณ์ในรูปแบบสัญญาณที่ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนและค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับที่ได้ทดสอบระบบการคาดการณ์ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ จากนั้นนำผลการคาดการณ์ทั้งหมดมารวมกันเพื่อหาผลรวมของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบต่อไป ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

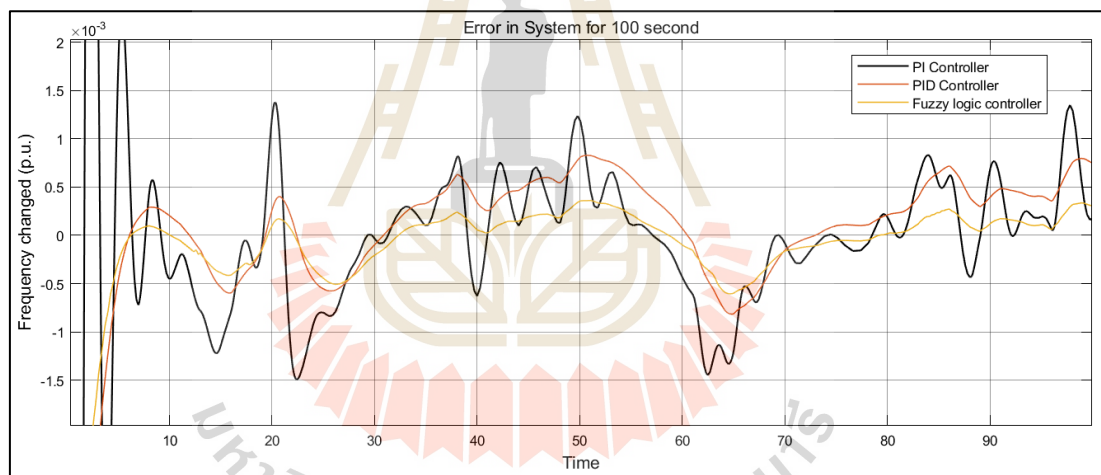
4.3.3 ผลการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลด

การควบคุมความถี่โหลดในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 วิธี ประกอบด้วย การควบคุมความถี่ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ การควบคุมความถี่ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี และการควบคุมความถี่ที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์ ผลของการควบคุมความถี่โหลดที่ได้จากแต่ละระบบจะแสดงในรูปที่ 4.16 และภาพขยายเพื่อให้เห็นการรักษาสมดุลของความถี่ จากรูปที่ 4.16 อย่างชัดเจนจะแสดงในรูปที่ 4.17

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น พบว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอมีค่าการกวัดแกว่งเริ่มต้นสูงมากและมีการกวัดแกว่งออกจากเสถียรภาพ (ออกจากศูนย์) มากที่สุด ต่อมาเป็นระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าการกวัดแกว่งเริ่มต้นต่ำกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไออย่างเห็นได้ชัด และมีการกวัดแกว่งออกจากเสถียรภาพในตลอดระยะเวลาการจำลอง 100 วินาที น้อยกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ และสุดท้ายเป็นระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีซีซีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์ มีค่าการกวัดแกว่งเริ่มต้นต่ำสุดและมีการกวัดแกว่งออกจากเสถียรภาพต่ำที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 4.16 ผลการคาดการณ์ของการควบคุมความถี่โหลดแบบพีไอ พีไอดี และฟัซซี่ลอจิก



รูปที่ 4.17 ผลการคาดการณ์ของการควบคุมความถี่โหลดแบบพีไอ พีไอดี และฟัซซี่ลอจิกแบบขยาย

จึงสรุปได้ว่าวิธีการควบคุมความถี่โหลดที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกทำให้ระบบอยู่ในเสถียรภาพได้ดีที่สุดเนื่องจากสามารถทำให้ความถี่ของระบบมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ได้มากที่สุด ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

4.4 ระบบมีการเปลี่ยนแปลงช่วงสั้น ๆ

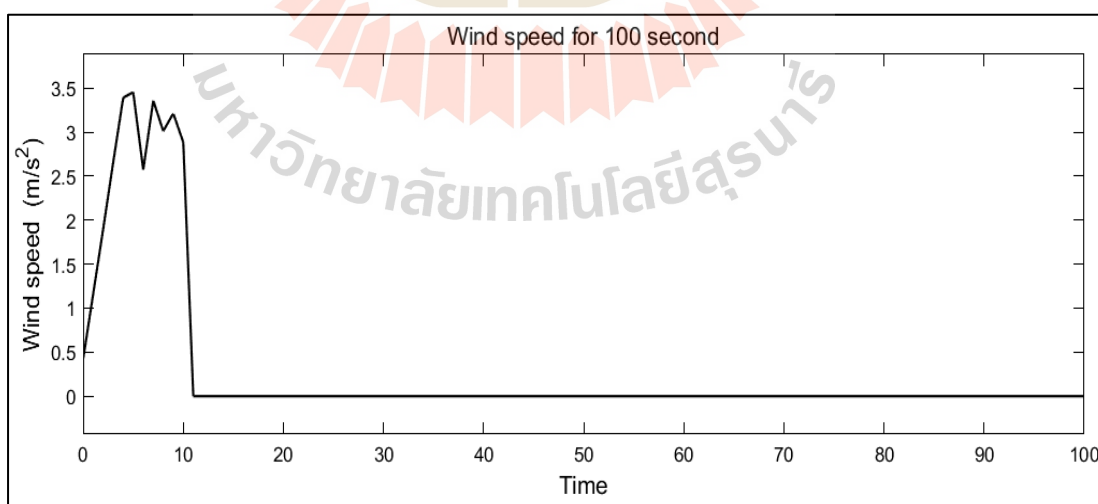
ในกรณีที่ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงสั้น ๆ จะแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมแบบทำให้ระบบกลับสู่เสถียรภาพได้เร็วกว่าเมื่อเกิดการรบกวน ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงสั้น ๆ ใน

หัวข้อนี้จะแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกคือลักษณะของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลง โหลด กังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่สองแสดงให้เห็นถึงผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้น และส่วนสุดท้ายแสดงผลการควบคุมความถี่ โหลดของการควบคุมความถี่ โหลด โดยใช้ตัวควบคุม พีไอ พีไอดี และการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

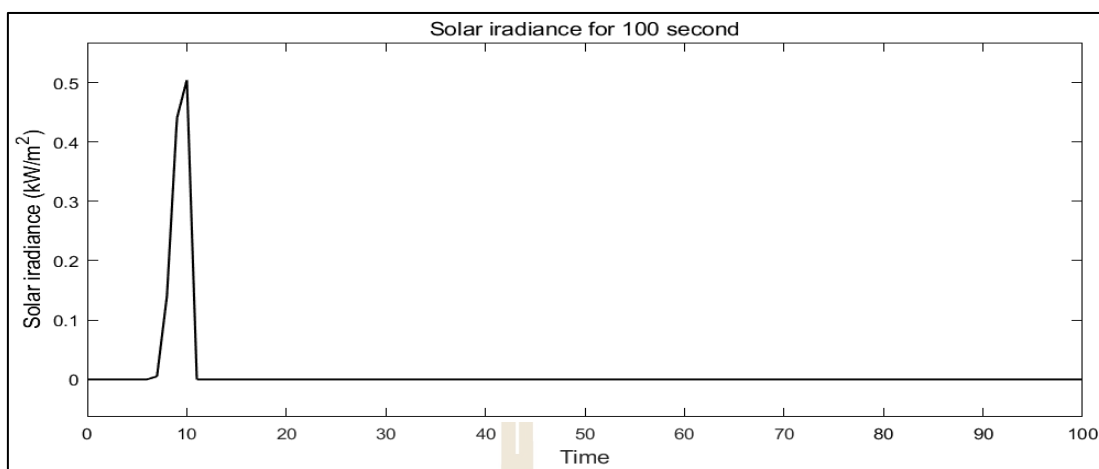
4.4.1 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ

การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกัน คือ กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ โหลด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งสามส่วนขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรรมชาติประกอบด้วย ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.20 และจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจากจากส่วนต่าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม ความเข้มแสง และ โหลดในรูปแบบสัญญาณที่ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน ดังรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.22 ตามลำดับ กำหนดให้ 10 MW มีค่าเท่ากับ 1 p.u.

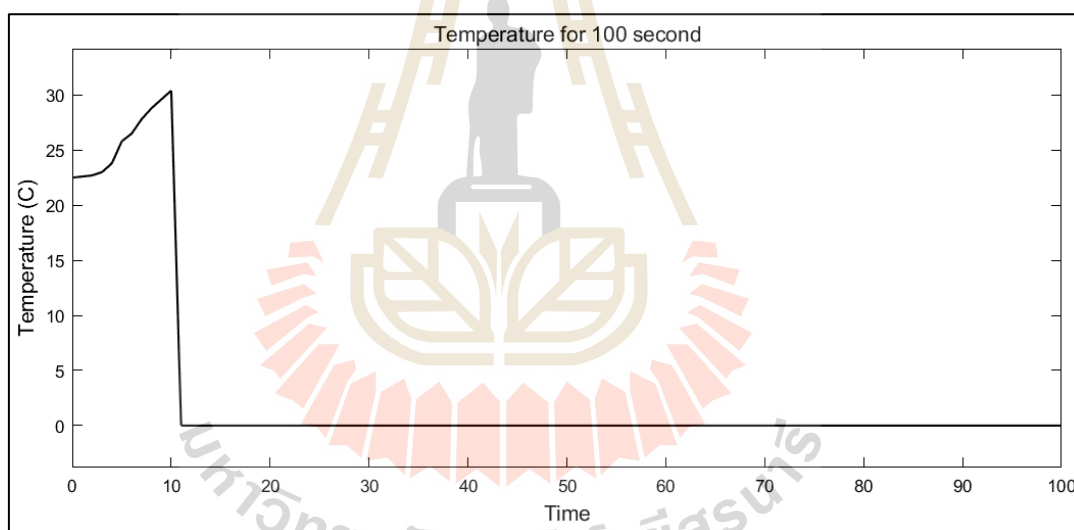
รูปที่ 4.18 แสดงความเร็วลมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเป็นเวลา 100 วินาที โดยอยู่ในช่วงประมาณ 0 m/s^2 ถึง 3.5 m/s^2 และรูปที่ 4.19 แสดงความเข้มแสงอาทิตย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเป็นเวลา 100 วินาทีโดยอยู่ในช่วงประมาณ 0 kW/m^2 ถึง 0.5 kW/m^2 รูปที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบเป็นเวลา 100 วินาทีโดยอยู่ในช่วงประมาณ 22°C ถึง 30°C



