

การทำเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยฟาร์มกังหันลมและ
แสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค

FREQUENCY STABILIZATION IN POWER SYSTEMS USING WIND AND
SOLAR FARMS BY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION-BASED
FUZZY LOGIC CONTROLLER

นัฐพล สว่างวงศ์

NATTAPOL SA-NGAWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-020-201

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยฟาร์มกังหันลมและ
แสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค

FREQUENCY STABILIZATION IN POWER SYSTEMS USING WIND AND
SOLAR FARMS BY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION-BASED
FUZZY LOGIC CONTROLLER



T138766

ณัฐพล สง่างวงศ์

NATTAPOL SA-NGAWONG

เลขหมู่
เลขทะเบียน 138766
รับเดือนปี 16 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-M-020-201

FREQUENCY STABILIZATION IN POWER SYSTEMS USING WIND AND
SOLAR FARMS BY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION-BASED
FUZZY LOGIC CONTROLLER

NATTAPOL SA-NGAWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-EN-M-020-201

COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยฟาร์มกังหันลมและแสงอาทิตย์ที่ใช้
ตัวควบคุมฟuzzy logic ที่ทำให้เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค

Thesis Title Frequency Stabilization in Power System Using Wind and Solar Farms by
Particle Swarm Optimization-based Fuzzy Logic Controller

นักศึกษา นายณัฐพล สง่าวงศ์





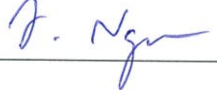
รหัสประจำตัว 55610752

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-020-201

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวินชวิไล	
ดร.วรวรรณ	นาคะวิโร	
ดร.คมสันต์	หงษ์สมบัติ	
ดร.สมภาพ	ผลไม้	
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรุ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 12.30-14.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-401

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยฟาร์มกังหันลมและแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค
นักศึกษา	นายณัฐพล สงวนวงศ์
รหัสประจำตัว	55610752
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อิศระชัย งามหรุ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator : DFIG) เพื่อทำเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้รับผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่ได้จากฟาร์มกังหันลม แสงอาทิตย์ และการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของโหลด งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกชนิดซุจิโน (Sugeno Fuzzy Logic Controller: SFLC) เพื่อปรับปรุงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV และ DFIG ให้เปลี่ยนไปตามสภาวะการทำงานของระบบเพื่อลดการแกว่งของความถี่ของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในที่นี้จะหาฟังก์ชันสมาชิกอินพุต เอาต์พุต (Input and Output Membership Function) และกฎควบคุม (Control Rule) ที่เหมาะสมของ SFLC ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) และเพื่อแสดงถึงสมรรถนะของวิธีที่นำเสนอ วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประยุกต์ใช้เพื่อการแก้ปัญหาการควบคุมความถี่ดังต่อไปนี้ เริ่มจากการศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ด้วย PV จากนั้นศึกษาการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วย DFIG และสุดท้ายศึกษาการประสานควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วย PV และ DFIG ร่วมกัน ผลการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า การควบคุม PV และ DFIG ด้วยตัวควบคุม SFLC ที่ทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วย PSO ที่นำเสนอ นั้น สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความถี่ของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความคงทนที่เหนือกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมที่นำมาเปรียบเทียบภายใต้สถานการณ์ต่างๆ

Thesis	Frequency Stabilization in Power Systems Using Wind and Solar Farms by Particle Swarm Optimization-based Fuzzy Logic Controller
Student	Mr. Nattapol Sangawong
Student ID.	55610752
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ABSTRACT

This thesis proposes the application of photovoltaic (PV) and doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine to frequency stabilization of power systems. The intermittent power output of PV and wind power sources, and load changes cause the power fluctuation and frequency deviation in power systems. To achieve satisfactory power control, a particle swarm optimization-based Sugeno fuzzy logic controller (PSO-SFLC) is applied to control the inverter so that the power output of PV and wind power sources can be modulated to stabilize the system frequency fluctuation. The parameters of SFLC such as input and output membership functions and control rules are optimally tuned by PSO. The proposed PSO-SFLC is applied to solve the frequency control problems as follows. First, the PV equipped with PSO-SFLC is applied to stabilize the frequency fluctuation in an isolated power system and a multi-area interconnected power system. Next, the DFIG wind turbine equipped with PSO-SFLC is applied to suppress the frequency fluctuation in an isolated system. Finally, the coordinated control of PV and DFIG with PSO-SFLC is used to alleviate the frequency deviation in an isolated system. Simulation results confirm that the control of PV and DFIG with the proposed PSO-SFLC is superior to other conventional methods in terms of the frequency stabilization effect and robustness against disturbances under various operating conditions.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิสระชัย งามหุรุ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาของการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ บุคลากร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาของการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ Electrical Power Applications Research Laboratory (EPARL) ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยในระดับปริญญาโทให้แก่ข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์นี้

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง พร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา-มารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐพล สง่าวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อ รักษาเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระและระบบไฟฟ้ากำลัง เชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	2
1.1.2 การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วยกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัว ควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC.....	3
1.1.3 การควบคุมแหล่งจ่ายกังหันลมชนิด DFIG และ PV ร่วมกันอย่างฉลาดเพื่อบริการ การควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	4
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	5
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย	6
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	6
บทที่ 2 หลักการควบคุม PV และกังหันลมชนิด DFIG ร่วมกับการควบคุมแบบฟuzzyที่เหมาะสม.....	7
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	7
2.2 กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	11
2.3 ฟuzzy (Fuzzy Logic Controller).....	17
2.4 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO).....	22
บทที่ 3 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อรักษา เสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระและระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลาย พื้นที่.....	24
3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา.....	24
3.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	24
3.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	26

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ตัวควบคุมที่นำเสนอและการออกแบบ.....	29
3.2.1 การออกแบบฟิชชี่ลอจิกสำหรับระบบแยกอิสระ.....	29
3.2.2 การออกแบบฟิชชี่ลอจิกสำหรับระบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	31
3.2.3 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค.....	32
3.3 ผลการจำลอง.....	34
3.4 สรุป.....	48
บทที่ 4 การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วยกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC.....	49
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ศึกษา.....	49
4.2 การออกแบบตัวควบคุมปรับค่าได้ที่นำเสนอ.....	52
4.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	55
4.4 สรุป.....	58
บทที่ 5 การควบคุมแหล่งจ่ายกังหันลมชนิด DFIG และ PV ร่วมกันอย่างฉลาดเพื่อบริการการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	60
5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา.....	60
5.2 ตัวควบคุมที่นำเสนอและการออกแบบ.....	63
5.2.1 การออกแบบฟิชชี่ลอจิกสำหรับ PV.....	63
5.2.2 การออกแบบฟิชชี่ลอจิกสำหรับ DFIG	65
5.2.3 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค.....	67
5.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	68
5.4 สรุป.....	74
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวแปรสำหรับแบบจำลอง DFIG.....	14
2.2 ค่าของตัวแปรใน DFIG.....	15
3.1 ตัวแปรในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	25
3.2 พิกัดกำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำ และ PV.....	28
3.3 ตัวแปรในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	28
3.4 กฎควบคุมของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	30
3.5 กฎควบคุมของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	31
3.6 กฎควบคุมของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	34
3.7 กฎควบคุมของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	38
3.8 ขนาดความจุของแบตเตอรี่.....	45
4.1 กฎควบคุมของ PSO-SFLC.....	56
5.1 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ก่อนหาค่าที่เหมาะสมสำหรับ PV.....	64
5.2 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ก่อนหาค่าที่เหมาะสมสำหรับ DFIG.....	66
5.3 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ที่ถูกหาค่าอย่างเหมาะสมสำหรับ PV.....	68
5.4 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ที่ถูกหาค่าอย่างเหมาะสมสำหรับ DFIG.....	69

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของโมดูล PV.....	7
2.2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-แรงดัน และกระแส-แรงดันของโมดูล PV.....	9
2.3 แบบจำลองของระบบ PV ที่ใช้ในการศึกษา.....	10
2.4 แบบจำลองของระบบ DFIG ที่ใช้ในการศึกษา.....	12
2.5 ส่วนที่ 1 ของแบบจำลอง DFIG.....	13
2.6 ลูปควบคุมการตอบสนองต่อความถี่ของ DFIG ที่ปรับค่าได้ด้วยฟิชชี.....	13
2.7 ส่วนที่ 2 ของแบบจำลอง DFIG.....	14
2.8 ลักษณะการตอบสนองต่ออินพุตของ DFIG.....	14
2.9 ส่วนที่ 3 ของแบบจำลอง DFIG.....	16
2.10 Max Power Lookup Curve สำหรับกำหนดจุดการทำงานของ DFIG ที่ใช้ในการศึกษา.....	16
2.11 ส่วนที่ 4 ของแบบจำลอง DFIG.....	17
2.12 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟิชชี.....	17
2.13 โครงสร้างการทำงานของฟิชชีลอจิก.....	18
2.14 การทำงานแบบยูเนียนของฟิชชี.....	19
2.15 การทำงานแบบอินเตอร์เซกชันของฟิชชี.....	19
2.16 การทำงานแบบคอมพลิเมนต์ของฟิชชี.....	19
2.17 โครงสร้างทั่วไปของตัวกำหนดอัตราขยายแบบฟิชชี.....	20
2.18 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของฟิชชีที่ใช้ศึกษา.....	21
2.19 โครงสร้างกฎควบคุมของฟิชชีที่ใช้ศึกษา.....	22
2.20 ขั้นตอนการทำงานของวิธี PSO.....	23
3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา.....	25
3.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	25
3.3 ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา.....	27
3.4 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	27
3.5 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	30
3.6 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	32
3.7 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	34
3.8 โหลด (กรณีที่ 1).....	35
3.9 ความเข้มแสง (กรณีที่ 1).....	35
3.10 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 1).....	35
3.11 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 1).....	36
3.12 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DG (กรณีที่ 1).....	36
3.13 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1).....	37
3.14 สัญญาณควบคุมจากฟิชชี (กรณีที่ 1).....	37
3.15 ผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดกับโหลด (กรณีที่ 1).....	37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่.....	38
3.17 โหลด (กรณีที่ 2)	39
3.18 ความเข้มแสง (กรณีที่ 2).....	39
3.19 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 2).....	39
3.20 กำลังไฟฟ้าในสายส่ง (กรณีที่ 2).....	39
3.21 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 2).....	40
3.22 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของกังหันไอน้ำ (กรณีที่ 2).....	40
3.23 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 2).....	41
3.24 สัญญาณควบคุมจากพีซซี (กรณีที่ 2).....	41
3.25 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดลบกับโหลด (กรณีที่ 2).....	42
3.26 โหลด (กรณีที่ 3).....	43
3.27 ความเข้มแสง (กรณีที่ 3).....	43
3.28 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 3).....	43
3.29 กำลังไฟฟ้าในสายส่ง (กรณีที่ 3).....	43
3.30 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 3).....	44
3.31 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของกังหันไอน้ำ (กรณีที่ 3).....	44
3.32 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 3).....	45
3.33 สัญญาณควบคุมจากพีซซี (กรณีที่ 3).....	45
3.34 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 4).....	47
3.35 SOC ของแบตเตอรี่.....	47
3.36 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 4).....	47
3.37 กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำ (กรณีที่ 4).....	47
3.38 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 4).....	48
3.39 สัญญาณควบคุมจากพีซซี (กรณีที่ 4).....	48
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา.....	50
4.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบ.....	50
4.3 แบบจำลองกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมปรับค่าได้.....	51
4.4 ตัวควบคุมความถี่ที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC.....	52
4.5 โหลดแบบสุ่ม (กรณีที่ 1).....	54
4.6 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต 1 และ 2 จากการหาค่าที่เหมาะสม.....	55
4.7 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต k_1 , k_2 และ k_f จากการหาค่าที่เหมาะสม.....	56
4.8 โหลดแบบขั้นบันได (กรณีที่ 2).....	57
4.9 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 1).....	57
4.10 การแกว่งของความถี่กรณีโหลดแบบขั้นบันได (กรณีที่ 2).....	57
4.11 ค่าความผิดพลาด (IAE) กรณีโหลดแบบสุ่ม (กรณีที่ 1).....	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ค่าความผิดพลาด (IAE) กรณีโหลดแบบขั้นบันได (กรณีที่ 2).....	58
5.1 DFIG และ PV ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ.....	61
5.2 แบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้การศึกษา.....	61
5.3 ฟังก์ชันสมาชิกของ PSO-SFLC สำหรับ PV.....	64
5.4 ฟังก์ชันสมาชิกของ PSO-SFLC สำหรับ DFIG.....	66
5.5 โหลดแบบขั้นบันได.....	70
5.6 ความเข้มแสง (อินพุตของ PV).....	70
5.7 แรงบิดจากลม (อินพุตของ DFIG).....	70
5.8 การแกว่งของความถี่.....	71
5.9 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV.....	71
5.10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DFIG.....	72
5.11 โหลดแบบสุ่ม.....	72
5.12 ความเข้มแสง (อินพุตของ PV).....	73
5.13 แรงบิดจากลม (อินพุตของ DFIG).....	73
5.14 การแกว่งของความถี่.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น ลดมลพิษที่เกิดจากแหล่งพลังงานหลัก ลดการใช้พลังงานหลักซึ่งมีราคาสูง และมีแนวโน้มไม่เพียงพอ และเพิ่มการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ เป็นต้น [1,2] โดยส่วนใหญ่พลังงานทดแทนนี้เป็นพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar) และพลังงานลม (Wind) ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด และมีอยู่ในธรรมชาติ [3,4] แต่อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) หรือฟาร์มกังหันลม (Wind Farm) ไม่มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของแสงอาทิตย์ และลมในธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ทั้งในส่วนของ การแกว่งของกำลังไฟฟ้า และความถี่ [5] นอกจากนี้ การเข้ามาของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเหล่านี้ ส่งผลให้เครื่องกำเนิดหลักบางส่วนได้ยกเลิกการใช้งาน และมีการลดขนาดลง ทำให้ความเฉื่อย (Inertia) ในระบบลดน้อยลง เป็นผลให้ระบบมีโอกาสที่จะสูญเสียเสถียรภาพได้ง่ายเมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในระบบ [6,7]

ในปัจจุบัน มีการเพิ่มขึ้นของ PV และกังหันลมชนิด DFIG ในระบบมากขึ้น ทั้งในส่วนของระบบแยกอิสระ และระบบไฟฟ้าเชื่อมโยงหลายพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งในระบบของ PV จะมีส่วนของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อจ่ายเข้าระบบที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยความสามารถด้านการควบคุมของอินเวอร์เตอร์จึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV ได้ [8,9] และเนื่องจาก PV ส่วนใหญ่มีแบตเตอรี่เพื่อทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานที่ไม่สมดุลกันระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไม่ได้สูญเสียไป นอกจากนี้ ด้วยความสามารถด้านการควบคุมกำลังไฟฟ้าของ DFIG ที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนแยกกันได้ ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ DFIG ได้ตามที่ระบบต้องการ [10] ด้วยเหตุนี้ PV และ DFIG จึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าให้เป็นเสมือนอุปกรณ์ที่เพิ่มเสถียรภาพของระบบได้ อย่างไรก็ตาม ในการควบคุม PV และ DFIG นี้ ประสิทธิภาพการควบคุมนั้นขึ้นอยู่กับตัวควบคุมที่นำมาใช้ และการออกแบบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นตัวควบคุมแบบค่าคงที่ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการใช้งาน แต่เนื่องจากอัตราขยายของตัวควบคุมที่เป็นค่าคงที่ ทำให้ระบบที่มีสภาวะการทำงานช่วงกว้าง ๆ อาจจะมีประสิทธิภาพการควบคุมที่ยังดีไม่พอ

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกชนิดซุจิโน (Sugeno Fuzzy Logic Controller: SFLC) [11] เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจาก SFLC มีความฉลาดสามารถวิเคราะห์สัญญาณอินพุตที่มากกว่าหนึ่งได้ และสามารถจัดการระบบที่มีข้อมูลคลุมเครือได้ โดย SFLC จะทำหน้าที่ควบคุมอัตราขยายของอุปกรณ์ที่ควบคุมอยู่ให้เปลี่ยนแปลงไปตามสถานการณ์ที่เหมาะสม จากนั้นตัวควบคุมจะจ่ายสัญญาณควบคุมให้กับอุปกรณ์ที่ควบคุมอยู่ [12] นอกจากนี้ SFLC ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับอัตราขยายชนิดอื่นได้โดยเพิ่มเข้าไปในระบบเดิมที่มีอยู่

ในอดีตที่ผ่านมา มีการใช้ฟuzzy เพื่อปรับอัตราขยายของตัวควบคุมอย่างแพร่หลาย เช่น ในงานวิจัย [13] ได้นำไปปรับค่าอัตราขยายของ PV เพื่อควบคุมความถี่ แต่โครงสร้างของฟuzzy เป็นแบบดั้งเดิม ซึ่งซับซ้อน และยุ่งยากต่อการออกแบบ ในงานวิจัย [14] ได้นำไปฟuzzy ไปควบคุมความถี่ในระบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่ที่มี PV ขนาดใหญ่ แต่โครงสร้าง และการออกแบบของฟuzzy ที่ใช้ยังคงเป็นโครงสร้างแบบเดิม ซึ่งยุ่งยากต่อการออกแบบ อีกทั้งยังไม่ได้ทดสอบเพื่อยืนยันว่าระบบมีความคงทนต่อสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และกักหน้ลมนชนิด DFIG เพื่อทำเสถียรภาพทางความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น PV และ DFIG และเพื่อปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมให้มีความเหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของระบบ วิทยานิพนธ์นี้ใช้ SFLC ที่มีโครงสร้างที่ง่าย นอกจากนั้นเพื่อให้ SFLC ที่ใช้มีสมรรถนะการควบคุมที่สูงขึ้นไปอีก จึงได้ออกแบบพารามิเตอร์ของ SFLC ได้แก่ ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต เอาต์พุต (Input and Output Membership Function) และกฎควบคุม (Control Rule) ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [15] พร้อมกันทั้งหมดภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด

ในการศึกษานี้ได้นำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุม 3 ระบบคือ 1) การควบคุมความถี่ด้วย PV ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล และ PV 2) การควบคุมความถี่ด้วย PV ในระบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่ที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Stream Turbine) และ PV และ 3) การควบคุมความถี่ด้วย DFIG ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ และ DFIG โดยทุกระบบที่ศึกษาได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าทั้งของ PV DFIG และโหลด โดยรายละเอียดของที่มา และความสำคัญของปัญหาสำหรับในแต่ละระบบที่นำมาประยุกต์ใช้ได้แบ่งแยกการอธิบายดังต่อไปนี้

1.1.1 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟuzzy ลอจิกเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อรักษาเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระและระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

ทุกวันนี้ PV ถูกติดตั้งเข้ากับระบบกันอย่างแพร่หลาย อย่างเช่น [16] ได้มีการติดตั้ง PV ขนาดใหญ่ (ขนาดมากกว่า 50 MW) เข้ากับระบบ ยกตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกา Topaz Solar Farm มีขนาด 300 MW, ในจีน Huanghe Solar Park มีขนาด 200 MW และเยอรมนี Neuhardenberg Solar Park มีขนาด 145 MW ซึ่งในอนาคต PV ไม่ควรแต่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเพียงอย่างเดียว แต่ควรจะให้บริการอื่น ๆ กับระบบด้วย อย่างเช่น การควบคุมความถี่ และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบ [17] ในขณะที่ปัญหาการแกว่งของความถี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลดขนาดใหญ่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้า [18] นอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอจากฟาร์ม PV ขนาดใหญ่ทำให้ปัญหาการควบคุมความถี่ซับซ้อนมากขึ้น ภายใต้สถานการณ์เหล่านี้การตอบสนองของตัวควบคุมควบคุมความถี่ (load frequency control: LFC) โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Generator: DG) และตัวบังคับความเร็วมีการตอบสนองที่ช้า อาจจะไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม

เพื่อที่จะจัดการกับปัญหาการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มี PV มีบางงานวิจัยพยายามที่จะควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อชดเชยความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดเพื่อความผันผวนของความถี่ลดลง ในงานวิจัย [19] นำเสนอการควบคุมความถี่ด้วย PV ในระบบผสมระหว่าง DG และ PV โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ของ PV ด้วยตัวควบคุมพีชชีลลจิก 2 ตัว ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV ไปลดการแกว่งของความถี่ได้ ในงานวิจัย [20]-[22] นำเสนอวิธีการควบคุมความถี่ด้วยพีชชีลลจิกอย่างง่ายด้วย PV ขนาดใหญ่ (ระดับ MW) เพื่อลดการแกว่งของความถี่ และการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งในระบบเชื่อมโยง 3 พื้นที่ อย่างไรก็ตามปัญหาที่ยากของตัวควบคุมพีชชีลลจิกที่นำเสนอในงานเหล่านี้คือการตั้งค่าฟังก์ชันสมาชิกและกฎควบคุม ซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ และการลองผิดลองถูก ซึ่งเป็นอุปสรรคในการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลลจิก นอกจากนี้โครงสร้างที่ซับซ้อนของตัวควบคุมพีชชีลลจิกเป็นอุปสรรคในการออกแบบ ซึ่งตัวควบคุมพีชชีลลจิกของงานในอดีตที่ผ่านมาไม่สามารถยืนยันประสิทธิภาพการควบคุมความถี่ และความคงทนของ PV ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด และความเข้มแสงแบบต่าง ๆ ได้

ในบทนี้แนะนำเสนอการควบคุม PV อย่างชาญฉลาดด้วยพีชชีลลจิกชนิดซุจิโนที่ถูกออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization-based Sugeno Fuzzy Logic Controller: PSO-SFLC) สำหรับการทำให้เสถียรภาพทางความถี่แบบคงทนในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ โดยความเข้มแสง และการแกว่งของความถี่เป็นสัญญาณอินพุตของ PSO-SFLC และมีสัญญาณเอาต์พุตจาก PSO-SFLC ไปควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลด ทำให้สามารถลดการแกว่งของความถี่ในระบบลงได้ ในที่นี้จะใช้ PSO สำหรับหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตเอาต์พุต และกฎควบคุมของ SFLC ผลการจำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ยืนยันว่า ประสิทธิภาพของการควบคุมความถี่ และความคงทนของตัวควบคุมที่นำเสนอดีที่สุดเมื่อเทียบกับ PV ที่ติดตั้ง SFLC และ PV ที่ติดตั้งเฉพาะตัวติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) ภายใต้ภาวะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง โหลดแบบต่าง ๆ และข้อจำกัดของขนาดแบตเตอรี่

1.1.2 การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วยกัณฑ์ลมนชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC

ปัจจุบัน ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระได้รับการยอมรับว่าเป็นระบบจัดการพลังงานสำหรับพื้นที่ห่างไกลซึ่งไม่สามารถเข้าถึงกริดของการไฟฟ้า โดยเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระซึ่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ และกัณฑ์ลมนั้น ปัญหาที่ทำนายหนึ่งคือปัญหาการแกว่งของความถี่ในระบบเนื่องจากความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปไม่สมดุลกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากระบบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบ [23]

โดยทั่วไปการแก้ปัญหาการแกว่งของความถี่ทำได้โดยติดตั้งตัวควบคุมควบคุมความถี่ (LFC) ซึ่งใช้ตัวบังคับความเร็วปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด อย่างไรก็ตามตัวบังคับความเร็วมีผลตอบสนองในการควบคุมค่อนข้างช้า จึงไม่สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความถี่เนื่องจากโหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าอย่างรวดเร็วได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการใช้กำลังไฟฟ้าจากกัณฑ์ลมาช่วยลดการแกว่งความถี่ [24] ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการติดตั้งตัวควบคุมความถี่เข้าไปกับ DFIG แต่เนื่องจากตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นแบบพารามิเตอร์คงที่จึง

ไม่สามารถปรับการทำงานให้เหมาะสมกับสถานการณ์ระบบที่เปลี่ยนไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงได้มีงานที่นำเสนอฟuzzyชนิดแมมดานิ (Mamdani-Type Fuzzy) ที่ทำให้เหมาะสมด้วย PSO มาปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมความถี่เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมได้ดียิ่งขึ้น [25] อย่างไรก็ตาม ฟuzzyชนิดนี้มีการประมวลผลที่ช้า อีกทั้งมีจำนวนฟังก์ชันสมาชิกมาก จึงไม่เหมาะกับการหาค่าที่เหมาะสม

บทความนี้นำเสนอการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วยกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC ในที่นี้จะหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิก และกฎพื้นฐานของฟuzzyด้วย PSO เพื่อให้ตัวควบคุมปรับค่าได้สามารถควบคุมความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของการควบคุมความถี่ของกังหันลมที่ติดตั้งตัวควบคุมปรับค่าได้เมื่อเทียบกับกังหันลมที่ติดตั้งตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบต่างๆ

1.1.3 การควบคุมแหล่งจ่ายกังหันลมชนิด DFIG และ PV ร่วมกันอย่างฉลาดเพื่อบริการการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ บางครั้งไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาการแกว่งของความถี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ ซึ่งปัญหานี้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพ และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ยิ่งกว่านั้นเมื่อติดตั้ง PV และ DFIG ขนาดใหญ่เข้ากับระบบ ก็จะทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของความถี่รุนแรงยิ่งขึ้นเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายทั้งสอง ภายใต้ปัญหานี้ตัวควบคุมความถี่ซึ่งใช้ตัวบังคับความเร็ว และกังหันไอน้ำอาจจะไม่เพียงพอที่จะรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ได้

ในอนาคตฟาร์มกังหันลมและ PV ถูกคาดหวังว่าจะเป็นตัวให้บริการอื่น ๆ กับระบบอย่างเช่น การควบคุมความถี่ [26] ในบทนี้จึงนำเสนอการควบคุม PV และกังหันลมชนิด DFIG ร่วมกันอย่างชาญฉลาดแบบใหม่สำหรับให้บริการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วย PSO-SFLC โดยกฎควบคุมของ SFLC จะถูกหาค่าอย่างเหมาะสมด้วย PSO โดยที่ PSO-SFLC จะติดตั้งกับ PV และ DFIG ทำให้สามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งของ PV และ DFIG เพื่อลดการแกว่งของความถี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด ความเข้มแสง และกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอร่วมกันได้ ผลการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ยืนยันว่า PV และกังหันลมชนิด DFIG ที่ติดตั้งตัวควบคุม PSO-SFLC ทำงานร่วมกันเหนือกว่า PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เพียงอย่างเดียว DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เพียงอย่างเดียว และ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุม PSO-SFLC ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง แรงบิดจากลม และการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางร่วมกับการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกชนิดซุจิโน ที่ทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อทำเสถียรภาพทางความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และ DFIG ร่วมกับการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกที่ทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วย PSO
2. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบ SFLC อย่างเหมาะสมด้วยวิธี PSO

3. สามารถนำกำลังไฟฟ้าที่ได้จาก PV และ DFIG ร่วมกับการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกไปทำเสถียรภาพทางความถี่ในระบบต่างๆ ได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางหรือกึ่งหันลม ร่วมกับการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกที่ทำการออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค โดยมีสมมติฐานของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการควบคุมความถี่สามารถที่แทนด้วยระบบเชิงเส้นได้ เนื่องจากสมมติว่าสิ่งที่มารบกวนระบบมีขนาดเล็กเพียงพอ ทำให้ตัวแปรสถานะในระบบนั้นเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ จนถือว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นได้

2. แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการทำเสถียรภาพ สามารถลดอันดับลงมาให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบได้ เนื่องจากผลตอบสนองของบางส่วน มีผลตอบสนองเร็วกว่ามากเมื่อเทียบกับผลตอบสนองของปัญหาที่พิจารณา

3. เนื่องจาก ผลตอบสนองการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางหรือกึ่งหันลม มีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่เร็วกว่าปัญหาที่พิจารณา จึงสมมติได้ว่าจะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเพื่อทำเสถียรภาพทางความถี่ของระบบได้

4. แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางหรือกึ่งหันลม ที่ไม่ได้ควบคุมกำลังไฟฟ้าสามารถแทนด้วยการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอได้ เนื่องจากต้องการพิจารณาผลกระทบในระบบเท่านั้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และ DFIG ร่วมกับการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกมีแนวคิด และหลักการจากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาดังต่อไปนี้

1. การควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และ DFIG

จากปัญหาด้านพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทำให้มีการนำเอาพลังงานทดแทน เช่น PV และ DFIG มาใช้ประโยชน์มากขึ้น ด้วยความสามารถของ PV และ DFIG ที่สามารถควบคุมการจ่าย และการรับกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามความต้องการของระบบเป็นผลให้สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความถี่ของระบบได้

2. การควบคุมแบบฟuzzyลอจิก

โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรม หรือระบบไฟฟ้าจะเป็นตัวควบคุมแบบอัตราขยายคงที่ทำให้สมรรถนะในการควบคุมในสภาวะการทำงานช่วงกว้าง ๆ นั้นไม่ดีเท่าที่ควร ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาตัวควบคุมฟuzzyลอจิก [27] เข้ามาปรับอัตราขยายเหล่านี้ให้เปลี่ยนแปลงตามสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบ ทำให้ตัวควบคุมที่ได้มีสมรรถนะในการควบคุมที่สูงขึ้น

3. วิธีกลุ่มอนุภาค

วิธีกลุ่มอนุภาค [28] เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยการเลียนแบบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยประยุกต์ใช้ในการหาค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนหลายสมการ ในปัจจุบันวิธีกลุ่มอนุภาคได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการค้นหาค่าตอบ

จากแนวคิดที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาทดสอบกับการทำเสถียรภาพทางความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยได้แยกพิจารณาหลายระบบ ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และ DFIG โดยการใช้การควบคุมแบบฟuzzyลอจิกที่ทำการออกแบบให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคดังที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ เพื่อทำเสถียรภาพทางความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังในระบบต่าง ๆ ภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยรายละเอียดอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อควบคุมความถี่ในระบบแยกอิสระที่ประกอบไปด้วย DG PV และโหลด โดยนำเอาการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกไปควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งอยู่กับ PV
2. ทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อควบคุมความถี่ในระบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่ที่ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ PV และโหลด โดยนำเอาการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกไปควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งอยู่กับ PV ในแต่ละพื้นที่
3. ทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางหรือกังหันลม ควบคุมความถี่ในระบบแยกอิสระที่ประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และโหลด โดยนำเอาการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกไปทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในรูปควบคุมความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ซึ่งทำหน้าที่กำหนดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต
4. ทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และ DFIG ร่วมกัน เพื่อควบคุมความถี่ในระบบแยกอิสระที่ประกอบไปด้วย DG PV DFIG และโหลด โดยนำเอาการควบคุมแบบฟuzzyลอจิกไปทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในรูปควบคุมความถี่ของ DFIG ซึ่งทำหน้าที่กำหนดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งอยู่กับ PV

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอน และรายละเอียดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎี และแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงที่มา และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ PV และ DFIG หลักการของการควบคุมแบบฟuzzyลอจิก และการออกแบบให้มีความเหมาะสมด้วยวิธี PSO

