

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการฟัซซีลอจิกรวมกับการรบกวนและ
สังเกตสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

MAXIMUM POWER POINT TRACKING USING FUZZY LOGIC BASED P&O
TECHNIQUE FOR A SMALL WIND TURBINE GENERATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-020-076

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการฟัซซีลอจิกร่วมกับการรบกวนและ
สังเกตสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

MAXIMUM POWER POINT TRACKING USING FUZZY LOGIC BASED P&O
TECHNIQUE FOR A SMALL WIND TURBINE GENERATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-020-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAXIMUM POWER POINT TRACKING USING FUZZY LOGIC BASED P&O
TECHNIQUE FOR A SMALL WIND TURBINE GENERATOR



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
2016

KMITL-2016-EN-M-020-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้






คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการฟัซซีลอจิกร่วมกับการรบกวนและสังเกตสำหรับ
กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

Thesis Title Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Based P&O Technique for
a Small Wind Turbine Generator

นักศึกษา นายอดิสร สุขแสง
รหัสประจำตัว 57601408
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-020-076

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วรชาติ	สุวรรณงาม	
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
ผศ.ดร.วุฒิพล	ธาราธิ์เศรษฐ์	
ดร.สมภาพ	ผลไม้	
ผศ.ดร.ศิริเดช	บุญแสง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-306

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการพีชซีลอจิกร่วมกับการ รบกวนและสังเกตสำหรับกักหน้ลผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
นักศึกษา	นายอดิศร สุขแสง
รหัสประจำตัว	57601408
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการพีชซีลอจิกร่วมกับวิธีการติดตามแบบรบกวนและสังเกตสำหรับกักหน้ลผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยวิธีการควบคุมนี้จะใช้ตัวควบคุมพีชซีลอจิกมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของการทำงานของการติดตามกำลังไฟฟ้า ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) โดยใช้บ้กคอนเวอร์เตอร์นั้น การปรับขนาดของค่าเพิ่ม-ลด ดิวตี้ไวเคิลมีความสำคัญมากต่อวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าภายใต้เทคนิครบกวนและสังเกต ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยจะช่วยลดปัญหาในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนดิวตี้ไวเคิลที่คงที่ ซึ่งในกรณีที่ขนาดของค่าเพิ่ม-ลด ดิวตี้ไวเคิล (ΔD) มีค่ามากเกินไป จะมีผลทำให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามาก และในทางตรงกันข้าม ถ้าขนาดของค่าเพิ่ม-ลด ดิวตี้ไวเคิล (ΔD) มีค่าน้อย จะมีผลทำให้การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นไปอย่างช้าแต่ส่งผลให้มีการแกว่งที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำ สำหรับการทดลองในงานวิทยานิพนธ์จะแบ่งการทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทดสอบที่ความเร็วลมคงที่ 5 เมตรต่อวินาทีและ 7 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และส่วนที่ 2 ทดสอบที่สภาวะที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงระหว่าง 5 เมตรต่อวินาทีและ 7 เมตรต่อวินาที วิธีการควบคุมที่นำเสนอจะเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ (PI) และวิธีการรบกวนและสังเกตแบบทั่วไป ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าทั้งสองวิธีในทุกสภาวะความเร็วลม โดยงานวิจัยจะทำการทดสอบโดยใช้วงจรทอน ระดับแรงดันไฟฟ้าและควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328P ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นการลดลงของการแกว่งและความเร็วในการติดตามกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้นเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Maximum Power Point Tracking Using Fuzzy Logic Based P&O Technique for A Small Wind Turbine Generator
Student	Mr.Adisorn Sooksang
Student ID.	57601408
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Siridech Boonsang

ABSTRACT

This thesis presents the maximum power point tracking technique by the fuzzy logic controller based on the Perturb and Observe (P&O) algorithm for a small wind turbine generator. This method used fuzzy logic controller for improving performances of a small wind turbine. In MPPT of wind turbine with converter, duty cycle needs to be adjusted based on the P&O algorithm. The proposed method applied in the thesis would reduce the problem from fix step duty. However, if the step size of duty cycle (ΔD) is too high, there was a large oscillation around the maximum power point (MPP). In contrary, the small step size of duty cycle (ΔD) results in slow tracking and small oscillation. This thesis divided the test into 2 parts. The first part is testing in the condition of constant wind speed at 5 m/s and 7 m/s. The second part is testing in the condition of wind speed changing between 5 m/s and 7 m/s. This technique was compared with conventional PI controller and the classical P&O MPPT. The experimental results showed that the proposed control method using fuzzy logic is better than PI controller and the classical P&O MPPT for all wind speed conditions. The experimental results show that the oscillation of the system decreases and the reaching to a maximum power point (MPP) is faster when wind speed changed.

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยเรื่องการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้การควบคุมแบบฟuzzyลอจิกสำหรับ
กักหน้ลผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถประสบความสำเร็จได้ด้วยดีนั้น เกิดจากการทำงานด้วยความ
วิริยะอุตสาหะของผู้จัดทำ และได้รับคำแนะนำและการสนับสนุนจากบุคคล รวมถึงหน่วยงานที่
เกี่ยวข้องหลายๆ ฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ดังกล่าว ดังมีรายนาม
ดังต่อไปนี้

ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณในความกรุณา ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่
ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางจนโครงการชิ้นนี้สำเร็จตามเป้าหมาย และให้ความช่วยเหลือ
เพิ่มเติมด้วยความเอ็นดูเสมอมา ตลอดจนอาจารย์ในสาขาวิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำ
ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณนายภูมิ คงห้วยยอด, นายปิยกร กุฑพันธ์ และนายอิทธิพันธ์ สกุลวัฒนาศักดิ์
นักศึกษาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่
ดีตลอดการทำงาน

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณนายนครศักดิ์ แสงศรีเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนนางกมลวรรณ ถาวร, นายบุญยวีร์ ฉายศิริ,
นางสาวสุภารัตน์ พุ่มย่อย และนางสาวนิตยา นากสุก เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการ
เบิกเบเสิร์จของโครงการ และขอขอบคุณฝ่ายอาคารสถานที่ที่กวิจัยนวัตกรรม ที่ให้ใช้ห้องทดสอบและ
อุปกรณ์เครื่องใช้อื่นๆเสมอมา รวมถึงกลุ่มเพื่อนๆที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่คอยเป็นกำลังใจรวมทั้งให้ความ
ช่วยเหลือร่วมทุกข์ร่วมสุขด้วยกันเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้คือบิดา มารดา อันเป็นที่
เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้จัดทำมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้
กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบไม่ได้ ผู้จัดทำระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและ
กราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

อดิศร สุขแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และIIIจงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	3
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทบทวนวรรณกรรมกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	5
2.1.1 Fixed speed generating systems.....	5
2.1.2 Variable speed generating systems.....	6
2.1.3 Doubly fed induction generator.....	7
2.2 ทบทวนวรรณกรรมการติดตามกำลังไฟฟ้า.....	7
2.2.1 วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าจากการ literature review.....	7
2.2.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยการจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink.....	8
2.2.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยการทดสอบจริง (Experiment).....	9
2.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้วิธีการฟuzzy logic ที่นำมา พิจารณา.....	11
2.3.1 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟuzzy logic โดยใช้ค่าอินพุตระบบฟuzzy เป็นกำลังไฟฟ้า และตัวตีไชเคิล.....	11
2.3.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟuzzy logic โดยใช้ค่าอินพุตระบบฟuzzy เป็นกำลังไฟฟ้า และความเร็วของกังหันลม.....	12
2.3.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟuzzy logic ต่อร่วมกับระบบกริด.....	13
2.4 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการอื่นๆ.....	14
2.4.1 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการ GA.....	14
2.4.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการ Wilcoxon radial basis function network (WRBFN).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อย่างเป็นทางการใดๆ

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้า	16
2.6 กังหันลมกับการผลิตไฟฟ้า.....	16
2.6.1 กังหันลมและการประยุกต์ใช้งาน	17
2.6.2 ชนิดกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	18
2.6.2.1 กังหันลมแนวแกนตั้ง	18
2.6.2.1 กังหันลมแนวแกนนอน.....	19
2.6.3 คุณลักษณะของกังหันลม	20
2.7 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรรีบคอนเวอร์เตอร์	23
2.8 การควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller).....	24
2.8.1 วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols) ที่ใช้ในการปรับค่าเกณฑ์ควบคุมแบบ พี ไอ ดี	25
2.8.2 วิธีการวัฏจักรท้ายสุด (Ultimate Cycle Method)	25
2.9 ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic).....	26
2.9.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับฟัซซีลอจิก	26
2.9.2 ฟัซซีลอจิกกับตัวควบคุมในงานทางวิศวกรรม.....	27
2.9.2.1 การควบคุมโดยตรง (Direct control).....	28
2.9.2.2 การควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feed forward control)	28
2.9.2.3 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว (Parameter adaptive control).....	29
2.9.3 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก	29
2.9.4 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก	30
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า	33
3.1 โครงสร้างของวงจรรีบคอนเวอร์เตอร์	33
3.2 หลักการพื้นฐานของการทำงานของวงจรรีบคอนเวอร์เตอร์.....	33
3.2.1 แผนผังการทำงานของวงจรรีบคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับโหลด	34
3.3 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter)	35
3.3.1 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ	36
3.3.2 การหาค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance).....	37
3.3.3 ชุดขับมอสเฟต (Drive Mosfet).....	38
3.3.4 ชุดจ่ายไฟ (Regulator).....	38
3.3.5 ชุดตรวจจับกระแส.....	38
3.3.6 ชุดตรวจจับแรงดัน.....	39
3.4 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการดำเนินงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ Vong Aung Ing ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.1 พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้งาน.....	40
3.4.2 การประมวลผลของโปรแกรมควบคุม	40
3.5 กังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	41
3.5.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC GENERATOR).....	41
3.5.2 การออกแบบใบพัดกังหันลม	43
3.6 อุโมงค์ลมและพัดลมดูดอากาศ	43
3.6.1 พัดลมดูดอากาศ	43
3.6.2 การออกแบบอุโมงค์ลม	44
บทที่ 4 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	47
4.1 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	47
4.2 กราฟคุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ.....	48
4.3 การออกแบบการทดลองในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ.....	48
4.3.1 กราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลม 5 m/s.....	49
4.3.2 กราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลม 7 m/s.....	50
4.4 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O).....	50
4.5 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกตภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ	51
4.5.1 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 m/s.....	51
4.5.2 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 7 m/s.....	54
4.6 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกต ภายใต้ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ	56
บทที่ 5 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	58
5.1 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller).....	58
5.2 เทคนิคการปรับจูนตัว PI-Controller ในงานวิจัย.....	59
5.3 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ.....	60
5.3.1 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 m/s.....	60
5.3.2 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 7 m/s.....	61
5.4 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอภายใต้ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ	63

บทที่ 6 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการควบคุมแบบฟัซซี่.....	64
--	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์ เว้นแต่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.1 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy logic control)	65
6.2 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซี ภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ	68
6.2.1 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 m/s	68
6.2.2 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 7 m/s	69
6.3 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีควบคู่กับวิธีการรบกวนและสังเกตภายใต้ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ	71
บทที่ 7 การเปรียบเทียบผลการทำงานของตัวควบคุมกังหันลม	72
7.1 ผลการเปรียบเทียบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบที่ความเร็วลม 5 m/s	72
7.2 ผลการเปรียบเทียบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบที่ความเร็วลม 7 m/s	74
7.3 ผลการเปรียบเทียบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด	77
บทที่ 8 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา	80
8.1 สรุปผลการทดลอง	80
8.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง	80
8.3 แนวทางการพัฒนา	81
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่	84
ประวัติผู้วิจัย	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบแต่ละวิธีการ.....	13
2.2 ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการติดตามแบบ GA ที่ความเร็วลมต่ำ.....	15
2.3 ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการติดตามแบบ GA ที่ความเร็วลมสูง.....	15
2.4 ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าในแต่ละวิธี.....	16
2.5 ค่าเกณฑ์ควบคุมโดยใช้วิธีการวัฏจักรท้ายสุด.....	26
3.1 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังที่ความเร็วตัวขับค่าต่างๆ.....	41
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบพัดลมและความเร็วลม.....	46
5.1 ค่าเกณฑ์ควบคุมโดยใช้วิธีการวัฏจักรท้ายสุดที่ใช้คำนวณ.....	59
6.1 ค่าน้ำหนักของฟังก์ชันสมาชิก.....	66
6.2 กฎการควบคุมแบบฟuzzy.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังองค์ประกอบของกังหันลม.....5
2.2	องค์ประกอบของระบบ Fixed speed generating systems6
2.3	องค์ประกอบของระบบ Variable speed generating systems6
2.4	องค์ประกอบของระบบ Doubly fed induction generator7
2.5	บล็อกไดอะแกรมการติดตามกำลังไฟฟ้า8
2.6	ชุดทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยการจำลอง (Simulation)9
2.7	ชุดทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้ชุดจำลอง (Wind turbine emulator) 10
2.8	ชุดทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าภายในอุโมงค์ลม 10
2.9	บล็อกไดอะแกรมและชุดการทดลอง Wind turbine emulator 11
2.10	ผลการทดลองจากวิธีการต่างๆ ก) Simulation ข) ชุดทดลอง Wind turbine emulator..... 12
2.11	บล็อกไดอะแกรมของระบบ..... 12
2.12	บล็อกไดอะแกรมของฟิซซีลอจิก 12
2.13	บล็อกไดอะแกรมของระบบ..... 13
2.14	บล็อกไดอะแกรมของฟิซซีลอจิก 13
2.15	ผลการทดลองของระบบ..... 14
2.16	บล็อกไดอะแกรมของระบบ..... 14
2.17	บล็อกไดอะแกรมของระบบและโครงสร้างของวิธีการ WRBFN..... 15
2.18	การเปลี่ยนรูปแบบพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า..... 17
2.19	ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบเดี่ยว..... 18
2.20	ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง..... 18
2.21	กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง..... 19
2.22	กังหันลมแกนหมุนแนวนอนแบบ 3-blades 19
2.23	กังหันลมแนวแกนแนวนอนแบบ multi-blades..... 20
2.24	ประสิทธิภาพของกังหันลมแบบต่างๆ..... 22
2.25	วงจรทอนระดับแรงดัน 23
2.26	วงจรมุมลของ MOSFET (a)สถานะ ON (b)สถานะ OFF 23
2.27	ขั้นตอนการทำงานของการควบคุมแบบ PID 25
2.28	การปรับค่าเกนของตัวควบคุมด้วยวิธีการวิฤจักรท้ายสุด 25
2.29	การวัดคาบเวลาการแกว่งในการปรับค่าเกนตัวควบคุมด้วยวิธีการวิฤจักรท้ายสุด..... 26
2.30	ตรรกะแบบจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบฟิซซี (ฟิซซีลอจิก) 27
2.31	ความไม่แน่นอน (uncertainty)..... 27
2.32	การควบคุมโดยตรง..... 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX จึงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.33 การควบคุมแบบไปข้างหน้า	29
2.34 การควบคุมพารามิเตอร์เชิงปรับตัว	29
2.35 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบพีซีซี	30
2.36 ขั้นตอนการประมวลผลแบบพีซีซีลอจิก	30
2.37 ขั้นตอนที่ 1 ของการประมวลผลแบบพีซีซีลอจิก.....	31
2.38 ขั้นตอนที่ 2 ของการประมวลผลแบบพีซีซีลอจิก.....	31
2.39 ขั้นตอนที่ 3 ของการประมวลผลแบบพีซีซีลอจิก.....	31
2.40 ขั้นตอนที่ 4 ของการประมวลผลแบบพีซีซีลอจิก.....	32
3.1 โครงสร้างของวงจรติดตามกำลังไฟฟ้า	33
3.2 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์	34
3.3 วงจรสมมูลของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน (ก) สวิตช์ ON (ข) สวิตช์ OFF	35
3.4 วงจรทอนแรงดัน (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรที่ออกแบบจริง.....	36
3.5 วงจรชุดขับมอเตอร์ (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรจริง.....	38
3.6 วงจรชุดจ่ายไฟ $\pm 15V$	38
3.7 ชุดตรวจจับกระแส (ก) บล็อกไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริง	39
3.8 วงจรตรวจจับแรงดัน (ก) ออกแบบตามทฤษฎี (ข) ออกแบบจริง	39
3.9 บอร์ด Arduino ATMEGA 328P-PU	40
3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ภาระไฟฟ้า 10 W	42
3.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้จริง (ข) ขดลวดภายใน (ค) แกนโรเตอร์.....	43
3.12 กังหันลมแบบหลายใบพัดที่ใช้ในการทดลอง	43
3.13 พัดลมดูดอากาศ	44
3.14 อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดลอง (ก) ภาพด้านข้างอุโมงค์ลม (ข) ภาพด้านหน้าอุโมงค์ลม	44
3.15 การจำลองการไหลของอากาศภายในอุโมงค์ลม (ก) การไหลของอากาศภายในอุโมงค์ (ข) ความเร็วลมในแนวแกน x (ค) ความเร็วลมที่กระจายในช่วงทดสอบ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16	แผนภาพคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วลมต่างๆในแนวระนาบของส่วนทดสอบ 46
4.1	วงจรไฟฟ้าสำหรับใช้ทำการทดลอง..... 47
4.2	รูปแบบการเชื่อมต่อวงจรการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด 48
4.3	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่างๆ 48
4.4	คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 m/s..... 49
4.5	กำลังไฟฟ้า แรงดันและกระแสที่ได้จากการเปลี่ยนความต้านทาน ที่ความเร็วลม 5 m/s (ไม่ต้องวงจรMPPT)..... 49
4.6	คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 7 m/s 50
4.7	กำลังไฟฟ้า แรงดันและกระแสที่ได้จากการเปลี่ยนความต้านทาน ที่ความเร็วลม 7 m/s (ไม่ต้องวงจร MPPT) 50
4.8	แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของเทคนิคการรบกวนและสังเกต (P&O)..... 51
4.9	ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 52
4.10	กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที..... 52
4.11	ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที 53
4.12	กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที..... 53
4.13	ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที 54
4.14	กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที 56
4.15	ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที 55
4.16	กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที 55
4.17	ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกต โดยใช้อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล 0.05 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **XI** อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกตโดยใช้อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล 0.1	57
5.1 แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller).....	58
5.2 ตัวควบคุมแบบ PI	58
5.3 การวัดคาบเวลาการแกว่งในการปรับค่าเกนตัวคุมด้วยวิธีการวิจักรท้ายสุด.....	59
5.4 คาบเวลาการแกว่งในการปรับค่าเกนในงานวิจัย	60
5.5 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที.....	60
5.6 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที.....	61
5.7 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที	62
5.8 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	62
5.9 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีไอ	63
6.1 โครงสร้างของการควบคุมแบบฟuzzy	65
6.2 แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของเทคนิคการควบคุมแบบฟuzzy	65
6.3 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต (ΔP) และ (ΔD)	66
6.4 เอาท์พุต (ΔD) ในระบบสามมิติโดยใช้เทคนิค Sugeno ของระบบที่นำเสนอ	68
6.5 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที.....	68
6.6 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที.....	69
6.7 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	70
6.8 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	70
6.9 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบฟuzzy ลอจิก	71
7.1 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที	72
7.2 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที	72
7.3 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XII อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที.....	73
7.4 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีซีซี บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที.....	73
7.5 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุม ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที	74
7.6 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ กำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุมที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที.....	74
7.7 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิฟฟิซิเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที	75
7.8 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิฟฟิซิเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	75
7.9 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	75
7.10 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีซีซี บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	76
7.11 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุม ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	76
7.12 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ กำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุมที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที.....	77
7.13 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกต โดยใช้อัตราการเปลี่ยนดิฟฟิซิเคิล 0.05	78
7.14 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกต โดยใช้อัตราการเปลี่ยนดิฟฟิซิเคิล 0.1	78
7.15 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีไอ	79
7.16 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีซีซีลอจิก	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากวิกฤตการณ์การขาดแคลนเชื้อเพลิงและความต้องการการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นในทุกๆปี พลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อตอบสนองความต้องการของพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น ทำให้ปัจจุบันมีการตื่นตัวในการนำพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานทดแทนมาใช้มากขึ้นอย่างเช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานจากไฮโดรเจน และพลังงานชีวมวล เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันคงปฏิเสธไม่ได้ว่าพลังงานลมนั้นได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มที่สูงมากขึ้น เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ใช้ได้ไม่มีวันหมด ไม่สิ้นเปลืองและไม่มีพิษต่อสิ่งแวดล้อม

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลความเร็วลมในประเทศไทย[1] พบว่า “ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานลมที่ประเมินได้ปริมาณ 1,600 เมกะวัตต์ ปัจจุบันได้มีการพัฒนามาใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตไฟฟ้าประมาณ 1,043 กิโลวัตต์” ซึ่งจากข้อมูลนี้ทำให้เห็นว่าพลังงานลมในประเทศไทย มีการใช้งานที่ใกล้เคียงกับศักยภาพของพลังงานลม และมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นจากข้อมูลแผนอนุรักษ์พลังงานของกระทรวงพลังงานในอีก 20 ปีข้างหน้า ซึ่งพลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนหลักที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ทำให้ในปัจจุบันพลังงานลมมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นและมีผู้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำพลังงานลมมาใช้อย่างมาก โดยนักวิชาการและผู้ที่มีความสนใจในพลังงานทดแทนได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นอุปกรณ์ในอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการแปลงผันพลังงานจึงมีความสำคัญมากในการเพิ่มประสิทธิภาพ แต่ปัญหาหลักในการพัฒนาอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ เมื่อมีการปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นนั้น ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและออกแบบกังหันลมก็มีราคาสูงขึ้นด้วย โดยพลังงานลมได้มีการพัฒนาและมีการประยุกต์ใช้ในหลายๆรูปแบบ เช่น การออกแบบจากตัวใบพัด เพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น มีแรงบิดที่สูงหรือต่ำตามแต่ละพื้นที่ที่ติดตั้ง การใช้ตัวควบคุมมุมใบพัดให้บิดตามทิศทางลม เพื่อเพิ่มแรงบิดของกังหันสำหรับจ่ายโหลด หรือการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการแปลงผันพลังงาน เป็นต้น ในงานวิจัยจะกล่าวเพียงการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นตัวควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า สำหรับการออกแบบชุดควบคุมโดยทั่วไปจะมีราคาในกระบวนการผลิตและการติดตั้งที่สูงมาก ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้วงจรเพื่อทำให้เป็นระบบที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำและง่ายต่อการติดตั้ง ซึ่งจากผลงานวิจัยในอดีตได้มีการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังไฟฟ้าในการติดตามกำลังไฟฟ้า โดยปรับค่าตัวตั้งไซเคิลเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีบวกลบและสังเกต [2] ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานและนิยมใช้มากที่สุด แต่มีข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวตั้งไซเคิล จึงมีการนำวิธีการอื่นมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตัวอย่างเช่น บทความการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้พีชชีลอจิกบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิด

แม่เหล็กถาวรในระบบพลังงานลมของคุณ Hong-Hee Lee และคณะ [3] เป็นการควบคุมโดยใช้ฟuzzy ลอจิก โดยใช้อินพุตของระบบเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งเปรียบเทียบผล ระหว่างการจำลองและการทดลองผ่านเครื่อง Wind Turbine Emulator ผลปรากฏว่าสามารถหา กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกังหันลมได้ และได้ผลที่ดีทั้งในด้านไดนามิกส์และประสิทธิภาพที่สภาวะคงตัว คุณ George Joseph และคณะ [4] ได้ศึกษาติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต โดยเพิ่มตัวแปรสำหรับกำหนดเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนดิฟเฟอเรนเชียล เพื่อลดปัญหาการที่เกิดขึ้นของการ ติดตามกำลังไฟฟ้าแบบรบกวนและสังเกต และให้กำลังไฟฟ้าใกล้เคียงจุดกำลังสูงสุดมากขึ้น คุณ Huynh Quang Minh และคณะ [5] ได้ศึกษาการควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเดี่ยวในเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวร โดยใช้ฟuzzyลอจิกร่วมกับการรบกวนและสังเกต จำลองผ่าน โปรแกรม Matlab Simulink ผลปรากฏว่าการทำงานของวิธีการฟuzzyให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการ ควบคุมแบบพีไอ และสามารถให้ผลที่ดีกับระบบแบบเดี่ยว จากการนำเสนองานวิจัยและบทความที่ ผ่านมานั้น การติดตามกำลังไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมมากและใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น คือการติดตาม แบบรบกวนและสังเกต ที่มีข้อดีคือใช้เพียงค่ากำลังไฟฟ้าในการวิเคราะห์การทำงาน ซึ่งง่ายต่อการ ออกแบบและใช้ต้นทุนต่ำ และวิธีการที่น่าสนใจมากที่สุด คือการใช้ฟuzzyลอจิกมาประยุกต์ใช้ในการ ติดตามกำลังไฟฟ้าร่วมกับการรบกวนและสังเกต ซึ่งงานวิจัยและบทความที่ผ่านนั้นมีเพียงการจำลอง การติดตามกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม Matlab Simulink เป็นส่วนใหญ่ การออกแบบการติดตาม กำลังไฟฟ้าจากการทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้จริง มีข้อมูลสำหรับการศึกษาค้นคว้าเพียง เล็กน้อย ซึ่งผลการตอบสนองการติดตามกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าอาจมีผลตอบสนองที่ แตกต่างกัน ทำให้แนวคิดการติดตามกำลังไฟฟ้าบนเครื่องกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีความน่าสนใจอย่างยิ่ง

โครงการนี้จึงนำเสนอการพัฒนาตัวติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการติดตามแบบฟuzzy ซึ่รวมกับการรบกวนและสังเกต โดยเปรียบเทียบการทำงานกับตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้ความชันของ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และการทำงานด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต เพื่อให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดในทุกช่วงความเร็วลมที่ทดสอบ โดยใช้ชุด ควบคุมสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรล ATmega328P บนบอร์ดควบคุม ArduinoUNO ซึ่ง สามารถแก้ไขปัญหาด้านการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการติดตามของเทคนิคการ ติดตามแบบรบกวนและสังเกตแบบธรรมดา โดยผลการทดลองจะได้นำเสนอในบทถัดไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

จุดมุ่งหมายในการทำวิจัยนี้เพื่อออกแบบและสร้างวงจรควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าสำหรับการ ติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดึงกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วลมและหา กราฟคุณลักษณะเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อศึกษาด้านการประยุกต์ใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.2.4 เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ MPPT (Maximum Power Point Tracking) โดยใช้ในการควบคุมแบบฟัซซีบนพื้นฐานการรบกวนและสังเกต (Fuzzy based Perturbation and Observation) มาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมมาใช้งานได้มากที่สุด

1.2.5 เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษา ออกแบบ รวมทั้งสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์และชุดควบคุม การทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าในกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด 28 วัตต์ โดยขอบเขตของโครงการนี้คือ สร้างและออกแบบให้วงจรคอนเวอร์เตอร์ สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อเชื่อมต่อกับโหลดคงที่ได้ โดยทดสอบกับกังหันลมจริงภายในอุโมงค์ลมจำลองขนาดเล็ก และนำระบบ MPPT แบบฟัซซีร่วมกับการรบกวนและสังเกต เข้ามาควบคุมเพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดในด้านการแกว่งและความเร็วในการติดตามของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบทั่วไป รวมทั้งศึกษาผลที่ได้จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ ปรับปรุง และพัฒนาตัวควบคุมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในขั้นต่อไป

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมด และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดตามกำลังไฟฟ้าจากกังหันลม

1.4.2 จัดหาและเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือชนิดต่างๆ

1.4.3 ออกแบบและสร้างวงจรที่ใช้ในการทดลอง

1.4.4 ปรับปรุงและแก้ไขการทำงานของตัวควบคุมให้ได้ผลตามที่ต้องการ

1.4.5 ทดสอบและเก็บผลวิธีการที่นำเสนอและวิธีการต่างๆที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

1.4.6 สรุปผลของงานวิจัย เพื่อจัดทำวิทยานิพนธ์ต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1.5.1 ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการติดตามกำลังไฟฟ้าในกังหันลมเพิ่มมากขึ้น

1.5.2 การควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถใช้ในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดึงกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้

1.5.3 ชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันนี้มีราคาสูงมาก การใช้ตัวควบคุมในงานวิจัยเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.4 เกิดการบูรณาการระหว่างวิทยาการทางด้านต่างๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบควบคุมเข้าด้วยกัน ทำให้ผู้ศึกษาค้นคว้าในงานวิจัยมีความรู้รอบด้าน

1.5.5 ผลการทดลองสามารถนำไปพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานจริงได้

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา วิเคราะห์และนำเสนอการพัฒนาตัวติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการติดตามแบบพีชชีร์ร่วมกับการรบกวนและสังเกต ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 8 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ รวมถึงวิธีการดำเนินงาน และแผนการดำเนินโครงการ ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมที่มีในปัจจุบัน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า และหลักการต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและจัดสร้างชิ้นงานจริง การออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ และชุดควบคุม

บทที่ 4 กล่าวถึงการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตแบบทั่วไป และผลการทดลองเมื่อทดสอบที่ความเร็วลมต่างๆ

บทที่ 5 กล่าวถึงการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ และผลการทดลองเมื่อทดสอบที่ความเร็วลมต่างๆ

บทที่ 6 กล่าวถึงการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีชชีร์ลอจิกร่วมกับการรบกวนและสังเกต และผลการทดลองเมื่อทดสอบที่ความเร็วลมต่างๆ

บทที่ 7 กล่าวถึงการเปรียบเทียบการทำงานของวิธีการต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 8 กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและจากการดำเนินการจัดทำโครงการสรุปผลการทดลองที่ได้ ตลอดจนข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้

ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

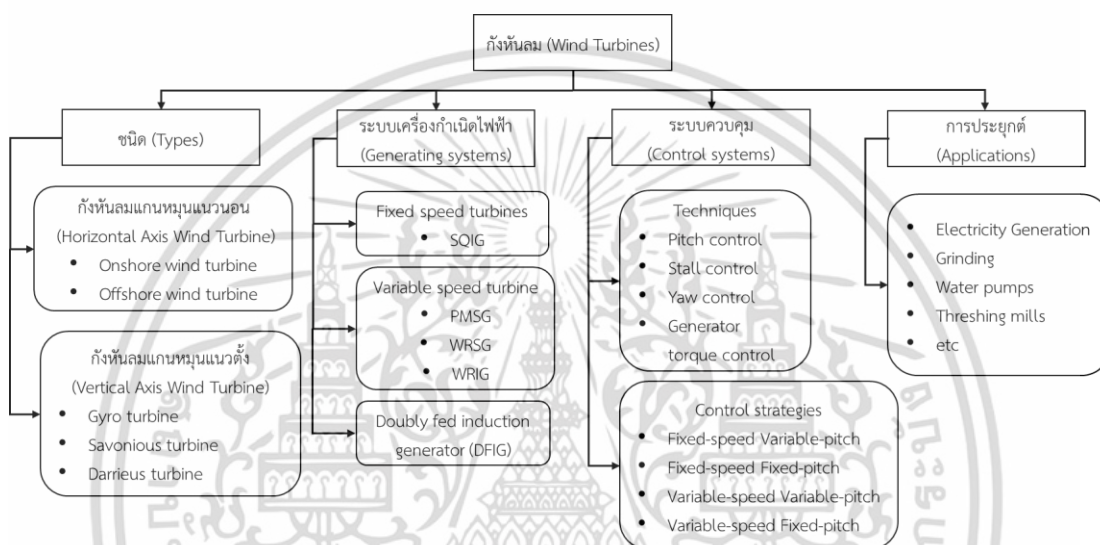
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทบทวนวรรณกรรมกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทบทวนบทความงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับกังหันผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งจะอธิบาย โดยแผนผังแสดงองค์ประกอบของกังหันลม [6] เพื่อจำแนกตามส่วนต่างๆ ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

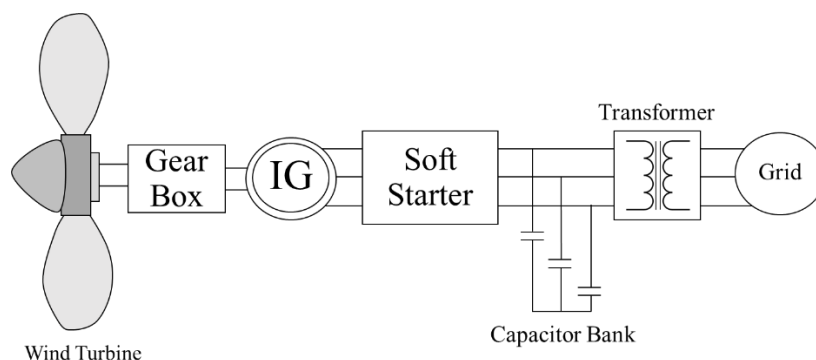


รูปที่ 2.1 แผนผังองค์ประกอบของกังหันลม

จากแผนผังองค์ประกอบของกังหันลมในส่วน of ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating systems) จะพบว่าเมื่อกังหันลมถูกประกอบเป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้า ระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิยมใช้มี 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่

2.1.1 Fixed speed generating systems

ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด กล่องเกียร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (squirrel cage induction generator) ชุดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในความเป็นจริงแล้วกังหันลมแบบนี้มีค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator slip) ไม่คงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมาก เพียง 1 – 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเรียกระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้ว่าเป็นแบบความเร็วคงที่



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของระบบ Fixed speed generating systems

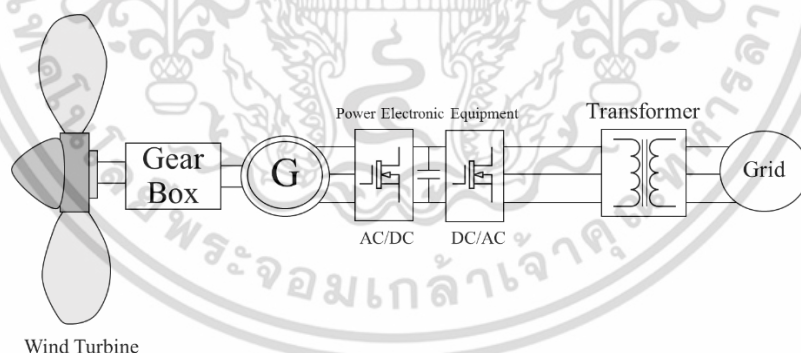
ลักษณะโดยทั่วไป คือ ระบบกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีการควบคุมความเร็วของกังหันลม ซึ่งจะนิยมใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (SQIG)

ข้อดีของวิธีการนี้คือ ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ และการบำรุงรักษาน้อย

ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ไม่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) มีความสามารถในการสกัดพลังงานที่เหมาะสมได้น้อย มีค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ต่ำ และต้องการการบำรุงรักษาส่วนกังหันสูง

2.1.2 Variable speed generating systems

กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรงและมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับแปลงผันกำลังไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของระบบ Variable speed generating systems