รูปที่ 4.18 ความเร็วลมเปลี่ยน

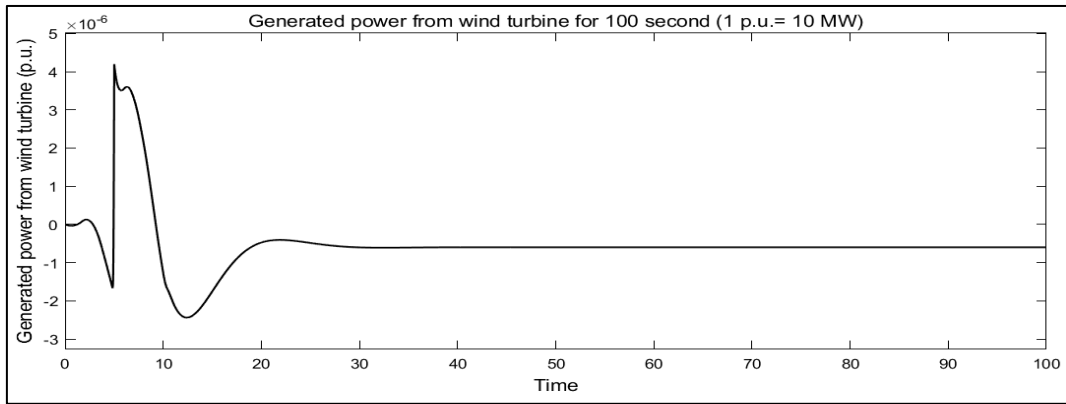


รูปที่ 4.19 ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

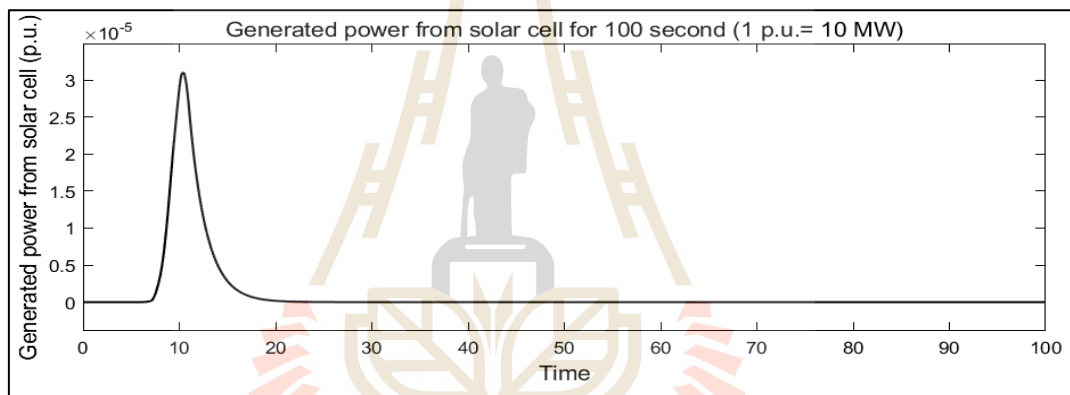


รูปที่ 4.20 อุณหภูมิเปลี่ยน

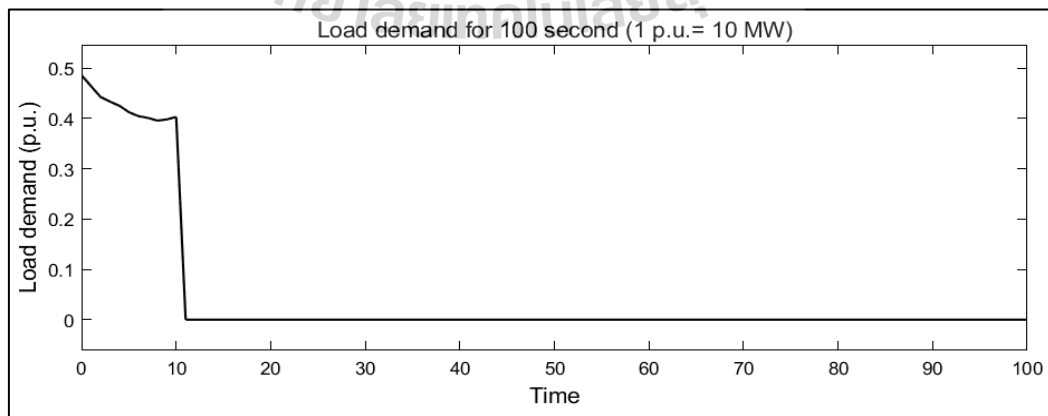
จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 4.18 จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 4.19 และจากรูปที่ 4.23 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของผลตอบสนองของโหลดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.21 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลง



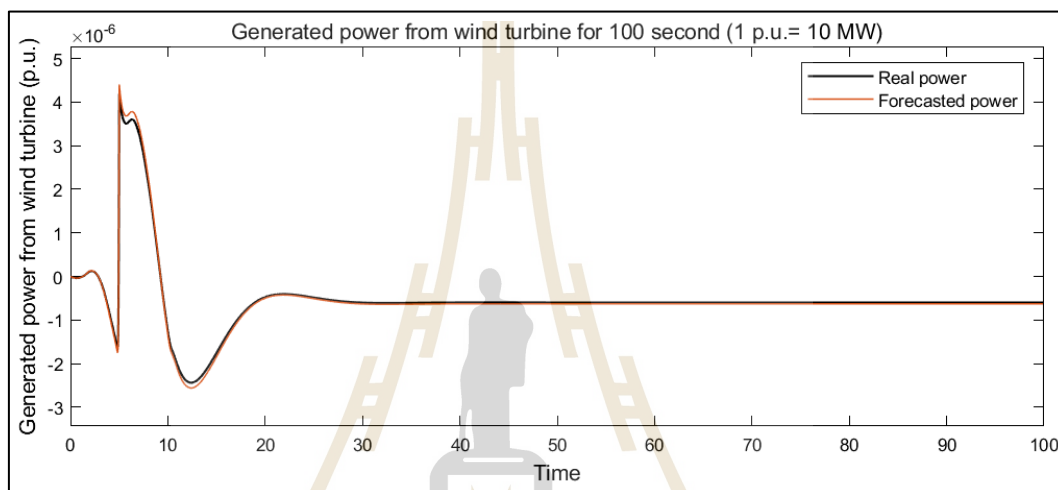
รูปที่ 4.22 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง



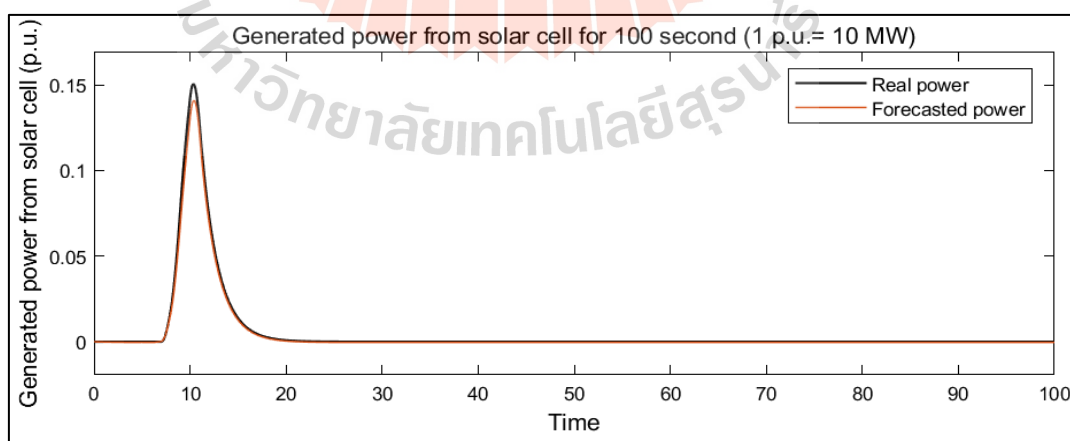
รูปที่ 4.23 กำลังไฟฟ้าโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง

4.4.2 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ

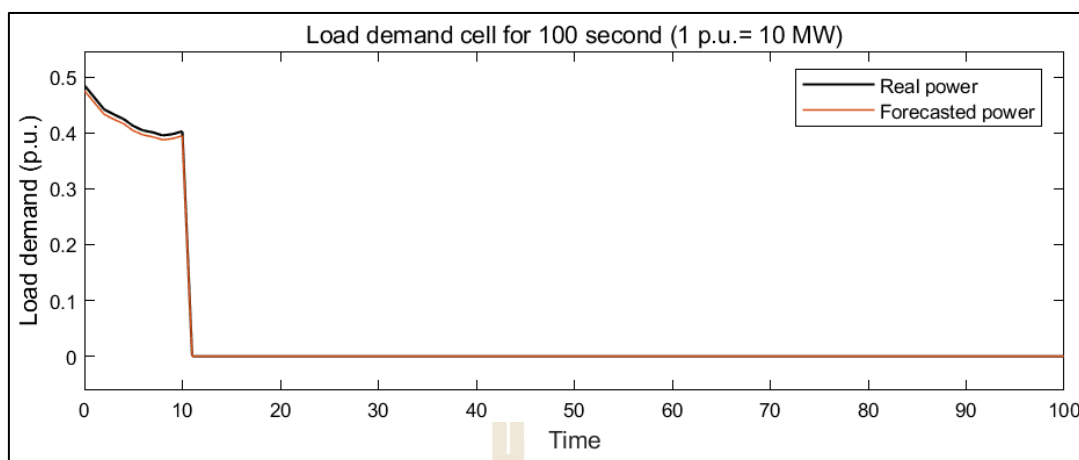
เนื่องจากระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจำเป็นต้องใช้ค่าที่ทำการคาดการณ์ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาอัตราขยายที่เหมาะสมในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการคาดการณ์ของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากส่วนต่าง ๆ ของระบบก่อน ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 4.24 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 4.25 ผลการคาดการณ์โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.24 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม



รูปที่ 4.25 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมเซลล์แสงอาทิตย์



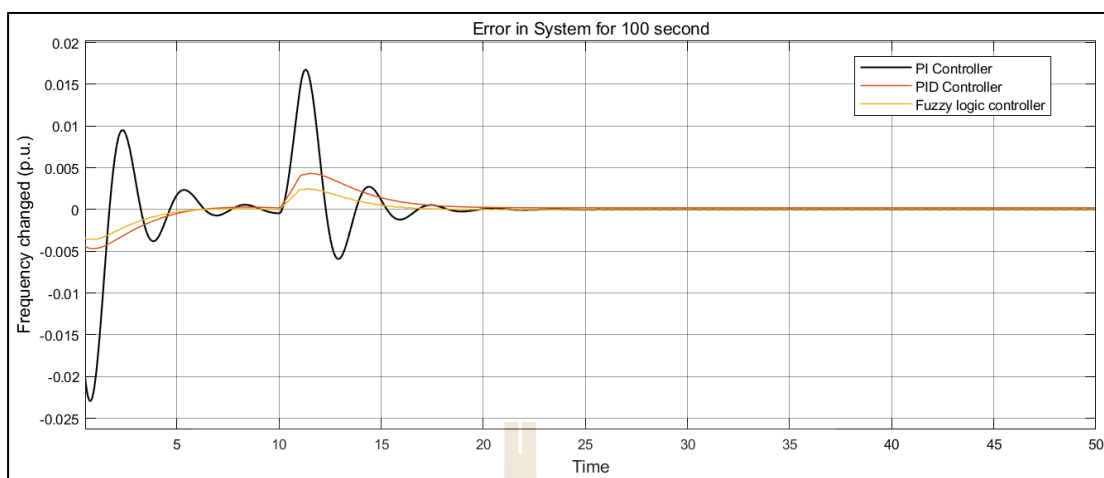
รูปที่ 4.26 ผลการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าโหลด

จากรูปที่ผลการจำลองการคาดการณ์พบว่าค่าผลการคาดการณ์ในรูปแบบสัญญาณที่ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนและค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับที่ได้ทดสอบระบบการคาดการณ์ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ จากนั้นนำผลการคาดการณ์ทั้งหมดมารวมกันเพื่อหาผลรวมของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบต่อไป ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

4.4.3 ผลการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลด

การควบคุมความถี่โหลดในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 วิธี ประกอบด้วย การควบคุมความถี่ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ การควบคุมความถี่ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี และการควบคุมความถี่ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์ ผลของการควบคุมความถี่โหลดที่ได้จากแต่ละระบบจะแสดงในรูปที่ 4.27

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการเปรียบเทียบการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น พบว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอมีค่าการกวัดแกว่งเริ่มต้นสูงมากและมีการกวัดแกว่งออกจากเสถียรภาพ (ออกจากศูนย์) มากที่สุด ต่อมาเป็นระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าการกวัดแกว่งเริ่มต้นต่ำกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไออย่างเห็นได้ชัด และมีการกวัดแกว่งออกจากเสถียรภาพในตลอดระยะเวลาการจำลอง 100 วินาที น้อยกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ และสุดท้ายเป็นระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีซีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์ มีค่าการกวัดแกว่งเริ่มต้นต่ำสุดและมีการกวัดแกว่งออกจากเสถียรภาพต่ำที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 4.27 ผลการคาดการณ์ของการควบคุมความถี่โหลดแบบพีไอ พีไอดี และฟัซซี่ลอจิก

จึงสรุปได้ว่าวิธีการควบคุมความถี่โหลดที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกทำให้ระบบอยู่ในเสถียรภาพได้ดีที่สุดเนื่องจากสามารถทำให้ความถี่ของระบบมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ได้มากที่สุดในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกและสังเกตจากรูปที่ 4.27 พบว่ามีค่าแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับระบบควบคุม พีไอ และพีไอดี อีกทั้งยังเข้าสู่เสถียรภาพ (ค่า frequency changed เท่ากับ 0) เร็วที่สุดอีกด้วย

4.5 เปรียบเทียบผลการจำลอง

จากการจำลองในกรณีที่กำลังไฟฟ้าในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แสดงผลการควบคุมทั้งหมด 3 วิธีการประกอบด้วยวิธีการควบคุมแบบพีไอ วิธีการควบคุมแบบพีไอดี และวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกใช้ใช้การคาดการณ์ช่วยสำหรับการวิเคราะห์

ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาวิธีการควบคุมพีไอ มีค่าแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งสูงที่สุด คือที่ประมาณ -0.0230 p.u. ที่เวลา $t=1$ s เนื่องจากค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมนั้น มีค่า K_p ต่ำ และไม่มี K_i มาช่วยลดแอมพลิจูดในการกวัดแกว่ง ส่วนค่าแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งของวิธีการควบคุมแบบพีไอดีมีค่าประมาณ -0.0048 p.u. และค่าแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งของวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมีค่าประมาณ -0.0031 p.u. และมีประสิทธิภาพในการควบคุมความถี่ของระบบมากที่สุด (ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้ศูนย์มากที่สุด)

ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาวิธีการควบคุมพีไอ มีค่าแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งสูงที่สุด คือที่ประมาณ -0.0230 p.u. ที่เวลา $t=1$ s เนื่องจากค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมนั้น มีค่า K_p ต่ำ และไม่มี K_i มาช่วยลดแอมพลิจูดในการกวัด

แกว่ง ส่วนค่าแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งของวิธีควบคุมแบบพีไอดีมีค่าประมาณ -0.0048 p.u. และค่าแอมพลิจูดของการกวัดแกว่งของวิธีควบคุมแบบพีซีลจิกมีค่าประมาณ -0.0031 p.u. เช่นเดียวกับในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่แตกต่างกันที่หลังจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบแล้วระบบจะกลับเข้าสู่เสถียรภาพโดยสมบูรณ์ (ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับศูนย์) ตัวควบคุมแบบพีไอใช้เวลา 23.6 วินาทีในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพ ตัวควบคุมแบบพีไอดีใช้เวลา 20.3 วินาทีในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพ และตัวควบคุมแบบพีซีลจิกใช้เวลา 17.1 วินาทีในการกลับเข้าสู่เสถียรภาพ จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่า วิธีการควบคุมความถี่แบบพีไอ และวิธีการควบคุมความถี่แบบพีไอดี ในด้านการรักษาเสถียรภาพทางความถี่ไหลลของระบบ ไมโคร กริด

4.6 สรุป

จากผลการจำลองการควบคุมความถี่ไหลล 3 วิธีการคือ (1) ระบบแบบที่ใช้ตัวควบคุมความถี่ไหลลแบบพีไอ (2) ระบบแบบที่ใช้ตัวควบคุมความถี่ไหลลแบบพีไอดี และ (3) ระบบแบบที่ใช้ตัวควบคุมความถี่ไหลล แบบพีซีลจิกร่วมกับการคาดการณ์ นำไปจำลองควบคุมในระบบทดสอบที่เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 กรณี คือ (1) เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (2) เกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ เป็นเวลา 10 วินาที พบว่าวิธีที่ได้แนะนำนั้นมีประสิทธิภาพดีที่สุดในแง่ของเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เสถียรภาพ และแอมพลิจูดของการกวัดแกว่ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในวิธีการที่ได้แนะนำไปนั้นได้มีการปรับขนาดสัญญาณควบคุมโดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่กำลังจะเกิดขึ้นซึ่งได้มาจากการคาดการณ์และค่าความผิดพลาดในขณะนั้นเป็นอินพุตสำหรับวิเคราะห์ด้วยค่าพีซีลจิกดังที่ได้กำหนดไว้ในตาราง ซึ่งต่างจากการควบคุมแบบพีไอ และพีไอดีที่คงที่อัตราขยายตลอดไม่ว่าจะเกิดการรบกวนแบบใดก็ตาม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดโดยใช้การคาดการณ์สำหรับเป็นอินพุตในระบบวิเคราะห์แบบฟuzzyลอจิกซ็องและแสดงรายละเอียดในการจำลองการควบคุมทั้งหมด 3 ระบบได้แก่ (1) การควบคุมความถี่ของระบบที่มีตัวควบคุมอัตโนมัติแบบพีไอ (2) การควบคุมความถี่ของระบบที่มีตัวควบคุมอัตโนมัติแบบพีไอดี (3) การควบคุมความถี่ของระบบที่มีตัวควบคุมอัตโนมัติแบบโดยนำการคาดการณ์กำลังไฟฟ้ามาประยุกต์เป็นอินพุตของระบบควบคุมแบบฟuzzy โดยได้ทำการจำลองนำ 2 กรณีทดสอบที่ได้แก่ (1) กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (2) กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.2 การควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ

การควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดโดยใช้ตัวควบคุมพีไอนั้นเป็นวิธีที่นิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งจะทำงานได้ดีเมื่อมีค่าอัตราขยายที่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งจากผลการจำลองตัวควบคุมพีไอมีสรรณะในการควบคุมความถี่โหลด มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ แบบพีไอดีและฟuzzyลอจิก

5.1.2 การควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี

การควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีนั้นเป็นอีกหนึ่งวิธีที่เป็นที่นิยม ซึ่งจะทำงานได้ดีเมื่อมีค่าอัตราขยายที่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งจากผลการจำลองตัวควบคุมพีไอดีมีสรรณะในการควบคุมความถี่โหลด สูงกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ แต่ในงานวิจัยไม่ได้นำเสนอเนื่องจาก ถ้าออกแบบค่าอัตราขยายอนพันธ์ไม่เหมาะสม จะทำให้ระบบเสถียรภาพได้