บทที่ 3 นำเสนอการประยุกต์ใช้งานของ PV เพื่อควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

บทที่ 4 นำเสนอ DFIG เพื่อควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

บทที่ 5 นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าร่วมกันของ PV และ DFIG เพื่อลดการแกว่งของความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

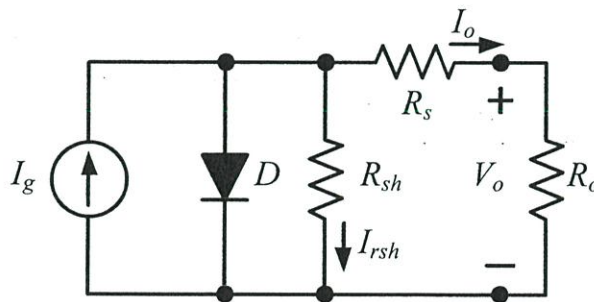
หลักการควบคุม PV และกังหันลมชนิด DFIG ร่วมกับการ ควบคุมแบบฟuzzyที่เหมาะสม

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการ และแนวคิดของการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ หลักการควบคุมแบบฟuzzyได้อธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป และสุดท้ายเทคนิคการออกแบบแบบฟuzzyให้มีความเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคได้อธิบายไว้ในหัวข้อสุดท้าย

2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ประกอบด้วยรอยต่อพีเอ็น 1 ชุด หรือเรียกว่า 1 เซลล์ (Cell) เมื่อต้องการเพิ่มแรงดัน หรือกระแสให้มากขึ้น สามารถทำได้โดยนำเซลล์มาต่อประกอบกันเป็นชุดเรียกว่า โมดูล (Module) ซึ่งมีแผ่นกระจกปิดอยู่ด้านหน้า มีขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อวงจรใช้งาน และเมื่อต้องการการใช้งานเป็นระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ขึ้นจะต้องนำโมดูลมาต่อเข้าด้วยกันเป็นแผง หรือเรียกว่าอะเรย์ (Array) ในการต่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ การต่อร่วมกันแบบอนุกรมจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าคงที่ และการต่อแบบขนานจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าโดยแรงดันคงที่

ในปัจจุบัน การผลิตกำลังไฟฟ้าด้วย PV นั้นได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยคาดหวังว่าจะนำมาทดแทน หรือช่วยลดการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ก๊าซ หรือถ่านหิน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ การจำลองและศึกษาผลกระทบ หรือการวิเคราะห์แนวทางการใช้งาน จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของโมดูล PV

แบบจำลองโดยทั่วไปของ PV สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลของไดโอดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [14] โดยวงจรประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแส (I_g) ไดโอด ตัวต้านทานภายในที่ต่อขนาน (R_{sh}) และตัวต้านทานอนุกรม (R_s) ของโมดูล โดยสมการของกระแสในวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$I_o = I_g - I_{sat} \left\{ \exp \left[\frac{q}{AKT} (V_o + I_o R_s) \right] - 1 \right\} \quad (2.1)$$

โดยที่	I_o	คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของโมดูล PV (A)
	V_o	คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโมดูล PV (V)
	I_g	คือ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากจากความเข้มแสง (A)
	I_{sat}	คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว (A)
	q	คือ ขนาดประจุของอิเล็กตรอน
	K	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann's
	A	คือ เฟกเตอร์จินตภาพของ p-n junction
	T	คือ อุณหภูมิ (K)
	R_s	คือ ความต้านทานอนุกรมภายในโมดูล PV (Ω)
	D	คือ ไดโอด (Diode)

จากสมการ 2.1 กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว (I_{sat}) ของโมดูล PV จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ตามสมการดังต่อไปนี้

$$I_{sat} = I_{or} \left[\frac{T_{mod}}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_g}{KT_{mod}} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right) \right] \quad (2.2)$$

และ

$$I_g = I_{sc} \frac{ISO}{1000} + I_t (T_{mod} - T_r) \quad (2.3)$$

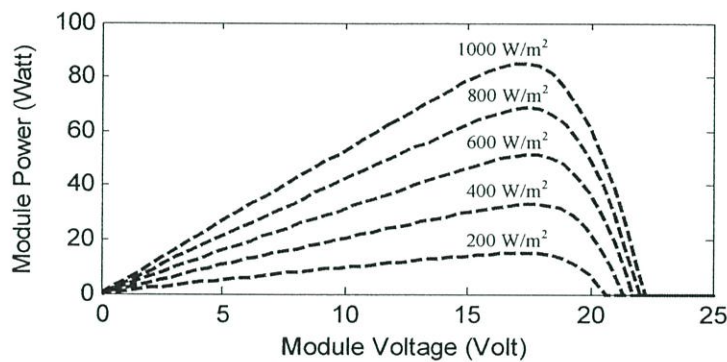
โดยที่	T_r	คือ อุณหภูมิอ้างอิง (K)
	I_{or}	คือ กระแสไฟฟ้าอิมิตัวที่อุณหภูมิอ้างอิง (A)
	T_{mod}	คือ อุณหภูมิของโมดูล PV (K)
	E_g	คือ แถบช่องว่างพลังงาน (band-gap energy)
	I_t	คือ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)

กระแสที่ไหลในความต้านทานขนานหาได้จากสมการต่อไปนี้

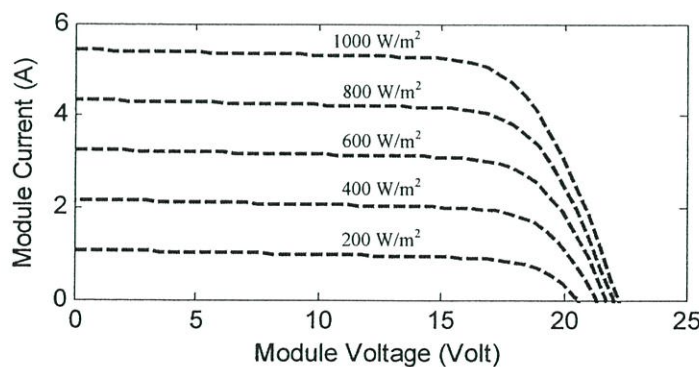
$$I_{rsh} = \frac{V_o}{N_s R_{sh}} \quad (2.4)$$

โดยที่ R_{sh} คือ ความต้านทานขนานของโมดูล PV (Ω)
 N_s คือ จำนวนเซลล์ของ PV ที่ต่ออนุกรม

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้เส้นโค้งความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดัน (I-V Curve) และเส้นโค้งความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความเข้มแสง (Insolation) มีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง กำลังไฟฟ้าที่ได้จาก PV จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น และจะมีจุดการทำงานจุดเดียวที่ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด (Maximum Power) นอกจากนี้ เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าความเข้มแสงที่ PV ได้รับนั้นไม่คงที่ ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อใช้งาน PV จึงจำเป็นต้องมีชุดควบคุมการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เพื่อคอยปรับให้ PV สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดอยู่เสมอ ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาใช้วิธี Perturb and Observe (P&O) [29] ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานที่ได้รับการนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

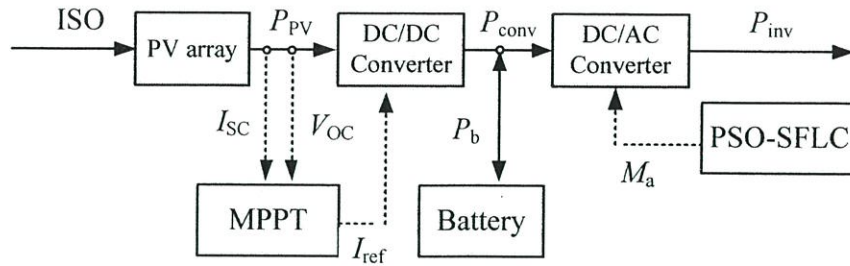


(ก) เส้นโค้งความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V Curve)



(ข) เส้นโค้งความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดัน (I-V Curve)

รูปที่ 2.2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า-แรงดัน และกระแส-แรงดันของโมดูล PV



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของระบบ PV ที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองของระบบ PV ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบไปด้วยแผง PV, DC/DC คอนเวอร์เตอร์, MPPT, DC/AC คอนเวอร์เตอร์หรืออินเวอร์เตอร์, แบตเตอรี่ และฟuzzyลอจิกชนิดซุจิโนที่ถูกออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization-based Sugeno Fuzzy Logic Controller: PSO-SFLC)

โดยที่	ISO	คือ ความเข้มแสง (Insolation) (Watt/m^2)
	P_{pv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (pu)
	P_{conv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ (pu)
	P_{inv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (pu)
	I_{ref}	คือ สัญญาณควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดจาก MPPT (A)
	P_b	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแบตเตอรี่ (pu)
	M_a	คือ สัญญาณควบคุมจากฟuzzy

ตั้งที่กล่าวมาแล้วว่าในวิทยานิพนธ์นี้ส่วนของ MPPT จะใช้วิธี P&O สำหรับติดตามหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูล PV ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะติดตั้ง MPPT เข้ากับ DC/DC คอนเวอร์เตอร์ โดยมีสัญญาณควบคุมจาก MPPT คือ I_{ref} ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์ไปให้กับอินเวอร์เตอร์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเสมอ

ส่วนอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้าจาก DC ให้เป็น AC จากนั้นจ่ายกำลังไฟฟ้า AC ให้กับระบบ โดยกำหนดให้โมเดลของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการศึกษามีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 4.5 % [19] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{conv} = P_{inv} + P_{inv,loss} \quad (2.5)$$

โดยที่ $P_{inv,loss}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในอินเวอร์เตอร์

ในที่นี้ให้ $P_{inv,loss}$ มีค่าเท่ากับ 4.5 % ของ P_{conv}
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หาได้จาก

$$P_{inv} = (P_{conv} + P_b) M_a \quad (2.6)$$

จากสมการ 2.6 จะพบว่า P_{inv} สามารถปรับค่าได้ตาม M_a ซึ่งก็คือสัญญาณควบคุมจากฟิชซี ส่วนแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ช่วย PV รักษาเสถียรภาพทางความถี่ของระบบ โดยทำหน้าที่ช่วยรับกำลังไฟฟ้าเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก DC/DC คอนเวอร์เตอร์มีมากกว่าที่ระบบต้องการ และทำหน้าที่ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อ PV ผลิตกำลังไฟฟ้าให้ระบบได้ไม่เพียงพอเท่าที่ระบบต้องการ โดยกฎควบคุมแบตเตอรี่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

ชาร์จ เมื่อ $P_{conv} > P_{inv}$

$$P_b = P_{conv} - P_{inv} \quad (2.7)$$

ดิสชาร์จ เมื่อ $P_{conv} < P_{inv}$

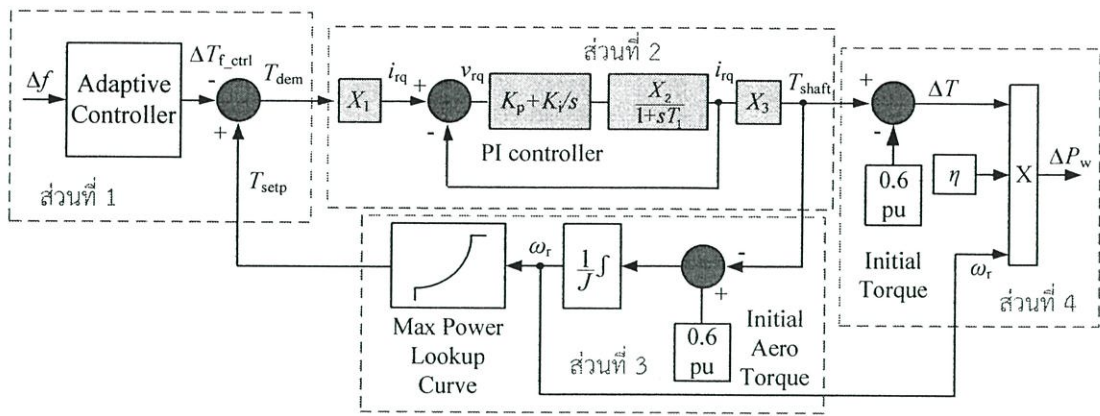
$$P_b = P_{inv} - P_{conv} \quad (2.8)$$

เป็นกลาง เมื่อ $P_{conv} = P_{inv}$

$$P_b = 0 \quad (2.9)$$

2.2 กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

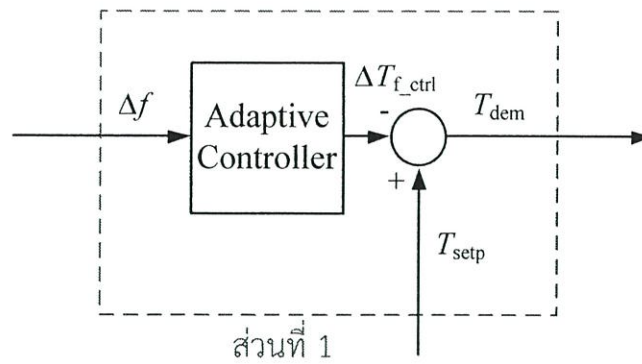
ในปัจจุบัน การผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยกังหันลมได้รับความนิยมอย่างมากไม่แพ้ PV โดยนำมาช่วยลดการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ก๊าซ หรือ ถ่านหิน เช่นเดียวกับ PV ด้วยเหตุนี้การจำลอง และศึกษาผลกระทบ หรือการวิเคราะห์แนวทางการใช้งาน จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกังหันลมชนิด DFIG เนื่องจากมีข้อดีที่สามารถควบคุมได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนแยกอิสระต่อกัน [30] ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงเส้นของ DFIG เฉพาะในส่วนของการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาดังพฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ของ DFIG



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของ DFIG ที่ใช้ในการศึกษา [24]

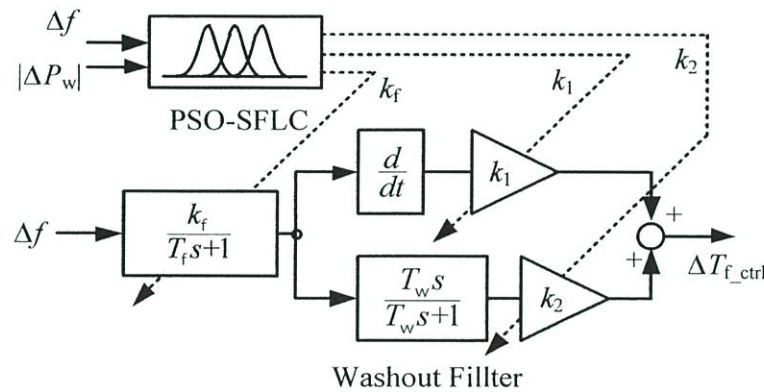
โดยที่	T_{setp}	คือ แรงบิดของ DFIG ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (pu)
	T_{dem}	คือ แรงบิดด้านเข้าของ DFIG (pu)
	ΔT_{f_ctrl}	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่แปลงมาจากตัวควบคุมความถี่ (pu)
	ΔT	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดของ DFIG (pu)
	T_{shaft}	คือ แรงบิดที่แกนโรเตอร์ของ DFIG (pu)
	J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (kg m^2)
	η	คือ ประสิทธิภาพของ DFIG
	ω_r	คือ ความเร็วเชิงมุมของแกนโรเตอร์ (pu)
	i_{rq}	คือ กระแสไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (pu)
	v_{rq}	คือ แรงดันไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (pu)
	K_p	คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน
	K_i	คือ ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
	Δf	คือ ค่าการแกว่งของความถี่ของระบบ (Hz)
	ΔP_w	คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของกังหันลม (pu)

จากรูปที่ 2.4 แบบจำลองของระบบ DFIG ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ และได้อธิบายแยกเป็นส่วน 4 ดังนี้



รูปที่ 2.5 ส่วนที่ 1 ของแบบจำลอง DFIG

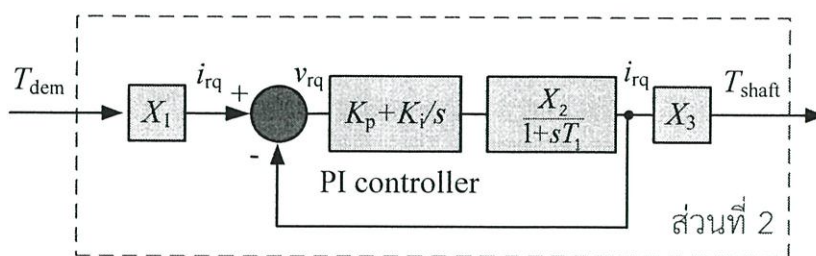
- ส่วนที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2.5 บล็อก Adaptive Controller จะทำหน้าที่แปลงการแกว่งของความถี่ให้กลายเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงบิดแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปควบคุมการตอบสนองต่อความถี่ของ DFIG ที่ปรับค่าได้ด้วยฟิชซี

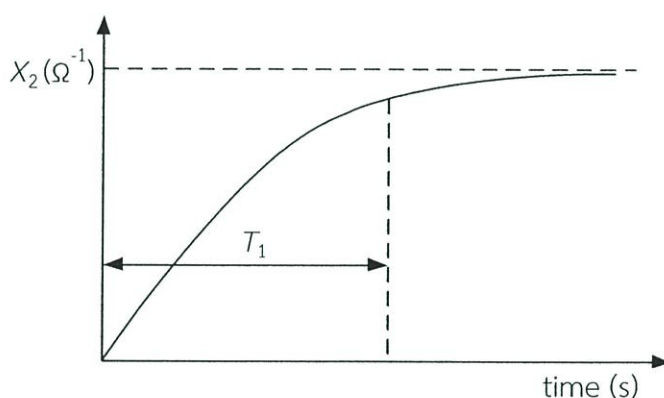
จากรูปที่ 2.6 ประกอบไปด้วยส่วนการตอบสนองต่อความถี่ของ DFIG โดย PSO-SFLC ที่นำเสนอจะทำหน้าที่วิเคราะห์ระบบ แล้วจ่ายสัญญาณควบคุมอัตราขยาย k_1 , k_2 และ k_f โดยมีรูปการตอบสนอง 2 รูปควบคุมร่วมกันซึ่งแต่ละรูปทำหน้าที่ดังนี้

- อัตราขยาย k_1 คือ ตัวสังเคราะห์ความถี่ของ DFIG ทำหน้าที่หน่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณการแกว่งของความถี่ $\left(\frac{df}{dt}\right)$ ซึ่งเป็นการตอบสนองเริ่มต้นของกังหันลม DFIG เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง
- อัตราขยาย k_2 คือ การกรองรูปร่างของสัญญาณด้วยตัวกรอง (Washout Filter) และด้วย T_w โดยกำหนดให้ตอบสนองหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ 2-3 วินาที
- ส่วนสุดท้าย คือ บล็อก k_f เป็นส่วนของการปรับอัตราขยายด้วยบล็อกสมการอันดับหนึ่ง ด้วยเวลา T_f เพื่อกำหนดสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งของความถี่ และการเปลี่ยนแปลงแรงบิด



รูปที่ 2.7 ส่วนที่ 2 ของแบบจำลอง DFIG

- รูปที่ 2.7 แสดงส่วนที่ 2 ของแบบจำลอง DFIG ซึ่งประกอบไปด้วย 2 บล็อกหลัก ๆ ได้แก่
 - บล็อกตัวควบคุม PI เป็นส่วนของการควบคุมแรงบิดที่ป้อนให้กับ DFIG โดยพิจารณาจากส่วนต่างของสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณป้อนกลับ
 - บล็อก $\frac{X_2}{1+sT_1}$ ทำหน้าที่พิจารณาถึงการตอบสนองของกังหันลม DFIG จริง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอินพุตที่ป้อนเข้า โดยมีความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการตอบสนองต่ออินพุตของ DFIG

บล็อก X_1 แทนสัดส่วนของการแปลงแรงบิด (T_{dem}) เป็นกระแส (i_{rq}) ส่วนสมการ และค่าของตัวแปร X_1 , X_2 , X_3 และ T_1 ที่ใช้ในแบบจำลอง และตัวแปรต่างที่จำเป็นแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรสำหรับแบบจำลอง DFIG

X_1	X_2	X_3	T_1
$\frac{L_{ss}}{L_m}$	$\frac{1}{R_r}$	$\frac{L_m}{L_{ss}}$	$\frac{L_0}{\omega_s R_r}$

ตารางที่ 2.2 ค่าของตัวแปรใน DFIG

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์ (R_s)	0.00491 pu
ค่าความต้านทานของโรเตอร์ (R_r)	0.00552 pu
ค่ารีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์ (X_{ls})	0.09273 pu
ค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ (X_{lr})	0.1 pu
ค่ารีแอกแตนซ์แม่เหล็ก (X_m)	3.96545
ค่าคงที่ความเฉื่อย (H)	4.5 sec
ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p)	0.5
ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (K_i)	0.5

โดยที่ L_{ss} หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad (2.10)$$

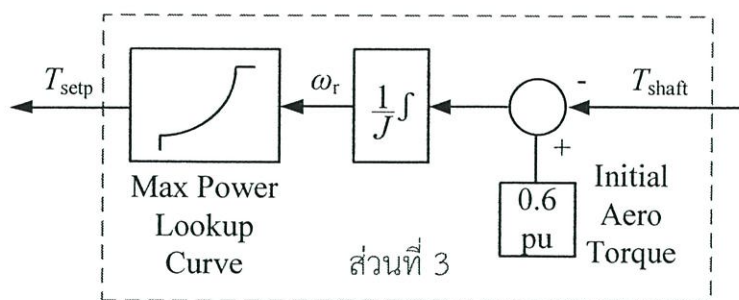
ส่วน L_0 หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$L_0 = L_{rr} - \frac{L_m^2}{L_{ss}} \quad (2.11)$$

และสามารถหา L_{rr} ได้จากสมการดังต่อไปนี้

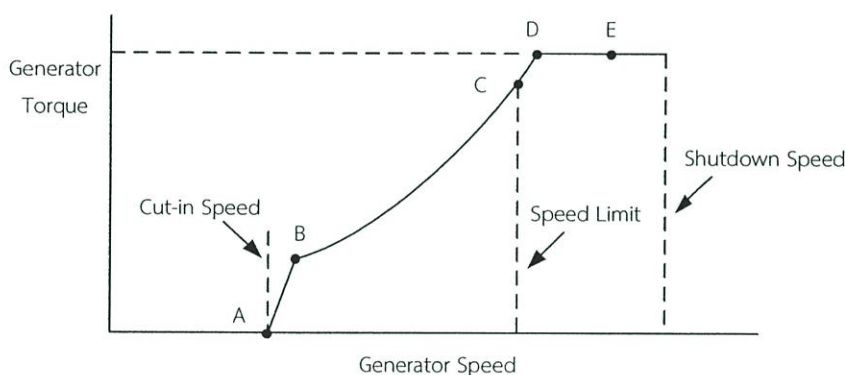
$$L_{rr} = L_r + L_m \quad (2.12)$$

โดยที่ L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วม
 L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์
 L_r คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของโรเตอร์
 ω_s คือ ความเร็วเชิงโคโรนัส



รูปที่ 2.9 ส่วนที่ 3 ของแบบจำลอง DFIG

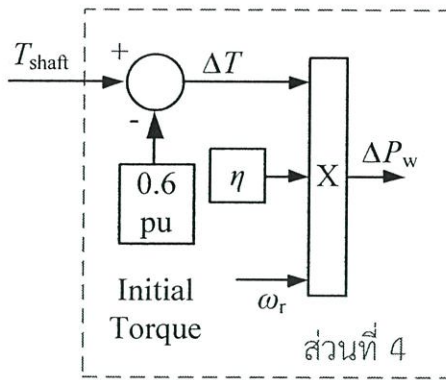
- ส่วนที่ 3 คือ ลูปสำหรับควบคุมให้ DFIG ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยมี Max Power Lookup Curve เป็นส่วนที่กำหนดโหมดการทำงานที่จุดต่าง ๆ ของ DFIG แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Max Power Lookup Curve สำหรับกำหนดจุดการทำงานของ DFIG ที่ใช้ในการศึกษา

จากรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายแยกเป็นโหมดการทำงานได้ดังนี้

- Below Cut-in Speed: โหมดนี้อยู่ในช่วงก่อนถึงจุด A โดยแกนโรเตอร์ของ DFIG ไม่หมุนและไม่ผลิตกำลังไฟฟ้า
- Max Power Tracking: โหมดนี้อยู่ในช่วงจุด B ถึง C โดยจะควบคุมให้ DFIG จ่ายกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- Constant Speed : โหมดนี้ทำงานที่จุด A ถึง B และจุด C ถึง D ในโหมดนี้สามารถเปลี่ยนแปลงแรงบิดได้แต่ความเร็วโรเตอร์ต้องคงที่ เนื่องจากข้อจำกัดของคอนเวอร์เตอร์ที่ความเร็วต่ำ และข้อจำกัดทางอากาศพลศาสตร์ที่ความเร็วสูงตามลำดับ
- Pitch Control or Stall: โหมดทำงานที่จุด D ถึง E ซึ่งความเร็วโรเตอร์ และแรงบิดจะถูกจำกัดไว้ที่จุดสูงสุดโดยการปรับองศาของใบพัดเพื่อลดแรงบิดที่เกิดจากการปะทะกับอากาศ
- Shutdown: โหมดนี้ DFIG จะปิดตัวเองลงเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วโรเตอร์เกินขอบเขตที่กำหนดไว้

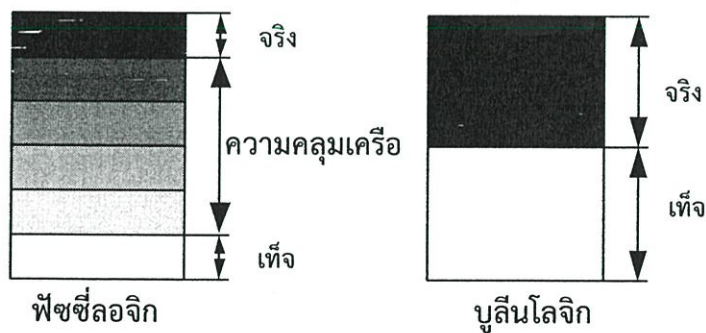


รูปที่ 2.11 ส่วนที่ 4 ของแบบจำลอง DFIG

- ส่วนที่ 4 คือ ส่วนของการคิดการเปลี่ยนแปลงแรงบิดให้เป็นการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของ DFIG โดยคิดจากแรงบิดของแกนโรเตอร์ลบกับแรงบิดของลมเริ่มต้น จากนั้นนำไปคูณกับค่าประสิทธิภาพของ DFIG และความเร็วโรเตอร์จะได้เป็นการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของ DFIG ดังแสดงในรูปที่ 2.11

2.3 ฟัชซี (Fuzzy Logic Controller)

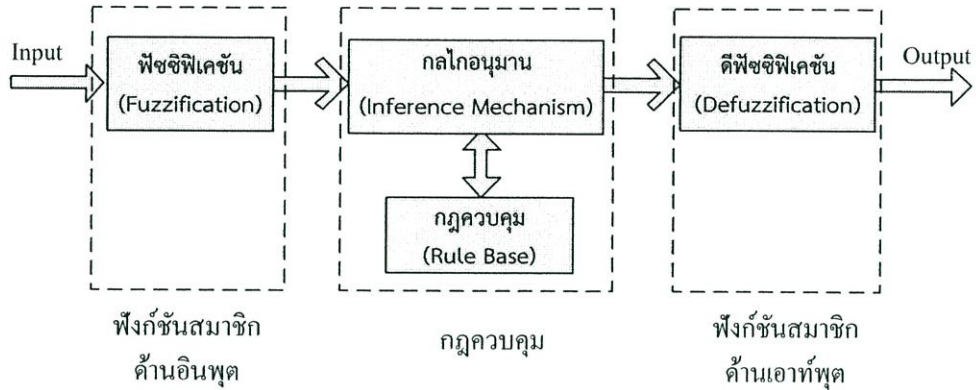
ฟัชซีลอจิก เป็นตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือที่พัฒนาจากฟัชซีเซต (Fuzzy Set) โดยเป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณ ซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะ ถูก/ผิด หรือ ใช่/ไม่ใช่ของตรรกศาสตร์แบบฉบับ (Classical Logic) ฟัชซีลอจิกนั้นถือเป็นการประยุกต์ใช้งาน เพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญต่อปัญหาที่ซับซ้อน ค่าระดับความจริงในตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นมักจะสับสนกับค่าความน่าจะเป็น ซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน ค่าระดับความจริงคลุมเครือนั้นใช้ในการระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซต (Set Membership) แต่ค่าความน่าจะเป็นนั้นระบุความเป็นไปได้ของสภาพการณ์แต่ละรูปแบบที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 2.12 ความแตกต่างของตรรกะแบบเท็จจริง และตรรกะแบบฟัชซี

ฟัชซีลอจิก สามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตด้วยค่าระหว่างศูนย์ ถึง หนึ่ง ที่แตกต่างจากตรรกะแบบเท็จจริง (Boolean Logic) ตรงที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial True) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely True) กับเท็จ (Completely False) ส่วน

ตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริง (1) กับเท็จ (0) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองระดับด้วยคำพูดที่ว่า "เล็กน้อย" "ค่อนข้าง" หรือ "มาก" โดยใช้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตบางส่วน ฟัชซีลอจิกมีความสัมพันธ์กับ ฟัชซีเซต และทฤษฎีความเป็นไปได้ ซึ่งคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1965 โดย L.A. Zadeh [31]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างการทำงานของฟัชซีลอจิก

รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างการทำงานของฟัชซีลอจิก สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ฟัชซีฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นการทำหน้าที่แปลงข้อมูลอินพุตให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัชซี ด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุต

ขั้นตอนที่ 2 กลไกอนุมาน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริง และกฎ เพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ปัญหา รวมทั้งกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

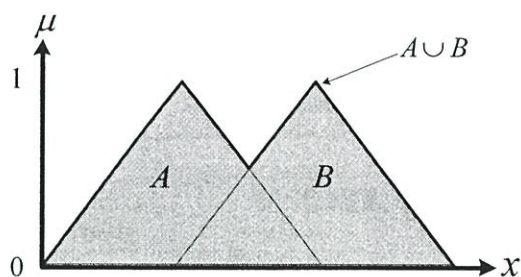
ขั้นตอนที่ 3 ฐานความรู้ เป็นส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา

ขั้นตอนที่ 4 ดีฟัชซีฟิเคชัน (Defuzzification) ทำหน้าที่แปลงตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัชซีที่ได้มาจากกลไกอนุมานให้เป็นเอาต์พุตจริงสำหรับกระบวนการของระบบด้วยการใช้ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุต

การดำเนินการของฟัชซีเซตสำหรับฟังก์ชันสมาชิกมีคุณสมบัติเหมือนกับเซตโดยทั่วไป มีการดำเนินการอยู่ด้วยกันสามแบบ คือ ยูเนียน (Union) อินเตอร์เซกชัน (Intersection) และคอมพลีเมนต์ (Complement)

1. ยูเนียน (Union) ของฟัชซีเซตแสดงในรูปที่ 2.14 จะเป็นการทำงานแบบ OR ดังสมการต่อไปนี้