ลักษณะโดยทั่วไป คือ ระบบกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีการควบคุมความเร็วของกังหันลม ซึ่งจะนิยมใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG), เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดขดพันขดลวด (WRSG) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำชนิดขดพันขดลวด (WRIG)

ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) และมีประสิทธิภาพสูง

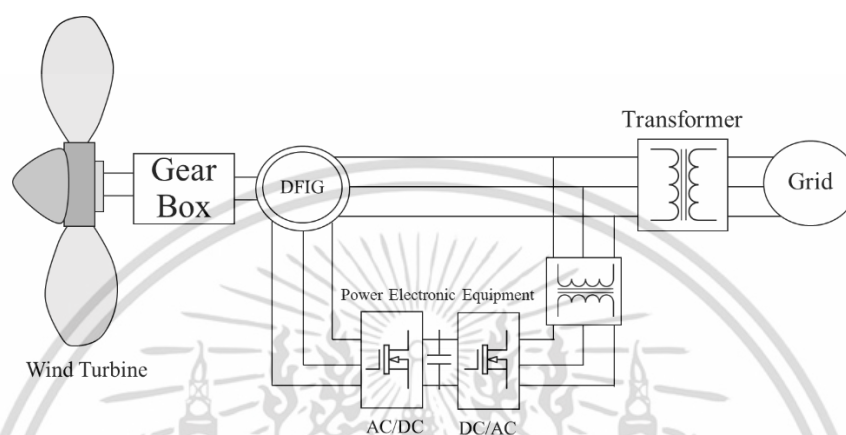
ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ค่าใช้จ่ายในส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีค่าสูง และมีข้อจำกัด

ในการข้ามผ่านความผิดปกติ (Limited fault ride through capability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 Doubly fed induction generator

กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด กล้องเกียร์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟด (Doubly fed induction generator) ชุดอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ชุดสเตเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า กังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยชุดอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของระบบ Doubly fed induction generator

ลักษณะโดยทั่วไป คือ ระบบกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดชนิดเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง (DFIG)

ข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ในลักษณะแยกอิสระกันได้ (ทำให้คุณภาพของระบบไฟฟ้าดีขึ้น) และสามารถเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าเข้ากริดระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

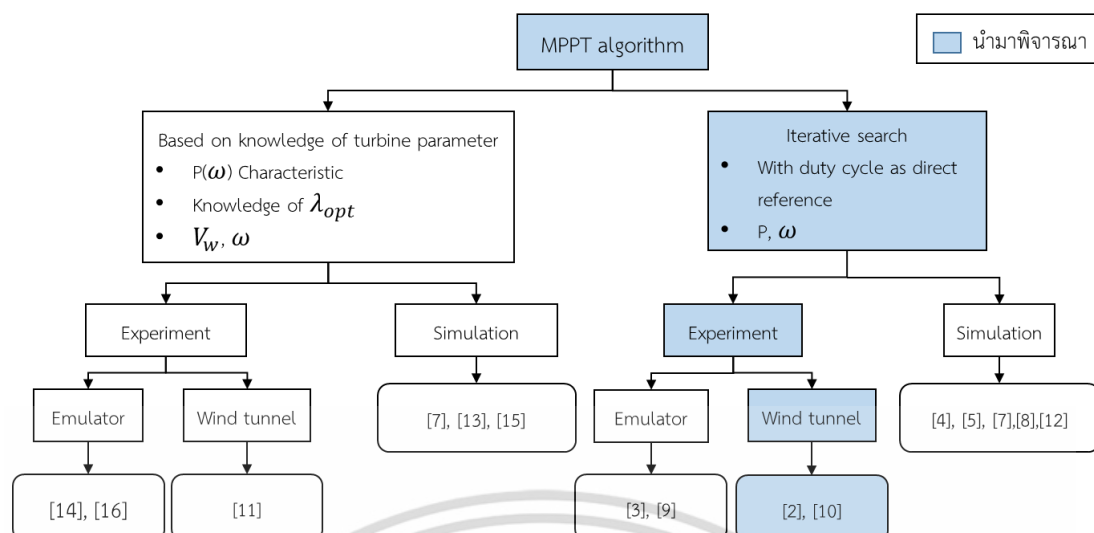
ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ค่าใช้จ่ายในส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีค่าสูง และปัญหาในเรื่องของการบำรุงรักษาทางกลของชุดวงแหวนในส่วนของวงจรรีเตอร์

จากส่วนของระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าข้างต้น ในการติดตามกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยการควบคุมกังหันลมผ่านวงจรรีเตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะถูกใช้ในระบบของเครื่องกำเนิดเพียง 2 ชนิด คือ Variable speed generating systems และ Doubly fed induction generator ซึ่งในส่วนของ Fixed speed generating systems จะมีการควบคุมมุมใบพัด (pitch angle control) หรือการควบคุมกังหันด้วยวิธีทางกลอื่นๆ ซึ่งจะไม่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้

2.2 ทบทวนวรรณกรรมการติดตามกำลังไฟฟ้า

2.2.1 วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าจากการ literature review

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

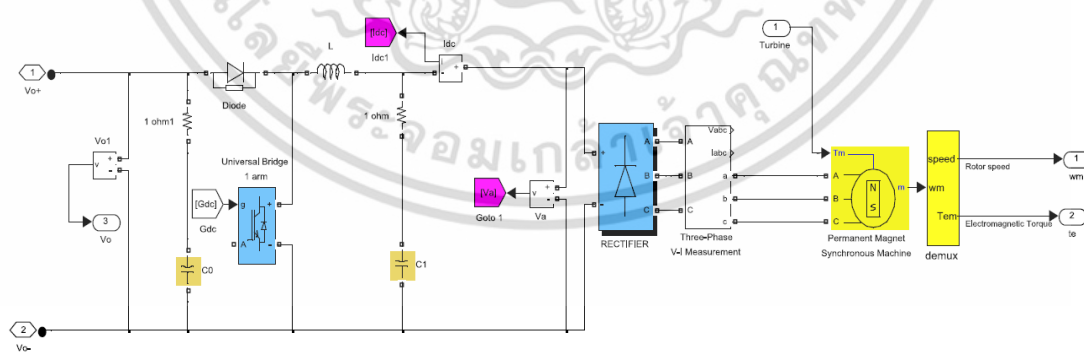


รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมการติดตามกำลังไฟฟ้า [7]

จากรูปที่ 2.5 จะแสดงการจำแนกวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกังหันลมผลิตไฟฟ้าออกเป็น 2 ประเภท คือ การติดตามกำลังไฟฟ้าจากการทราบค่าคุณลักษณะของกังหันลม และการติดตามกำลังไฟฟ้าจากวิธีค้นหาตามลำดับ (iterative search) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการรบกวนและสังเกต เพื่อลดปัญหาการทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เช่นเดียวกับวิธีการที่นำมาพิจารณาในรูปด้านบน

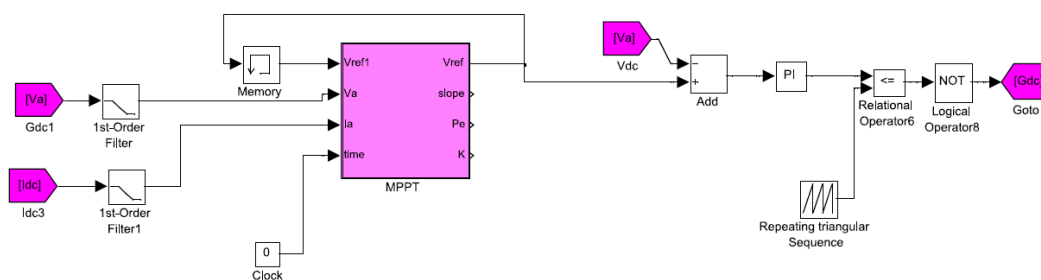
2.2.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยการจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink

งานวิจัยที่พบส่วนมากถูกออกแบบและทดลองผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink [8] ซึ่งจะช่วยให้ความสะดวกในการวิจัยเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่นรูปที่ 2.6 การจำลองวงจรการติดตามกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิด PMSG ต่อกับกังหันระดับแรงดันไฟฟ้า



ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)

รูปที่ 2.6 ชุดทดสอบกักเก็บผลผลิตไฟฟ้าโดยการจำลอง (Simulation) [8]

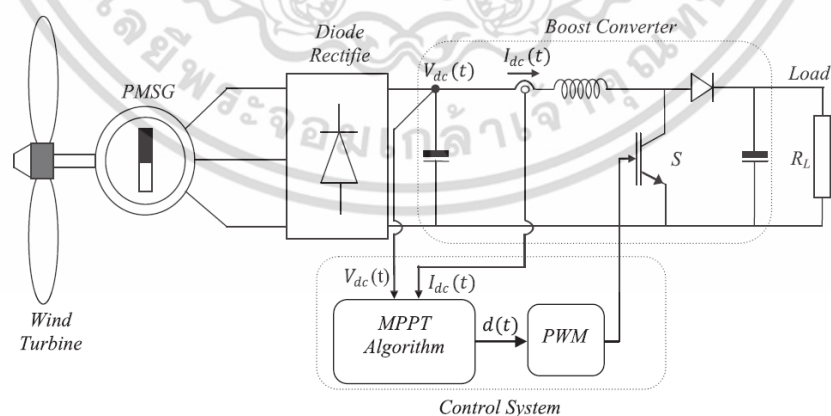
(ก) รูปแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรทระดับแรงดัน

(ข) รูปแบบจำลองวงจรติดตามกำลังไฟฟ้า

จากงานวิจัยที่ใช้การจำลองการติดตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้การจำลองผ่านทางโปรแกรม MATLAB Simulink ข้างต้น รูปที่ 2.6 (ก) แสดงรูปแบบการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ชนิดแม่เหล็กถาวรต่อกับวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เพื่อเป็นอินพุต (Input) ของตัวควบคุมสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.6 (ข) โดยเอาต์พุต (Output) ของตัวควบคุมจะเป็นแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ตัวควบคุมพีไอสำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณ รูปคลื่นสามเหลี่ยมในการกำหนดดิวิตีเซเคิลของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้านั้นเอง

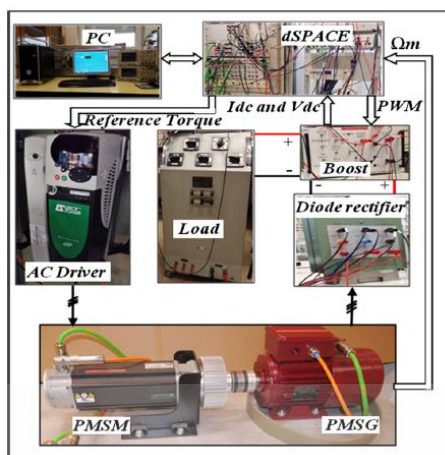
2.2.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยการทดสอบจริง (Experiment)

จากการศึกษางานวิจัยที่เคยมีมา พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้การทดสอบจริงๆ มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ การทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้ชุดจำลองกังหันลม (Wind emulator) และการทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าภายในอุโมงค์ลม (Wind tunnel) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



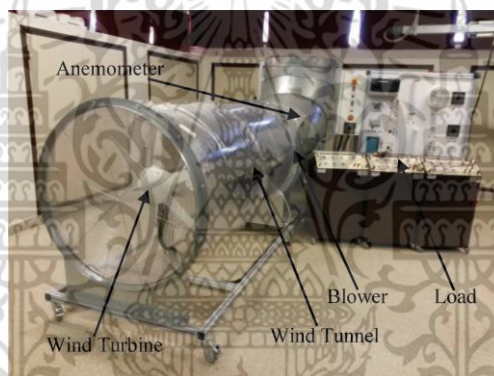
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.7 ชุดทดสอบกักกันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้ชุดจำลอง (Wind turbine emulator) [9]
(ก) บล็อกไดอะแกรมของวงจรติดตามกำลังไฟฟ้า (ข) อุปกรณ์ที่ใช้งานจริงในงานวิจัย



รูปที่ 2.8 ชุดทดสอบกักกันลมผลิตไฟฟ้าภายในอุโมงค์ลม [10]

จากงานวิจัยในรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) แสดงการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์จำลอง คุณลักษณะของกักกันลมที่มีชื่อว่า Wind turbine emulator บนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) และต่อร่วมโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG) ควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้วงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีความแตกต่างกับการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อร่วมกับกักกันลมโดยตรง ดังเช่นในงานวิจัยในรูปที่ 2.8 แสดงชุดทดสอบกักกันลมผลิตไฟฟ้าภายในอุโมงค์ลม สภาวะทางด้านไดนามิกส์ของกักกันลมจะมีผลตอบสนองที่แตกต่างกับการใช้ชุดจำลองกักกันลม (Wind turbine emulator) ยกตัวอย่างเช่นในกรณีการปรับเปลี่ยนตัวตัดไฮเคิลของวงจรทระดับแรงดัน กักกันลมทดสอบจะมีผลตอบสนองที่ช้ากว่าตามลักษณะของลมจริงๆ อย่างแท้จริง

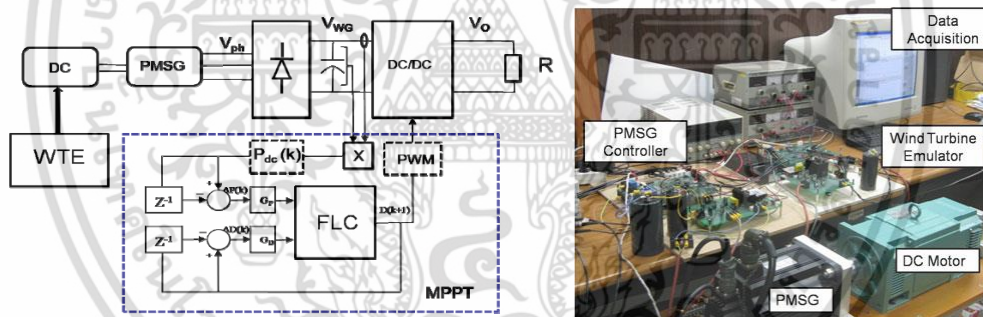
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้วิธีการฟuzzyลอจิกที่นำมาพิจารณา

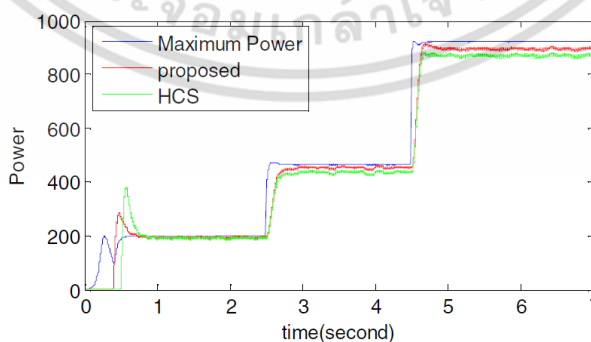
ในหัวข้อวิจัยจะเป็นการใช้วิธีการของฟuzzyลอจิกในการติดตามกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของการรบกวนและสังเกต (P&O) ซึ่งทดสอบภายในโมเดลขนาดเล็ก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิจัยนี้จะถูกนำเสนอในแต่ละข้อดังนี้

2.3.1 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟuzzyลอจิกโดยใช้ค่าอินพุตระบบฟuzzyเป็นกำลังไฟฟ้าและดิฟฟิเอนเชียล

จากการศึกษาของ Quoc-Nam Trinh และ Hong-Hee Lee ในปี 2010 [3] ได้นำเสนอวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการฟuzzyลอจิกที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร โดยแสดงผลการทดสอบจากการจำลอง (Simulation) และการทดสอบในชุดทดลอง Wind turbine emulator แสดงในรูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์จำลองคุณลักษณะของกังหันลมบนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและต่อรวมโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG) ควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้วงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการฟuzzyลอจิกที่มีอินพุตสองค่า คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟฟิเอนเชียล สำหรับเปรียบเทียบและวิเคราะห์เพื่อปรับเปลี่ยนค่าดิฟฟิเอนเชียลของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า

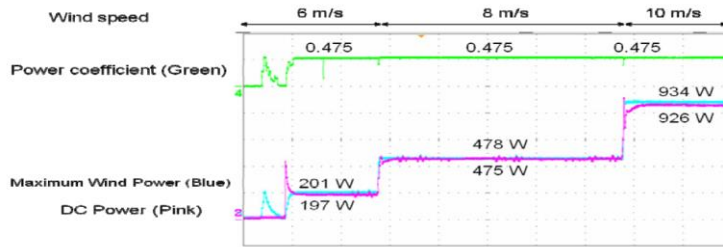


รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมและชุดการทดลอง Wind turbine emulator [3]



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

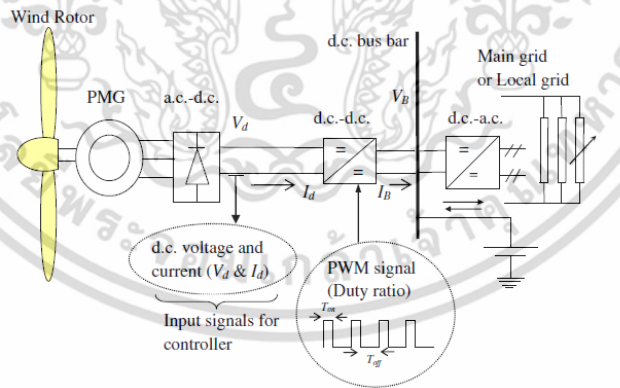
รูปที่ 2.10 ผลการทดลองจากวิธีการต่างๆ [3]

(ก) Simulation (ข) ชุดทดลอง Wind turbine emulator

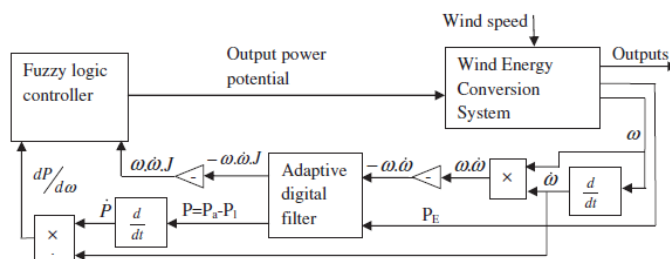
จากผลการทดลองในรูปที่ 2.10 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าในวิธีการแบบฟuzzyลอจิกที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการแบบรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม ทั้งผลการจำลองและการทดสอบด้วยชุดทดลอง ซึ่งให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากที่สุด

2.3.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟuzzyลอจิกโดยใช้ค่าอินพุตระบบฟuzzyเป็นกำลังไฟฟ้าและความเร็วของกังหันลม

จากการศึกษาของ M. Narayana, G.A. Putrus, M. Jovanovic, P.S. Leung และ S. McDonald ในปี 2011 [11] ได้นำเสนอวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการฟuzzyลอจิกรวมกับการใช้ Adaptive filter สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้เซ็นเซอร์วัดความลม ซึ่งแสดงบล็อกไดอะแกรมระบบในรูปที่ 2.11 และบล็อกไดอะแกรมในการควบคุมในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบ [11]



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของฟuzzyลอจิก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในพิธีการเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

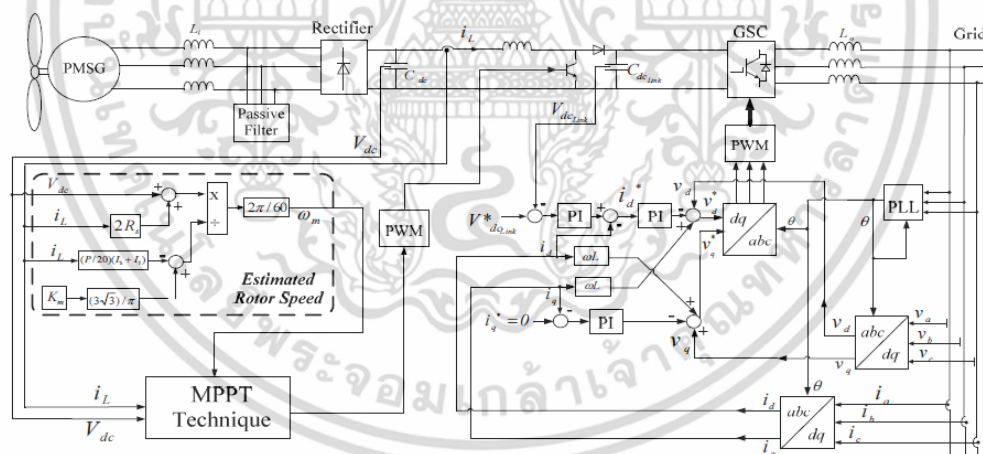
ผลการวิจัยพบว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ดีกว่าวิธีการที่ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วลม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แสดงผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบแต่ละวิธีการ โดยทดสอบเป็นเวลา 2500 วินาที ค่ากำลังไฟฟ้าจากวิธีการที่นำเสนอได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอย่างมาก เพิ่มขึ้นจากวิธีการที่ใช้เซ็นเซอร์ความเร็วลมคิดเป็นร้อยละ 12.7

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบแต่ละวิธีการ [11]

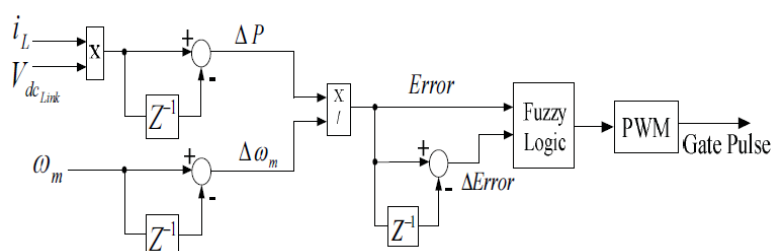
Optimal control strategies	Generated energy within 2500 s (J)	As percentage of available energy (%)
Wind sensor method	121478	53.8
Proposed generic optimal controller	150005	66.5

2.3.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟuzzyลอจิกต่อร่วมกับระบบกริด

จากการศึกษาของ A.M. El-Sebaai, M.S. Hamad และ A.A. Helal ในปี 2013 [12] ได้เสนอวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการฟuzzyลอจิกต่อร่วมกับระบบกริด ดังบล็อกไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 2.13 การติดตามกำลังไฟฟ้าจะมีการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์จากค่ากระแสและแรงดันเพื่อใช้เป็นอินพุตของระบบฟuzzyลอจิก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของระบบฟuzzyลอจิก



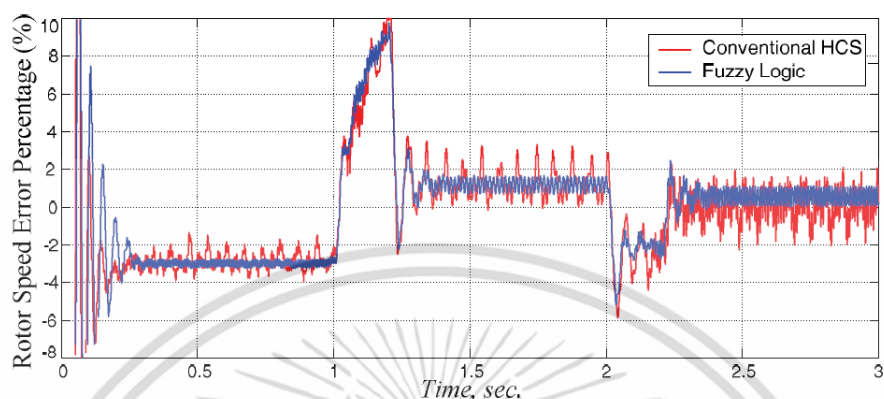
รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบ [12]



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของฟuzzyลอจิก [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิจัยจะแสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์ของแต่ละวิธี ซึ่งใช้วิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละวิธีการสามารถให้กำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงจุดสูงสุดได้ แต่วิธีการฟัซซีลอจิกจะช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดได้ดีกว่าวิธีการรบกวนและสังเกตแบบทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.15



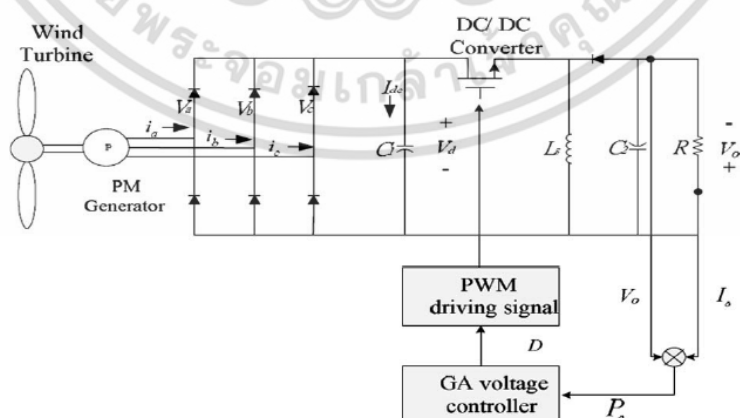
รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ของแต่ละวิธี [12]

2.4 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการอื่นๆ

ในปัจจุบันการติดตามกำลังไฟฟ้าในกังหันลมมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น ทำให้วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้ามืดความหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น

2.4.1 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการ GA

จากการศึกษาของ Ying-Yi Hong, Shiue-Der Lu และ Ching-Sheng Chiou ในปี 2008 [13] ได้เสนอการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Gradient approximation โดยใช้เพียงเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า เปรียบเทียบกับวิธีการ Gradient approximation ที่มีการใช้แบบ Full-sensor เพื่อลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 บล็อกไดแกรมของระบบ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิจัยพบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจากวิธีการที่นำเสนอสามารถให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับวิธีการที่ใช้แบบ Full-sensor ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 โดยค่ากำลังไฟฟ้าถูกพิจารณาในกรณีที่ความเร็วลมต่ำและความเร็วลมสูงตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการติดตามแบบ GA ที่ความเร็วลมต่ำ [13]

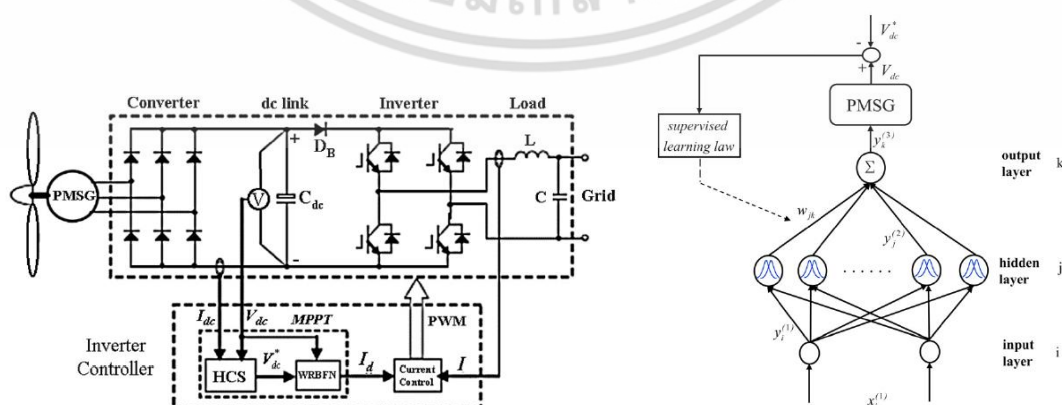
	Average W	Increasing power percentage (%)
No control	6.60	-
Rule base with GA	9.20	39.4
Adaptive duty cycle with GA	9.60	45.5
Full-sensor control with GA	9.63	45.9

ตารางที่ 2.3 ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการติดตามแบบ GA ที่ความเร็วลมสูง [13]

	Average W	Increasing power percentage (%)
No control	85.2	-
Rule base with GA	172.8	102.8
Adaptive duty cycle with GA	182.7	114.4
Full-sensor control with GA	185.5	117.7

2.4.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการ Wilcoxon radial basis function network (WRBFN)

จากการศึกษาของ Whei-Min Lin และ Chih-Ming Hong ในปี 2010 [14] ได้เสนอการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Wilcoxon radial basis function network (WRBFN) ประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอริทึมแบบ Particle swarm optimization (PSO) โดยใช้เซ็นเซอร์แรงดันและกระแสไฟฟ้าสำหรับอินพุตของตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์ ทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด PMSG ดังแสดงในรูปที่ 2.17 บล็อกไดแกรมของระบบและโครงสร้างของวิธีการ WRBFN ซึ่งมีข้อดีคือการใช้เซ็นเซอร์ทางกลอื่นๆ



รูปที่ 2.17 บล็อกไดแกรมของระบบและโครงสร้างของวิธีการ WRBFN [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิจัยพบว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถให้กำลังไฟฟ้าได้ค่าสูงกว่าวิธีการแบบฟuzzyลอจิก และการควบคุมด้วยพีไอ ดังแสดงค่าในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าในแต่ละวิธี [14]

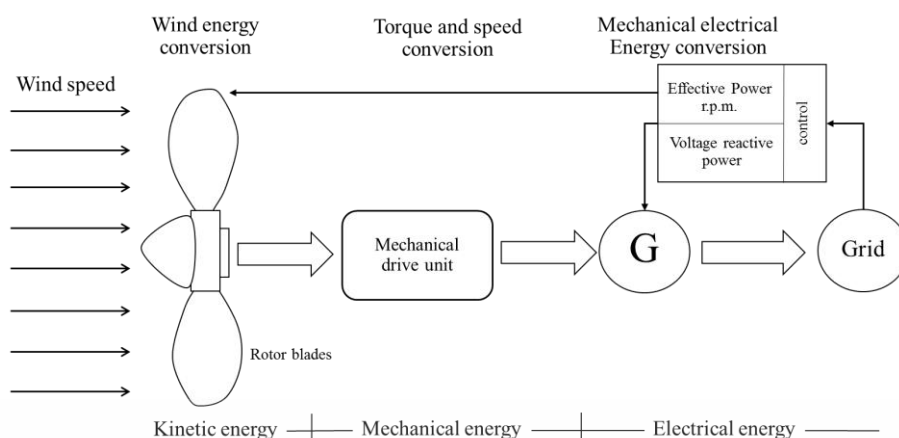
Controller type	Control characteristic				
	Average power (P_{av}) (W)	Increasing power percentage (%)	Max. error of power coefficient (C_p) (%)	Max. error of dc-link power (%)	Max. error of dclink voltage (%)
WRBFN with MPSO algorithm method	224	9.27	1.79	0.32	0.074
Fuzzy-based algorithm method	216	5.36	9.95	1.4	0.9
PI method	205	–	18.4	2.58	2.25

2.5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้า

จากการทบทวนงานวิจัยต่างๆ พบว่าการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการฟuzzyลอจิกมีการวิจัยที่หลากหลาย เพราะวิธีการควบคุมแบบฟuzzy สามารถใช้กับการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี และออกแบบง่ายสำหรับระบบที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก แต่งานวิจัยที่เคยนำเสนอจากการควบคุมกักกันลมด้วยวิธีการฟuzzyลอจิก โดยทดสอบกับกักกันลมภายใต้สภาวะไดนามิกส์ของความเร็วลมจริง นั้นมีน้อยมาก การศึกษาในงานวิจัยอื่นๆ ถูกแสดงและออกแบบผ่านโปรแกรมจำลองเป็นส่วนใหญ่ ระบบกักกันลมภายใต้สภาวะลมจริงนั้นมีเพียงส่วนน้อยที่ถูกออกแบบให้มีการติดตามกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจและต้องการศึกษางานในเรื่องนี้มากขึ้น และยังช่วยตอบโจทย์การทำงานของระบบฟuzzyลอจิกเมื่อนำมาใช้กับกักกันลมผลิตไฟฟ้าที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวันได้อีกด้วย

2.6 กักกันลมกับการผลิตไฟฟ้า

พลังงานลม เป็นพลังงานสะอาด ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย และมีอยู่อย่างไม่จำกัด ไม่ว่าจะเป็นด้านเกษตรกรรมหรือด้านพลังงาน พลังงานลมนั้นได้รับความนิยมเป็นอันดับต้นๆของพลังงานทางเลือกที่ใช้ทดแทนพลังงานหลักที่มีราคาสูงในปัจจุบัน ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงการนำพลังงานลมมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยกักกันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งกักกันลมจะเป็นตัวดึงพลังงานจลน์ที่รับมาจากพลังงานลมมาใช้ในการผลิตพลังงานกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลด ซึ่งสามารถเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าได้ในรูปของแบตเตอรี่เพื่อใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ใช้เปิดไฟในตอนกลางคืนสำหรับบ้านพักอาศัยที่ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึง เป็นต้น จะเห็นได้ว่าปัจจุบันนี้คนส่วนใหญ่หันมาให้ความสนใจพลังงานทางด้านนี้มากขึ้น แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องของต้นทุนของกักกันลมผลิตไฟฟ้ามีราคาสูง มีน้ำหนักมาก ต้องการพื้นที่และการบำรุงรักษา ทำให้นักวิจัยต่างๆ มีความต้องการที่จะพัฒนาเกี่ยวกับกักกันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านการผลิตพลังงานไปใช้ให้ได้มากที่สุด หรือด้านของวัสดุที่ใช้ทำให้มีต้นทุนและขนาดที่ต่ำลง เป็นต้น



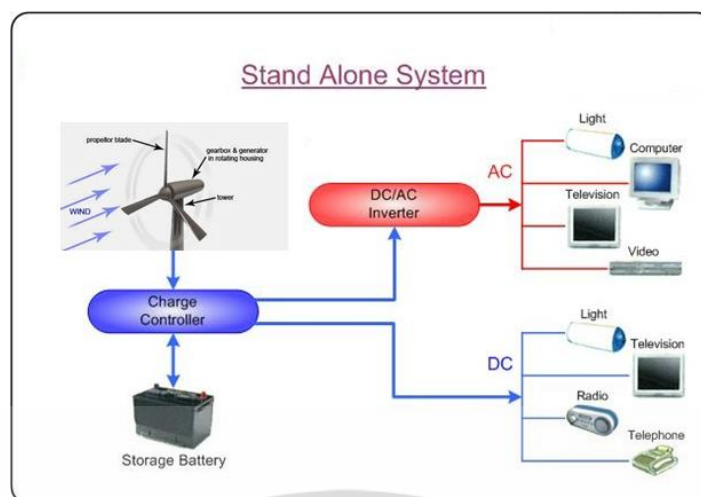
รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนรูปแบบพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

หลักการการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหันพลังงานจลน์ที่เกิดจากลม จะทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุนและได้เป็นพลังงานกลออกมา พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนแปลงรูปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม จ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านระบบควบคุมไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบต่อไป ดังแผนผังในรูปที่ 2.18 โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นกับความเร็วของลม ความยาวของใบพัดและสถานที่ติดตั้งกังหันลม