5.1.3 การควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกร่วมกับ การคาดการณ์

การควบคุมความถี่โหลดของระบบไมโครกริดโดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก ร่วมกับการคาดการณ์นั้นถูกออกแบบให้สามารถทำงานได้ดีแม้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวน โดยจะใช้การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าเพื่อคาดการณ์หาการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้น โดยการ

การคาดการณ์กำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการคาดการณ์แบบพีชชีลอจิก จากนั้นนำผลการคาดการณ์ที่ได้ไปเลือกสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมจากการรบกวนขณะนั้น ตามที่ได้กำหนดไว้ในตารางกฎพีชชี ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบพีชชีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์นั้นมีสมรรถนะในการควบคุมโหลดดีที่สุด

จากผลการจำลองทั้ง 2 กรณีพบว่าวิธีการควบคุมแบบพีชชีลอจิกร่วมกับการคาดการณ์นั้นมีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในด้านช่วงเวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพและค่าการฟุ้งเกิน ตามด้วยระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอตามลำดับเนื่องจากระบบควบคุมพีชชีมีเสถียรภาพสูง สามารถรองรับอินพุตที่มีความคลุมเคลือได้หลากหลาย ประมวลผลด้วยนิยามหรือกฎของผู้ออกแบบทำให้ไม่มีข้อจำกัดด้านจำนวนอินพุตหรือเอาต์พุต ซึ่งส่งผลให้สามารถออกแบบการทำงานได้หลากหลายให้เหมาะสมกับแต่ละสถานการณ์ และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ทำให้การใช้พีชชีลอจิกเป็นตัวควบคุมจะให้ผลตอบสนองทางด้านเวลาที่รวดเร็วขึ้น และสมรรถนะต่อการหน่วงที่ดีกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลตอบสนองทางด้านเวลา ผลตอบสนองด้านลูกคลื่นสูงสุด ค่าความผิดพลาดผลตอบสนองที่สภาวะคงตัว เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างใช้การควบคุมแบบไม่มีตัวควบคุมอัตโนมัติและแบบใดเป็นตัวควบคุมกับแบบพีชชีลอจิกที่ประยุกต์ร่วมกับการคาดการณ์ในระบบไมโครกริดได้เปรียบเทียบให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกที่ประยุกต์ร่วมกับการคาดการณ์มีค่าสมรรถนะผลตอบสนองทางด้านเวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพและค่าลูกคลื่นสูงสุดให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าทำให้ระบบมีคุณภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ดีและน่าเชื่อถือมากขึ้นจะส่งผลที่ดีต่อคุณภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือของระบบมากกว่า

รายการอ้างอิง

- Abhilash, T., & Pavani, A. P. (2017). Multi area load frequency control of power system involving renewable and non-renewable energy sources. 2017 **Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)**.
- Alomoush, M. (2010). Fractional Calculus-Based Optimal Controllers Of Automatic Voltage Regulator In Power System. *Control and Intelligent Systems*, 38(1). Alomoush, M. (2010). **Fractional Calculus-Based Optimal Controllers Of Automatic Voltage Regulator In Power System**. *Control and Intelligent Systems*, 38(1).
- Barba, S. L., Torre, M. D., & Ordiales, M. (2012). New challenges for operation of systems with large renewable capacity. **2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting**.
- Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., & Crossley, P. (2009). *Microgrids and active distribution networks*. Stevenage: Institution of Engineering and Technology.
- Conley, D. (2002). *Fuzzy logic*. Kansas City: Andrews McMeel Pub.
- Das, R., & Winter, S. (2016). Detecting Urban Transport Modes Using a Hybrid Knowledge Driven Framework from GPS Trajectory. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 5(11), 207.
- Dong, L. (2016). Decentralized load frequency control for an interconnected power system with nonlinearities. **2016 American Control Conference (ACC)**.
- Diggavi, K. C., Pinnapureddy, R., & Rao, K. J. (2017). Analysis of load frequency control for multi area system using PI and fuzzy logic controllers. **2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)**
- Doumbia, M. L., & Agbossou, K. (2009). *Photovoltaic*. INTECH Open Access Publisher. Erol, H., Sezer, H., & Ayasun, S. (2017). Computation of all stabilizing PI controller parameters of hybrid load frequency control system with communication time delay. **2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG)**.

- Garcia, L. (2002). The wind turbine: (as part of an electrical power system for a house which hasnt got ETSA power lines). Adelaide. S. Aust.: Luis Garcia.
- Gupta, B. R. (2006). Power system: Analysis and design. New Delhi: S. Chand & Comp.
- Indirect Adaptive Fuzzy Load Frequency Control. (2017). **Power System Load Frequency Control**, 213-216.
- Jain, S. K., Bhargava, A., & Pal, R. K. (2015). Three area power system load frequency control using fuzzy logic controller. **2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)**.
- Jagatheesan, K., Anand, B., Dey, N., Gaber, T., Hassanien, A. E., & Kim, T. (2015). A Design of PI Controller using Stochastic Particle Swarm Optimization in Load Frequency Control of Thermal Power Systems. **2015 Fourth International Conference on Information Science and Industrial Applications (ISI)**.
- Janfeshan, K., Masoum, M. A., & Deilami, S. (2014). V2G application to frequency regulation in a microgrid using decentralized fuzzy controller. **Proceedings of 2014 International Conference on Modelling, Identification & Control**.
- Juang, C., & Lu, C. (n.d.). Power system load frequency control by evolutionary fuzzy PI controller. **2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE Cat. No.04CH37542)**.
- Kamble, S. V., & Akolkar, S. M. (2017). Load frequency control of micro hydro power plant using fuzzy logic controller. **2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)**.
- Kimbark, E. W. (1995). Power system stability. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Koley, I., Bhowmik, P. S., & Datta, A. (2017). Load frequency control in a hybrid thermal-wind-photovoltaic power generation system. **2017 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES)**.
- Kumar, A., Kumar, A., & Chanana, S. (2010). Genetic fuzzy PID controller based on adaptive gain scheduling for load frequency control. **2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India**

- Lehyeh, E. A., Hinti, I. A., Harb, A., & Alsafasfeh, Q. (2018). Stability of the Jordanian electrical system in the presence of intermittent renewable resources. **2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC).**
- Liu, H., & Qian, D. (2015). Sliding-mode-based disturbance rejection control of nonlinear power systems with renewable sources. **2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS).**
- Li, W., Zhang, X., & Li, H. (2010). A novel digital Automatic Voltage Regulator for synchronous generator. **2010 International Conference on Power System Technology.**
- Liu, Z., Li, G., Ding, Y., & Liu, C. (2013). Transient stability studies of power system with shared transmission of wind power and thermal power. **2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013).**
- Logic and Fuzzy Systems. (2010). Fuzzy Logic with Engineering Applications, 117-173.
- Ma, F. (2014). An improved fuzzy PID control algorithm applied in liquid mixing system. **2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA).**
- Optimization of dimensions of the valve chamber of the control valves of steam turbine. (2018). **Engineering Mechanics 2018.**
- Patel, N. G., & Dr. A. M. Prabhakar Dr. A. M. Prabhakar. (2012). Analysis of Rain Water Harvesting System for Artificial Recharge of Groundwater for Gandhinagar District, Gujarat. **Paripex - Indian Journal Of Research**, 3(7), 215-216.
- Qi, J., & Liu, Y. (2010). PID control in adjustable-pitch wind turbine system based on fuzzy control. **2010 The 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation.**
- Sonmez, S., & Ayasun, S. (2016). Stability Region in the Parameter Space of PI Controller for a Single-Area Load Frequency Control System With Time Delay. **IEEE Transactions on Power Systems**, 31(1), 829-830.
- Sheikh, A. F., & Starrett, S. K. (2015). Comparison of input signal choices for a fuzzy logic-based power system stabilizer. **2015 North American Power Symposium (NAPS).**
- Thierry Van Cutsem. (2018). ELEC0047 - Power system dynamics, control and stability Turbines and speed governors.

- Vieira, R., Gomide, F., & Ballini, R. (2018). Kernel Evolving Participatory Fuzzy Modeling for Time Series Forecasting. **2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)**
- Yacar, D., Tejada-Arango, D. A., & Wogrin, S. (2018). Storage allocation and investment optimisation for transmission-constrained networks considering losses and high renewable penetration. **IET Renewable Power Generation**, 12(16), 1949-1956.
- Yaday, V., & Tayal, V. K. (2018). Optimal Controller Design for a DC Motor using PID Tuner. **2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)**.
- Yousef, H. A. (2017). Load Frequency Control of Power Systems. **Power System Load Frequency Control**, 3-32.
- Zgurovsky, M., & Zaychenko, Y. (2017). The application of fuzzy neural networks in corporations bankruptcy risk forecasting. **2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)**.