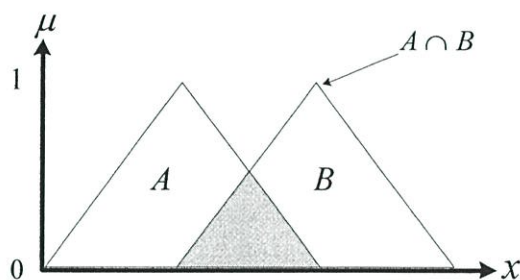
$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.14 การทำงานแบบยูเนียนของฟัซซี่

2. อินเตอร์เซกชัน (Intersection) ของฟัซซี่เซตแสดงในรูปที่ 2.15 จะเป็นการทำงานแบบ AND ดังสมการต่อไปนี้

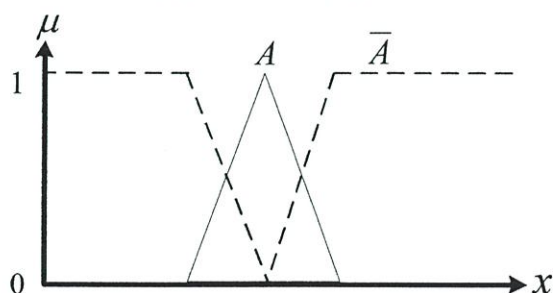
$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.15 การทำงานแบบอินเตอร์เซกชันของฟัซซี่

3. คอมพลิเมนต์ (Complement) ของฟัซซี่เซตดังแสดงในรูปที่ 2.16 หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.16 การทำงานแบบคอมพลิเมนต์ของฟัซซี่

ในปี 1985 [32] Takagi และ Sugeno (SFLC) ได้เสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี่ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นกฎเงื่อนไข ของการแจกแจงเหตุสุด

(Implication) ซึ่งอธิบายปริภูมิ (Space) ของอินพุต และในส่วนของผลสรุปเป็นการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรอินพุต-เอาต์พุต การระบุหาแบบจำลองอาศัยข้อมูลของอินพุต-เอาต์พุต ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนคือการระบุหาโครงสร้าง และพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

จากพื้นฐานแนวคิดของ SFLC รูปแบบของกฎควบคุมภายใต้เงื่อนไข If-Then สามารถแสดงได้ดังนี้

$$R^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and...and } x_n \text{ is } A_n^i \text{ Then } y^i = f_i(x_1, \dots, x_n) \quad (2.13)$$

โดย A_n^i เป็นฟัซซีเซตตัวที่ n ของกฎข้อที่ i และกำหนดให้อินพุตเป็น (x_1, \dots, x_n) ดังนั้นค่าเอาต์พุตของแบบจำลองฟัซซีประมาณได้โดยใช้การเฉลี่ยโดยน้ำหนักของ y^i ดังนี้

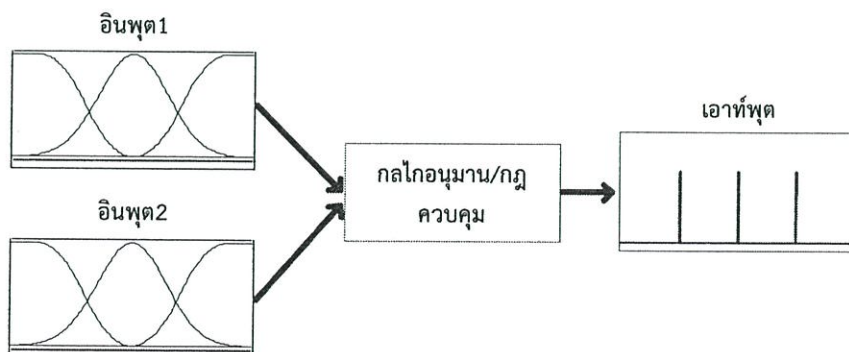
$$Y = \frac{\sum_{i=1}^k w^i y^i}{\sum_{i=1}^k w^i} \quad (2.14)$$

โดยที่ k เป็นจำนวนของกฎฟัซซี

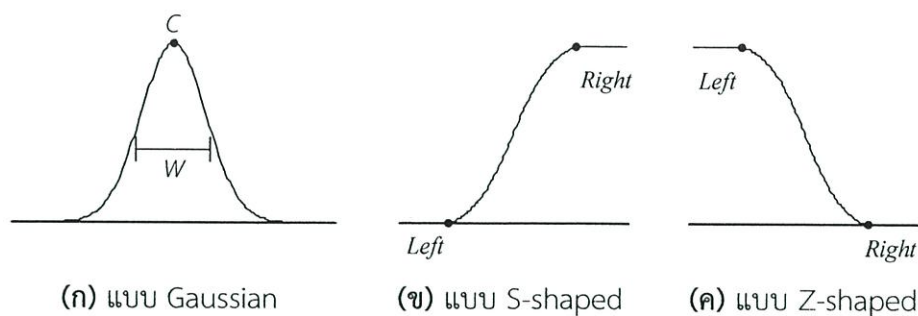
y^i เป็นเอาต์พุตของกฎข้อที่ i

w^i เป็นค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมดของส่วนเงื่อนไขของการแจกแจงผลลัพธ์สำหรับตัวแปรอินพุต

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากฟัซซีจะเป็นรูปแบบของฟังก์ชัน $y^i = f_i(x_1, \dots, x_n)$ เมื่อทำการแทนค่าฟังก์ชันด้วยคำตอบที่มีสมการอันดับที่ศูนย์ เอาต์พุตที่ได้ก็จะ เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาฟัซซีประเภทนี้ไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดอัตราขยายแบบฟัซซี



รูปที่ 2.17 โครงสร้างทั่วไปของตัวกำหนดอัตราขยายแบบฟัซซี



รูปที่ 2.18 โครงสร้างฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzyที่ใช้ศึกษา

การควบคุมแบบฟuzzyที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วย ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตแบบค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และฟังก์ชันสมาชิกอินพุตแบบ Gaussian S-shaped และ Z-shaped ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยแต่ละแบบประกอบด้วยตำแหน่งสมาชิกดังนี้

แบบ Gaussian มีลักษณะเป็นเส้นโค้งการกระจายแบบธรรมชาติ โดยมีตำแหน่งสมาชิกเป็นค่าตัวแปร 2 ตัว คือ

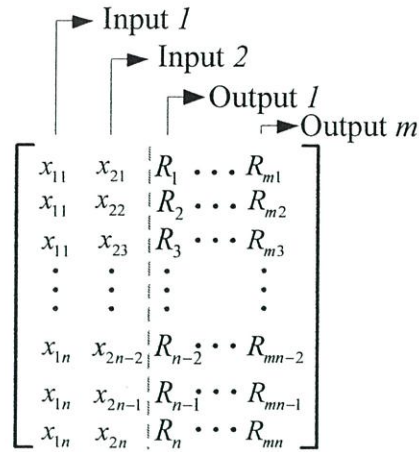
ตำแหน่งศูนย์กลางของฟังก์ชัน	Center (C)
ตัวกำหนดความกว้างของฟังก์ชัน	Width (W)

แบบ S-shaped มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ไป 1 จากด้านซ้ายไปขวา โดยมีตำแหน่งสมาชิกเป็นค่าตัวแปร 2 ตัว คือ

ตำแหน่งทางด้านซ้าย	Left
ตำแหน่งทางด้านขวา	Right

แบบ Z-shaped มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง มีค่าลดลงจาก 1 ไป 0 จากด้านซ้ายไปขวา โดยมีตำแหน่งสมาชิกเป็นค่าตัวแปร 2 ตัว คือ

ตำแหน่งทางด้านซ้าย	Left
ตำแหน่งทางด้านขวา	Right



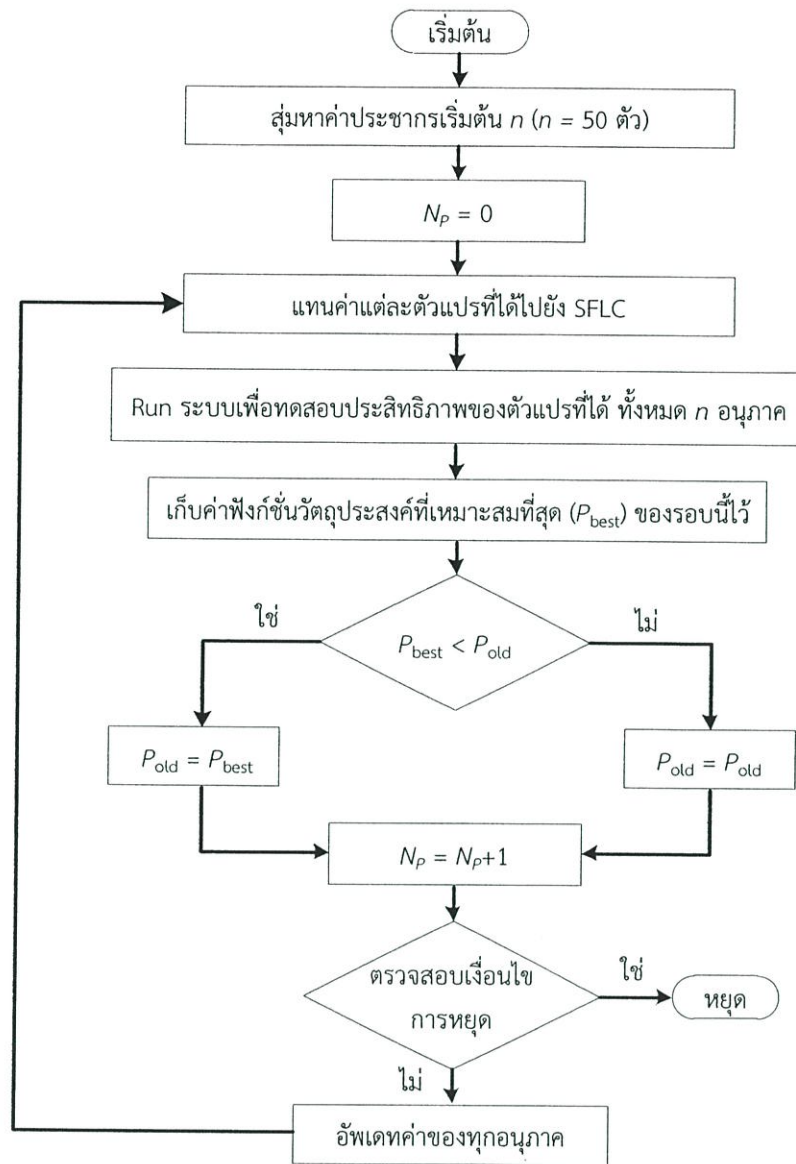
รูปที่ 2.19 โครงสร้างกฎควบคุมของฟัซซี่ที่ใช้ศึกษา

สำหรับกฎควบคุมของฟัซซี่ที่มี 2 อินพุต และ m เอาต์พุต ได้แสดงอยู่ในจำนวน n แถว m คอลัมน์ ตามที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.19 โดยที่ x และ R คือตัวแทนของสมาชิกแต่ละตัวของอินพุต และเอาต์พุต ตามลำดับ โดยจำนวน n หาได้จากจำนวนสมาชิกใน Input 1 คูณด้วยจำนวนสมาชิกใน Input 2 เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว Input 1 Input 2 และเอาต์พุตจะแสดงโดยตัวแปรทางภาษา หรือตัวแปรฟัซซี่ ซึ่งแทนด้วยตัวเลขที่มีสมาชิกอยู่ในทั้งหมด ในที่นี้ ตัวแปรของกฎควบคุมที่จะต้องทำการออกแบบคือตัวแปรด้านเอาต์พุตซึ่งจะมีจำนวน $n \times m$ ตัวแปร

2.4 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [15] ได้คิดค้นมาจากการเลียนแบบการเคลื่อนที่หาอาหารของฝูงนกหรือฝูงปลา โดยขั้นตอนของกระบวนการทำงานของวิธี PSO ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงในรูปที่ 2.20 และสามารถอธิบายรายละเอียดเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1: สร้างอนุภาคเริ่มต้นแบบสุ่มจำนวน n อนุภาค ในที่นี้ $n = 50$ และอนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว
- ขั้นตอนที่ 2: ให้ $N_p = 0$ เมื่อ N_p คือจำนวนรอบของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
- ขั้นตอนที่ 3: อนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้จะถูกแทนค่าไปที่พารามิเตอร์ใน SFLC
- ขั้นตอนที่ 4: หลังจากแทนค่าจะถูกทดสอบเพื่อดูค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- ขั้นตอนที่ 5: เลือกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม (P_{best})
- ขั้นตอนที่ 6: ถ้า $P_{best} < P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{best}$ (P_{old} คือค่าที่เหมาะสมที่สุดของรอบที่ผ่านมา) แล้วข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8
- ขั้นตอนที่ 7: ถ้า $P_{best} > P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{old}$ แล้วไปทำขั้นตอนต่อไป
- ขั้นตอนที่ 8: ให้ $N_p = N_p + 1$
- ขั้นตอนที่ 9: ตรวจสอบว่าจำนวนรอบถึงรอบที่กำหนดแล้วหรือไม่ โดยถ้า $N_p = 200$ ให้หยุดการหา ถ้าไม่ให้ทำต่อไป
- ขั้นตอนที่ 10: อัปเดตค่าของอนุภาคแต่ละตัว แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ต่อไป



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการทำงานของวิธี PSO

สมการการอัปเดตค่าของอนุภาคแต่ละตัวที่ใช้ในการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$V^{t+1} = (V^t (1 - \beta)) + (V^b \beta) + (\alpha(\text{rand} - 0.5)) \quad (2.15)$$

- โดยที่
- V^{t+1} คือ ตัวแปรที่ถูกอัปเดตค่าแล้ว
 - V^t คือ ตัวแปรก่อนที่จะถูกอัปเดตค่า
 - V^b คือ ตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของรอบที่ผ่านมา (global best)
 - rand คือ การสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1
 - α และ β คือ ค่าความแรงคงที่ ในที่นี้กำหนดให้ $\alpha = 0.2$ และ $\beta = 0.5$

บทที่ 3

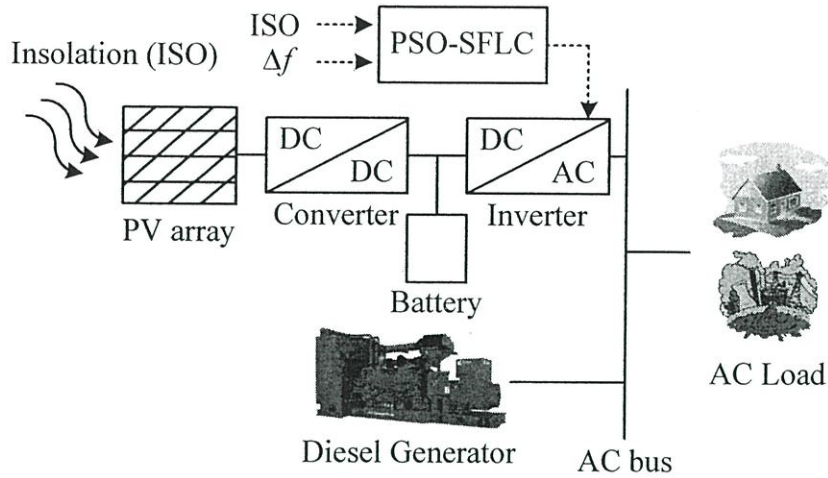
การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อรักษาเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระและระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

ในปัจจุบันฟาร์มแสงอาทิตย์ (Solar Farm) หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าของ PV บวกกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลันเป็นต้นเหตุให้เกิดปัญหาการแกว่งของความถี่ในระบบ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ในบทนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyซิดชูจิโน (Sugeno Fuzzy Logic Controller: SFLC) ให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) สำหรับ PV เพื่อควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ โดยที่มีสัญญาณอินพุตของ PSO-SFLC คือสัญญาณการแกว่งของความถี่ในระบบ และความเข้มแสง (Insolation: ISO) หลังจากทีวิเคราะห์สัญญาณแล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตเพื่อไปควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์ของ PV ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อไปชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ลดการแกว่งของความถี่ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าของตัวแปรที่เหมาะสมของ PSO-SFLC ได้จาก PSO ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ยืนยันว่าประสิทธิภาพการควบคุมความถี่ และความคงทนของ PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC ดียิ่งกว่า PV ที่ติดตั้ง SFLC และ PV ที่ติดตั้งเฉพาะ MPPT ภายใต้ภาวะการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และโหลดแบบสุ่ม ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และข้อจำกัดด้านขนาดของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

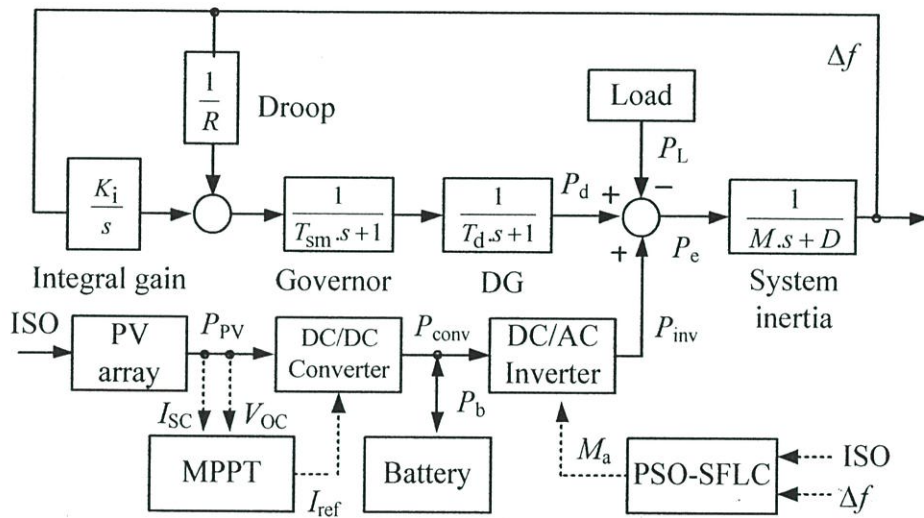
3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

รูปที่ 3.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา ในระบบประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Generator: DG), PV และโหลด โดยขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของ DG และ PV คือ 465 kW และ 225 kW ตามลำดับ รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา โดยติดตั้งตัวควบคุม PSO-SFLC ไว้กับ PV โดยตัวแปรต่าง ๆ ในระบบแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

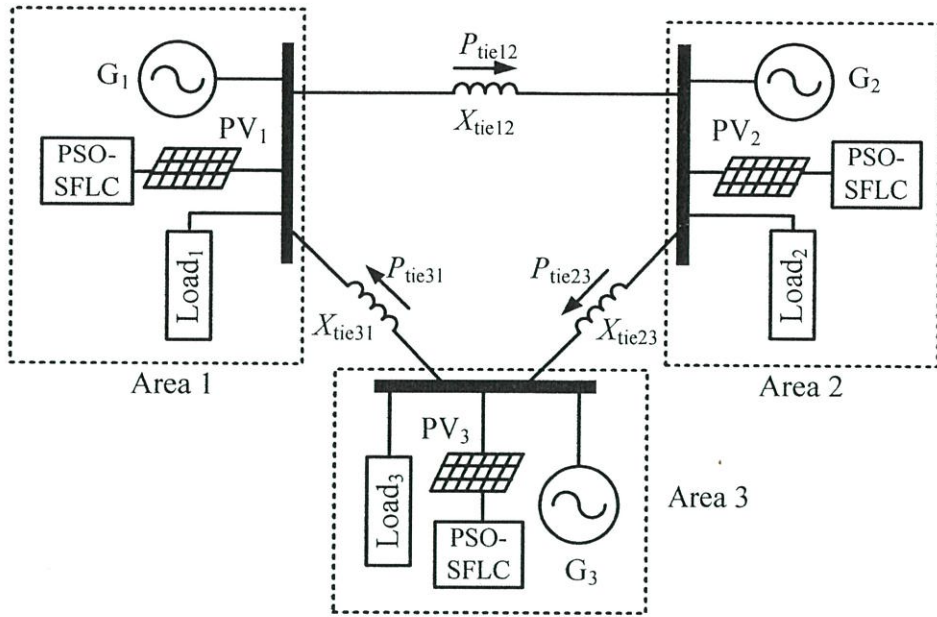
ตัวแปรของ DG	ค่าที่กำหนด
ค่าคงที่ความเฉื่อยของระบบ (M)	0.150 puMW.s/Hz
ค่าคงที่การหน่วง (D)	0.008 puMW/Hz
ค่าคงที่เวลาของตัวบังคับความเร็ว (T_{sm})	0.10 s
ค่าคงที่เวลาของ DG (T_d)	5.0 s
ดรู๊ป (R)	2.5 Hz/puMW
ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (K_i)	0.022

โดยที่	ISO	คือ ความเข้มแสง (Watt/m^2)
	P_{pv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (pu)
	V_{oc}	คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผง PV (V)
	I_{sc}	คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผง PV (A)
	I_{ref}	คือ กระแสอ้างอิงสำหรับ DC/DC คอนเวอร์เตอร์ (A)
	P_{conv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DC/DC คอนเวอร์เตอร์ (pu)
	P_b	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแบตเตอรี่ (pu)
	P_{inv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (pu)
	P_d	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DG (pu)
	P_L	คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด (pu)
	P_e	คือ กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดลบกับโหลด (pu)
	Δf	คือ การแกว่งของความถี่ในระบบ (Hz)
	M_a	คือ สัญญาณจาก PSO-SFLC ที่ไปควบคุมอินเวอร์เตอร์
	T_{sm}	คือ ค่าคงที่เวลาของตัวบังคับความเร็ว (s)
	T_d	คือ ค่าคงที่เวลาของ DG (s)
	M	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของระบบ (puMW.s/Hz)
	D	คือ ค่าคงที่การหน่วง (puMW/Hz)
	K_i	คือ ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
	R	คือ ดรูป (Hz/puMW)

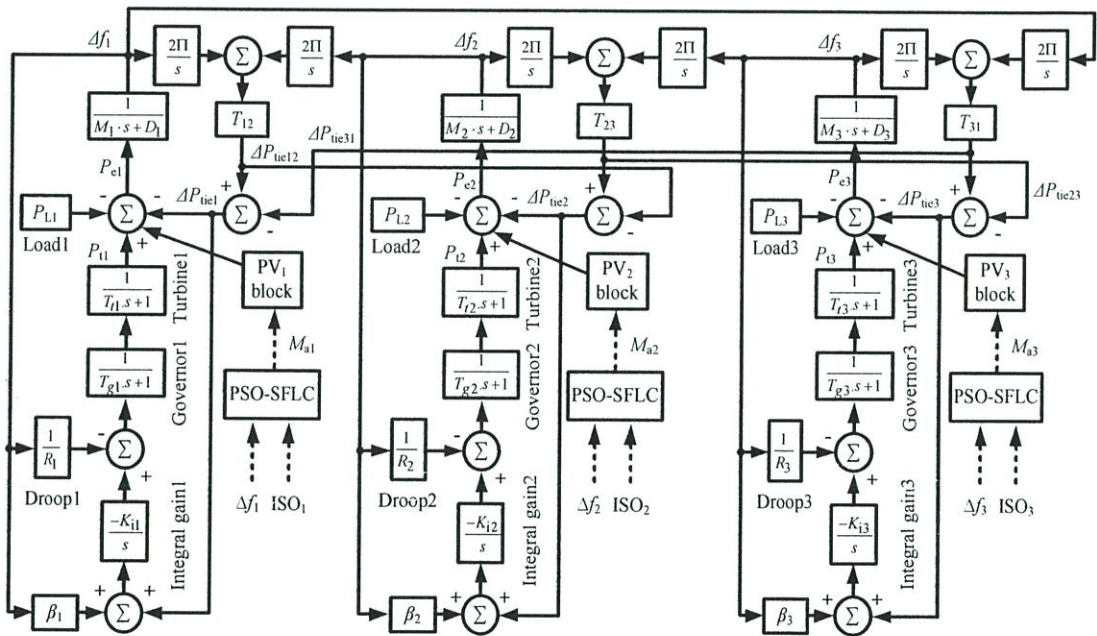
3.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

รูปที่ 3.3 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งในแต่ละพื้นที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ฟาร์ม PV และโหลด จากที่กล่าวไว้ใน [14] พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละพื้นที่มาจากผลรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมของพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งจะได้พิกัดกำลังไฟฟ้าในพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 คือ 1000, 1100 และ 850 MW ตามลำดับ เมื่อรวมแล้วพิกัดกำลังไฟฟ้าทั้งหมดของกังหันไอน้ำคือ 2950 MW โดยขนาด และพิกัดกำลังไฟฟ้าของ PV ในแต่ละพื้นที่แสดงในตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ โดยแบบจำลองนี้จะใช้ศึกษาถึงพฤติกรรมตอบสนองด้านความถี่ของระบบ ซึ่งระบบนี้จะติดตั้ง PSO-SFLC เข้ากับ PV ในแต่ละพื้นที่เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อไปช่วยควบคุมความถี่ในระบบ โดยที่ค่าของตัวแปรต่าง ๆ ในระบบแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.4 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

ตารางที่ 3.2 พิกัดกำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำ และ PV (ค่าฐาน 1000 MW)

กังหันไอน้ำ		แผง PV	
พื้นที่	พิกัดกำลังไฟฟ้า	พื้นที่	พิกัดกำลังไฟฟ้า
1	1000 MW	1	400 MW
2	1100 MW	2	220 MW
3	850 MW	3	371 MW

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

พื้นที่	M (pu·s)	D (pu/Hz)	T_g (s)	T_t (s)	R (Hz/s)	K (s)	β (pu/Hz)	T_{ab} (pu/Hz)
1	0.1667	0.015	0.08	0.40	3.00	-0.3	0.3483	$T_{12}=0.20$ $T_{13}=0.25$
2	0.2917	0.016	0.06	0.44	2.73	-0.2	0.3827	$T_{21}=0.20$ $T_{23}=0.12$
3	0.1247	0.015	0.07	0.30	2.82	-0.4	0.3692	$T_{31}=0.25$ $T_{32}=0.12$

- โดยที่ P_t คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของกังหันไอน้ำ (pu)
 T_g คือ ค่าคงที่เวลาของตัวบังคับความเร็ว (s)
 T_t คือ ค่าคงที่เวลาของกังหันไอน้ำ (s)
 β คือ ความถี่โอบแฮส (pu/Hz)
 ΔP_{tie12} คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างพื้นที่ที่ 1 และ 2 (pu)
 ΔP_{tie23} คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างพื้นที่ที่ 2 และ 3 (pu)
 ΔP_{tie31} คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างพื้นที่ที่ 3 และ 1 (pu)
 T_{12} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงบิดระหว่างพื้นที่ที่ 1 และ 2 (pu/Hz)
 T_{23} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงบิดระหว่างพื้นที่ที่ 2 และ 3 (pu/Hz)
 T_{31} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงบิดระหว่างพื้นที่ที่ 3 และ 1 (pu/Hz)

3.2 ตัวควบคุมที่นำเสนอและการออกแบบ

3.2.1 การออกแบบฟuzzyลอจิกสำหรับระบบแยกอิสระ

ในที่นี้ได้ออกแบบให้ PSO-SFLC ติดตั้งเข้ากับ PV ในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV โดยหลักการออกแบบกฎควบคุม และฟังก์ชันสมาชิกของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระสามารถอธิบายได้จากกฎ “if-then” ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{if Input ISO} = x_o \text{ and Input } \Delta f = y_p \\ \text{then, Output } M_a = Ax_o + By_p + C_q \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$o = 1, 2, 3, 4 \quad p = 1, 2, \dots, 7 \quad q = 1, 2, 3$$

โดยที่ x_o คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุตที่ o ของ ISO
 y_p คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุตที่ p ของ Δf
 C_q คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตที่ q ของ M_a

ในที่นี้ A และ $B = 0$

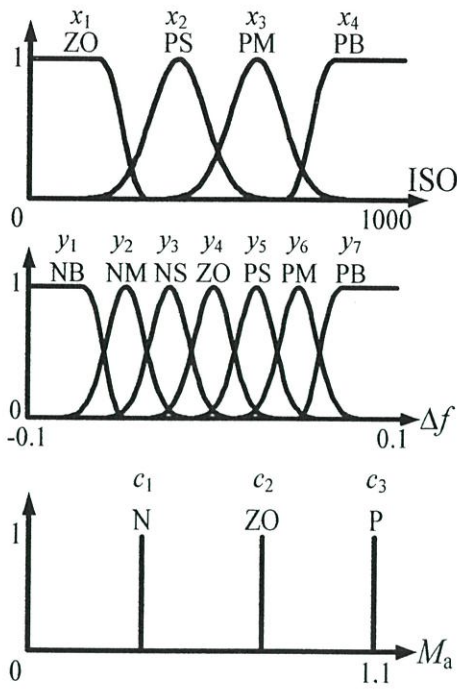
สัญญาณเอาต์พุตของกฎข้อที่ i จะถูกถ่วงน้ำหนักจากกฎของ “AND” ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอินพุตของฟังก์ชันสมาชิก 2 สัญญาณ โดยค่าถ่วงน้ำหนักของกฎข้อที่ i สามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$w_i = \min(x_o, y_p) \quad (3.2)$$

ค่าที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักของกฎทุกข้อจะถูกนำมาคูณกับสมาชิกด้านเอาต์พุตของกฎข้อนั้น ๆ จากนั้นกฎทุก ๆ ข้อจะถูกนำมารวมกันแล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าที่เหมาะสม จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i C_q}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.3)$$

โดยที่ N คือจำนวนของกฎควบคุมของ PSO-SFLC ในที่นี้ $N = 28$ โดยฟังก์ชันสมาชิกอินพุต เอาต์พุต และกฎควบคุมที่ใช้ใน PSO-SFLC ก่อนถูกตั้งค่าอย่างเหมาะสม (SFLC) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระแสดงในรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

ตารางที่ 3.4 กฎควบคุมของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

		Δf						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ISO	ZO	P	P	P	ZO	ZO	ZO	N
	PS	P	P	ZO	ZO	ZO	N	N
	PM	P	ZO	ZO	ZO	N	N	N
	PB	P	ZO	ZO	ZO	N	N	N

- โดยที่ NB คือ Negative Big
 NM คือ Negative Medium
 NS คือ Negative Small
 PB คือ Positive Big
 PM คือ Positive Medium
 PS คือ Positive Small
 ZO คือ Zero
 N คือ Negative
 P คือ Positive

3.2.2 การออกแบบฟuzzyลอจิกสำหรับระบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่

ในที่นี้ได้ออกแบบให้ PSO-SFLC ติดตั้งกับ PV ในแต่ละพื้นที่เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV หลักการออกแบบกฎควบคุม และฟังก์ชันสมาชิกของระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่สามารถอธิบายได้จากกฎ “if-then” ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{if Input ISO} = x_o \text{ and Input } \Delta f &= y_p \\ \text{then, Output } M_a &= Ax_o + By_p + C_m \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$o = 1, 2, 3, 4 \quad p = 1, 2, \dots, 7 \quad m = 1, 2, \dots, 7$$