2.6.1 กังหันลมและการประยุกต์ใช้งาน

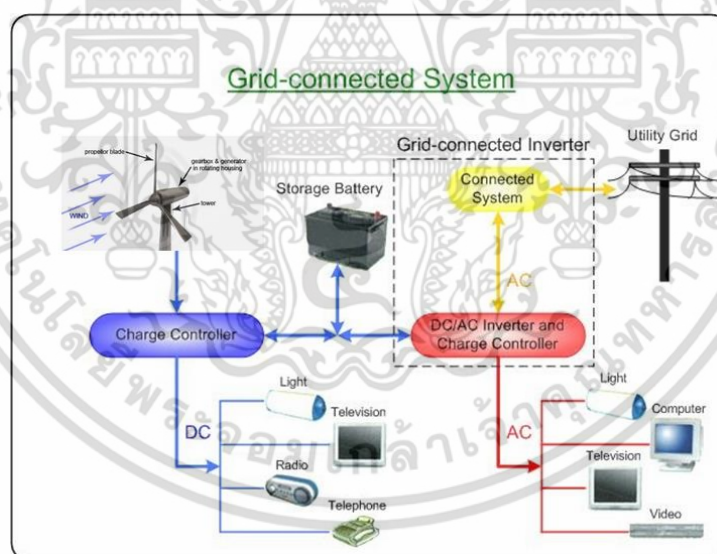
ในปัจจุบันนี้ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า [1] มีการประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ประเภท โดยแบ่งตามระบบการติดตั้งได้ 2 ประเภทดังนี้ ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว (Stand Alone System) และระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System)

ในปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบอิสระ มีการนำมาประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้น สามารถพบเห็นได้ตามสถานที่ต่างๆ เช่น เสาไฟฟ้าที่มีระบบจ่ายไฟในตัวเอง เครื่องสูบน้ำพลังงานลม หรือกังหันลมตามบ้านเรือนที่ใช้ชาร์ตแบตเตอรี่แล้วจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน โดยข้อดีของระบบนี้ คือไม่ต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อื่นๆ ทำให้ระบบมีการสำรองไฟฟ้าไว้ใช้ยามจำเป็น ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบเดี่ยว [1]

ในส่วนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะถูกจ่ายเข้าสู่อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับจ่ายให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า และหากระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ต้องการ พลังงานไฟฟ้าที่เหลือก็จะถูกขายคืนให้กับกริดไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง [1]

2.6.2 ชนิดกังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามแกนหมุนได้แก่ กังหันลมแกนหมุนแนวตั้งและกังหันลมแกนหมุนแนวนอน

2.6.2.1 กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical axis wind turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง กังหันลมแกนตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลมปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมแบบนี้้อยมาก ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง [20]

2.6.2.2 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal axis wind turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลมเรียกว่าหางเสือและมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง เช่น ลมพายุและตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรง กังหันลมแบบแกนนอนได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพน นิยมใช้กับเครื่องสูบน้ำ กังหันลมแบบกังล้อจักรยาน กังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอปเพลเลอร์ (Propeller) ดังรูปที่ 2.22 และ 2.23



รูปที่ 2.22 กังหันลมแกนหมุนแนวนอนแบบ 3-blades [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 กังหันลมแนวแกนนอนแบบ multi-blades [22]

2.6.3 คุณสมบัติของกังหันลม

พลังงานลม เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ พลังงานลมที่เกิดจากลมที่มีมวล m เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v สามารถเขียนสมการพลังงานจลน์จากลมได้ดังสมการที่ (2.1)

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลาได้ดังสมการที่ (2.2)

$$m = \rho Av \quad (2.2)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.2) ในสมการที่ (2.1) จะได้สมการกำลังลม ดังสมการที่ (2.3)

$$P = \frac{1}{2}\rho_a A_T V_w^3 \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ

V_w คือ ความเร็วของลม (m/s)

A_T คือ พื้นที่หน้าตัด (m²)

เมื่อกระแสลมผ่านกังหันลม จะเกิดพลังงานกลที่ใบพัดหมุนส่วนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิด ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงนั้นจะอธิบายจากค่า Power Coefficient (C_p) โดย C_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม หากจากอัตราส่วนระหว่างกำลังที่เกิดจากกังหันลมกับพลังงานจลน์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กังหันลม เป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังแสดงในสมการที่ (2.4) โดยที่กราฟคุณลักษณะ C_p เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละใบพัด

$$C_p = \frac{P_w}{P_{wind}} \quad (2.4)$$

เมื่อแทนสมการกำลังลมจะได้สมการกำลังของแต่ละใบพัด ซึ่งขึ้นกับค่าอัตราส่วน C_p ด้วย ดังสมการที่ (2.5)

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A_T C_p V^3 \quad (2.5)$$

ตามที่กฎของ Betz ได้กล่าวไว้ ไม่มีกังหันลมที่สามารถได้รับพลังงานจลน์เกิน 59.3 เปอร์เซ็นต์ ค่า Power Coefficient (C_p) ในอุดมคติของกังหันลมคืออัตราส่วนของกำลังสูงสุดซึ่งได้มาจากลมซึ่งใช้พลังงานทั้งหมดจากลม ค่า factor เท่ากับ 0.593 คือ Betz Coefficient ซึ่งค่า Betz Coefficient เป็นค่า fraction สูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่มาจากกระแสลมที่สามารถรับมาได้ โดยผู้ออกแบบจะต้องออกแบบใบพัดให้มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ค่า C_p มีค่าสูงสุด สมการของแรงและแรงบิดของกังหันลมจะแสดงในสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_w^2 \quad (2.6)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_w^2 R \quad (2.7)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของกังหันลม

อัตราส่วนระหว่างค่าแรงบิดจริงที่เพิ่มขึ้นจากค่ารัศมีของกังหันลมกับค่าแรงบิดจากทฤษฎีเราจะเรียกอัตราส่วนนี้ว่า C_T โดยที่ C_T มีค่าตามสมการที่ (2.8)

$$C_T = \frac{2T_T}{\rho_a A_T V^2 R} \quad (2.8)$$

โดยที่ T_T เป็นค่าแรงบิดจริง

อัตราส่วนระหว่างความเร็วของกังหันและความเร็วลม เราจะเรียกอัตราส่วนนี้ว่า Tip speed ratio (λ) ซึ่งสมการหาค่า Tip speed Ratio จะแสดงดังสมการที่ (2.9)

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (2.9)$$

โดยที่ Ω คือ ความเร็วเชิงมุมของกังหัน

R คือ รัศมีของกังหัน

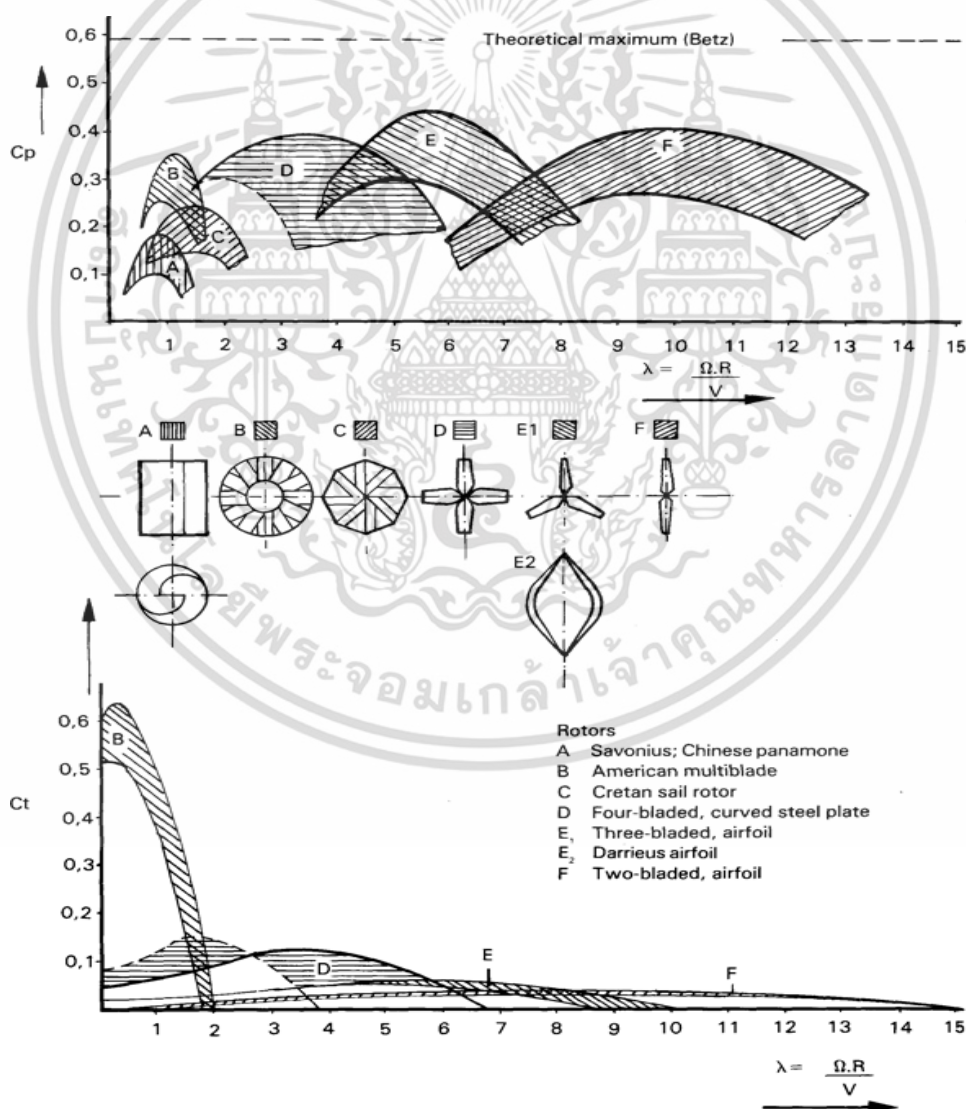
V คือ ความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่กล่าวมาจะพบว่าค่า Power Coefficient และ ค่า Torque Coefficient จะขึ้นกับ Tip speed ratio ซึ่งค่า Tip speed ratio เป็นอัตราส่วนระหว่าง C_p และ C_T จะแสดงในสมการที่ (2.10)

$$\lambda = \frac{C_p}{C_T} \quad (2.10)$$

ประสิทธิภาพของกังหันลมที่สามารถดึงกำลังไฟฟ้ามาได้นั้นจะขึ้นกับลักษณะของใบพัดและกระแสลม จากตัวอย่างเส้นโค้ง $C_p - \lambda$ สำหรับใบพัดรูปแบบต่างๆนั้นจะแสดงในรูปที่ 2.24 จะแสดงประสิทธิภาพของใบพัดต่างๆ ซึ่งจะไม่ขึ้นกับขนาดของใบพัดหรือพารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งตามปกติค่า Power Coefficient ของกังหันลมจะเพิ่มขึ้นตามค่า Tip speed ratio จนถึงค่าสูงสุด และจะลดลงเมื่อค่า Tip speed ratio เพิ่มมากขึ้น ในส่วนของ $C_T - \lambda$ จะแสดงในตัวอย่างเส้นโค้งในรูปที่ 2.24 เช่นกัน

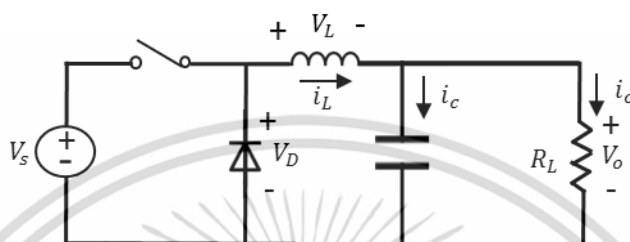


รูปที่ 2.24 ประสิทธิภาพของกังหันลมแบบต่างๆ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

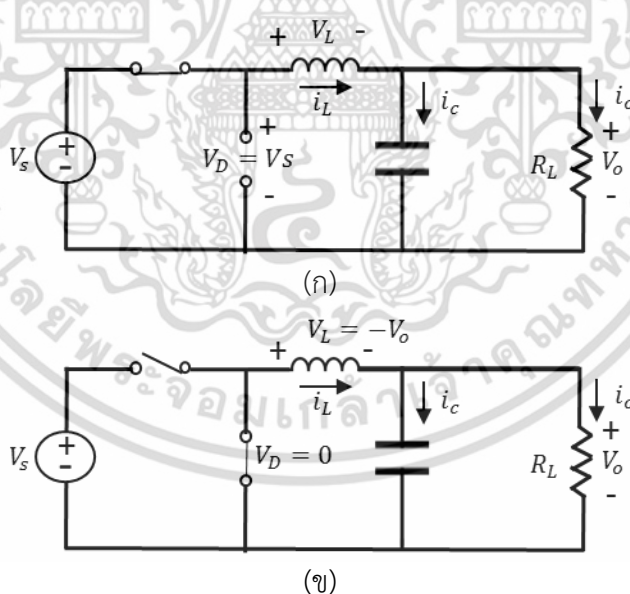
2.7 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์

วงจรทอนระดับแรงดัน [23] ใช้เพื่อลดแรงดันกระแสตรง วงจรพื้นฐานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์จะแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งประกอบไปด้วยสี่ส่วนประกอบหลัก ๆ คือ Power MOSFET (S), Diode (D), Inductor, Output filter capacitor(C) คอนเวอร์เตอร์ทำงานในสองโหมดที่แตกต่างกัน คือ โหมดการนำกระแสอย่างต่อเนื่องซึ่งมีกระแสเหนี่ยวนำไม่เป็นศูนย์ และโหมดการนำกระแสไม่ต่อเนื่องกระแสตัวเหนี่ยวนำจะตกลงสู่ศูนย์เมื่อผ่านหนึ่งรอบการทำงาน



รูปที่ 2.25 วงจรทอนระดับแรงดัน

ในโหมดการนำกระแสอย่างต่อเนื่อง วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์อาจจะอยู่ในสองสถานะที่แตกต่างกัน คือสถานะ ON และสถานะ OFF ดังรูปที่ 2.26 จะแสดงวงจรสมมูลของสถานะ ON และสถานะ OFF ตามลำดับ โดย R_s คือความต้านทานของ MOSFET ในสถานะ ON และ R_L คือความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.26 วงจรสมมูลของ MOSFET (ก) สถานะ ON (ข) สถานะ OFF

ในสถานะ ON ; จากรูปที่ 2.26 (ก) มอสเฟสกำลัง(S) จะ ON และ ไดโอด(D) จะ OFF กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุ จะได้สมการของระบบเป็นดังสมการที่ (2.11) ถึง (2.15)

$$-v_s + v_L + v_o = 0 \quad (2.11)$$

$$v_L = v_s - v_o \quad (2.12)$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.13)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.14)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt = DT$

$$\Delta i_{L.on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.15)$$

ในสถานะ OFF ; จากรูปที่ 2.26 (ข) มอสเฟสกำลัง(S) จะ OFF และ ไดโอด(D) จะ ON ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง จะได้สมการของระบบเป็นดังสมการที่ (2.16) ถึง (2.19)

$$v_L = -v_o \quad (2.16)$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.17)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L.off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.18)$$

กระแสเฉลี่ยที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าค่อยๆลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นลบ dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ $dt = (1 - D)T$ จักรูปสมการใหม่จะได้

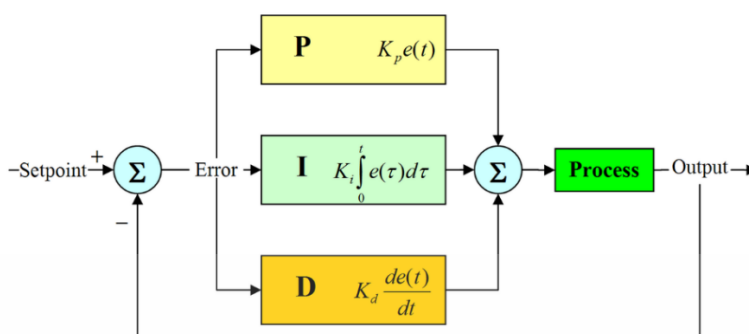
$$\Delta i_{L.off} = -\left(\frac{V_o}{L} \right) (1 - D)T \quad (2.19)$$

2.8 การควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) [18]

การควบคุมแบบพีไอดี [18] เป็นการควบคุมที่ได้รับนิยามอย่างกว้างขวางในระบบควบคุมทางด้านอุตสาหกรรมและในสาขาต่างๆ วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือ ค่าสัดส่วน (P), ปริพันธ์(I) และอนุพันธ์ (D) ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ แต่วิธี PID ไม่สามารถบอกได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอนที่สุดได้ ขึ้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของการควบคุมแบบ PID แสดงในรูปที่ 2.27 วิธีการที่ใช้ในการจูนค่า K_p , K_i และ K_d ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายได้แก่วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols)



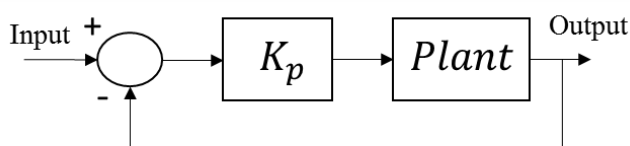
รูปที่ 2.27 ขั้นตอนการทำงานของ การควบคุมแบบ PID [18]

2.8.1 วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols) ที่ใช้ในการปรับค่าเกณฑ์ควบคุมแบบ พี ไอ ดี

ในปี ค.ศ. 1942 ซีเกลอร์และนิโคลส์ได้พัฒนาวิธีการปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี ขึ้นโดยอาศัยการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม และใช้เกณฑ์ IAE กับผลการตอบสนองของระบบ โดยมีสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (Unit-step Input) วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ที่ใช้ในการปรับค่าเกณฑ์ตัวควบคุมนี้สามารถทำให้การตอบสนองของระบบเมื่อมีอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย มีลักษณะการแกว่งแบบลดลงด้วยอัตราหนึ่งในสี่ ซึ่งหมายความว่าโอเวอร์ชูตที่สองจะน้อยกว่า 25% ของค่าโอเวอร์ชูตตัวแรก การปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์มีด้วยกันสองวิธีคือ วิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ (Process Reaction Method) และวิธีการวัฏจักรท้ายสุด (Ultimate Cycle Method)

2.8.2 วิธีการวัฏจักรท้ายสุด (Ultimate Cycle Method) การปรับค่าเกณฑ์ตัวควบคุมด้วยวิธีการวัฏจักรท้ายสุด

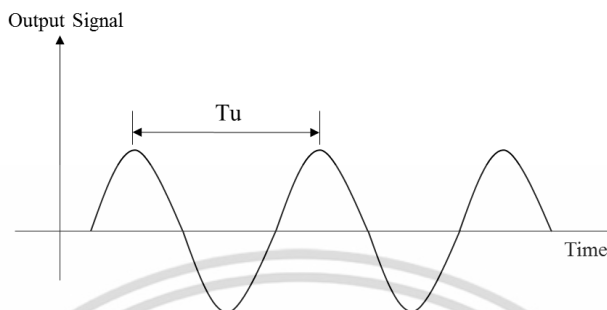
เริ่มจากทำให้ระบบและตัวควบคุมเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดสัดส่วน (Proportional Control) เพียงอย่างเดียว หรือถ้าผู้อ่านใช้ตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี อยู่แล้วในระบบก็ให้ทำการลดค่าเกณฑ์ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control) และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) ลงให้เหลือน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการวัฏจักรท้ายสุด [10]

จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มค่าเกณฑ์ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) ให้มีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบเริ่มมีการแกว่ง (Oscillate) ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) คงที่ ดังรูปที่ 2.29 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ สถานะนี้ระบบเริ่มไม่มีความสมดุล (Unstable) นั่นเอง ทำการบันทึกค่าเกณฑ์ควบคุมแบบสัดส่วนตรงตำแหน่งนี้ไว้ สมมุติให้มีค่าเท่ากับ K_u ในขณะที่เดียวกันก็ทำการวัดคาบเวลาการแกว่งไว้ด้วยสมมุติให้มีค่าเป็น T_u จากค่าของ K_u และ T_u เราจะสามารถคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมได้จากตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.29 การวัดคาบเวลาการแกว่งในการปรับค่าเกณฑ์ควบคุมด้วยวิธีการวัฏจักรท้ายสุด

ตารางที่ 2.5 ค่าเกณฑ์ควบคุมโดยใช้วิธีการวัฏจักรท้ายสุด

Ziegler–Nichols method			
Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.5 * K_u$	-	-
I	$0.45 * K_u$	$1.2 / T_u$	-
D	$0.6 * K_u$	$2 / T_u$	$T_u / 8$

2.9 ฟัชซีลอจิก (Fuzzy logic)

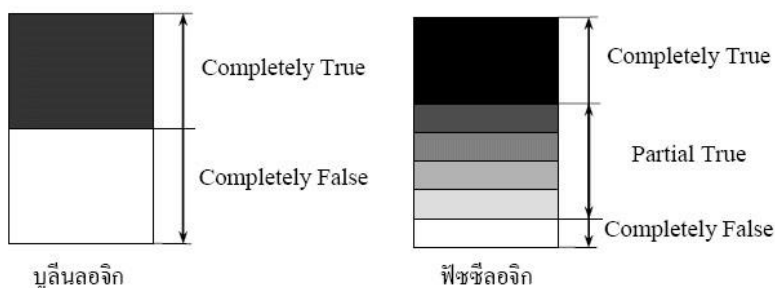
ฟัชซีลอจิก (fuzzy logic) [19] ตรีรกศาสตร์ที่ใช้ในด้านการคำนวณซึ่งได้รับความนิยมมากขึ้นในการวิจัยทางด้านคอมพิวเตอร์ และการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการทหาร ด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งฟัชซีลอจิกอาศัยการตัดสินใจแบบมนุษย์ที่สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยลักษณะความไม่แน่นอนที่เป็นความคลุมเครือ ความไม่ตายตัวของสิ่งตายๆนั้นเอง

2.9.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับฟัชซีลอจิก

ตรรกะแบบฟัชซี (fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัชซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (completely true) กับเท็จ (completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น แสดงดังรูปที่

2:30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ตรรกะแบบจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบฟัซซี (ฟัซซีลอจิก) [19]

ฟัซซีเซต (Fuzzy set) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สื่อถึง “ความไม่แน่นอน (uncertainty)” ซึ่งหากกำหนดว่า คนที่อ้วนคือคนที่มีน้ำหนักมากกว่า 75 กิโลกรัม คนที่มีน้ำหนัก 74.50 กิโลกรัม จะไม่จัดเป็นคนที่อ้วน ซึ่งระบบจะสร้างและกำหนดรูปแบบ (modeling) ของลักษณะความไม่แน่นอนที่เป็นความคลุมเครือ ความไม่ตายตัว รวมถึงความขาดข้อมูลบางส่วน จากการศึกษาปัญหาต่างๆ ไปจะแสดงถึงรูปแบบลักษณะการกระจายของปัญหา ดังรูปที่ 2.31 เป็นการแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการตัดสินใจของปัญหาทั้งหมดมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นสิ่งที่แน่นอน (certainty) ที่เหลือคือสิ่งที่ไม่แน่นอน ซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอนที่มีลักษณะแบบสุ่ม และความไม่แน่นอนที่มีลักษณะเป็นฟัซซี หรือคลุมเครือ ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 40 เพราะปัญหาส่วนมากเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของมนุษย์ซึ่งจะตัดสินใจตามพื้นฐานความคิดของตนเป็นหลัก



รูปที่ 2.31 ความไม่แน่นอน (uncertainty) [19]

ฟัซซีจะสร้างวิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือ ความไม่แน่นอนของระบบที่เกี่ยวข้องกับความคิดความรู้สึกของมนุษย์ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่าง ๆ ในความไม่แน่นอนเพื่อกำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Decision making) โดยอาศัยเซตของความไม่เป็นสมาชิก (Set membership)

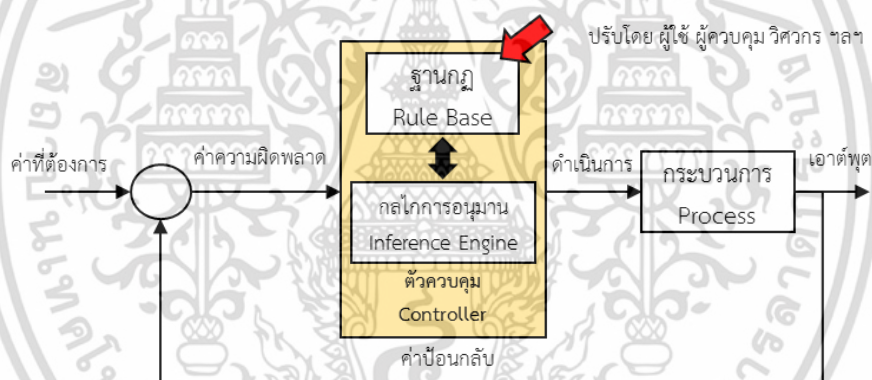
2.9.2 ฟัซซีลอจิกกับตัวควบคุมในงานทางวิศวกรรม

ฟัซซีลอจิกกับตัวควบคุมในงานทางวิศวกรรม ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงฟัซซีลอจิกเบื้องต้น โดยใช้ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy controller) สำหรับการอธิบายเนื้อหา โดยปกติแล้วเราจะคุ้นเคยกับการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีต่างๆ ได้อย่างไม่ยุ่งยาก ตัวควบคุมแบบฟัซซีถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เครื่องซักผ้า กล้องวิดีโอ หม้อหุงข้าว ตู้เย็น รวมไปถึงกระบวนการในอุตสาหกรรมแบบต่างๆ ตัวควบคุมแบบฟัซซีใช้หลักของฟัซซีลอจิกในการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีมีลักษณะของการใช้ฐานกฎ (rule base) ที่มาจากการควบคุมด้วยคนจริงๆ ได้ ตัวควบคุมแบบนี้จึงมีประโยชน์มาก ในการประยุกต์ใช้กับงานเชิงปฏิบัติการจริงด้วยผู้เชี่ยวชาญ แนวทางการออกแบบตัวควบคุมต่างๆ ในเชิงวิศวกรรมในตัวควบคุมแบบฐานกฎต่างๆ ไปกลยุทธในการควบคุม นั้นจะอยู่ในรูปแบบภาษาธรรมชาติ เหมือนกับที่วิศวกรต่างๆ ไปใช้พูดสั่งงานตัวอย่างรูปแบบการใช้งานตัวควบคุมแบบฟัซซีมี ดังต่อไปนี้

2.9.2.1 การควบคุมโดยตรง (Direct control)

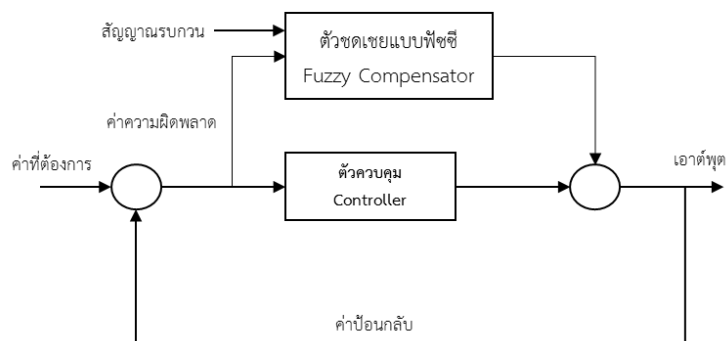
การควบคุมโดยตรงแสดงในรูปที่ 2.32 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีจะอยู่ในส่วนหน้า ก่อนที่เอาต์พุตจะถูกป้อนกลับ เอาต์พุตที่ได้จากกระบวนการจะถูกเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ตั้งไว้ ถ้ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งเอาต์พุตไม่ตรงหรือไม่สอดคล้องกับค่าอินพุตที่ต้องการ ตัวควบคุมจะดำเนินการตามกลวิธีเพื่อที่กำหนดหรือควบคุมให้กระบวนการเป็นไปตามที่กำหนดไว้ ตัวควบคุมแบบฟัซซีในรูปข้างต้นจะถูกนำมาใช้แทนตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม



รูปที่ 2.32 การควบคุมโดยตรง [19]

2.9.2.2 การควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feed forward control)

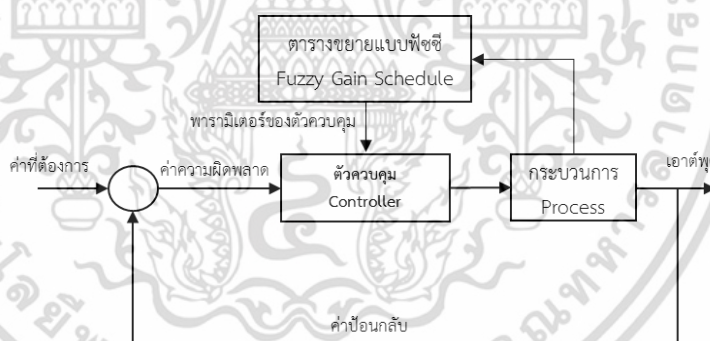
การนำเอาฟัซซีลอจิกมาเป็นตัวชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในการควบคุมแบบไปข้างหน้าแสดงในรูปที่ 2.33 ตัวชดเชยแบบฟัซซีใช้สัญญาณรบกวนเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าจะทำการชดเชยให้กับตัวควบคุมขนาดไหน ตัวควบคุมในระบบอาจจะเป็นตัวควบคุม PID แบบเชิงเส้น ในขณะที่ตัวชดเชยแบบฟัซซีจะทำการชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.33 การควบคุมแบบไปข้างหน้า [19]

2.9.2.3 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว (Parameter adaptive control)

ในกรณีที่ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีจุดทำงานเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นที่ตั้งไว้ เราสามารถที่จะปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุม ให้สอดคล้องกับจุดทำงานใหม่ได้ด้วยการจัดการการขยายแบบฟัซซี (fuzzy gain scheduling) ตัวควบคุม ที่มีการจัดการการขยายแบบฟัซซีจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบเชิงเส้น ที่ซึ่งมีค่าของพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากจุดทำงานเดิม อินพุตที่วัดจากตัวตรวจจับจะถูกใช้เป็นตัวแปรการจัดตาราง (scheduling variable) ที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเดิม การปรับค่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปของตารางค้นหา (look-up table) รูปที่ 2.34 แสดงแผนผังทั่วไปของการควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวแบบฟัซซี

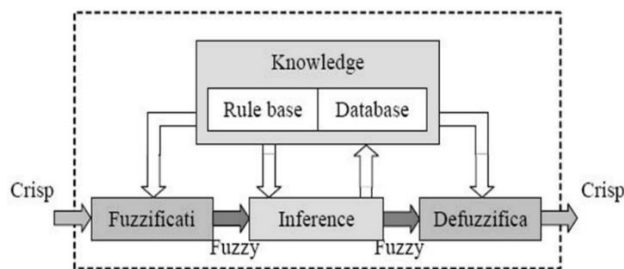


รูปที่ 2.34 การควบคุมพารามิเตอร์เชิงปรับตัว [19]

2.9.3 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วนดังนี้ ดังรูปที่ 2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี [19]

ส่วนที่แปลงการอินพุตทั่วไปเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี (Fuzzification) หรือในรูปแบบเซตฟัซซีหรือเรียกว่าเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic Variable)

ฐานความรู้ (Knowledge base) เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุมประกอบ 2 ส่วนคือ ฐานกฎ (Rule base) และฐานข้อมูล (Database)

ฐานกฎ (Rule base) ส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม ซึ่งได้จากผู้เชี่ยวชาญในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา (Linguistic rule)

ฐานข้อมูล (Database) เป็นการเตรียมส่วนที่จำเป็นเพื่อที่จะใช้ในการกำหนดกฎการควบคุม และการจัดการข้อมูลของตรรกศาสตร์ฟัซซี

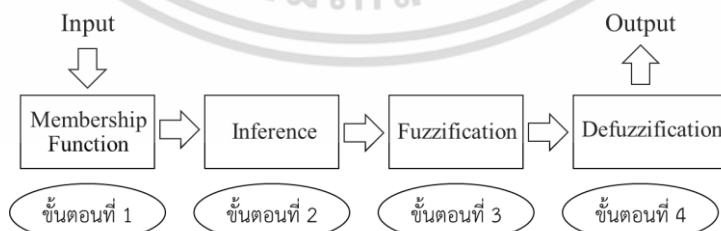
เครื่องอนุมานหรือการตีความ (Inference Engine) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริงและกฎ เพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งการกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

ส่วนที่แปลงการเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Defuzzification) เป็นการทำการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบฟัซซีให้เป็นค่าที่สรุปผลหรือค่าการควบคุมระบบ

2.9.4 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิกมีรูปแบบการทำงานเป็น 4 ส่วนจะแสดงดัง รูปที่

2.36

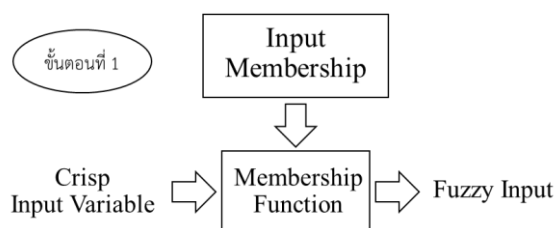


รูปที่ 2.36 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับคุณลักษณะของแต่ละ

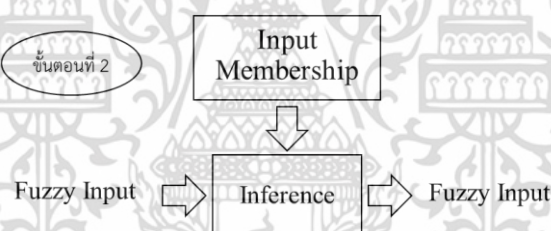
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอินพุต (Input) และความสำคัญต่อการเอาต์พุต (Output) ที่น่าสนใจโดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษาสามัญ เพื่อให้เป็นฟัซซีการอินพุต ดังรูปที่ 2.37



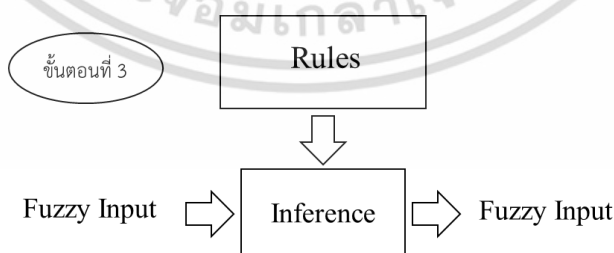
รูปที่ 2.37 ขั้นตอนที่ 1 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจจะสร้างการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If) และ (And) หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 ขั้นตอนที่ 2 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาฟัซซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซีอินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผล ดังรูปที่ 2.39

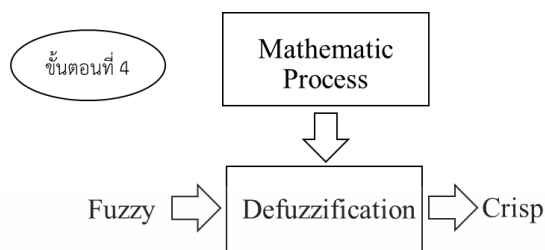


รูปที่ 2.39 ขั้นตอนที่ 3 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

วิธีการทำเป็นค่าคลุมเครือ (Fuzzification) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการตีความหาเหตุผล เลือกใช้ Max-Min method และ Max-Dot method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซีโดยจะเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุตตามรูปที่ 2.40 และด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมระบบในสถานการณ์นั้นๆ



รูปที่ 2.40 ขั้นตอนที่ 4 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

วิธีการทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าปกติ (Defuzzification) วิธีการที่เป็นเทคนิคการเลือกค่าสูงสุดหรือสรุปหาเหตุผลจากหลายๆ เซตมาเพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆ แบบและเลือกกระทำเพียงรูปแบบเดียว

วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุผลที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์ถ่วงโดยรวม ซึ่งหาได้จากการประมาณค่าจากสมการที่ (2.20)