ภาคผนวก ก

พารามิเตอร์ของระบบทดสอบและโค้ดสร้างระบบการเรียนรู้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบไมโครกริด

ในการจำลองการควบคุมความถี่โหลด ของระบบไมโครกริดด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งระบบจำลองนี้ประกอบขึ้นด้วยระบบไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยเลือกใช้การเปลี่ยนแปลงของกำลังแบบทันทีทันใด

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

	ขนาด	หน่วย
พิกัด โรงไฟฟ้า	10	MW
ความถี่	50	Hz
การควบคุมความเร็ว	4	%
ค่าคงตัวความเฉื่อย	10	Sec
ค่าคงตัวของตัวควบคุมความเร็ว	0.08	Sec
ค่าคงตัวของกังหันน้ำ	0.3	Sec
ค่าคงตัวของกังหันลม	4	Sec
ค่าคงตัวของโซลาร์เซลล์	1.8	Sec

ก.2 โค้ดคำสั่งการสร้างอินพุตสำหรับระบบการคาดการณ์ไหล

```

clc

training = csvread('CI_Assignment_TrainingData.csv', 1,1); %reading the file
testing=csvread('CI_Assignment_TestingData.csv', 1,1); %reading the file

%removing outliers:

P = training(:,2);
P1=testing(:,2);

figure('name','Training Data With Outliers');
plot(P,'b*');
Ph=P;
title('Training Data With Outliers')
figure('name','Testing Data With Outliers');
plot(P1,'b*');
title('Testing Data With Outliers')
Q1=prctile(P,25);
Q3=prctile(P,75);
range=[Q1-1.5*(Q3-Q1),Q3+1.5*(Q3-Q1)];
position=[find(P>range(2)) find(P<range(1))];
P(position)=[]; % deleting the outliers

figure
plot(P,'r*');
title('Training Data without Outliers')

figure
subplot(1,2,1)
hist(Ph)
title('Training Data With Outliers')

subplot(1,2,2)
hist(P)
title('Training Data without Outliers')

% developng a fuzzy system Training
training = removerows(training, position);

```

```

T= training(:,1);
D= training(:,2);
t=3:(length(training)-1);
training=[T(t-2), T(t-1),T(t),D(t-2), D(t-1), D(t), D(t+1)];
trainC = corrcof(training); % correlation matrix
%%% defining the fuzzy inputs and outputs
trainingInputs(:,1) = training(:,2);
trainingInputs(:,2) = training(:,6);
trainingOutputs = training(:,7);
figure
hist(trainingInputs(:,1))
title('Demand Histogram ')
figure
hist(trainingInputs(:,2))
title('Temperature Histogram')
figure
hist(trainingOutputs)
title('Demand Histogram (T+1)')
%%%%%%%%% removing outliers from the testing %%%%%%%%%%
%%%%%%%%% removing outliers from the testing %%%%%%%%%%
P1h=P1;
Q1=prctile(P1,25);
Q3=prctile(P1,75);
range=[Q1-1.5*(Q3-Q1),Q3+1.5*(Q3-Q1)];
position=[find(P1>range(2)) find(P1<range(1))];
P1(position)=[]; % deleting the outliers
figure
plot(P1,'r*');
title('Testing Data without Outliers')
figure
subplot(1,2,1)

```

```

hist(P1h)
title('Testing Data With Outliers')
subplot(1,2,2)
hist(P1)
title('Testing Data without Outliers')
% developng a fuzzy system testing
testing = removerows(testing, position);
T= testing(:,1);
D= testing(:,2);
t=3:(length(testing)-1);
testing=[T(t-2), T(t-1),T(t),D(t-2), D(t-1), D(t), D(t+1)];
testC = corcoef(testing); % correlation matrix
%%% defining the fuzzy inputs and outputs
testingInputs(:,1) = testing(:,1);
testingInputs(:,2) = testing(:,6);
testingOutputs = testing(:,7);
fuzzSys= readfis('newdesignload.fis');
futureload = evalfis(trainingInputs,fuzzSys);
figure
n = 1:length(trainingInputs);
plot(n,trainingOutputs,n,futureload)
xlabel('n')
ylabel('LoadDemand')
title('Relationship between Training Output LoadDemand with Predicted')
legend('Training Load','Predicted Load')
%RErr = (sum((abs(futureload - trainingOutputs))./futureload))./length(futureload)
[n,x] = hist(trainingOutputs);
[n2,x2] = hist(futureload);
bar(x,n,'hist')
hold on; h=bar(x2,n2,'hist'); hold off
set(h,'facecolor','c')

```

```

%%%%%%%% with testing %%%%%%%%%
fuzzSys= readfis('newdesignload.fis');
futureload= evalfis(testingInputs,fuzzSys);
figure
n = 1:length(testingInputs);
plot(n,testingOutputs,n,futureload)
xlabel('t (s)')
ylabel('Load demand (W)')
title('Relationship between Testing Output load with Predicted')
legend('Testing load','Predicted load')
RErr = (sum((abs(futureload - testingOutputs))./futureload))./length(futureload)

```

ก.3 โค้ดคำสั่งการสร้างอินพุตสำหรับระบบการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากกังหันลม

```

clc
training = csvread('CI_WP_trainingData.csv', 1,1); %reading the file
testing=csvread('CI_WP_testingData.csv', 1,1); %reading the file
%removing outliers:
WP = training(:,2);
WP1=testing(:,2);
figure('name','Training Data With Outliers');
plot(WP,'b*');
WPh=WP;
title('Training Data With Outliers')
figure('name','Testing Data With Outliers');
plot(WP1,'b*');
title('Testing Data With Outliers')
Q1=prctile(WP,25);
Q3=prctile(WP,75);
range=[Q1-1.5*(Q3-Q1),Q3+1.5*(Q3-Q1)];
position=[find(WP>range(2)) find(WP<range(1))];
WP(position)=[]; % deleting the outliers

```



```

figure
plot(WP,'r*');
title('Training Data without Outliers')
figure
subplot(1,2,1)
hist(WPh)
title('Training Data With Outliers')
subplot(1,2,2)
hist(WP)
title('Training Data without Outliers')
% developng a fuzzy system Training
training = removerows(training, position);
T= training(:,1);
D= training(:,2);
t=3:(length(training)-1);
training=[T(t-2), T(t-1),T(t),D(t-2), D(t-1), D(t), D(t+1)];
trainC = corrcoeff(training); % correlation matrix
%%% defining the fuzzy inputs and outputs
trainingInputs(:,2) = training(:,6);
trainingInputs(:,1) = training(:,3);
trainingOutputs = training(:,7);
figure
hist(trainingInputs(:,1))
title('Demand Histogram ')
figure
hist(trainingInputs(:,2))
title('Temperature Histogram')
figure
hist(trainingOutputs)
title('Demand Histogram (T+1)')
%%%%%%%%% removing outliers from the testing %%%%%%%%%%

```

```

WP1h=WP1;
Q1=prctile(WP1,25);
Q3=prctile(WP1,75);
range=[Q1-1.5*(Q3-Q1),Q3+1.5*(Q3-Q1)];
position=[find(WP1>range(2)) find(WP1<range(1))];
WP1(position)=[]; % deleting the outliers

figure
plot(WP1,'r*');
title('Testing Data without Outliers')

figure
subplot(1,2,1)
hist(WP1h)
title('Testing Data With Outliers')
subplot(1,2,2)
hist(WP1)
title('Testing Data without Outliers')

% developng a fuzzy system testing
testing = removerows(testing, position);
T= testing(:,1);
D= testing(:,2);
t=3:(length(testing)-1);
testing=[T(t-2), T(t-1),T(t),D(t-2), D(t-1), D(t), D(t+1)];
testC = corrcoef(testing); % correlation matrix

%%% defining the fuzzy inputs and outputs
testingInputs(:,2) = testing(:,6);
testingInputs(:,1) = testing(:,1);
testingOutputs = testing(:,6);
fuzzSys= readfis('newdesignwind.fis');
futureWP = evalfis(trainingInputs,fuzzSys);
RErr = (sum((abs(futureWP - trainingOutputs))./futureWP))./length(futureWP)
[n,x] = hist(trainingOutputs);

```

```

[n2,x2] = hist(futureWP);
bar(x,n,'hist')
hold on; h=bar(x2,n2,'hist'); hold off
set(h,'facecolor','c')
%%%%%%%% with testing %%%%%%%%%
fuzzSys= readfis('newdesignwind.fis');
futureWP= evalfis(testingInputs,fuzzSys);
%%%%%%%% remove error%%%%%%%%
futureWP(1)=[];
futureWP(2)=[];
testingOutputs(201)=[];
testingOutputs(200)=[];
for a=2:1:199
error(a,1)=abs((futureWP(a,1)-testingOutputs(a,1))/testingOutputs(a,1));
if error(a,1)==inf
error(a,1)=0;
elseif error(a,1)>10
error(a,1)=0;
end
end
figure
n = 1:length(testingInputs)-2;
plot(n,testingOutputs,n,futureWP)
xlabel('n')
ylabel('LoadDemand(t+1)')
title('Relationship between Testing Output load with Predicted')
legend('Testing load','Predicted load')
Xerror = sum(error)/199

```

ก.4 โค้ดคำสั่งการสร้างอินพุตสำหรับระบบการคาดการณ์กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

```

error=zeros(236,1);

clc

training = csvread('CI_SP_trainingData.csv', 1,1); %reading the file
testing=csvread('CI_SP_testingData.csv', 1,1); %reading the file

%removing outliers:
SP = training(:,2);
SP1=testing(:,2);
figure('name','Training Data With Outliers');
plot(SP,'b*');
SPH=SP;
title('Training Data With Outliers')
figure('name','Testing Data With Outliers');
plot(SP1,'b*');
title('Testing Data With Outliers')
Q1=prctile(SP,25);
Q3=prctile(SP,75);
range=[Q1-1.5*(Q3-Q1),Q3+1.5*(Q3-Q1)];
position=[find(SP>range(2)) find(SP<range(1))];
SP(position)=[]; % deleting the outliers
figure
plot(SP,'r*');
title('Training Data without Outliers')
figure
subplot(1,2,1)
hist(SPh)
title('Training Data With Outliers')
subplot(1,2,2)
hist(SP)

```

```

title('Training Data without Outliers')

% developng a fuzzy system Training
training = removerows(training, position);
T= training(:,1);
D= training(:,2);
t=3:(length(training)-1);
training=[T(t-2), T(t-1),T(t),D(t-2), D(t-1), D(t), D(t+1)];
trainC = corrcoef(training); % correlation matrix
%%% defining the fuzzy inputs and outputs
trainingInputs(:,2) = training(:,6);
trainingInputs(:,1) = training(:,3);
trainingOutputs = training(:,7);
figure
hist(trainingInputs(:,1))
title('Demand Histogram ')
figure
hist(trainingInputs(:,2))
title('Temperature Histogram')
figure
hist(trainingOutputs)
title('Demand Histogram (T+1)')
%%%%%%%%% removing outliers from the testing %%%%%%%%%%
SP1h=SP1;
Q1=prctile(SP1,25);
Q3=prctile(SP1,75);
range=[Q1-1.5*(Q3-Q1),Q3+1.5*(Q3-Q1)];
position=[find(SP1>range(2)) find(SP1<range(1))];
SP1(position)=[]; % deleting the outliers
figure
plot(SP1,'r*');