โดยที่ C_m คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตที่ m ของ M_a

ในที่นี้ A และ $B = 0$

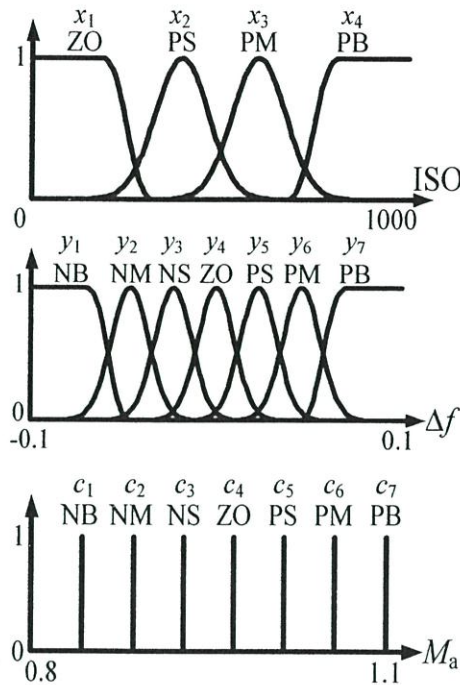
สัญญาณเอาต์พุตของกฎข้อที่ i จะถูกถ่วงน้ำหนักจากกฎของ “AND” ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอินพุตของฟังก์ชันสมาชิก 2 สัญญาณ โดยค่าถ่วงน้ำหนักของกฎข้อที่ i สามารถอธิบายได้จากสมการ (3.2) ค่าที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักของกฎทุกข้อจะถูกนำมาคูณกับสมาชิกด้านเอาต์พุตของกฎข้อนั้น ๆ จากนั้นกฎทุก ๆ ข้อจะถูกนำมารวมกันแล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าที่เหมาะสมจากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i C_m}{\sum_{i=1}^N w_i} \tag{3.5}$$

โดยที่ N คือจำนวนของกฎควบคุมของ PSO-SFLC แต่ละตัว ในที่นี้ $N = 28$ โดยฟังก์ชันสมาชิกอินพุตเอาต์พุต และกฎควบคุมที่ใช้ใน PSO-SFLC ก่อนถูกตั้งค่าอย่างเหมาะสม (SFLC) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่แสดงในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 กฎควบคุมของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

		Δf						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ISO	ZO	PS	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB
	PS	PS	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB
	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
	PB	PS	PS	ZO	NS	NM	NB	NB



รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

สุดท้ายค่า M_a ที่ได้จาก SFLC หรือ PSO-SFLC จะถูกส่งไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ใน PV ซึ่งสามารถสรุปหลักการควบคุมได้ดังนี้

- เมื่อสัญญาณจาก SFLC หรือ PSO-SFLC มีค่าเท่ากับ 1 จะสั่งให้อินเวอร์เตอร์ใน PV จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเท่ากับที่ผลิตได้จาก MPPT

- เมื่อสัญญาณจาก SFLC หรือ PSO-SFLC มีค่ามากกว่า 1 จะสั่งให้อินเวอร์เตอร์ใน PV จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบมากกว่าที่ผลิตได้จาก MPPT แบตเตอรี่จึงต้องช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่พอจ่ายให้กับระบบ

- เมื่อสัญญาณจาก SFLC หรือ PSO-SFLC มีค่าน้อยกว่า 1 จะสั่งให้อินเวอร์เตอร์ใน PV จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบน้อยกว่าที่ผลิตได้จาก MPPT แบตเตอรี่จึงต้องช่วยเก็บกำลังไฟฟ้าที่เกินจากที่ผลิตได้ไว้

3.2.3 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

ในบทนี้ได้ออกแบบฟังก์ชันสมาชิกอินพุต เอาต์พุต และกฎควบคุมของ PSO-SFLC โดยหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมจาก PSO โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระและระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัญหาของระบบนั้น ๆ โดยที่ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\text{Minimize } \gg \int_0^T |\Delta f| dt + \int_0^T |P_{conv} - P_{inv}| dt \quad (3.5)$$

โดยที่ T คือ เวลาที่ใช้ในการจำลอง

จากสมการ 3.5 แรกแทนด้วยการหาค่าตัวแปรที่ทำให้ค่าการแกว่งของความถี่น้อยที่สุด พจน์ที่สองแสดงถึงผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากคอนเวอร์เตอร์กับกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้กับระบบ โดยพจน์นี้จะบังคับให้ PV จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับที่ผลิตได้ หรือก็คือให้แบตเตอรี่ทำงานน้อยที่สุด เพื่อลดขนาดของแบตเตอรี่ในขณะที่ยังสามารถควบคุมความถี่ในระบบไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

$$\text{Minimize } \gg \sum_{i=1}^3 \int_0^T |\Delta f_j| dt + \sum_{i=1}^3 \int_0^T |P_{convj} - P_{invj}| dt \quad (3.6)$$

โดยที่ j คือ คือพื้นที่ที่ j ($j=1,2,3$)

จากสมการ 3.6 พจน์แรกแทนด้วยการหาค่าตัวแปรที่ทำให้ค่าการแกว่งของความถี่ในแต่ละพื้นที่น้อยที่สุด พจน์ที่สองแสดงถึงผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้กับระบบในแต่ละพื้นที่ เพื่อลดขนาดของแบตเตอรี่ในขณะที่ยังสามารถควบคุมความถี่ในระบบไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

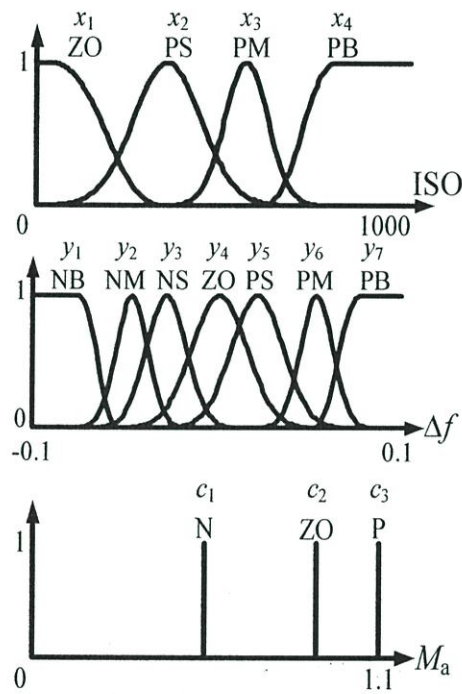
การหาค่าที่เหมาะสมด้วย PSO มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1: สร้างอนุภาคเริ่มต้นแบบสุ่มจำนวน n อนุภาค ในที่นี้ $n = 50$ และอนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้ต้องอยู่ภายในขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว
- ขั้นตอนที่ 2: ให้ $N_p = 0$ เมื่อ N_p คือจำนวนรอบของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
- ขั้นตอนที่ 3: อนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้จะถูกแทนค่าไปที่พารามิเตอร์ใน SFLC
- ขั้นตอนที่ 4: หลังจากแทนค่าจะถูกทดสอบเพื่อดูค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- ขั้นตอนที่ 5: เลือกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม (P_{best})
- ขั้นตอนที่ 6: ถ้า $P_{best} < P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{best}$ (P_{old} คือค่าที่เหมาะสมที่สุดของรอบที่ผ่านมา) แล้วข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8
- ขั้นตอนที่ 7: ถ้า $P_{best} > P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{old}$ แล้วไปทำขั้นตอนต่อไป
- ขั้นตอนที่ 8: ให้ $N_p = N_p + 1$
- ขั้นตอนที่ 9: ตรวจสอบว่าจำนวนรอบถึงรอบที่กำหนดแล้วหรือไม่ โดยถ้า $N_p = 200$ ให้หยุดการหา ถ้าไม่ให้ทำต่อไป
- ขั้นตอนที่ 10: อัปเดตค่าของอนุภาคแต่ละตัว แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

3.3 ผลการจำลอง

ในการจำลองศึกษาทางคอมพิวเตอร์ได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 ทดสอบ PSO-SFLC ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และกรณีที่ 2 ทดสอบในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ ในที่นี้ตัวควบคุมที่นำเสนอ (PSO-SFLC) จะถูกเปรียบเทียบผลการจำลองกับ PV ที่ติดตั้งเฉพาะ MPPT ในที่นี้จะเรียกว่า MPPT และ PV ที่ติดตั้ง SFLC ในที่นี้จะเรียกว่า SFLC

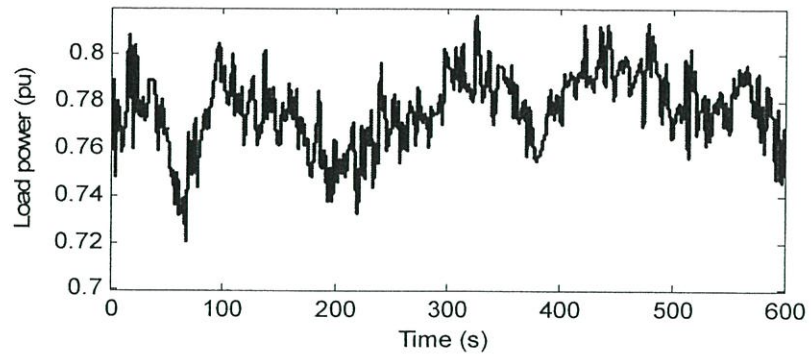
กรณีที่ 1 ทดสอบในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ โดยหลังจากหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO จะได้ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต เอาต์พุต และกฎควบคุมของ PSO-SFLC แสดงในรูปที่ 3.7 และตารางที่ 3.6 ตามลำดับ ซึ่งในระบบมีสิ่งรบกวนคือการเปลี่ยนแปลงโหลด และความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ตามลำดับ



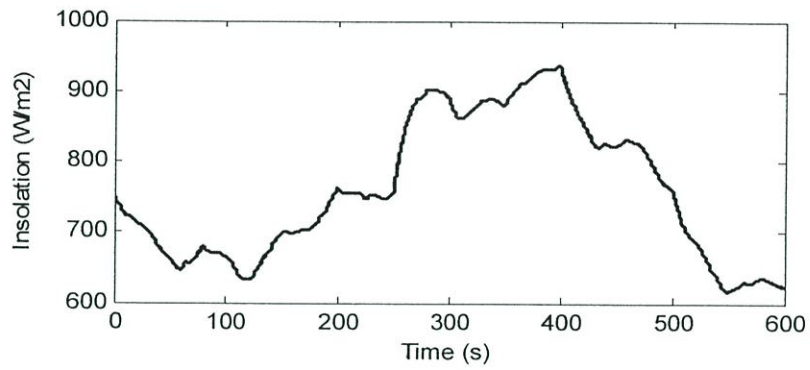
รูปที่ 3.7 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

ตารางที่ 3.6 กฎควบคุมของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

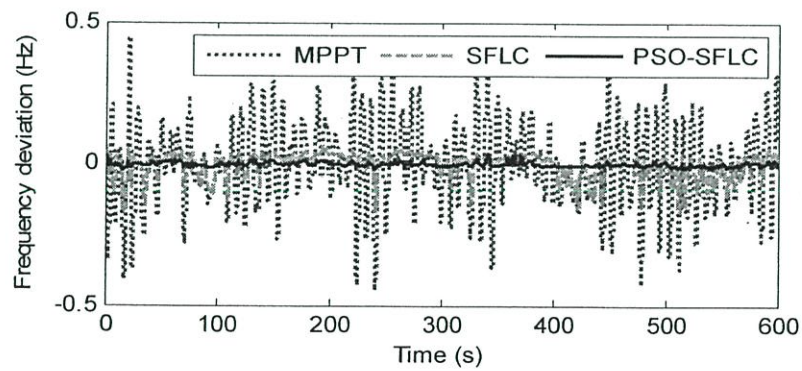
		Δf						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ISO	ZO	P	N	ZO	N	ZO	ZO	P
	PS	P	ZO	P	P	ZO	P	ZO
	PM	P	P	P	ZO	N	N	N
	PB	P	P	P	N	N	N	N



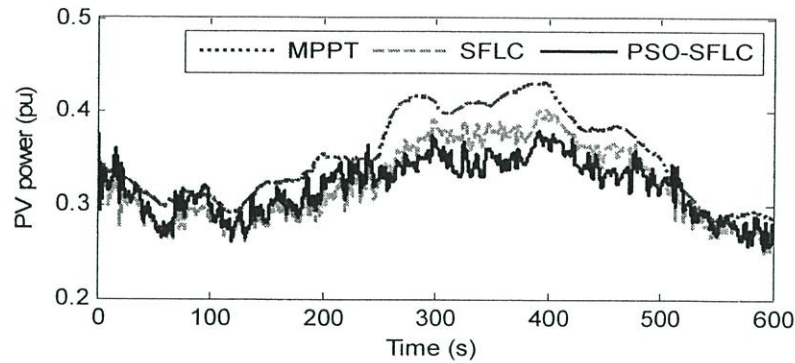
รูปที่ 3.8 โหลด (กรณีที่ 1)



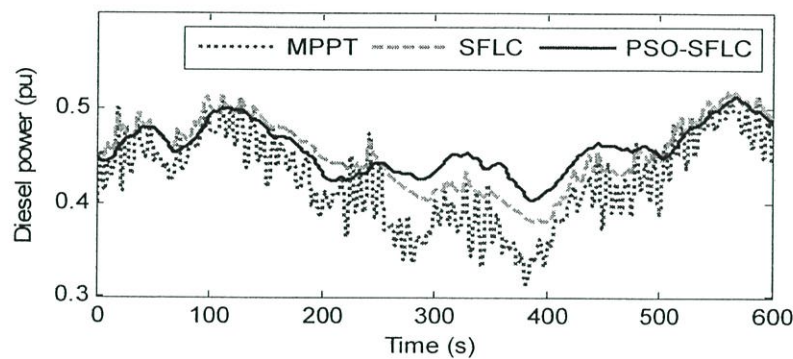
รูปที่ 3.9 ความเข้มแสง (กรณีที่ 1)



รูปที่ 3.10 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 1)



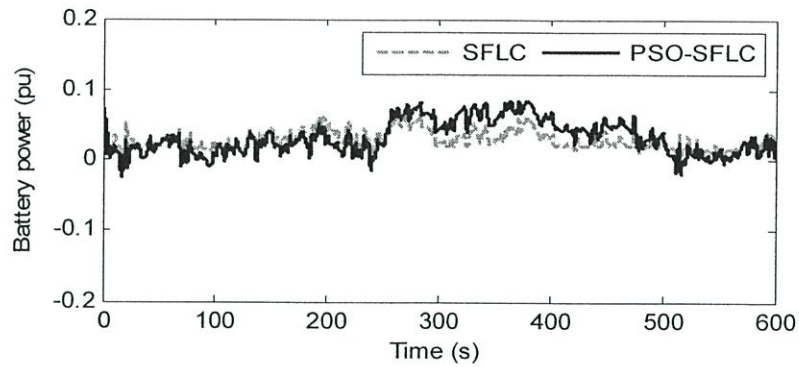
รูปที่ 3.11 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 1)



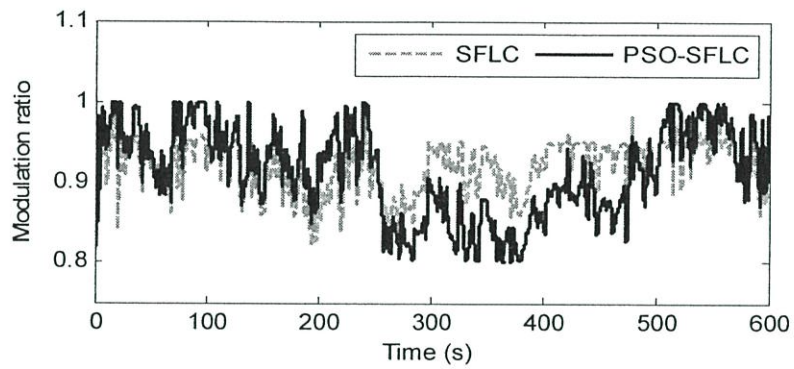
รูปที่ 3.12 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DG (กรณีที่ 1)

รูปที่ 3.10 แสดงการแกว่งของความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ (กรณีที่ 1) จะเห็นว่าการแกว่งของความถี่ของวิธี MPPT รุนแรงมาก ในทางกลับกันเมื่อติดตั้ง SFLC การแกว่งของความถี่ลดลงอย่างมาก ส่วนวิธีที่นำเสนอ PSO-SFLC สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพทางความถี่ได้ดีมากจนเข้าใกล้ 0

รูปที่ 3.11 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 1) จากรูปจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV จากวิธี SFLC และ PSO-SFLC กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบใกล้เคียงกับ MPPT เนื่องจากกำลังไฟฟ้าของ PV จากวิธี SFLC และ PSO-SFLC ถูกควบคุมเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกไปให้กับระบบมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับโหลดตลอดเวลา ตรงกันข้ามกับวิธี MPPT ซึ่งไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายของเท่ากับความเข้มแสงที่เข้ามา ส่วน DG จะเป็นฐานจ่ายกำลังไฟฟ้า และสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้เช่นเดียวกับ PV แต่ความเร็วการตอบสนองต่อโหลดจะช้ากว่าตามรูปที่ 3.12

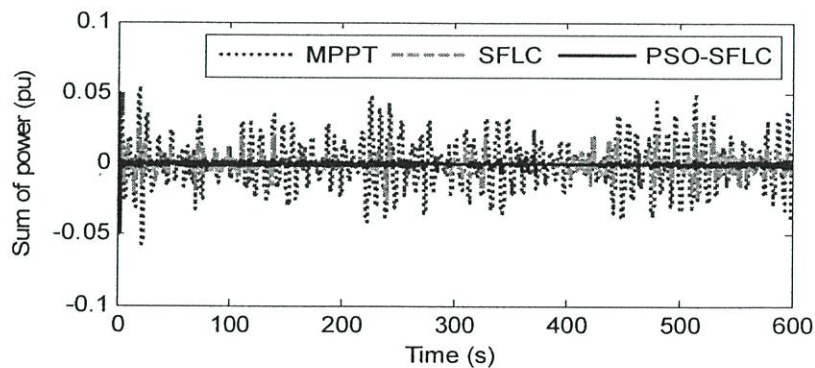


รูปที่ 3.13 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1)



รูปที่ 3.14 สัญญาณควบคุมจากพีชซี (กรณีที่ 1)

รูปที่ 3.13 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1) โดยค่าบวกแสดงว่าแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้า ส่วนค่าลบแสดงว่าจ่ายกำลังไฟฟ้า จากรูปแสดงว่าแบตเตอรี่ช่วย PV ควบคุมความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 3.14 แสดงสัญญาณควบคุมจากพีชซีของวิธี SFLC และ PSO-SFLC (กรณีที่ 1) จากรูปยืนยันว่าวิธี SFLC และ PSO-SFLC สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ทำให้สามารถลดการแกว่งของความถี่ในระบบลงได้



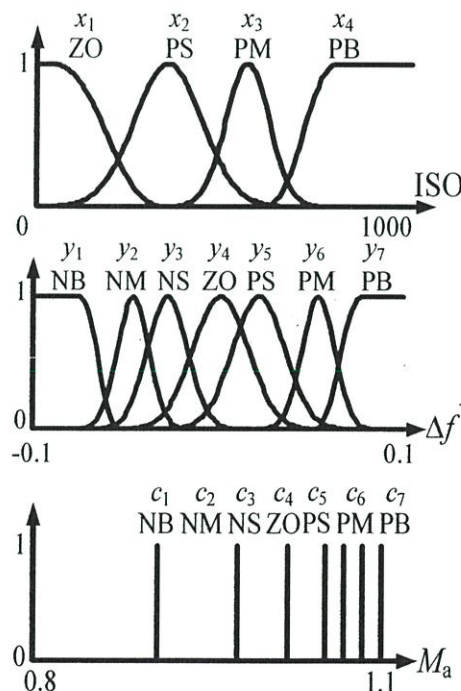
รูปที่ 3.15 ผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดกับโหลด (กรณีที่ 1)

รูปที่ 3.15 แสดงผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดกับโหลด (กรณีนี้ที่ 1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลต่างกำลังไฟฟ้าจากวิธี PSO-SFLC เข้าใกล้ 0 ในขณะที่วิธีอื่นไม่สามารถลดผลต่างของกำลังไฟฟ้าให้เข้าใกล้ 0 ได้ ซึ่งยืนยันได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบ ให้สมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

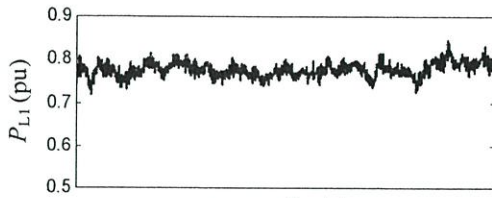
กรณีที่ 2 ทดสอบในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ โดยหลังจากหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO จะได้ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต เอาต์พุต และกฎควบคุมของ PSO-SFLC แสดงในรูปที่ 3.16 และตารางที่ 3.7 ตามลำดับ ซึ่งในระบบมีสิ่งรบกวนคือการเปลี่ยนแปลงโหลด และความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 กฎควบคุมของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่

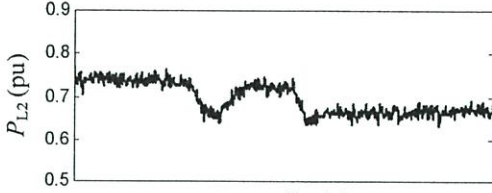
		Δf						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ISO	ZO	NS	NM	NB	PS	NM	NB	NM
	PS	NS	NS	ZO	NB	NB	PB	NB
	PM	NM	NM	PB	NM	NB	NB	NB
	PB	PS	PS	PS	NS	NB	ZO	NS



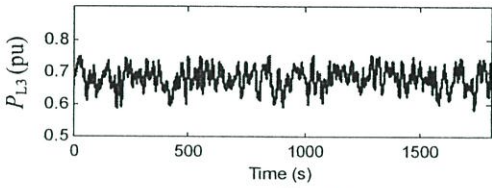
รูปที่ 3.16 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และเอาต์พุตของ PSO-SFLC สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่



(ก) โหลดพื้นที่ที่ 1

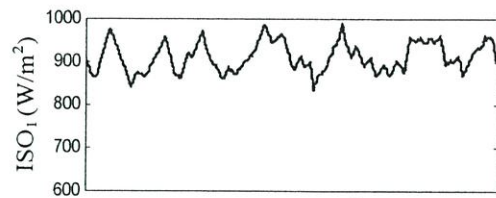


(ข) โหลดพื้นที่ที่ 2

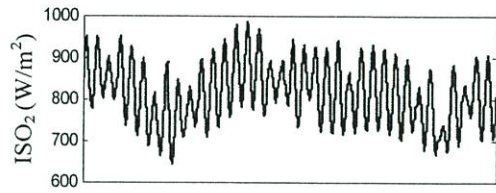


(ค) โหลดพื้นที่ที่ 3

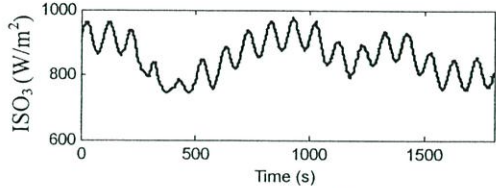
รูปที่ 3.17 โหลด (กรณีที่ 2)



(ก) ความเข้มแสงพื้นที่ที่ 1

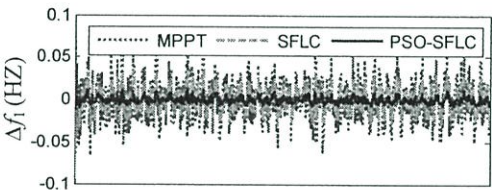


(ข) ความเข้มแสงพื้นที่ที่ 2

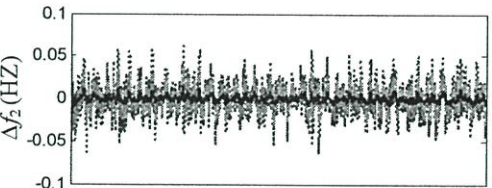


(ค) ความเข้มแสงพื้นที่ที่ 3

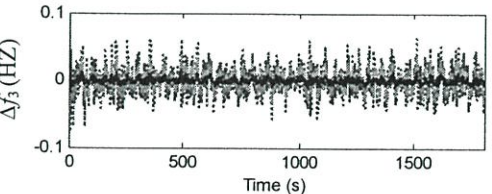
รูปที่ 3.18 ความเข้มแสง (กรณีที่ 2)



(ก) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 1

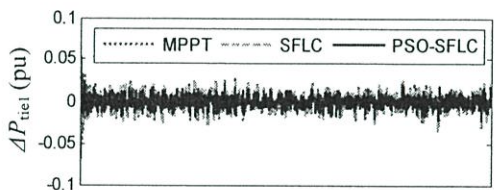


(ข) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 2

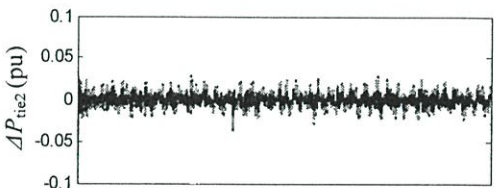


(ค) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 3

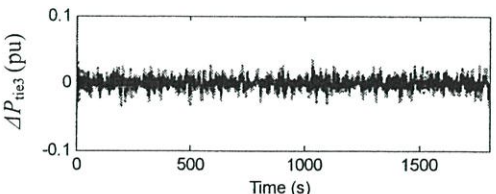
รูปที่ 3.19 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 2)



(ก) การแกว่งของกำลังไฟฟ้ารวมในสายส่งพื้นที่ที่ 1



(ข) การแกว่งของกำลังไฟฟ้ารวมในสายส่งพื้นที่ที่ 2



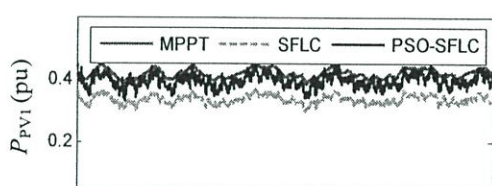
(ค) การแกว่งของกำลังไฟฟ้ารวมในสายส่งพื้นที่ที่ 3

รูปที่ 3.20 กำลังไฟฟ้าในสายส่ง (กรณีที่ 2)

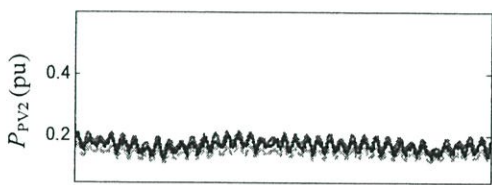
รูปที่ 3.19 แสดงการแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 2) ในพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่า การแกว่งของความถี่ในทุกพื้นที่จากวิธี MPPT รุนแรงมาก ส่วนวิธี SFLC การแกว่งของความถี่ลดลงระดับหนึ่ง และวิธี PSO-SFLC สามารถลดการแกว่งของความถี่ได้ดีที่สุด

รูปที่ 3.20 แสดงการแกว่งของกำลังไฟฟารวมในสายส่งของพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในสายส่งจากวิธี MPPT รุนแรงที่สุด ส่วนวิธี PSO-SFLC สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้มากกว่าวิธี SFLC

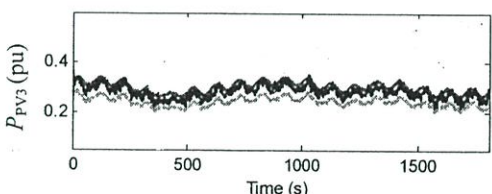
รูปที่ 3.21 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 2) ในพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปพบว่า กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ในทุกพื้นที่จากทั้งวิธี MPPT และ PSO-SFLC ใกล้เคียงกันมาก โดยที่ กำลังไฟฟ้าจากวิธี PSO-SFLC มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากวิธี PSO-SFLC พยายามควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ในทางกลับกัน วิธี SFLC มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าทั้ง MPPT และ PSO-SFLC ซึ่งกำลังไฟฟ้าส่วนต่างระหว่างวิธี MPPT กับ PSO-SFLC หรือ SFLC จะถูกนำไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่



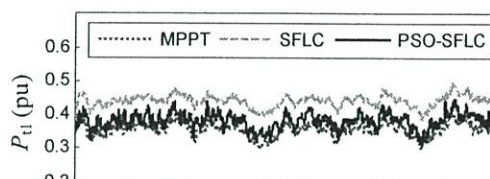
(ก) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 1



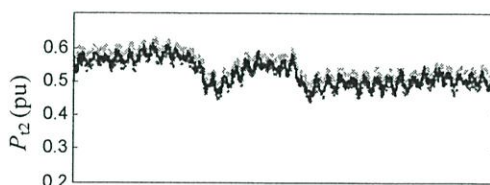
(ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 2



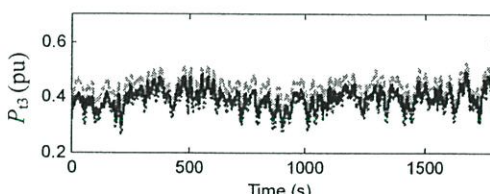
(ค) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 3



(ก) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 1



(ข) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 2



(ค) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 3

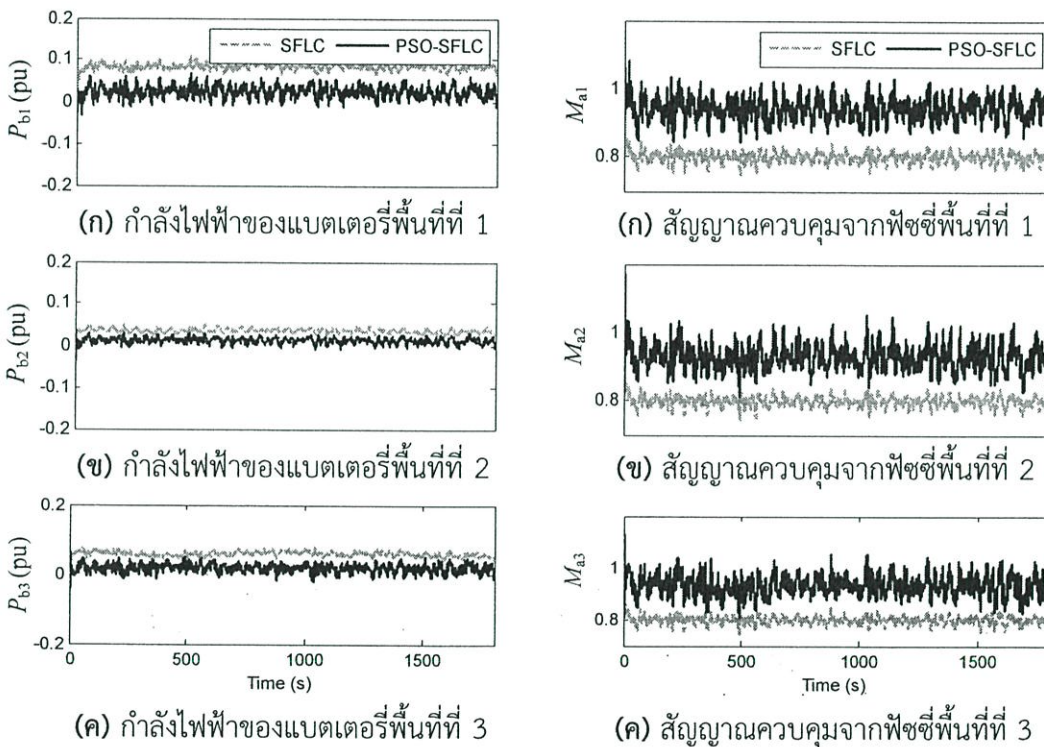
รูปที่ 3.21 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 2) รูปที่ 3.22 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของกังหันไอน้ำ (กรณีที่ 2)