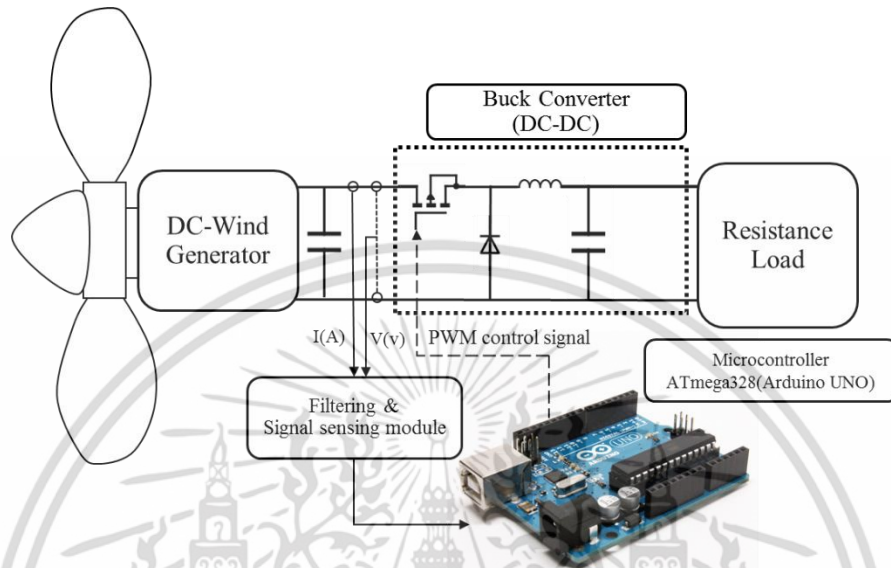
$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (2.20)$$

เมื่อ	COG	คือ ค่าของจุดศูนย์ถ่วง(Central of Gravity)
	N	คือ ค่าตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ i
	α_i	คือ ค่าฟัซซีของเอาต์พุตในเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i
	w_i	คือ พื้นที่ใต้กราฟของเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า

3.1 โครงสร้างของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของวงจรติดตามกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 เป็นโครงสร้างของวงจรติดตามกำลังไฟฟ้า โดยมีการออกแบบวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์และชุดควบคุม โดยมีวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งค่าที่ได้ผ่านวงจรกรองความถี่สูงไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลผ่านทางตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเอาต์พุตสัญญาณที่ได้จากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกนำมาควบคุมการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมกระแสและแรงดันของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากพลังงานลมที่ได้รับเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ซึ่งมีสวิตช์มอสเฟตกำลังที่ถูกขับด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM) ที่สร้างจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ArduinoUNO จะเป็นตัวควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และจ่ายกำลังไปยังโหลดความต้านทานที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 หลักการพื้นฐานของการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์

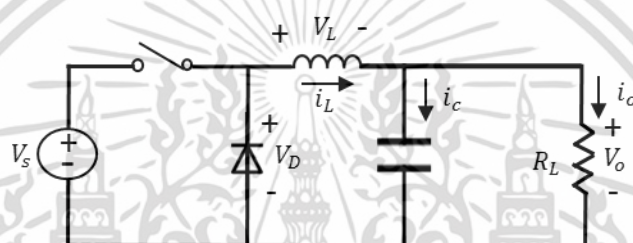
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดทอนแรงดัน ในปัจจุบันนิยมเรียกว่าวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์(Buck Converter) ดังรูปที่ 3.2 เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันทางด้านออกมีระดับต่ำกว่าแรงดันทางเข้าโดยระดับของแรงดันทางออกจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการนำและหยุดนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ เช่น มอสเฟต หรือ ไอจีบีที โดยอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลา

อุปกรณ์สวิตช์นำกระแส (t_{on}) กับคาบเวลา (T) เรียกว่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ดังสมการดิวตี้ไซเคิล(D)

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.1)$$

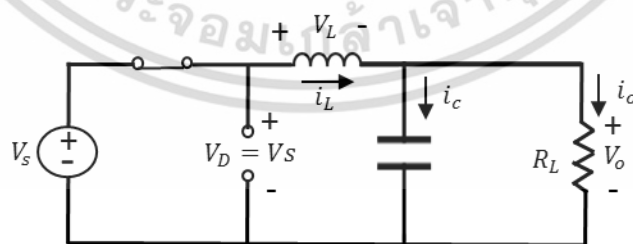
เพื่อให้แรงดันทางด้านออกมีความเป็นกระแสตรงมากๆ จึงนิยมต่อวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ร่วมด้วย ส่วนการออกแบบวงจรเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้านำออกตามต้องการจะแบ่งการพิจารณาการทำงานของสวิตช์เป็น 2 ช่วงการทำงานได้แก่ ขณะที่สวิตช์นำกระแสและสวิตช์ไม่นำกระแส

3.2.1 แผนผังการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับโหลด

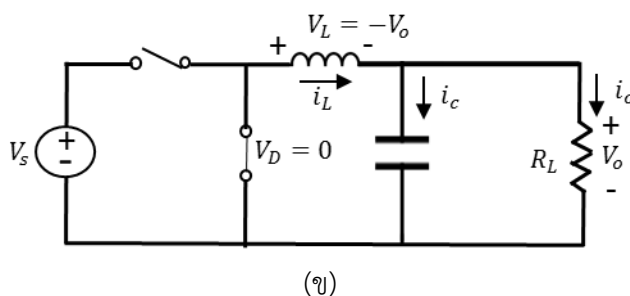


รูปที่ 3.2 วงจรบักคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 3.2 แสดงรูปวงจบบักคอนเวอร์เตอร์ โดยมีส่วนประกอบดังนี้ ส่วนแรกคือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สวิตช์กำลัง ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และโหลด การทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์นำกระแส ดังรูปที่ 3.3 (ก) ซึ่งอยู่ในสถานะต่อวงจร ในช่วงเวลาที่ค่าเวลา t อยู่ระหว่าง 0 ถึง t_{on} ในสถานะนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าตกที่สวิตช์มีค่าเท่ากับศูนย์และไดโอดจะอยู่ในสถานะตัดวงจรเนื่องจากได้รับไบแอสกลับและจะยังคงอยู่ในสถานะตัดวงจรตลอดเท่าที่อเล็กทรอนิกส์ สวิตช์ยังคงอยู่ในสถานะต่อวงจร



(ก)



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน

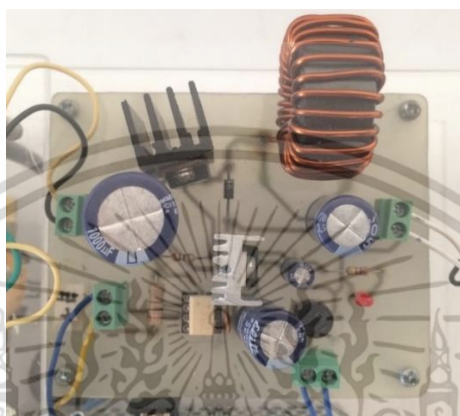
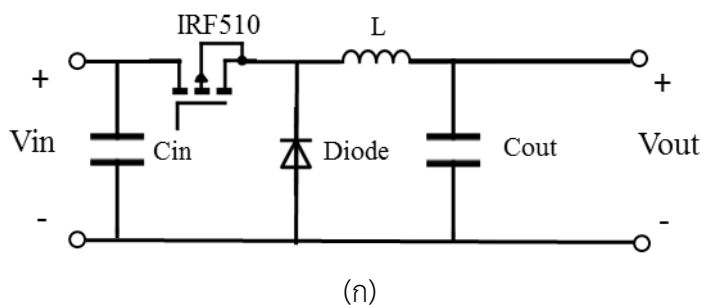
(ก) สวิตช์ ON (ข) สวิตช์ OFF

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ดังรูปที่ 3.3 (ข) ซึ่งอยู่ในสถานะต่อวงจรตัดวงจร จะมีผลทำให้ไดโอดเปลี่ยนจากสถานะตัดวงจรเป็นสถานะต่อวงจรเนื่องจากได้รับไบเอสดตรงจากการคายพลังงานที่เก็บสะสมในตัวเหนี่ยวนำ (L) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) จะไม่ลดลงทันทีทันใดแต่จะลดลงโดยเริ่มต้นจากค่าสุดท้ายที่สวิตช์ต่อวงจรซึ่งเป็นค่าสูงสุด แล้วค่อยๆลดลงเข้าหาศูนย์ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวเหนี่ยวนำ (L) โดยมีขั้วทางไฟฟ้ากลับกับในสถานะที่สวิตช์ต่อวงจร กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) จะไหลผ่านตัวเก็บประจุ (C) และโหลด และไหลผ่านไดโอดจนครบวงจร

3.3 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter)

วงจรทอนระดับแรงดันหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการคือ ต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นก็จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ วงจรทอนแรงดันมีประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆที่มีรายละเอียดดังนี้

1. ตัวเก็บประจุ (Capacitance: C) เป็นตัวกรองแรงดันเพื่อทำให้แรงดันทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกเรียบอีกทั้งยังทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับโหลดอีกด้วย
2. มอสเฟต (Mosfet) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในการตัดต่อไฟเข้าสู่โหลดโดยจะได้รับสัญญาณควบคุมจากส่วนขยายสัญญาณควบคุมควบคุม โดยในวงจรจะเลือกใช้มอสเฟตเบอร์ IRF510
3. ตัวเหนี่ยวนำ (Inductance: L) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับโหลดช่วยกรองและป้องกันการกระชากของกระแสในช่วงที่สวิตช์มีการ turn off
4. ไดโอด (Diode) ในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสไดโอดจะช่วยให้กระแสวิ่งผ่านโหลดได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.4 วงจรทอนแรงดัน (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรที่ออกแบบจริง

3.3.1 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำจะหาค่าที่น้อยที่สุดที่จะทำให้วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่บนสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งในการออกแบบต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของกระแสด้วย โดยต้องเลือกค่า L ให้มีค่ามากกว่าค่า L_{\min} ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งสูตรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad : \text{ ความถี่ในการสวิตช์}$$

$$D \quad : \text{ ดิวตี้ไซเคิล}$$

$$R \quad : \text{ โหลดความต้านทาน}$$

โดยค่าที่ออกแบบมีดังนี้

$$f_s = 30 \text{ kHz}$$

$$D = 0.1$$

$$R = 100 \ \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าในสมการที่ 3.2 จะได้ค่า

$$L_{\min} = \frac{(1-0.1)(100)}{2(30 \times 10^3)} = 1.45 \text{ mH}$$

เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่ามากกว่า 1.45 mH

สำหรับการเลือกใช้แกนแม่เหล็กในงานวิจัยเลือกใช้แกนแม่เหล็กรูปทรงเทอร์รอยด์ชนิดเฟอร์ไรต์ (Ferrite cores) ซึ่งแกนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์เหมาะสำหรับใช้งานที่ความถี่การสวิตช์มีค่าสูงๆ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนต่ำ โดยงานวิจัยออกแบบความถี่การสวิตช์ของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ที่ 30 kHz ซึ่งการใช้แกนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีโอกาสเกิดสภาพอิ่มตัว (saturation) คือ ไม่สามารถสร้างฟลักซ์ในแกนต่อไปได้ตามคุณสมบัติของแกนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ แต่เนื่องจากงานวิจัยมีกำลังไฟฟ้าต่ำมากจึงสามารถมองข้ามกรณีการเกิดสภาพอิ่มตัว (saturation) ในแกนแม่เหล็กได้ โดยแกนเฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 10.5 เซนติเมตรและพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 65.6 มิลลิเมตร² สามารถคำนวณรอบการพันแกนเหล็กได้จากสมการที่ (4.2)

$$L = \frac{2\mu NA^2}{l} \quad (3.3)$$

ค่า μ (ความซึมซาบของแกนเฟอร์ไรต์) มีค่าเท่ากับ 8.8×10^{-3}

จากสมการที่ (3.3) เมื่อแทนค่าในสมการจะได้จำนวนรอบที่พันแกนเหล็กเท่ากับ 22 รอบ ในงานวิจัยจึงเลือกพันรอบแกนเหล็กเท่ากับ 30 รอบ เพื่อให้แกนเหล็กมีค่าความเหนี่ยวนำไม่น้อยกว่าค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดที่จะทำให้วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

3.3.2 การหาค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance)

การหาค่าตัวเก็บประจุในวงจรทอนแรงดัน (Buck Converter) สามารถหาได้จากสูตร

$$C = \frac{1-D}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (3.4)$$

$f_s = \frac{1}{T_s}$: ความถี่ในการสวิตช์
D	: ดิวตี้ไซเคิล
L	: ค่าความเหนี่ยวนำ
ΔV_o	: ค่าระลอกแรงดันขาออก
V_o	: แรงดันขาออก

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.4) จะได้

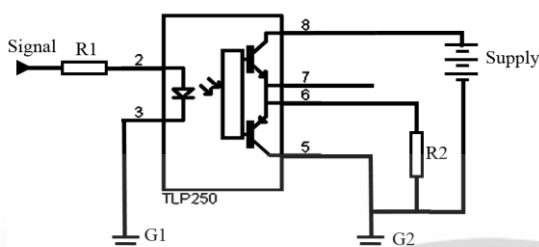
$$C = \frac{(1-0.1)}{8(1.45 \times 10^{-3})(30 \times 10^3)^2 \left(\frac{0.2}{70}\right)} = 29.16 \mu\text{F}$$

ในที่นี้เลือกใช้ $100 \mu\text{F}$

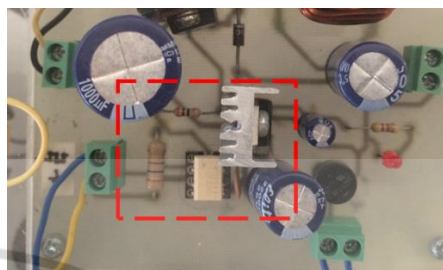
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ชุดขับมอสเฟต (Drive Mosfet)

ชุดขับมอสเฟตจะใช้ IC เบอร์ TLP250 เป็นวงจรขับมอสเฟต ซึ่งวงจรขับมอสเฟตจะรับสัญญาณ Pulse (Duty Cycle) ที่สร้างมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์และทำหน้าที่ขยายสัญญาณ จะนำสัญญาณที่ขยายแล้วไปขับมอสเฟต



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 วงจรชุดขับมอสเฟต (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรจริง

3.3.4 ชุดจ่ายไฟ (Regulator)

ชุดจ่ายไฟ (Regulator) ขนาดแรงดันขาออก ± 15 โวลต์ และ 5 โวลต์ โดยชุดจ่ายไฟจะใช้เพื่อจ่ายไฟให้กับชุดขับมอสเฟต (Drive mosfet) เพื่อจะนำสัญญาณไปขับมอสเฟตต่อไป ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้ชุดสวิตช์พาวเวอร์ซัพพลายยี่ห้อ TDK-Lambda มีแหล่งจากทั้ง ± 15 โวลต์ และ 5 โวลต์ ในตัวเดียว ซึ่งการใช้พาวเวอร์ซัพพลายแยกจะช่วงลดปัญหาการต่อกราวนด์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สวิตช์พาวเวอร์ซัพพลาย รหัส JWT100-5FF/A 100วัตต์ 3 เอ้าต์พุต

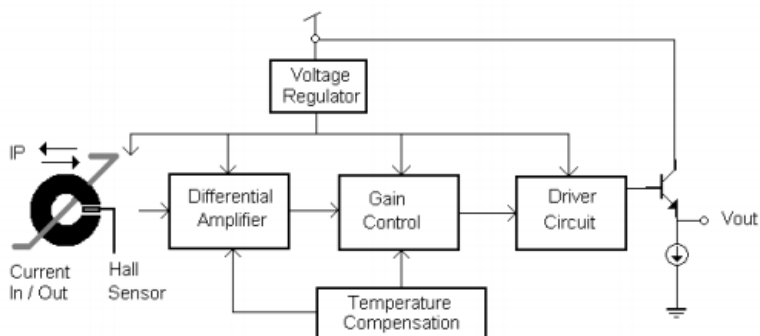


รูปที่ 3.6 วงจรชุดจ่ายไฟ $\pm 15V$

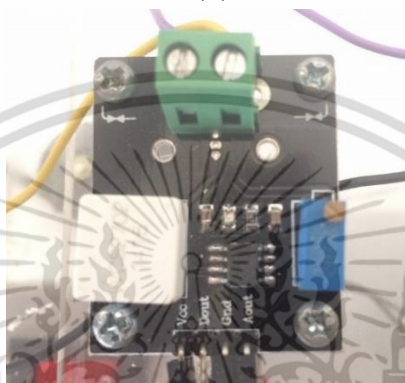
3.3.5 ชุดตรวจจ็บกระแส

ชุดตรวจจ็บกระแสเพื่อส่งไปประมวลผลในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้โมดูลตรวจวัดกระแสที่ใช้ได้ทั้งกระแสไฟ AC และ DC ไอซีเบอร์ WCS2702 ที่ออกแบบมาสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม โดยต้องการไฟเลี้ยงขนาด +5 Vdc ความไวในการตรวจจ็บ(High sensitivity) 1mV/mA มีย่านการวัดกระแสดีซี (DC) ± 2 A และย่านการวัดกระแสเอซี (AC) 1.4 Arms เอ้าต์พุตจากชุดตรวจวัดเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งสามารถส่งเข้าไปในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลได้ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

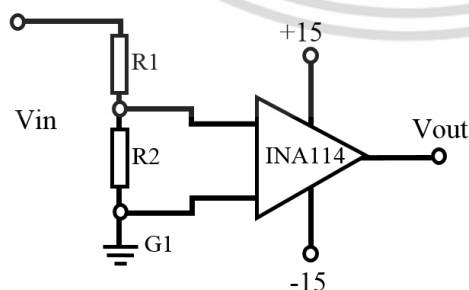


(ข)

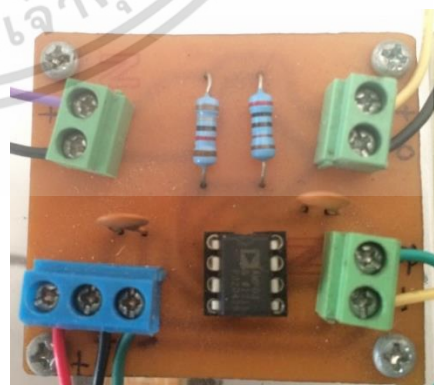
รูปที่ 3.7 ชุดตรวจจับกระแส (ก) บล็อกไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริง

3.3.6 ชุดตรวจจับแรงดัน

ชุดตรวจจับแรงดันจะใช้วงจรทอนแรงดันเป็นอัตราส่วน 10:1 และวงจรถ่ายโดยจะใช้ วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ใช้ IC เบอร์ INA114AP ซึ่งรับค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าของ วงจรตีไวเตอร์ 2 สัญญาณ โดย V1 ใช้แรงดันไฟบวกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนแรงดัน V2 จะต่อเข้า ขั้วลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อผ่านวงจรที่อัตราขยาย 1:1 และจะใช้ความต้านทานปรับค่าได้ปรับ ค่าแรงดันให้มีค่าสูงสุดที่ 5 V เพื่อนำค่าที่ได้ไปเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 วงจรตรวจจับแรงดัน (ก) ออกแบบตามทฤษฎี (ข) ออกแบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์

ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมได้หลายภาษา ได้แก่ แอสเซมบลี ซี และอื่นๆ แต่เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีด้วยกันหลายประเภทตามสถาปัตยกรรม บางประเภทสามารถเขียนได้ทุกภาษาแต่บางประเภทก็เขียนได้เพียงบางภาษา สำหรับการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมขนาดเล็กนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328P-Pu ซึ่งเป็นบอร์ด Arduino-Uno ซึ่งตัวนี้จะมีขา Digital 14 ขา input/output (สามารถทำเป็น PWM ได้ถึง 16 ขา) และมีขา Analog input ได้อีก 6 ขา ที่ความถี่ 16 MHz รับแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ โดยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

- สร้างสัญญาณ Duty Cycle เพื่อจ่ายให้กับวงจรขยายสัญญาณและนำไปขับมอเตอร์ต่อไป
- ประมวลผลกำลังไฟฟ้าและส่งสัญญาณ Duty Cycle ไปยังวงจรทอนแรงดัน
- เปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล
- หาค่าเฉลี่ยของกระแสและแรงดัน



รูปที่ 3.9 บอร์ด Arduino ATMEGA 328P-PU

3.4.1 พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้งาน

- ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณ PWM และจะส่งสัญญาณในรูปแบบของ Duty Cycle เพื่อนำไปเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรขยายเพื่อนำสัญญาณไปขับมอเตอร์ในวงจรทอนแรงดัน
- ไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงสัญญาณขาเข้าจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยรับสัญญาณอนาล็อกจากส่วนตรวจจับสนและความดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.4.2 การประมวลผลของโปรแกรมควบคุม

ในการประมวลผลของโปรแกรมควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบระบบกวนและสังเกตมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. เริ่มต้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่าแรงดันและกระแสจากชุดตรวจจับสน (Voltage and Current Sensor) แล้วทำการแปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกไปเป็นดิจิทัลโดยใช้ ADC เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ในการประมวลผล
2. นำค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากการแปลงค่าไปคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาเป็นค่าอ้างอิง เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่ากระแสและแรงดันค่าใหม่เพื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเพื่อปรับ Duty Cycle ให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้จุดที่มีค่ากำลังสูงสุดโดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นค่าที่ใช้อ้างอิงค่าต่อไป
3. เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าใหม่กับค่ากำลังไฟฟ้าเดิมในกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ค่ากำลังไฟฟ้าใหม่ที่เข้ามามีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าเดิมจะเปลี่ยนจุดการทำงานในทิศทางเดิม และทำการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าค่านี้ไว้เป็นค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าใหม่ต่อไปเรื่อยๆ

3.2 หากกำลังไฟฟ้าใหม่ที่เข้ามามีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าเดิมจะเปลี่ยนจุดการทำงานไปในทิศทางตรงข้ามจนกว่าค่ากำลังไฟฟ้าใหม่ที่เข้ามาจะมีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดอ้างอิง

3.3 หากกำลังไฟฟ้าใหม่มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเดิมจะคงค่า Duty Cycle ไว้ที่ค่าเดิม โดยโปรแกรมจะทำงานวนลูปแบบนี้ไปเรื่อยๆเพื่อจะให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดตลอดเวลา

3.5 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

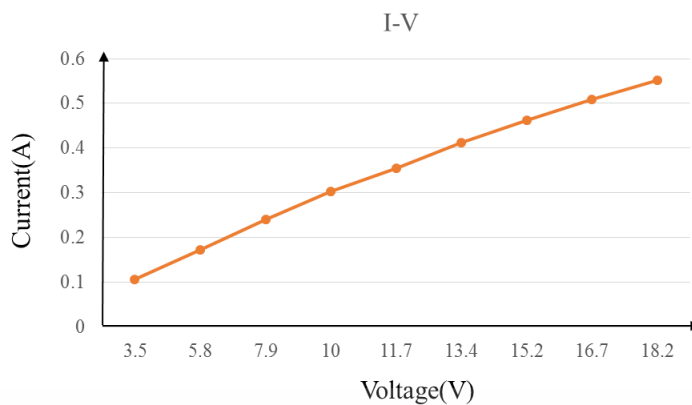
3.5.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC GENERATOR)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีกังหันลมเป็นต้นกำลัง ในการขับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้หลอดไฟขนาด 10W ผลที่ได้จะแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดัน กระแสและกำลังที่ความเร็วตัวขับค่าต่างๆ

RPM	V(V)	I(A)	P(W)
200	3.5	0.105	0.4
300	5.8	0.172	1.0
400	7.9	0.241	1.9
500	10	0.302	3.0
600	11.7	0.355	4.2
700	13.4	0.412	5.5
800	15.2	0.463	7.0
900	16.7	0.508	8.4
1000	18.2	0.551	10.0

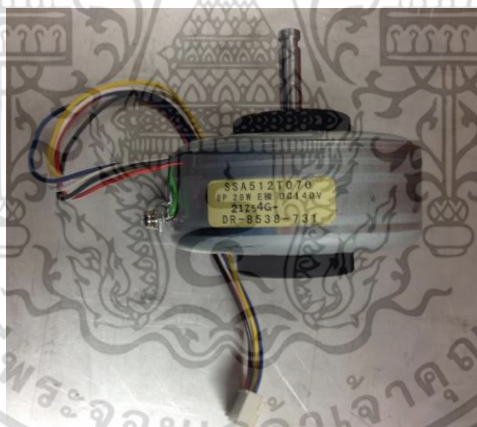
นำค่ากระแสและแรงดันมาพล็อตกราฟและหาค่าความชันของกราฟ ซึ่งจากตารางที่ 3.1 พบว่าค่าความชันจะมีค่าเท่า 1/2 ดังนั้น ค่าความต้านทานภายในที่ได้คือ 2Ω เมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปขับกับมอเตอร์ขนาด $\frac{1}{2}$ HP (0.4kW) 4 pole 50 Hz ทำการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open circuit test) ที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 2770 RPM จะได้แรงดันขณะเปิดวงจรที่ 140 V และเมื่อนำไปทำการทดสอบแบบลัดวงจร(Short circuit test)ที่ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 2770 RPM จะได้กระแสลัดวงจรเท่ากับ 1.04 A



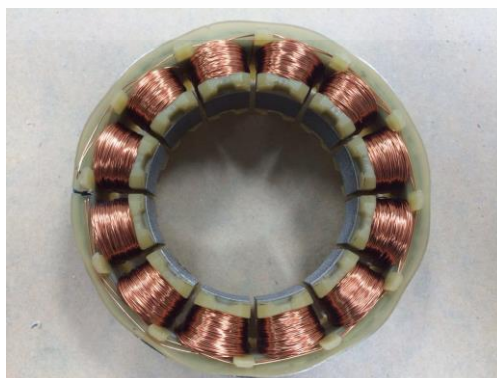
รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ภาระไฟฟ้า 10 W

ดังนั้น จะได้พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- พิกัดกำลังไฟฟ้า 28 วัตต์
- กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current) 1.04 แอมแปร์
- แรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage) 140 โวลต์
- พิกัดความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที
- จำนวนโพล 8 โพล
- ความต้านทานภายใน 2 โอห์ม



(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ(ข)เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 3.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้จริง (ข) ขดลวดภายใน (ค) แกนโรเตอร์

3.5.2 การออกแบบใบพัดกังหันลม

กังหันลมแบบหลายใบพัด (Multi blade) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 เมตร ใบพัดแต่ละอันมีขนาดความกว้างปลายใบ 10 เซนติเมตร ความกว้างโคนใบ 4 เซนติเมตรและมีความยาวตลอดใบ 16 เซนติเมตร ประกอบกันทั้งหมด 10 ใบ โดยทั้ง 10 ใบ นั้นมีขนาดมุมพิทเชลี่ยอยู่ที่ 7 องศา ดังแสดงในรูป 3.12



รูปที่ 3.12 กังหันลมแบบหลายใบพัดที่ใช้ในการทดลอง

3.6 อุโมงค์ลมค์ลมและพัดลมดูดอากาศ

3.6.1 พัดลมดูดอากาศ

ความเร็วลมที่ใช้ในการขับกังหันลมขนาดเล็กเพื่อศึกษาคุณลักษณะจำเป็นต้องใช้ความเร็วลมที่มากกว่าปกติ ดังนั้นจึงเลือกใช้พัดลมดูดอากาศซึ่งสามารถสร้างความเร็วลมที่สูงพอที่จะขับกังหันลมขนาดเล็กให้สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้ โดยพัดลมดูดอากาศที่เลือกจะใช้พัดลมถังกลมยี่ห้อ Delton ขนาด 380 วัตต์ 1 เฟส 220 โวลต์ ความเร็วรอบสูงสุด 2800 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.13 พัดลมดูดอากาศ

3.6.2 การออกแบบอุโมงค์ลม

ในการออกแบบอุโมงค์ลมตามทฤษฎีจำเป็นต้องมีส่วนประกอบด้วยกัน 3 ส่วน คือ ส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction) ส่วนปฏิบัติงาน (Working section) และส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser) แต่ในปฏิบัติจริงเพื่อลดราคาและขนาดของอุโมงค์ลม จึงออกแบบอุโมงค์ลมจริงโดยมีด้วยกัน 2 ส่วน คือ

- ส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction) ส่วนอากาศแพร่เข้านี้จะเป็นส่วนแรกที่อากาศจะไหลเข้าสู่อุโมงค์ลมเพื่อขยายอากาศให้มีการกระจายเพิ่มขึ้น
- ส่วนปฏิบัติงาน (working section) ส่วนที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานตามวัตถุประสงค์

อุโมงค์ลมที่ได้ออกแบบได้แสดงตามรูป 3.14 ความยาว 1.6 เมตร ความกว้างฐาน 0.6 เมตร และสูง 0.6 เมตร และในส่วนปฏิบัติงานจะมีพื้นที่หน้าตัด 0.785 ตารางเมตร



(ก)



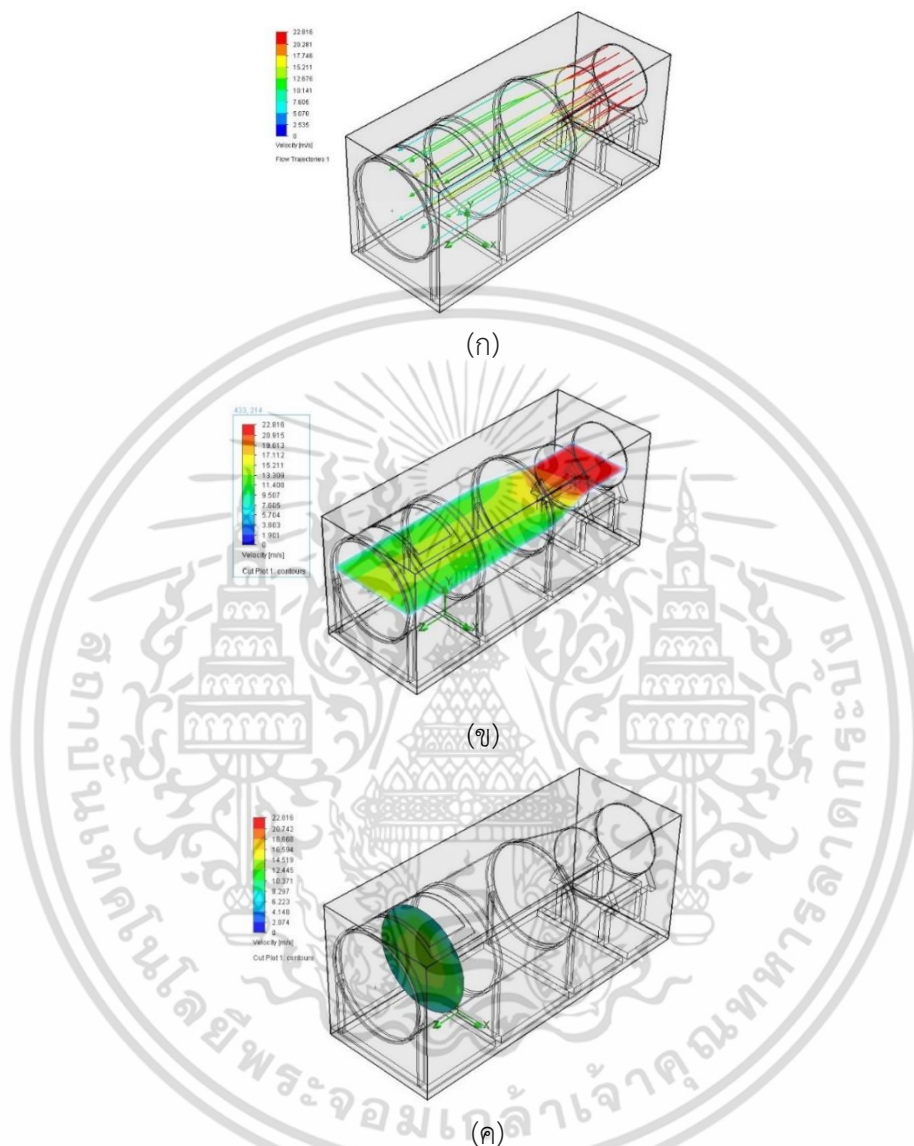
(ข)

รูปที่ 3.14 อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดลอง

(ก) ภาพด้านข้างอุโมงค์ลม (ข) ภาพด้านหน้าอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลของอากาศผ่านอุโมงค์ลมที่ได้ออกแบบโดยอาศัยโปรแกรม Solid work จะใช้ฟังก์ชัน Solid work flow simulation โดยกำหนดความเร็วขาเข้า 22 m/s และความดันอากาศขาออก 101325 Pa (1atm) และอุณหภูมิขาออก 27° C ดังแสดงในรูปที่ 3.15



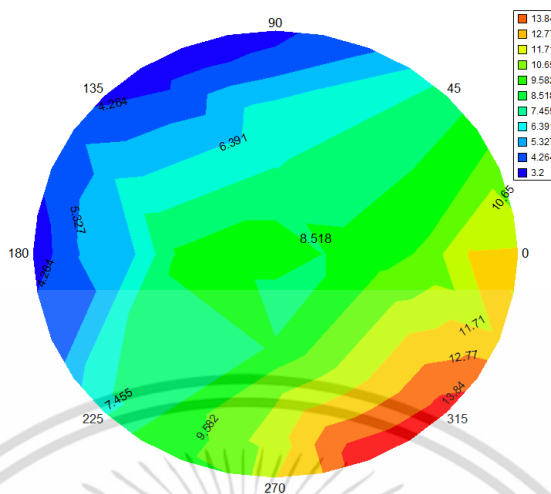
รูปที่ 3.15 การจำลองการไหลของอากาศภายในอุโมงค์ลม

(ก) การไหลของอากาศภายในอุโมงค์ (ข) ความเร็วลมในแนวแกน x

(ค) ความเร็วลมที่กระจายในช่วงทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบความเร็วลมในอุโมงค์พบว่าในส่วนพื้นที่ทดสอบ (test section) เมื่อกำหนดความเร็วลมจากพัดลมเป่าอากาศที่ 44 เมตรต่อวินาที จะมีความเร็วรอบเท่ากับ 2758 รอบต่อนาที เพื่อแสดงความเร็วลมของจุดทดสอบที่ความเร็วลมสูงสุดที่สามารถผลิตได้นั้น จะแสดงในแผนภาพคอนทัวร์ในรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ชัดว่าความเร็วลมในแนวระนาบของส่วนทดสอบมีค่าไม่สม่ำเสมอโดยความเร็วที่ขอบของอุโมงค์ลมทั้งด้านบนและด้านล่างมีกระแสลมปั่นพวน (turbulent flow) ซึ่งจะส่งผลต่อความเร็วกึ่งหันลม ทำให้ในขณะทดสอบมีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดของผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบได้ อีกทั้งผลของกระแสลมผันผวนนี้ยังส่งผลไปถึงสภาวะคงตัวในการทำงานของกังหันลมอีกด้วย



รูปที่ 3.16 แผนภาพคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วลมต่างๆในแนวระนาบของส่วนทดสอบ