```

```

title('Testing Data without Outliers')

figure

subplot(1,2,1)

hist(SP1h)

title('Testing Data With Outliers')

subplot(1,2,2)

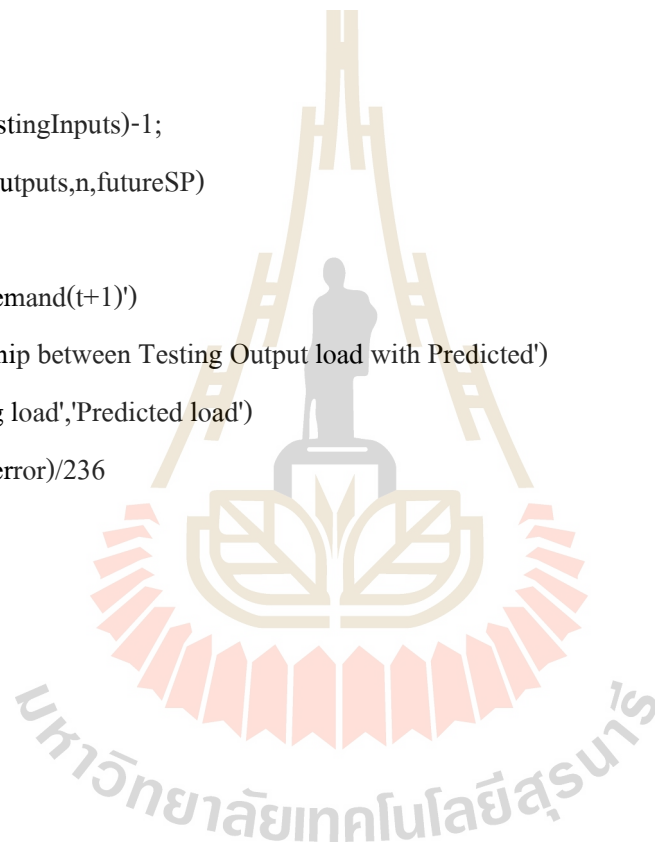
hist(SP1)

title('Testing Data without Outliers')

% developng a fuzzy system testing
testing = removerows(testing, position);
T= testing(:,1);
D= testing(:,2);
t=3:(length(testing)-1);
testing=[T(t-2), T(t-1),T(t),D(t-2), D(t-1), D(t), D(t+1)];
testC = corrcoef(testing); % correlation matrix
%%% defining the fuzzy inputs and outputs
testingInputs(:,2) = testing(:,6);
testingInputs(:,1) = testing(:,1);
testingOutputs = testing(:,6);
fuzzSys= readfis('newdesignsolar.fis');
futureSP = evalfis(trainingInputs,fuzzSys);
RErr = (sum((abs(futureSP - trainingOutputs))./futureSP))./length(futureSP)
[n,x] = hist(trainingOutputs);
[n2,x2] = hist(futureSP);
bar(x,n,'hist')
hold on; h=bar(x2,n2,'hist'); hold off
set(h,'facecolor','c')
%%%%%%%% with testing %%%%%%%%%
fuzzSys= readfis('newdesignsolar.fis');
futureSP= evalfis(testingInputs,fuzzSys);
%%%%%%%% remove error%%%%%%%%

```

```
futureSP(1)=[];
testingOutputs(237)=[];
for a=2:1:236
error(a,1)=abs((futureSP(a,1)-testingOutputs(a,1))/testingOutputs(a,1));
if error(a,1)==inf
error(a,1)=0;
end
end
figure
n = 1:length(testingInputs)-1;
plot(n,testingOutputs,n,futureSP)
xlabel('n')
ylabel('LoadDemand(t+1)')
title('Relationship between Testing Output load with Predicted')
legend('Testing load','Predicted load')
Xerror = sum(error)/236
```





ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Junhuathon, N. and Marungsri, B. (2018). Planning for Battery Energy Storage Systems Control to Enhance Stability of the Microgrid using Power Forecasting. **GMSARN International Journal (2019) Vol. 13(1):** pp.45-51.

Junhuathon, N., & Marungsri, B. (2018). Optimal Location and Size for the Battery Energy Storage System Installation in a Microgrid. **Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA 2018).**

นิธิกร จันท์หัวโทน, บุญเรืองมะรังศรี. (2018). การปรับปรุงการควบคุมความถี่โหลดที่ใช้ระบบพลังงานหมุนเวียนแบบผสม โดยใช้แบคเตอร์ที่มีตัวควบคุมแบบ PI. **การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11.**

นิธิกร จันท์หัวโทน, บุญเรืองมะรังศรี. (2018). การใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อคาดการณ์พลังงานระบบไฟฟ้าเพื่อประเมินออกแบบ ระบบไมโครกริดที่ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานหลัก. **การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14**



Planning for Battery Energy Storage Systems Control to Enhance Stability of the Microgrid using Power Forecasting

Nitikorn Junhuathon and Boonruang Marungsri*

Abstract— A microgrid system which uses renewable energy has to enhance the system stability because the fluctuation of renewable energy source in the microgrid system may damage the system. Therefore, this paper proposes a method to strengthen the stability of a microgrid system by using planning to control the Battery Energy Storage System (BESS). The proposed method aims (i) to forecast power of the system based on the previous information by using Artificial Neural Network (ANN), (ii) to analyze the stability and to select the operation mode for BESS by using load flow analysis, and (iii) to control the BESS according to the appropriate process from part (i) and part (ii) for enhancing the system stability. The IEEE 13 node standard test system has been used to evaluate the proposed method, and the system has been modified to the off-grid system which uses hybrid renewable energy resources including wind and solar energy sources. The simulation was performed using MATLAB. By using the proposed method, the simulation results show that the system stability obtaining from the proposed method is better than the conventional controlling method because the proposed method can maintain the voltage in the range belong to the IEEE 1547 standard. The study results also showed that an accurate power forecast could manage microgrid effectively.

Keywords— Power forecasting, BESS, battery control, steady-state stability.

1. INTRODUCTION

The microgrid system which uses Renewable Energy Resource (RER) to provide energy has to install BESS for supplying load when load demand over generated power from RER. This system requires voltage control and frequency control for prevented power system instability by the power fluctuation. Power system instability can be classified into three types, i.e., (i) steady-state instability, (ii) transient instability and (iii) dynamic instability. For the off-grid system, the steady-state instability has been the most interesting because such an event can easily occur by load and generated power from RER slow change.

For a decade, researchers have been focused on BESS control to improve the stability of a microgrid system which was fluctuated by RER and load demand using BESS. Optimal BESS control for the microgrid system which uses RER has many methods such as voltage stability were improved by optimal active power and reactive power output control of storage battery system, microgrid with RER was controlled by Optimal BESS control [1]-[3].

The objective of BESS control is mainly focused to supply enough power to the system all the time. However, a BESS cannot always provide enough power to the system due to the fluctuation of renewable energy generation sources and leads to instability of a microgrid

system. Recently, system stability improvement is widely considered.

Forecasting technique is interesting to use to solve many problems in a power system. Such as forecasting the wind power curve from inconsistent data and forecasting the photovoltaic power using the artificial neural network. The PV distributed generation is forecasted in consideration of its effects on load forecasting [4]-[6]. Therefore, power forecasting is an attractive technique to manage the microgrid system.

The planning to control an insufficient power from BESS to maintain the stability of a microgrid system using the power forecast is proposed in this paper. The rest of the research work structured as follows: In section 2 details about the theory of power forecasting. A comparison of a learning method for power forecasting shown in section 3. Section 4 presents the voltage standard and BESS control modes. A case study and the simulation results along with discussion presented in section 5. Finally, the conclusion of the paper shown in section 6.

2. POWER FORECASTING

Many techniques can be applied to power forecasting such as a short-term load forecasting based on wavelet theory, and a load power forecasting based on feedforward Artificial Neural Network (ANN) [7], [8]. This paper, power forecasting based on ANN has been used to forecast wind power generation, PV power generation, and load demand. The accuracy of power forecasting depends on using into account all essential factors from the system to forecast.

Power Forecasting from Wind Turbine

A wind turbine which use to convert the kinetic energy of the airflow to mechanical energy. After that, the

N Junhuathon is with the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

B Marungsri is with the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

* Corresponding author: B. Marungsri, E-mail: bmslvce@sut.ac.th.

mechanical energy is converted into electrical energy by the generator in a wind turbine. The influential factors of generated power from the wind turbine are wind speed and the air density which depends on temperature [9]. Electrical power generated from wind power can be expressed as equation (1).

$$P_{wind} = f(w_s V + w_a A) \tag{1}$$

where P_{wind} = generated power from a wind turbine (W)
 w_s = weight of wind speed
 V = wind speed (m/s)
 w_a = weight of air density
 A = air density (kg/m³)

Power Forecasting from PV

A solar cell is used to generate electrical power from sunlight. Nowadays, many types of solar cell panel have been available for electrical power generation. However, power generation from solar cell depends on the two influential factors, i.e., sunlight irradiation and temperature. [10]. Electrical power generated from the solar cell can be expressed as equation (2).

$$P_{solar} = f(W_i T + W_r I) \tag{2}$$

where P_{solar} = generated power from the solar panel (W)
 w_i = weight of the temperature
 T = temperature (°C)
 w_r = weight of irradiance
 I = irradiance (W/m²)

Load Forecasting

In this work, load forecasting has been focused into two factors, i.e., dry bulb and dew point. because of one-day forecasting. Although, some researchers have focused on longtime forecasting [11]. However, short time forecasting is concentrated in this study. The relation can be expressed as equation (3)

$$P_{load} = f(w_{dry} D_r + w_{dew} D_e) \tag{3}$$

where P_{load} = load demand (W)
 w_{dry} = weight of the dry bulb
 D_r = dry bulb (°C)
 w_{dew} = weight of dew point
 D_e = dew point (°C)

Artificial Neural Network

ANN is a mathematic model or a computer model for Processing Information by connectionist calculation. The

basic concept of this technique is derived from the bioelectric networks study inside the brain which has neural cells and synapse. Each neural cell has bias and between cell is connected by weight. Bias and weight can change according to the learning system of ANN. The infrastructure of ANN has three layers as following.

1. Input layer, information is modified into a specified range and put to the input layer.
2. Hidden layer, the number of layers and node in the hidden layer depends on the complexity of the problem. If the hidden layer has many layer and node, this procedure will also use a long time for calculating.
3. Output layer. The results are showed in this layer following Fig.1 [12], [13].

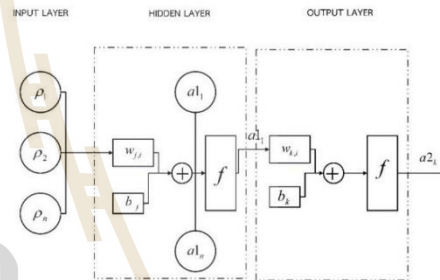


Fig.1. The procedure of the neural network.

Moreover, a_{1j} and a_{2k} are depending on the complexity of the problem as shown in equation (4) and (5).

$$a_{1j} = f\left(\sum_{i=1}^m (w_{f,i}) + b_j\right) \tag{4}$$

$$a_{2k} = f\left(\sum_{i=1}^m (w_{k,i}) + b_k\right) \tag{5}$$

where ρ_i = input
 a_{1j} = results from the calculation in the hidden layer
 a_{2k} = results from output layer
 w = weight
 b = bias
 $f(c)$ = transfer function

The procedure of ANN is divided into 2 part following

1. Learning part: Historical information is put into the learning system to create a neural network which use to forecast output by the internal relation between input and target values. Learning procedure is divided into 2 part included (1) feedforward calculation from input to hidden to output (2) feed backward calculation for adjusting weight and bias

2. Testing part: Another input is tested with a neural network which creat in learning the part and use feeds forward calculation for adjusting the weight of each input.

Input information is divided into 3 part for use in the learning procedure, testing procedure and validation which check the accuracy of forecasts. If all data for learning is not accurate, the forecasting results are not accurate. The learning processes have many methods such as Scale Conjugate Gradient method (SCG), Levenberg-Marquardt method (LM) and Bayesian Regularization method(BR) [13]. This paper will show to compare with each method on the next topic.

3. COMPARING LEARNING METHODS

This paper, a comparison between the three learning methods, i.e., SCG, LM, and BR, cooperation with ANN for load forecasting is presented. The forecasting period is 30 days or 720 hours. ANN shows the appropriate learning method for power forecasting. The input and output are separated into three parts including training, testing, and validation. Dry bulb and dew points are the input and load of a system is the output for load forecasting. The information is separated into three parts 70%, 20% and 10% for training, a validation, and testing, respectively. This procedure is done for selecting the most appropriate learning method for power forecasting. All the analytical works are done via MATLAB software version R2017a. The results of load forecasting from each learning methods are shown in Fig.2. As seen from load forecasting results, the most appropriate learning method is the BR method because of the less error following Table 1.

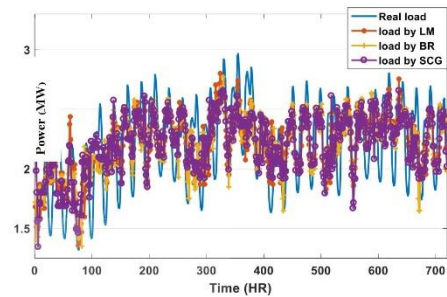
Table 1. The error of load forecasting by ANN using LM BR and SCG

Learning method	Error (%)
LM	9.43
BR	8.98
SCG	9.64

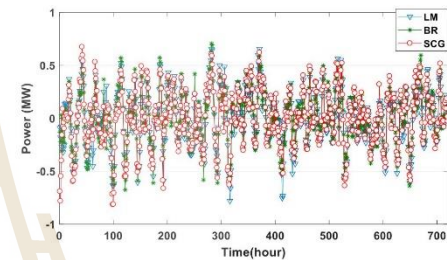
4. VOLTAGE STANDARD AND BESS CONTROL MODE

Voltage Standard

In this paper, voltage standard is set according to the IEEE 1547 standard as shown in Table 2 [14]. The voltage level of each node should maintain between 0.88 p.u. to 1.10 p.u. Otherwise, the power outage may be occurring on the system.



(a)



(b)

Fig.2. (a) Load forecasting using LM BR and SCG methods (b) Error from load forecasting using LM BR and SCG.

Table 2. Clearing Time

Voltage Range (p.u.)	Clearing Time (sec)
$V < 0.50$	0.16
$0.50 \leq V < 0.88$	2.00
$1.10 < V < 1.20$	1.00
$1.20 \leq V$	0.16

Power flow analysis

For BESS control planning, power forecasting with power flow analysis has been used to simulate a state of the study system.

Power flow analysis procedures are as follows [15].

1. Determine the element values for the passive network components.
2. Determine the locations and the values of all complex power loads.
3. Determine the generation specifications and the constraints.
4. Develop the mathematical model for describing power flow in the power network.
5. Solve the voltage profile for the network.
6. Solve the power flows and power losses in the network.
7. Check for constraint violations

In this paper, voltage each node has been analyzed by equation (6)

$$V_i^{(k+1)} = \frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{(k)}} + \sum y_{ij} V_j^{(k)} \quad (6)$$

where V_i = voltage at bus i (p.u.)
 P_i^{sch} = real power at bus i (p.u.)
 Q_i^{sch} = reactive power at bus i (p.u.)

The power forecasted using ANN have been analyzed by power flow analysis. The voltage level of each node has been considered for selecting the appropriate mode to control BESS in maintaining the stability of the power system.

Battery controller

A planning method of BESS control for an off-grid system has proposed in this paper. Power forecasting and load flow analysis have used to forecasting and analyzing power and voltage levels on the system. The

reason is due to highly fluctuates of power producing from RER. Power forecasting and voltage level have been examined to use for BESS control. BESS control can be divided into two modes including: (1) mode 1 is BESS have enough power to maintain the system stability and (2) mode 2 is BESS have enough power to maintain the system stability. For mode 1, if the power generating from RER is higher than the load demand, then the BESS will be charged as long as State of Charge (SOC) does not exceed 80% (depending on the type of battery) for the longer lifespan of BESS [16]. If the BESS is fully charged (i.e., Soc higher than 80%) then the BESS will be disconnected itself from the system. If the load demand is higher than the generating power from RER, then the BESS will be connected itself to the system. For mode 2, if forecasting process has found that the energy in BESS is not enough for use to maintain the system stability, then BESS will be managed at the highest discharge period before the occurring of instability event to keep the power for using in instability event. An overview of the BESS control methodology is presented in Fig. 3.

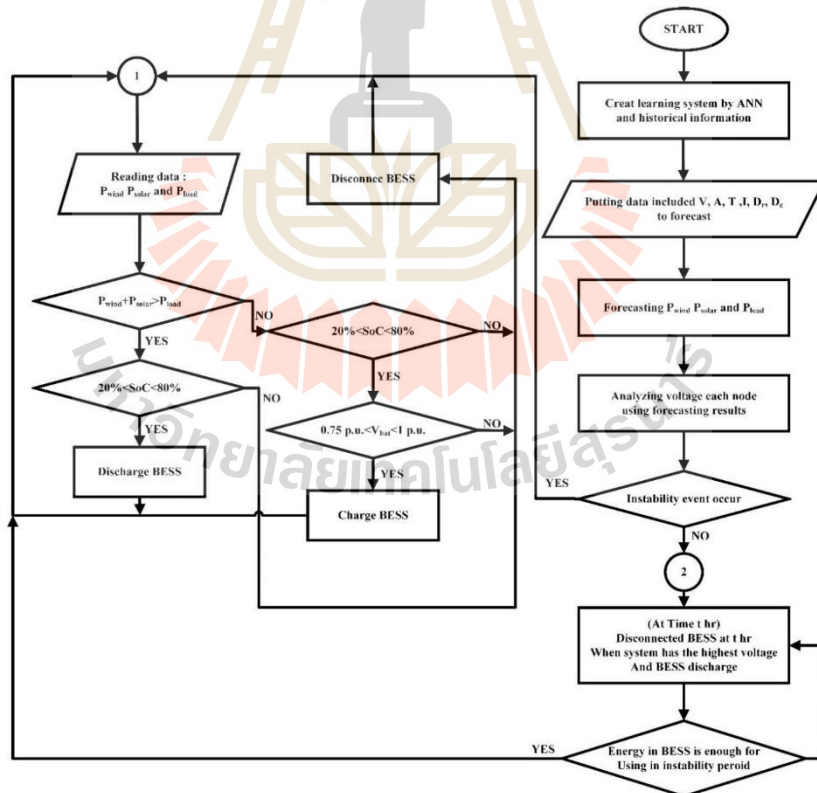


Fig.3. Overview method for planning to manage energy in BESS.

5. A CASE STUDY AND SIMULATION RESULTS

The IEEE 13 node standard test system [21] has been modified to evaluate the proposed technique. The system has modified to the off-grid system having the hybrid renewable energy resources as power generating units. The hybrid renewable energy resources are a Wind turbine 3.5 MW installed at node 2, PV panel 3 MW and BESS 5 MWh installed at node 1 as shown in Fig.4. The Maximum load of this system is approximately 2.9 MW, and parameters in this system have been designed according to weather in a day.

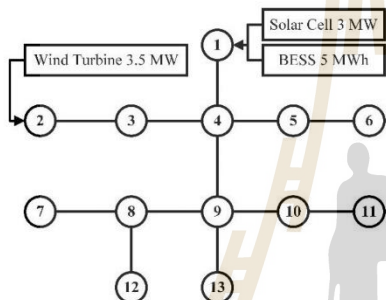


Fig.4. The modified IEEE 13 node standard test system.

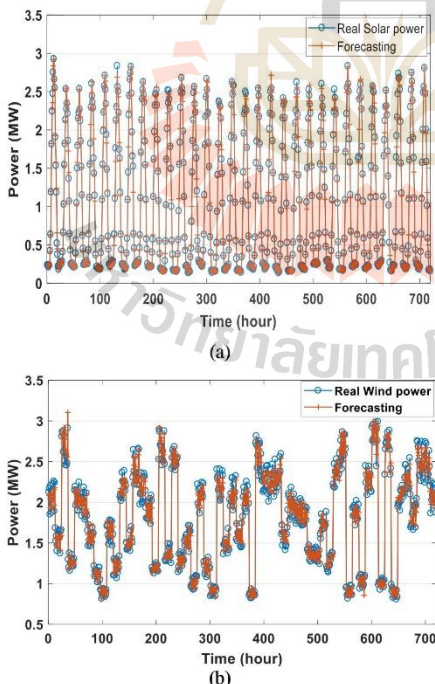


Fig.5. (a) Wind forecasting (b) Solar forecasting.

For forecast the load demand and the power generating from RER, the weather information is required. This study, the weather information is taken from Lumtaklong area at Amphoc Sikhio, Nakhon Ratchasima province Thailand. The average wind speed is approximately 5.5 m/s, the average solar irradiation is approximately 5 kW/m², the temperature is between 25-38 °C, and the air pressure depends on temperature [17-20]. The forecasting results are shown in Fig. 5. As illustrated in Fig. 5, the forecasting results agree with the power generation power from RER. After forecasting, forecasted results of the system have been analyzed by power flow analysis. By using load flow analysis results of node 7 and node 8, The forecasting voltage results are shown in Fig. 6. (a) and the real system results are shown in Fig. 6. (b). As illustrated in Fig. 6 (a), during 11 am to 1 pm, the voltage level at node 7 and node 8 is lower than 0.88 p.u. because of the peak period of load demand. As illustrated in Fig.6 (b), the actual voltage level at node 7 and node 8 is in a range 0.88-0.95 p.u. and approximately agree with those the forecasting results. According to analyzing results, the planning to support the system during an instability period using forecasting results has considered. During 11 am to 1 pm, the voltage level at node 7,8 is lower than the standard level such effects cause the BESS must store enough power to provide when the voltages level lower than 0.88 p.u. The BESS is disconnected from the system during 0 - 4 am to store power for use in the under voltage period because of the highest voltage level, and the BESS has to discharge on the under voltage period. The problem was solved by disconnecting the BESS during 0-4 am to keep power in BESS and connect when the voltage level lower than 0.88 p.u. The actual voltage level at node 7 and node 8 is lower than 0.88 p.u. while using the forecasting results the voltage level is not lower than 0.88 p.u. As illustrated in Fig. 7, the BESS has enough power to maintain the system stability. The off-grid system has no supply power from the main grid. Therefore, a power uses in the off-grid system provided from distributed generation. In this paper, distributed generation in the off-grid system is a wind turbine and a solar cell. The fluctuating power generated from RER depends on weather conditions cause a voltage drop due to lack of power. Although, the BESS has used to decrease the fluctuating power generation from RER. But when weather conditions change, it may lead to power generation lower than power demand and this may cause the voltage to drop lower than the standard level. However, due to the parameters of the system can be forecasted, appropriately power management on the system can be done. The stored power in BESS can be used when instability occurred in the system.

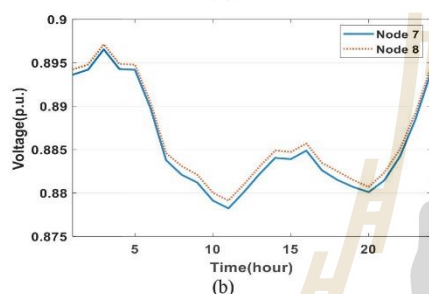
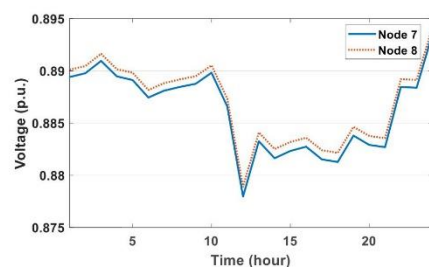


Fig.6. (a) Forecasting voltage at the lowest voltage node (b) Voltage in the real event at the lowest voltage node.

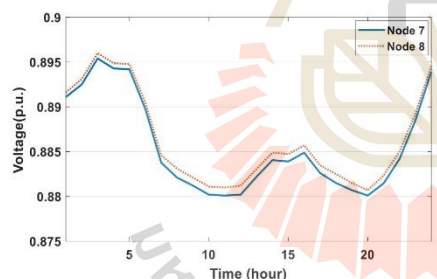


Fig.7. The voltage at the lowest voltage node using the proposed method.

6. CONCLUSION

For the off-grid system which using RER to provide power, this system has to carefully maintain stability because the power generation by RER is fluctuating power cause the BESS has been used to solve the problem. The BESS has not always enough energy to provide load cause the system instability. This paper has been proposed planning to manage power in BESS using ANN to obtain appropriately. power forecasting. ANN has to use the learning method to create a neural network for power forecasting. This paper has been compared the effectiveness of the learning methods which included SCG, LM, and BR. The results show that BR was the most accurate learning method for power forecasting. Then power which is generated by RER were forecasted

to analyze by power flow analysis for analysis voltage each bus and planning to manage energy in BESS. From the case study, it is confirmed that the occurring of instability event can be solved by the proposed method. However, the effectiveness of planning depends on the accuracy of the forecasting results because the precise predictions can make the analysis more accurate.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology

REFERENCES

- [1] Sagara, M., Sediqi, M. M., Senjyu, T., Danish, M. S., & Funabashi, T. (2016). Voltage stability improvement by optimal active power and reactive power output control of a storage battery system. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON).
- [2] Tang, W., & Zhang, Y. J. (2015). Optimal BESS control in a microgrid with renewable energy generation. 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm).
- [3] Wang, S., Sun, Q., Guo, S., Hu, L., & Ma, D. (2017). The hierarchical control algorithm of energy router based on bus voltage and SOC of the battery. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).
- [4] Wang, Y., Hu, Q., Srinivasan, D., & Wang, Z. (2018). Wind Power Curve Modeling and Wind Power Forecasting with Inconsistent Data. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 1-1.
- [5] Khan, I., Zhu, H., Yao, J., & Khan, D. (2017). Photovoltaic power forecasting based on Elman Neural Network software engineering method. 2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS).
- [6] Liu, Y., Li, Z., Bai, K., Zhang, Z., Lu, X., & Zhang, X. (2017). Short-term power-forecasting method of the distributed PV power system for consideration of its effects on load forecasting. The Journal of Engineering, 2017(13), 865-869.
- [7] Pan, J., & Qi, M. (2018). Study on Short-Term Load Forecasting of Distributed Power System Based on Wavelet Theory. 2018 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA).
- [8] Zhichao, R., Qiang, Y., Haiyan, W., Chao, C., & Yuan, L. (2017). Power load forecasting in the spring festival based on a feedforward neural network model. 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC).
- [9] Silva, C., Bessa, R., Pequeno, E., Jean, S., Vladimiro, M., Zhou, Z., & Botterud, A. (2014). Dynamic Factor Graphs - A New Wind Power Forecasting Approach.
- [10] Documentation. (n.d.). Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/physmod/elcc/ref/solarcell.html>
- [11] Deoras, A. (2016, September 01). Electricity Load and Price Forecasting Webinar Case Study - File

N. Junhuathon and B. Marungsri / GMSARN International Journal 13 (2019) 45 - 51

- Exchange - MATLAB Central. Retrieved from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28684-electricity-load-and-price-forecasting-webinar-case-study?focused=6789430&tab=example>
- [12] Cristianini, N. (2004). Neural Network (Artificial Neural Network, Connectionist Network, Backpropagation Network, Multilayer Perceptron). Dictionary of Bioinformatics and Computational Biology.
- [13] Gultekin, S. S., Guney, K., & Sagiroglu, S. (2003). Neural Networks for the Calculation of Bandwidth of Rectangular Microstrip Antennas. Ft. Belvoir: Defense Technical Information Center.
- [14] IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003) - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. (2018, February 15).
- [15] Power Flow Analysis - Guc. (n.d.). Retrieved from <http://eee.guc.edu.edu/Courses/Electronics/ELCT908%20Distributed%20Power%20System>
- [16] Pozo, N., & Pozo, M. (2017). Battery energy storage system for a hybrid generation system grid connected using fuzzy controllers. 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America).
- [17] Deoras, A. (2016, September 01). Electricity Load and Price Forecasting Webinar Case Study - File Exchange - MATLAB Central. Retrieved from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28684-electricity-load-and-price-forecasting-webinar-case-study?focused=6789430&tab=example>
- [18] (n.d.). Retrieved from http://www3.egat.co.th/re/egat_wind/egat_windlamtakhong/wind_lamtakhong.htm
- [19] Solar power in Thailand. (2017, August 07). Retrieved from <https://ienergyguru.com/2015/07/solar-resource-map-of-Thailand/>
- [20] Air properties (2011, January 08). Retrieved from <https://kruoiyn.wordpress.com/2011/01/08/สมบัติของอากาศ/>
- [21] Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN). (n.d.). doi:10.21533/pen



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายนิธิกร จันท์ห้วโทน เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2538 จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2560 โดยขณะศึกษาได้จัดทำโครงการควบคุมมือกลไร้สาย ต่อมาในปีเดียวกันนี้ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนกิตติบัณฑิตศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มีความสนใจศึกษาในด้านการจัดการพลังงานของไมโครกริดที่ใช้พลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน โดยมีผลงานตีพิมพ์และเอกสารการประชุมทางวิชาการดังแสดงไว้ในภาคผนวก