รูปที่ 3.22 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันไอน้ำในแต่ละพื้นที่ โดยกังหันไอน้ำจะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าหลักในระบบ รูปที่ 3.23 แสดงกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 2) พื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยที่ กำลังไฟฟ้าเป็นบวกคือแบตเตอรี่ชาร์จกำลังไฟฟ้าเข้าไปเก็บไว้ ส่วนค่าลบคือแบตเตอรี่

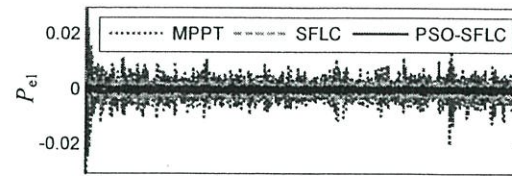
กำลังช่วย PV จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ จากรูปจะพบว่าวิธี SFLC กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ค่อนข้างไปทางซาร์จกำลังไฟฟ้าจะส่วนใหญ่ ในทางกลับกันวิธี PSO-SFLC มีทั้งด้านบวก และลบ ซึ่งหมายความว่าแบตเตอรี่มีทั้งซาร์จ และดิสซาร์จกำลังไฟฟ้าเพื่อช่วย PV รักษาเสถียรภาพทางความถี่

รูปที่ 3.24 แสดงสัญญาณควบคุมควบคุมจากพีชชี (กรณีที่มี 2) ของพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าสัญญาณควบคุมของทั้ง 2 วิธีเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งหมายความว่าพีชชีพยายามควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV ให้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยวิธี PSO-SFLC มีสัญญาณควบคุมเข้าใกล้ 1 มากกว่าวิธี SFLC หมายความว่าจ่ายกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับที่ผลิตได้มากกว่านั่นเอง

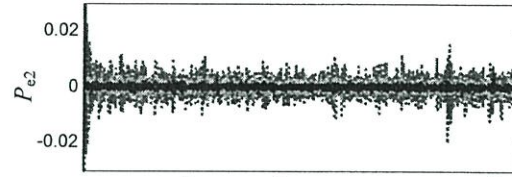
รูปที่ 3.25 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดลบกับโหลด (กรณีที่มี 2) ของพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าผลรวมกำลังไฟฟ้าจากวิธี PSO-SFLC เข้าใกล้ 0 ในขณะที่วิธีอื่นไม่สามารถลดผลรวมของกำลังไฟฟ้าให้เข้าใกล้ 0 ได้ ซึ่งยืนยันว่าวิธีที่นำเสนอสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบให้สมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



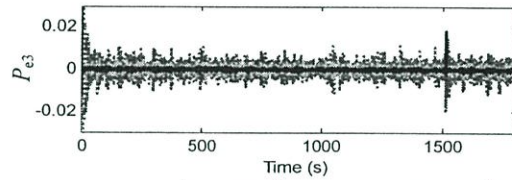
รูปที่ 3.23 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่มี 2) รูปที่ 3.24 สัญญาณควบคุมจากพีชชี (กรณีที่มี 2)



(ก) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดลบกับโหลดพื้นที่ที่ 1



(ข) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดลบกับโหลดพื้นที่ที่ 2

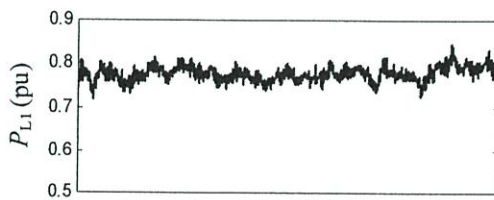


(ค) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดลบกับโหลดพื้นที่ที่ 3

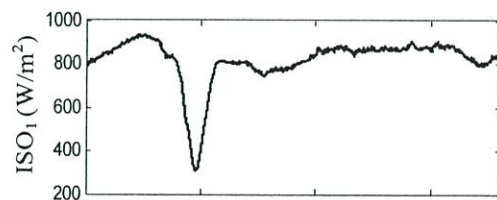
รูปที่ 3.25 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดลบกับโหลด (กรณีที่ 2)

กรณีที่ 3 ทดสอบในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ โดยมีสิ่งรบกวนคือการเปลี่ยนแปลงโหลด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบฉับพลันอย่างรุนแรงในแต่ละพื้นที่ที่ตั้งแสดงในรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27 ตามลำดับ โดยใช้ตัวควบคุม PSO-SFLC จากกรณีที่ 2

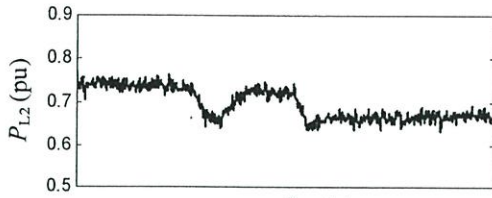
รูปที่ 3.28 แสดงการแกว่งของความถี่ (3 กรณีที่) พื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าในทุกพื้นที่ของวิธี MPPT แกว่งรุนแรงมากที่สุด และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอย่างฉับพลัน วิธี SFLC เกิดการแกว่งของความถี่ขึ้นสูงระดับหนึ่ง ในทางกลับกันวิธี PSO-SFLC สามารถควบคุมความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธี SFLC รูปที่ 3.29 แสดงการแกว่งของกำลังไฟฟารวมในสายส่ง (กรณีที่ 3) พื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าวิธี PSO-SFLC ให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด



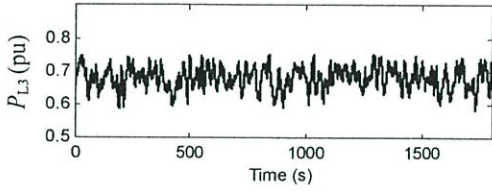
(ก) โหลดพื้นที่ที่ 1



(ข) ความเข้มแสงพื้นที่ที่ 1

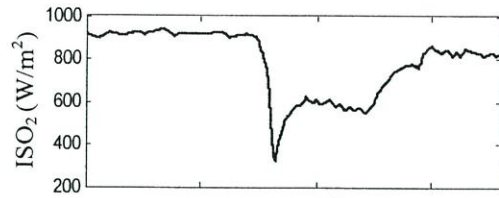


(ข) โหลดพื้นที่ที่ 2

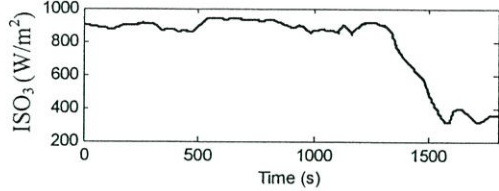


(ค) โหลดพื้นที่ที่ 3

รูปที่ 3.26 โหลด (กรณีที่ 3)

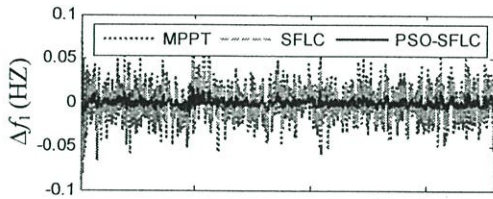


(ข) ความเข้มแสงพื้นที่ที่ 2

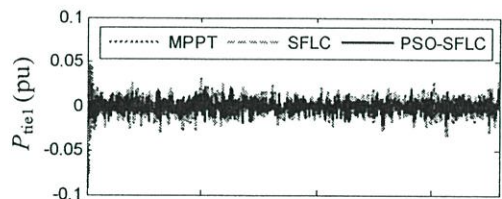


(ค) ความเข้มแสงพื้นที่ที่ 3

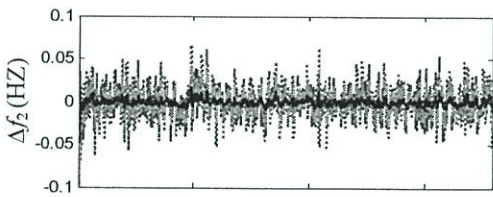
รูปที่ 3.27 ความเข้มแสง (กรณีที่ 3)



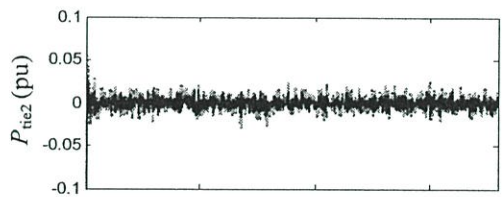
(ก) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 1



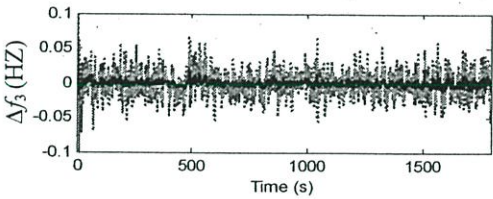
(ก) การแกว่งของกำลังไฟฟ้ารวมในสายส่งพื้นที่ที่ 1



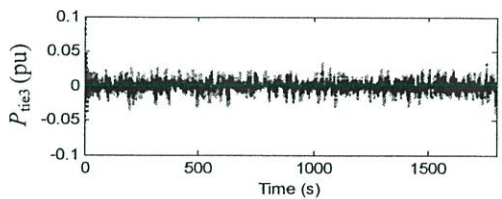
(ข) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 2



(ข) การแกว่งของกำลังไฟฟ้ารวมในสายส่งพื้นที่ที่ 2



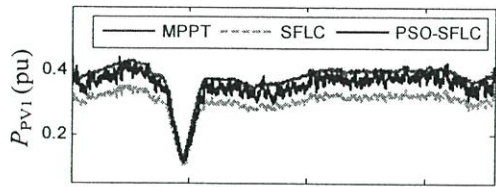
(ค) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 3



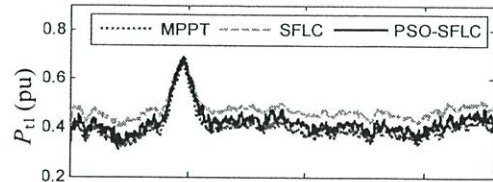
(ค) การแกว่งของกำลังไฟฟ้ารวมในสายส่งพื้นที่ที่ 3

รูปที่ 3.28 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 3)

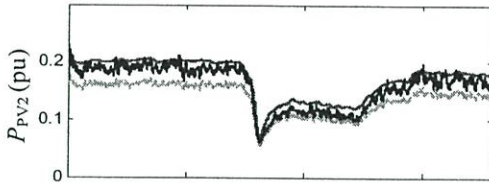
รูปที่ 3.29 กำลังไฟฟ้าในสายส่ง (กรณีที่ 3)



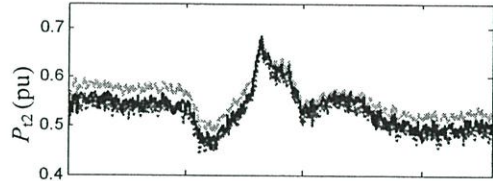
(ก) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 1



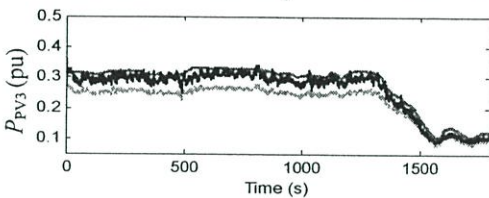
(ก) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 1



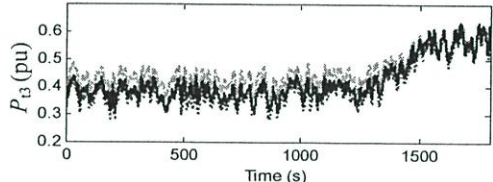
(ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 2



(ข) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 2



(ค) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 3

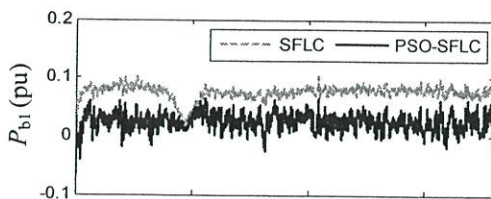


(ค) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 3

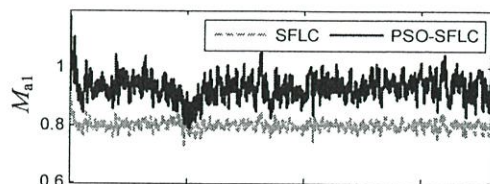
รูปที่ 3.30 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 3) รูปที่ 3.31 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของกังหันไอน้ำ (กรณีที่ 3)

รูปที่ 3.30 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 3) ของพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV ในแต่ละพื้นที่ลดลงตามความเข้มแสงที่ตกลง รูปที่ 3.31 แสดงกำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำในแต่ละพื้นที่ จะเห็นว่ากังหันไอน้ำจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยให้กับระบบเมื่อ PV ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้

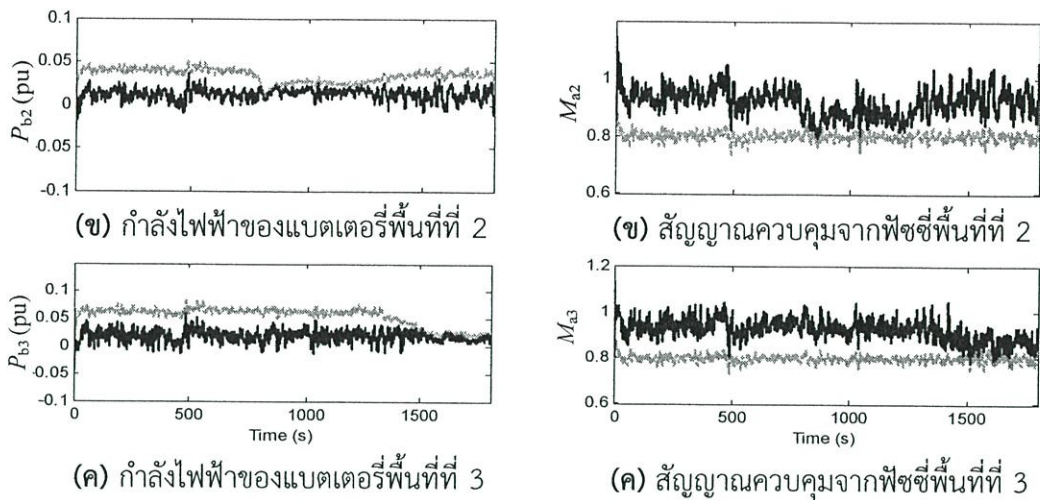
รูปที่ 3.32 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 3) ในพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าของ PV ตกลง กำลังไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่จะลดลงตาม รูปที่ 3.33 แสดงสัญญาณควบคุมจากฟิชซี (กรณีที่ 3) ของพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จะเห็นว่าสัญญาณควบคุมจะลดลงเมื่อความเข้มแสงตกลง เนื่องจาก PV ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยลงฟิชซีจึงต้องสั่งลดปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับระบบลงด้วย



(ก) กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่พื้นที่ที่ 1



(ก) สัญญาณควบคุมจากฟิชซีพื้นที่ที่ 1



รูปที่ 3.32 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 3) รูปที่ 3.33 สัญญาณควบคุมจากฟิชชี (กรณีที่ 3)

กรณีที่ 4 ทดสอบในระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ โดยกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ในแต่ละพื้นที่ให้มีขนาดประมาณ 10% ของขนาด PV เนื่องจากขนาดของแบตเตอรี่อาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมความถี่ของระบบ โดยมีสิ่งรบกวนคือการเปลี่ยนแปลงโหลด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 ตามลำดับ โดยใช้ตัวควบคุม PSO-SFLC จากกรณีที่ 2 โดยขนาดของแบตเตอรี่ในแต่ละพื้นที่ที่แสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ขนาดความจุของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่	
พื้นที่	ขนาดความจุ
1	40 MWh
2	20 MWh
3	35 MWh

รูปที่ 3.34 และรูปที่ 3.35 แสดงการแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 4) และสถานะการชาร์จ (Stage of Charge: SOC) ของแบตเตอรี่ในพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยสามารถหา SOC ได้จากสมการต่อไปนี้ [33]

$$SOC_i = SOC_{in} + \frac{1}{E_r} \Delta E_i \quad (3.7)$$

- โดยที่ SOC_i คือ สถานะการชาร์จของแบตเตอรี่
- SOC_{in} คือ สถานะการชาร์จของแบตเตอรี่เริ่มต้น
- E_r คือ ขนาดของแบตเตอรี่ (kWh)
- ΔE_i คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของแบตเตอรี่

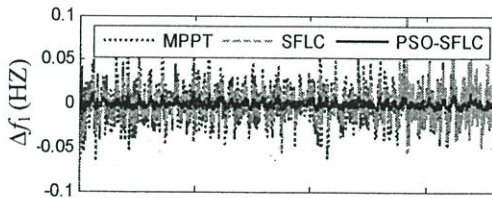
โดยค่าของ ΔE_i สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta E_i = \int_0^T P_b(t) dt \tag{3.8}$$

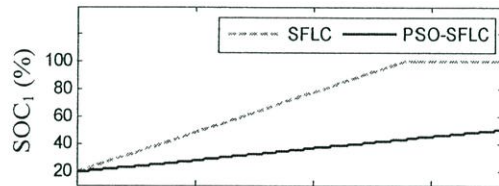
โดยที่ P_b คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแบตเตอรี่ (pu)

จากรูปจะพบว่าวิธี PSO-SFLC ควบคุมความถี่ได้เหนือกว่า SFLC โดยเฉพาะหลังจากที่แบตเตอรี่เต็มแล้ว ซึ่ง SOC ของวิธี PSO-SFLC ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช้า ๆ ทำให้แบตเตอรี่สามารถชาร์จ และดิสชาร์จ เพื่อช่วยระบบได้ตลอดเวลา เป็นผลให้วิธี PSO-SFLC ให้ผลการควบคุมที่เหนือกว่า

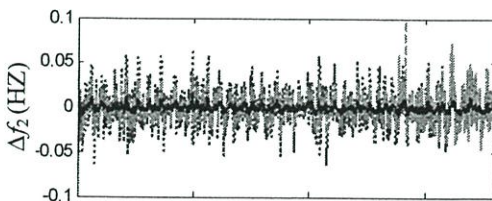
รูปที่ 3.36 และรูปที่ 3.37 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที 4) และกำลังไฟฟ้าของ กังหันไอน้ำ (กรณีที 4) ของพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าเมื่อวิธี SFLC ชาร์จถึง 100% กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV จะเพิ่มขึ้นเท่ากับ MPPT ซึ่งหมายความว่าสูญเสียหน้าที่การควบคุมความถี่ไป และทำให้การจ่ายกำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำลดลง



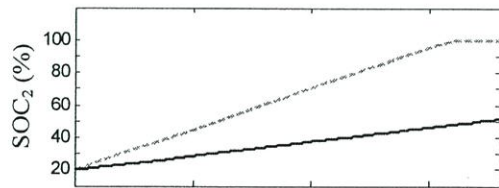
(ก) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 1



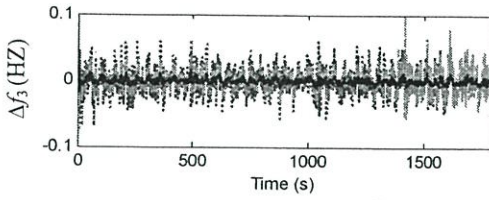
(ก) SOC ของแบตเตอรี่ในพื้นที่ที่ 1



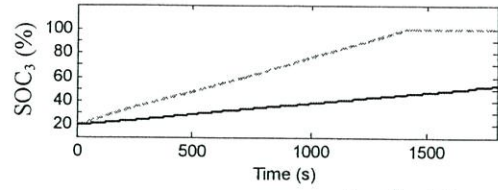
(ข) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 2



(ข) SOC ของแบตเตอรี่ในพื้นที่ที่ 2



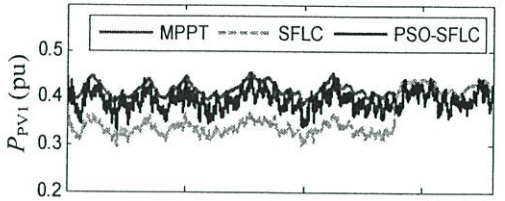
(ค) การแกว่งของความถี่พื้นที่ที่ 3



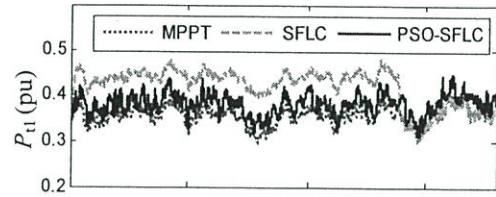
(ค) SOC ของแบตเตอรี่ในพื้นที่ที่ 3

รูปที่ 3.34 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 4)

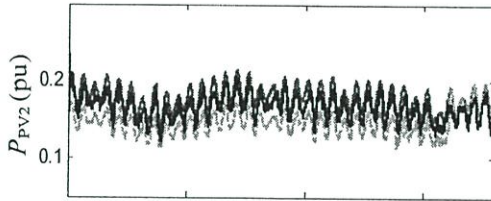
รูปที่ 3.35 SOC ของแบตเตอรี่



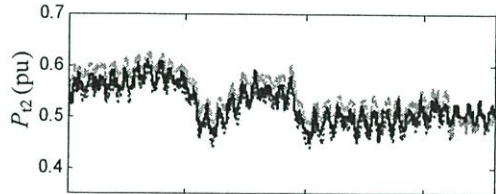
(ก) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 1



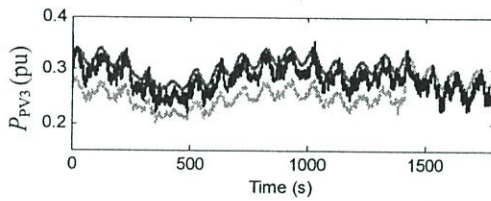
(ก) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 1



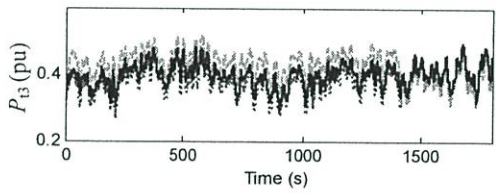
(ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 2



(ข) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 2



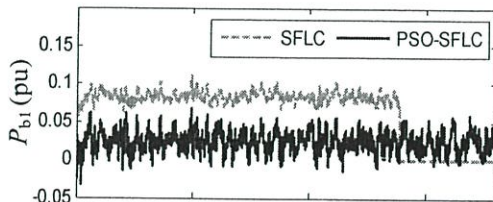
(ค) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV พื้นที่ที่ 3



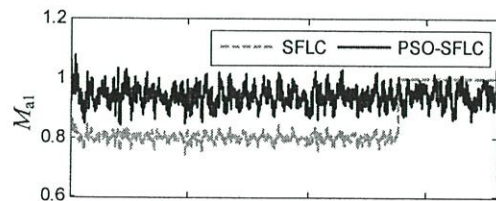
(ค) กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำพื้นที่ที่ 3

รูปที่ 3.36 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (กรณีที่ 4)

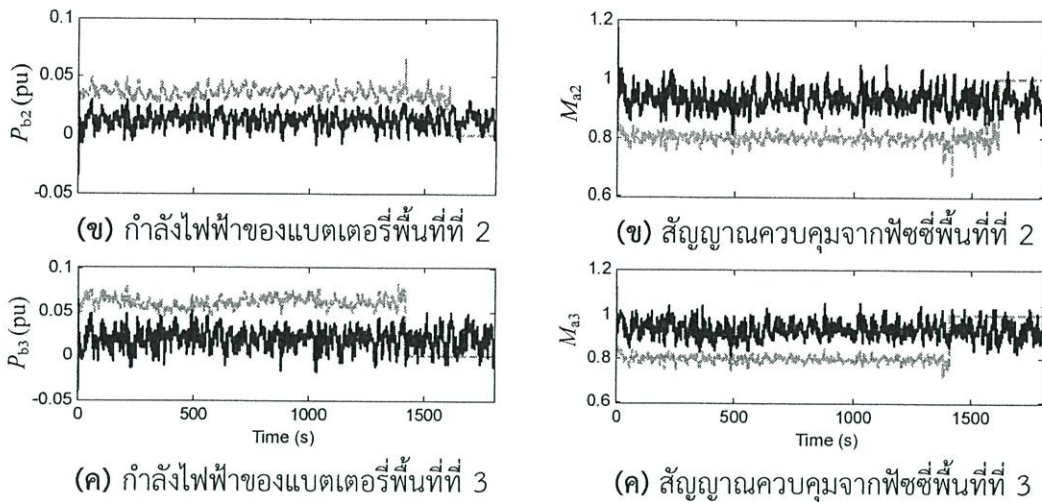
รูปที่ 3.37 กำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำ (กรณีที่ 4)



(ก) กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่พื้นที่ที่ 1



(ก) สัญญาณควบคุมจากพืชพื้นที่ที่ 1



รูปที่ 3.38 กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 4) รูปที่ 3.39 สัญญาณควบคุมจากฟิชชี (กรณีที่ 4)

รูปที่ 3.38 และรูปที่ 3.39 แสดงกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และสัญญาณควบคุมจากฟิชชีในพื้นที่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อแบตเตอรี่เต็มกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะเท่ากับ 0 นั้นหมายความว่าแบตเตอรี่จะไม่ทำหน้าที่ใด ๆ ทั้งชาร์จ หรือดิสชาร์จกำลังไฟฟ้าเพื่อช่วย PV โดยที่สัญญาณควบคุมจากฟิชชีจากวิธี SFLC เท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าของ PV มีค่าเท่ากับวิธี MPPT

3.4 สรุป

บทนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PSO-SFLC สำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์ของ PV เพื่อควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ โดยมีสัญญาณอินพุตของ PSO-SFLC คือสัญญาณการแกว่งของความถี่ในระบบ และความเข้มแสง หลังจากทีวิเคราะห์สัญญาณแล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตเพื่อไปควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าในอินเวอร์เตอร์ของ PV ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV เพื่อไปชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลด และสิ่งรบกวนระบบอื่น ๆ ผลการจำลองยืนยันว่าประสิทธิภาพการควบคุมความถี่ และความคงทนของ PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เหนือกว่า PV ที่ติดตั้ง SFLC และ PV ที่ติดตั้งเฉพาะ MPPT ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และโหลดแบบสุ่ม ทั้งในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่ ทั้งกรณีที่ถูกจำกัด และไม่จำกัดด้วยขนาดของแบตเตอรี่

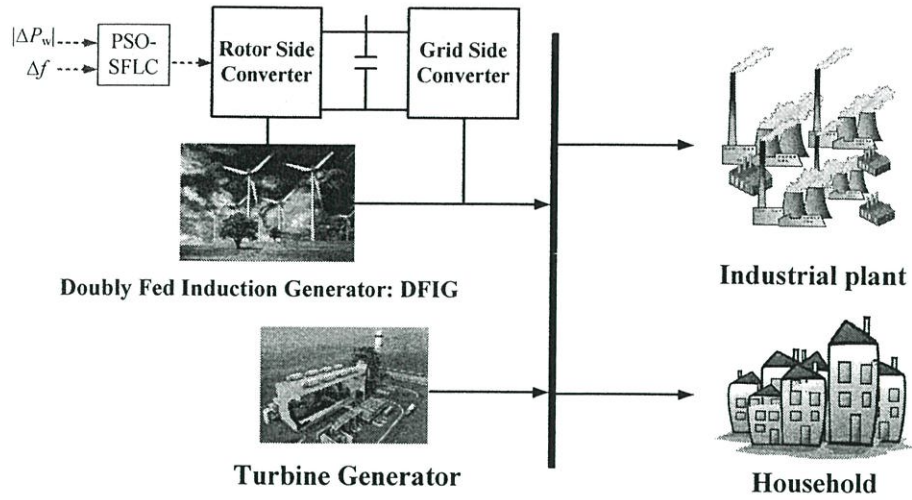
การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วยกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC

ในบทนี้กล่าวถึงการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมชนิดเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกชนิดซุจินที่ถูกออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization-based Sugeno Fuzzy Logic Controller: PSO-SFLC) เนื่องจากกังหันลมชนิด DFIG มีคุณสมบัติที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงได้เร็ว และสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนแยกอิสระต่อกัน จึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของ DFIG เพื่อให้บริการควบคุมความถี่แก่ระบบได้ และเพื่อให้ตัวควบคุมความถี่สามารถทำงานได้กับสภาวะโหลดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปในที่นี้จะประยุกต์ใช้ PSO เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิก และกฎควบคุมของ SFLC เพื่อปรับค่าตัวควบคุมความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า กังหันลมชนิด DFIG ที่ติดตั้งตัวควบคุมปรับค่าได้สามารถลดการแกว่งของความถี่ในระบบได้เร็วกว่ากังหันลมซึ่งติดตั้งตัวควบคุมแบบดั้งเดิมภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบต่างๆ นอกจากนี้ยังมีสมรรถนะคงทนสูงต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ

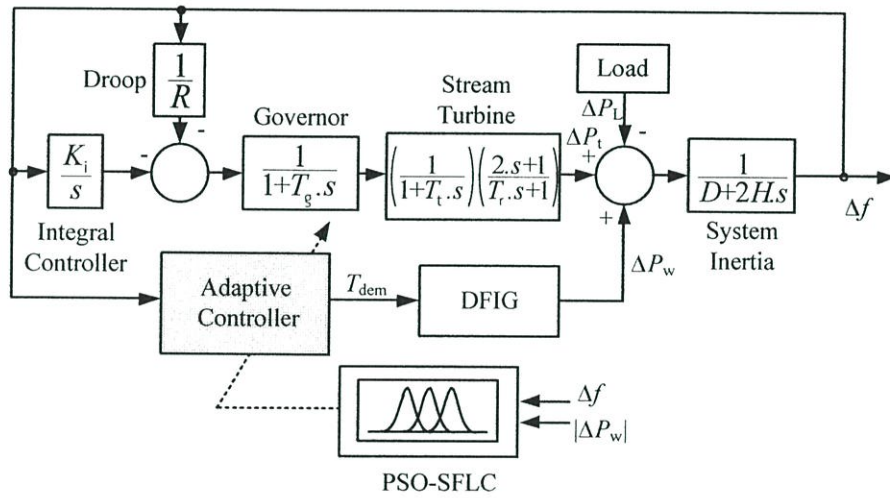
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ศึกษา

รูปที่ 4.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษาซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Stream Turbine) กังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ (Adaptive controller) ด้วย PSO-SFLC และกลุ่มโหลด ในการศึกษาที่สมมติว่าความเร็วลมเฉลี่ยในระบบค่อนข้างคงที่จึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมค่อนข้างสม่ำเสมอ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากจึงทำให้เกิดการแกว่งของความถี่ระบบอย่างรุนแรง

รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ศึกษาการแกว่งของความถี่ซึ่งประกอบด้วย ตัวบังคับความเร็ว (Governor) กังหันไอน้ำ กังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC โดยระบบมีขนาด 63.54 GW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสของกังหันไอน้ำมีขนาด 40.78 GW และกังหันลมมีขนาด 19.4 GW ค่าพารามิเตอร์ของระบบได้กำหนดไว้ใน [24]