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบพบว่าความเร็วลมในส่วนทดสอบนั้นมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นจะต้องนำค่าความเร็วลมที่ได้จากพิกัดในแนวระนาบมาเฉลี่ยเพื่อหาความเร็วและนำไปเป็นค่าอ้างอิงในการปรับความเร็ว เช่น ต้องปรับความเร็วรอบพัดลม 2695 รอบต่อนาที จะส่งผลให้เกิดความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนทดสอบ 8 เมตรต่อวินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบพัดลมเป่าอากาศและความเร็วลมจะแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบพัดลมและความเร็วลม

ความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนทดสอบ (m/s)	ความเร็วรอบพัดลม ω_{fan} (rpm)
0	0
1	512
2	752
3	1065
4	1220
5	1504
6	1943
7	2319
8	2695
8.3	2758

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

4.1 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบต่อเข้ากับวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ตัวควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) วิธีการควบคุมแบบพีไอและการควบคุมแบบฟัซซีร่วมกับการรบกวนและสังเกต โดยทำการทดลองดังนี้

1. พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

กำลังไฟฟ้าสูงสุด 28 วัตต์

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 1.04 แอมป์

แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร 140 โวลต์

อุโมงค์ลมสามารถให้ความเร็วลมสูงสุดที่ 8.3 m/s

2. ต่อเข้ากับวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และลดระดับแรงดันไฟฟ้า ให้อยู่ในระดับที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

3. ใช้โหลดความต้านทาน 40 โอห์มต่อเข้ากับเอาต์พุตของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์

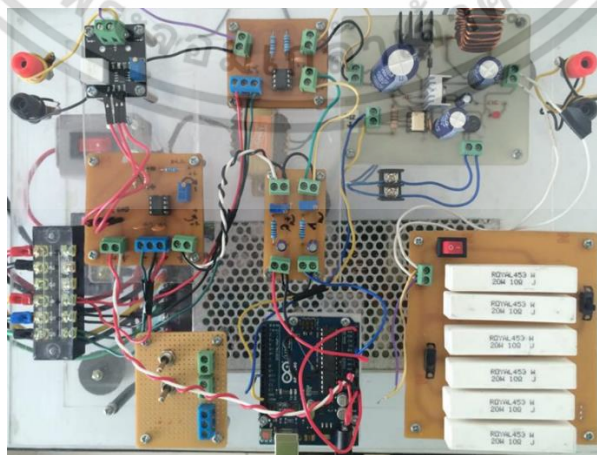
4. ใช้ออสซิลโลสโคปมาบันทึกกราฟกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า

5. ทดสอบที่ความเร็วลมต่างๆกัน

6. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โปรแกรมด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกต และบันทึกผลการทดลอง

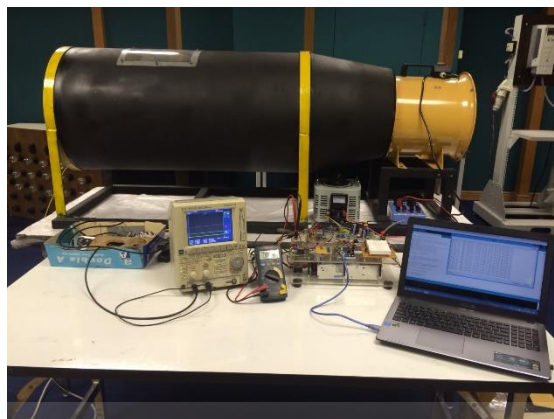
7. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โปรแกรมด้วยวิธีการควบคุมแบบพีไอและบันทึกผลการทดลอง

8. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โปรแกรมด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีร่วมกับการรบกวนและสังเกตและบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 4.1 วงจรไฟฟ้าสำหรับใช้ทำการทดลอง

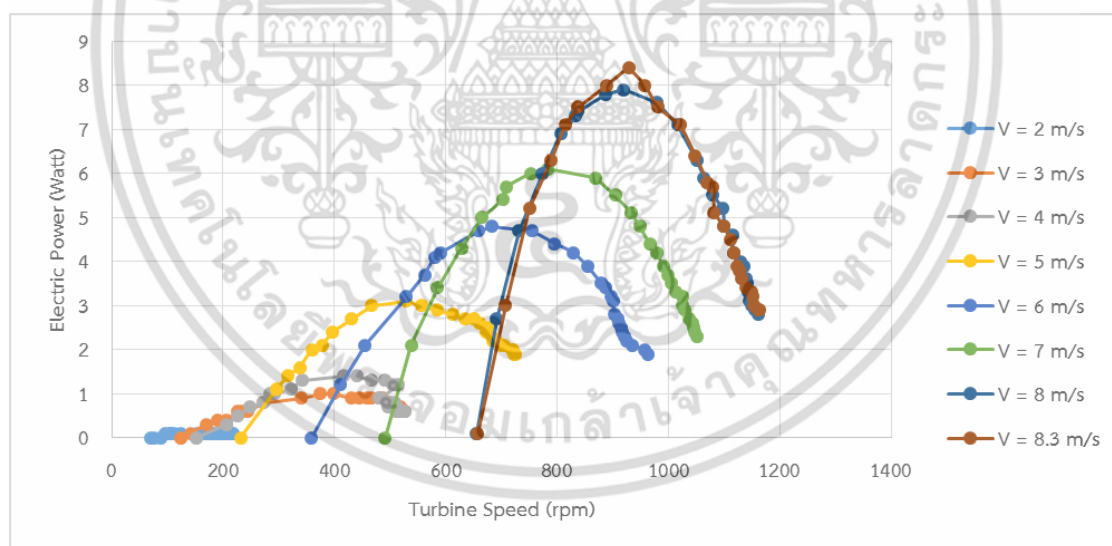
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเชื่อมต่อวงจรการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.2 กราฟคุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ

กังหันลมที่ออกแบบใช้ในการทดลองเป็นกังหันลมชนิดแกนนอน แบบหลายใบพัด จากรูปที่ 4.3 การทดสอบกังหันลมภายในอุโมงค์ลม เมื่อต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วจะเห็นได้ว่ากังหันลมแบบหลายใบพัดนั้นจะเริ่มหมุนที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที จะเกิดกำลังสูงสุดที่ 3.0 วัตต์ และเมื่อเราทำการเพิ่มความเร็วลมเป็น 3,4,5,...,8.3 m/s ค่ากำลังสูงสุดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



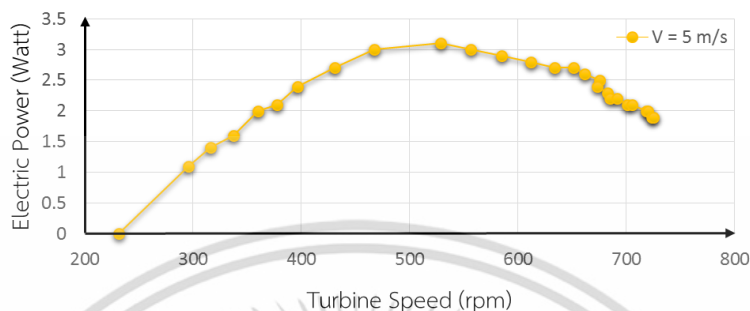
รูปที่ 4.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่างๆ

4.3 การออกแบบการทดลองในติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ

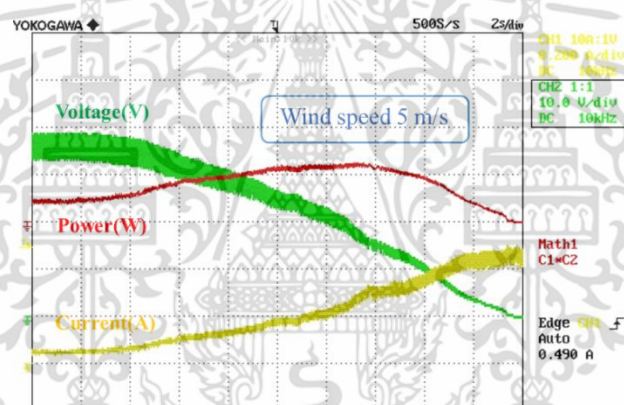
การทดสอบในงานวิจัยมีด้วยกัน 3 วิธีการ ได้แก่ การติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการรบกวน และสังเกตแบบทั่วไป การติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอ และการติดตามกำลังไฟฟ้าที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอด้วยวิธีการพีชชี โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ลักษณะ คือ ทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าในแต่ละวิธีที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5m/s , 7m/s และการทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าในแต่ละวิธีที่ความเร็วลมเปลี่ยนทันทีทันใด

4.3.1 กราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลม 5 m/s



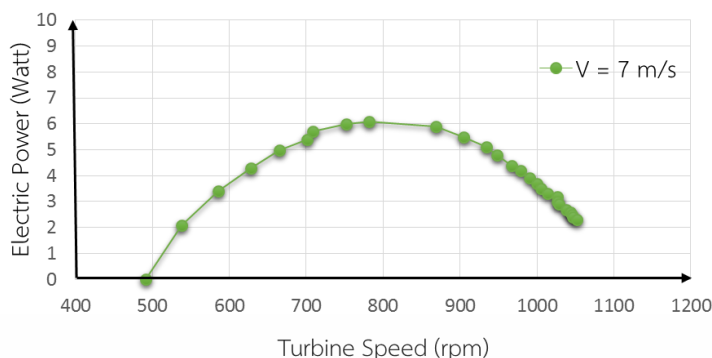
รูปที่ 4.4 คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 m/s



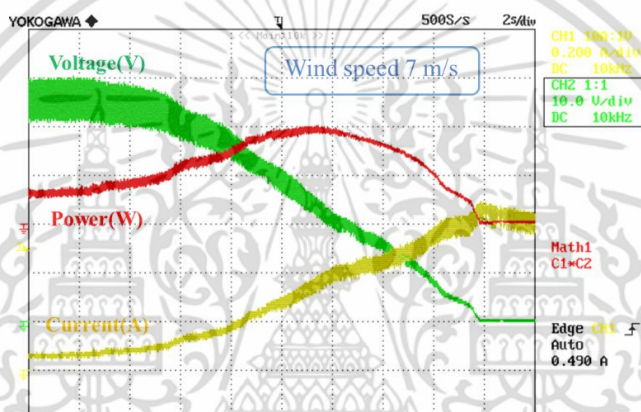
รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้า แรงดันและกระแสที่ได้จากการเปลี่ยนความต้านทาน ที่ความเร็วลม 5 m/s (ไม่ต่อวงจรMPPT)

จากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟคุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วโรเตอร์ โดยกราฟจะเป็นเส้นโค้งที่มีจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงจุดเดียว เช่นเดียวกับรูปที่ 4.5 แสดงค่ากระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าจริง จากการเปลี่ยนค่าความต้านทานอย่างรวดเร็วที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

4.3.2 กราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลม 7 m/s



รูปที่ 4.6 คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 7 m/s



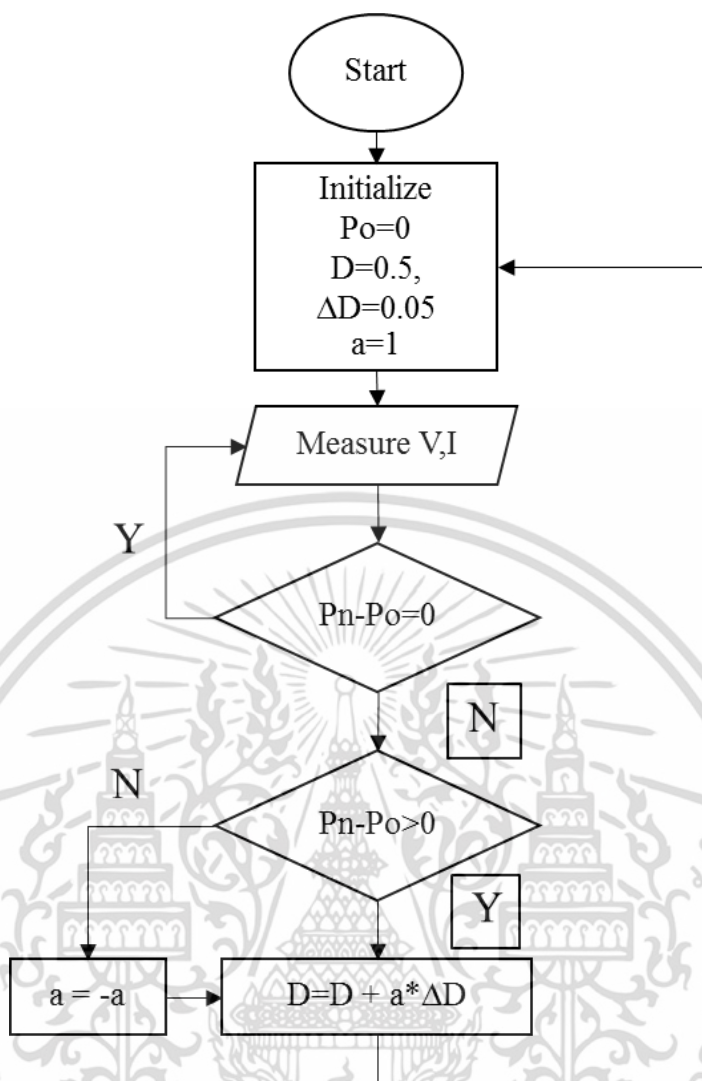
รูปที่ 4.7 กำลังไฟฟ้า แรงดันและกระแสที่ได้จากการเปลี่ยนความต้านทาน ที่ความเร็วลม 7 m/s (ไม่ต่อวงจร MPPT)

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟคุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วโรเตอร์ โดยกราฟจะเป็นเส้นโค้งที่มีจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงจุดเดียว เช่นเดียวกับรูปที่ 4.7 แสดงค่ากระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าจริง จากการเปลี่ยนค่าความต้านทานอย่างรวดเร็วที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

4.4 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O)

เทคนิครบกวนและสังเกตใช้การปรับค่าของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมและทำงานได้อย่างดีที่สุดในสภาวะที่เป็นสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามข้อเสียของเทคนิคนี้คือเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ยิ่งไปกว่านั้นระบบอาจมีการติดตามกำลังไฟฟ้าที่ผิดทิศทางได้หากเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมอย่างรวดเร็วรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของโหลด และผลของอัตราการเปลี่ยนดิวิต์ไวเคลจะส่งผลต่อความเร็วในการติดตามกำลังไฟฟ้าและการแกว่งของกำลังที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วย ซึ่งแผนผังการทำงานของวิธีการนี้แสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



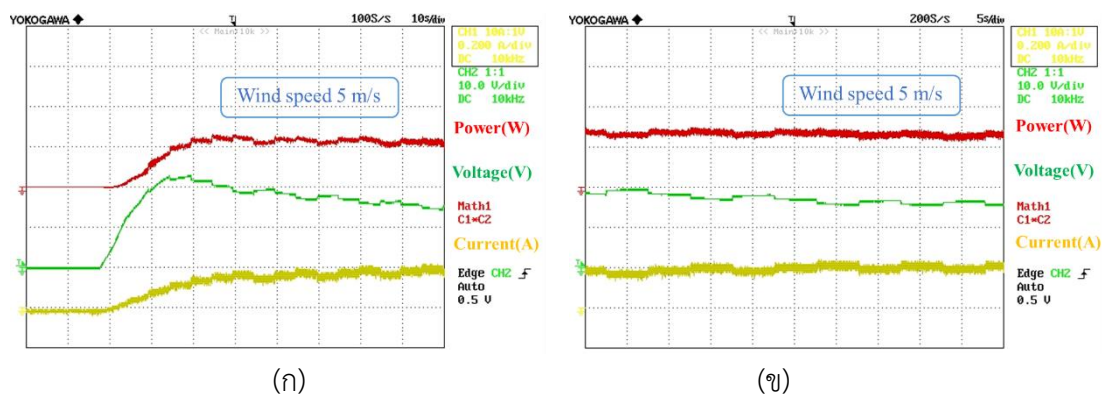
รูปที่ 4.8 แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของเทคนิคการรบกวนและสังเกต (P&O)

4.5 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกตภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ

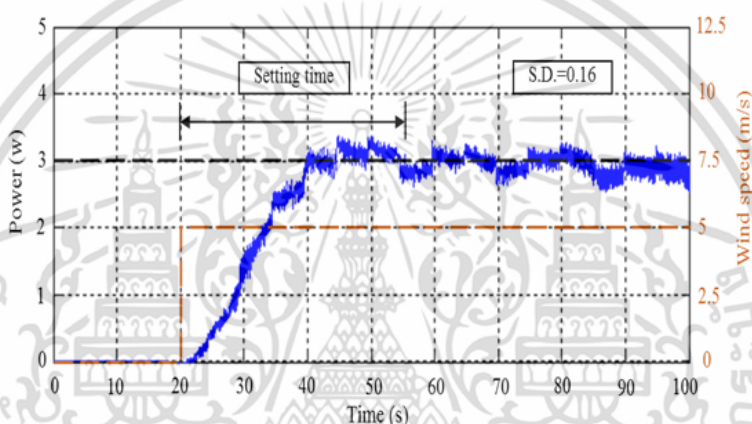
ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิล (ΔD) ที่ 0.05 และ 0.1 โดยทำการทดลองในสภาวะความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s และ 7 m/s ตามลำดับ

4.5.1 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 m/s

กรณีที่ อัตราการเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.05



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวิตีไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที



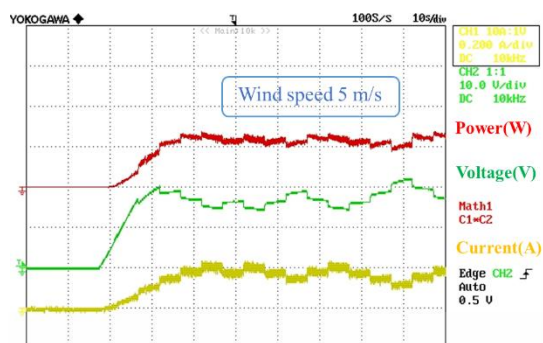
รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิวิตีไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.9 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดง เวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 4.9 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะคง ตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 4.9 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิวิตีไซเคิล (ΔD) เท่ากับ 0.05 ภายใต้สภาวะความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ระบบ ติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s ดังรูป ที่ 4.4 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆลดลง ในขณะที่ กระแสจะค่อยๆเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดันจะเป็น ลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

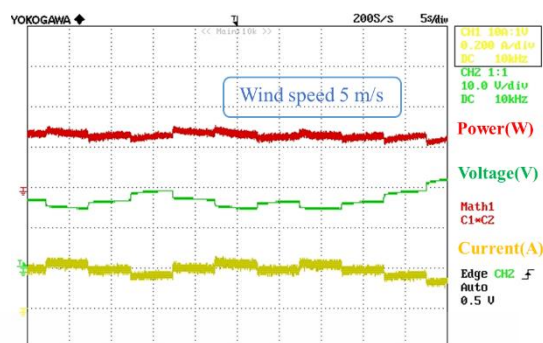
จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.10 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตาม กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 35 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ อัตราการเปลี่ยนค่าตัวชี้เซลล์ เท่ากับ 0.1

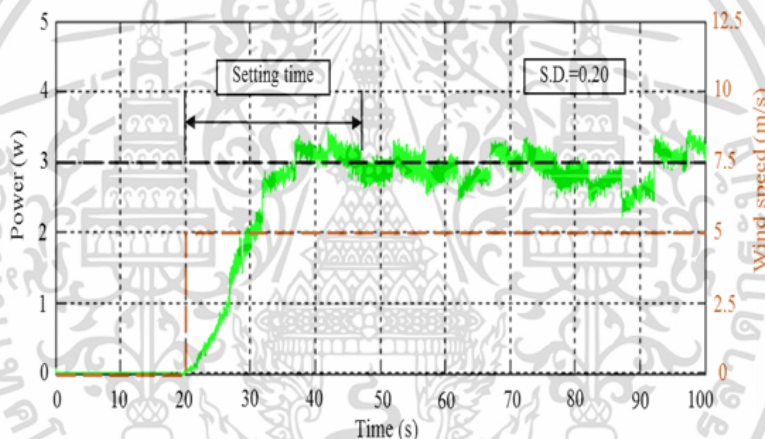


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนตัวชี้เซลล์ เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนตัวชี้เซลล์ เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.11 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดง เวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 4.11 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะ คงตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 4.11 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของ กำลังไฟฟ้า โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงตัวชี้เซลล์ (ΔD) เท่ากับ 0.1 ภายใต้สภาวะความเร็วลม เฉลี่ยคงที่ 5 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้า ที่ระบบติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดัน จะเป็นลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.12 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตาม

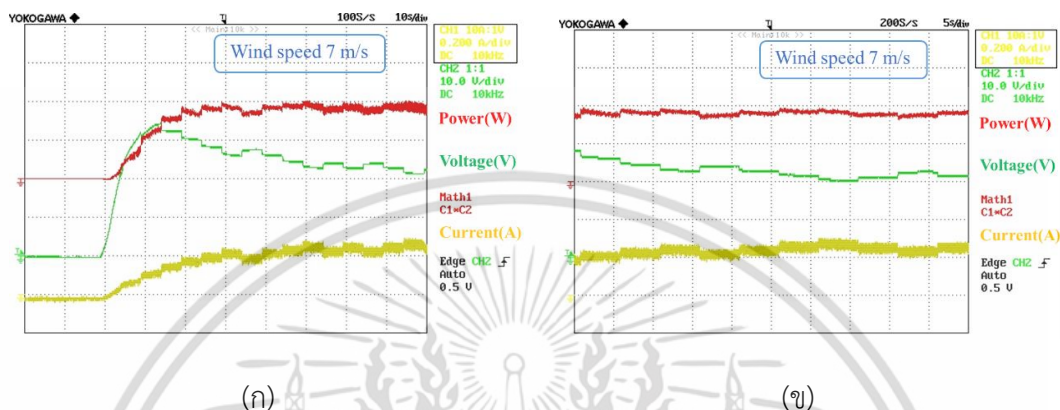
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้เห็นเอกสารนี้แล้ว กรุณาอย่าเผยแพร่ให้ผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

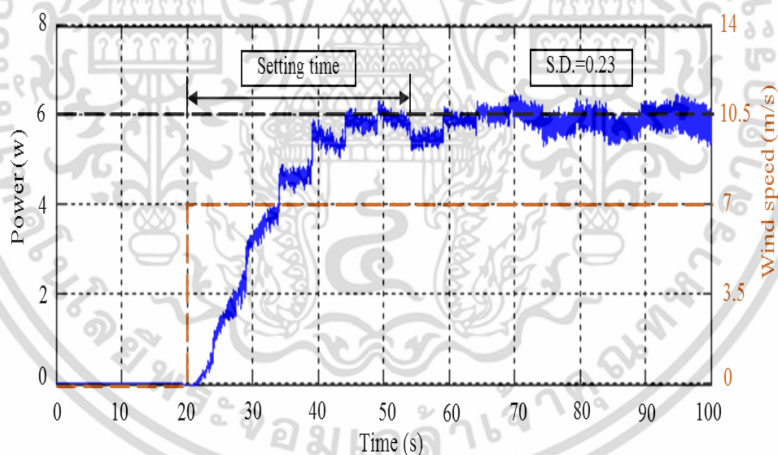
กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 28 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.2

4.5.2 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 7 m/s

กรณีที่ อัตราการเปลี่ยนค่าดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0.05



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที



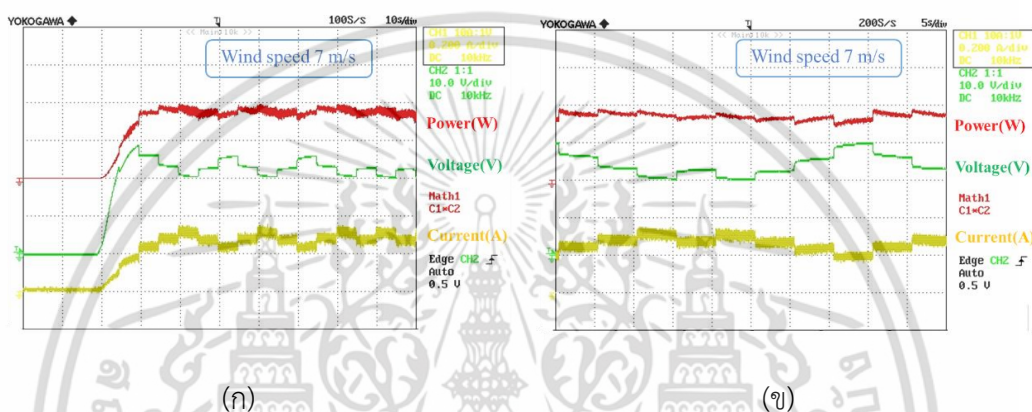
รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.13 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดง เวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 4.13 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะ คงตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 4.13 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของ กำลังไฟฟ้า โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (Δ) เท่ากับ 0.05 ภายใต้สภาวะความเร็วลม เฉลี่ยคงที่ 7 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้า ที่ระบบติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 7 m/s เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

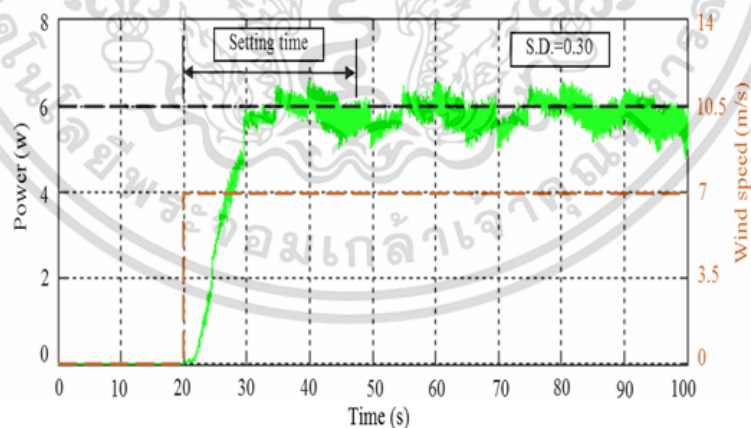
m/s ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 6 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดัน จะเป็นลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.14 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 34 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.23

กรณีที่ อัตราการเปลี่ยนค่าดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0.1



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้ อัตราการเปลี่ยนดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

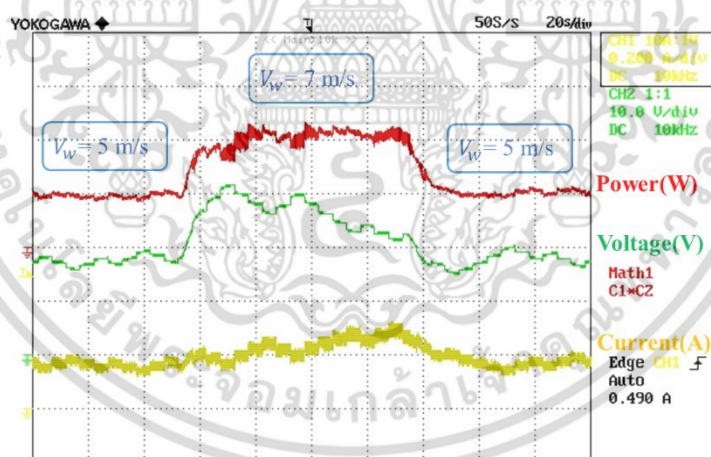
จากรูปที่ 4.15 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดง เวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 4.15 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะ คงตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 4.15 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้า โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) เท่ากับ 0.1 ภายใต้สภาวะความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 7 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ระบบติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 7 m/s ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 6 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดันจะเป็นลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

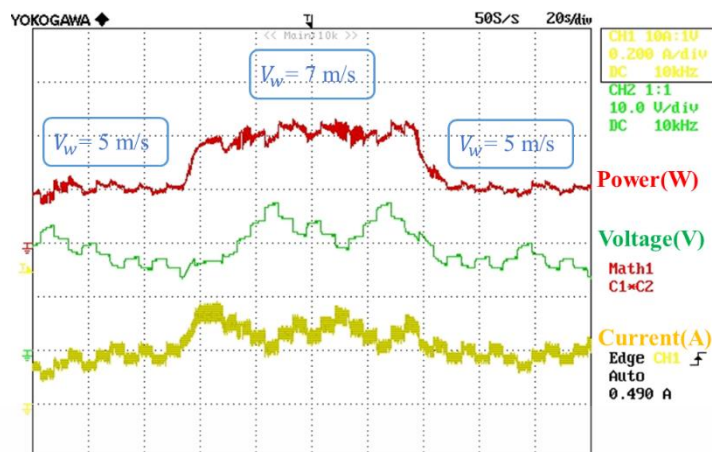
จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.16 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 28 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.3

4.6 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกต ภายใต้ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากการปรับเปลี่ยนความเร็วลมแบบทันทีทันใด จากการเพิ่มความเร็วลมเฉลี่ย 5 m/s ไปที่ 7 m/s และลดความเร็วลมมาที่ 5 m/s อีกครั้ง เพื่อทดสอบการทำงานของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบธรรมดาที่มีการใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล 0.05 และ 0.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกต โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล 0.05



รูปที่ 4.18 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและ
สังเกต โดยใช้อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล 0.1



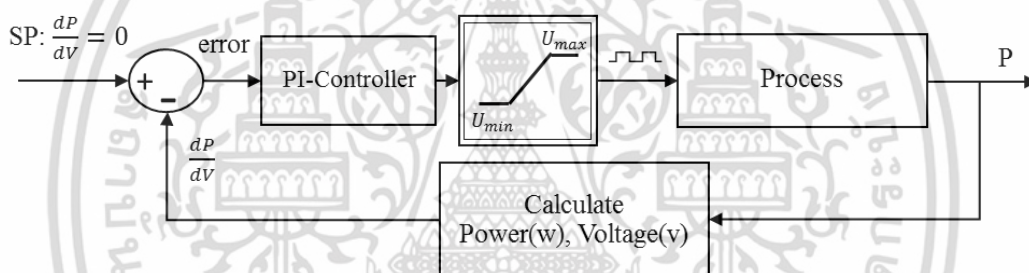
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

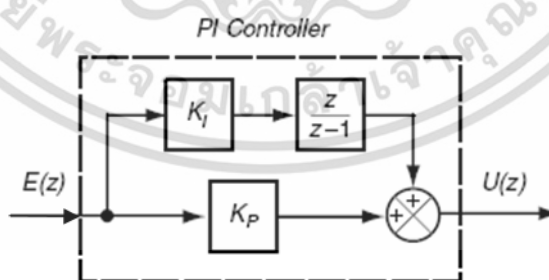
การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยตัวควบคุมพีไอ

5.1 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller)

ตัวควบคุมพีไอ ใช้วิธีการหาค่าอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าขาออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เมื่อค่าอนุพันธ์มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าจุดทำงานอยู่ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้าไม่เท่ากับศูนย์จะทำการเพิ่มหรือลดค่าตัวตั้งไซเคิลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าตามค่าความผิดพลาด (error) จนกระทั่งจุดทำงานวิ่งเข้าสู่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีนี้มีข้อดีคือ เมื่อเข้าสู่จุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะคงตัว ระบบจะมีการแกว่งที่น้อย และได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงค่าสูงสุดมาก แต่การปรับค่าเกนของตัวควบคุมเป็นไปได้ยาก เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนค่าเกน K_p และ K_i จะต้องถูกคำนวณใหม่อีกครั้ง วิธีนี้ใช้เพียงการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เช่นเดียวกับวิธีการรบกวนและสังเกต ซึ่งจะช่วยลดปัญหาในการใช้เซ็นเซอร์ทางกลอีกด้วย ซึ่งแผนผังการทำงานของวิธีการนี้แสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller)



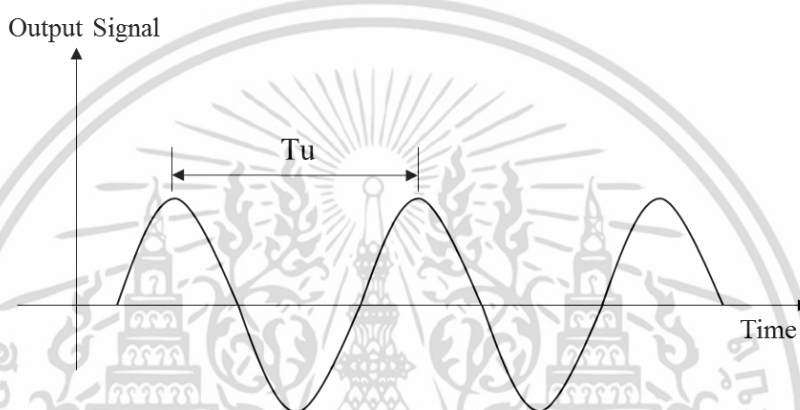
รูปที่ 5.2 ตัวควบคุมแบบ PI

รูปที่ 5.2 แสดงด้านในของบล็อก PI-Controller ซึ่งประกอบด้วยตัวเกน K_p และ K_i อินพุตของตัวควบคุม คือ ค่าความผิดพลาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้า จุดเซตพอยต์ของการทำงานคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เอาต์พุตของตัวควบคุม คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียลของระบบในลำดับขั้นตอนถัดไป

5.2 เทคนิคการปรับจูนตัว PI-Controller ในงานวิจัย

ตัวควบคุมที่ใช้กำหนดค่าเพิ่ม-ลด ดิฟเฟอเรนเชียล ถูกกำหนดโดยส่วนอัตราขยาย และส่วนของปฏิพันธ์ในตัวควบคุม โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการของ Ziegler and Nichols เพื่อหาค่า K_p และ K_i ซึ่งทำการเพิ่มค่าเกณฑ์ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) ให้มีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบเริ่มมีการแกว่ง (Oscillate) ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) คงที่ ดังรูปที่ 5.3 ณสภาวะนี้ระบบเริ่มไม่มีความสมดุล (Unstable)



รูปที่ 5.3 การวัดคาบเวลาการแกว่งในการปรับค่าเกณฑ์ตัวควบคุมด้วยวิธีการวิฤจักรท้ายสุด

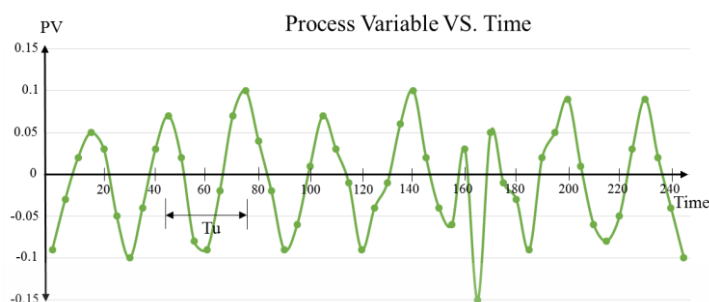
เมื่อได้ค่า K_u และ T_u ตามวิธีการของ Ziegler and Nichols นำค่าที่ได้แทนในตารางที่ 5.1 จะได้ค่าเกณฑ์ K_p และ K_i ที่ต้องการ

ตารางที่ 5.1 ค่าเกณฑ์ตัวควบคุมโดยใช้วิธีการวิฤจักรท้ายสุดที่ใช้คำนวณ

Ziegler-Nichols method			
Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.5 \cdot K_u$	-	-
I	$0.45 \cdot K_u$	$1.2 / T_u$	-
D	$0.6 \cdot K_u$	$2 / T_u$	$T_u / 8$

การทำ Ultimate gain ตามวิธีการของ Ziegler - Nichols นั้นจะปรับ gain K_p จนเอาต์พุตระบบเริ่มเกิดการแกว่ง ซึ่งตามระบบควบคุมในบทความความต้องการจุด Maximum ของ Power ซึ่งเป็นจุดที่ $dP/dV = 0$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เอาต์พุตระบบคือ ค่า dP/dV เพียงแต่ค่าคำสั่งเป็น 0 เท่านั้น (dP/dV) ดังนั้นการดูว่าเอาต์พุตระบบนั้นแกว่งแล้วต้องดูจากค่าของ dP/dV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทดสอบการควบคุมที่ค่าความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s เพื่อหาค่า K_p ที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการแกว่งของค่า PV คงที่



รูปที่ 5.4 คาบเวลาการแกว่งในการปรับค่าเกนในงานวิจัย

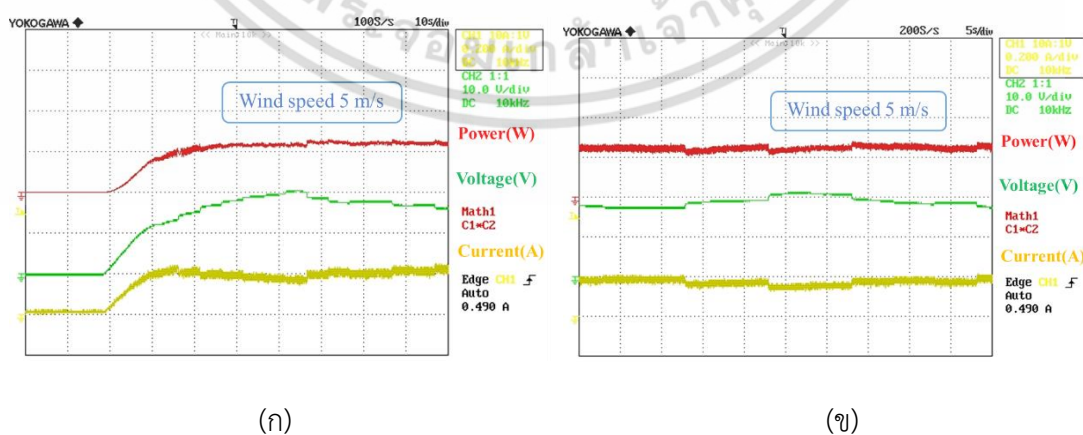
ในรูปที่ 5.4 แสดงการปรับค่า K_p จนเกิดการแกว่ง (Oscillate) ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) คงที่ โดยสังเกตจากค่าเอาต์พุตของระบบตัวควบคุม ได้แก่ ค่าดีวีดีไซเคิลของแต่ละรอบการทำงาน ซึ่งค่า K_u ที่ได้จะเท่าปรับค่า คือ 700 และค่า T_u ที่ได้จะเท่ากับ 60 s ตามตารางที่ 5.1 เมื่อแทนค่าดังกล่าวในตาราง จะ ได้ค่า K_p เท่ากับ 350 และ K_i เท่ากับ 72

5.3 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีโอภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ

ทำการทดลองโดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีโอ โดยทำการทดลองในสภาวะความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s และ 7 m/s ตามลำดับ

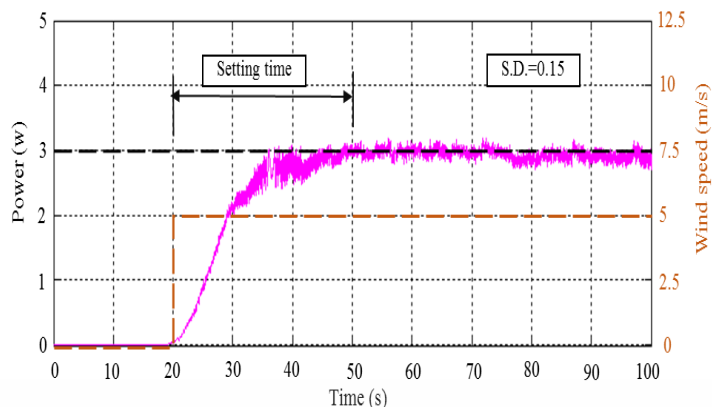
5.3.1 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 m/s

กรณี เทคนิคการควบคุมแบบพีโอ



รูปที่ 5.5 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีโอ ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



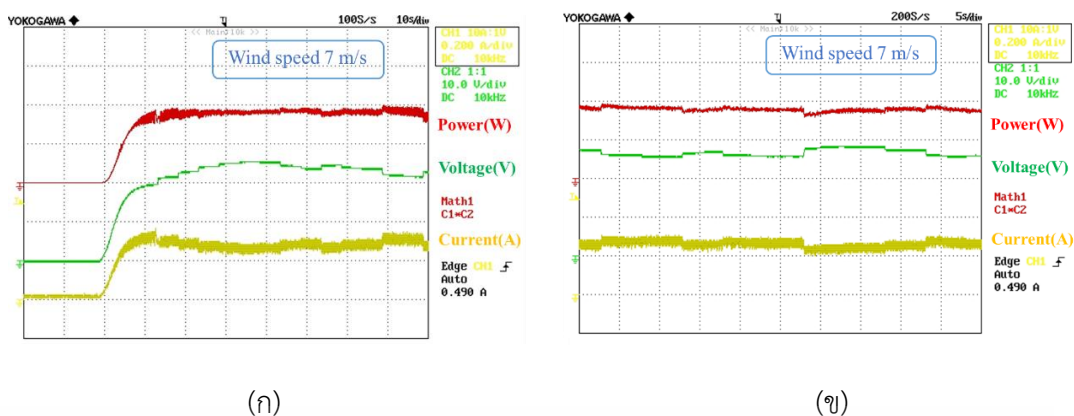
รูปที่ 5.6 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 5.5 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดง เวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 5.5 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะคง ตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 5.5 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยใช้ตัวควบคุมพีไอในการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) ภายใต้สภาวะความเร็วลม เฉลี่ยคงที่ 5 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้า ที่ระบบติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดัน จะเป็นลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

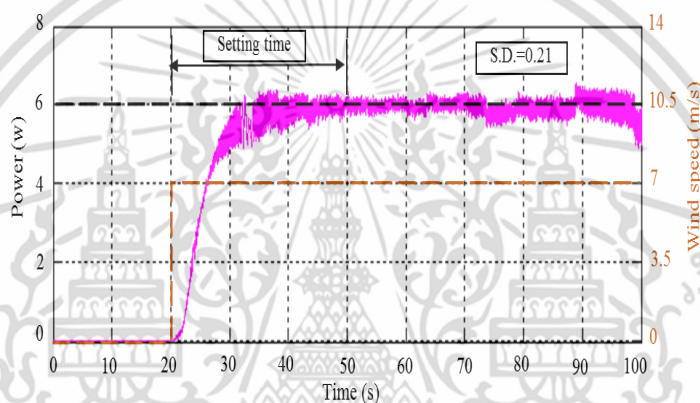
จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 5.6 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตาม กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.15

5.3.2 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 7 m/s

กรณี เทคนิคการควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.7 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีโอ ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.8 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีโอ ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

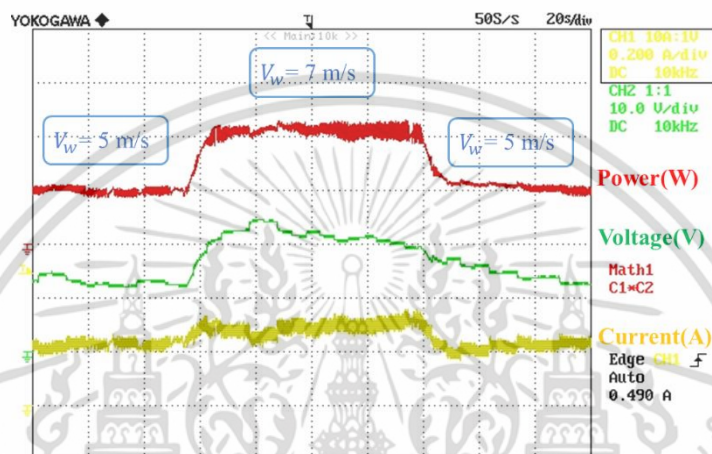
จากรูปที่ 5.7 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดง เวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 5.7 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะคง ตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 5.7 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยใช้ตัวควบคุมพีโอในการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) ภายใต้สภาวะความเร็วลม เฉลี่ยคงที่ 7 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้า ที่ระบบติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 7 m/s ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 6 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดัน จะเป็นลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 5.8 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตาม กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบน มาตราฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอภายใต้ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 5.9 แสดงกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากการปรับเปลี่ยนความเร็วลมแบบทันทีทันใด จากการเพิ่มความเร็วลมเฉลี่ย 5 m/s ไปที่ 7m/s และลดความเร็วลมมาที่ 5m/s อีกครั้ง เพื่อทดสอบการทำงานของวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.9 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการควบคุมแบบฟัซซี

6.1 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy logic control)

การควบคุมการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยในการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมนั้นจะใช้การควบคุมการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิฟเฟอเรนเชียลที่เท่าเดิมตลอดการควบคุม โดยถ้าใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) ที่มีค่ามากเกินไปจะทำให้เกิดการแกว่งที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากแต่จะใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันถ้าใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) ที่มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการแกว่งที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำ ขณะเดียวกันจะใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้า โดยเทคนิคที่นำเสนอในบทความนี้คือ ตัวติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้การควบคุมแบบฟัซซีควบคู่กับการรบกวนและสังเกต (Fuzzy based P&O MPPT) เพื่อปรับจูนค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) ให้มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งทำให้การติดตามกำลังไฟฟ้ามีความรวดเร็ว อีกทั้งลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อกำลังไฟฟ้าอยู่ใกล้จุดสูงสุด

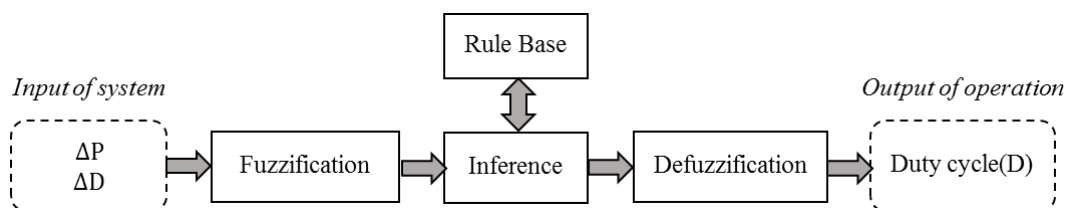
การควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการฟัซซีลอจิก จะทำให้ระบบมีคุณสมบัติที่ดีมากขึ้นในด้านต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น มีความเสถียร เนื่องจากกฎพื้นฐานของฟัซซีถูกสร้างโดยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากและซับซ้อน รูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างการควบคุมแบบฟัซซี เป็นส่วนหนึ่งในการวิธีการของการควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วนด้วยกันคือ กระบวนการฟัซซิฟิเคชัน (fuzzification) กระบวนการอนุมาน (inference engine) และกระบวนการดีฟัซซิฟิเคชัน (defuzzification) โดยในเทคนิคที่นำเสนอได้นำค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) และค่าการเปลี่ยนแปลงของดิฟเฟอเรนเชียล(ΔD) มาเป็นอินพุตให้การควบคุมด้วยฟัซซี โดยเอาท์พุทของระบบจะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) ของระบบในลำดับถัดไป จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการรับและสังเกตซึ่งใช้เป็นตัวควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกังหันลมผลิตไฟฟ้า สำหรับแผนผังการทำงาน (Flow chart) การทำงานของเทคนิคที่นำเสนอ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 สมการของตัวแปรอินพุทของระบบฟัซซีลอจิกแสดงในสมการที่ (6.1) ถึง (6.3)

$$P = P(k) * D(k) \tag{6.1}$$

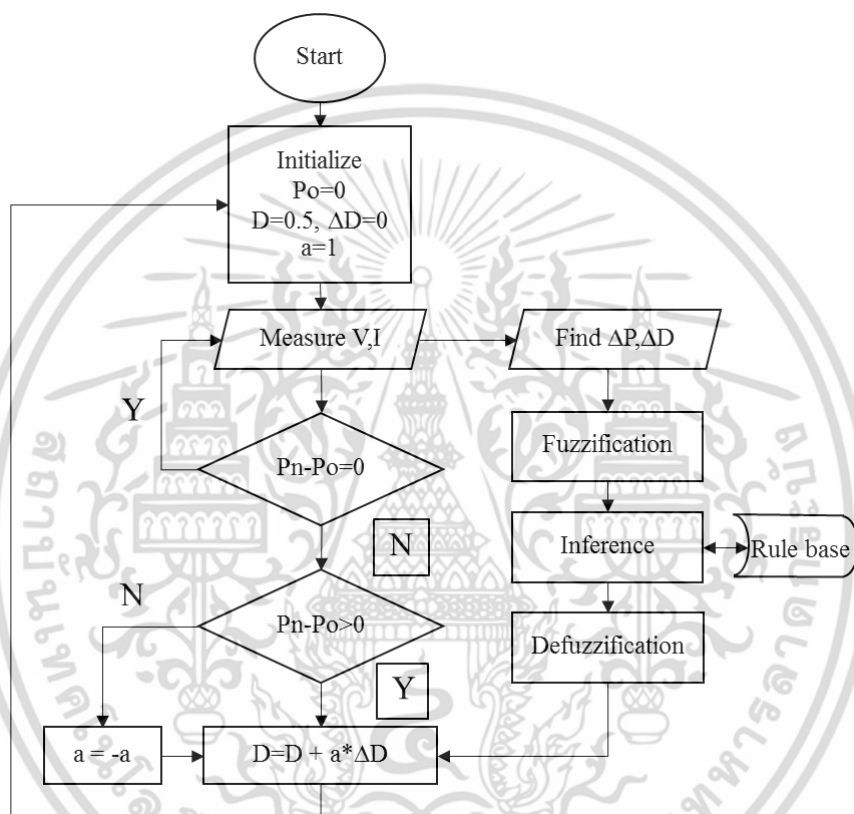
$$\Delta P = P(k) - P(k - 1) \tag{6.2}$$

$$\Delta D = D(k) - D(k - 1) \tag{6.3}$$

เมื่อ k และ k-1 คือลำดับของการสุ่มที่ k และ k-1 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



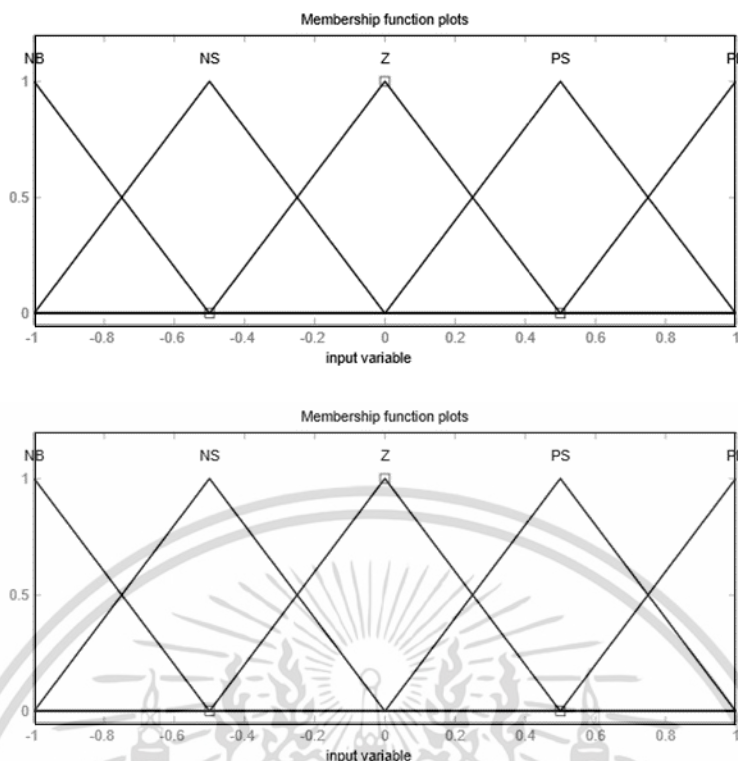
รูปที่ 6.1 โครงสร้างของการควบคุมแบบฟัซซี



รูปที่ 6.2 แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซี

บทความนี้ ในกระบวนการฟัซซีพีเคชั่นได้นำค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) มาเป็นอินพุตตัวแรกของระบบโดยทำการเปลี่ยนค่าที่เป็นตัวเลขให้เป็นตัวแปรเชิงภาษา (linguistic variable) ซึ่งประกอบด้วย 5 สับเซตย่อยๆ คือ NB (negative big), NS (negative big) , Z (zero) , PS (positive small) และ PB (positive big) และค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิวิตีไซเคิล (ΔD) มาเป็นอินพุตให้กับการควบคุมด้วยฟัซซี มาใช้เป็นอินพุตตัวที่สองของระบบโดยแบ่งเป็น 5 สับเซตเช่นกัน แบ่งได้ดังนี้ NB (negative big), NS (negative big) , Z (zero) , PS (positive small) และ PB (positive big) ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตถูกแสดงดังรูปที่ 6.3 โดยค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิวิตีไซเคิล (ΔD)เป็นเอาต์พุตของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต (ΔP) และ (ΔD)

การออกแบบกฎได้ออกแบบโดยใช้พื้นฐานความรู้จากการทดลองของผู้เขียน โดยค่าของกฎได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 โดยกฎจะบอกค่าน้ำหนักของฟังก์ชันสมาชิกของ (ΔP) และ (ΔD) เมื่อได้ค่าความเป็นสมาชิกจากกราฟของแต่ละอินพุตแล้ว ค่าน้ำหนักของฟังก์ชันสมาชิกจะเป็นไปตามกฎการควบคุมแบบฟuzzyดังแสดงในตารางที่ 6.2 โดยเครื่องหมายการเพิ่มหรือลดของตัวชี้ไอเคิลจะเป็นไปตามกระบวนการของการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบรบกวนและสังเกต ในส่วนฟuzzyจะบอกขนาดการเปลี่ยนค่าตัวชี้ไอเคิลที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการเท่านั้น

ตารางที่ 6.1 ค่าน้ำหนักของฟังก์ชันสมาชิก

Membership function	ΔD weight
VS(very small)	0.01
S(small)	0.05
M(medium)	0.1
B(big)	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 กฎการควบคุมแบบฟัซซี

5x5		ΔP				
		NB	NS	Z	PS	PB
ΔD	NB	B	M	S	M	B
	NS	M	S	VS	S	M
	Z	S	S	VS	S	S
	PS	M	S	VS	S	M
	PB	B	M	S	M	B

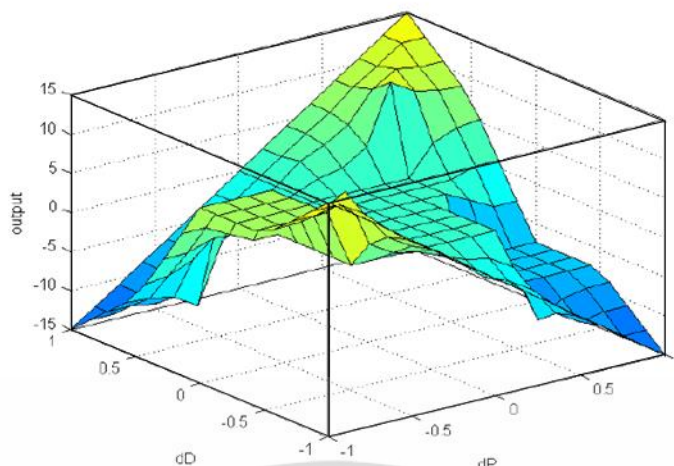
กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชัน ใช้เทคนิค (Sugeno's method) ซึ่งใช้งานง่ายและรวดเร็ว ซึ่งใช้การประมวลผลที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน โดยในบทความนี้ได้โปรแกรมฟัซซีลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนของอุปกรณ์การประมวลผล ในส่วนของการคำนวณเพื่อหาค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงขนาดของดิวตี้ไซเคิล (ΔD) ของเอาต์พุตจากระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.4)

$$D(k) = \frac{\sum_{k=1}^m u^k w_k}{\sum_{k=1}^m w_k} \quad (6.4)$$

$$D(k) = D(k-1) + \Delta D_{fuzzy}(k) \quad (6.5)$$

เมื่อ $D(k)$ คือ เอาต์พุตของระบบ
 μ^k คือ ค่าผลจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตในอันดับที่ k
 w_k คือ ค่าน้ำหนักของกฎอันดับที่ k
 m คือ จำนวนของกฎ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 เอาร์ทพุต (ΔD) ในระบบสามมิติโดยใช้เทคนิค Sugeno ของระบบที่นำเสนอ

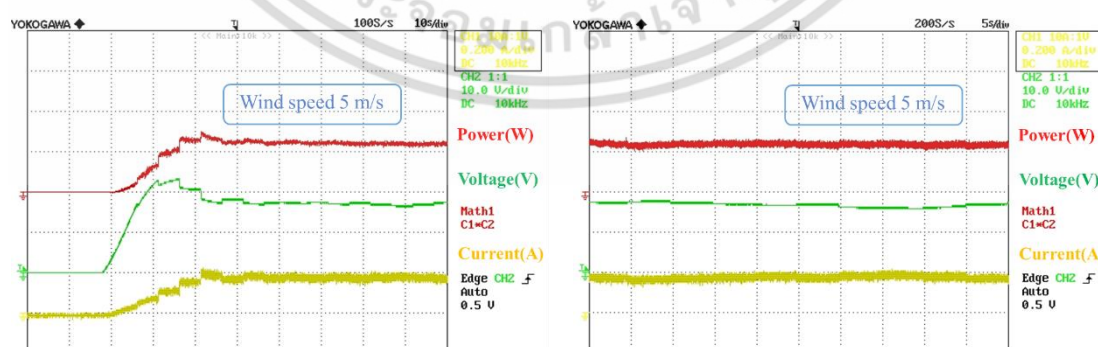
ค่าเอาร์ทพุตจากกระบวนการฟัซซีถูกนำไปในกระบวนการเพิ่ม-ลด ค่าตัวที่ใช้เคลิลของวงจร บั๊กคอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 6.4 เพื่อควบคุมการทำงานของกั๊กหันลมผลิตไฟฟ้าให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้า สูงสุด

6.2 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกั๊กหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซี ภายใต้ความเร็วลมค่าต่างๆ

ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีควบคู่กับวิธีการรบกวนและสังเกต โดยทำการทดลองในสภาวะความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s และ 7 m/s ตามลำดับ

6.2.1 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 5 m/s

กรณีที่ 1 เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีบนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต (Fuzzy based P&O)



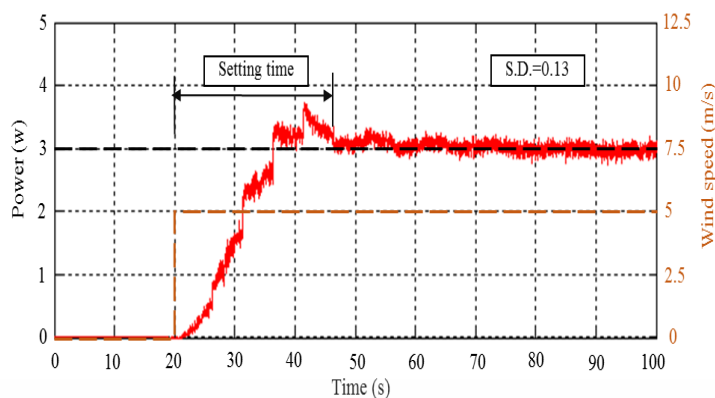
(ก)

(ข)

รูปที่ 6.5 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี

บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



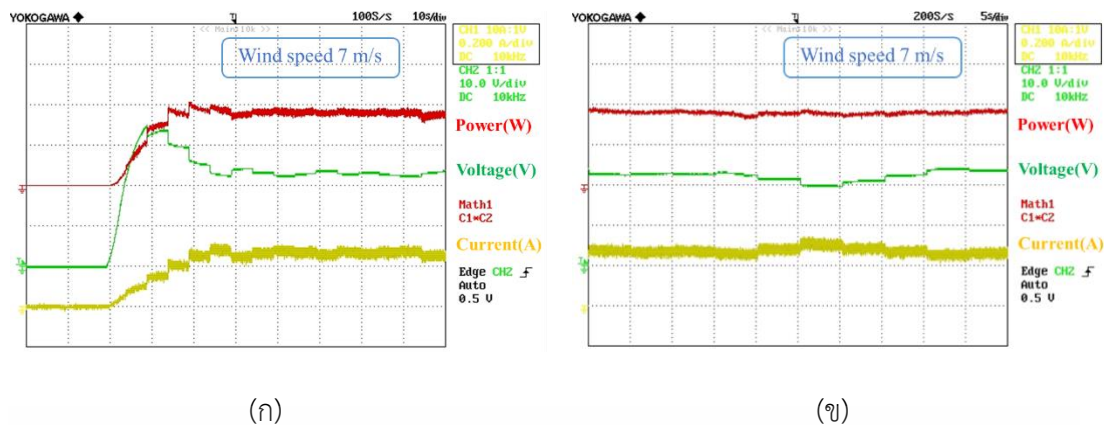
รูปที่ 6.6 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 6.5 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดง เวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 6.5 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะคงตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 6.5 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยใช้มีตัวควบคุมฟัซซีในการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (Δ) ภายใต้สภาวะความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ระบบติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 5 m/s ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดันจะเป็นลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

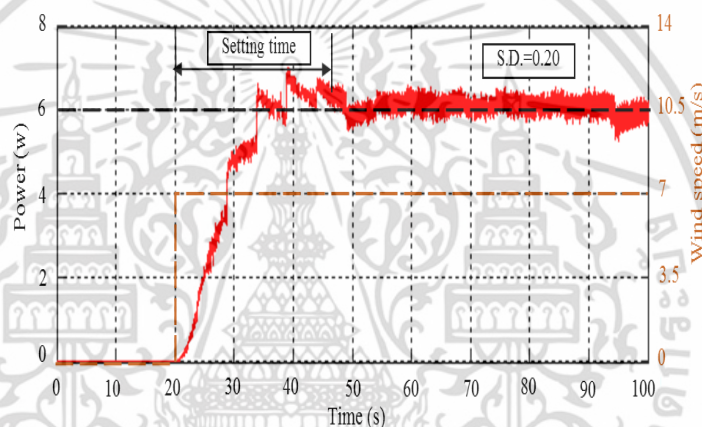
จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 6.6 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.13

6.2.2 การทดลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 7 m/s

กรณี เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีบนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต (Fuzzy based P&O)



รูปที่ 6.7 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที



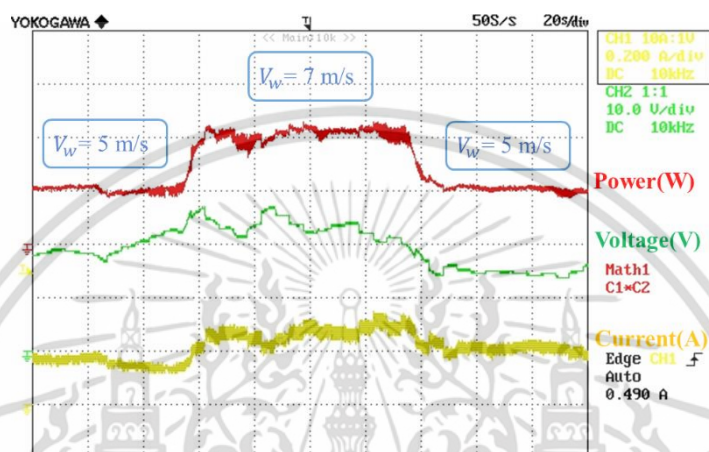
รูปที่ 6.8 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 6.7 (ก) แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อแสดงเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และรูปที่ 6.7 (ข) แสดงกราฟที่ทำการขยายในช่วงสภาวะคงตัว เมื่อระบบติดตามถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วของรูปที่ 6.7 (ก) เพื่อวัดค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยใช้มีตัวควบคุมฟuzzyในการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (ΔD) ภายใต้สภาวะความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 7 m/s โดยระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริง เนื่องจากค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ระบบติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ 7 m/s ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 6 วัตต์ โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลักษณะของกราฟกระแสและแรงดันจะเป็นลักษณะที่แกว่งอยู่ตลอดเวลา

จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตกราฟและคำนวณค่าผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 6.8 พบว่ากราฟของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้างช้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 26 วินาที และการแกว่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อดูการเกาะกลุ่มของข้อมูล พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.2

6.3 การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีควบคู่กับวิธีการรบกวนและสังเกตภายใต้ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 6.9 แสดงกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากการปรับเปลี่ยนความเร็วลมแบบทันทีทันใด จากการเพิ่มความเร็วลมเฉลี่ย 5 m/s ไปที่ 7m/s และลดความเร็วลมมาที่ 5m/s อีกครั้ง เพื่อทดสอบการทำงานของวิธีการควบคุมแบบฟัซซีควบคู่กับวิธีการรบกวนและสังเกต



รูปที่ 6.9 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

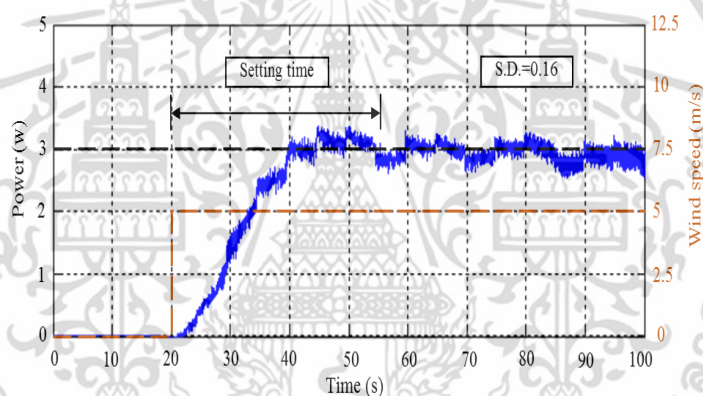
บทที่ 7

การเปรียบเทียบผลการทำงานของตัวควบคุมกึ่งอัตโนมัติ

ในบทนี้จะเสนอการเปรียบเทียบการทำงานของตัวควบคุมการติดตามกำลังสูงสุด แบบรบกวนและสั่งเกตแบบทั่วไป ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมฟuzzyควบคู่กับการรบกวนและสั่งเกตตามที่ได้ออกแบบในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5 ตามลำดับ โดยจะเปรียบเทียบความเร็วในการติดตามกำลังสูงสุด กำลังไฟฟ้าที่กึ่งอัตโนมัติผลิตได้ ณ ความเร็วลมเฉลี่ยค่าต่างๆ เทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจริงของระบบ

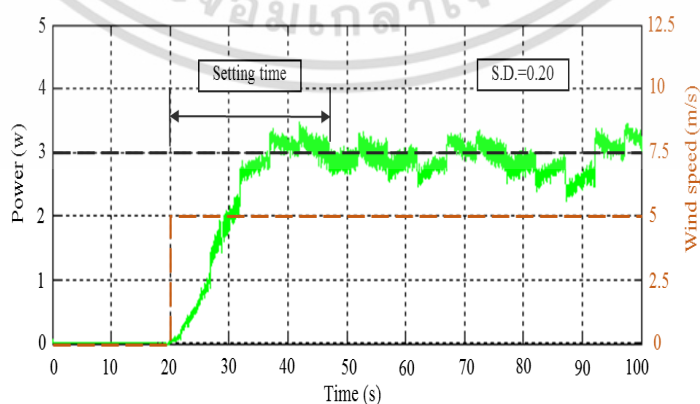
7.1 ผลการเปรียบเทียบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบที่ความเร็วลม 5 m/s

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาในบทที่ 4 บทที่ 5 และบทที่ 6 สามารถนำมาวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของแต่ละวิธีการที่ความเร็วลม 5 m/s ได้ดังรูปที่ 7.1-7.4



รูปที่ 7.1 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสั่งเกตโดยใช้

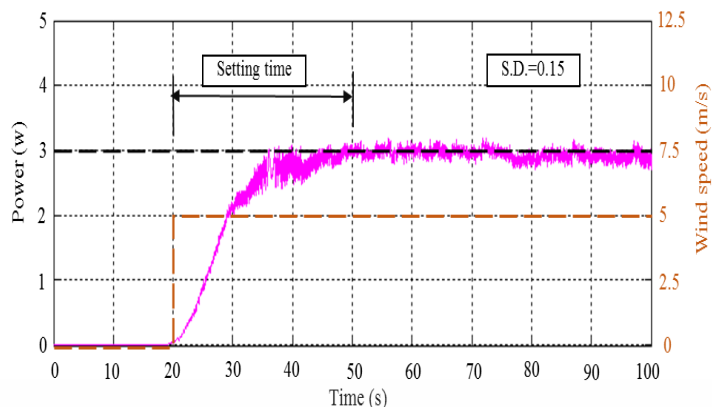
อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที



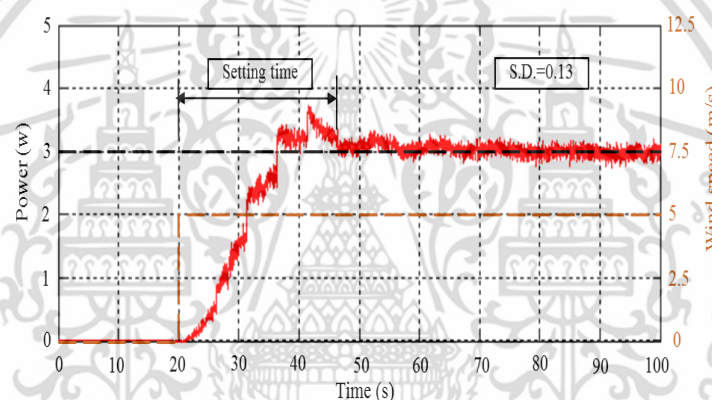
รูปที่ 7.2 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสั่งเกตโดยใช้

อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

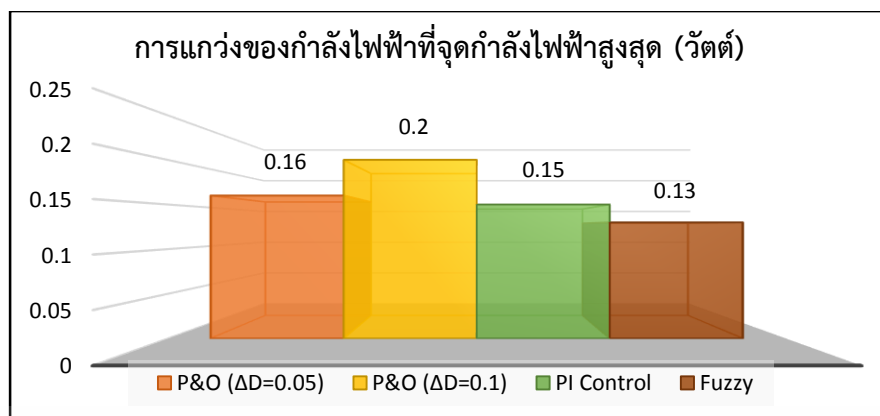


รูปที่ 7.3 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

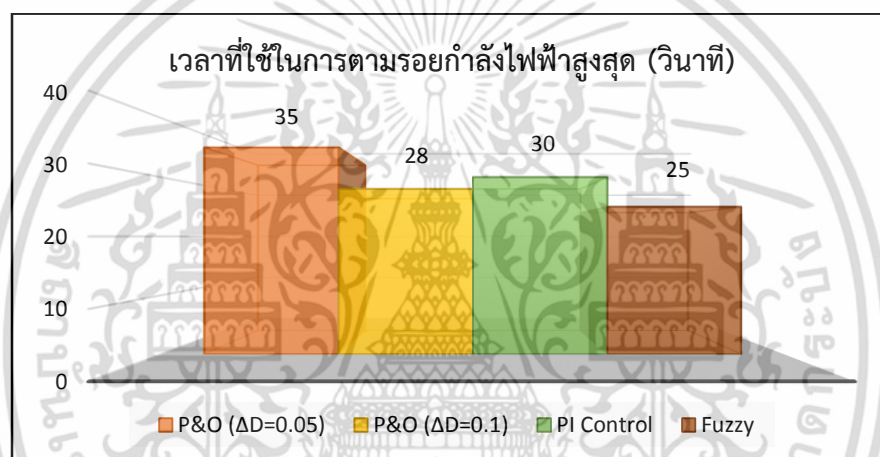


รูปที่ 7.4 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีซีซี บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

จากรูปด้านบนจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบพีซีซีสามารถติดตามกำลังงานสูงสุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการเพิ่ม-ลด ค่าตัวตั้งไซเคิลในช่วงกำลังเพิ่มขึ้นน้อยกว่า และยังให้ค่ากำลังที่สม่ำเสมอ มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ เมื่อกำลังไฟฟ้าเข้าใกล้จุดสูงสุด และ รองลงมาคือ การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบพีไอซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับพีซีซีลจก



รูปที่ 7.5 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุมที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที



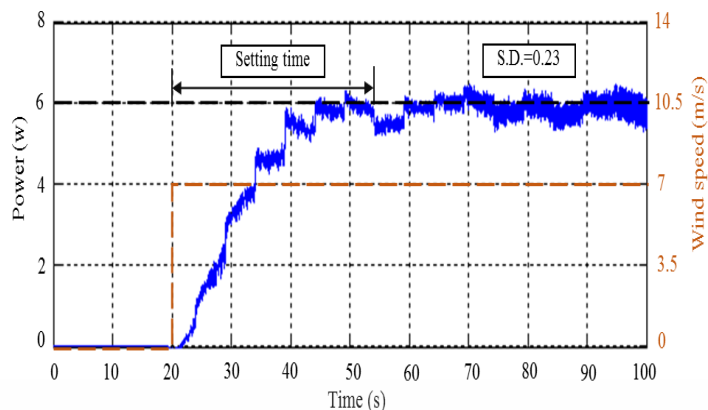
รูปที่ 7.6 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุมที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 7.5 และ 7.6 แสดงผลการเปรียบเทียบทั้งการแกว่งของกำลังและเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 3 เทคนิค ภายใต้สภาวะความเร็วลมเฉลี่ย 5 m/s ในรูปของผลการเปรียบเทียบแบบแผนภูมิแท่ง พบว่าเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีมีการแกว่งของกำลังที่ต่ำกว่าเทคนิคการรบกวนและสั่งเกต ในขณะที่ใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับเทคนิคการรบกวนและสั่งเกตที่ใช้ $\Delta D=0.1$ ซึ่งสรุปได้ว่าเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าเทคนิค P&O ธรรมดา

7.2 ผลการเปรียบเทียบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบที่ความเร็วลม 7 m/s

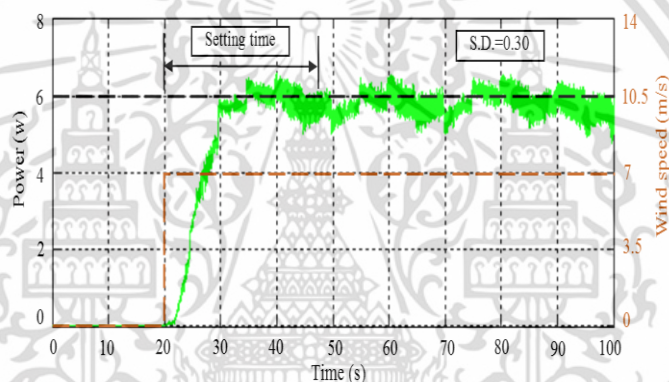
จากผลการทดสอบที่กล่าวมาในบทที่ 4 บทที่ 5 และบทที่ 6 สามารถนำมาวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของแต่ละวิธีการที่ความเร็วลม 7 m/s ได้ดังรูปที่ 7.7-7.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



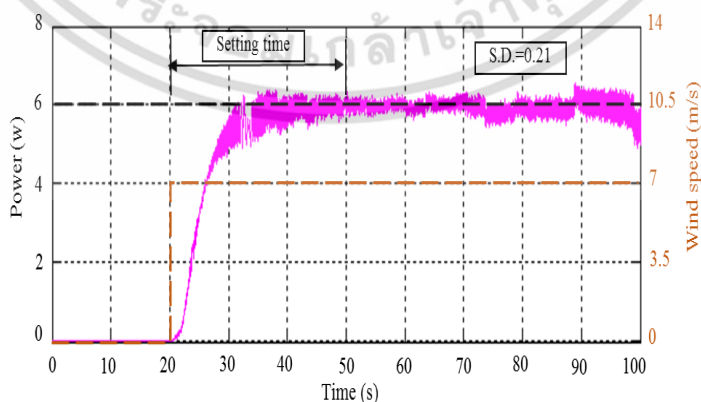
รูปที่ 7.7 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้

อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.05 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 7.8 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการรบกวนและสังเกตโดยใช้

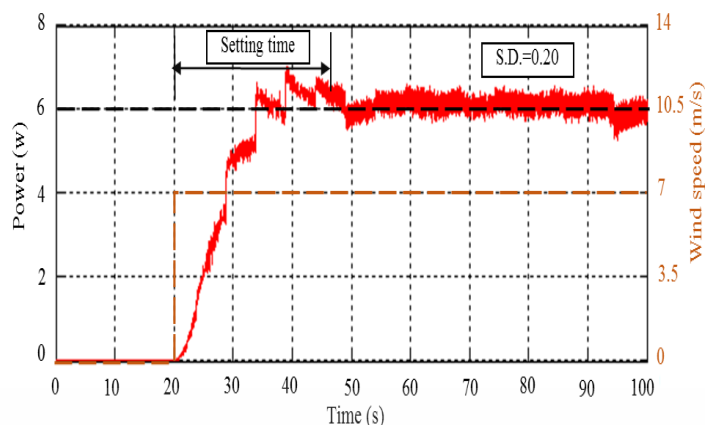
อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล เท่ากับ 0.1 ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 7.9 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบพีไอ

ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

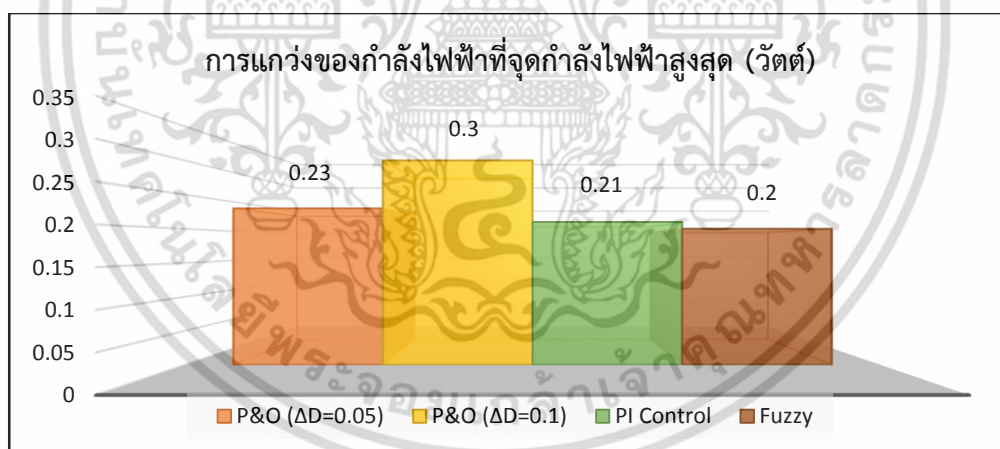
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.10 กำลังไฟฟ้าจากเทคนิคการควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy

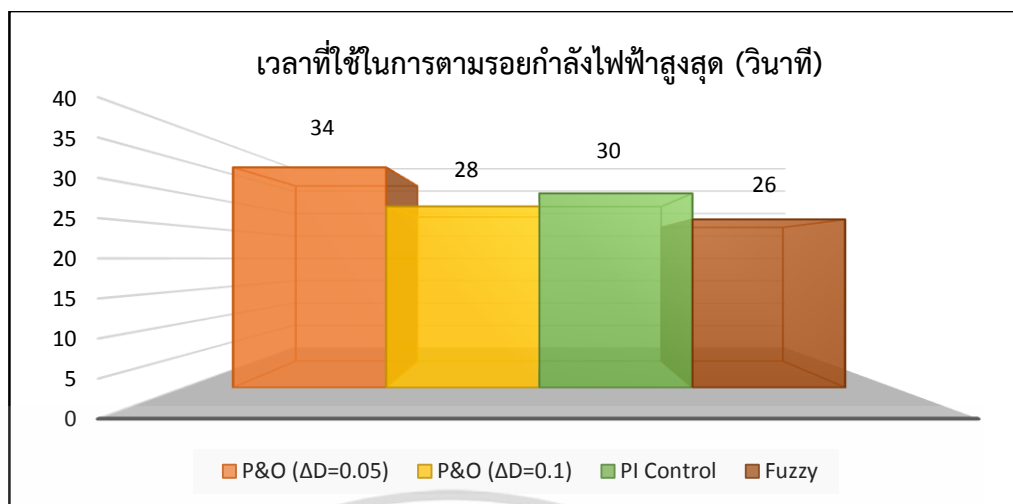
บนพื้นฐานของการติดตามและสังเกต ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

จากรูปด้านบนจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบฟuzzyสามารถติดตามกำลังงานสูงสุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการเพิ่ม-ลด ค่าตัวตั้งไซเคิลในช่วงกำลังเพิ่มขึ้นน้อยกว่า และยังให้ค่ากำลังที่สม่ำเสมอ มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ เมื่อกำลังไฟฟ้าเข้าใกล้จุดสูงสุด และ รองลงมาคือ การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบพีไอซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับฟuzzyลอจิก ซึ่งมีผลเช่นเดียวกับที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 7.11 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุม ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.12 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าในแต่ละการควบคุมที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 7.11 และ 7.12 แสดงผลการเปรียบเทียบทั้งการแกว่งของกำลังและเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง เทคนิค ภายใต้สภาวะความเร็วลมเฉลี่ย 37 m/s ในรูปของผลการเปรียบเทียบแบบแผนภูมิแท่ง พบว่าเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีมีการแกว่งของกำลังที่ต่ำกว่าเทคนิคการรบกวนและสั่งเกต ในขณะที่ใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับเทคนิคการรบกวนและสั่งเกตที่ใช้ $\Delta D=0.1$ ซึ่งสรุปได้ว่าเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าเทคนิค P&O ธรรมดา

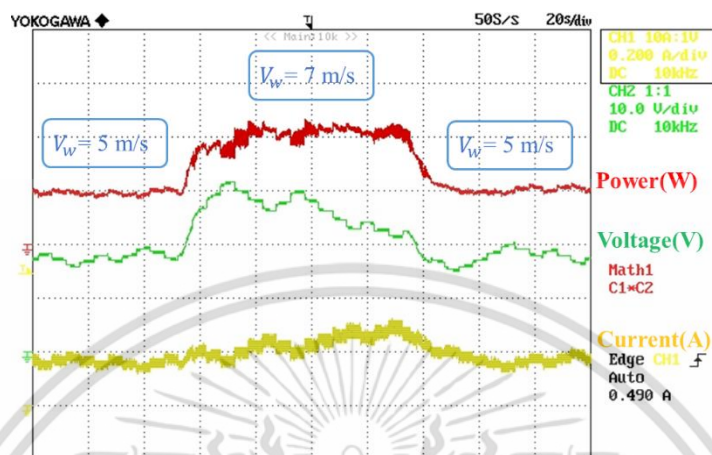
สรุปผลการทดลองการเปรียบเทียบผลการทดลองคุณลักษณะภายใต้สภาวะความเร็วลมแบบต่างๆ

จากผลการทดลองที่ทำการทดลองทั้ง 2 ค่าความเร็วลมทดสอบ แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการติดตามด้วยการควบคุมแบบฟัซซีรวมกับการรบกวนและสั่งเกตที่น่าเสนอ ทำให้ระบบเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำและใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่าเทคนิคการรบกวนและสั่งเกตแบบธรรมดา และการติดตามโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการดึงกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้น ระบบจะมีการสูญเสียอันเนื่องมาจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ลดลง จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เทคนิคฟัซซีที่น่าเสนอนี้สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาของเทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบรบกวนและสั่งเกตได้ โดยมีข้อสังเกตที่เกิดจากวิธีการฟัซซีลอจิกนั้นจะมีการเกิดค่าโอเวอร์ชูตมากกว่าวิธีการอื่น ซึ่งมีค่าสูงกว่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้น เป็นผลทางกลที่เกิดขึ้นเมื่อกังหันลมหมุนด้วยความเร็วสูงและมีการเพิ่มตัวตีไซเคิลมากขึ้นนั่นเอง

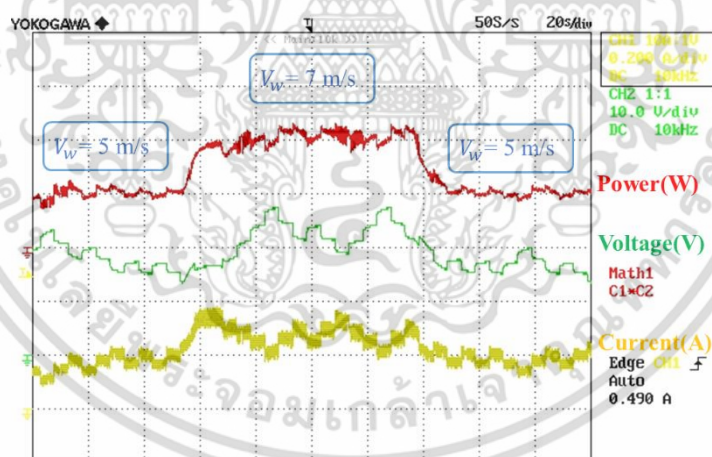
7.3 ผลการเปรียบเทียบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาในบทที่ 4 บทที่ 5 และบทที่ 6 สามารถนำมาวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของแต่ละวิธีการที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดที่ 5 m/s, 7 m/s และ 5 m/s ตามลำดับ ได้ดังรูปที่ 7.13-7.16

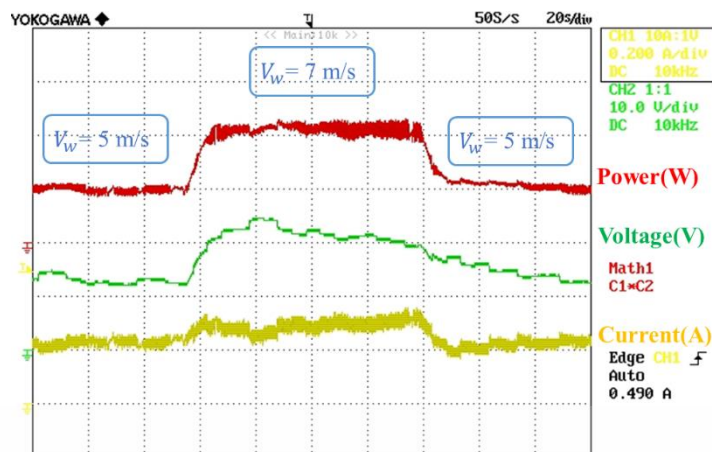


รูปที่ 7.13 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกต โดยใช้อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล 0.05

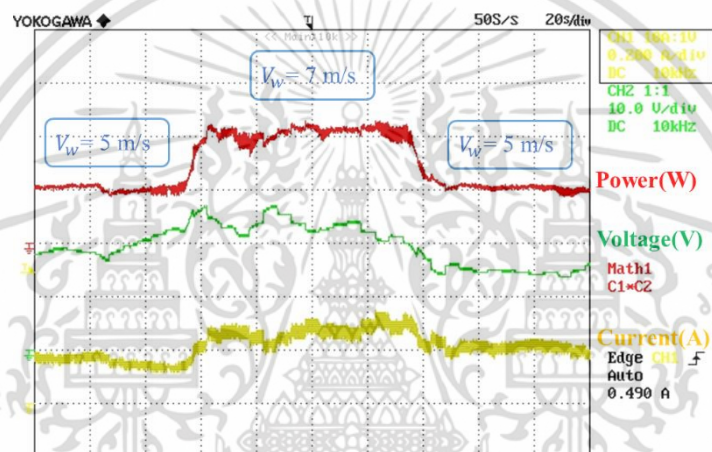


รูปที่ 7.14 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วลมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบการรบกวนและสังเกต โดยใช้อัตราการเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิล 0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.15 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีโอ



รูปที่ 7.16 ผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีซีลจิก

สรุปผลการทดลองคุณลักษณะภายใต้สภาวะที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.13-7.16 พบว่าทั้งเทคนิคที่ใช้การควบคุมแบบพีซีและการควบคุมแบบพีโอที่นำเสนอ สามารถควบคุมระบบให้มีค่าการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต่ำลงได้ และยังใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้น้อยลง แม้ว่าจะทดสอบภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วลมจาก 5m/s, 7m/s และ 5m/s ระบบยังคงสามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามเป้าหมาย ซึ่งจากผลดังกล่าวจะช่วยลดค่าความสูญเสียของระบบลดลง จึงสรุปได้ว่า เทคนิคพีซีที่นำเสนอนี้สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาของเทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าแบบรบกวนและสังเกตได้

บทที่ 8

สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

8.1 สรุปผลการทดลอง

จากการติดตามกำลังไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม, เทคนิคการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ และเทคนิคการควบคุมด้วยพีซี พบว่าทั้งสามเทคนิคสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจริง โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ติดตามได้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าจากกราฟคุณลักษณะที่ความเร็วลมนั้นๆ แต่การทำงานของวิธีการรบกวนและสังเกตที่ค่าการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียลสูงๆระบบจะเกิดการแกว่งสูง ค่ากำลังไฟฟ้าขาขึ้นมีโอกาสสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่านั้นได้ เนื่องจากผลทางด้านไดนามิกส์ของกังหันลม และจากการทดลองสำหรับตัวควบคุมแบบติดตามและสังเกตแบบทั่วไปพบว่า เมื่อเลือกใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (Δ) ค่าต่ำระบบจะใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาก แต่มีข้อดีคือจะมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อย ในทางกลับกันถ้าเลือกใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (Δ) ที่มีค่าสูง ระบบจะใช้เวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อยแต่มีข้อเสียคือจะมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาก ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงนำวิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบพีซีและวิธีการพีไอเข้ามาช่วยในการปรับการเปลี่ยนแปลงดิฟเฟอเรนเชียล (Δ) ซึ่งจะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับกฎที่สร้างขึ้นในกระบวนการของเทคนิคการควบคุมแบบพีซี และค่าความผิดพลาดของกระบวนการของตัวควบคุมพีไอที่นำเสนอ ผลที่ได้จากการทดลองของระบบและเทคนิคที่นำเสนอนั้นสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วขึ้น และมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่น้อยลงกว่าเทคนิคการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม และตัวควบคุมแบบพีไอให้ผลที่ดีกว่าเช่นกัน

8.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

1. ในการออกแบบตัวตรวจจับกระแส ควรออกแบบให้มีการเห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ชัดเจน เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับค่าที่ถูกต้องและแม่นยำในการประมวลผล เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะผลิตกระแสในระดับต่ำ ทำให้ตัวตรวจจับกระแสไม่สามารถตรวจสอบค่ากระแสได้อย่างชัดเจน
2. การแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลังเพื่อป้องกันการเกิดการลัดวงจร
3. การออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ควรออกแบบให้เหมาะสมกับระบบที่ใช้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและการสูญเสียที่เกิดในวงจร
4. การกำหนดค่าความถี่ในการสวิตช์ซึ่งมีผลต่อการออกแบบอุปกรณ์ ควรใช้ค่าความถี่สูงๆ เพื่อลดขนาดของวงจรคอนเวอร์เตอร์
5. การควบคุมความเร็วลมเป็นสิ่งที่ค่อนข้างยาก ควรทดสอบในสถานที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 แนวทางการพัฒนา

การติดตามกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลมขนาดเล็กที่สามารถใช้ได้จริงตามอาคารบ้านเรือนมีการศึกษาที่น้อยมาก การนำกังหันลมผลิตไฟฟ้ามาใช้ร่วมกับการติดตามกำลังไฟฟ้าควรมีการทดสอบจริงและสามารถใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซี่และตัวควบคุมแบบพีไอ นั้นยังมีค่าเวลาในการติดตามกำลังไฟฟ้านานมาก เมื่อนำมาใช้ในสภาวะจริงระบบอาจทำงานได้อย่างไม่ถูกต้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการศึกษาและพัฒนาในระดับต่อไปควรหาแนวทางแก้ปัญหาในเรื่องไดนามิกส์ของกังหันลมให้มีผลตอบสนองที่เร็วขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เทคโนโลยีพลังงานลม. [Online]. Available: <http://encos.co.th/articles/details/5>. 2014.
- [2] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 486-494, Apr. 2006.
- [3] Quoc-Nam Trinh and Hong-Hee Lee, “Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Tracking in PMSG-Based Wind Power Systems”, *ICIC 2010 6th International conference on intelligent computing*, pp. 543-553, Aug. 2010.
- [4] George Joseph, J. Chris Foreman, and Michael L. McIntyre, “A Variable Duty Cycle Maximum Power Point Tracking Algorithm for Wind Energy Conversion Systems”, *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, pp. 1 - 5, Jul. 2012.
- [5] Huynh Quang Minh, Nollet Frédéric, Essounbouli Najib, and Hamzaoui Abdelaziz, “Control of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine for Stand-Alone System using Fuzzy Logic”, *EUSFLAT-LFA 2011*, pp. 720-727, Jul. 2011.
- [6] Samir Raiyani, *Wind Energy*. [Online]. Available: https://dolcera.com/wiki/index.php?title=Wind_Energy_Background. 2011.
- [7] R. Kot, M. Rolak, and M. Malinowski, “Comparison of Maximum Peak Power Tracking Algorithms for a Small Wind Turbine”, *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 91, pp. 29-40, Apr. 2013.
- [8] M. Kesraoui, N. Korichi, and A. Belkadi, “Maximum Power Point Tracker of Wind Energy Conversion System”, *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2655-2662, May. 2010.
- [9] Yacine Daili, Jean-Paul Gaubert, and Lazhar Rahmani, “Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors”, *Energy Conversion and Management*, vol. 97, pp. 298-306, Apr. 2015.
- [10] Lahfaoui Badreddine, Smail Zouggar, Mohammed Larbi Elhafyani, and Fatima Zahra Kadda, “Experimental modeling and control of a small wind PMSG turbine”, *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 802 - 807, Oct. 2014.
- [11] M. Narayana, G.A. Putrus, M. Jovanovic, P.S. Leung, and S. McDonald, “Generic maximum power point tracking controller for small-scale wind turbines”, *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 72–79, Jan 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] A. M. El-Sebaei, M. S. Hamad, and A. Helal, “A sensorless MPPT technique for a grid-connected PMSG wind turbine system”, *Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2nd IET*, pp. 1–6, Sep. 2013.
- [13] Ying-Yi Hong, Shiue-Der Lu, and Ching-Sheng Chiou, “MPPT for PM wind generator using gradient approximation”, *Energy Conversion and Management*, vol. 35, pp. 2440-2447, Apr. 2009.
- [14] Athanasios Mesemanolis, Christos Mademlis, and Iordanis Kioskeridis, “High-Efficiency Control for a Wind Energy Conversion System With Induction Generator”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 958–967, Dec. 2012.
- [15] Joanne Hui, Alireza Bakhshai, and Praveen K. Jain, “An Adaptive Approximation Method for Maximum Power Point Tracking (MPPT) in Wind Energy Systems”, *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2664–2669, Sep. 2011.
- [16] Kazmi Syed Muhammad Raza, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, and Osamu Ichinokura, “A novel algorithm for fast and efficient maximum power point tracking of wind energy conversion systems”, *ICEM 2008. 18th International Conference on*, pp. 1–6, Sep. 2008.
- [17] P.L. Fraenkel, *Water Lifting*, Rome, Food and Agriculture Organization of the United, 1986
- [18] **PID controller**. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller. 2016.
- [19] **Fuzzy logic**. [Online]. Available: <http://alaska.reru.ac.th/text/fuzzylogic.pdf>. 2014
- [20] M. Ragheb., “**Vertical Axis Wind Turbines**”. [Online]. Available: <http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Vertical%20Axis%20Wind%20Turbines.pdf>. 2016
- [21] Michael Bloch., “**Electricity from the wind – how turbines work**”. [Online]. Available: <http://www.greenlivingtips.com/articles/how-wind-turbines-work.html>, 2008
- [22] American Windmills., “**Water Pumping Windmills**”. [Online]. Available: http://www.windmills.net/?page_id=390. 2010
- [23] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)**, กรุงเทพมหานคร: วี.เจ.พริ้นติ้ง, 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1] อติศร สุขแสง, และ ศิริเดช บุญแสง, “การเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลในการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบ P&O โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก”, *EECON-38*, vol. 2, pp. 501-504, Nov. 18-20, 2015.
- [2] Adisorn Sooksang and Siridech Boonsang, “Experimental Variation Duty Cycle of P&O MPPT Algorithm Using Fuzzy logic Controller for Small Wind Turbine”, 6th ICEAS , pp. 207-216, Jun. 8-10, 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘
The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38)



UTCC University of
the Thai Chamber
of Commerce
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
ไฟโตนิคส์ (PH)
วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

Volume II
AEC Synergy

วันที่ ๑๘ - ๒๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๕๘
โรงแรมวารุริ อโยธยา คอนเวนชัน รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

การเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลในการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบ P&O โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน สำหรับกังหันลมขนาดเล็ก

A Variable Duty Cycle Modified P&O MPPT Algorithm using Proportional Controller for Small Wind Turbine

อดิศร สุขแสง และ ศิริเดช บุญแสง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง adisorn.b49@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับเปลี่ยนขนาดดิวตี้ไซเคิลในการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบ P&O โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนของวงจรทอนแรงดันสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดกระแสตรงทดสอบภายในอุโมงค์ลมขนาดเล็กที่ความเร็วลมเฉลี่ยคงที่ โดยศึกษาจากข้อบกพร่องของการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ P&O แบบดั้งเดิม ที่มีค่าเพิ่ม-ลดดิวตี้ไซเคิลที่คงที่ ซึ่งถ้าค่าดิวตี้ไซเคิลที่เพิ่ม-ลด มีค่ามากเกินไปนั้นระบบจะให้กำลังไฟฟ้าที่มีการแกว่งมาก หรือถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลที่เพิ่ม-ลด มีค่าน้อยเกินไประบบจะได้กำลังไฟฟ้าที่มีการแกว่งน้อยลงแต่ใช้ระยะเวลาในการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดนานขึ้น การใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนมาประยุกต์ใช้นั้นจะช่วยลดปัญหาจากการเพิ่ม-ลด ของดิวตี้ไซเคิลที่คงที่ จากผลการทดสอบพบว่าระบบมีการแกว่งลดน้อยลงและการเข้าใกล้จุดสูงสุดเร็วขึ้นเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนไป

คำสำคัญ: การติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด, กังหันลมผลิตไฟฟ้า, พีคอนโทรล

Abstract

This paper presents the P&O duty cycle adjustment in tracking maximum electrical power by using Proportional control method of Buck converter for DC wind turbine generator tested in small wind tunnel with constant wind speed. This paper studied from the drawbacks of the classical P&O MPPT which had fix step duty value. If step duty value is too much, the system will give too much oscillation for electrical power, or if step duty value is too small the system will give electrical power of which oscillation decrease but time reaching to the maximum power point (MPP) is longer. The Proportional control method applied in the paper will reduce the problem from fix step duty. The experimental results found that the oscillation of the system decrease and the reaching to maximum power point (MPP) was faster when wind speed changed.

Keywords: MPPT, Wind Turbine Generator, P Controller

1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันพลังงานทดแทนได้มีบทบาทสำคัญในการผลิตใช้พลังงานหลัก เช่น พลังงานถ่านหิน พลังงานจากก๊าซธรรมชาติ หรือพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมให้ลดน้อยลง เนื่องจากมีราคาที่สูงขึ้นและมีปริมาณจำกัด พลังงานลมจึงได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด ไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถผลิตได้อย่างไม่จำกัด สิ่งสำคัญของการเลือกใช้พลังงานทดแทนให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่าที่สุดคือ ประสิทธิภาพของพลังงานที่ได้รับจากแหล่งต้นพลังงาน เช่นเดียวกันกับการใช้พลังงานลมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในระบบของพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม

โดยทั่วไปการใช้วิธีการติดตามค่ากำลังไฟฟ้ามีหลากหลายวิธีตามความเหมาะสมของกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ ได้แก่ การติดตามค่ากำลังไฟฟ้าแบบอาศัยข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆของกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นหลัก และการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าแบบการใช้ลำดับขั้นตอนการค้นหาค่ากำลังไฟฟ้า (iterative search) ซึ่งทั้งสองแบบนี้ยังแบ่งย่อยได้ตามการนำมาประยุกต์ใช้ เช่น การติดตามค่ากำลังไฟฟ้าแบบอาศัยข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีทั้งแบบทราบค่า Tip Speed Ratio (λ) [1], การใช้ข้อมูลเส้นโค้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า [2] ส่วนในกรณีการใช้ลำดับขั้นตอนการค้นหาค่ากำลังไฟฟ้า (iterative search) นั้นได้รับความนิยมมาก คือ วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) [3] ซึ่งวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์ทางกลหรือข้อมูลใดๆของกังหันลมเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีการประยุกต์นำอัลกอริทึมอื่นๆ มาช่วยในการค้นหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมากขึ้น เช่น พีชชีลลจิกพีชชีลลจิกกับโครงข่ายประสาทเทียม(FNN) เป็นต้น

การติดตามกำลังสูงสุด (Maximum Peak Power Tracking, MPPT) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อาศัยหลักการของการค้นหา (Searching Algorithm) จุดสูงสุดของกำลังที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าผลิตได้ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกราฟกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ โดยการนำค่าความชันเท่ากับศูนย์ซึ่งเป็นที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นตัวกำหนด เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าในขณะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

กำลังทางกลของกังหันลมสามารถหาได้จาก ในสมการ (1)

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (1)$$

เมื่อ P_{wind} คือ กำลังที่ได้จากลม ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ R คือ รัศมีของกังหันลม V_w คือ ความเร็วลม กำลังไฟฟ้าได้จากกังหันลมนั้นสามารถหาได้จาก P_{blade} ในสมการ(2)

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda) \quad (2)$$

เมื่อค่า $C_p(\lambda)$ คือ สัมประสิทธิ์กำลังไฟฟ้า หากสมมติให้ ความเร็วลม, ความหนาแน่นอากาศ, และรัศมีกังหันลมเป็นค่าคงที่ แสดงว่าระบบนั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของกังหันลม ($C_p(\lambda)$) โดยมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับ Tip Speed Ratio (λ) และมุมกังหันลม (β) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (3)

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0006795\lambda \quad (3)$$

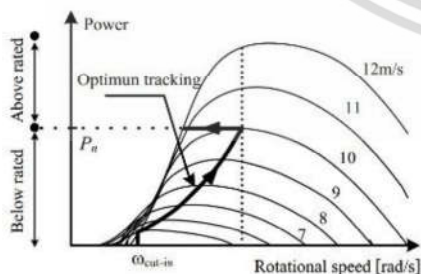
โดยที่

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_w} \quad (5)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วโรเตอร์ของกังหันลม

จากสมการ(1-5) เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วยกกำลังของกังหันลมจะได้กราฟเส้นโค้งที่มีค่ากำลังสูงสุดอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่ง กำลังสูงสุดนั้นจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่ม-ลดความเร็วลมดังแสดงในรูปที่ 1

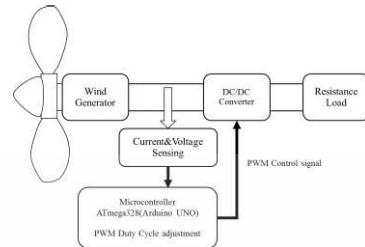


รูปที่ 1 เส้นโค้งลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

2.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)

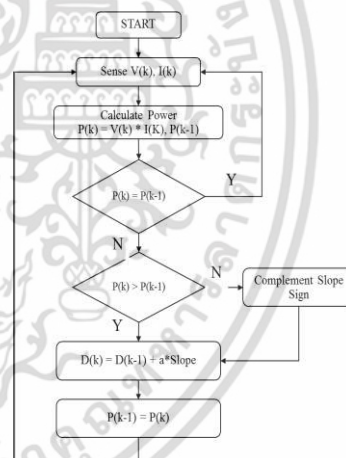
บล็อกไดอะแกรมโดยรวมของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ต่อกับวงจรคอนเวอร์เตอร์และโหลดแสดงในรูปที่ 2 โดยส่วน

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ประมวลผลเพื่อกำหนดค่าตัวชี้โฆเคลื่อนนั้น จะรับค่าจากเซ็นเซอร์และทำการเปรียบเทียบค่ากำลังของระบบตามวิธีการแบบรบกวนและสังเกต(P&O) การติดตามกำลังไฟฟ้าในวิธีที่นำเสนอนี้ จะใช้หลักการของการค้นหา (Searching Algorithm) หาค่าจุดสูงสุดของกำลังที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าให้ได้



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้อัลกอริทึม P&O ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย ทั้งในระบบพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ซึ่งมีแผนภาพไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 3 อัลกอริทึมทั่วไปของ P&O เริ่มต้นจากการรับค่าจากเซ็นเซอร์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าในลำดับขั้นตอนที่ผ่านมา เพื่อใช้ในการกำหนดทิศทางการเพิ่ม-ลด ตัวชี้โฆเคลื่อนของวงจรคอนเวอร์เตอร์ในลำดับต่อไป



รูปที่ 3 อัลกอริทึมของวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O)

ข้อดีของการใช้วิธีการแบบ P&O ในการกำหนดค่า step duty กิ่งที่นั้น เมื่อ step duty มีค่ามากจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าใกล้จุดสูงสุดมาก ไม่สามารถเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดได้ และในกรณี step duty มีค่าน้อยจะเกิดการแกว่งลดน้อยลงแต่เวลาและลำดับขั้นตอนในการติดตามกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ใกล้ถึงจุดสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นด้วย