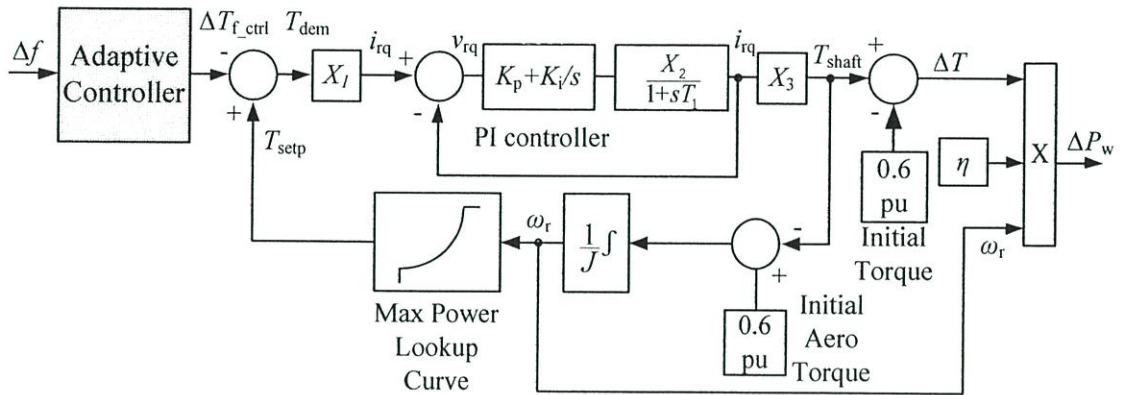
รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 4.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบ

- โดยที่ T_g คือ ค่าคงที่เวลาของตัวบังคับความเร็ว (s)
 T_t คือ ค่าคงที่เวลาของกังหันไอน้ำ (s)
 R คือ ดรู๊ป (Hz/puMW)
 K_i คือ ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
 D คือ ค่าคงที่การหน่วงของระบบ (MW/Hz)
 H คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของระบบ (Mw s/Hz)
 Δf คือ ค่าการแกว่งของความถี่ของระบบ (Hz)

- ΔP_t คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของกังหันไอน้ำ (pu)
 ΔP_w คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของกังหันลม (pu)
 ΔP_L คือ การเปลี่ยนแปลงความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด (pu)
 T_{dem} คือ แรงบิดด้านเข้าของ DFIG (pu)

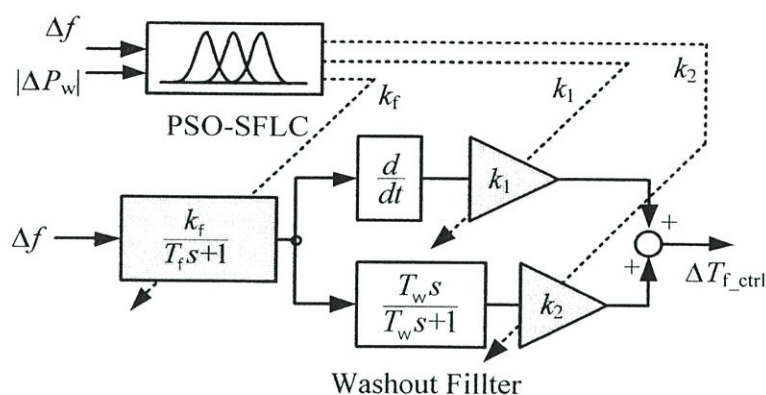


รูปที่ 4.3 แบบจำลองกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมปรับค่าได้

รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองกังหันลมชนิด DFIG สำหรับควบคุมความถี่ เมื่อความถี่ระบบเปลี่ยนแปลงไป ตัวควบคุมความถี่จะปรับค่าแรงบิดให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าด้านออกของกังหันลม DFIG ตามที่ระบบต้องการ โดยรายละเอียดของแบบจำลอง DFIG แบบละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

- โดยที่ T_{setp} คือ แรงบิดของ DFIG ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (pu)
 ΔT_{f_ctrl} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่แปลงมาจากตัวควบคุมความถี่ (pu)
 ΔT คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดของ DFIG (pu)
 T_{shaft} คือ แรงบิดที่แกนโรเตอร์ของ DFIG (pu)
 J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (kg m^2)
 η คือ ประสิทธิภาพของ DFIG
 ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมของแกนโรเตอร์ (pu)
 i_{rq} คือ กระแสไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (pu)
 v_{rq} คือ แรงดันไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (pu)
 K_p คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

4.2 การออกแบบตัวควบคุมปรับค่าได้ที่น่าเสนอ



รูปที่ 4.4 ตัวควบคุมความถี่ที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC

รูปที่ 4.4 แสดงตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC ซึ่งทำหน้าที่แปลงค่าการแกว่งของความถี่ให้กลายเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงบิดป้อนให้กับกังหันลม DFIG เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ไม่สมดุลซึ่งจะมีผลไปลดการแกว่งของความถี่ในระบบ โดยมี PSO-SFLC เป็นตัวปรับค่าตัวแปร k_1 , k_2 และ k_f เพื่อให้ทำงานในสถานการณ์ที่เหมาะสม

โดยที่	k_f	คือ ค่าคงที่ของการแปลงความถี่ไปเป็นแรงบิด
	T_f	คือ ค่าคงที่เวลาของการแปลงความถี่ไปเป็นแรงบิด (s)
	T_w	คือ ค่าคงที่เวลาของตัวกรองสัญญาณ (s)
	k_1	คือ อัตราขยายของตัวสังเคราะห์ความเฉื่อยของ DFIG
	k_2	คือ อัตราขยายของตัวกรองรูปร่างของสัญญาณ

สำหรับ SFLC จะคล้ายกับ Mamdani Fuzzy Logic Controller แต่ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตและวิธีพิจารณาอินพุต (Defuzzification) จะต่างกัน กล่าวคือฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตของ SFLC มี 2 แบบได้แก่ สมการเส้นตรง และค่าคงที่ การควบคุมของ PSO-SFLC แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยส่งสัญญาณไปปรับค่า k_1 , k_2 และ k_f ให้เปลี่ยนแปลงไปตามสถานการณ์ของระบบ โดยฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของ PSO-SFLC ประกอบด้วย ค่าเบี่ยงเบนความถี่ และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของกังหันลม DFIG โดยสัญญาณเอาต์พุตของ PSO-SFLC สามารถพิจารณาจากเงื่อนไข if-then ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{If Input } |\Delta P_w| = a_r \text{ and Input } \Delta f = b_s \\ \text{then, Output } k_1 = Aa_r + Bb_s + d_s \\ \text{, Output } k_2 = Aa_r + Bb_s + e_s \end{aligned}$$

$$, \text{ Output } k_f = Aa_r + Bb_s + f_u \quad (4.1)$$

$$r = 1, 2, \dots, 5 \quad s = 1, 2, \dots, 7 \quad u = 1, 2, \dots, 6$$

ในที่นี้ให้ A และ $B = 0$

โดยที่ d_s คือ ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตที่ s ของ k_1
 e_s คือ ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตที่ s ของ k_2
 f_u คือ ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตที่ u ของ k_f

สัญญาณเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อจะถูกถ่วงน้ำหนัก จากกฎ “AND” (ในที่นี้คือการเลือกค่าต่ำสุด) โดยเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอินพุตของฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$w_i = \min(a_r, b_s) \quad (4.2)$$

โดยที่ w_i คือ ค่าที่ได้หลังจากถ่วงน้ำหนักของกฎข้อที่ i
 สุดท้ายค่าที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักของเอาต์พุต k_1 จะถูกนำมาคูณกับสมาชิกด้านเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อ จากนั้นกฎทุก ๆ ข้อจะถูกนำมารวมกันแล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i d_s}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (4.3)$$

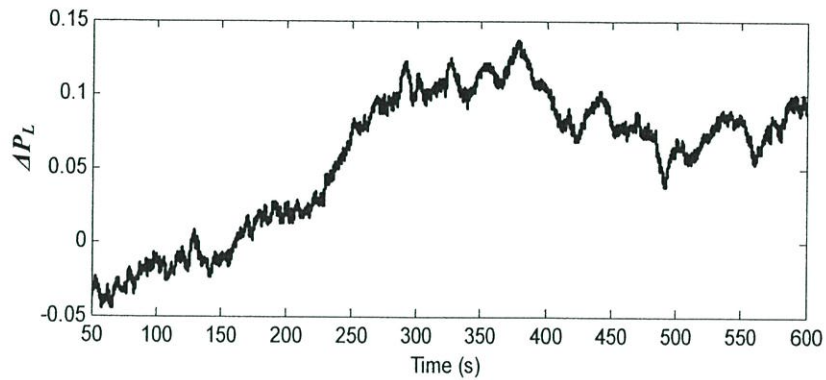
สำหรับเอาต์พุต k_2 อธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i e_s}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (4.4)$$

และสำหรับเอาต์พุต k_f อธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i f_u}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (4.5)$$

โดยที่ N คือจำนวนของกฎควบคุมของเอาต์พุตแต่ละตัว ในที่นี้ $N = 28$



รูปที่ 4.5 โหลดแบบสุ่ม (กรณีที่ 1)

ในที่นี้ จะหาฟังก์ชันสมาชิกและกฎพื้นฐานที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO ภายใต้การจำลองคอมพิวเตอร์ของโหลดแบบสุ่มดังรูปที่ 4.5 โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำให้การแกว่งของความถี่ในระบบมีค่าต่ำสุดดังนี้

$$\text{Minimize } \gg \quad \text{IAE} = \int_0^T (|\Delta f(t)|) dt \quad (4.6)$$

โดยที่ IAE คือ ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์รวม (Integral Absolute Error)
 T คือ เวลาที่ใช้ในการจำลอง

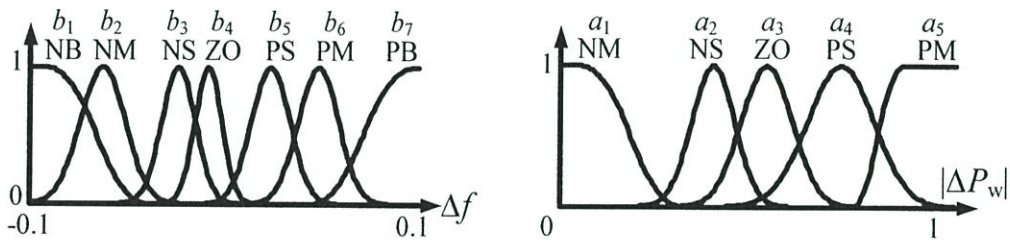
การหาค่าที่เหมาะสมด้วย PSO มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1: สร้างอนุภาคเริ่มต้นแบบสุ่มจำนวน n อนุภาค ในที่นี้ $n = 50$ และอนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว
- ขั้นตอนที่ 2: ให้ $N_p = 0$ เมื่อ N_p คือจำนวนรอบของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
- ขั้นตอนที่ 3: อนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้จะถูกแทนค่าไปที่พารามิเตอร์ใน SFLLC
- ขั้นตอนที่ 4: หลังจากแทนค่าจะถูกทดสอบเพื่อดูค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- ขั้นตอนที่ 5: เลือกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม (P_{best})

- ขั้นตอนที่ 6: ถ้า $P_{best} < P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{best}$ (P_{old} คือค่าที่เหมาะสมที่สุดของรอบที่ผ่านมา) แล้วข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8
- ขั้นตอนที่ 7: ถ้า $P_{best} > P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{old}$ แล้วไปทำขั้นตอนต่อไป
- ขั้นตอนที่ 8: ให้ $N_p = N_p + 1$
- ขั้นตอนที่ 9: ตรวจสอบว่าจำนวนรอบถึงรอบที่กำหนดแล้วหรือไม่ โดยถ้า $N_p = 200$ ให้หยุดการหา ถ้าไม่ให้ทำต่อไป
- ขั้นตอนที่ 10: อัปเดตค่าของอนุภาคแต่ละตัว แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

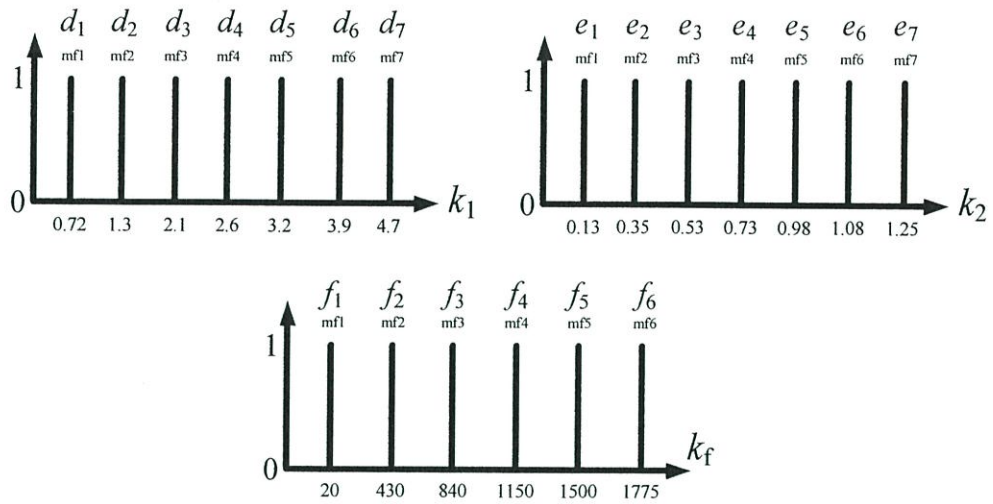
4.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink รูปที่ 4.6 แสดงฟังก์ชันสมาชิกอินพุตฟuzzy 1 และ 2 ที่ถูกหาค่าอย่างเหมาะสมของ ตามลำดับ สำหรับเอาต์พุตที่ได้มี 3 ค่า ได้แก่ k_1 , k_2 และ k_f แสดงดังรูปที่ 4.7 นอกจากนี้กฎของ PSO-SFLC ที่ทำให้เหมาะสมแสดงได้ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต 1 และ 2 จากการหาค่าที่เหมาะสม

ในที่นี้แบ่งการจำลองทดสอบเป็น 2 กรณี โดยกรณีที่ 1 ทดสอบตามรูปแบบของโพลสดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของโพลสแบบสุ่ม และกรณีที่ 2 ทดสอบตามรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของโพลสแบบขั้นบันได เมื่อเปรียบเทียบการควบคุม 3 แบบ คือ (1) ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมความถี่ให้กับกังหันลม (Without control) (2) ติดตั้งตัวควบคุมความถี่ให้กับกังหันลมโดยการหาค่า k_1 , k_2 และ k_f อย่างเหมาะสม (Optimized control) และ (3) ที่ติดตั้งตัวควบคุมความถี่ที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC เป็นตัวปรับหาค่า k_1 , k_2 และ k_f (Adaptive control) รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงค่าการแกว่งของความถี่กรณีโพลสแบบสุ่มและโพลสแบบขั้นบันไดตามลำดับ ในกรณีตัวควบคุมที่นำเสนอ ค่าการแกว่งของความถี่จะแกว่งน้อยกว่าตัวควบคุมที่ตั้งค่าอย่างเหมาะสม

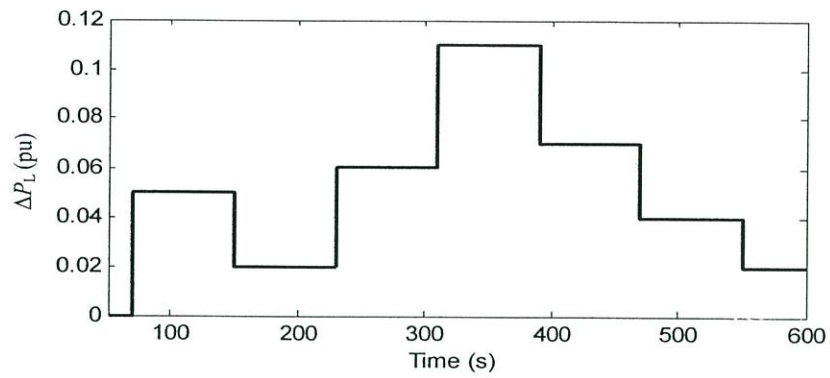


รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต k_1 , k_2 และ k_f จากการหาค่าที่เหมาะสม

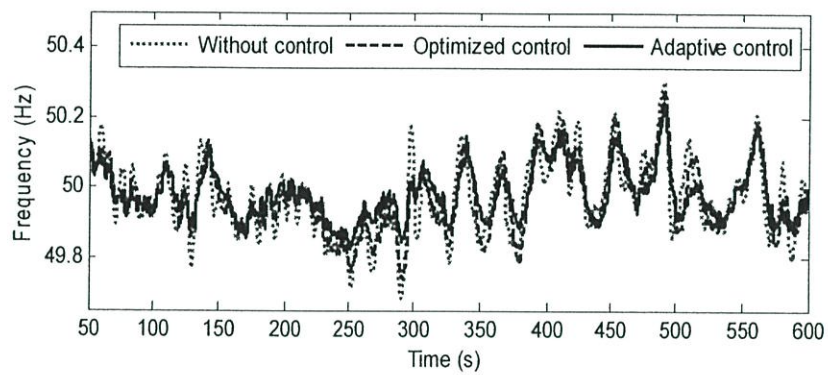
ตารางที่ 4.1 กฎควบคุมของ PSO-SFLC

		Δf				
		NM	NS	ZO	PS	PM
		k_1, k_2, k_f	k_1, k_2, k_f	k_1, k_2, k_f	k_1, k_2, k_f	k_1, k_2, k_f
$ \Delta P_w $	NB	mf1,mf7,mf5	mf4,mf2,mf6	mf4,mf2,mf4	mf6,mf4,mf4	mf7,mf6,mf2
	NM	mf4,mf6,mf3	mf1,mf6,mf6	mf5,mf2,mf1	mf3,mf5,mf3	mf4,mf1,mf6
	NS	mf5,mf2,mf4	mf5,mf3,mf5	mf7,mf1,mf5	mf6,mf2,mf6	mf3,mf7,mf5
	ZO	mf1,mf6,mf4	mf2,mf2,mf5	mf3,mf1,mf2	mf1,mf3,mf4	mf5,mf1,mf6
	PS	mf6,mf7,mf6	mf3,mf6,mf3	mf2,mf1,mf5	mf1,mf5,mf5	mf2,mf2,mf6
	PM	mf2,mf5,mf1	mf6,mf2,mf3	mf5,mf6,mf2	mf1,mf2,mf6	mf2,mf6,mf4
	PB	mf7,mf2,mf1	mf1,mf6,mf4	mf3,mf2,mf5	mf1,mf3,mf2	mf6,mf2,mf1

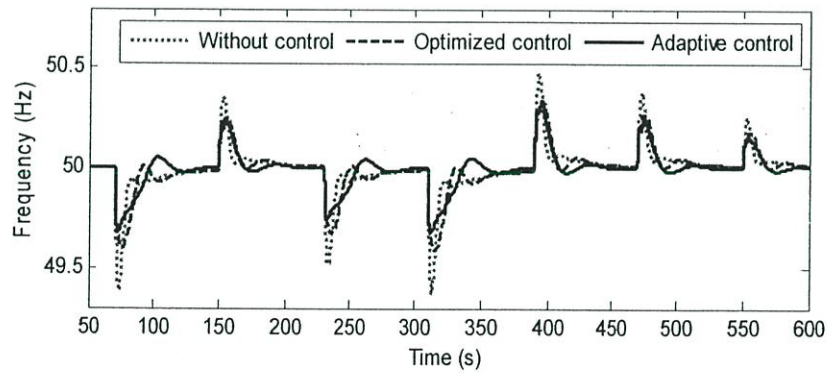
โดยที่ NB คือ Negative Big
 NM คือ Negative Medium
 NS คือ Negative Small
 ZO คือ Zero
 PS คือ Positive Small
 PM คือ Positive Medium
 PB คือ Positive Big
 mf1 ถึง mf7 คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตของ k_1 , k_2 และ k_f



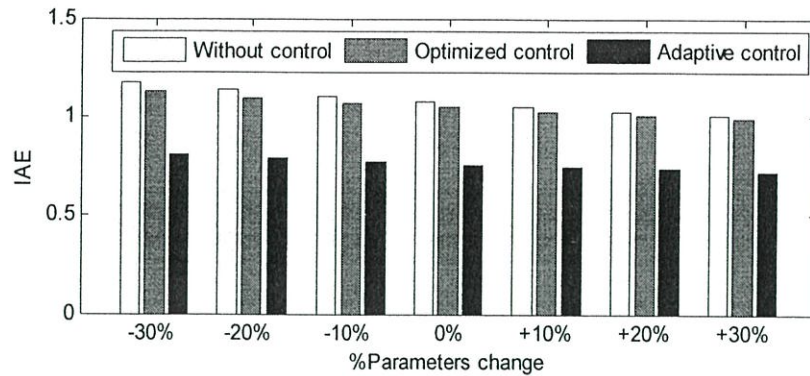
รูปที่ 4.8 โหลดแบบขั้นบันได (กรณีที่ 2)



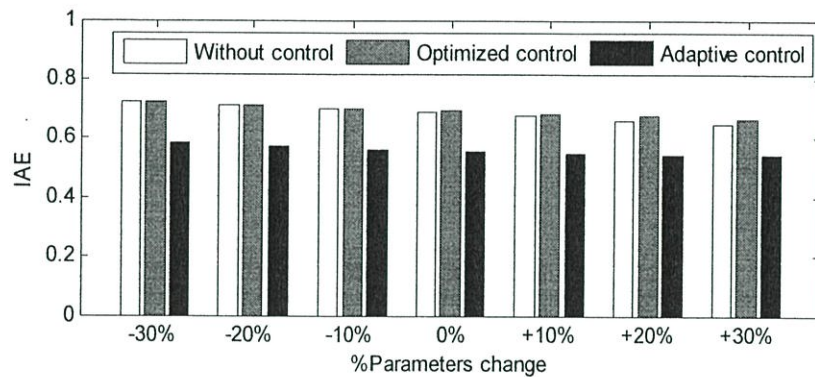
รูปที่ 4.9 การแกว่งของความถี่ (กรณีที่ 1)



รูปที่ 4.10 การแกว่งของความถี่กรณีโหลดแบบบันได (กรณีที่ 2)



รูปที่ 4.11 ค่าความผิดพลาด (IAE) กรณีโหลดแบบสุ่ม (กรณีที่ 1)



รูปที่ 4.12 ค่าความผิดพลาด (IAE) กรณีโหลดแบบขั้นบันได (กรณีที่ 2)

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของค่า IAE ในกรณีโหลดแบบสุ่มและโหลดแบบขั้นบันไดตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทุกตัวในระบบ $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ และ $\pm 30\%$ จะเห็นว่าค่า IAE ในกรณีตัวควบคุมที่นำเสนอมีค่าต่ำที่สุดและแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงค่าเลย ในขณะที่กรณีไม่ติดตั้งตัวควบคุม และตัวควบคุมที่ตั้งค่าอย่างเหมาะสมนั้นให้ค่า IAE ที่มากกว่า ผลศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมปรับค่าได้ที่นำเสนอมีสมรรถนะในการควบคุมความถี่ และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบสูงกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบ

5. สรุป

บทนี้นำเสนอตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย PSO-SFLC ซึ่งติดตั้งกับกังหันลมชนิด DFIG เพื่อลดการแกว่งของความเร็วในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ ในที่นี่ได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิก และกฎพื้นฐานของ PSO-SFLC ด้วยวิธี PSO ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากังหันลม DFIG ที่ติดตั้งตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของความเร็วในระบบได้มากกว่ากังหันลมที่ติดตั้งตัวควบคุมแบบพารามิเตอร์

คงที่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่ม และแบบขั้นบันได นอกจากนี้ตัวควบคุมที่นำเสนอยังมีสมรรถนะคงทนสูงต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบด้วย

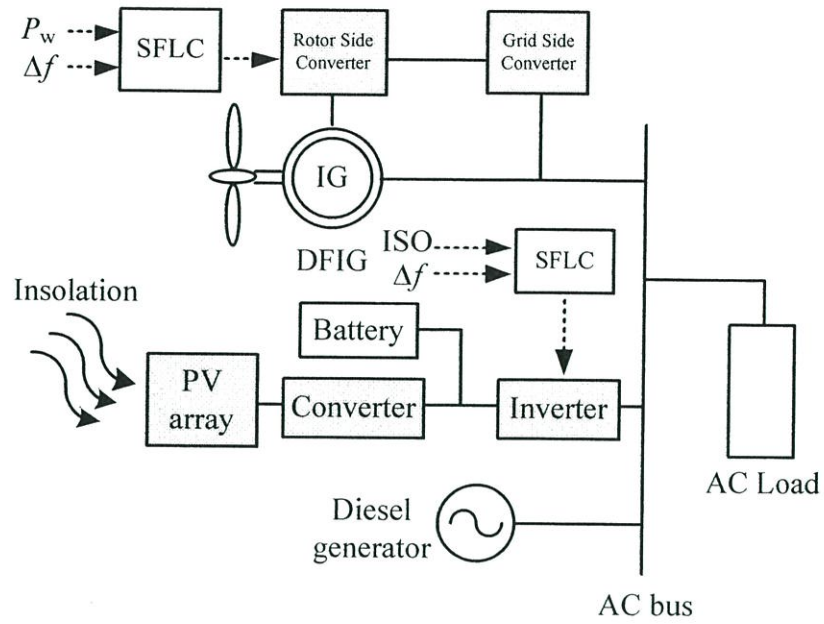
บทที่ 5

การควบคุมแหล่งจ่ายกังหันลมชนิด DFIG และ PV ร่วมกันอย่างฉลาดเพื่อบริการการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ

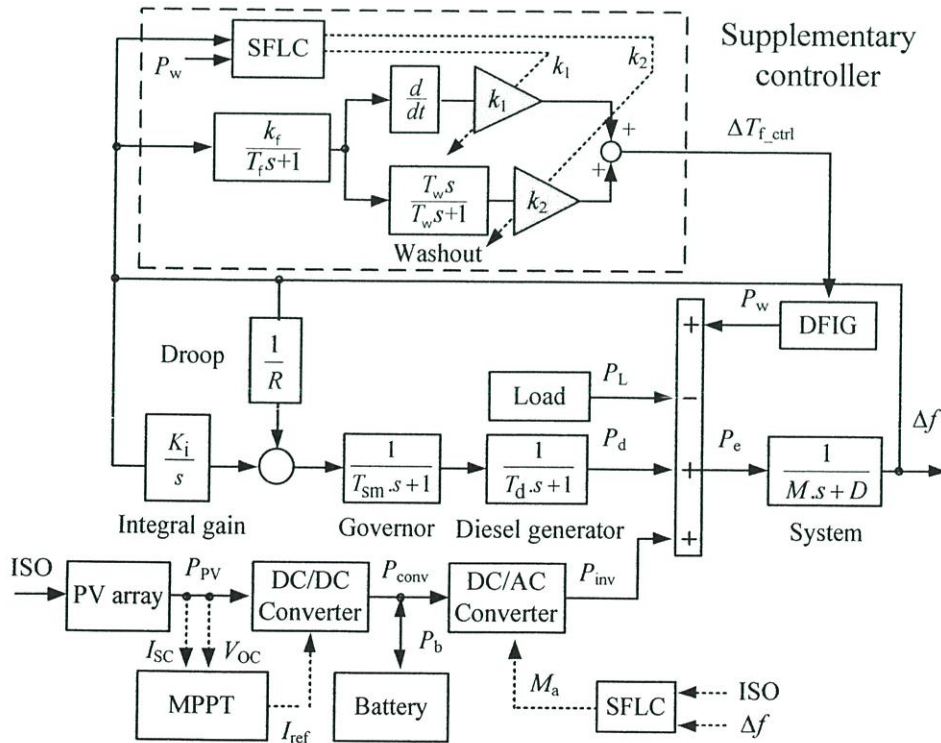
ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกชนิดซูจิโน (Sugeno Fuzzy Logic Controller: SFLC) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator: DFIG) เพื่อให้บริการการควบคุมความถี่ร่วมกันในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ โดยกฎควบคุมของ SFLC ถูกหาค่าอย่างเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่ง PSO-SFLC ถูกติดตั้งใน PV และ DFIG ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV และ DFIG ได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้นำไปลดการแกว่งของความถี่ในระบบได้ โดยมีสัญญาณอินพุตของ PSO-SFLC ใน PV คือ ปริมาณความเข้มแสง และการแกว่งของความถี่ในระบบ และสัญญาณเอาต์พุตจะถูกนำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ของ PV ส่วน PSO-SFLC ใน DFIG สัญญาณอินพุตคือ สัญญาณการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DFIG และสัญญาณการแกว่งของความถี่ในระบบ จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตจะไปปรับอัตราขยายของลูบควบคุมความถี่ที่ติดตั้งใน DFIG ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการควบคุมความถี่ของ PV และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เหนือกว่า PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เพียงอย่างเดียว DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เพียงอย่างเดียว และ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่ม การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันได ความเข้มแสง และการเปลี่ยนแปลงกำลังลมที่ไม่สม่ำเสมอ

5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 5.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระที่ใช้ในการศึกษา ในระบบประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Generator: DG) PV DFIG และโหลด โดยพิกัดกำลังไฟฟ้าของ DG PV และ DFIG คือ 18.6 MW 2.25 MW และ 2 MW ตามลำดับ ส่วน PSO-SFLC จะถูกติดตั้งไว้ข้างในส่วนควบคุมของ PV และ DFIG



รูปที่ 5.1 DFIG และ PV ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ



รูปที่ 5.2 แบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้การศึกษา

รูปที่ 5.2 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้ในการศึกษาด้านการตอบสนองต่อความถี่ของระบบ โดยแบบจำลองของ DG ประกอบไปด้วยลูปลควบคุมความถี่ที่ประกอบไปด้วยทรูป (Droop) ตัวบังคับความเร็ว (Governor) และตัวควบคุมแบบอินทริกัล (K_i) ส่วนแบบจำลองของ PV ประกอบด้วยแผง PV, DC/DC คอนเวิร์ตเตอร์ที่ติดตั้งตัวติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT), DC/AC คอนเวิร์ตเตอร์ หรืออินเวอร์เตอร์ และสุดท้ายแบตเตอรี่ [34] PSO-SFLC ที่ติดตั้งใน PV มีอินพุต 2 อินพุตคือ ความเข้มแสง (Insolation: ISO) และสัญญาณการแกว่งของความถี่ในระบบ (Δf) ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะไปควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ ส่วนแบบจำลองของ DFIG อย่างง่ายสำหรับพิจารณาด้านการควบคุมความถี่นำมาปรับใช้จาก [24], [30] โดยลูปลควบคุมความถี่จะเป็นตัวพิจารณาชดเชยกำลังไฟฟ้าให้กับระบบโดยมี 2 ส่วนได้แก่ ลูปลสังเคราะห์ความเฉื่อยของ DFIG (ส่วนของ k_1) และลูปลของตัวกรองรูปร่างของสัญญาณ (ส่วนของ k_2) โดยที่ PSO-SFLC ถูกนำมาใช้เพื่อปรับค่าอัตราขยายของ k_1 และ k_2 ของลูปลควบคุมความถี่ เป็นผลให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ DFIG ผ่านการควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงบิดของ DFIG เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้