3. วิธีการวิจัย

ในการวิจัยจะใช้การทดสอบกังหันลมจากการสร้างกังหันลมขนาดเล็กที่มีรัศมีของใบพัดขนาด 0.45 เมตร เป็นกังหันชนิดหลายใบพัด (Multiple-blade) มีใบพัดทั้งหมด 10 ใบและมุมใบพัดเฉลิษฐ์(pitch angle) 7 องศา ทดสอบภายใต้อุโมงค์จำลองขนาดเล็กที่สามารถผลิตความเร็วลม

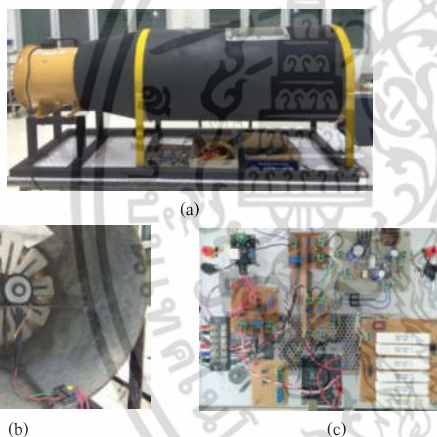
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดเฉลี่ยได้ 8.3 เมตรต่อวินาที โดยกั้นลมต่อค่าปลี่ยนกับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 28 วัตต์ ด้านขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ توانแรงดันไฟฟ้าและควบคุมความเร็วของกั้นลมผลิตไฟฟ้าสำหรับการติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ข้อมูลรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของกั้นลมผลิตไฟฟ้าและวงจรคอนเวอร์เตอร์

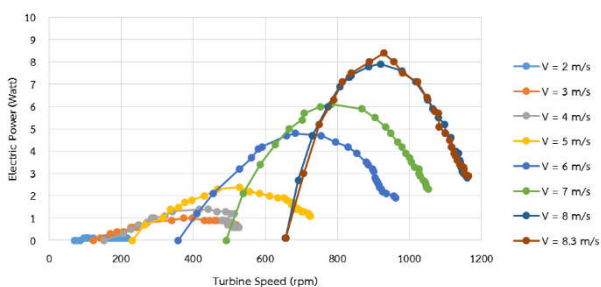
Turbine[Unit]	Generator[Unit]	Buck Converter[Unit]
Radius R 0.3 [m]	DC Generator	L 2 [mH]
ρ 1.205 [kg/m ³]	Power rating 28 [w]	C _{dc} 470 [μ F]
Gear ratio 1:1	Pole 8	C _o 47 [μ F]
Controller	Base Speed 2700 [rpm]	R _L 30 [ohm]
ATmega328 (Arduino UNO)		f _s 30 [kHz]

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง โดยกั้นลมที่ออกแบบเป็นกั้นลมขนาดเล็กที่สามารถพบได้ตามบ้านเรือนทั่วไปของประเทศไทย ดังแสดงอุปกรณ์ทดลองในรูปที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 4 เส้นโค้งกั้นลมผลิตไฟฟ้าของกั้นลมที่ใช้ในการทดสอบ (a) อุโมงค์ลมทดสอบ (b) กั้นลมทดสอบ (c) วงจรไฟฟ้าทดสอบ

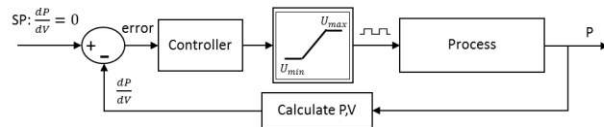
คุณลักษณะของกั้นลมผลิตไฟฟ้าที่ออกแบบถูกแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วโรเตอร์ในรูปที่ 5 ซึ่งที่ความเร็วลมสูงสุดที่ทดสอบเท่ากับ 8.3 m/s เป็นความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ทดสอบและความเร็วลมต่ำสุดที่ 2 m/s เป็นความเร็วลมต่ำสุดที่กั้นลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้



รูปที่ 5 เส้นโค้งกั้นลมผลิตไฟฟ้าของกั้นลมที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิธีการที่นำเสนอจะแก้ไขข้อด้อยที่เกิดขึ้นในวิธีการแบบรบกวนและสังเกต(P&O) โดยการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนมาปรับเปลี่ยนคิวดิไซเทิลสำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมกั้นลมผลิตไฟฟ้าดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 6

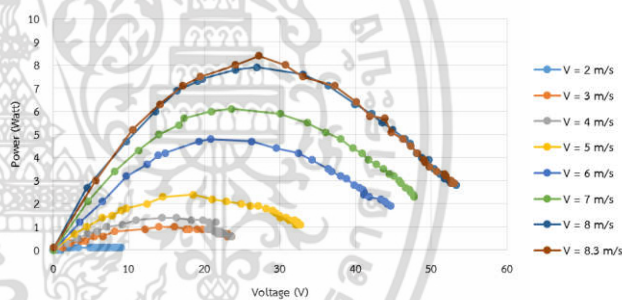


รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่นำเสนอ

ตัวควบคุมที่ใช้กำหนดค่าเพิ่ม-ลดคิวดิไซเทิล ถูกกำหนดโดยส่วนอัตราขยายในตัวควบคุม PID เพียงส่วนเดียว ซึ่งค่าที่ต้องกำหนดคือ Kp ของระบบ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อหาค่าของ Kp และทดสอบหาค่าที่เหมาะสมสำหรับชุดควบคุม

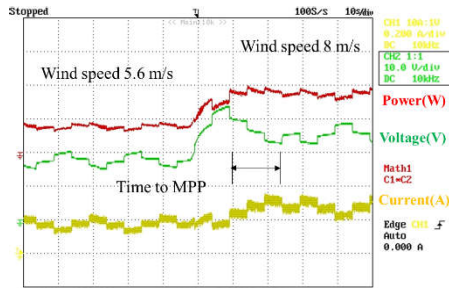
4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของกั้นลมที่ออกแบบซึ่งแสดงในรูปที่ 7 เพื่อใช้กำหนดค่าเป้าหมายที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์นั่นเอง

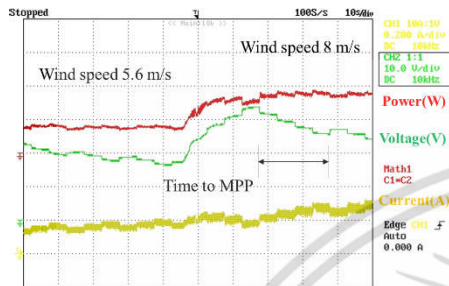


รูปที่ 7 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความดันไฟฟ้าของกั้นลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

การติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O แบบทั่วไปถูกแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีการทดสอบที่ความเร็วลมเฉลี่ยสองค่า คือ 5.6 m/s และ 8m/s ตามลำดับ โดยจะแสดงลักษณะของกราฟกำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ตามลำดับ จะเห็นว่าการเพิ่มค่า Step duty ในรูปที่ 8(a) จะทำให้ระบบเกิดการแกว่งมากขึ้น และการลดค่า Step duty ในรูปที่ 8(b) จะทำให้ระบบมีการแกว่งที่ลดลง แต่หากค่า Step duty มีค่าน้อยเกินไประบบจะไม่สามารถติดตามค่ากำลังไฟฟ้าตามขั้นตอนได้ เนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยเกินไป และสิ่งสำคัญในการกำหนดค่าการควบคุมคือ เวลาในการปรับเปลี่ยนคิวดิไซเทิลในแต่ละครั้ง เนื่องจากในความเป็นจริง โมเมนต์ต่างๆของกั้นลมที่หมุนอยู่จะเป็นทั้งตัวส่งและตัวต้านกำลังไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้น การควบคุมกั้นลมผลิตไฟฟ้าจึงใช้เวลานานในการเพิ่ม-ลดคิวดิไซเทิลในแต่ละครั้ง เพื่อรอกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัว



(a)

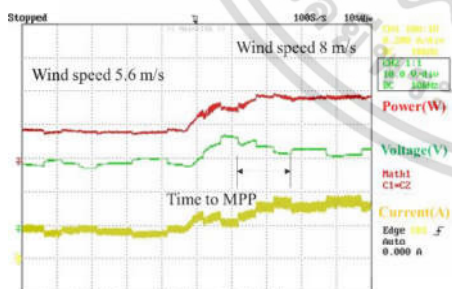


(b)

รูปที่ 8 MPPT แบบ P&O ทัวไป (a) Fix step duty 0.1 (b) Fix step duty 0.05

สำหรับการกำหนดค่า K_p ที่ใช้ในการควบคุมถูกกำหนดโดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยหาค่า K_p จากการทดสอบของระบบที่กำลังไฟฟ้าที่มีค่าใกล้สูงสุดและมีการแกว่งน้อย ซึ่งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในเทอมอัตราขยาย (K_p) จะต้องปรับเปลี่ยนให้เหมาะสม และการปรับจูนค่าในเทอมของอัตราขยายปริพันธ์ (K_i) และอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) จะนำมาวิจัยในงานวิจัยอื่นต่อไป

ผลของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยแสดงไว้ในรูปที่ 9 โดยทดสอบเช่นเดียวกับวิธี P&O แบบทัวไปเพื่อแสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากกราฟกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ลดน้อยลง สังเกตได้จากตารางที่ 2



รูปที่ 9 MPPT ของระบบที่นำเสนอ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและการแกว่งของระบบ

วิธีการ	กำลังไฟเฉลี่ย (W) ค่าเบี่ยงเบน (S.D.)	
	ความเร็วลม 5.6 m/s	ความเร็วลม 8 m/s
No MPPT	2.45/-	6.02/-
P&O [D=0.05]	3.08/0.15	7.01/0.18
P&O [D=0.10]	3.05/0.24	6.96/0.32
P&O with P Controller	3.14/0.14	7.19/0.14

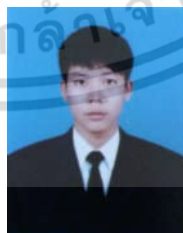
5. สรุปผลการวิจัย

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยการปรับเปลี่ยนคิวดิไซเคลของวงจรทอนแรงดัน โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนสำหรับกั้นหั่นผลิตไฟฟ้าชนิดกระแสตรง ซึ่งทดสอบภายในอุโมงค์ลมขนาดเล็กที่มีความเร็วลมเฉลี่ยคงที่นั้น สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) แบบทัวไปได้ ซึ่งสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนของกำลังไฟฟ้าเมื่อใช้กับระบบที่นำเสนอ ระบบจะให้กำลังไฟฟ้าที่มีการแกว่งลดน้อยลงตามผลการทดสอบ โดยอัตราการเพิ่ม-ลดของคิวดิไซเคลนั้นจะเกิดจากค่าผิดพลาด (error) ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหรือลดน้อยลง ดังนั้นการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนมาประยุกต์ใช้นั้นจึงทำให้สามารถช่วยลดปัญหาการเพิ่ม-ลดของคิวดิไซเคลแบบคงที่ ผลคือการแกว่งที่ลดน้อยลงและเพิ่มความเร็วในการเข้าถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Magdi Ragheb and Adam M. Ragheb, "Wind Turbines Theory – The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio," in *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Dr. Rupp Cariveau (Ed.), InTech, 2011, ch. 2, pp. 19 – 38.
- [2] Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche, "MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems," in *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Dr. Rupp Cariveau (Ed.), InTech, 2011, ch. 15, pp. 339 – 360.
- [3] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 486 – 494. Apr. 2006.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายอดิศร สุขแสง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2556 สนใจงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและพลังงานทดแทน



ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องมื่อวัดอิเล็กทรอนิกส์ จาก University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) พ.ศ. 2547 สนใจงานวิจัยด้าน Electronic Instrumentation System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HONG KONG

JUNE 8-10, 2016

Conference Proceedings

ICEAS

The International Conference on
Engineering and Applied Sciences

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICEAS-10990

Experimental Variation Duty Cycle of P&O MPPT Algorithm Using Fuzzy Logic Controller for Small Wind Turbine

Adisorn Sooksang^{a,*}, Siridech Boonsang^b

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's of Technology
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Email: ^aadisorn.b49@gmail.com; ^bkksiride@kmitl.ac.th

Abstract

This paper presents the P&O duty cycle adjustment in tracking maximum electrical power by using the Fuzzy logic controller of buck converter for DC wind turbine generator tested in a small wind tunnel with constant wind speed. This paper studied from the drawbacks of the classical P&O MPPT which had fix step duty value. If step size duty value is too much, the system will give too much oscillation for electrical power, or if step duty value is too small the system will give the electrical power of which oscillation decrease but time reaching to the maximum power point (MPP) is longer. The Fuzzy controller method applied in the paper would reduce the problem from fix step duty. In this paper implement hardware using ArduinoUno board based on the ATmega328P microcontroller to control the duty cycle of Buck converter. The experimental results found that the oscillation of the system decrease and the reaching to a maximum power point (MPP) was faster when wind speed changed.

Keywords: Wind energy, Maximum Power Tracking (MPPT), Perturb and observe Controller (P&O), Fuzzy Logic Controller (FLC)

1. Introduction

In the current situation where energy crisis and environmental issues such as greenhouse gases, acid rain, and air pollution are the main concerns, the wind is one of the attractive sources of alternative energy. Since wind speed varies all the time, it is essential for the wind energy conversion systems to be able to extract maximum power from the wind. Therefore, wind turbine controllers play a key role for the production of energy.

Among techniques to extract the maximum power of the electrical energies from the wind, the maximum power point tracking of the wind turbine is often used and called as MPPT (Maximum Power Point Tracking) [1]. In the literature, many MPPT techniques are proposed such as the Perturb and Observe (P&O) method[2], Fuzzy Logic Method[3], Gradient approximation (GA)[4] etc. Of these, the most popular MPPT techniques Perturb and Observe (P&O) and Fuzzy logic method are studied in this paper. The result of MPPT method are mostly designed and simulated in MATLAB/Simulink but the real experiment is very few.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The hill climbing or perturbation and observation (P&O) is the commonly used algorithms because of simplicity, ease of controller and low cost but it has its limitations as the increments/decrement of step size duty are fixed. This paper proposes a fuzzy logic controller based P&O technique for MPPT method reduce the problem from fix step duty. This proposed method along with experimental result is presented.

Section II in this paper showed a brief introduction to the wind turbine characteristics, proposed control system and design of FLC for MPPT algorithm. Section III showed experimental results and comparison of the proposed and the classical P&O algorithm technique. And Section IV showed the conclusion.

2. Proposed MPPT control algorithm

2.1 Wind Turbine Characteristic

The mechanical power (P_{blade}) generated by wind turbine depends on the wind turbine power coefficient ($C_p(\lambda, \beta)$) of the wind turbine as shown in eq.1. The wind turbine power coefficient is given as a function of the tip Speed Ratio (λ) and the pitch angle of the turbine (β) as shown in eq.2. The power coefficient (C_p) depends only on λ for fixed-pitch angle.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

where

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_w} \quad (2)$$

Where P_{blade} is the mechanical power captured by the wind turbine, ρ is the air density (typically 1.225 kg/m³), R is the blade radius (m), V_w is the wind speed (m/s). Equation 3 is derived from equation 1 and equation 2. The wind turbine characteristic curve extracted from equation 3 is shown in figure 1. This equation shows the relationship between power and rotational speed. It can be considered that each wind speed existed single point for the amount of generated power is the highest.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3} w^3 \quad (3)$$

Equation (4) describes the relationship between the turbine rotational speed (ω) and the duty cycle of converter (D).

$$\frac{dP}{dD} = - \frac{dP}{d\omega} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

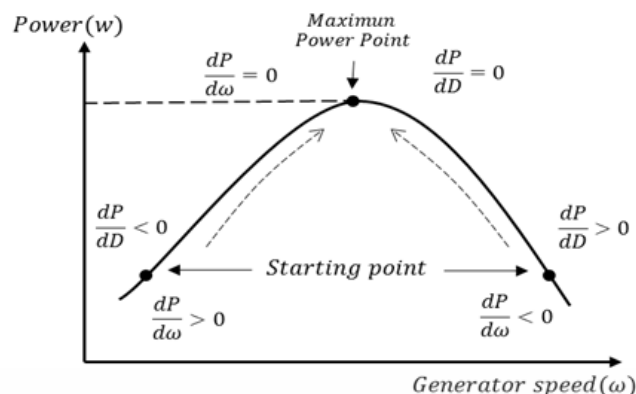


Fig. 1: Maximum power point tracking process

2.2 Proposed Control System

There is a general relation between the electrical power and the turbine rotational speed as shown in fig 2, where it is similar relation between the electrical power and the duty cycle of converter. Different colors in fig. 2 show the different wind speed. The maximum wind speed for testing is 8.3 m/s the wind tunnel can generate and the minimum is 2 m/s, the least speed to generate electrical power output.

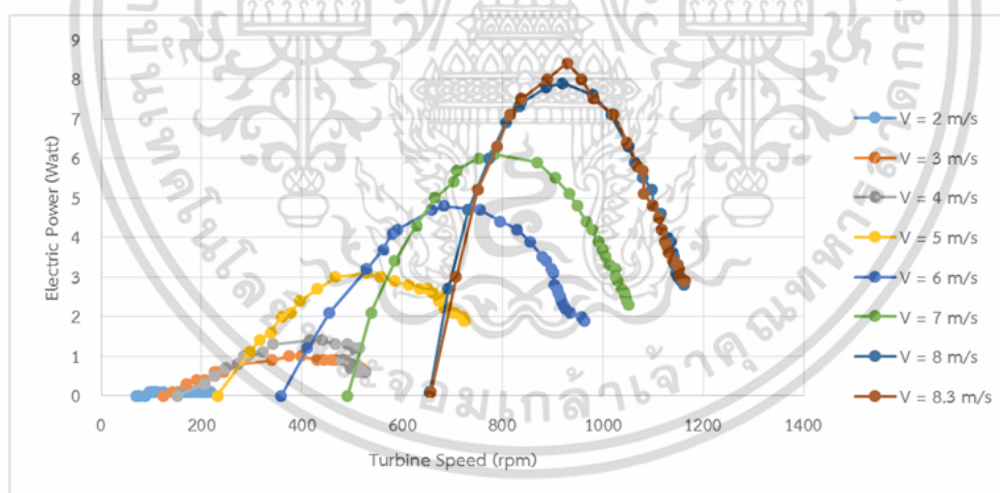


Fig. 2: Experimental of the wind turbine characteristic

In this paper used multiple-blade turbine with radius 0.45 meter and pitch angle 7 degree. The performance is tested in wind tunnel that can generate maximum wind speed at 8.3 m/s. The wind turbine generator is implemented by the multi-blades wind turbine (10 blades) coupling with the 28 w 2700 rpm 8 pole DC motor. The output side of generator is connected with buck converter to control speed turbine and obtain maximum power. Detail of parameters of the wind turbine and the control system shows in table 1 and the experiment of the wind tracking system show in figure 3.

สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1: Parameters of the wind turbine and the control system

Turbine[Unit]	Generator[Unit]	Buck Converter[Unit]
Radius R 0.3 [m]	DC Generator	L 2 [mH]
ρ 1.205 [kg/m ³]	Power rating 28 [w]	C_{dc} 470 [μF]
Gear ratio 1:1	Pole 8	C_o 47 [μF]
Controller	Base Speed 2700 [rpm]	R_L 30 [ohm]
ATmega328 (Arduino UNO)		f_s 30 [kHz]

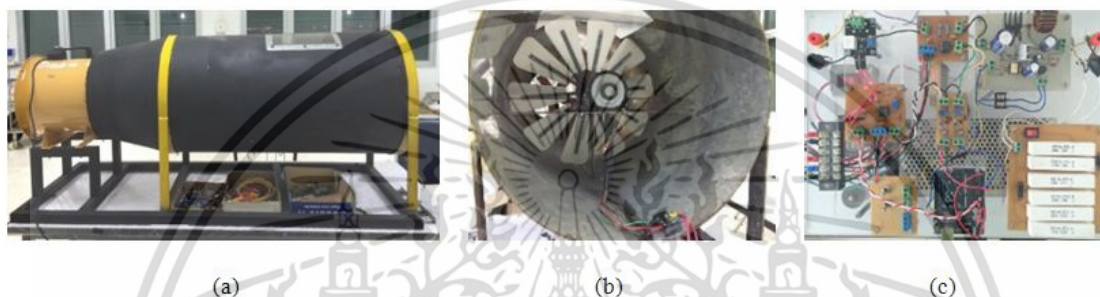


Fig. 3: Experimental setup of the wind tracking system
 (a) Wind tunnel (b) Wind turbine (c) Buck Converter

In this paper, the fuzzification is the process of converting (ΔP) and (ΔD) . The input of fuzzy logic controller are

$$\Delta P = P(k) - P(k-1) \quad (5)$$

$$\Delta D = D(k) - D(k-1) \quad (6)$$

Where ΔP is the wind turbine array output power change, ΔD is the buck convertor duty cycle change.

Figure 4 shows the operation box diagram of fuzzy logic based P&O MPPT control. Inputs of system are rate of change of power and step size duty cycle. The fuzzification receive two inputs. The output from fuzzification process is input of interference. The Output receiving from interference is compared with Rule base. After comparing, the defuzzification process generates step size of the duty cycle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

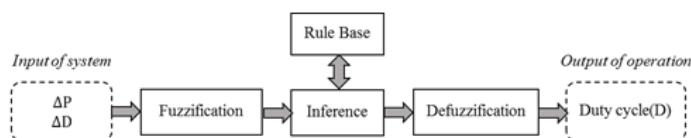


Fig. 4: Operation box diagram of fuzzy logic based P&O MPPT control

The flow Chart of fuzzy logic control based on P&O algorithm is show in fig.5

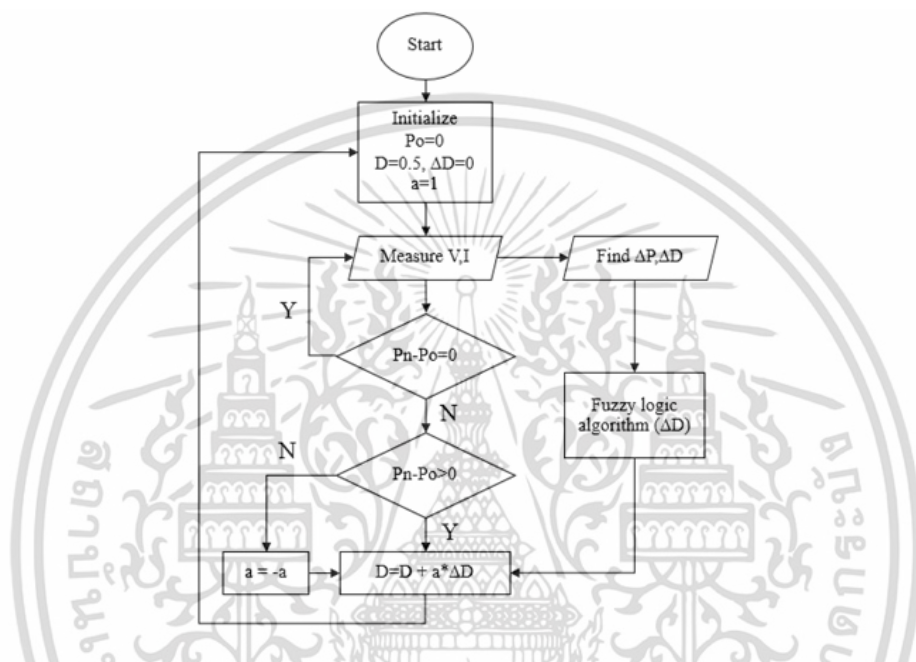


Fig. 5: Flow Chart of the fuzzy logic controller based P&O algorithm

2.3 Design of FLC for MPPT algorithm

The fuzzy logic in this paper used triangular membership functions since they are easy to be calculated (having lesser number of parameters) and easier to modify. The linguistic fuzzy sets using fuzzy membership function with five fuzzy sets: NB (negative big), NS (negative small), PS (positive small), and PB (positive big). The ranges and parameters are shown in the figure 6. The fuzzy sets of output membership are VB (Very Big), B (Big), M (Medium), S (small), VS (very small) as shown in table.3

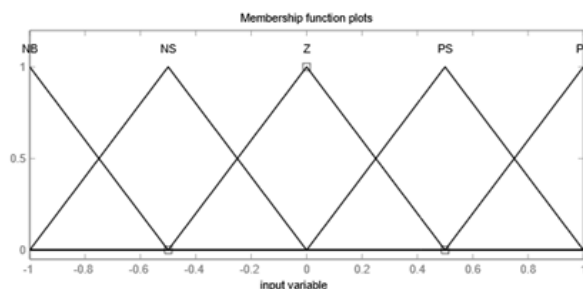


Fig. 6: Fuzzy membership functions for input ΔP and ΔD

Table 3: Membership function for output ΔD fuzzy

Membership function	ΔD weight
VS(very small)	0.01
S(small)	0.05
M(medium)	0.1
B(big)	0.15

Fuzzy rules based on expert knowledge are obtained on the basis of observations by researcher, shown as table4.

Table 4: Fuzzy rules

5x5		ΔP				
		NB	NS	Z	PS	PB
ΔD	NB	B	M	S	M	B
	NS	M	S	VS	S	M
	Z	S	S	VS	S	S
	PS	M	S	VS	S	M
	PB	B	M	S	M	B

The fuzzy rules would decide the output of fuzzy logic controlled by the referring input. In this fuzzy system, there are 25 rules. The defuzzification is the last step in fuzzy controller. The equation for defuzzification is described as shown in equation 7.

$$D(k) = \frac{\sum_{k=1}^m u^k w_k}{\sum_{k=1}^m w_k} \quad (7)$$

Where $D(k)$ is the step size duty cycle, u^k is the product of all membership values of rule no. k, w_k is the weight of rule no. k and m is the number of rules.

Output duty cycle from fuzzy logic is applied to calculate the rate of change of step size duty cycle. From equation 8, duty cycle output is used for change step size to generate duty cycle in the buck converter.

ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D(k) = D(k-1) + \Delta D_{fuzzy}(k) \quad (8)$$

The fuzzy logic based P&O algorithm computes variable step sizes to increment or decrement the duty cycle, therefore oscillation of power output and time tracking are less than with original P&O algorithm.

3. Experimental System and Results

3.1 Experimental System

The proposed fuzzy system are verified by real experimental. Fig. 7 shows the block diagram of the maximum power point tracking process for wind turbine. The wind energy system used in this paper is composed of 28 w DC generator and Buck converter with 30 kHz switching frequency. In this paper implement hardware using ArduinoUno board because Arduino software is easy to use for beginners, yet flexible enough for advanced users.

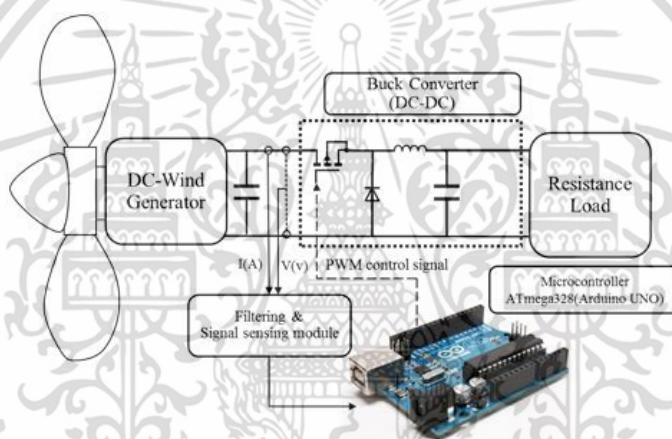


Fig. 7: Maximum power point tracking process

The experimental is tested under different stepped wind speed conditions. The real power, voltage and current of comparison can be seen in Fig. 8 and table 5.

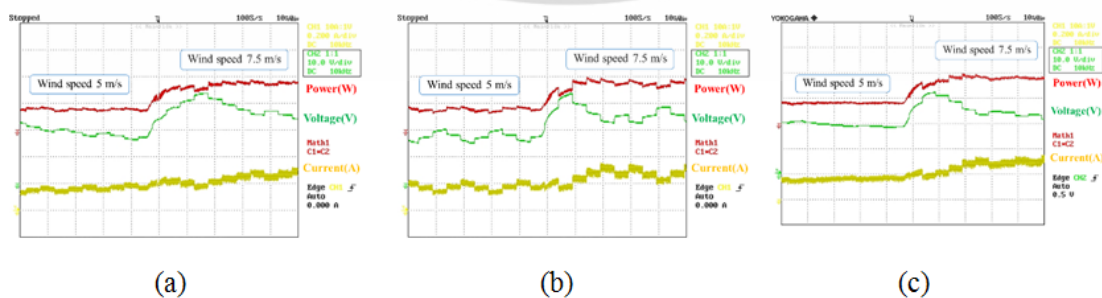


Fig. 8: Output real power, voltage and current of Buck converter

(a) P&O MPPT [$\Delta D=0.05$] (b) P&O MPPT [$\Delta D=0.1$]

(c) Fuzzy logic MPPT [Variable step size]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figs. 8(a) and (b) show the results of power, voltage and current of wind turbine generator when operated at wind speed 5m/s and 7.5m/s from the general P&O algorithm which fix step size duty cycle. Fig. 8(c) shows the experimental results of the proposed fuzzy logic controller. In Fig. 8(a), the step size of duty cycle is low value, the power output would give low oscillation and slow tracking at maximum power point. In contrary, as shown in Fig. 8(b), the step size of duty cycle is high value, the power output would give high oscillation and fast tracking at maximum power point. In Fig. 8(c), the proposed fuzzy logic controller is better than the general P&O algorithm which fix step size duty cycle in terms of lower power oscillation and faster tracking.

3.2 Result and Discussion

The electrical power from P&O and Fuzzy Logic method is plotted by MATLAB, shown in fig.9. The Y-axis demonstrates the electric power and wind speed, the X-axis shows time in the minute unit.

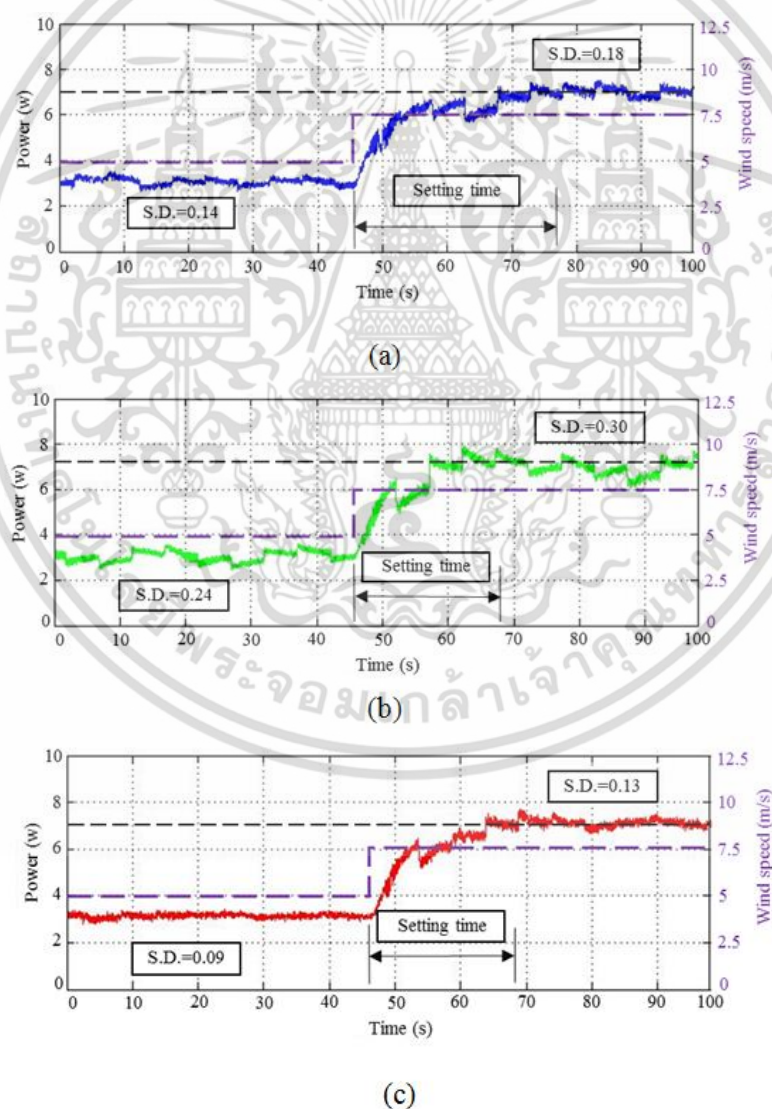


Fig. 9: Output power of Buck converter plot on MATLAB (a) P&O MPPT [$\Delta D=0.05$] (b) P&O MPPT [$\Delta D=0.1$] (c) Fuzzy logic MPPT [Variable step size]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 9 show the results of power when operated at wind speed 5m/s and 7.5m/s from the general P&O algorithm and Fuzzy logic MPPT. The value of standard deviation (S.D.) is a measure that is used to quantify the amount of variation or dispersion of a set of data values. This paper, the standard deviation (S.D.) means the output oscillation. When the wind speed is 5 m/s and 7.5m/s, the least value of standard deviation (S.D.) derived from fuzzy logic method is 0.09 and 0.13 respectively. Determined the error band in steady state is $\pm 2\%$ of maximum power at wind speed 7.5m/s. The Setting time of fuzzy logic method is equal to the P&O MPPT step size 0.1 but less than the P&O MPPT step size 0.05. The experiment result of various control methods shown as Table 5.

Table 5: The experiment result of various control methods

Method	Wind speed 5 m/s		Wind speed 7.5 m/s	
	Power average (w)	S.D.	Power average (w)	S.D.
No MPPT	2.45	-	6.02	-
P&O MPPT [Step size D=0.05]	3.09	0.14	7.01	0.18
P&O MPPT [Step size D=0.1]	3.04	0.24	6.93	0.30
Fuzzy logic MPPT[Variable step size]	3.15	0.09	7.10	0.13

4. Conclusion

In this paper, the maximum power point tracking using fuzzy logic for wind turbine with DC generator is tested in wind tunnel under the constant wind speed conditions. The experimental results suggest that the proposed approach can achieve better efficiency compared to P&O fix step size duty cycle 0.05 and 0.1 based on MPPT techniques under rapidly changing wind speed. The proposed method can reduce the oscillation of power by original P&O method.

Future work includes experimental implementation of the proposed method for grid connected wind energy system.

Acknowledgments

This work was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

References

- [1] Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche, "MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems", in *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), InTech, 2011, ch. 15, pp. 339 – 360.

- [2] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 486 – 494. Apr. 2006.
- [3] Quoc-Nam Trinh and Hong-Hee Lee, “Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Tracking in PMSG-Based Wind Power Systems”, *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications: With Aspects of Artificial Intelligence*, pp. 543–553, 2010.
- [4] Ying-Yi Hong, Shiue-Der Lu and Ching-Sheng Chiou, “MPPT for PM Wind Generator using Gradient Approximation”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp.82-89, January. 2009.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอดิสร สุขแสง
วัน เดือน ปีเกิด	19 มิถุนายน 2534
ที่อยู่	29 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าโรงช้าง อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84130
ประวัติการศึกษา	ปี 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี ปี 2552 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี ปี 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2557-ปัจจุบัน เป็นนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2) เครื่องมือและอุปกรณ์การวัดทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้