โดยที่	P_{pv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ PV (pu)
	V_{oc}	คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผง PV (V)
	I_{sc}	คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผง PV (A)
	I_{ref}	คือ กระแสอ้างอิงสำหรับ DC/DC คอนเวิร์ตเตอร์ (A)
	P_{conv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DC/DC คอนเวิร์ตเตอร์ (pu)
	P_b	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแบตเตอรี่ (pu)
	P_{inv}	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (pu)
	P_d	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DG (pu)
	P_L	คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด (pu)
	P_e	คือ กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดลบกับโหลด (pu)
	Δf	คือ การแกว่งของความถี่ในระบบ (Hz)
	M_a	คือ สัญญาณจาก PSO-SFLC ที่ไปควบคุมอินเวอร์เตอร์
	T_{sm}	คือ ค่าคงที่เวลาของตัวบังคับความเร็ว (s)
	T_d	คือ ค่าคงที่เวลาของ DG (s)
	M	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของระบบ (puMW.s/Hz)
	D	คือ ค่าคงที่การหน่วง (puMW/Hz)
	K_i	คือ ตัวควบคุมแบบอินทริกัล
	R	คือ ทรูป (Hz/puMW)
	P_w	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DFIG (pu)

ΔT_{f_ctrl}	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่แปลงมาจากตัวควบคุมความถี่ (pu)
k_f	คือ อัตราขยายของการแปลงสัญญาณระหว่าง Δf และ ΔT_{f_ctrl}
T_w	คือ ค่าคงที่เวลาของตัวกรองสัญญาณ (s)
k_1	คือ อัตราขยายสัดส่วนของการตอบสนองความถี่เริ่มต้นจากพลังงานจลน์
k_2	คือ ตัวปรับสัดส่วนของการตอบสนองความถี่จากแรงบิดทางกล
T_f	คือ ค่าคงที่เวลาของการแปลงความถี่ไปเป็นแรงบิด (s)

5.2 ตัวควบคุมที่นำเสนอและการออกแบบ

ด้วยข้อดีหลากหลายของ SFLC เช่น มีประสิทธิภาพในการคำนวณ ใช้เวลาในขั้นตอน Defuzzification น้อย และเหมาะกับระบบที่เป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้จึงถูกนำมาใช้ในการควบคุม DFIG และ PV เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด ความเข้มแสง และกำลังลม ทำให้ลดการแกว่งของความถี่ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2.1 การออกแบบฟuzzyลอจิกสำหรับ PV

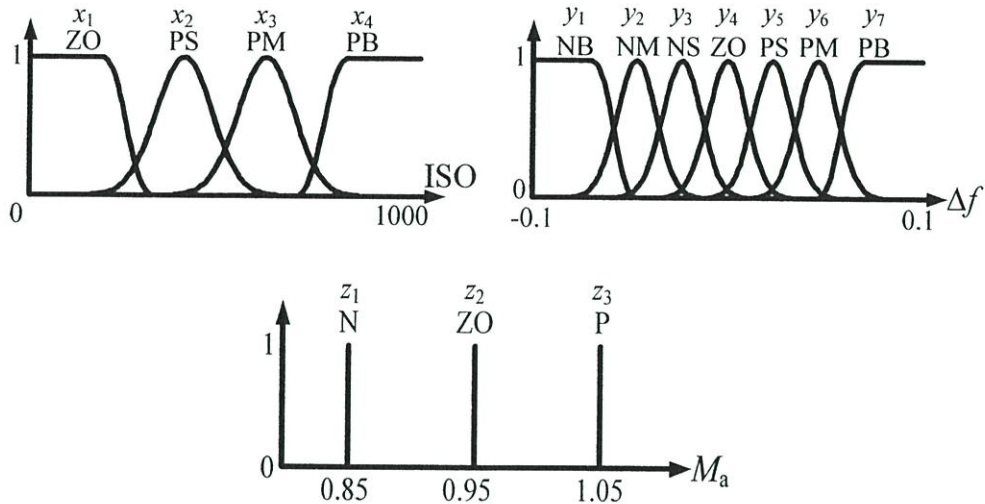
PSO-SFLC สำหรับ PV ใช้ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ใน PV ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมได้โดยสัญญาณเอาต์พุตจาก PSO-SFLC โดยที่สัญญาณอินพุตคือ ISO และ Δf ส่วนกฎควบคุมของ PSO-SFLC นี้ถูกตั้งให้สามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลด ในขณะที่ยังคงจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับ MPPT โดยสามารถอธิบายหลักการทำงานจากกฎ “if-then” ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{If Input ISO} = x_o \text{ and Input } \Delta f = y_p \\ \text{then, Output } M_a = Ax_o + By_p + C_q \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$o = 1, 2, 3, 4 \quad p = 1, 2, \dots, 7 \quad q = 1, 2, 3$$

โดยที่	x_o	คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุตที่ o ของ ISO
	y_p	คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุตที่ p ของ Δf
	C_q	คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตที่ q ของ M_a

ในที่นี้ A และ $B = 0$ โดยที่ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุต เอาต์พุต และกฎควบคุมของ PSO-SFLC แสดงดังรูปที่ 5.3 และตารางที่ 5.1 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันสมาชิกของ PSO-SFLC สำหรับ PV

ตารางที่ 5.1 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ก่อนหาค่าที่เหมาะสมสำหรับ PV

		Δf						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ISO	ZO	P	P	P	ZO	ZO	ZO	N
	PS	P	P	ZO	ZO	ZO	N	N
	PM	P	ZO	ZO	ZO	N	N	N
	PB	ZO	ZO	ZO	N	N	N	N

สัญญาณเอาต์พุตของกฎข้อที่ i จะถูกถ่วงน้ำหนัก จากกฎ “AND” (ในที่นี้คือการเลือกค่าต่ำสุด) โดยเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอินพุตของฟังก์ชันสมาชิก 2 สัญญาณ โดยค่าถ่วงน้ำหนักของกฎข้อที่ i สำหรับ PV สามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$w_i = \min(x_o, y_p) \quad (5.2)$$

สุดท้ายค่าที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักสำหรับ PV จะถูกนำมาคูณกับสมาชิกด้านเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อ จากนั้นกฎทุก ๆ ข้อจะถูกนำมารวมกันแล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i C_q}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5.3)$$

โดยที่ N คือจำนวนของกฎควบคุม ในที่นี้ $N = 28$

5.2.2 การออกแบบฟuzzyลอจิกสำหรับ DFIG

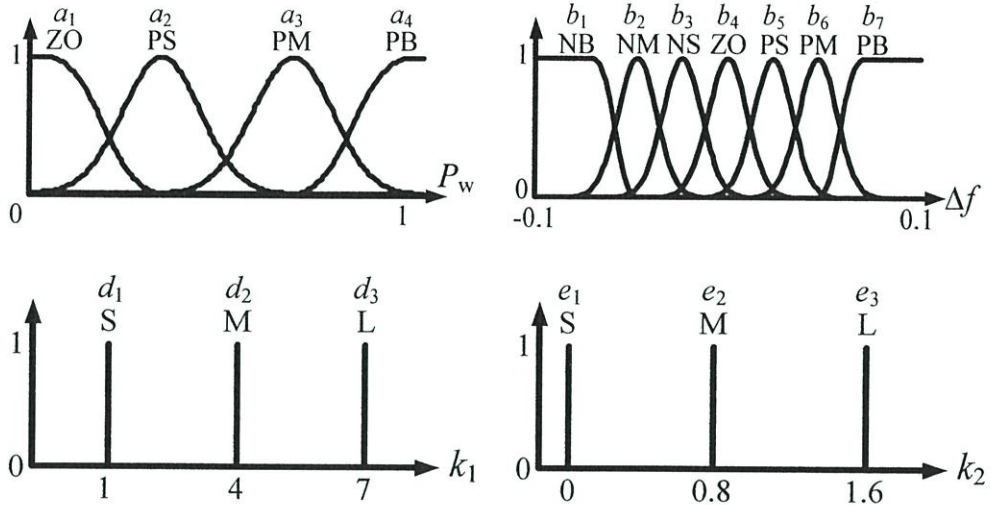
PSO-SFLC สำหรับ DFIG ใช้ปรับอัตราขยายของตัวแปรในรูปควบคุมความถี่ของ DFIG โดยสัญญาณเอาต์พุตของ PSO-SFLC นี้คือ k_1 และ k_2 โดยที่สัญญาณอินพุตของ PSO-SFLC นี้คือ P_w และ Δf การออกแบบกฎควบคุมสำหรับ PSO-SFLC มุ่งเน้นไปที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างรวดเร็ว และปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของรูปควบคุมความถี่ของ DFIG ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎ “if-then” ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{If Input } P_w = a_r \text{ and Input } \Delta f = b_s \\ \text{then, Output } k_1 = Aa_r + Bb_s + d_t \\ \text{, Output } k_2 = Aa_r + Bb_s + e_t \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$r = 1,2,3,4 \quad s = 1,2,\dots,7 \quad t = 1,2,3$$

โดยที่ a_r คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุตที่ q ของ P_w
 b_s คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุตที่ q ของ Δf
 d_t คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตที่ t ของ k_1
 e_t คือ ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตที่ t ของ k_2

ในที่นี้ A และ $B = 0$ โดยที่ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุต เอาต์พุต และกฎควบคุมของ PSO-SFLC แสดงดังรูปที่ 5.4 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันสมาชิกของ PSO-SFLC สำหรับ DFIG

ตารางที่ 5.2 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ก่อนหาค่าที่เหมาะสมสำหรับ DFIG

		Δf													
		NB		NM		NS		ZO		PS		PM		PB	
		k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
P_w	ZO	L	L	M	M	S	M	S	S	S	M	M	M	L	L
	PS	L	L	M	L	M	M	S	S	M	M	M	L	L	L
	PM	L	L	L	L	M	M	S	M	M	M	L	L	L	L
	PB	L	L	L	M	M	L	M	L	M	L	L	M	L	L

ค่าถ่วงน้ำหนักของกฎข้อที่ i สำหรับ DFIG สามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$w_i = \min(a_r, b_s) \tag{5.5}$$

สุดท้ายค่าที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักของเอาต์พุต k_1 ของ DFIG จะถูกนำมาคูณกับสมาชิกด้านเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อ จากนั้นกฎทุก ๆ ข้อจะถูกนำมารวมกันแล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i d_t}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5.6)$$

โดยที่ N คือจำนวนของกฎควบคุม ในที่นี้ $N = 28$

ส่วนค่าที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักของเอาต์พุต k_2 ของ DFIG จะถูกนำมาคูณกับสมาชิกด้านเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อ จากนั้นกฎทุก ๆ ข้อจะถูกนำมารวมกันแล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i e_u}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5.7)$$

5.2.3 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

ในที่นี้จะหาฟังก์ชันสมาชิกและกฎพื้นฐานที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ PSO-SFLC สำหรับ PV คือ

$$\text{Minimize } \gg \int_0^T |\Delta f| dt + \int_0^T |P_{conv} - P_{inv}| dt \quad (5.8)$$

จากสมการ 5.8 เหนอแรก คือ การหาค่าตัวแปรที่ทำให้ค่าการแกว่งของความถี่น้อยที่สุด เหนอที่สองแสดงถึงผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากคอนเวอร์เตอร์กับกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้กับระบบ โดยเหนอนี้จะบังคับให้ PV จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับที่ผลิตได้มากที่สุด

โดยที่ T คือ เวลาที่ใช้ในการจำลอง

ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ PSO-SFLC สำหรับ DFIG มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ PSO-SFLC สำหรับ PV ที่ทำให้การแกว่งของความถี่ในระบบมีค่าต่ำสุดดังนี้

$$\text{Minimize } \gg \int_0^T (|\Delta f|) dt \quad (5.9)$$

การหาค่าที่เหมาะสมด้วย PSO มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1: สร้างอนุภาคเริ่มต้นแบบสุ่มจำนวน n อนุภาค ในที่นี้ $n = 50$ และอนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว
- ขั้นตอนที่ 2: ให้ $N_p = 0$ เมื่อ N_p คือจำนวนรอบของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
- ขั้นตอนที่ 3: อนุภาคเริ่มต้นเหล่านี้จะถูกแทนค่าไปที่พารามิเตอร์ใน SFLC
- ขั้นตอนที่ 4: หลังจากแทนค่าจะถูกทดสอบเพื่อดูค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- ขั้นตอนที่ 5: เลือกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม (P_{best})
- ขั้นตอนที่ 6: ถ้า $P_{best} < P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{best}$ (P_{old} คือค่าที่เหมาะสมที่สุดของรอบที่ผ่านมา) แล้วข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8
- ขั้นตอนที่ 7: ถ้า $P_{best} > P_{old}$ ให้ $P_{old} = P_{old}$ แล้วไปทำขั้นตอนต่อไป
- ขั้นตอนที่ 8: ให้ $N_p = N_p + 1$
- ขั้นตอนที่ 9: ตรวจสอบว่าจำนวนรอบถึงรอบที่กำหนดแล้วหรือไม่ โดยถ้า $N_p = 200$ ให้หยุดการหา ถ้าไม่ให้ทำต่อไป
- ขั้นตอนที่ 10: อัปเดตค่าของอนุภาคแต่ละตัว แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

5.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในบทนี้จะทำการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO เฉพาะส่วนของกฎควบคุมของ PSO-SFLC เท่านั้น ด้วยเหตุผลที่ว่า ง่ายต่อการออกแบบ และลดเวลาที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งผลจากการหาค่าที่เหมาะสมของกฎควบคุมของ PSO-SFLC สำหรับ PV และ DFIG แสดงดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ที่ถูกหาค่าอย่างเหมาะสมสำหรับ PV

		Δf						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ISO	ZO	P	P	P	ZO	ZO	ZO	N
	PS	P	P	ZO	ZO	ZO	N	N
	PM	P	ZO	ZO	ZO	N	N	N
	PB	P	ZO	ZO	ZO	N	N	N

โดยที่ NB คือ Negative Big
 NM คือ Negative Medium
 NS คือ Negative Small
 PB คือ Positive Big
 PM คือ Positive Medium

PS	คือ Positive Small
ZO	คือ Zero
P	คือ Positive
N	คือ Negative

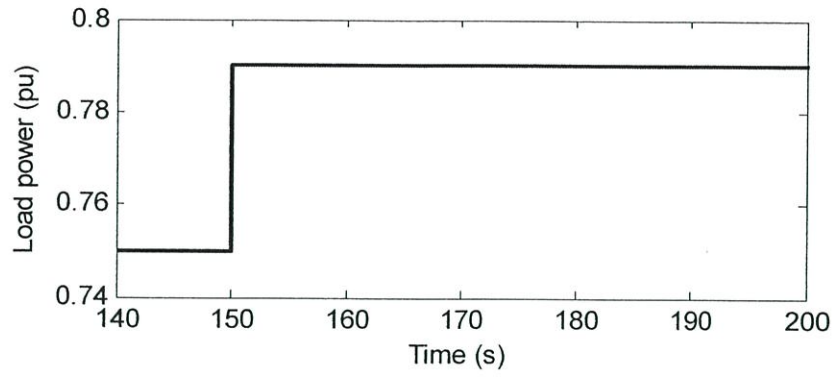
ตารางที่ 5.4 กฎควบคุมของ PSO-SFLC ที่ถูกหาค่าอย่างเหมาะสมสำหรับ DFIG

		Δf													
		NB		NM		NS		ZO		PS		PM		PB	
		k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
P_w	ZO	L	L	M	M	S	M	S	S	S	M	M	M	L	L
	PS	L	L	M	L	M	M	S	S	M	M	M	L	L	L
	PM	L	L	L	L	M	M	S	M	M	M	L	L	L	L
	PB	L	L	L	M	M	L	M	L	M	L	L	M	L	L

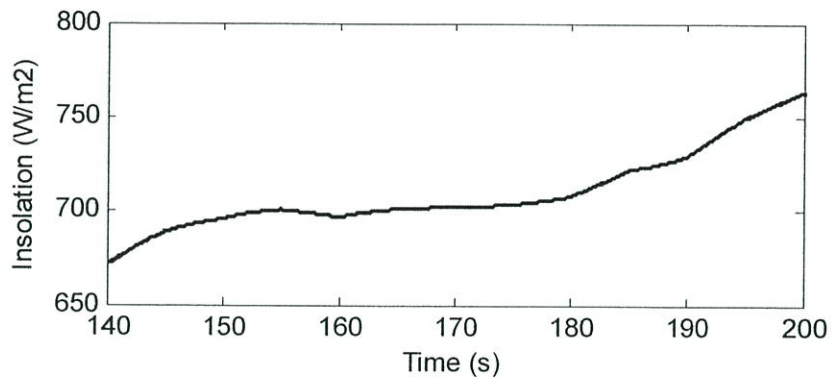
โดยที่	S	คือ Small
	M	คือ Medium
	L	คือ Large

ผลการจำลองทดสอบทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยดูประสิทธิภาพควบคุมของ PSO-SFLC ที่ติดตั้งทั้งใน PV และ DFIG เปรียบเทียบกับ PSO-SFLC ติดตั้งใน PV เพียงอย่างเดียว, PSO-SFLC ติดตั้งใน DFIG เพียงอย่างเดียว และสุดท้าย PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC โดยแบ่งการจำลองทดสอบออกเป็น 2 กรณี ตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดดังนี้

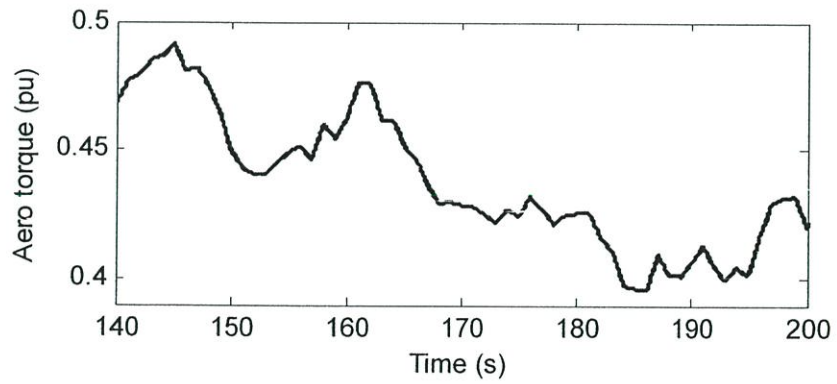
กรณีที่ 1 ทดสอบโดยให้โหลดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดตามรูปที่ 5.5 รูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงความเข้มแสง และแรงบิดที่เกิดจากลมของ DFIG ที่ใช้ในการจำลองทดสอบในกรณีที่ 1 ตามลำดับ รูปที่ 5.8 แสดงการแกว่งของความเร็วในระบบ จากรูปจะเห็นว่า การแกว่งของความเร็วในกรณีของ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC (เส้นแบบจุด) แกว่งรุนแรงมากที่สุด ในทางกลับกันการแกว่งของความเร็วลดลงเมื่อติดตั้ง PSO-SFLC ใน DFIG เพียงอย่างเดียว (เส้นประ-จุด) และลดลงมากขึ้นเมื่อติดตั้ง PSO-SFLC ใน PV เพียงอย่างเดียว (เส้นประ) สุดท้ายจะสามารถลดการแกว่งของความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อติดตั้ง PSO-SFLC ทั้งใน PV และ DFIG (เส้นทึบ)



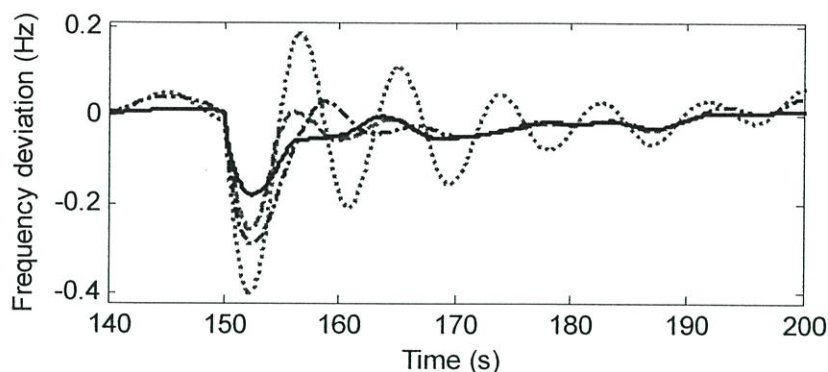
รูปที่ 5.5 โหลดแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.6 ความเข้มแสง (อินพุตของ PV)

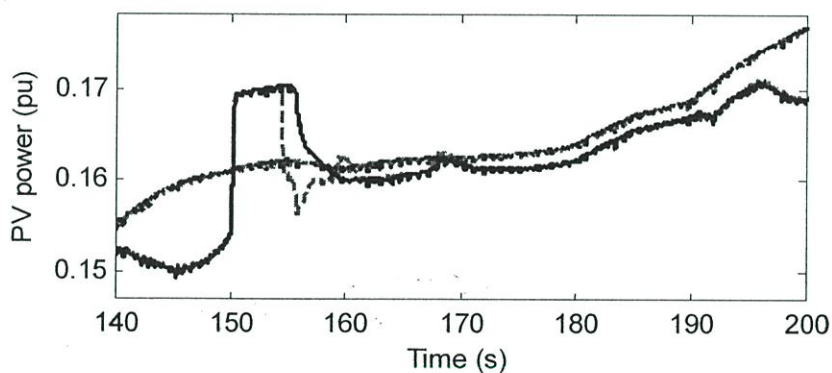


รูปที่ 5.7 แรงบิดจากลม (อินพุตของ DFIG)



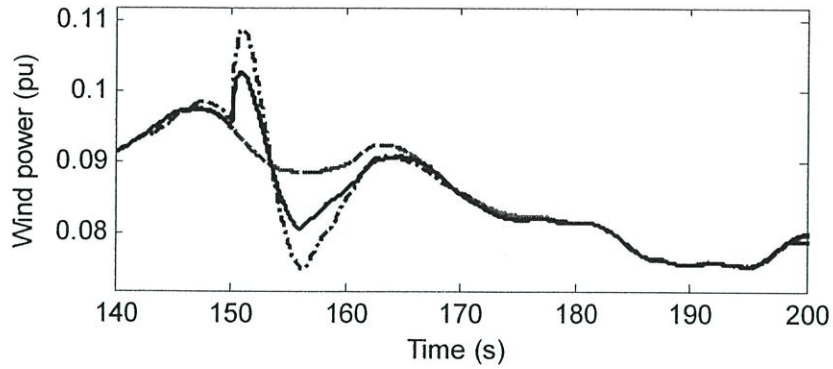
รูปที่ 5.8 การแกว่งของความถี่

ในที่นี้กำหนดให้	เส้นแบบจุด	คือ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC
	เส้นประ-จุด	คือ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC
	เส้นประ	คือ PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC
	เส้นทึบ	คือ PV และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC



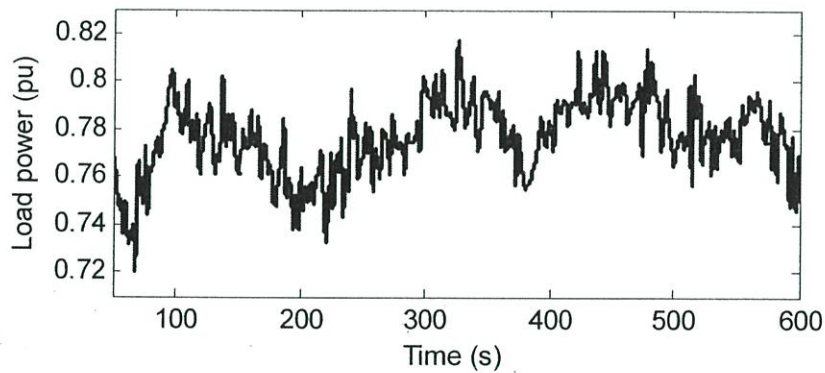
รูปที่ 5.9 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV

รูปที่ 5.9 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV ในกรณีของ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากไม่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ใน PV ในทางตรงกันข้าม กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใน PV ในกรณีของ PV และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC และ PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับโหลดเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลด



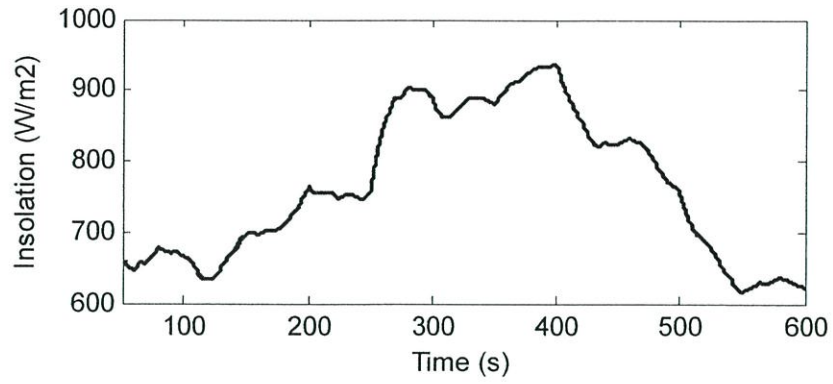
รูปที่ 5.10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DFIG

รูปที่ 5.10 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DFIG จะพบว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DFIG ในกรณีของ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC และ PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในทางกลับกันกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ DFIG ในกรณี PV และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีสัญญาณการควบคุมจาก PSO-SFLC ช่วยให้สามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างรวดเร็ว

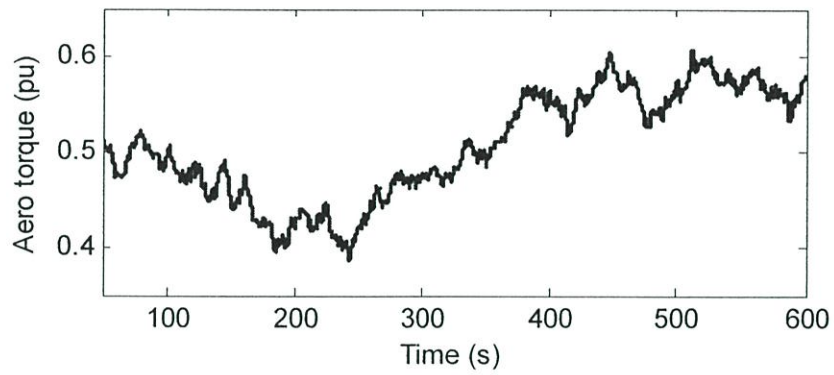


รูปที่ 5.11 โหลดแบบสุ่ม

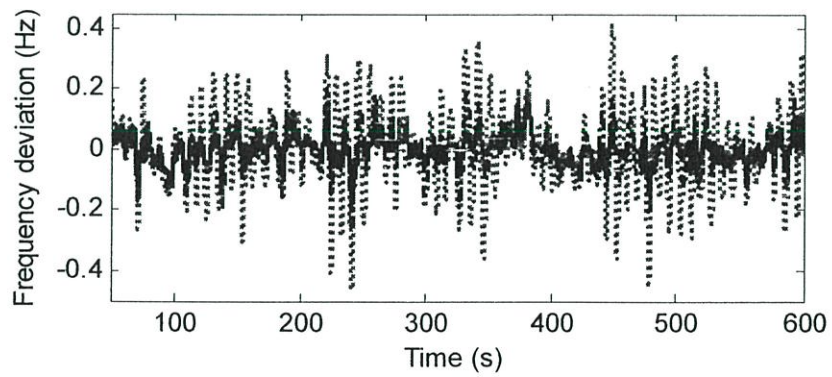
กรณีที่ 2 ทดสอบโดยให้โหลดเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มตามรูปที่ 5.11 รูปที่ 5.12 และ 5.13 แสดงความเข้มแสง และแรงบิดที่เกิดจากลมของ DFIG ที่ใช้ในการจำลองทดสอบในกรณีที่ 2 ตามลำดับ รูปที่ 5.14 แสดงการแกว่งของความเร็วในกรณีของ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC จะเห็นว่าในกรณีของ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC มีการแกว่งของความเร็วที่รุนแรงที่สุดในทางกลับกันในกรณีของ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC การแกว่งของความเร็วลดลงในระดับหนึ่ง ส่วน PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC สามารถลดการแกว่งของความเร็วได้ดียิ่งกว่า DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC และสุดท้าย PV และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC สามารถลดการแกว่งของความเร็วที่ดีที่สุด



รูปที่ 5.12 ความเข้มแสง (อินพุตของ PV)



รูปที่ 5.13 แรงบิดจากลม (อินพุตของ DFIG)



รูปที่ 5.14 การแกว่งของความถี่

5.4 สรุป

บทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ PSO-SFLC ควบคุม PV และ DFIG เพื่อควบคุมความถี่ร่วมกันในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ โดย PSO-SFLC ที่ติดตั้งใน PV ถูกใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV ผ่านอินเวอร์เตอร์ ส่วน PSO-SFLC ที่ติดตั้งใน DFIG ถูกใช้เพื่อควบคุมอัตราขยายของลูบควบคุมความถี่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมความถี่ของลูบควบคุมความถี่ เป็นผลให้สามารถลดการแกว่งของความถี่ในระบบได้ทุก ๆ สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกฎควบคุมของ PSO-SFLC ถูกหาค่าอย่างเหมาะสมด้วยวิธี PSO จากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ยืนยันว่า ผลการควบคุมความถี่ในกรณีของ PV และ DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC เหนือกว่า กรณีของ PV และ DFIG ที่ไม่ได้ติดตั้ง PSO-SFLC, DFIG ที่ติดตั้ง PSO-SFLC และ PV ที่ติดตั้ง PSO-SFLC ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบสุ่ม แรงบิดจากลมแบบสุ่ม การเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบขั้นบัน และโหลดแบบสุ่ม

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการใช้ประโยชน์จาก Renewable โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator : DFIG) เพื่อทำเสถียรภาพทางความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังทั้งในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ และระบบไฟฟ้ากำลังแบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่ ซึ่งได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงโหลด การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของ PV และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของ DFIG เป็นต้น เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูง วิทยานิพนธ์นี้ประยุกต์ใช้ฟัซซี่ลอจิกชนิดซุจิโนที่ถูกออกแบบให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization-based Sugeno Fuzzy Logic Controller: PSO-SFLC) ทำให้ตัวควบคุมที่ได้มีสมรรถนะสูง และสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของ PV และ DFIG เพื่อลดการแกว่งของความถี่ (Frequency Deviation) ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบสามารถสรุปงานวิจัยออกมาได้ดังต่อไปนี้

- สามารถควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบให้สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความถี่ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ตัวควบคุม PSO-SFLC ที่ใช้มีสมรรถนะการทำงานที่สูง อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการทำงานได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบค่าคงที่
- พารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งหมดได้มีการออกแบบให้มีความเหมาะสมพร้อมกันทั้งหมดด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค
- สามารถออกแบบตัวควบคุมให้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่มีระบบมีอุปกรณ์ไฟฟ้า และตัวควบคุมหลายตัวควบคุม
- ได้ประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Generator: DG) และ PV ผลที่ได้คือวิธีที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของความถี่ได้เหนือกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบภายใต้การจำลองการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ PV ได้รับที่แตกต่างกัน
- ได้ประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่ ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Stream Turbine) และ PV ผลที่ได้คือวิธีที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของความถี่ และการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้เหนือกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบภายใต้การจำลองการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลด การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบสุ่ม การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอย่างฉับพลัน และกรณีที่มีข้อจำกัดด้านขนาดของแบตเตอรี่ของ PV
- ได้ประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันไอน้ำ และ DFIG ผลที่ได้คือวิธีที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของ

ความถี่ได้เหนือกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบภายใต้การจำลองการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของ โหลด และการเปลี่ยนแปลงแรงบิดจากลมที่ DFIG ได้รับที่แตกต่างกัน

- ได้ประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอในการทำเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังแยกอิสระ ซึ่งประกอบไปด้วย DG PV และ DFIG ผลที่ได้คือวิธีที่นำเสนอสามารถควบคุมให้ PV และ DFIG ทำงานร่วมกัน เพื่อลดการแกว่งของความถี่ได้เหนือกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบภายใต้การจำลองการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลด การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ PV ได้รับ และการเปลี่ยนแปลงแรงบิดจากลมที่ DFIG ได้รับที่แตกต่างกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. สามารถประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PSO-SFLC กับอุปกรณ์ชนิดอื่นนอกจากอุปกรณ์ที่นำเสนอได้
2. ในกรณีระบบไฟฟ้ากำลังแบบเชื่อมโยงหลายพื้นที่ ในแต่ละพื้นที่จะมี PSO-SFLC ติดตั้ง 1 ตัว ดังนั้นควรพัฒนาต่อไปให้สามารถควบคุมจากส่วนกลางได้
3. แบบจำลองของ PV ควรมีการพิจารณาในส่วนของกำลังไฟฟ้าเสมือนเนื่องจากสามารถช่วยทำเสถียรภาพระบบได้ในช่วงที่ไม่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงได้
4. วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบตัวควบคุมในโดเมนเวลาทำให้ใช้เวลาในการออกแบบมาก ดังนั้นหากพิจารณาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ได้จะช่วยลดเวลาในการออกแบบได้เร็วขึ้น
5. ในการออกแบบตัวควบคุม PSO-SFLC เป็นการแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุม ซึ่งได้ทำการออกแบบในกรณีศึกษาเดียว แล้วทดสอบกับกรณีอื่น ๆ ถึงแม้ตัวควบคุมที่ได้จะสามารถรองรับกับการทำงานในกรณีอื่น ๆ ได้ แต่ในการออกแบบเพื่อใช้งานจริง ควรมีการพิจารณาหลาย ๆ กรณีในการออกแบบ เพื่อให้ตัวควบคุมที่ได้มีความเหมาะสมกับทุกสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bevrani H., Ghosh A. and Ledwich G. “Renewable Energy Sources and Frequency Regulation: Survey and New Perspectives”, *IET Renew. Power Gen.*, vol. 4, no. 5, 2010. pp. 438-457.
- [2] Kruger P. *Alternative Energy Sources: The Quest for Sustainable Energy*. Wiley. 2006.
- [3] Wang K., Ciucu F., Lin C. and Low S. H. “A Stochastic Power Network Calculus for Integrating Renewable Energy Sources into the Power Grid”, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 6, 2012. pp. 1037-1048.
- [4] Maisonneuve N. and Gross G. “A Production Simulation Tool for Systems with Integrated Wind Energy Resources”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, 2011. pp. 2285 – 2292.
- [5] Teleke S. et. al. “Rule-Based Control of Battery Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Sources”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 1, no. 3, 2010. pp. 117-124.
- [6] Yagami M. et. al. “Power System Transient Stability Analysis in the Case of High-Penetration Photovoltaics”, *IEEE Grenoble PowerTech (POWERTECH)*, 2013. pp. 1-6.
- [7] Pingping H., Ming D. and Binbin L. “Study on Transient Stability of Grid-connected Large Scale Wind Power System”, *2nd IEEE International Symposium on PEDG*, 2010.
- [8] Kakimoto N. et. al. “Power Modulation of Photovoltaic Generator for Frequency Control of Power System”, *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 24, 2009. pp. 943-49.
- [9] Senjyu T. et. al. “A Control Method for Small Utility Connected Large PV System to Reduce Frequency Deviation using a Minimal-Order Observer”, *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 24, 2009. pp. 520-28.
- [10] Morel J., Bevrani H., Ishii T. and Hiyama T. “A Robust Control Approach for Primary Frequency Regulation through Variable Speed Wind Turbines”, *IEEJ Trans. PE*, vol. 130, no.11, 2010. pp. 1002-1009.
- [11] Lilly J. “Takagi-Sugeno Fuzzy Systems,” *Fuzzy Control and Identification*, 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2010, pp. 88-105.

- [12] Bevrani H. and Tikdari A.G. **An ANN-Based Power System Emergency Control Scheme in the Presence of High Wind Power Penetration.**
- [13] Datta M., Senjyu T., Yona A. and Funabashi T. "A Fuzzy based Method for Leveling Output Power Fluctuations of Photovoltaic-Diesel Hybrid Power System," **Renewable Energy**, vol. 36, 2011, pp. 1693-1703.
- [14] Datta M., Senjyu T., Yona A. and Funabashi T. "Control of MW-class PV Generation to Reduce Frequency and Tie-line Power Fluctuations in Three Control Area Power System," **IEEE Int Conf on Power Electronics**, 2011, p. 894-901.
- [15] Kennedy J. and Eberhart R. "Particle Swarm Optimization," **Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Neural Networks**, vol. 1, 1995, pp. 1942-1948.
- [16] [Online]. Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations.
- [17] Shah R., Mithulananthan N. and Lee K. Y. "Large-Scale PV Plant With a Robust Controller Considering Power Oscillation Damping," **IEEE Trans on Energy Conversion**, vol. 28, no. 1, March 2013, pp. 106-116.
- [18] Kundur P. **Power System Stability and Control**. McGraw Hill, 1994.
- [19] Datta M., Senjyu T., Yona A., Funabashi T. and Kim C. H. "A Frequency-Control Approach by Photovoltaic Generator in a PV-Diesel Hybrid Power System," **IEEE Trans on Energy Conversion**, vol. 26, 2011, p. 559-571.
- [20] Datta M. and Senjyu T. "Fuzzy Control of Distributed PV Inverters/Energy Storage Systems/Electric Vehicles for Frequency Regulation in a Large Power System," **IEEE Trans on Smart Grid**, vol. 4, no. 1, 2013, p. 479-488.
- [21] Datta M., Senjyu T., Yona A., Funabashi T. and Kim C. H. "A Voltage and Frequency Control Approach by Grid-connected MW Class PV Systems," **IEEE Int Conf Elect. Machine and Syst.** 2010.
- [22] Datta M., Senjyu T., Yona A. and Funabashi T. "Fuzzy Control of MW-class PV Generation to Reduce Frequency and Tie-line Power Fluctuations in Three Control Area Power System," **IEEE Int Conf on Fuzzy Systems**, 2011, p. 2440-2447.
- [23] Chowdhury S.P. et. al. "Microgrids and Active Distribution Networks," **IET**, 2009.
- [24] Ekanayake J.B. et. al. "Frequency Response From Wind Turbines," **Wind Engineering**, vol. 32, 2008, pp. 573-586.

- [25] Bevrani H. et. al. "Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, December 2012, pp. 1935-1944
- [26] North American Electric Reliability Corporation, [Online]. Available: www.nerc.com/.
- [27] **Fuzzy toolbox user's guide 2012a**, The MathWorks, Inc, 2012.
- [28] Soliman S., Mantawy A. H. and Hassan A. A. **Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems**, London, Springer New York Heidelberg Dordrecht, 2010.
- [29] Femia N., Petrone G., Spagnuolo G. and Vitelli M. "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method," *IEEE Trans on Power Electron*, vol. 20, 2005, p. 963-973.
- [30] Keung P.K. et. al. "Kinetic Energy of Wind-Turbine Generators for System Frequency Support," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 24, Feb. 2009, pp. 279-287.
- [31] Zadeh L. A. "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, 1965. pp. 338-353.
- [32] Takagi T. and Sugeno M. "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", *IEEE Trans. on Syst. Man. and Cybern.*, vol. SMC-15, no. 1, 1995. pp. 116-132.
- [33] Li X., Hui D. and Lai X. "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations," *IEEE Trans. On Sustainable Energy*, vol. 4, April 2013, pp. 464-473.
- [34] [Online]. Available: <http://ecee.colorado.edu/~ecen2060/matlab.html>.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

วารสารต่างประเทศ (International Journal)

1. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Intelligent Photovoltaic Farms for Robust Frequency Stabilization in Multi-Area Interconnected Power System based on PSO-based Optimal Sugeno Fuzzy Logic Control," *Renewable Energy*, vol.74, p.555-567, 2015.

บทความทางวิชาการระดับนานาชาติ (International Conference)

1. N. Sa-ngawong, T. Chaiyatham, and I. Ngamroo, "Microgrid Frequency Stabilization by Controllable PV Source based on Fuzzy Logic Control," *The 2013 International Electrical Engineering Congress (iEECON2013)*, 13-15 March 2013, Chiang Mai, Thailand.
2. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Frequency Control of Isolated Microgrid by Fuzzy Logic Control-based Photovoltaic Generator," *International Smart Grid Conference & Exhibition (ISGC&E 2013)*, 8-11 July 2013, Jeju Island, Korea.
3. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Fuzzy Logic Control-based Photovoltaic Generator for Microgrid Frequency Stabilization," *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2013)*, 21-24 August 2013, Bangkok, Thailand.
4. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Optimal Fuzzy Logic-based Adaptive Controller equipped with DFIG Wind Turbine for Frequency Control in Stand Alone Power System," *Innovative Smart Grid Technologies Conference Engineering (IEEE PES ISGT 2013)*, 10-13 November 2013, Bangalore, India.
5. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "PSO-based Sugeno Fuzzy Logic Controller of Photovoltaic Generator for Frequency Stabilization in Stand-Alone Power System," *The 5th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (IEEE PES APPEEC 2013)*, 8-11 December 2013, Kowloon, Hong Kong.
6. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Sugeno Fuzzy Logic Control-based Smart PV Generators for Frequency Control in Loop Interconnected Power Systems," *The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON2014)*, 19-21 March 2014, Pattaya City, Thailand.

7. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Intelligent Control of PV and DFIG Wind Power Sources for Frequency Control Support in a Standalone Power System," Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition (GRE2014), 27 July - 1 August 2014, Tokyo, Japan.

บทความทางวิชาการระดับชาติ (National Conference)

1. N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Isolated Power System Frequency Control by DFIG Wind Turbine with Adaptive Controller by PSO-based Sugeno Type Fuzzy Logic Control" 36th Electrical Engineering Conference (EECON36), 11-13 December 2013, Kanchanaburi, Thailand.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36

The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)

11-13 ธันวาคม 2556

ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี



Volume 2

- (CM) ไฟฟ้าสื่อสาร
- (EL) อิเล็กทรอนิกส์
- (PH) ไฟโตนิคส์
- (CT) ระบบควบคุม
และการวัดคุม
- (DS) การประมวล
สัญญาณดิจิทัล
- (CP) คอมพิวเตอร์
และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- (GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
กับวิศวกรรมไฟฟ้า
- (BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์

Electrical Engineering Dept.

Faculty of Engineering

Kasetsart University

50 Ngamwongwan Road Lamyao

Chatuchak Bangkok 10900

Tel: 02-797-0999 ext 1503-1504

Fax: 02-579-7566



L&E

silicon craft

ABB

การควบคุมความถี่ระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ซึ่งคิดตั้งควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วยฟัซซีลอจิกชนิดซุจินซึ่งทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

Isolated Power System Frequency Control by DFIG Wind Turbine with Adaptive Controller

by PSO-based Sugeno Type Fuzzy Logic Control

ณัฐพล สว่างค์ และ อิศระจือ งามหวู

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: nattapol.bnk@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมความถี่ในระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly Fed Induction Generator : DFIG) ซึ่งคิดตั้งควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วยฟัซซีลอจิกชนิดซุจิน (Sugeno-Type Fuzzy) ซึ่งทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) เนื่องจากกังหันลมชนิด DFIG มีคุณสมบัติที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงได้เร็ว จึงสามารถใช้กังหันลมนี้เพื่อให้บริการควบคุมความถี่แก่ระบบ เพื่อให้ได้ควบคุมความถี่สามารถทำงานได้กับสภาวะโหลดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปในที่นี้จะประยุกต์ใช้ PSO เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) และกฎพื้นฐาน (Rule base) ของ Sugeno fuzzy เพื่อปรับค่าตัวควบคุมความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า กังหันลม DFIG ที่คิดตั้งควบคุมปรับค่าได้สามารถลดค่าเบี่ยงเบนความถี่ในระบบได้เร็วกว่ากังหันลมซึ่งคิดตั้งควบคุมแบบดั้งเดิมภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบต่างๆ นอกจากนี้ยังมีสมรรถนะทนสูงต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระบบ

คำสำคัญ: ฟัซซีลอจิกชนิดซุจิน การควบคุมความถี่ ระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดด กังหันลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

Abstract

This paper proposes a new adaptive controller by optimal Sugeno-type fuzzy control of Doubly Fed Induction Generator (DFIG) wind turbine for frequency control in microgrid. The PSO is applied to optimize membership functions and rule bases of Sugeno fuzzy so that the adaptive controller can deal with any system situations. Simulation results show that the control effect of the proposed control is superior to that of the conventional control against various load changes.

Keywords: Sugeno-type fuzzy logic, frequency control, microgrid, wind turbine, doubly fed induction generator (DFIG)

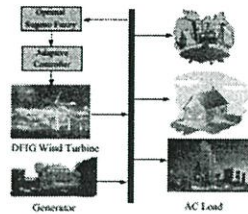
1. บทนำ

ปัจจุบัน ระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดได้รับผลกระทบร้ายแรงเป็นระบบจัดการพลังงานสำหรับพื้นที่ห่างไกลซึ่งไม่สามารถเข้าถึงกริดของกาไฟฟ้า โดยเฉพาะระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดซึ่งผลิตพลังงานด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เลเซอร์และกังหันลมนั้น ปัญหาที่ท้าทายหนึ่งคือปัญหาการแกว่งของความถี่ในระบบเนื่องจากความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปไม่สมดุลกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากระบบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบ [1]

โดยทั่วไป การแก้ปัญหาการแกว่งของความถี่ทำได้โดยการควบคุมโหลด-ความถี่ (Load-Frequency Control, LFC) ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด อย่างไรก็ตามไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตตามการควบคุมล้นข้างช้า จึงไม่สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความถี่เนื่องจากโหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่อย่างรวดเร็วได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการใช้กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมมาช่วยลดการแกว่งความถี่ [2] ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการคิดตั้งควบคุมความถี่เข้าไปกับกังหันลมชนิด DFIG แต่เนื่องจากตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นแบบพารามิเตอร์คงที่จึงไม่สามารถปรับการทำงานให้เหมาะสมกับสถานการณ์ระบบที่เปลี่ยนไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอฟัซซีลอจิกชนิดแมนดานิ (Mamdani-Type Fuzzy) ที่ทำให้เหมาะสมด้วย PSO มาปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมความถี่เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น [3] อย่างไรก็ตาม ฟัซซีลอจิกมีการประมวลผลที่ช้า อีกทั้งมีจำนวนฟังก์ชันสมาชิกมากจึงไม่เหมาะสมกับการหาค่าที่เหมาะสม

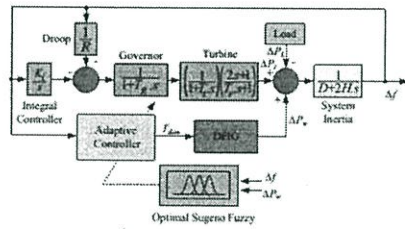
บทความนี้นำเสนอการควบคุมความถี่ในระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดด้วยกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งคิดตั้งควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย Sugeno fuzzy ในที่นี้จะหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิก และกฎพื้นฐานของ Sugeno fuzzy ด้วย PSO เพื่อให้ตัวควบคุมปรับค่าได้สามารถควบคุมความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของการควบคุมความถี่ของกังหันลมที่คิดตั้งควบคุมปรับค่าได้เมื่อเทียบกับกังหันลมที่คิดตั้งควบคุมแบบดั้งเดิมเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบต่างๆ

2. ระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดที่ใช้ศึกษา



รูปที่ 1 ระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดที่ใช้ศึกษา

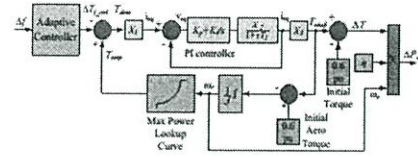
รูปที่ 1 แสดงระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดที่ใช้ศึกษาซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมกับกังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งคิดค้นตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ (Adaptive controller) หรือ Sugeno fuzzy และกลุ่มโหลด ในการศึกษานี้สมมติว่าความเร็วลมเฉลี่ยในระบบก่อนข้างคังที่ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมก่อนข้างสม่ำเสมอ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าไหลคังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาจจึงทำให้เกิดการแกว่งของความเร็วระบบอย่างรุนแรง



รูปที่ 2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบ

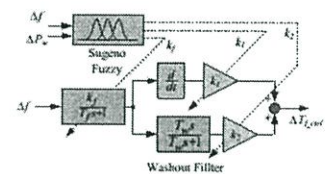
รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบกำลังไฟฟ้าแยกโดดที่ใช้ศึกษาการแกว่งของความเร็ว ซึ่งประกอบด้วย ไคเวอร์เนอร์ เทอร์บิณ กังหันลมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย Sugeno fuzzy เมื่อ D คือ ค่าคงที่การหน่วงของระบบ H คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของระบบ $\Delta\omega$ คือ ค่าเบี่ยงเบนความเร็วของระบบ $\Delta\omega$, คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ω , คือ ความเร็วเชิงมุมของแกนโรเตอร์ ΔP , คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของเทอร์บิณ ΔP_t , คือ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของกังหันลม ΔP_c , คือการเปลี่ยนแปลงความถี่การกำลังไฟฟ้าของโหลดและ T_{dew} คือ แรงบิดคังเข้าของ DFIG ระบบมีขนาด 63.54 GW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ชนิดซิงโคร 40.78 GW และกังหันลมมีขนาด 19.4 GW ค่าพารามิเตอร์ของระบบได้กำหนดไว้ใน [2]

รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองกึ่งกันสมของ DFIG สำหรับควบคุมความเร็ว [2] เมื่อความเร็วระบบเปลี่ยนแปลงไป ตัวควบคุมความเร็วจะปรับค่าแรงบิดให้คังค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าคังด้านออกของกังหันลมตาม



รูปที่ 3 แบบจำลองกึ่งกันสมชนิด DFIG ซึ่งติดตั้งตัวควบคุมปรับค่าได้คือ T_{ref} คือ แรงบิดของ DFIG ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ΔT_{ref} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่เปลี่ยนมาจากตัวควบคุมความเร็ว ΔT คือค่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดของ DFIG T_{ref} คือ แรงบิดที่แกนโรตอร์ของ DFIG J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยและ η คือ ประสิทธิภาพของ DFIG

3. การออกแบบตัวควบคุมปรับค่าได้ที่นำเสนอ



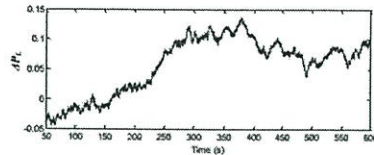
รูปที่ 4 ตัวควบคุมความเร็วที่ปรับค่าได้ด้วย Sugeno fuzzy

รูปที่ 4 แสดงตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย Sugeno fuzzy ซึ่งทำหน้าที่แปลงการเปลี่ยนแปลงความเร็วให้กลายเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงบิดให้กึ่งกันสมเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าที่โมเมนต์สูงซึ่งมีผลไปลดการแกว่งของความเร็วในระบบโดยมี Sugeno fuzzy เป็นตัวปรับค่าตัวแปร k_1, k_2 และ k_3 เมื่อ k_1 คือค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงความเร็วไปเป็นแรงบิด T_r คือค่าคงที่เวลาของการแปลงความเร็วไปเป็นแรงบิด T_r คือ ค่าคงที่เวลาของตัวกรองสัญญาณ k_2 คือ ตัวปรับคังส่วนของกรลอบสนองความเร็วที่เริ่มต้นจากพลังงานจลน์และ k_3 คือตัวปรับคังส่วนของกรลอบสนองความเร็วจากแรงบิดทางกล

สำหรับ Sugeno fuzzy นั้นจะคล้ายกับ Mamdani fuzzy เพียงแต่ฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตจะคังกันคังคือฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตของ Sugeno fuzzy มี 2 แบบได้แก่ สมการเส้นตรง และค่าคงที่ [4] การควบคุมของ Sugeno fuzzy แสดงได้คังรูปที่ 4 โดยตั้งสัญญาณไปปรับค่า k_1, k_2, k_3 ให้เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะของระบบ ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของ Sugeno fuzzy ประกอบด้วย ค่าเบี่ยงเบนความเร็ว และค่าเบี่ยงเบนกำลังไฟฟ้าของกังหันลม สัญญาณเอาต์พุตของ Sugeno fuzzy สามารถพิจารณาจากเงื่อนไขคังนี้

$$\begin{aligned} \text{ถ้า อินพุต } 1 = A \text{ และ อินพุต } 2 = B \\ \text{แล้ว เอาต์พุต } k_1 = C, k_2 = D, k_3 = E \end{aligned}$$

โดยที่ A, B, C, D และ E คือฟังก์ชันสมาชิกของฟังก์ชัน

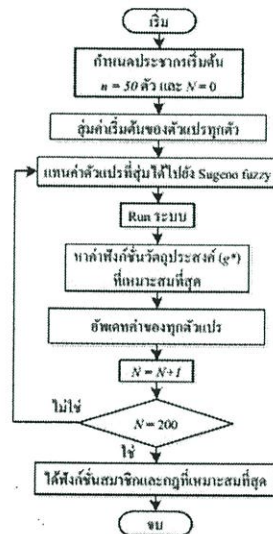


รูปที่ 5 โหลดแบบสุ่ม

ในที่นี้ จะหาฟังก์ชันสมาชิกและกฎพื้นฐานที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO ภายใต้การจำลองคอมพิวเตอร์ของโหลดแบบสุ่มดังรูปที่ 5 โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ระบบต่ำสุดดังนี้

$$\text{Minimize } IAE = \int_0^T (|\Delta f(t)|) dt. \quad (1)$$

เมื่อ IAE คือ ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์รวม (Integral Absolute Error) และ T คือเวลาที่ใช้ในการจำลอง ในที่นี้จะแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค [5] โดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภูมิการทำงานของ PSO

เมื่อ n คือ จำนวนประชากรเริ่มต้นหรืออนุภาคเริ่มต้น N คือ จำนวนรอบการทำงาน (iteration) และ g* คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ

ตารางที่ 1 กฎของ Sugeno fuzzy จากกราฟค่าที่เหมาะสม

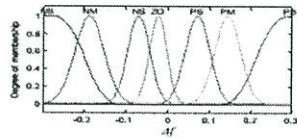
		อินพุต 1				
		NM	NS	ZO	PS	PM
		k_1, k_2, k_3	k_1, k_2, k_3	k_1, k_2, k_3	k_1, k_2, k_3	k_1, k_2, k_3
อินพุต 2	NB	mf1, mf7, mf5	mf4, mf2, mf6	mf4, mf2, mf3	mf6, mf4, mf4	mf7, mf6, mf2
	NM	mf4, mf6, mf3	mf1, mf6, mf6	mf5, mf2, mf1	mf3, mf5, mf3	mf4, mf1, mf6
	NS	mf5, mf2, mf4	mf3, mf3, mf5	mf7, mf1, mf5	mf6, mf2, mf6	mf3, mf7, mf5
	ZO	mf1, mf6, mf4	mf2, mf2, mf5	mf3, mf1, mf2	mf1, mf3, mf4	mf5, mf1, mf6
	PS	mf6, mf7, mf6	mf3, mf6, mf3	mf2, mf1, mf5	mf1, mf5, mf5	mf2, mf2, mf6
	PM	mf2, mf5, mf1	mf6, mf2, mf3	mf5, mf6, mf2	mf1, mf2, mf6	mf2, mf6, mf4
	PB	mf7, mf2, mf1	mf1, mf6, mf4	mf3, mf2, mf5	mf1, mf3, mf2	mf6, mf2, mf1

เมื่อ NB คือ Negative Big NM คือ Negative Medium NS คือ Negative Small ZO คือ Zero PS คือ Positive Small PM คือ Positive Medium PB คือ Positive Big และ mf1 ถึง mf7 คือฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุท

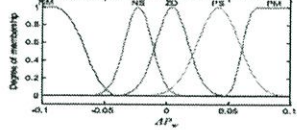
รูปที่ 7 และ 8 แสดงฟังก์ชันสมาชิกที่ทำให้เหมาะสมของอินพุตของฟังก์ชัน 1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับเอาท์พุทที่ 3 ค่า k_1, k_2 และ k_3 สามารถแสดงได้ด้วยกราฟที่แนบมาเมื่อเทียบกับอินพุตทั้งสองดังรูปที่ 9-10 และ 11 ตามลำดับ นอกจากนี้กฎของ Sugeno fuzzy ที่ทำให้เหมาะสมแสดงได้ในตารางที่ 1

4. ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

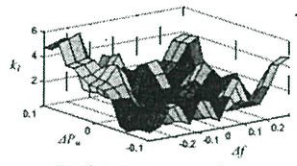
ในที่นี้แบ่งการจำลองเป็น 2 กรณีตามรูปแบบของโหลดดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบสุ่ม และ รูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบขั้นบันได เมื่อเปรียบเทียบการควบคุม 3 ชนิด คือ (1) กรณีที่ไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุมความถี่ให้กับกึ่งนำทอม (Without control) (2) กรณีที่ติดตั้งตัวควบคุมความถี่ให้กับกึ่งนำทอมโดยการหาค่า k_1, k_2 และ k_3 อย่างเหมาะสม (Optimized control) และ (3) กรณีที่ติดตั้งตัวควบคุมความถี่ที่ปรับค่าได้โดย Sugeno fuzzy เป็นตัวปรับหาค่า k_1, k_2 และ k_3 (Adaptive control) รูปที่ 13 และ 14 แสดงค่าเบี่ยงเบนความถี่กรณีโหลดแบบสุ่มและโหลดแบบขั้นบันได โดยตามลำดับ ในกรณีตัวควบคุมที่นำเสนองาน ค่าเบี่ยงเบนความถี่จะต่ำกว่าค่าเบี่ยงเบนความถี่ในกรณีของตัวควบคุมที่ติดตั้งอย่างเหมาะสม รูปที่ 15 และ 16 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของค่า IAE ในกรณีโหลดแบบสุ่มและโหลดแบบขั้นบันไดตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทุกตัวในระบบ $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ และ $\pm 30\%$ จะเห็นว่าค่า IAE ในกรณีตัวควบคุมที่นำเสนองานมีค่าที่ต่ำที่สุดและแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงค่าเลย ในขณะที่กรณีไม่ได้ติดตั้งตัวควบคุม และตัวควบคุมที่ติดตั้งอย่างเหมาะสมนั้นให้ค่า IAE ที่มากกว่า ผลที่ตามมาคือแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมปรับค่าได้มีคุณสมบัติสมรรถนะในการควบคุมความถี่และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบสูงกว่าตัวควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบ



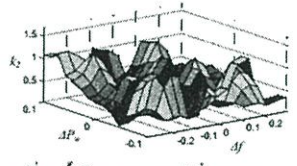
รูปที่ 7 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต 1 จากตารางค่าที่เหมาะสม



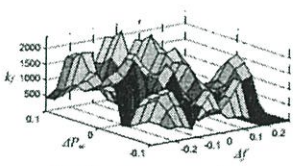
รูปที่ 8 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต 2 จากตารางค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 9 พื้นผิว k_1 จากตารางค่าที่เหมาะสม



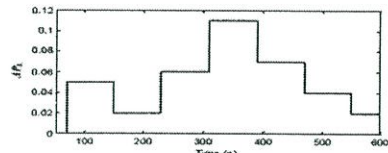
รูปที่ 10 พื้นผิว k_2 จากตารางค่าที่เหมาะสม



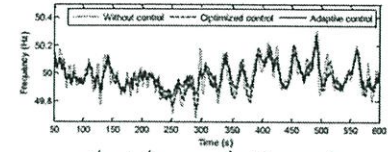
รูปที่ 11 พื้นผิว k_3 จากตารางค่าที่เหมาะสม

5. สรุป

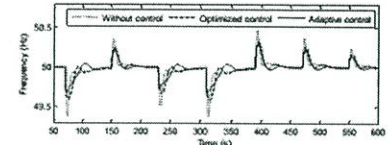
บทความนี้มีข้อเสนอแนะควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย Sugeno fuzzy ที่ทำให้อะแดปทีฟด้วย PSO ซึ่งติดตั้งกับกังหันลมชนิด DFIG เพื่อลดการแกว่งของความเร็วในระบวมกำลังไฟฟ้าแอกโตค ในที่นี้ได้อำนาจการไหลที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิกและกฎพื้นฐานของ Sugeno fuzzy ด้วยวิธี PSO ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากังหันลม DFIG ที่ติดตั้งตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถลดค่าเบี่ยงเบนความเร็วของระบบได้มากกว่ากังหันลมที่ติดตั้งตัวควบคุมแบบพารามิเตอร์คงที่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบสุ่มและขั้นบันได นอกจากนี้ตัวควบคุมที่นำเสนอยังมีสมรรถนะสูงส่งต่อการเปลี่ยนแรงจลน์มอเตอร์ในระบบด้วย



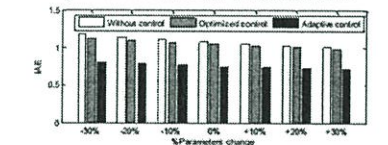
รูปที่ 12 โหลดแบบขั้นบันได



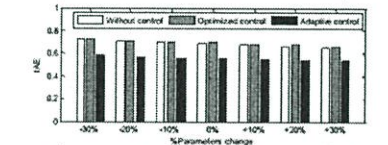
รูปที่ 13 ค่าเบี่ยงเบนความถี่กรณีโหลดแบบสุ่ม



รูปที่ 14 ค่าเบี่ยงเบนความถี่กรณีโหลดแบบขั้นบันได



รูปที่ 15 ค่าความผิดพลาด (IAE) กรณีโหลดแบบสุ่ม



รูปที่ 16 ค่าความผิดพลาด (IAE) กรณีโหลดแบบขั้นบันได

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.P. Chowdhury, et al., "Microgrids and active distribution networks", IET, 2009.
- [2] J.B. Ekanayake, et al., "Frequency response from wind turbines", Wind Engineering, Vol. 32, pp. 573-586, 2008.
- [3] H. Bevrani, et al., "Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach", IEEE Trans. Smart Grid, pp. 1935-1944, December 2012.
- [4] Fuzzy toolbox user's guide 2012a, The MathWorks, Inc., 2012.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, Vol.1, pp.1942-1948, 1995.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐพล สว่างวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	2 กรกฎาคม 2532 ที่ จ.เชียงราย
ที่อยู่	138 หมู่ 1 ต.แม่กรณ์ อ.เมืองเชียงราย จ.เชียงราย 57000
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนและรางวัล	2556 ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปี งบประมาณ 2556 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน จาก สนพ. 2556 ทุนสนับสนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับปริญญาโท จากสำนักงาน กองทุน สจล. 2557 ทุนสนับสนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับปริญญาโท จากสำนักงาน กองทุน สจล. 2556 ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานทางวิชาการ 2557 ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานทางวิชาการ