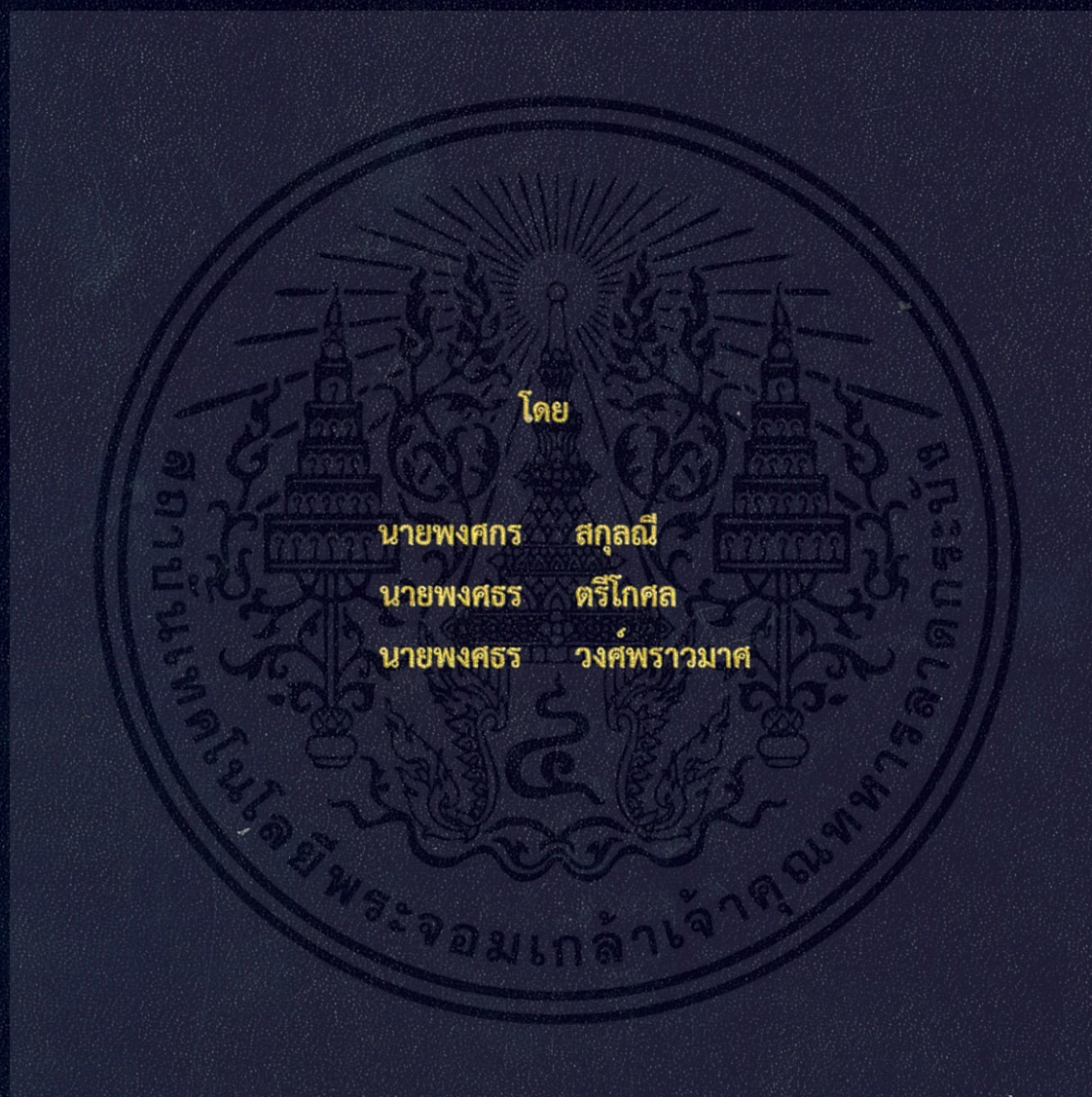


การปรับปรุงสมรรถนะวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมหลายใบพัด

IMPROVEMENT OF THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING

PERFORMANCE FOR MULTIPLE BLADES WIND TURBINE



โดย

นายพงศกร สกฤษณี

นายพงศธร ตริโกศล

นายพงศธร วงศ์พราวมาศ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การปรับปรุงสมรรถนะวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมหลายใบพัด

IMPROVEMENT OF THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING
PERFORMANCE FOR MULTIPLE BLADES WIND TURBINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING
PERFORMANCE FOR MULTIPLE BLADES WIND TURBINE



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การปรับปรุงสมรรถนะวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมหลายใบพัด
IMPROVEMENT OF THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING
PERFORMANCE FOR MULTIPLE BLADES WIND TURBINE



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

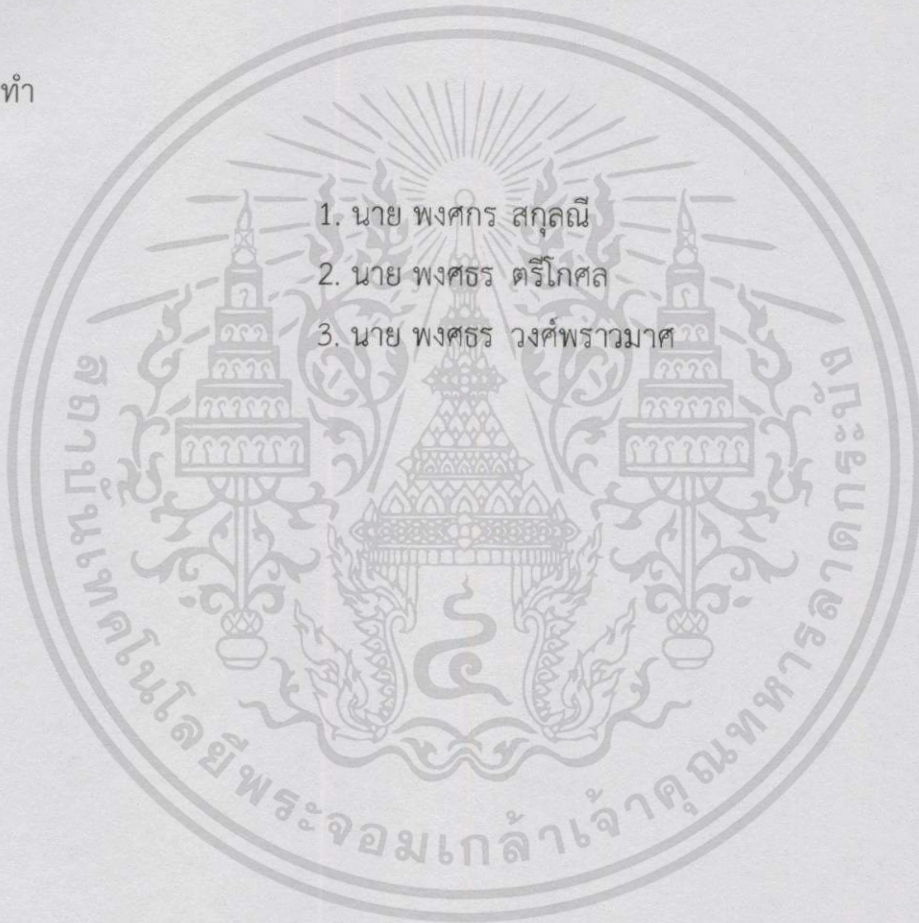
ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับปรุงสมรรถนะวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมหลายใบพัด

ผู้จัดทำ



1. นาย พงศกร สกฤตณี
2. นาย พงศธร ตริโกศล
3. นาย พงศธร วงศ์พรามาศ

..... (ชื่อ) อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงสมรรถนะวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมหลายใบพัด

นาย พงศกร สกุลณี

นาย พงศธร ตริโกศล

นาย พงศธร วงศ์พราวมาศ

ผศ.ดร. ศิริเดช บุญแสง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมขนาดเล็กชนิดหลายใบพัด โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร วิธีการควบคุมจะอาศัยหลักการรบกวนและสังเกต ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและเหมาะสมสำหรับภูมิอากาศในประเทศไทย โดยได้ศึกษาถึงคุณลักษณะของกังหันลมที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้า ที่มีผลต่อการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดในการจ่ายโหลดในระดับความเร็วลมต่างๆ โดยได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้ทำการวัดค่าได้อย่างแม่นยำ และลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่สอดแทรกเข้ามาในระบบ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเป็นไปอย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีการควบคุมระดับแรงดันด้วยการปรับดิ้วตีไซเคิลของวงจรลดทอนแรงดัน ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ประมวลผลและสร้างสัญญาณ PWM ขึ้นมาใช้ในการกำหนดขนาดของดิ้วตีไซเคิลที่เหมาะสมอย่างอัตโนมัติ เพื่อให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด

Improvement of the maximum power point tracking performance
for multiple blades wind turbine

Mr. Pongsakorn Sakulnee

Mr. Pongsathon Treegosol

Mr. Pongsathon Wongpraomas

Assist.Prof.Dr. Siridech Boonsaeng Supervisor

Year 2014

ABSTRACT

A paper presents a tracking scheme for locating power points of multiple blades small wind turbine. That is permanent magnetic DC generator. Based on the principle of perturb and observe control. Which is appreciate and effective for the climate in Thailand. By studying the characteristic of wind turbines to determine the maximum power point that obtain from produced to represent the load for each wind speed. There is improve the circuit to make precise measurement and get rid off noise signals that interfere into circuit. In order to analyze the result are correct and reliable for control voltage load by adjusting the duty cycle of buck converter. Which is analyzed by microcontroller for generate PWM signals used to determine duty cycle at the appropriate point for the best performance of wind turbine.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร. ศิริเดช บุญแสง อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำโครงการเรื่องนี้ ผู้ให้คำแนะนำในด้านวิชาการ พร้อมทั้งให้แนวคิดที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อการวิจัย ให้คำปรึกษาเมื่อเจอกับอุปสรรคปัญหาต่างๆ จนสามารถแก้ไขและสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร. พิเชิต ล้ายอง ผู้ให้คำปรึกษาในด้านการทำตัวเหนียวนาเพื่อใช้ในวงจรลดทอนแรงดัน และให้ข้อมูลด้านวิชาการเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

ขอขอบคุณคุณอดิสร สุขแสง และคุณปิยงกูร กุฑุทพันธ์ พี่ ป.โท ที่ศึกษาวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาก่อนหน้านี้ ซึ่งคอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการสร้างวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ชี้แนะแนวทาง และให้การสนับสนุนทั้งด้านวิชาการ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ พร้อมทั้งจัดหาสถานที่ในการทดสอบอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ยืมอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ และคอยช่วยเหลือกันมาโดยตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงสี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกอุปกรณ์การทำโครงการ ตลอดจนคุณกมลวรรณ ถาวร เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงบประมาณในการเบิกใบเสร็จของโครงการ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและเป็นอีกหนึ่งกำลังใจสำคัญที่ช่วยให้มีแรงบันดาลใจในการทำโครงการเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการทำโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 รูปแบบกึ่งหั่นลม	4
2.2 ชนิดของกึ่งหั่นลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน	5
2.3 จำนวนใบพัด	7
2.4 ความเร็วลมและกำลังของกึ่งหั่นลม	8
2.5 การตามรอยจุดที่กำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุด (MPPT)	8
2.6 คุณลักษณะของกึ่งหั่นลม	11
2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	14
2.8 วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า	15
2.9 วงจรขยายสำหรับเครื่องมือวัด (Instrument Amplifier)	17
2.10 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter)	20
2.11 ชุดตรวจจับกระแส (Current Sensor)	21
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	22
3.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)	22
3.2 การออกแบบวงจรทอนแรงดัน (Buck converter)	22
3.3 ชุดขับมอสเฟต (Power MOSFET Gate Drive)	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ชุดจ่ายไฟ (Regulator)	26
3.5 ชุดตรวจจับกระแส (Current Detector)	27
3.6 ชุดตรวจจับแรงดัน (Voltage Detector)	30
3.7 ชุดวงจรกรอง	32
3.8 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Board)	33
3.9 อุโมงค์ลม	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง	38
4.1 คุณลักษณะของกังหันลม	38
4.2 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ ความเร็วโรเตอร์	40
4.3 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลังไฟฟ้า	42
4.4 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า	44
4.5 การทดสอบระดับการกรองสัญญาณของวงจร Low-Pass Filter	48
4.6 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด	50
4.7 ผลของการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการ Perturb and Observe (P&O)	52
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	59
ภาคผนวก ข เอกสารประกอบชุดวงจรรวม	64
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์	69
ภาคผนวก ง วิธีการทดลอง	75
ประวัติผู้เขียน	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กังหันลมแนวตั้ง	4
2.2 กังหันลมแนวนอน	5
2.3 กังหันลมแบบความเร็วคงที่	6
2.4 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่	6
2.5 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง	7
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วกังหันต่อความเร็วลมกับสัมประสิทธิ์กำลังไฟฟ้าของกังหันลมรูปแบบต่างๆ	7
2.7 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบ Stall Limit (เส้นประ) และแบบ Pitch Control (เส้นทึบ)	8
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ที่ความเร็วลมค่าต่างๆ	9
2.9 การทำงานของระบบไฟฟ้าพลังงานลม	10
2.10 ประสิทธิภาพของกังหันลมแบบต่างๆ	13
2.11 รูปคลื่นแรงดันจากการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	14
2.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	15
2.13 วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า	15
2.14 วงจรสมมูลของ MOSFET	16
2.15 วงจรขยายสำหรับเครื่องมือวัด	17
2.16 ใช้ Superposition Theorem โดยกำหนดให้ $V_2=0$	18
2.17 ใช้ Superposition Theorem โดยกำหนดให้ $V_1=0$	19
2.18 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน	20
2.19 กราฟระดับการกรองสัญญาณ	20
2.20 ชุดตรวจจับกระแส	21
3.1 Block Diagram ของชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด	22
3.2 วงจรทอนแรงดัน	23
3.3 วงจรชุดขับมอสเฟต	25
3.4 วงจรชุดจ่ายไฟ 18V	26
3.5 Current Sensor เบอร์ ACS712	28
3.6 วงจรปรับสภาพสัญญาณ	29
3.7 วงจรชุดตรวจจับแรงดัน	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 ชุดวงจรกรอง	32
3.9 บอร์ด Arduino UNO R3	34
3.10 Flow Chart การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี P&O	36
3.11 วงจรที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์	36
4.1 กราฟคุณลักษณะของกังหันลมชนิด Multi-blade	39
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ ความเร็วโรเตอร์	41
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลังไฟฟ้า	43
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้า	46
4.5 กราฟระดับการกรองสัญญาณความถี่	49
4.6 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด พร้อมทั้งแสดงขอบเขตความคลาดเคลื่อน (Max, Min)	51
4.7 ผลการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 6 m/s และ 8.3 m/s	52
4.8 ความสัมพันธ์เมื่อมีการปรับความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 30 Ω เป็น 100 Ω	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	2
4.1 ค่ากำลังสูงสุดของกังหันลมแบบหลายใบพัดในแต่ละความเร็วลมค่าต่างๆ	38
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ ความเร็วโรเตอร์	40
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลังไฟฟ้า	42
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่างๆ	45
4.5 ระดับการกรองสัญญาณของวงจร Low-Pass Filter	48
4.6 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความต้านทาน 30Ω	50



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ามีราคาสูงกว่าในอดีตมาก อีกทั้งยังสร้างมลภาวะให้แก่สิ่งแวดล้อมบริเวณรอบๆ ซึ่งในอนาคต อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าก็มีแนวโน้มสูงขึ้น ตามสภาวะการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ดังนั้น หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจึงได้มองหาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นๆ มาทดแทน ซึ่งพลังงานลมก็เป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความสนใจและเป็นที่ยอมรับกันในหลายประเทศ เนื่องจากเป็นพลังงานที่หาได้โดยทั่วไป เป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น จากข้อมูลการสำรวจล่าสุดนั้น กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทั่วโลกมีถึง 282,275 เมกะวัตต์ และมีอัตราการเติบโตที่เพิ่มขึ้นทุกๆ ปี

สำหรับในประเทศไทยนั้น ยังนับว่ามีการใช้พลังงานลมน้อย เนื่องจากภูมิประเทศไม่เอื้ออำนวย อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ที่มีความเร็วลมเพียงพอ สามารถใช้กังหันลมขนาดเล็กในการผลิตไฟฟ้าได้ โดยการใช้พลังงานลมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จะต้องอาศัยการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด หรือการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MTPP) โดยอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาทำการวิเคราะห์ค่า เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการควบคุมกังหันลมเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของกังหันลมประเภทต่างๆ
3. สามารถออกแบบอุปกรณ์ให้ทำการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ
4. เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้มีความแม่นยำและถูกต้อง

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมกังหันลมเพื่อให้ได้ค่ากำลังสูงสุดที่ความเร็วลมต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาทำการควบคุมแรงดันที่เหมาะสมกับโหลด ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลจากกระแสและแรงดันที่อ่านได้จาก DC Generator จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่าเพื่อกำหนด Duty Cycle ที่เหมาะสม โดยใช้กังหันลมชนิดหลายใบพัด ทำในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก และวิเคราะห์คุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะของกังหันลมประเภทต่างๆ
2. ค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด
3. ศึกษาเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
4. ค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์และฟังก์ชันการทำงาน
5. ศึกษาการออกแบบวงจรวัดค่าต่างๆ
6. วิเคราะห์สาเหตุหรือปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อทดลองใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์

กับอุโมงค์ลมจริง

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง									
2. วัดค่าคุณลักษณะของกังหันลม									
3. สร้างวงจรวัดและควบคุม									
4. สร้างวงจรรองความถี่ที่มารบกวนระบบและที่ไม่ต้องการ									
5. ปรับปรุงวงจรเซ็นเซอร์ให้วัดได้ถูกต้องและแม่นยำ									
6. ประกอบวงจรสมบูรณ์									
7. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการทำโครงการ

1. บูรณาการความรู้ในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในโครงการ
2. ทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
3. รู้วิธีการควบคุมการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมพลังงานทดแทนอื่นๆได้
5. สามารถนำความรู้ไปใช้ออกแบบในการสร้างกังหันลมขนาดใหญ่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

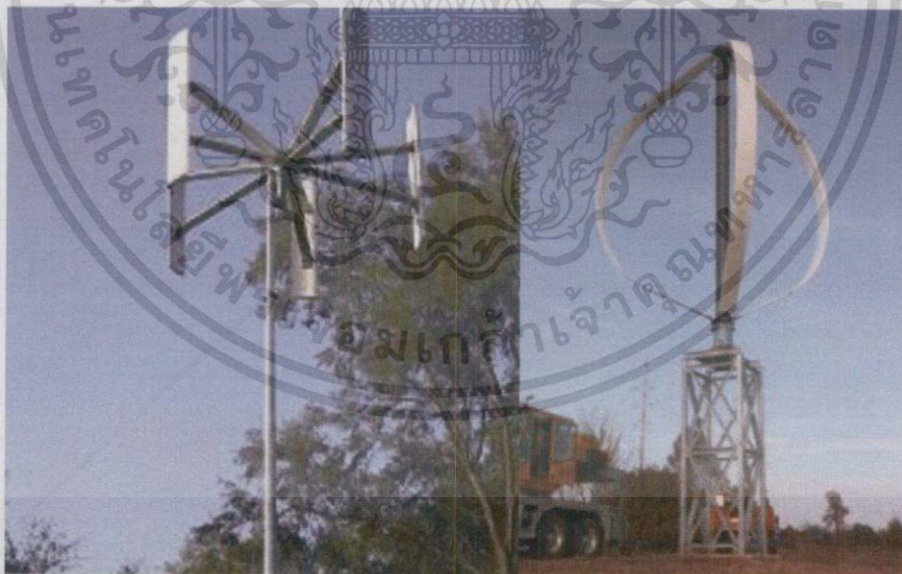
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ลม เป็นทรัพยากรทางธรรมชาติที่ได้มาโดยไม่เสียค่าใช้จ่าย การนำพลังงานที่ได้มาพัฒนาเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจึงนับว่าเป็นสิ่งที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อภาวะเศรษฐกิจที่เชื่อเพลิงมีราคาแพง การนำพลังงานจากลมเข้ามาจะใช้รูปแบบการแปรผันจากพลังงานกลที่ได้จากการหมุนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบต่อไป โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ความยาวของใบพัด และสถานที่ตั้ง ซึ่งปัจจุบันมีการนำใบพัดทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่มาใช้งาน

2.1 รูปแบบกังหันลม [1] [2]

กังหันลมสามารถแบ่งออกตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้เป็น 2 รูปแบบ

1. กังหันลมแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง กังหันลมแบบแกนตั้งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลมปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมแบบนี้้น้อยมาก

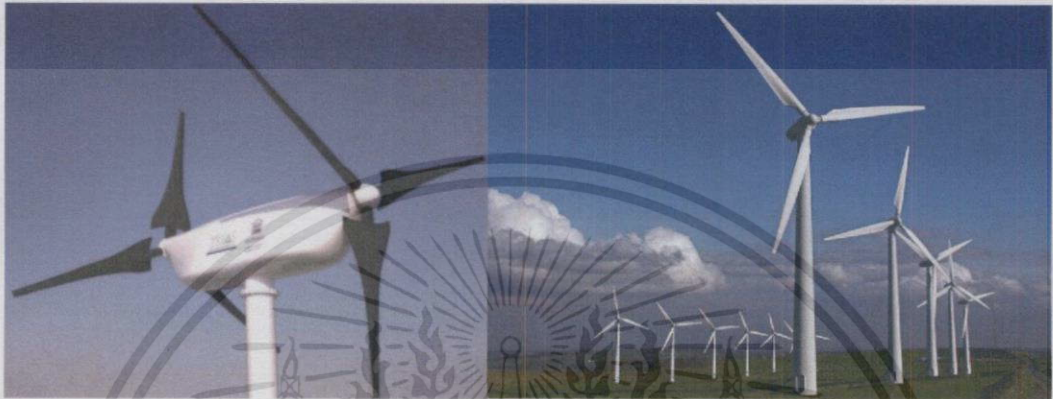


รูปที่ 2.1 กังหันลมแนวตั้ง

2. กังหันลมแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ลมพายุและตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรง กังหันลมแบบแกนนอน ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบสี่ลำแพน นิยมใช้กับเครื่องสูบน้ำ กังหันลมแบบกงล้อจักรยาน กังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอปเพลเลอร์ (Propeller)



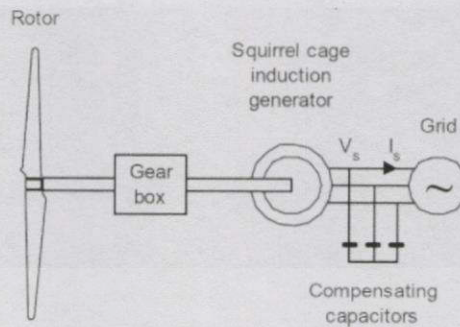
รูปที่ 2.2 กังหันลมแนวนอน

2.2 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน

กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน สามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิดคือ a) Fixed Speed with Directly Grid Couple (Asynchronous) Squirrel Cage Induction Generator b) Variable Speed with Doubly Fed Induction Generator และ c) Variable Speed Based on a Direct Drive Synchronous Generator

1. กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Turbine)

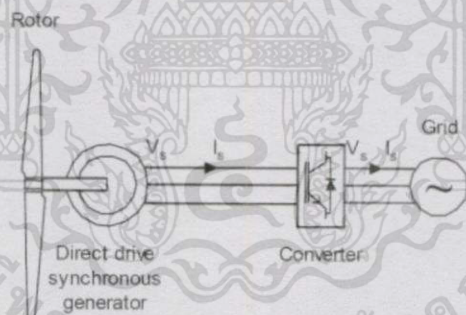
กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด ก่อส่งเกียร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel Cage Induction Generator) ชุดสเตเตอร์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า (รูปที่ 2.3) ในความเป็นจริงแล้วกังหันลมแบบนี้มีค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Slip) ไม่คงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมาก เพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเรียกกังหันลมแบบนี้ว่าเป็นแบบความเร็วคงที่ (Fix Speed Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ มักจะดึงพลังงาน (Reactive Power) จากสายส่งมาใช้ โดยเฉพาะที่ในที่มีระบบสายส่งที่ไม่เสถียรภาพ สำหรับเหตุการณ์ลักษณะดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการชดเชยพลังงานจากตัวเก็บประจุ ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในตัวกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้



รูปที่ 2.3 กังหันลมแบบความเร็วคงที่

2. กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed)

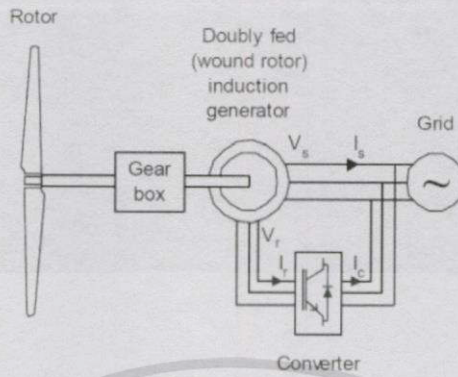
กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด กล่องเกียร์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิลเฟ็ด (Doubly Fed Induction Generator) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ชุดสเตรเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า กังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบ และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้



รูปที่ 2.4 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่

3. กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (Variable Speed with Direct Drive)

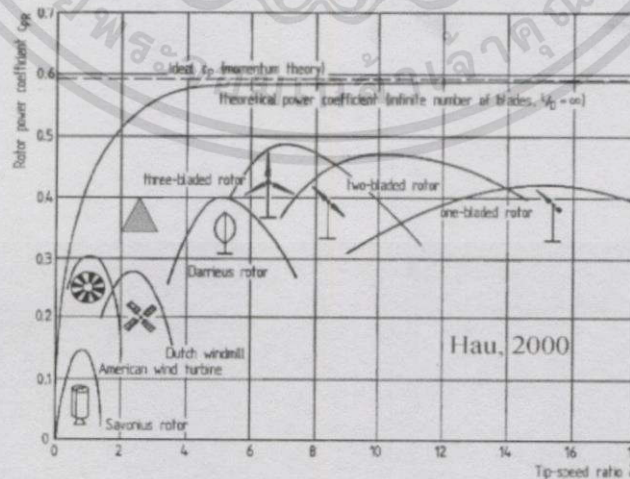
กังหันลมชนิดนี้ ประกอบไปด้วยใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง และมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง

2.3 จำนวนใบพัด

โดยทั่วไปกฎของการหาจำนวนใบพัดที่เหมาะสมสำหรับกังหันลมขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้เป็นที่ชัดเจนคือ ถ้าต้องการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วรอบสูง แรงบิดต่ำ กังหันจะต้องการจำนวนใบพัดน้อยแต่ถ้าเป็นกังหันลม ซึ่งประยุกต์ใช้เพื่อการสูบน้ำ หรือสีข้าว กังหันชนิดนี้ต้องการแรงบิดสูงที่ความเร็วรอบต่ำ ดังนั้นกังหันชนิดนี้จะต้องการจำนวนใบพัดมาก จำนวนใบพัดต่ำสุดที่ควรจะมีของกังหันลมคือ หนึ่งใบ ซึ่งมีข้อดีคือ น้ำหนักของใบพัดจะลดลง อย่างไรก็ตามการหมุนของกังหันแบบใบพัดเดียวจะไม่ดีเท่าที่ควร กังหันลมแบบสองใบเป็นแบบหนึ่งที่ยอมรับใช้กันแต่การหมุนก็ยังไม่ราบรื่นนัก กังหันแบบสามใบให้การหมุนของแกนกังหันที่ราบรื่น แต่ก็ มีน้ำหนักมาก ทำให้ต้องการโครงสร้างรองรับที่แข็งแรง ซึ่งส่งผลถึงงบประมาณการลงทุน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสามใบพัดเป็นที่นิยมและ มีส่วนแบ่งทางการตลาดสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีข้อดีมากกว่าแบบสองใบพัดอีก คือ ให้ความสวยงามมากกว่าในด้านของรูปลักษณ์และการมองแล้ และมีเสียงดังรบกวนน้อยกว่า

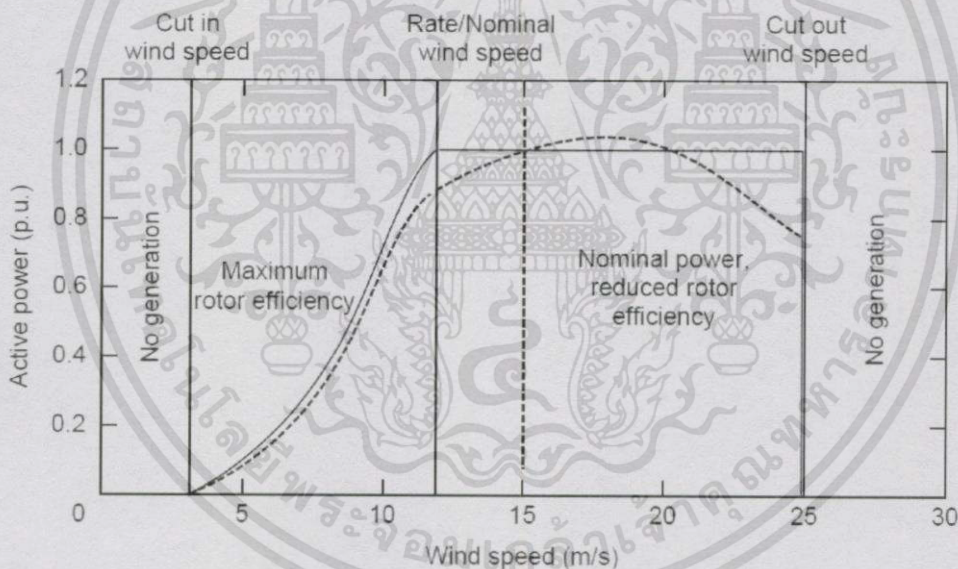


รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วกังหันต่อความเร็วลมกับสัมประสิทธิ์กำลังไฟฟ้าของกังหันลมรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ความเร็วลมและกำลังของกังหันลม

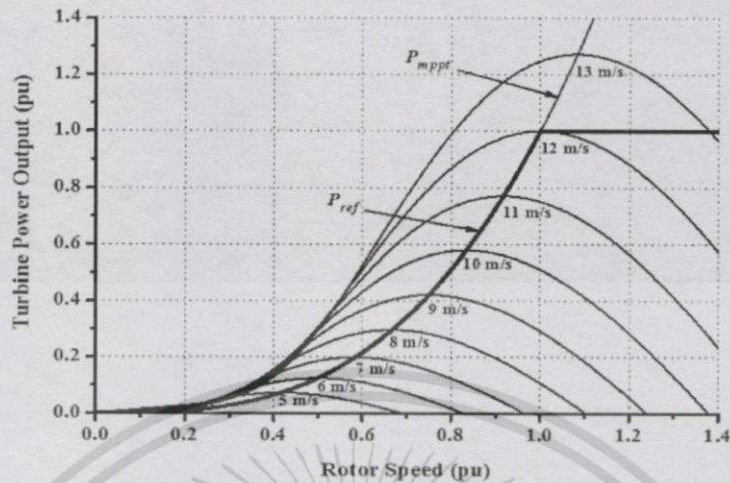
พลังงานที่ผลิตได้จากกังหันลมจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่ด้วยความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง ที่ความเร็วลมต่ำ (1-3 เมตร/วินาที) กังหันลมจะยังไม่ทำงาน ในช่วงความเร็วลมนี้ กังหันลมจะยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ที่ความเร็วลมระหว่าง 2.5-5 เมตร/วินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่า "cut in wind speed" ที่ความเร็วลมช่วงประมาณ 12-15 เมตร/วินาที เป็นช่วงที่เรียกว่า "nominal หรือ rate wind speed" ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตนเองค่าความเร็วลมที่แน่นอนขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดของใบพัดและการออกแบบ ที่จุดต่ำกว่า Nominal คือ "Maximum rotor efficiency" ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับ "tip speed ratio" (Siegfried, 1998) ในช่วงความเร็วลมที่สูงกว่า 25 เมตร/วินาที กังหันลมจะหยุดทำงาน เนื่องจากความเร็วลมที่สูงเกินไปจนอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้



รูปที่ 2.7 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบ Stall Limit (เส้นประ) และแบบ Pitch Control (เส้นทึบ)

2.5 การตามรอยจุดที่กำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุด (MTTP) [3] [4] [5]

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ที่ค่าความเร็วลมต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะแตกต่างกันเมื่อความเร็วโรเตอร์ต่างกัน ดังนั้นจุดที่เหมาะสมที่จะให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องมีการควบคุมเมื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ที่ความเร็วลมค่าต่างๆ

วิธีการควบคุม MPPT เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันผลิตไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธีโดยจะพิจารณาในส่วนของวิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation Method) P&O ซึ่งนอกเหนือจากวิธีนี้ยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถควบคุมระบบกังหันลมไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ดังนี้

- วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance)

หลักการของวิธีการนี้ คือ ทำโดยการหาค่าอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าขาออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของ DC Generator ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าจุดทำงานอยู่ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้าไม่เท่ากับศูนย์ จำทำการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของ DC Generator เป็นขั้นๆ จนกระทั่งจุดทำงานวิ่งเข้าสู่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

วิธีนี้มีข้อดีในแง่ของความสามารถในการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอย่างทันทีทันใด แต่จะมีการคำนวณที่ซับซ้อน ใช้เวลานานในการคำนวณ และเกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะคงตัวเมื่อต้องการลดเวลาในการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้น้อยลง วิธีนี้ยังคงมีการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ DC Generator เช่นเดียวกับวิธีการรบกวน

- Tip Speed Ratio (TSR) Control

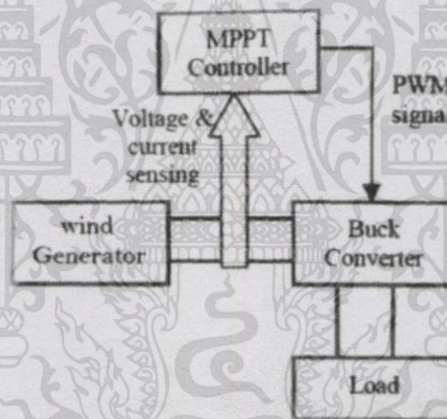
วิธีการควบคุม TSR เป็นการควบคุมความเร็วในการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษา TSR ให้เป็นค่าสูงสุด เพื่อให้เกิดพลังงานสูงสุด วิธีนี้ต้องใช้ทั้งความเร็วลมและความเร็วกังหันที่จะวัดหรือประมาณ นอกจากนี้ยังต้องทราบการทำให้ TSR มีค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุด

- Power Signal Feedback (PSF) Control

วิธีการควบคุมแบบนี้จะต้องทราบกราฟกำลังสูงสุดของกังหันลมและต้องตามรอยเส้นกราฟกำลังผ่านระบบควบคุม กราฟกำลังสูงสุดที่จะต้องได้จากแบบจำลองหรือการทดลองของแต่ละใบพัด ซึ่งวิธีนี้กำลังไฟฟ้าอ้างอิงจะได้โดยการบันทึกกราฟกำลังสูงสุดหรือใช้สมการกำลังทางกลของกังหันลมที่ความเร็วลมหรือความเร็วโรเตอร์ถูกนำมาใช้เป็นค่าอินพุต

2.5.1 แบบจำลองระบบ

การทำงานของระบบพลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมนั้นประกอบด้วยกังหันลมต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.9 ในส่วนของวงจรลดทอนแรงดันเป็นวงจรแปลงกระแสตรง (DC-DC Converter) แต่สามารถควบคุมขนาดของแรงดันขาเข้าและขาออกได้โดยอัตราส่วนระหว่างโวลต์ขาเข้าและขาออกจะถูกควบคุมโดยสัญญาณ PWM จากวงจรควบคุม MPPT โดยที่ตัวควบคุม MPPT จะทำการอ่านค่าแรงดันและกระแสที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำมากำหนด Duty Cycle ของสัญญาณ PWM



รูปที่ 2.9 การทำงานของระบบไฟฟ้าพลังงานลม

2.5.2 วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation)

หลักการการทำงานเป็นคาบเวลาโดยทำการปรับแรงดันไฟฟ้าของดีซีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวคือขั้นตอนการรบกวน หลังจากนั้นจะทำการวัดกำลังไฟฟ้าของดีซีเจนเนอเรเตอร์ที่ได้จากการรบกวน แล้วทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของดีซีเจนเนอเรเตอร์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อน เพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของดีซีเจนเนอเรเตอร์ให้จุดทำงานวิ่งเข้าหาจุดจ่าย

วิธีนี้เป็นวิธีที่มีอัลกอริธึมง่ายและมีประสิทธิภาพสูงในการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะคงตัวและไม่สามารถหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอย่างทันทีทันใดอีกทั้งในการ

หากำลังไฟฟ้าของดีซีเจนเนอเรเตอร์ต้องใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าจึงเกิดความยุ่งยากในการใช้งานและความซับซ้อนในการคำนวณ

วิธีการของ P&O จะทำงานด้วยการปรับค่ารอบการทำงานของวงจรถับคอนเวอร์เตอร์ คือการปรับค่าแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสังเกตกำลังไฟฟ้าเพื่อนำไปเพิ่มหรือลดรอบการทำงานในรอบการทำงานถัดไป ถ้ารอบจนแล้วกำลังเพิ่มขึ้น ดังนั้นทิศทางของการรบกวนในรอบถัดไปจะไปในทิศทางเดิม ในทางตรงกันข้าม ถ้ารอบจนแล้วกำลังมีค่าลดลง ทิศทางของสัญญาณรบกวนต้องตรงข้ามจากรอบก่อนหน้านี้

โดยเทคนิคนี้จะทำการปรับเพิ่มดิฟเฟอเรนเชียลที่ละนิดแล้วทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า ณ ปัจจุบันเทียบค่าที่วัดก่อนหน้านี้ ถ้ามีค่ามากกว่าก็จะปรับค่าดิฟเฟอเรนเชียลเพิ่มขึ้น ถ้ามีค่าน้อยกว่าก็จะทำการปรับลดค่าดิฟเฟอเรนเชียลแล้วทำการเปรียบเทียบอีกครั้ง

2.6 คุณลักษณะของกังหันลม

กำลังจากการของลมสำหรับกังหันลมจะแสดงในสมการดังนี้

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_w^3 \quad (2.1)$$

เมื่อ

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ

A_T คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

V_w คือ ความเร็วของลม (m/s)

เมื่อกระแสลมผ่านกังหันลมพลังงานจลน์จะถูกส่งผ่านไปยัง rotor ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงนั้นจะอธิบายจากค่า Power Coefficient (C_p) โดย C_p เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังที่เกิดจากกังหันลมกับพลังงานจลน์ของกังหันลม ซึ่งพลังงานจลน์ของกังหันลมและค่า Power Coefficient (C_p) จะแสดงในสมการดังนี้

$$E = \frac{1}{2} \rho_a v V^2 \quad (2.2)$$

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3} \quad (2.3)$$

ตามกฎของ Betz ได้กล่าวไว้ ไม่มีกังหันลมที่สามารถได้รับพลังงานจลน์เกิน 59.3 เปอร์เซ็นต์ ค่า Power Coefficient (C_p) ในอุดมคติของกังหันลมคืออัตราส่วนของกำลังสูงสุดซึ่งได้มาจากลมซึ่งใช้พลังงานทั้งหมดจากลม ซึ่งค่า Factor เท่ากับ 0.593 คือ Betz Coefficient ซึ่งค่า Betz Coefficient เป็นค่า fraction สูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่มาจากกระแสลมที่สามารถรับมาได้ค่า C_p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกังหันลมจะขึ้นอยู่กับค่าต่างๆอาทิเช่นค่า Rotor Blade เป็นต้น ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องออกแบบให้ มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อจะให้ค่า C_p เป็นค่าสูงสุดซึ่งสมการของแรงและแรงบิดจะแสดงใน สมการดังนี้

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_w^2 \quad (2.4)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_w^2 R \quad (2.5)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของกังหันลม

อัตราส่วนระหว่างค่าแรงบิดจริงที่เพิ่มขึ้นจากค่ารัศมีของกังหันลมกับค่าแรงบิดจาก ทฤษฎีเราจะเรียกอัตรส่วนนี้ว่า C_T โดย C_T มีค่าตามสมการดังนี้

$$C_T = \frac{2T_T}{\rho_a A_T V^2 R} \quad (2.6)$$

โดยที่ T_T เป็นค่าแรงบิดจริง

อัตราส่วนระหว่างความเร็วของกังหันและความเร็วลม เราจะเรียกอัตรส่วนนี้ว่า Tip speed ratio (λ) ซึ่งค่า Tip Speed Ratio จะแสดงดังสมการดังนี้

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{2\pi NR}{V} \quad (2.7)$$

โดยที่ Ω คือ ความเร็วเชิงมุมของกังหัน

R คือ รัศมีของกังหัน

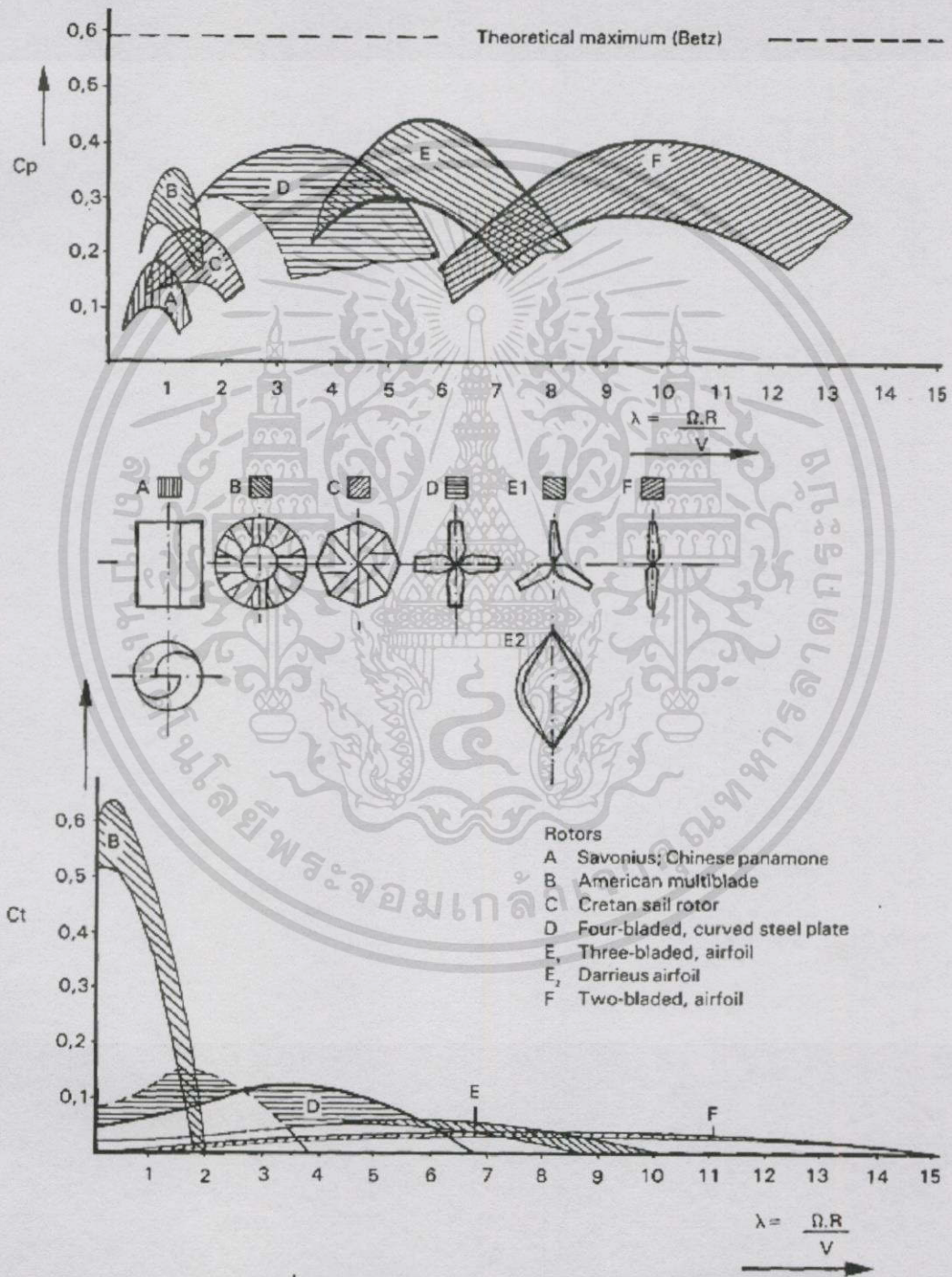
V คือ ความเร็วลม

ซึ่งจากสมการจะพบว่าค่า Power Coefficient และค่า Torque Coefficient จะ ขึ้นกับ Tip Speed Ratio ทั้งสิ้น ซึ่งค่า Tip Speed Ratio เป็นอัตราส่วนระหว่าง C_p และ C_T ซึ่งจะ แสดงในสมการดังนี้

$$\frac{C_p}{C_T} = \frac{R\Omega}{V} = \lambda \quad (2.8)$$

ประสิทธิภาพที่กังหันสามารถดึงกำลังไฟฟ้ามาได้นั้นจะขึ้นกับการเข้ากันของใบพัด และกระแสลม จากเส้นโค้ง $C_p - \lambda$ จะแสดงการประสิทธิภาพของใบพัดต่างๆ ซึ่งจะไม่ขึ้นกับ ขนาดของใบพัดและพารามิเตอร์ จากตัวอย่างเส้นโค้ง $C_p - \lambda$ สำหรับใบพัดรูปแบบต่างๆนั้นจะ

แสดงในรูป ซึ่งตามปกติค่า Power Coefficient ของกังหันลมจะเพิ่มขึ้นตามค่า Tip Speed Ratio จนถึงค่าสูงสุด และจะลดลงเมื่อค่า Tip Speed Ratio เพิ่มมากขึ้น ในส่วน $C_T - \lambda$ จะแสดงในตัวอย่างเส้นโค้งในรูปเช่นกัน

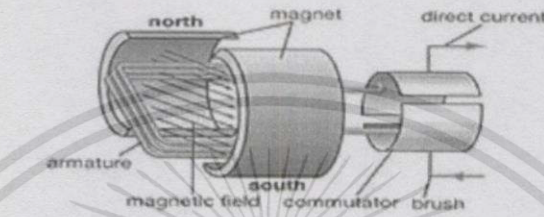


รูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพของกังหันลมแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง [6]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะมีแปรงถ่านทำหน้าที่จัดเรียงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับในขดลวดอาร์เมเจอร์มาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายออกมาจากจุดต่อทางไฟฟ้าที่ขั้วของแปรงถ่าน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นแรงดันจากการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อแท่งตัวนำที่อาร์เมเจอร์เคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced emf) ซึ่งค่าที่ได้จากการเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จาก

$$\vec{e} = \dot{\vec{u}}l \times \vec{B} \tag{2.9}$$

สามารถเขียนสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็น

$$E_a = K_a \phi_p \omega \tag{2.10}$$

และเมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์มีกระแสไหลอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก จะสามารถหาแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กได้จาก

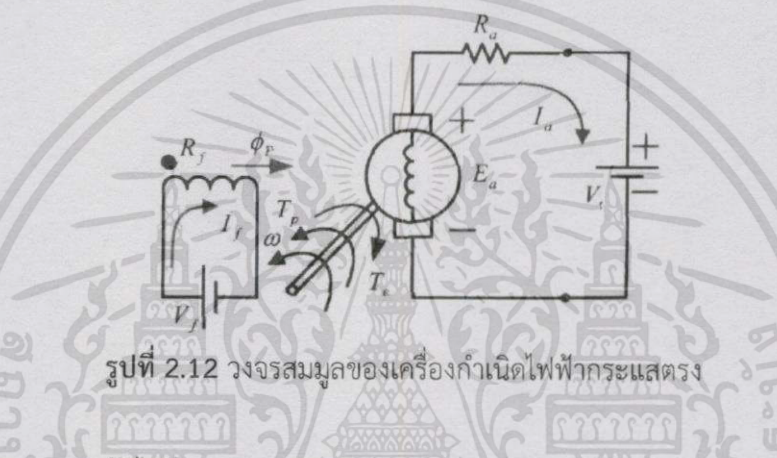
$$\vec{F} = \vec{I}l \times \vec{B} \tag{2.11}$$

ซึ่งสามารถหาแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเป็น

$$T_e = K_a \phi_p I_a \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

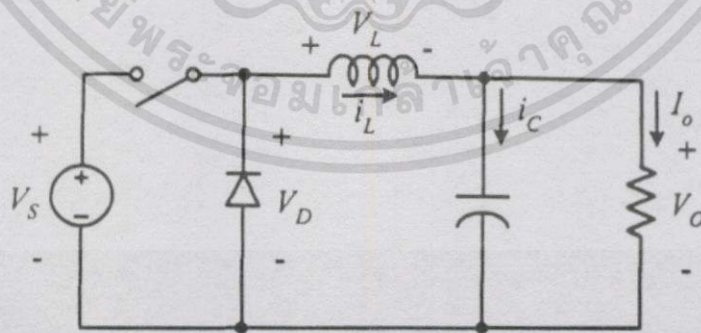
ส่วนวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนแรกที่เป็นวงจรของอาร์เมเจอร์ที่ประกอบด้วยแรงเคลื่อนที่ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (E_a) และค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (R_a) และส่วนที่สองเป็นขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ที่ต้องมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า (V_f) เพื่อให้มีกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (I_f) และมีความต้านทานของขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (R_f) ส่วนตัวโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω ในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยแรงบิดตัวต้นกำลังเท่ากับ T_p ขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าจะมีแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (T_e) ในทิศทางตรงข้ามกับการหมุน



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

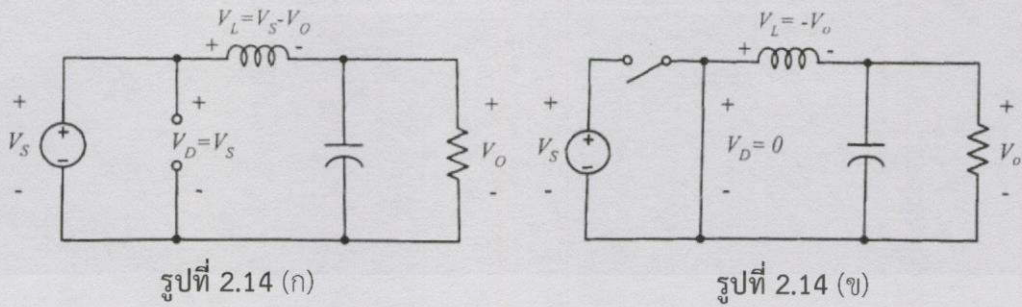
2.8 วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า [7] [8] [9]

เป็นวงจรที่ใช้ลดแรงดันกระแสตรง ภายในวงจรประกอบด้วย 1. Power MOSFET 2. Diode 3. Inductor 4. Output Filter Capacitor ดังรูปที่ 2.13 วงจรลดทอนแรงดันสามารถทำงานได้สองโหมดที่แตกต่างกัน คือ โหมดนำกระแสต่อเนื่อง และโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.13 วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า

ในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง วงจรจะมีการทำงานอยู่ 2 สถานะ คือ ON และ OFF
 ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของ MOSFET (ก) สถานะ ON (ข) สถานะ OFF

ในสถานะ ON ; มอสเฟสกำลังจะ ON และไดโอดจะ OFF จะได้สมการดังนี้

$$-V_S + V_L + V_O = 0 \quad (2.13)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.14)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (2.15)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วง ON คือ $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_S - V_O}{L} \right) DT \quad (2.16)$$

ในสถานะ OFF ; มอสเฟสกำลังจะ OFF และไดโอดจะ ON จะได้สมการดังนี้

$$V_L = -V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.17)$$

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

dt ในกรณีอยู่ในช่วง OFF คือ $dt = (1-D)T$

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

ในช่วงสภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะสถานะ ON จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะสถานะ OFF จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.20)$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T = 0 \quad (2.21)$$

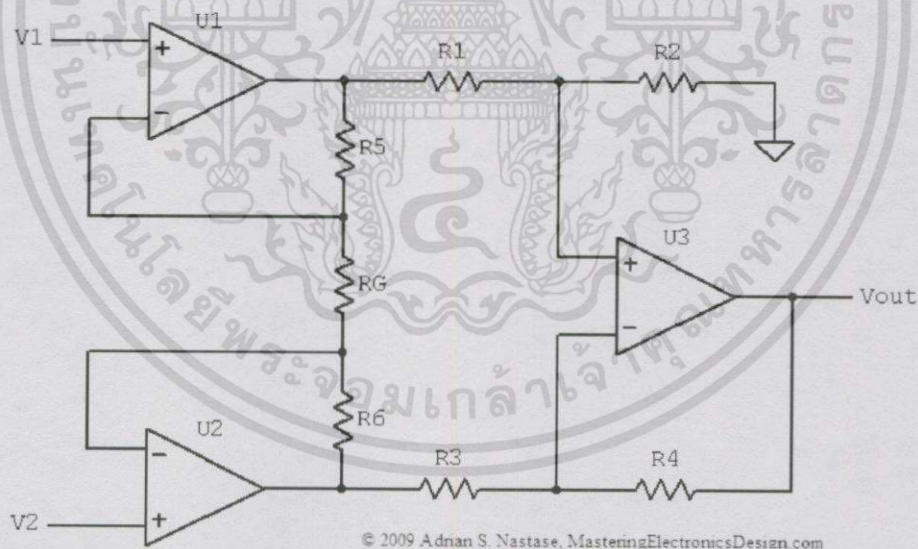
$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.22)$$

2.9 วงจรขยายสำหรับเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier) [10] [11]

เป็นวงจรขยายสัญญาณผลต่างชนิดหนึ่ง (Differential Amplifier) โดยจะมีวงจรกันชน (Buffer Amplifier) ต่อเข้าด้าน input วงจรนี้ใช้สำหรับการวัดและกระบวนการควบคุมที่มีความถูกต้องสูง ภายในวงจรจะประกอบด้วยออปแอมป์ 3 ตัว ความต้านทาน 6 ตัว และความต้านทานปรับค่าได้ 1 ตัว ดังรูปที่ 2.15 วงจรขยายสำหรับเครื่องมือวัดมีคุณสมบัติ 3 ประการ คือ

1. อัตราขยายสามารถปรับค่าได้ด้วยความต้านทานภายนอก R_G
2. อิมพีแดนซ์ด้านขาเข้ามีค่าสูง ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราขยายที่ปรับ
3. แรงดันขาออก V_o ขึ้นกับความแตกต่างระหว่าง V_1 และ V_2 ด้านขาเข้า ซึ่งจะไม่ขึ้นกับแรงดันโหมตร่วม

ขึ้นกับแรงดันโหมตร่วม



รูปที่ 2.15 วงจรขยายสำหรับเครื่องมือวัด

ในวงจรจากการใช้ Superposition Theorem ให้ $V_2=0$ ดังรูปที่ 2.15 จะได้ว่า

$$V_{out1} = \frac{R_2}{R_1} (V_{11} - V_{12}) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{11} = V_1 \left(1 + \frac{R_5}{R_G}\right) \tag{2.24}$$

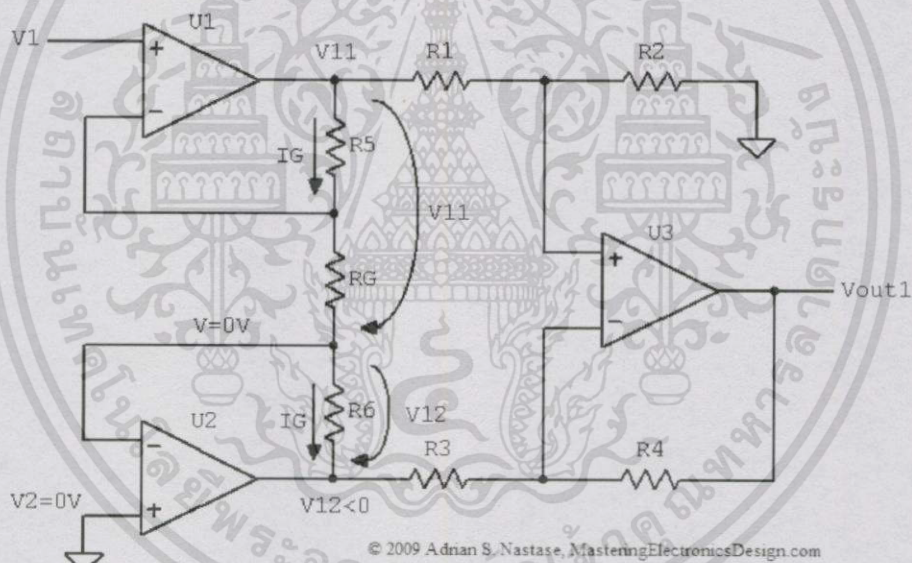
เนื่องจากกระแสที่ผ่าน R_5 และ R_6 เป็นกระแสเดียวกัน

$$\frac{V_{11}}{R_G + R_5} = -\frac{V_{12}}{R_6} \tag{2.25}$$

$$V_{12} = -V_{11} \left(\frac{R_6}{R_5 + R_G}\right) \tag{2.26}$$

แทน V_{11} และ V_{12} ลงในสมการ (2.23) และเนื่องจาก $R_5 = R_6$ จะได้ว่า

$$V_{out1} = V_1 \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{2R_5}{R_G}\right) \tag{2.27}$$



รูปที่ 2.16 ใช้ Superposition Theorem โดยกำหนดให้ $V_2=0$

Superposition ส่วนที่สอง ให้ $V_1=0$ ดังรูปที่ 2.17 จะได้ว่า

$$V_{out2} = \frac{R_2}{R_1} (V_{21} - V_{22}) \tag{2.28}$$

$$V_{22} = V_2 \left(1 + \frac{R_6}{R_G}\right) \tag{2.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

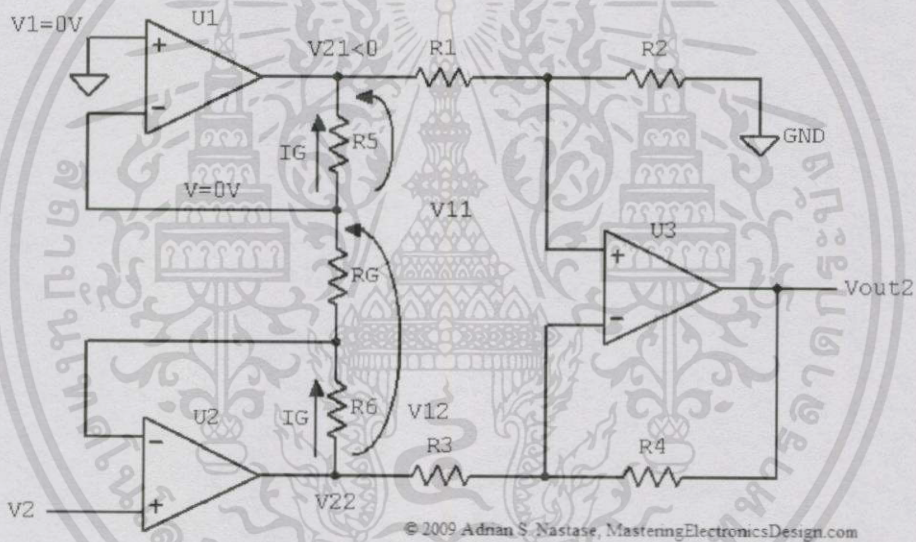
เช่นเดียวกับสมการ (2.25) จะได้ว่า

$$\frac{V_{22}}{R_G + R_6} = -\frac{V_{21}}{R_5} \tag{2.30}$$

$$V_{21} = -V_{22} \left(\frac{R_5}{R_6 + R_G} \right) \tag{2.31}$$

แทน V_{21} และ V_{22} ลงในสมการ (2.28)

$$V_{out2} = -V_2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 + \frac{2R_5}{R_G} \right) \tag{2.32}$$



รูปที่ 2.17 ใช้ Superposition Theorem โดยกำหนดให้ $V_1=0$

จาก $V_{out} = V_{out1} + V_{out2}$ จะได้ว่า

$$V_{out} = (V_1 - V_2) \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 + \frac{2R_5}{R_G} \right) \tag{2.33}$$

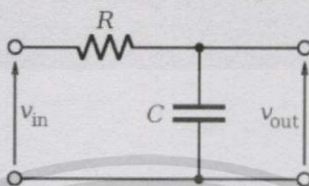
เนื่องจาก $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$ จะได้ สมการ Instrument Op-Amp

$$\frac{V_{out}}{V_1 - V_2} = \left(1 + \frac{2R}{R_G} \right) \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) [12] [13] [14]

เป็นวงจรที่ใช้กรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออกจากระบบ เพื่อไม่ให้สัญญาณที่วัดได้ผิดเพี้ยน เช่น สัญญาณรบกวนจากภายนอก สัญญาณจากอุปกรณ์สวิชชิง เป็นต้น โดยจะนำความต้านทานมาต่ออนุกรมและตัวเก็บประจุมาต่อขนานดังรูปที่ 2.18



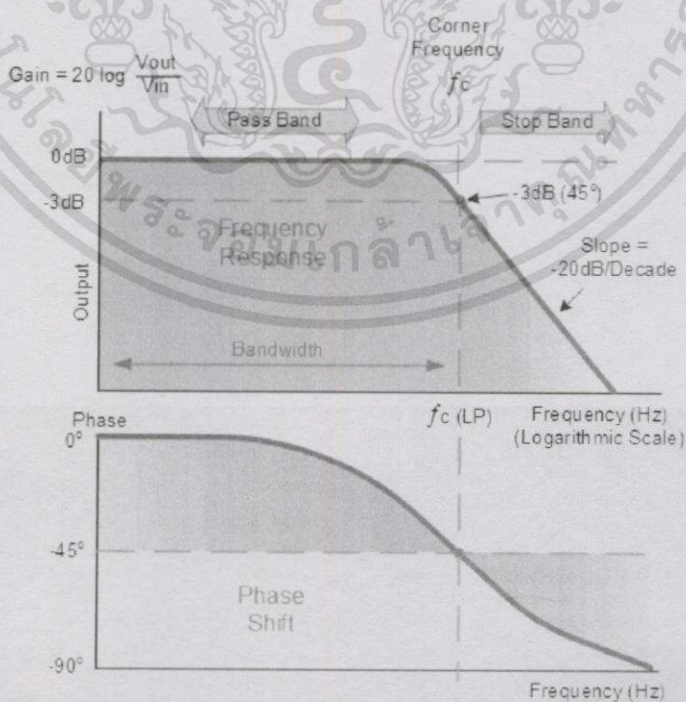
รูปที่ 2.18 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

ในการหา $f_{\text{cut-off}}$ จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.35)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.36)$$

ในอุดมคติที่ $f > f_{\text{cut-off}}$ สัญญาณจะเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณจะค่อยๆ ลดลงตามกราฟ โดยที่ $f_{\text{cut-off}}$ สัญญาณจะลดลง 3 dB



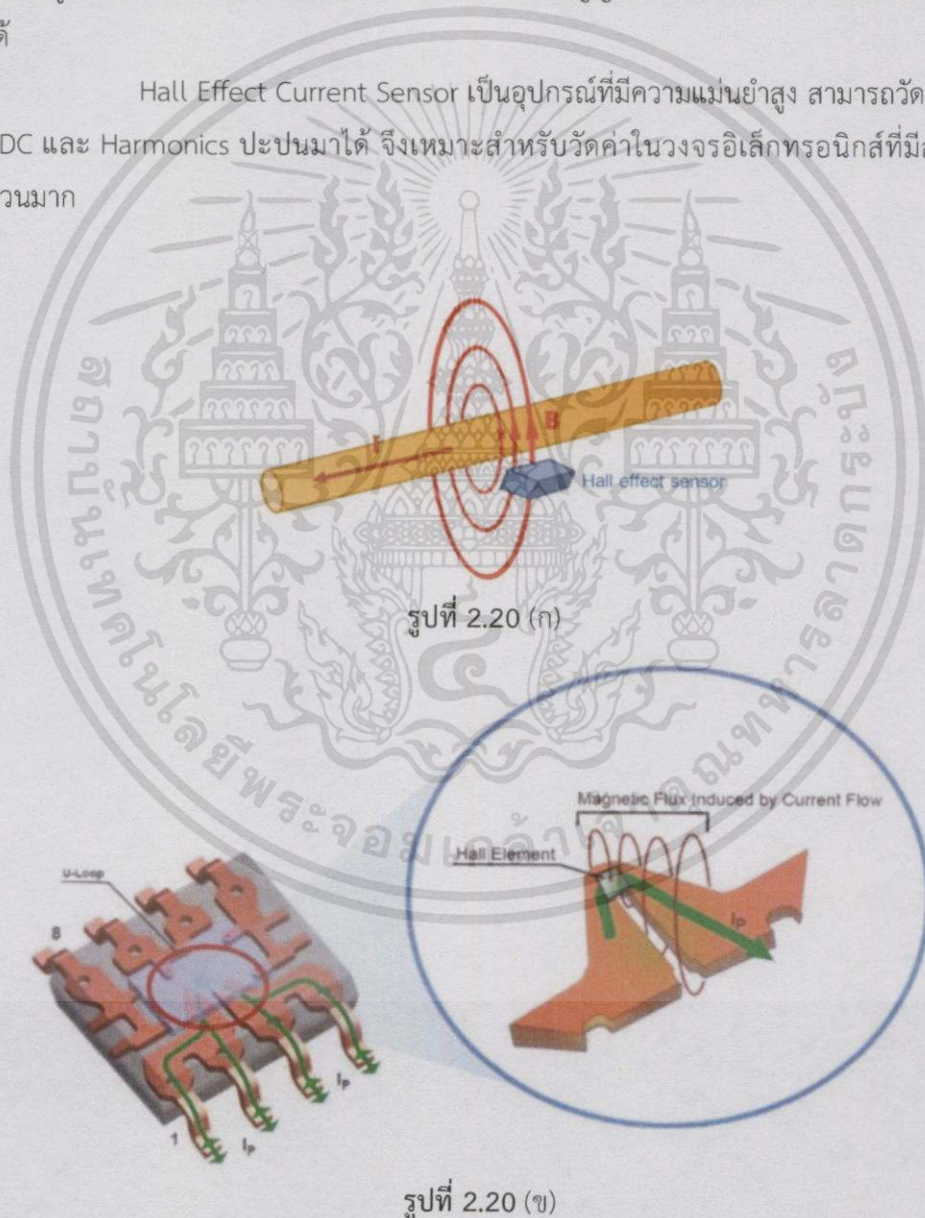
รูปที่ 2.19 กราฟระดับการกรองสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 ชุดตรวจจับสนกระแส (Current Sensor) [15]

ชุดตรวจจับสนกระแสมีหลายประเภท เช่น Current Sensing Resistors , Hall Effect Sensor , Current Transformer เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงชุดตรวจจับสนกระแสประเภท Hall Effect Current Sensor เนื่องจากมีการความเหมาะสมในวงจรที่มีกระแสไหลในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งสามารถวัดค่ากระแสโดยการวัดคัลลิ่งสายของกระแสที่ไหล และให้อาท์พุทออกมาเป็นแรงดัน โดยเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าทั้ง DC และ AC จะทำให้เกิดเส้นสนามแม่เหล็กรอบสายไฟ เมื่อเซ็นเซอร์ Hall effect อยู่ในบริเวณเส้นสนามแม่เหล็กของสายไฟ จะส่งสัญญาณออกมา ตามระดับสนามแม่เหล็กที่วัดได้

Hall Effect Current Sensor เป็นอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง สามารถวัดสัญญาณที่มี DC และ Harmonics ปะปนมาได้ จึงเหมาะสำหรับวัดค่าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสัญญาณรบกวนมาก



รูปที่ 2.20 ชุดตรวจจับสนกระแส (ก) การวัดกระแสโดยใช้ Hall Effect Sensor
(ข) Hall Effect Sensor ภายในชิปตระกูล ACS

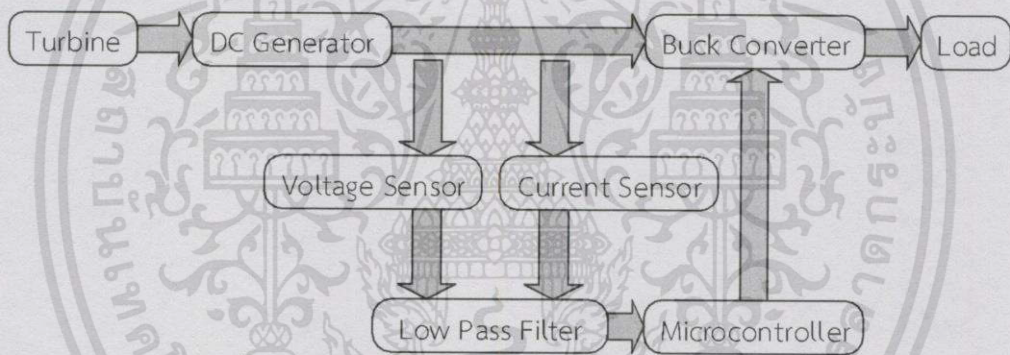
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบชุดวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) ในขั้นแรกจะรับไฟจาก DC Generator ผ่านเข้ามาในวงจรควบคุม ก่อนที่จะถูกส่งต่อไปยังโหลด ซึ่งในวงจรควบคุมจะมีการกำหนดค่าแรงดันโดยการปรับค่า Duty Cycle ซึ่งได้จากการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะส่งคำสั่งไปยังวงจร Buck Converter ซึ่งมีอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในการเปิด-ปิดกระแส สำหรับค่าที่นำเข้ามาคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นกระแสและแรงดัน ซึ่งมีการนำค่าเข้ามาโดยใช้ Current Sensor และ Voltage Divider โดยมีวงจรกรองสัญญาณต่อทำหน้าที่ในการขจัดสัญญาณรบกวนออกไปจากวงจรวัดค่ากระแสและแรงดัน ซึ่งรายละเอียดของวงจรต่างๆ เป็นดังนี้

3.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)



รูปที่ 3.1 Block Diagram ของชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.2 การออกแบบวงจรทอนแรงดัน (Buck Converter)

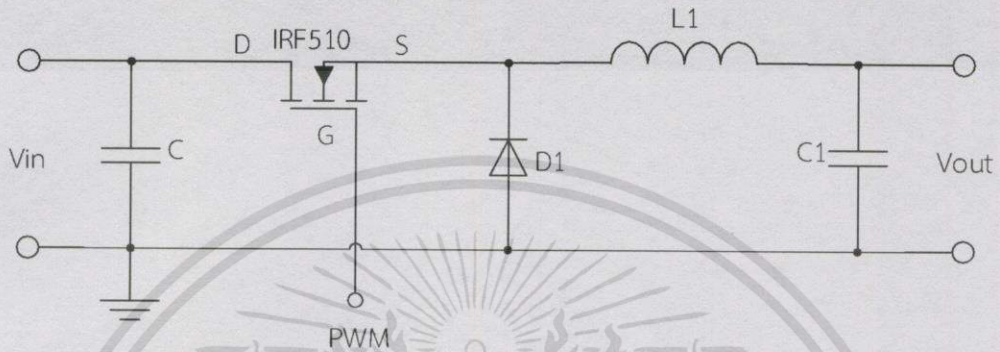
วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ หรือวงจรทอนแรงดัน คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า และเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่มีความเป็นกระแสตรงมากๆ โดยจะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ผกผันกับกำลังสองของความถี่ โดยองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรมีดังนี้

1. Input เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
2. Output เป็นแรงดันไฟฟ้าที่โหลด
3. Switch เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เปิด-ปิด การนำกระแสในวงจร
4. ไดโอด (Diode: D) จะทำหน้าที่นำกระแสขณะที่สวิตช์เปิด เพื่อให้กระแสไหลผ่าน

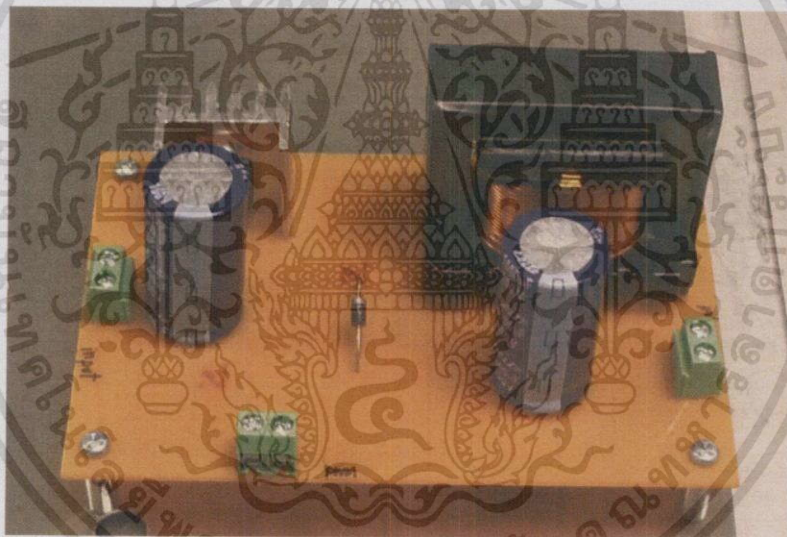
โหลดได้อย่างต่อเนื่อง โดยกระแสในวงจรจะมาจากตัวเหนี่ยวนำ

5. ตัวเหนี่ยวนำ (Inductance: L) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส และช่วยกรองสัญญาณรบกวน และป้องกันการกระชากของกระแสให้กับโหลด

6. ตัวเก็บประจุ (Capacitance: C) ทำหน้าที่ในการช่วยจ่ายกระแสและทำให้แรงดันขาเข้าและขาออกเรียบ



รูปที่ 3.2 (ก)



รูปที่ 3.2 (ข)

รูปที่ 3.2 วงจรทอนแรงดัน (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรที่ออกแบบจริง

3.2.1 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductance)

ในการทำให้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ค่าการเหนี่ยวนำจะต้องมีค่ามากพอ ซึ่งจะหาขนาดที่เหมาะสมได้จะเริ่มต้นจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นกระแสบวกเสมอ โดยค่าที่เล็กที่สุดของตัวเหนี่ยวนำคือ

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (3.1)$$

เมื่อ $f_s = \frac{1}{T_s}$: ความถี่ในการสวิตช์
 D : ดิวตี้ไซเคิล
 R : โหลดความต้านทาน

โดยค่าที่ใช้คำนวณเพื่อให้นำกระแสได้ต่อเนื่องมีดังนี้

$$\begin{aligned} f_s &= 30 \text{ kHz} \\ D &= 0.1 \\ R &= 100 \Omega \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ 3.1 จะได้ว่า $L_{min} = \frac{(1-0.1)(100)}{2(30 \times 10^3)} = 1.45 \text{ mH}$

จากการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ได้ค่าที่ 9.388 mH, $X_L = 1.7689 \text{ k}\Omega$ ที่ 30 kHz โดยในการออกแบบ จะใช้ความถี่ในการสวิตช์ 30 kHz

3.2.2 การหาค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance)

วงจรบักคอนเวอร์เตอร์จะมีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ เพื่อรักษาแรงดันให้คงที่ โดยจะไปลดอัตราระลอกคลื่น (Ripple Ratio) ระหว่างคายอดถึงยอดของแรงดันไฟฟ้า ในการหาค่าตัวเก็บประจุในวงจรบักคอนเวอร์เตอร์สามารถหาได้จากสูตร

$$C = \frac{(1-D)}{8Lf^2 \frac{\Delta v_o}{v_o}} \quad (3.2)$$

เมื่อ $f_s = \frac{1}{T_s}$: ความถี่ในการสวิตช์
 D : ดิวตี้ไซเคิล
 L : ค่าความเหนี่ยวนำ
 Δv_o : ค่าระลอกแรงดันขาออก
 v_o : แรงดันขาออก

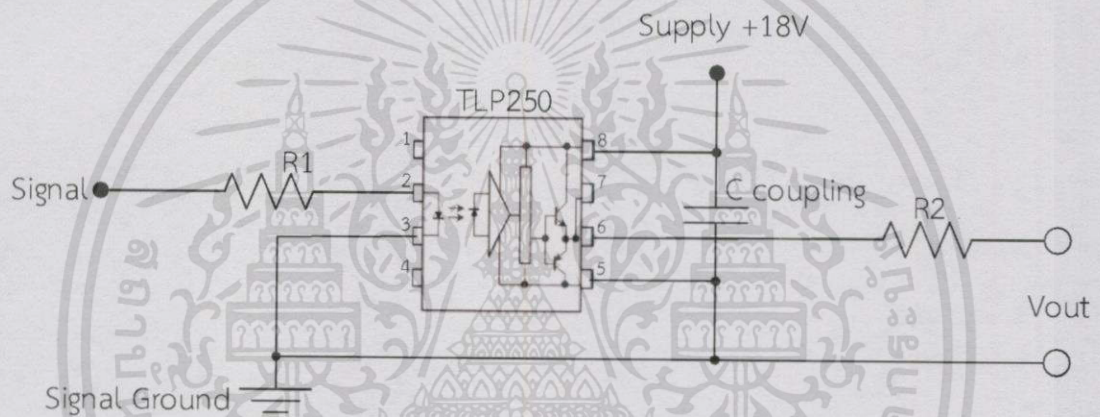
แทนค่าลงในสมการ 3.2 จะได้ $C = \frac{(1-0.1)}{8(1.45 \times 10^{-3})(30 \times 10^3)^2 (\frac{0.2}{70})} = 30.17 \mu\text{F}$

ในการออกแบบ เลือกใช้ค่าที่ 1000 μF

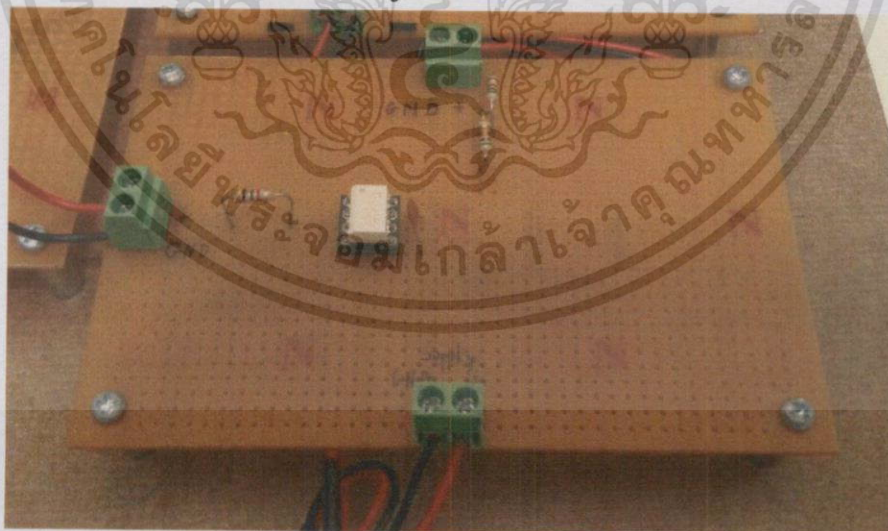
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชุดขับมอสเฟต (Power MOSFET Gate Drive)

มอสเฟตกำลังจะนำกระแสเมื่อให้แรงดันที่ขาเกตเมื่อเทียบกับขาซอส (V_{GS}) มีค่าสูงกว่าแรงดันที่ขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) สำหรับความเร็วในการสวิตช์ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเก็บและคายประจุของค่าตัวเก็บประจุแผ่นด้านเข้าของมอสเฟตกำลัง ดังนั้น ในการควบคุมการนำหรือไม่นำกระแสของมอสเฟตกำลังนั้น จะใช้วงจรขับเกต ซึ่งสามารถจ่ายกระแส (Sourcing) และดึงกระแส (sinking) ได้อย่างรวดเร็ว เพื่อจะให้มอสเฟตกำลังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง โดยในวงจรที่ออกแบบจะใช้ IC เบอร์ TLP250 ทำหน้าที่ในการขับมอสเฟต โดยจะรับสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ และนำมาขยายสัญญาณเพื่อส่งไปควบคุมสวิตช์มอสเฟตกำลัง



รูปที่ 3.3 (ก)



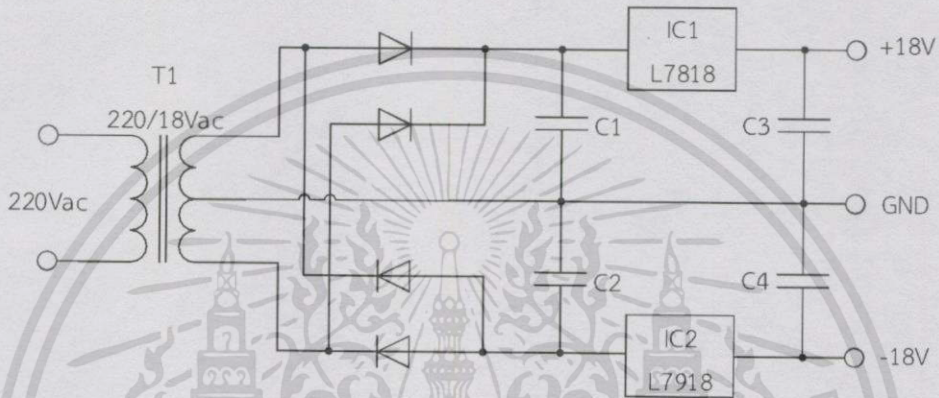
รูปที่ 3.3 (ข)

รูปที่ 3.3 วงจรชุดขับมอสเฟต (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรที่ออกแบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ชุดจ่ายไฟ (Regulator)

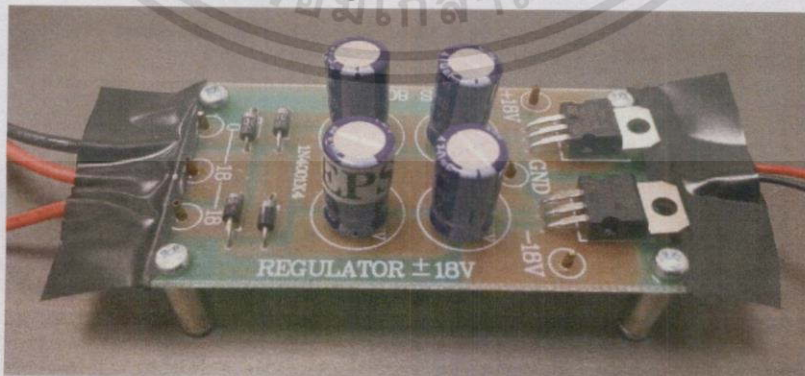
ไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้มาจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220V โดยแปลงแรงดันผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเซินเตอร์แทปขนาด 220/18V ก่อนที่จะเข้าสู่วงจรควบคุมแรงดัน REGULATOR 18V EPS_808 ซึ่งทำหน้าที่ในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ โดยจะมีแรงดันขาออก +18 V, 18 V และ GND วงจรจ่ายไฟนี้สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 1 A และใช้สำหรับแรงดันขาเข้า 15-18 V



รูปที่ 3.4 (ก)



รูปที่ 3.4 (ข)



รูปที่ 3.4 (ค)

รูปที่ 3.4 วงจรชุดจ่ายไฟ 18V (ก) วงจรตามทฤษฎี (ข) หม้อแปลง (ค) วงจรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรที่แสดงใน รูปที่ 3.4 มีหัวใจหลักในการควบคุมระดับแรงดันโดยใช้ไอซี 2 ตัว คือ IC เบอร์ L7818 จะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟด้านบวก ส่วน IC เบอร์ L7918 จะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟด้านลบ

3.5 ชุดตรวจจับกระแส (Current Detector)

ในการส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จะใช้ Current Sensor เบอร์ ACS712ELCTR-05B-T ทำการอ่านค่าสัญญาณกระแส จากนั้น จะใช้ Instrument Op-Amp เบอร์ INA114 ทำการขยายช่วงสัญญาณขึ้นไปทีระดับ 5V เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าได้ละเอียดขึ้น โดยมีการปรับขนาด Gain 27.03 เท่า เพื่อให้อยู่ในช่วง 0-5V

โดยวิธีการหาขนาดในการปรับ Gain มีหลักการคำนวณดังนี้

เนื่องจาก Current sensor มีค่า Sensitive ที่ 185 mV/A โดยกระแสสูงสุดที่ใช้งาน อยู่ที่ 0.7 A จึงเลือกพิกัดใช้งานที่ 1 A จะทำให้ได้แรงดันสูงสุดอยู่ที่ 185 mV ซึ่งจะนำไปขยายโดยใช้ Instrument op-amp โดยใช้แรงดันอ้างอิงที่ 2.5V โดยค่าที่อ่านได้จะเป็นดังนี้

ถ้า sensor อ่านค่าได้ 2.5V กระแสที่เข้าไมโครจะอยู่ในรูปแรงดัน 0V

ถ้า sensor อ่านค่าได้ 2.685V กระแสที่เข้าไมโครจะอยู่ในรูปแรงดัน 5V

จากสมการของ Instrument Op-Amp

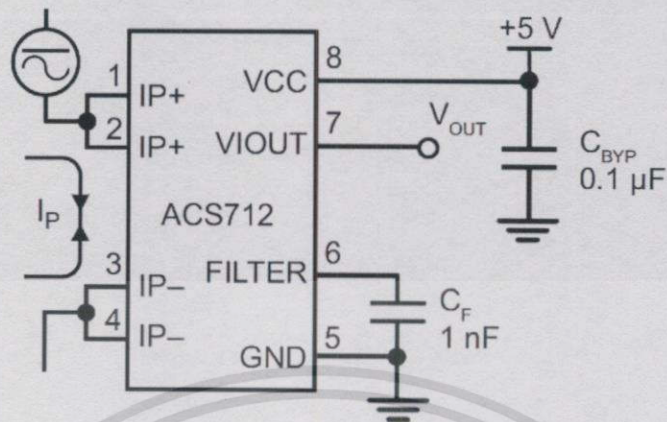
$$Gain = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = 1 + \frac{2R}{R_G} \quad (3.3)$$

จะได้ว่า

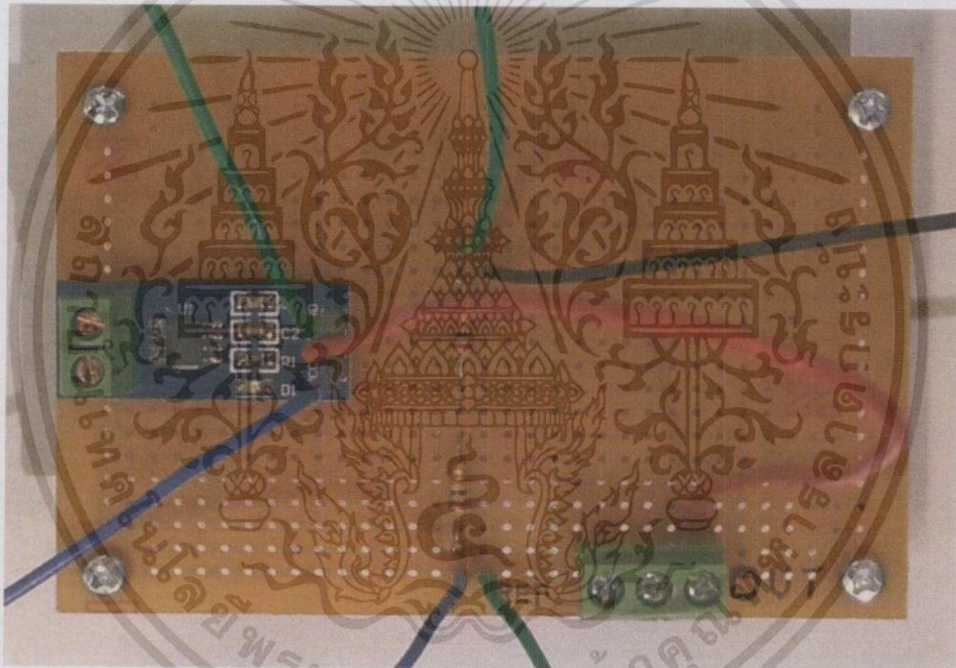
$$27.03 = \frac{5}{2.685 - 2.5} = 1 + \frac{2(25k)}{R_G}$$

$$R_G = 1921.08 \Omega$$

เนื่องจากความต้านทานปรับค่าได้ทั่วไปที่ขนาด 1, 2, 5, 10, ... Ω จึงเลือกใช้ R ขนาด 1 kΩ อนุกรมกับความต้านทานปรับค่าได้ 2 kΩ จึงต้องไปปรับความต้านทานปรับค่าได้ให้ได้ค่า 921.08 Ω โดยความต้านทานปรับค่าได้มีขนาด 2000Ω หมุนได้ 25 รอบ จะได้ว่า 1 รอบจึงคิดเป็น 40Ω ดังนั้น จึงต้องหมุน 11 รอบ กับ 184.86 องศา



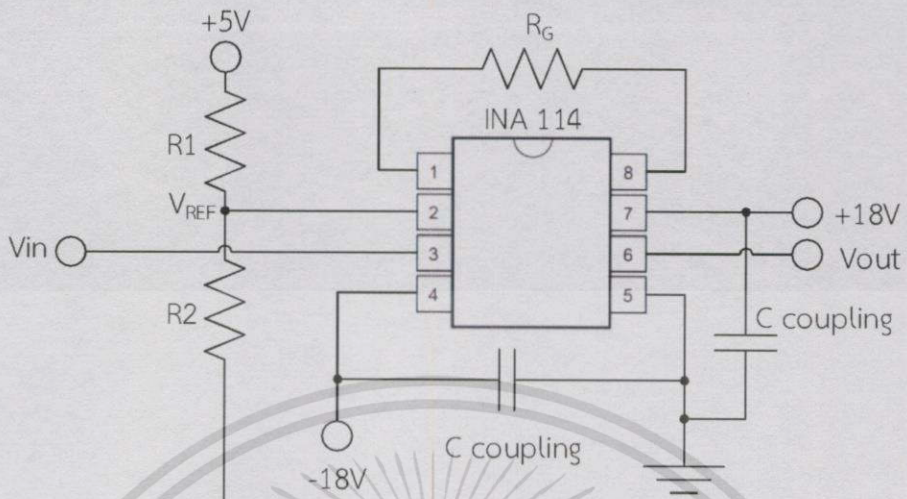
รูปที่ 3.5 (ก)



รูปที่ 3.5 (ข)

รูปที่ 3.5 Current Sensor เบอร์ ACS712 (ก) วงจรตามทฤษฎี (ข) วงจรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 (ก)



รูปที่ 3.6 (ข)

รูปที่ 3.6 วงจรปรับสภาพสัญญาณ (ค) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ง) วงจรที่ออกแบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ชุดตรวจจับแรงดัน (Voltage Detector)

จะรับค่าแรงดันที่ไหลโดยใช้โวลเตจดีไวเดอร์ทำการแบ่งแรงดันจากพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากที่ 60V ให้อยู่ภายในย่าน 5V โดยต่อตัวต้านทานอนุกรมกันเพื่อให้ได้อัตราส่วน 60:5 แรงดันที่ได้รับมาจะส่งค่าผ่าน Instrument Op-Amp ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจร Buffer เพื่อลดผลกระทบจาก loading effect ก่อนที่จะส่งค่าเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านต่อไป

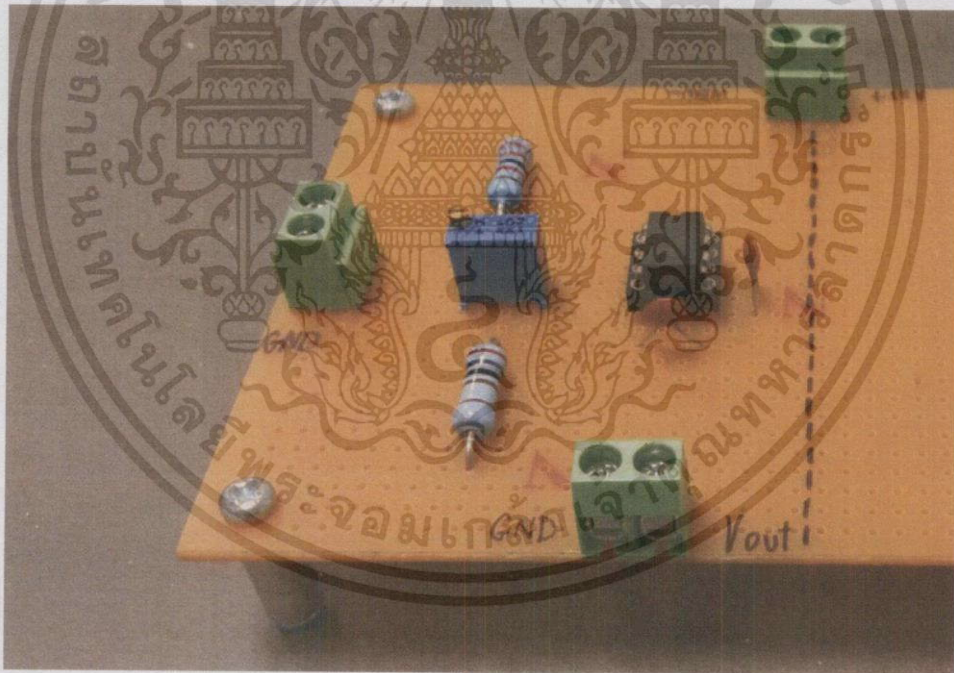
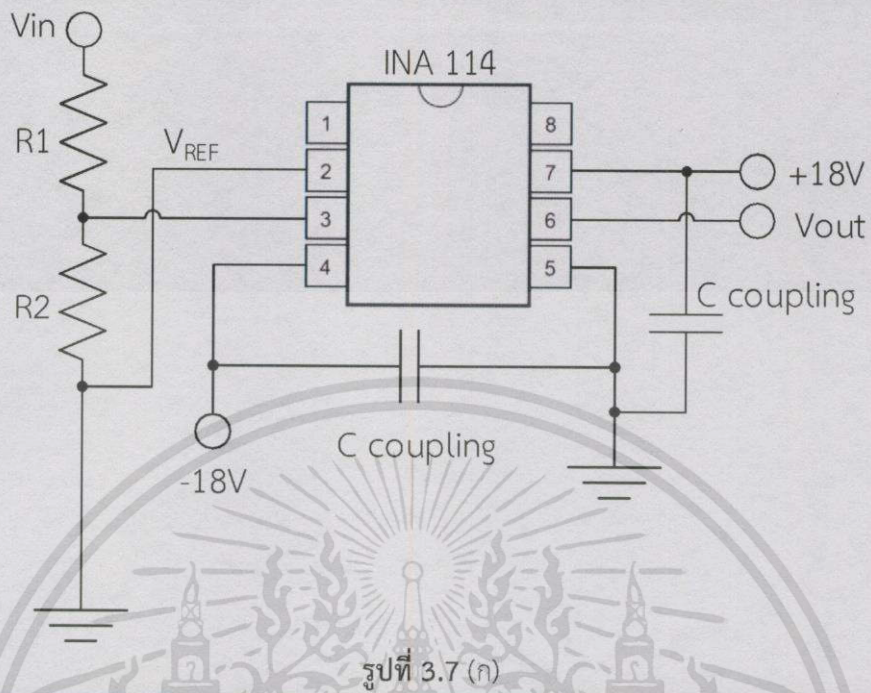
โดยวิธีการหาขนาดในการปรับ Gain มีหลักการคำนวณดังนี้
จากสมการของ Instrument Op-Amp

$$Gain = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = 2 + \frac{2R}{R_G} \quad (3.4)$$

เนื่องจากอัตราส่วนที่เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น 60:5 หรือได้แรงดันจาก Voltage Divider 5V พอดี จึงให้อัตราการขยาย หรือ Gain = 1 จะได้ว่า

$$1 = \frac{5}{5} = 1 + \frac{2(25k)}{R_G}$$

ซึ่งจะได้ว่า $R_G = \infty$ จึงเปรียบเสมือนไม่มี R_G



รูปที่ 3.7 วงจรชุดตรวจจับแรงดัน (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรที่ออกแบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ชุดวงจรกรอง

วงจรกรองทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการ เช่น สัญญาณรบกวน ฮาร์โมนิก สัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์สวิตชิง สัญญาณรบกวนจากภาคขยายสัญญาณ เป็นต้น โดยจะกันไม่ให้สัญญาณรบกวนสามารถเข้ามาในระบบได้ เพราะจะส่งผลทำให้การวัดค่าผิดพลาด เนื่องจากเป็นวงจรกระแสตรง ดังนั้นในทางอุดมคติจึงควรรับสัญญาณที่ความถี่ 0 Hz เข้ามาได้เพียงสัญญาณเดียว ซึ่งในที่นี้ได้ใช้วงจรกรองชนิด Low-Pass Filter ซึ่งมีความถี่ cut-off ที่ 11.61 Hz

โดยหลักการคำนวณจะเลือกขนาด capacitor 1000 μ F จากนั้นจึงหาขนาด R ได้ดังนี้

จากสมการ

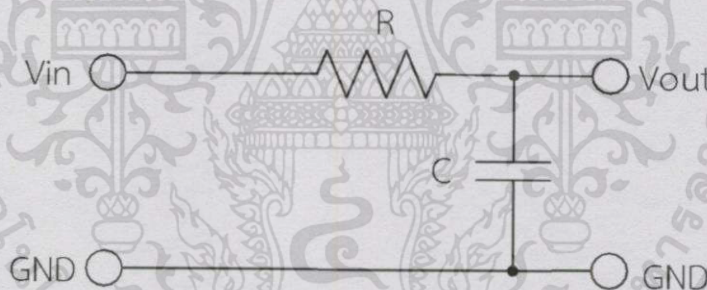
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.5)$$

จะได้

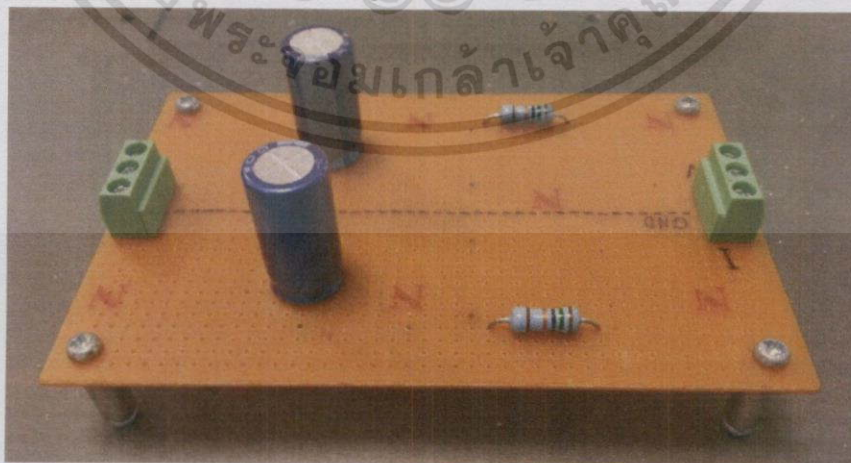
$$10 = \frac{1}{2\pi R(1000\mu)}$$

$$R = 15.91 \Omega$$

ซึ่งในวงจรได้เลือกความต้านที่ 15 Ω ซึ่งเมื่อคำนวณกลับจะได้ความถี่คัตออฟที่ 10.61 Hz ดังนั้นจึงสามารถกรองความถี่ 50 Hz ออกไปได้



รูปที่ 3.7 (ก)



รูปที่ 3.7 (ข)

รูปที่ 3.8 ชุดวงจรกรอง (ก) วงจรที่ออกแบบตามทฤษฎี (ข) วงจรที่ออกแบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Board)

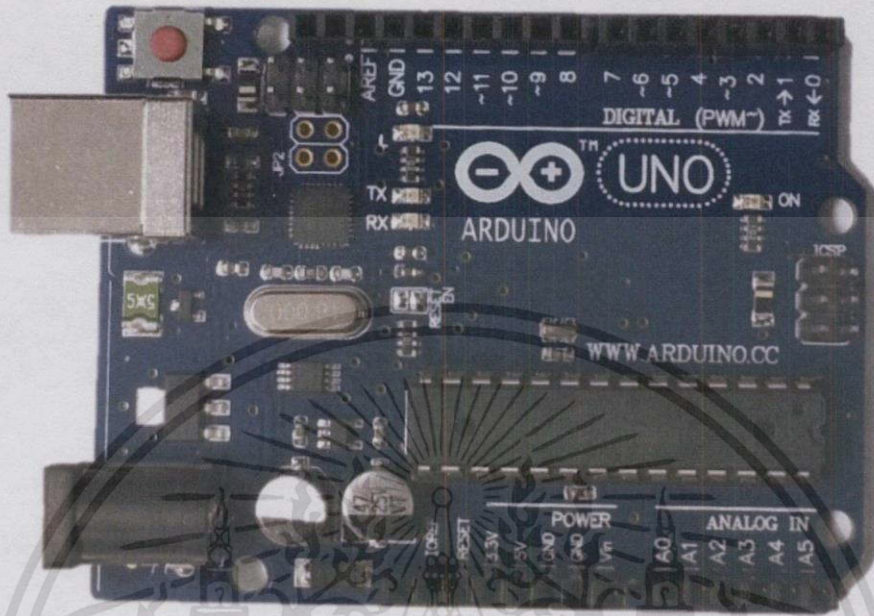
ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นชิปไอซีพิเศษชนิดหนึ่ง สามารถสั่งการหรือควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ให้เป็นที่ต้องการได้ ซึ่งมีความสามารถคล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมได้หลายภาษา เช่น ภาษาแอสเซมบลี ภาษาซี ภาษาเบสิก ภาษาปาสคาล เป็นต้น ในปัจจุบันมีผลิตรายจำหน่ายหลายตระกูล โดยแบ่งตามสถาปัตยกรรมการออกแบบที่แตกต่างกันไป สำหรับการออกแบบโครงงานนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMMEGA328P-PU ซึ่งทำงานบนบอร์ด Arduino Uno R3

3.7.1 คุณสมบัติของบอร์ด Arduino Uno R3

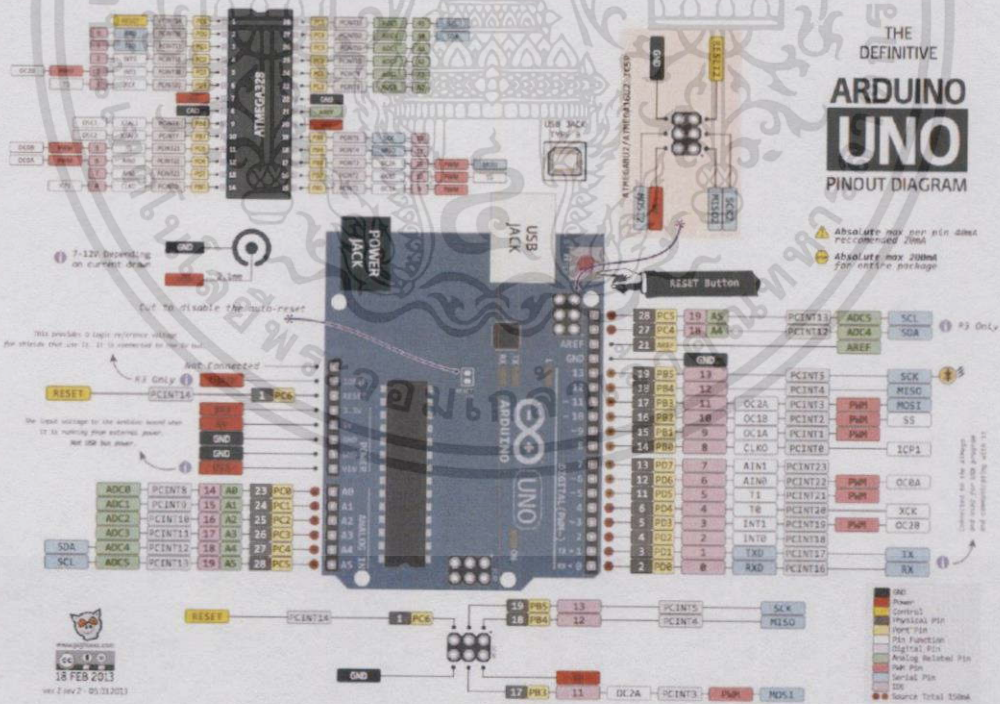
Microcontroller-----	ATmega328
Operating Voltage-----	5V
Input Voltage (recommended)-----	7-12V
Input Voltage (limits)-----	6-20V
Digital I/O Pins-----	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins-----	6
DC Current per I/O Pin-----	40 mA
DC Current for 3,3V Pin-----	50 mA
Flash Memory-----	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by boot loader
SRAM-----	2 KB (ATmega328)
EEPROM-----	1 KB (ATmega328)
Clock Speed-----	16 MHz

- ซึ่งชุดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ต่างๆดังนี้
- แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล
 - สร้างสัญญาณ PWM และส่งค่าออกไปจ่ายวงจรที่เกี่ยวข้อง
 - ประมวลผลกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรตรวจจับกระแสและวงจรตรวจจับแรงดัน

เพื่อนำไปวิเคราะห์ในการปรับค่า Duty cycle



รูปที่ 3.9 (ก)



รูปที่ 3.9 (ข)

รูปที่ 3.9 บอร์ด Arduino UNO R3 (ก) บอร์ดที่ใช้งานจริง (ข) วงจรการเชื่อมต่อบนบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้งาน

- ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณ PWM และส่งสัญญาณในรูปแบบของดิวิตีไซเคิล เพื่อจ่ายให้วงจรขับเคลื่อน เพื่อขยายสัญญาณและนำไปควบคุมการนำกระแสมอเตอร์
- ไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงสัญญาณที่รับจากวงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก ไปเป็นสัญญาณดิจิทัล

3.7.3 การประมวลผลของโปรแกรมควบคุม

ในการประมวลผลของโปรแกรมควบคุมการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. เริ่มต้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่าแรงดันและกระแสจากชุดตรวจจับ แล้วทำการแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นดิจิทัล โดยใช้ Analog to Digital Converter (ADC) ซึ่งมีอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปประมวลผล

2. นำค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากการแปลงค่าไปคำนวณค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาเป็นค่าอ้างอิงกับสัญญาณที่ไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่ากระแสและแรงดันเข้ามาใหม่ หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบกันเพื่อวิเคราะห์ในการปรับดิวิตีไซเคิลให้มีค่าที่เหมาะสม ณ จุดที่ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นค่าที่ใช้อ้างอิงสำหรับรอบต่อไป

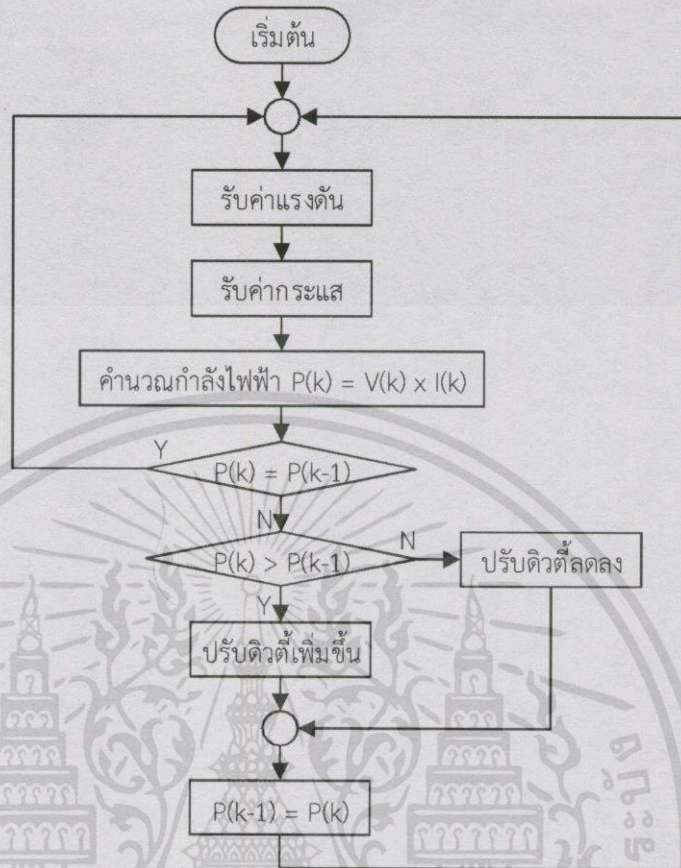
3. เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าใหม่กับค่ากำลังไฟฟ้าเดิมโดยวิธี P&O โดยมีหลักการดังนี้

3.1 ค่ากำลังไฟฟ้าที่เข้ามาใหม่มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าเดิม จะเปลี่ยนจุดการทำงานในทิศทางเดิม และทำการเก็บค่ากำลังไฟฟ้านั้นไว้เป็นค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าใหม่ต่อไปเรื่อยๆ

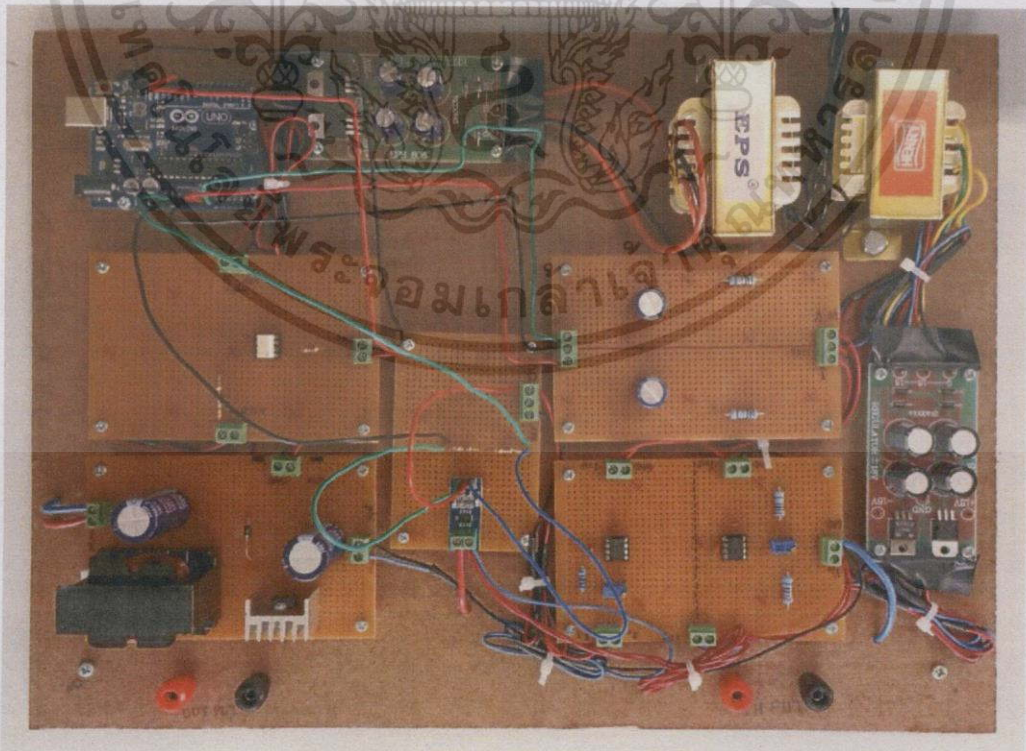
3.2 ถ้าหากค่ากำลังไฟฟ้าที่เข้ามาใหม่มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าเดิมจะเปลี่ยนจุดการทำงานไปในทิศทางตรงกันข้าม จนกว่าค่ากำลังไฟฟ้าใหม่ที่เข้ามาจะมีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดอ้างอิง

3.3 ถ้าหากค่ากำลังไฟฟ้าใหม่มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเดิมจะคงค่าดิวิตีไซเคิลไว้ที่ค่าเดิม

โดยโปรแกรมจะทำงานวนลูปเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดตลอดเวลา โดยแสดงเป็น Flow Chart ได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 Flow Chart การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี P&O



รูปที่ 3.11 วงจรที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 อุโมงค์ลม

ในการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) จะจำลองโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ความยาว 1.6 เมตร โดยประกอบเข้ากับพัดลมดูดอากาศ ขนาด 380 วัตต์ 1 เฟส 220V ความเร็วรอบสูงสุด 2800 รอบต่อนาทีพร้อมกับชุดควบคุมความเร็วรอบ และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พิกัดกำลังไฟฟ้า 28 วัตต์ 8 โพล ซึ่งขับเคลื่อนโดยใช้กังหันลม แบบ 3 ใบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 เมตร มุมพิทที่ 7 องศา



บทที่ 4

ผลการทดลอง

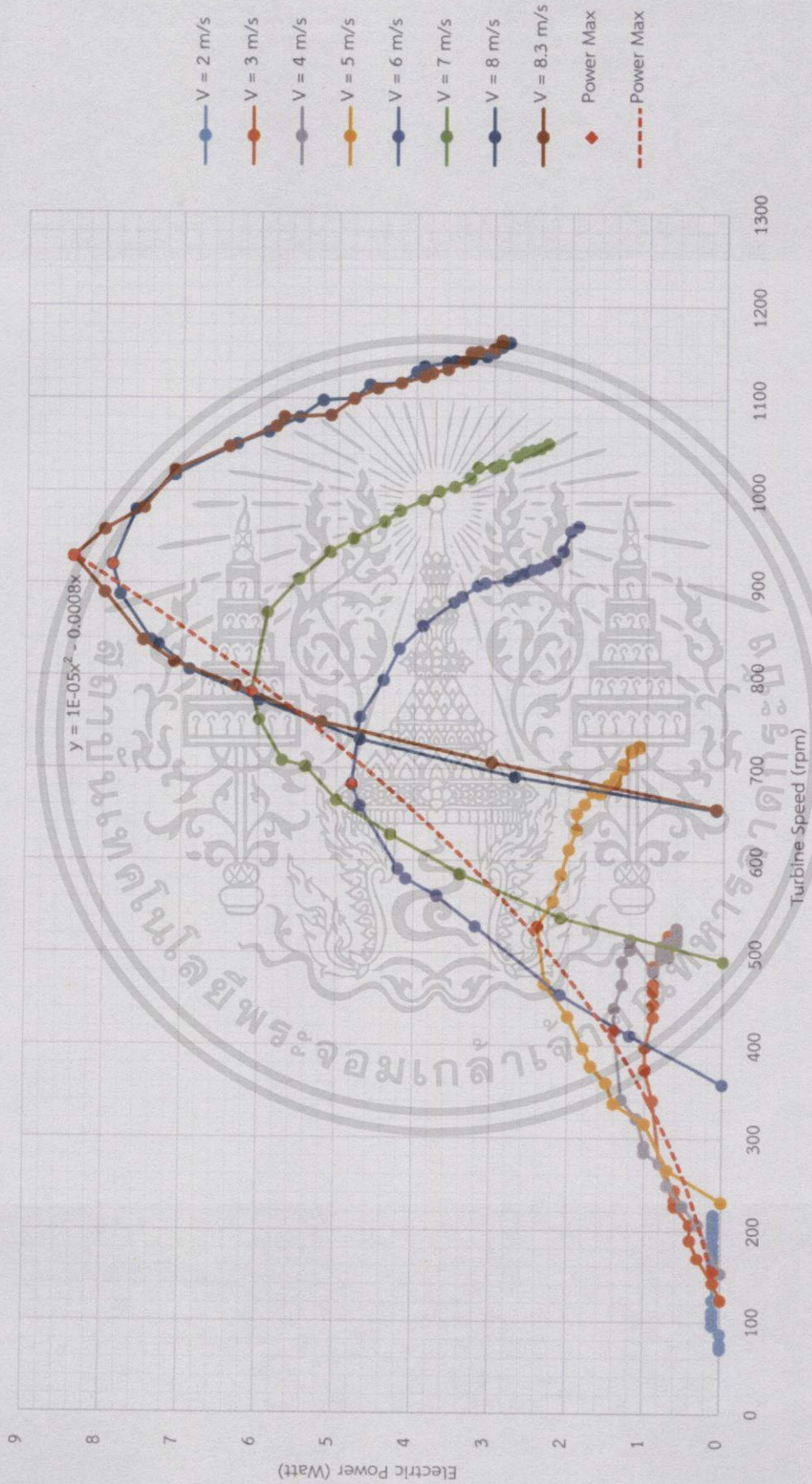
4.1 คุณลักษณะของกังหันลม

ในการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด จำเป็นจะต้องศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับกำลังที่ผลิตได้ของ DC-Generator ซึ่งมีการต่ออยู่กับใบพัดชนิด Multi-blade โดยจะทำการปรับค่าความต้านทานโดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่พิกัด 0 – 1000 โอห์ม และปรับความเร็วลมที่ 2 m/s (เป็นความเร็วลมที่ทำให้ใบพัดเริ่มเคลื่อนที่) ไปจนถึงความเร็วลมที่ 8.3 m/s ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่สามารถจำลองได้ในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก โดยผลการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังสูงสุดของกังหันลมแบบหลายใบพัดในแต่ละความเร็วลมค่าต่างๆ

ความเร็วลม V_{wind} (m/s)	กำลังสูงสุด P_{max} (Watt)
2	0.1
3	1
4	1.4
5	2.4
6	4.8
7	6.1
8	7.9
8.3	8.4

ซึ่งจากข้อมูลสามารถนำไปเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกังหันลมและกำลังที่ผลิตได้ในแต่ละค่าความเร็วลมต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟคุณลักษณะของกังหันลมชนิด Multi-blade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

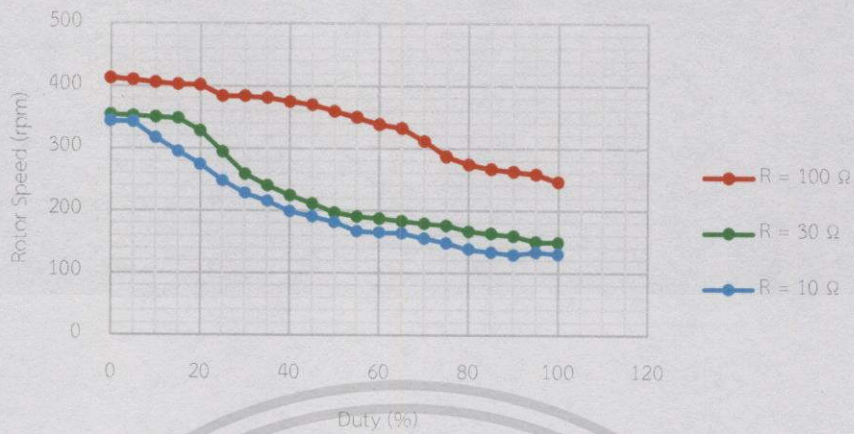
4.2 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle กับ ความเร็วโรเตอร์

การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle กับ ความเร็วโรเตอร์ มีความสำคัญต่อการศึกษาจุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากการปรับ Duty Cycle นั้นจะส่งผลโดยตรงกับความเร็วโรเตอร์ ในการทดสอบนี้จะมีการปรับค่า Duty Cycle ตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยมีการปรับ Step Duty Cycle เพิ่มขึ้นทีละ 5% ที่ความเร็วลม 4 m/s 6m/s และ 8.3m/s โดยใช้ความต้านทานที่ 10 Ω 30 Ω และ 100 Ω ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 4.2

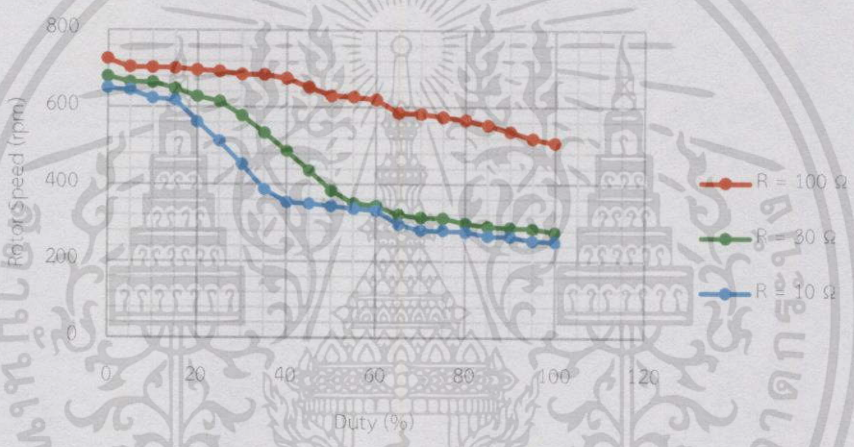
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ ความเร็วโรเตอร์

Duty (%)	Rotor Speed (rpm)								
	V = 4 m/s			V = 6 m/s			V = 8.3 m/s		
	R = 10 Ω	R = 30 Ω	R = 100 Ω	R = 10 Ω	R = 30 Ω	R = 100 Ω	R = 10 Ω	R = 30 Ω	R = 100 Ω
0	344.3	354.8	413.2	650.7	680.1	725.8	1113	1119	1138
5	343.4	352.7	410.2	644.5	665.3	704.2	1086	1095	1103
10	317.4	350.6	406.3	624.2	664.6	703.3	1083	1094	1095
15	295.2	348.5	403.4	618.6	649	701.4	1076	1082	1087
20	274.3	328.2	402	562	628.9	697.4	1058	1079	1079
25	248.2	294.5	384.3	512	616	693.1	1016	1062	1069
30	228.4	258.6	383.9	453.4	578.5	685.4	996	1035	1068
35	215.5	240.6	381.4	387.3	533.9	685	954.6	1013	1067
40	199.4	224.6	374.8	353.1	486.9	675.7	902.2	991.3	1062
45	190.7	211.8	369.9	349.9	436	652.2	884	965.1	1061
50	181.4	197	359.3	344.2	383.2	630.1	810.3	942.9	1053
55	167	190.7	349.8	336.9	351.1	627.4	746.8	887.6	1044
60	165.2	187.2	338.5	332.5	344.6	620.4	682.8	828.6	1032
65	164	183.8	332.6	296.1	321.5	585.7	676.9	788.7	1029
70	155.5	179.5	311.8	280.8	314.3	583.6	664	746.3	1014
75	147.8	175.8	287.2	280.1	312	575.2	632.8	669.7	1006
80	138.4	166.7	274.5	276.7	298.9	568	628.5	665.1	1001
85	133.5	163.3	267.2	266	291.2	554.6	618.7	654.3	994.6
90	129.3	159.3	263.3	264.6	287.5	537.1	607.6	640.8	982.6
95	133.3	150	258.8	253.6	284.9	519.2	601.2	628.3	977.5
100	130.3	149.1	246.6	251.1	275.8	508.1	598.1	621.4	962.3

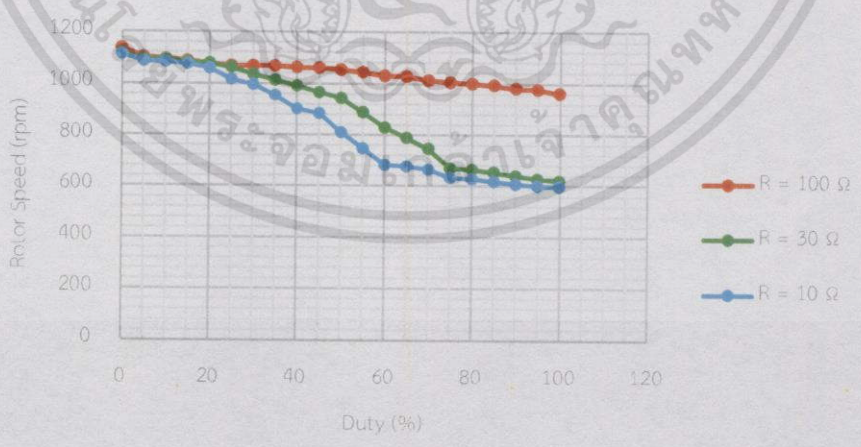
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 (ก)



รูปที่ 4.2 (ข)



รูปที่ 4.2 (ค)

รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ ความเร็วโรเตอร์ (ก) ที่ความเร็วลม 4 m/s (ข) ที่ความเร็วลม 6 m/s (ค) ที่ความเร็วลม 8.3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle กับ กำลังไฟฟ้า

เนื่องจากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ด้วยเทคนิคการรบกวนและสังเกต (P&O) จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลังไฟฟ้า ซึ่งจะทำการทดสอบโดยการปรับค่า Duty Cycle ตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยมีการปรับ Step Duty Cycle เพิ่มขึ้นทีละ 5% ที่ความเร็วลม 4 m/s 6m/s และ 8.3m/s โดยใช้ความต้านทานที่ 10Ω 30Ω และ 100Ω ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลังไฟฟ้า

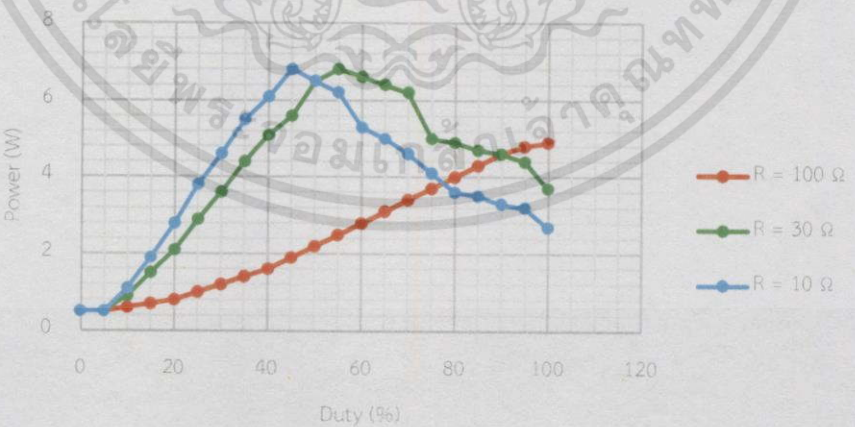
Duty (%)	Power (W)								
	V = 4 m/s			V = 6 m/s			V = 8.3 m/s		
	R = 10 Ω	R = 30 Ω	R = 100 Ω	R = 10 Ω	R = 30 Ω	R = 100 Ω	R = 10 Ω	R = 30 Ω	R = 100 Ω
0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
5	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
10	0.2	0.2	0.1	0.6	0.5	0.3	1.1	0.9	0.6
15	0.4	0.3	0.2	1	0.7	0.4	1.9	1.5	0.7
20	0.4	0.4	0.2	1.4	1	0.5	2.8	2.1	0.8
25	0.4	0.4	0.3	1.7	1.4	0.6	3.8	2.9	1
30	0.4	0.5	0.3	1.8	1.6	0.7	4.6	3.6	1.2
35	0.4	0.5	0.4	1.5	1.8	0.8	5.5	4.4	1.4
40	0.4	0.4	0.4	1.4	1.9	1.1	6.1	5.1	1.6
45	0.3	0.4	0.5	1.4	1.7	1.2	6.8	5.6	1.9
50	0.3	0.3	0.5	1.4	1.4	1.2	6.5	6.5	2.2
55	0.3	0.3	0.6	1.3	1.4	1.3	6.2	6.8	2.5
60	0.3	0.3	0.6	1.2	1.4	1.5	5.3	6.6	2.8
65	0.2	0.3	0.6	1	1.2	1.6	5	6.4	3.1
70	0.2	0.3	0.5	0.9	1	1.7	4.6	6.2	3.4
75	0.2	0.3	0.5	0.8	1	1.8	4.1	5	3.7
80	0.2	0.2	0.5	0.8	1	2	3.6	4.9	4
85	0.2	0.2	0.5	0.8	0.9	2	3.5	4.7	4.3
90	0.1	0.2	0.5	0.6	0.9	2	3.3	4.6	4.6
95	0.1	0.2	0.5	0.6	0.8	2	3.2	4.4	4.8
100	0.1	0.2	0.5	0.5	0.7	2	2.7	3.7	4.9



รูปที่ 4.3 (ก)



รูปที่ 4.3 (ข)



รูปที่ 4.3 (ค)

รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลังไฟฟ้า (ก) ที่ความเร็วลม 4 m/s (ข) ที่ความเร็วลม 6 m/s (ค) ที่ความเร็วลม 8.3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

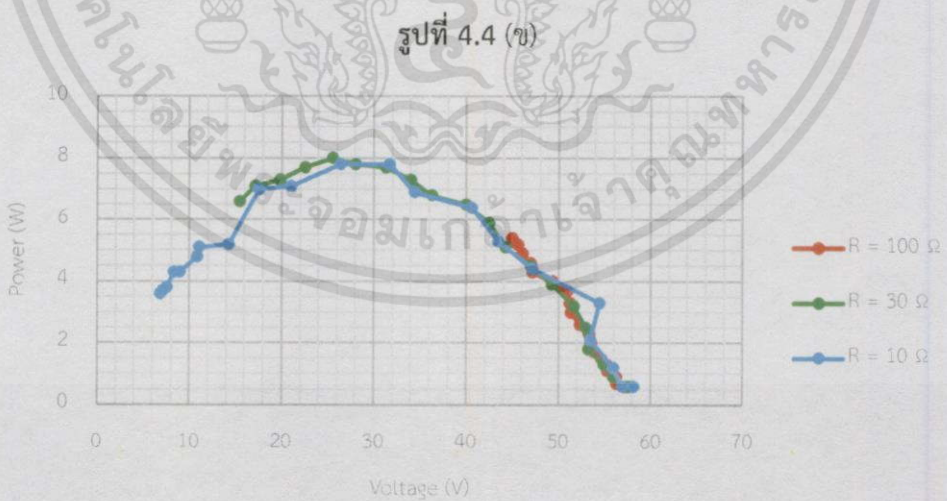
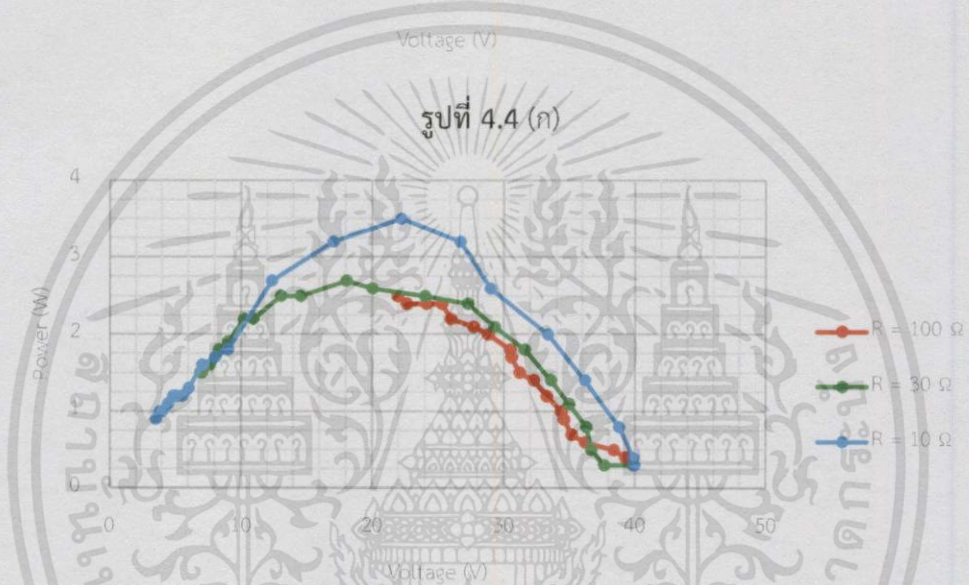
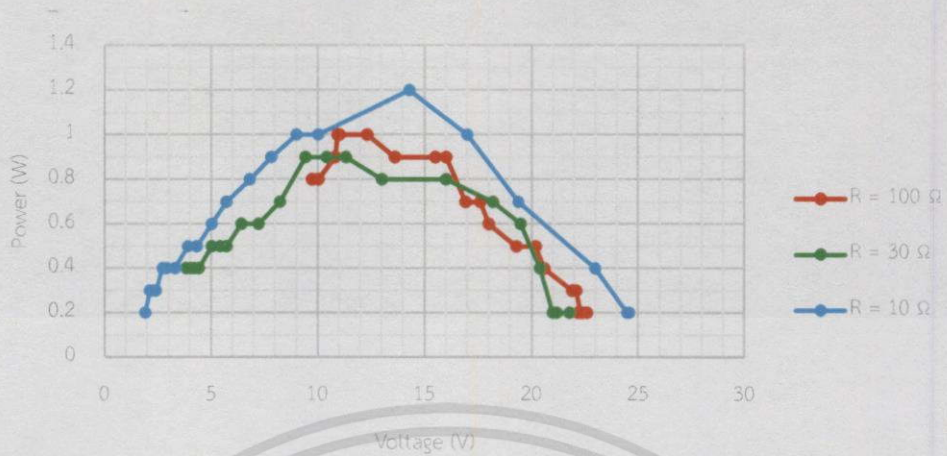
4.4 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เพื่อปรับค่า Duty Cycle ที่เหมาะสม โดยทดสอบที่ความเร็วลม 4 m/s 6 m/s และ 8.3 m/s ที่ความต้านทานโหลด 10 Ω 30 Ω 100 Ω ในแต่ละย่านความเร็วลม และมีการปรับ Step Duty Cycle เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 0% ถึง 100% โดยปรับขึ้นครั้งละ 5% โดยผลการทดสอบเป็นดังนี้



ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่างๆ

Duty (%)	Wind Speed = 4 m/s						Wind Speed = 6 m/s						Wind Speed = 8.3 m/s					
	R = 10 Ω		R = 30 Ω		R = 100 Ω		R = 10 Ω		R = 30 Ω		R = 100 Ω		R = 10 Ω		R = 30 Ω		R = 100 Ω	
	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)	V (V)	P (W)
0	24.6	0.2	21.8	0.2	22.6	0.2	40	0.3	39.9	0.3	39.9	0.4	58.2	0.6	57.7	0.6	58.2	0.6
5	24.5	0.2	21.2	0.2	22.4	0.2	39.9	0.4	37.7	0.3	39.5	0.4	57	0.6	57.2	0.6	57.5	0.6
10	23	0.4	21	0.2	22.2	0.2	38.8	0.8	36.7	0.5	39.4	0.4	56	1.2	56	0.9	57.3	0.6
15	19.4	0.7	20.4	0.4	22.3	0.2	36.2	1.4	36.3	0.8	39.3	0.4	53.5	2.1	55	1.3	56.4	0.7
20	17	1	19.5	0.6	22.1	0.3	33.4	2	35	1.1	38.4	0.5	54.5	3.3	53.3	1.8	56.3	0.9
25	14.3	1.2	18.2	0.7	21.9	0.3	29	2.6	33.6	1.4	36.2	0.6	47.2	4.4	53	2.5	55.4	1.1
30	10	1	16	0.8	20.6	0.4	26.7	3.2	31.6	1.8	35.2	0.7	43.5	5.3	51.7	3.2	55.3	1.3
35	9	1	13	0.8	20.2	0.5	22.2	3.5	29.3	2.1	34.6	0.9	40.6	6.4	49.3	3.9	54.7	1.5
40	7.8	0.9	11.3	0.9	19.3	0.5	17	3.2	27.3	2.4	34.4	1	34.4	6.9	47	4.5	54	1.7
45	6.8	0.8	10.4	0.9	18	0.6	12.3	2.7	24	2.5	33.3	1.2	31.7	7.8	44.3	5.1	53.6	2
50	5.7	0.7	9.4	0.9	17.6	0.7	9	1.8	20	2.6	32.3	1.4	26.4	7.8	42.5	5.9	53.4	2.3
55	5	0.6	8.2	0.7	16.9	0.7	8	1.7	18	2.7	31.2	1.5	21	7.1	40	6.5	52.4	2.6
60	4.3	0.5	7.2	0.6	16	0.9	7	1.6	14.5	2.5	30.6	1.7	17.5	7	36.3	6.8	51.4	3
65	3.9	0.5	6.4	0.6	15.5	0.9	6	1.3	13	2.5	30.5	1.8	14.2	5.2	34	7.3	51.3	3.3
70	3.3	0.4	5.7	0.5	13.6	0.9	5.5	1.2	10.9	2.2	28.8	2	11	5.1	31.3	7.7	51	3.7
75	2.9	0.4	5.4	0.5	12.3	1	5	1.2	10.2	2.2	27.7	2.1	10.8	4.8	28	7.8	49.4	4
80	2.7	0.4	5	0.5	11	1	4.8	1.2	9	1.9	26	2.2	8.9	4.3	25.5	8	47.2	4.3
85	2.4	0.3	4.4	0.4	10.9	1	4.4	1.1	8.3	1.8	25.3	2.4	8.3	4.3	22.5	7.7	47	4.6
90	2.2	0.3	4.2	0.4	10.8	0.9	4	1	7.6	1.6	24.1	2.4	7.5	3.8	19.8	7.3	46.1	4.9
95	2.1	0.3	4	0.4	10	0.8	3.8	1	7	1.5	22.6	2.4	7.1	3.7	17.1	7.1	45.6	5.2
100	1.9	0.2	3.8	0.4	9.7	0.8	3.5	0.9	6.9	1.5	21.9	2.5	6.8	3.6	15.4	6.6	45	5.4



รูปที่ 4.4 (ค)

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้า
 (ก) ที่ความเร็วลม 4 m/s (ข) ที่ความเร็วลม 6 m/s (ค) ที่ความเร็วลม 8.3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่า ถ้ามีการปรับ Duty Cycle เพิ่มขึ้น แรงดัน จะมีค่าน้อยลง แต่กำลังไฟฟ้ามักมากขึ้น เนื่องจากมีกระแสไหลในวงจรมากขึ้น นอกจากนี้ ความต้านทานก็มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอีกด้วย โดยจะสังเกตได้ว่า ที่ค่าความต้านทานต่ำๆ จะให้ค่ากำลังสูงสุดได้มากกว่าที่ความต้านทานสูง (ในระดับความเร็วลมที่ 3 m/s) แต่เมื่อความเร็วลมมากขึ้น (8.3 m/s) จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อต่อความต้านทาน ทั้ง 3 ค่า (10Ω 30Ω และ 100Ω) จะให้กำลังไฟฟ้าขนาดใกล้เคียงกัน

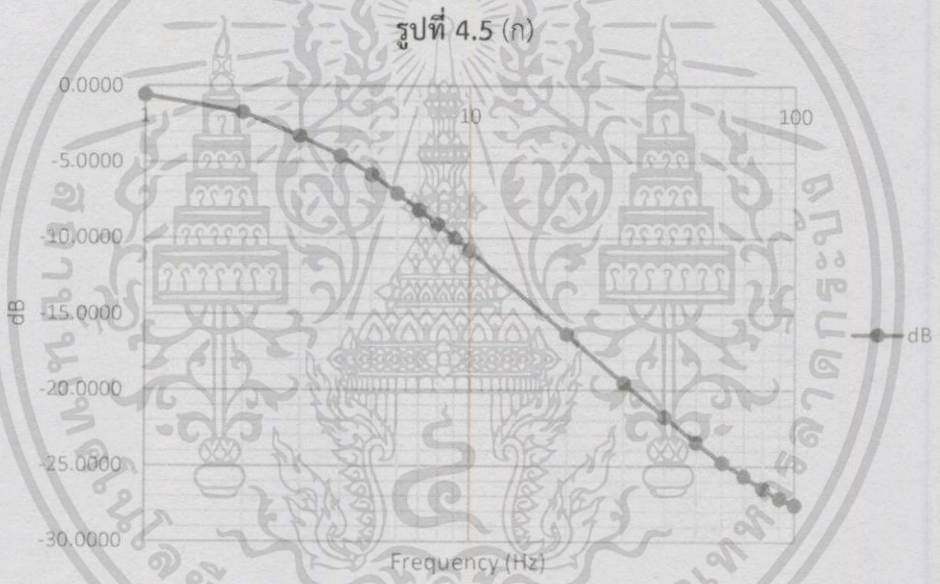
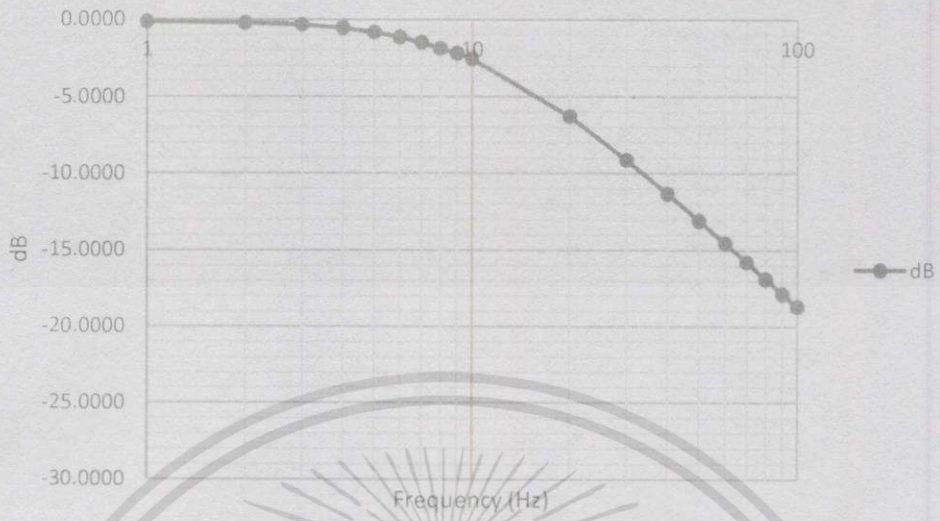


4.5 การทดสอบระดับการกรองสัญญาณของวงจร Low-Pass Filter

การรับสัญญาณเข้ามาประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มีความถูกต้องและแม่นยำ จะต้องเลือกรับค่าสัญญาณที่ต้องการอย่างแท้จริง ซึ่งก็คือสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะต้องไม่มีสัญญาณรบกวนความถี่สูงหรือฮาร์มอนิกส์สอดแทรกเข้ามา ดังนั้น วงจรกรองความถี่จึงใช้เป็น Low-Pass Filter ดักจับสัญญาณรบกวนก่อนที่จะเข้า Current Sensor และ Voltage Sensor ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการปรับ Duty Cycle ซึ่งผลจากการทดสอบเป็นดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ระดับการกรองสัญญาณของวงจร Low-Pass Filter

Frequency (Hz)	วงจรกรองด้าน Current Sensor			วงจรกรองด้าน Voltage Sensor		
	V_{in}	V_{out}	dB	V_{in}	V_{out}	dB
1	6.4761	6.3791	-0.1310	4.0853	3.8230	-0.5763
2	5.6311	5.4896	-0.2211	2.8005	2.2942	-1.7320
3	4.7421	4.5678	-0.3253	2.2835	1.5664	-3.2740
4	4.0713	3.8193	-0.5550	2.0361	1.1986	-4.6021
5	3.5740	3.2486	-0.8292	1.9118	0.9779	-5.8235
6	3.2044	2.8083	-1.1461	1.8379	0.8128	-7.0862
7	2.9293	2.4666	-1.4933	1.7903	0.7006	-8.1492
8	2.7158	2.1884	-1.8754	1.7581	0.6163	-9.1045
9	2.5336	1.9706	-2.1825	1.7351	0.5491	-9.9938
10	2.4041	1.7923	-2.5510	1.7188	0.4949	-10.8138
20	1.8884	0.9171	-6.2738	1.6626	0.2537	-16.3289
30	1.7638	0.6166	-9.1288	1.6505	0.1747	-19.5085
40	1.7157	0.4658	-11.3238	1.6457	0.1346	-21.7488
50	1.6924	0.3749	-13.0926	1.6435	0.1105	-23.4495
60	1.6790	0.3140	-14.5614	1.6429	0.0949	-24.7672
70	1.6710	0.2712	-15.7935	1.6418	0.0856	-25.6565
80	1.6655	0.2380	-16.8976	1.6417	0.0780	-26.4615
90	1.6619	0.2126	-17.8618	1.6414	0.0723	-27.1163
100	1.6593	0.1933	-18.6740	1.6410	0.0689	-27.5372



รูปที่ 4.5 (ก)
รูปที่ 4.5 (ข)
รูปที่ 4.5 กราฟระดับการกรองสัญญาณความถี่
(ก) วงจรกรองด้าน Current Sensor (ข) วงจรกรองด้าน Voltage Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

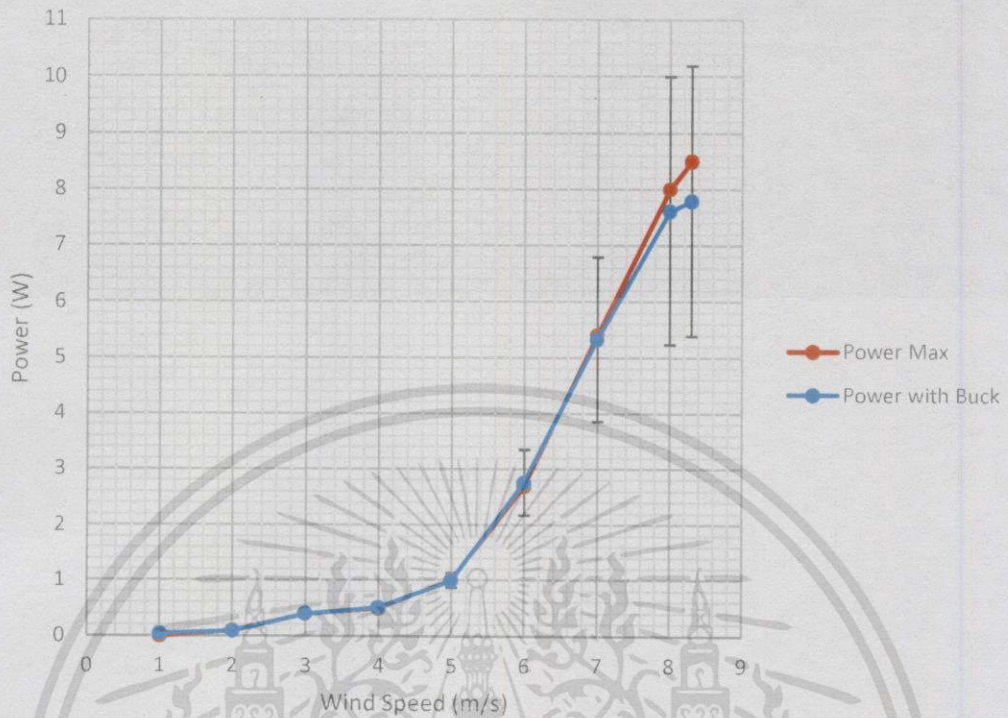
4.6 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ทำการทดสอบโดยการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการต่อกังหันลมเข้ากับโหลดโดยตรง โดยอาศัยการปรับค่าความต้านทาน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความต้านทาน 30Ω แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.6

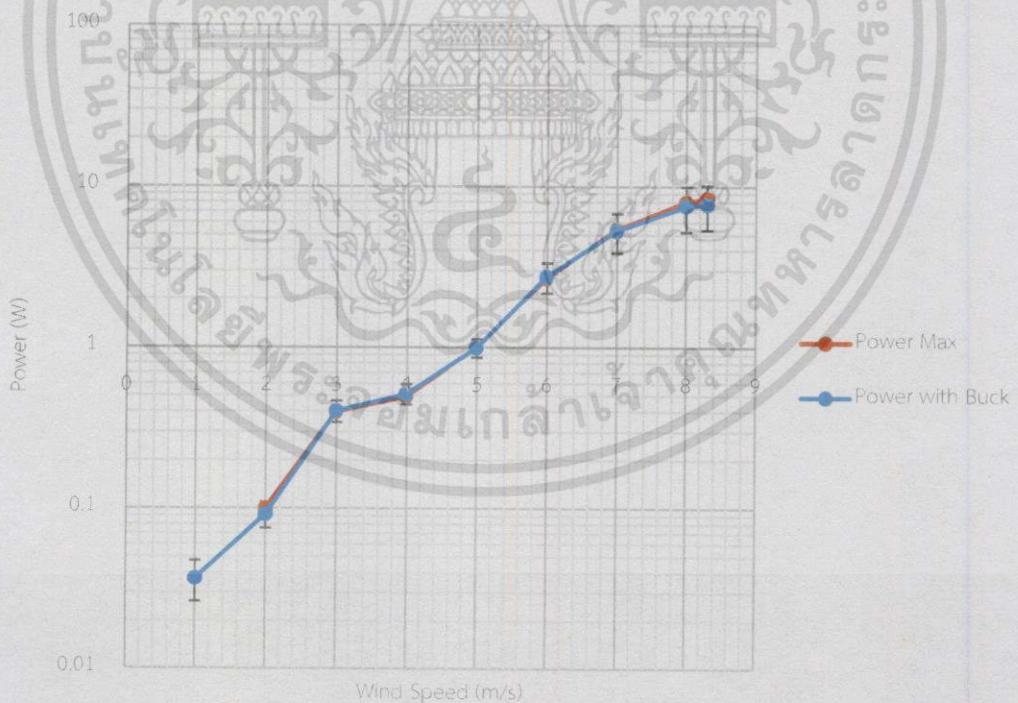
ตารางที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความต้านทาน 30Ω

Wind Speed (m/s)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกังหันลม (Watt)	กำลังไฟฟ้าจากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Watt)		
		ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด
1	0.0	0.0474	0.0369	0.0264
2	0.1	0.1096	0.0925	0.0754
3	0.4	0.4665	0.4044	0.3423
4	0.5	0.5891	0.5154	0.4417
5	1.0	1.1303	0.9978	0.8653
6	2.7	3.3434	2.7576	2.1718
7	5.4	6.7898	5.3259	3.8620
8	8.0	9.9887	7.6123	5.2359
8.3	8.5	10.1919	7.7878	5.3837

จากการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมโดยตรง กับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสอดคล้องกันกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมโดยตรงแต่จะมีความคลาดเคลื่อน และโดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้ามียิ่งมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 (ก)



รูปที่ 4.6 (ข)

รูปที่ 4.6 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด พร้อมทั้งแสดงขอบเขตความคลาดเคลื่อน (Max, Min)

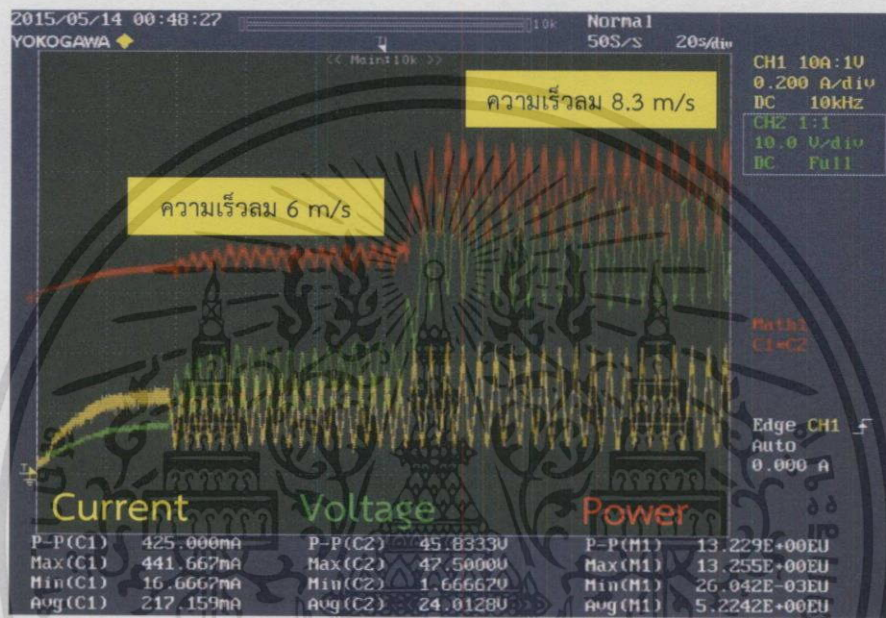
(ก) Scale แบบทั่วไป (ข) Scale แบบ Semi-log

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

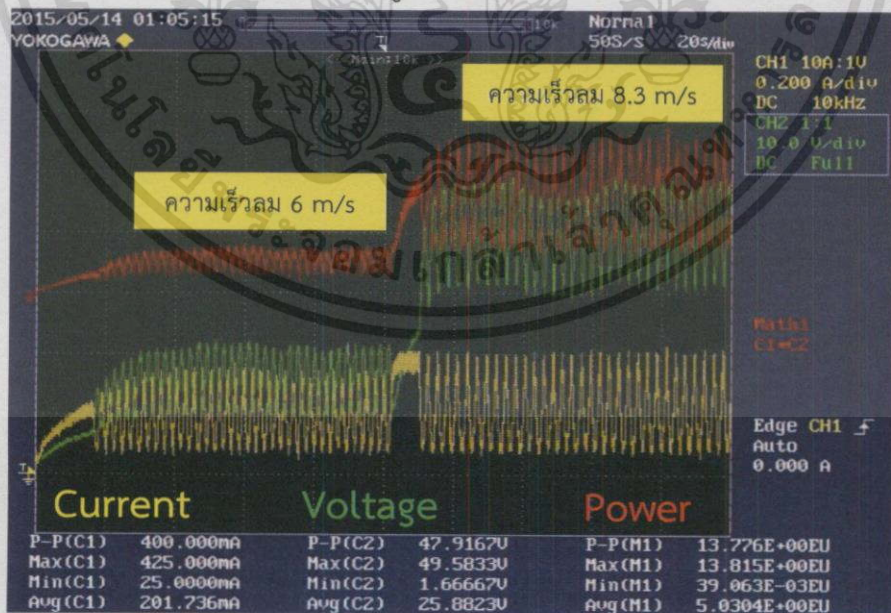
4.7 ผลของการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการ Perturb and Observe (P&O)

4.7.1 ผลจากการปรับความเร็วลม

ทดลองโดยการปรับค่าความต้านทานไปที่ 30Ω จากนั้นทำการปรับความเร็วลมไปที่ 6 m/s และ 8.3 m/s แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างในการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในขณะที่มีการปรับค่า Step Duty Cycle เป็น 5% และ 10% โดยแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 (ก)



รูปที่ 4.7 (ข)

รูปที่ 4.7 ผลการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลม 6 m/s และ 8.3 m/s

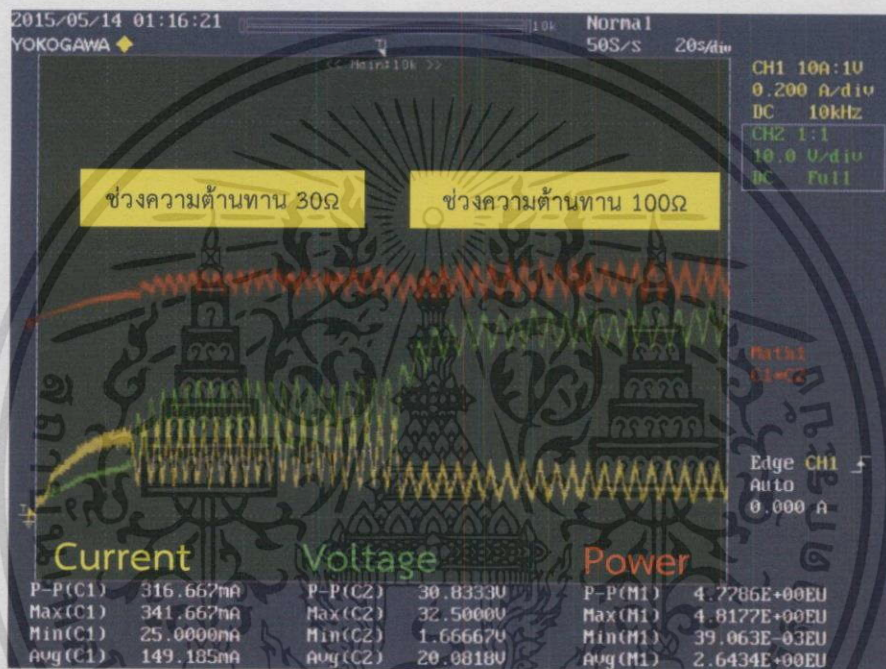
(ก) Step Duty Cycle ที่ 5% (ข) Step Duty Cycle ที่ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับค่า Step Duty Cycle มากขึ้น จำนวนครั้งในการปรับ Step จะลดลง (จากเดิมมีการปรับ Step 8 ระดับ จะเหลือ 4 ระดับจากขอบเขตล่างสุดถึงบนสุด) นอกจากนี้จะทำให้ใช้เวลาในการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อยลง

4.7.2 ผลจากการปรับค่าความต้านทาน

ทดลองโดยการปรับค่าความเร็วลมไปที่ 6 m/s จากนั้นทำการปรับค่าความต้านทานไปที่ 30 Ω และ 100 Ω ได้ผลการทดลองตาม รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์เมื่อมีการปรับความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 30 Ω เป็น 100 Ω

จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการปรับความต้านทานเพิ่มขึ้น กระแสจะลดลง ส่วนแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าคงที่ ในกระบวนการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้น จุดสำคัญคือการรักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม ซึ่งจากกราฟคุณลักษณะของกังหันลมชนิดหลายใบพัด จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละระดับความเร็วกังหันลมไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมกังหันลมให้มีจุดทำงานอยู่ในย่านที่มีประสิทธิภาพสูงสุด หรือให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยอาศัยหลักการปรับแรงดัน ในลักษณะของการปรับค่า Duty Cycle ของวงจร Buck-Converter โดยพบว่า การปรับ Duty Cycle จะแปรผกผันกับความเร็วโรเตอร์ หากต้องการเพิ่มความเร็วกังหันลมในการไต่ระดับผลิตไฟฟ้ามาที่จุดให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จะต้องทำการปรับลดค่า Duty Cycle ในทางตรงกันข้าม หากความเร็วกังหันลมเลยจุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จะต้องทำการปรับเพิ่มค่า Duty Cycle เพื่อถอยกลับมาในจุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางไฟฟ้ากับกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อกระแสไหลมากจะทำให้แรงบิดทางไฟฟ้าสูง และไปต้านแรงบิดทางกลของโรเตอร์ ส่งผลให้ความเร็วของกังหันลมลดลง แต่การปรับ Duty Cycle นั้น จะส่งผลกระทบต่อในกรณีที่ปรับค่าความต้านทานสูงน้อยกว่าในกรณีที่ปรับค่าความต้านทานต่ำ เนื่องจากที่ค่าความต้านสูง จะมีกระแสไหลน้อย จึงเกิดแรงบิดต้านน้อยกว่า ทำให้ความเร็วโรเตอร์ลดลงมาไม่มากนัก

สำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าในการปรับ Duty Cycle ที่เหมาะสมนั้น จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันที่ค่าความต้านทานต่ำๆ แต่ที่ค่าความต้านทานสูง จุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเลื่อนออกไปที่ค่า Duty Cycle สูงกว่า

ในการปรับ Duty Cycle จะส่งผลให้ต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของ กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เป็นการบ่งชี้ว่าการปรับแรงดันมีผลสำคัญต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้ ซึ่งจากการทดสอบในหลายๆ กรณีนั้น จึงเห็นได้ว่า การปรับ Duty Cycle มีความสำคัญต่อกระบวนการหาจุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด การวิเคราะห์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการปรับ Duty Cycle จึงมีความสำคัญมาก การนำสัญญาณเข้ามาจึงต้องมีการควบคุมไม่ให้มีสัญญาณรบกวนเข้ามา โดยจากการใช้วงจรกรองชนิด Low-pass Filter นั้น พบว่า ที่ความถี่ตั้งแต่ 10 Hz ขึ้นไปจะถูกกรองออกไปเป็นจำนวนมาก และเมื่อทำการ Tracking จะพบว่ามีความแม่นยำในการควบคุมระดับ Step Duty สูงขึ้น

จากทดลองการทำงานของวงจรโดยรวม พบว่า วงจรสามารถกำหนดจุดทำงานที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าได้ตามค่ากำลังสูงสุดที่กังหันลมผลิตได้ในแต่ละค่าความเร็วลมต่างๆ โดยให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ถึง 10.1919 วัตต์ (ที่ความเร็วลม 8.3 m/s) ซึ่งเป็นผลการทดลองที่น่าพึงพอใจ แต่

ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้ามีค่ามาก สำหรับวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe) เพื่อที่จะ Tracking ได้อย่างแม่นยำนั้น จะต้องรอจังหวะการปรับความเร็วลมอย่างช้าๆ จึงไม่เหมาะสมกับบริเวณที่มีอากาศแปรปรวน

5.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

1. การต่อกราวด์ของชุดวงจรควบคุมและวงจรถูกำลังควรแยกออกจากกัน เนื่องจากจะเกิดสัญญาณรบกวนจากวงจรถูกำลังเข้ามาในส่วนของวงจรควบคุม อันจะมีผลทำให้เกิดผลกระทบต่อการวัดค่าของเครื่องมือวัด ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง
2. ชุดวงจรตรวจจับกระแสควรเป็นชนิด Hall effect เนื่องจากจะเป็นทำให้วงจรส่วนอินพุตและเอาพุตแยกออกจากกันโดยสิ้นเชิง โดยอาศัยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้สัญญาณที่ได้ควรจะมีการปรับสภาพสัญญาณ เนื่องจากชุดวัดกระแสที่เลือกใช้ ซึ่งเป็นเบอร์ ACS 712 มีขอบเขตของแรงดันด้านเอาพุต อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 3.5 V (สำหรับค่ากระแส -1 ถึง 1 A) ซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตสัญญาณเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 V ส่งผลให้การอ่านค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่ละเอียดเท่าที่ควร
3. วงจรกรองความถี่ ควรมีความสามารถในการกรองความถี่ที่ครอบคลุมอย่างน้อย 50 Hz ขึ้นไป ซึ่งเป็นความถี่ที่เกิดจากการรบกวนจากระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากชุดวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสตรง สัญญาณที่มีความถี่จึงทำให้เกิดความผิดพลาดจากการวัดได้
4. มอสเฟตที่ใช้ในวงจรลดทอนแรงดัน ควรตรวจสอบก่อนนำไปใช้งาน ว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ เนื่องจากอุปกรณ์อาจเกิดความเสียหายได้ง่าย ส่งผลให้ไม่สามารถตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้
5. กังหันลมควรได้รับการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากอาจเกิดความร้อนจากการขัดสี และทำให้ข้อต่อคลายตัว เกิดการแกว่งของใบพัด ทำให้จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558, **รูปแบบกังหันลม**, (ออนไลน์), แหล่งที่มา : <http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanghanrom/wind/4.pdf>, 11 พฤษภาคม 2558.
- [2] ฟิสิกส์ราชชมงคล, 2558, **บทที่ 6 พลังงานลม**, (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/5/energy/6.pdf>, 11 พฤษภาคม 2558.
- [3] Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche (2011), **MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems**, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2, InTech, [cited 2015 May 11], Available from: <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advancedtopics-in-wind-power/mppt-control-methods-in-wind-energy-conversion-systems>.
- [4] Siegfried Heier, **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**, 2nd ed, Chichester English: John Wiley & sons Ltd., 2006.
- [5] S.M. Muyeen, **Wind energy conversion systems: technology and trends**, 1st ed, London: Springer, 2012.
- [6] ศุภพงศ์ คล้ายคลึง, **เครื่องกำเนิดไฟฟ้า**, (ออนไลน์) แหล่งที่มา: <http://www.mmw.ac.th/supphapong/sci%20617.htm>, 11 พฤษภาคม 2558.
- [7] วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, พิมพ์ครั้งที่ 13, กรุงเทพฯ : วี. เจ. พรินต์ติ้ง, 2555.
- [8] Daniel W. Hart, **Power Electronics**, Singapore: McGRAW-HILL, 2011.
- [9] Mike Thomson, **DC-DC switching voltage regulator: Buck converter**, 2011; [cited 2015 May 11], Available from: <http://mike-thomson.com/blog/?p=246>.
- [10] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, **ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณอนาล็อก**, กรุงเทพฯ: ว.เพ็ชรสกุล, 2545.
- [11] Adrian S. Nastase, **How to Derive the Instrumentation Amplifier Transfer Function**, 2010; [cited 2015 May 11], Available from: <http://masteringelectronicsdesign.com/how-to-derive-the-instrumentation-amplifier-transfer-function/>.

- [12] รศ. อีร์วัฒน์ ประกอบผล, วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit), (ออนไลน์), แหล่งที่มา: http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data_com/datacom_52/Filter.htm, 11 พฤษภาคม 2558.
- [13] Fragapanagos, Low-pass filter, 2014; [cited 2015 May 11], Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter.
- [14] Wayne Storr, Passive Low Pass Filter, 2015; [cited 2015 May 11], Available from: http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html.
- [15] บริษัท วินัส ซัพพลาย จำกัด, ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Current Sensor (เซ็นเซอร์วัดกระแส), (ออนไลน์), แหล่งที่มา: <http://thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ-current-sensor-เซ็นเซอร์วัดกระแส.html>, 11 พฤษภาคม 2558.
- [16] ปิยงกูร กุฎกพันธ์ และคณะ, “การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก”, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงสมรรถนะวงจรถามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมหลายใบพัด

Improvement of the maximum power point tracking performance

for multiple blades wind turbine

นายพงศกร สุกถณี นายพงศธร ศรีโกสภ นายพงศธร วงศ์พรามาศ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3529
E-Mail: touch.letter@gmail.com, pong_sathon.treegosol@gmail.com, pong_smd@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมขนาดเล็กชนิดหลายใบพัด โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร วิธีการควบคุมจะอาศัยหลักการรบกวนและสังเกต ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและเหมาะสมสำหรับภูมิอากาศในประเทศไทย โดยได้ศึกษาถึงคุณลักษณะของกังหันลมที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้า ที่มีผลต่อการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดในการจ่ายโหลดในระดับความเร็วลมต่างๆ โดยได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรถามรอยกำลังไฟฟ้าให้ทำการวัดค่าได้อย่างแม่นยำ และลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่สอดแทรกเข้ามาในระบบ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเป็นไปอย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีการควบคุมระดับแรงดันด้วยการปรับดิวตี้ไซเคิลของวงจรถอนแรงดัน ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ประมวลผลและสร้างสัญญาณ PWM ขึ้นมาใช้ในการกำหนดขนาดของดิวตี้ไซเคิลที่เหมาะสมอย่างอัตโนมัติ เพื่อให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด

Abstract

A paper presents a tracking scheme for locating power points of multiple blades small wind turbine. That is permanent magnetic DC generator. Based on the principle of perturb and observe control. Which is appreciate and effective for the climate in Thailand. By studying the characteristic of wind turbines to determine the maximum power point that obtain from produced to represent the load for each wind speed. There is improve the circuit to make precise measurement and get rid off noise signals that interfere into circuit. In order to analyze the result are correct and reliable for control voltage load by adjusting the duty cycle of buck converter. Which is analyzed by microcontroller for generate PWM signals used to determine duty cycle at the appropriate point for the best performance of wind turbine.

Keyword: Maximum Power Point Tracking, Buck Converter, Duty Cycle, Perturb and Observe, Instrument Amplifier, Low-Pass Filter

1. บทนำ

ในอนาคต อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าก็มีแนวโน้มสูงขึ้นตามภาวะการขยายตัวของเศรษฐกิจ ดังนั้น หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจึงได้มองหานแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นๆ มาทดแทน ซึ่งพลังงานลมก็เป็นตัวเลือกหนึ่งที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่หาได้โดยทั่วไป

สำหรับในประเทศไทยนั้น ยังนับว่ามีการใช้พลังงานลมน้อย เนื่องจากภูมิประเทศไม่เอื้ออำนวย อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ที่มีความเร็วลมเพียงพอ สามารถใช้กังหันลมขนาดเล็กในการผลิตไฟฟ้าได้ โดยการใช้พลังงานลมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จะต้องอาศัยการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด หรือการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MTTP) โดยอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวิเคราะห์ค่า เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็วลมค่าต่างๆ

2. คุณลักษณะของกังหันลม [1] [2] [3]

กำลังจากการของลมที่รับกังหันลมจะแสดงในสมการที่ 1

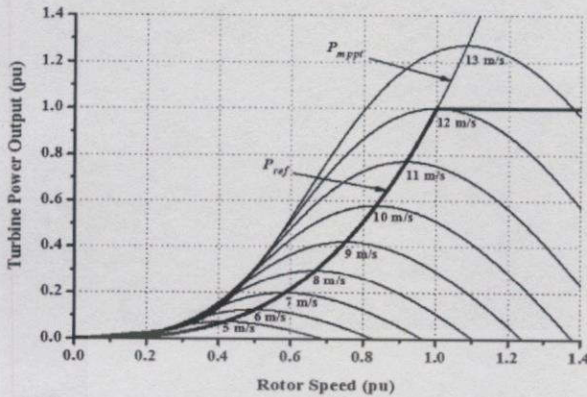
$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_w^3 \quad (1)$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ A_T คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)
 V_w คือ ความเร็วของลม (m/s)

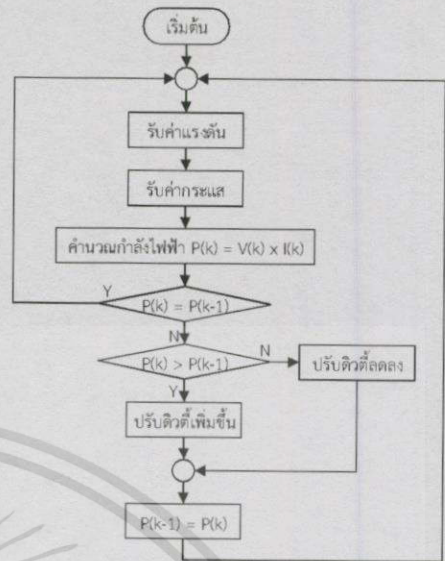
กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะแสดงในสมการที่ 2

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

กราฟคุณลักษณะของกังหันลม แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วโรเตอร์เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ที่ความเร็วลมค่าต่างๆ

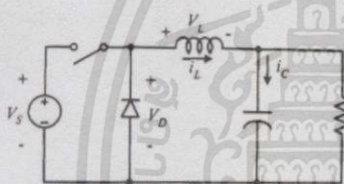


รูปที่ 3 Flow Chart การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี P&O

3. วงจรทอนแรงดัน [4] [5] [6]

เป็นวงจรที่ใช้ลดแรงดันกระแสตรง โดยค่าแรงดันขาออกจะหาได้จากสมการที่ 3

$$V_o = DV_s \quad (3)$$



รูปที่ 2 วงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า

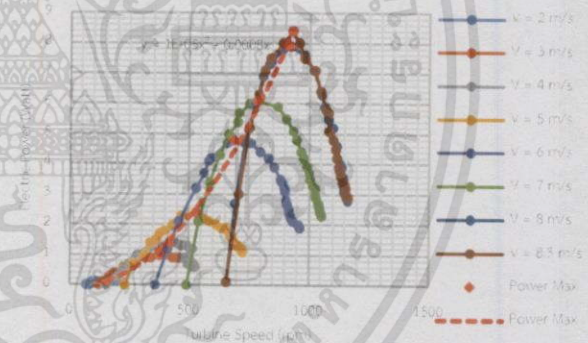
4. การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิครบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation Method : P&O)

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิครบกวนและสังเกตจะใช้การปรับค่าตัวชี้เซลล์เพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผล และสร้างสัญญาณ Duty Cycle ในรูปของสัญญาณ PWM โดยมีกระบวนการทำงานดังนี้

1. รับค่าสัญญาณกระแสและแรงดันจากอุปกรณ์ตรวจจับ (Current Sensor and Voltage Sensor)
2. คำนวณกำลังไฟฟ้าจาก $P=VI$
3. เก็บค่ากำลังไฟฟ้าไว้เป็นกำลังไฟฟ้าอ้างอิง
4. ถ้ากำลังไฟฟ้าที่เข้ามาใหม่มีค่ามากกว่าเดิม จะทำการเลื่อนจุดทำงานสูงขึ้น โดยการปรับ Duty Cycle เพิ่มขึ้น
5. ถ้ากำลังไฟฟ้าที่เข้ามาใหม่มีค่าลดลงกว่าเดิม แสดงว่าเลขจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จะทำการปรับ Duty Cycle ลดลง
6. เก็บค่ากำลังไฟฟ้าไว้เป็นกำลังไฟฟ้าอ้างอิงใหม่

5. ผลการทดสอบ

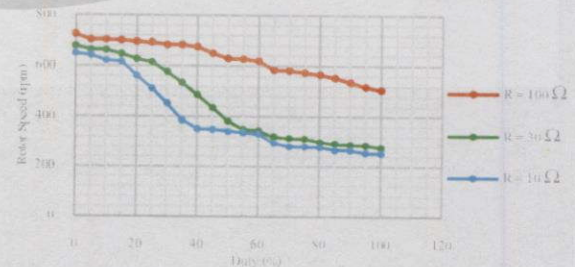
5.1 กราฟคุณลักษณะของกังหันลมจากการทดสอบ



รูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะของกังหันลมชนิด Multi-blade

จากรูปจะเห็นความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละความเร็วลม โดยมีสมการกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนี้ $y = 1E-05x^2 - 0.0008x$

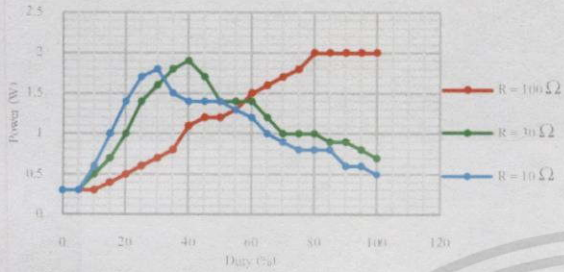
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle กับ ความเร็วโรเตอร์



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ ความเร็วโรเตอร์ ที่ความเร็วลม 6 m/s

Duty Cycle มีลักษณะแปรผกผันกับความเร็วโรเตอร์ ที่ความต้านทานต่ำ (10Ω และ 30Ω) แต่ในความเร็วต้านทาน 100Ω การปรับ Duty Cycle จะส่งผลน้อยลงต่อความเร็วโรเตอร์

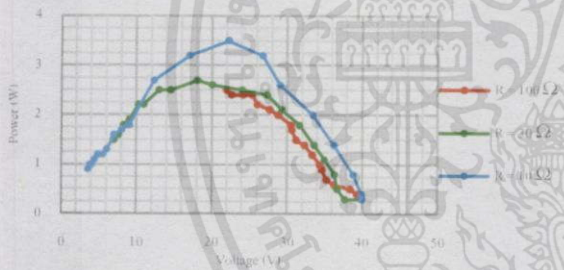
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลัง ไฟฟ้า



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับ กำลัง ไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 6 m/s

เมื่อปรับ Duty Cycle เพิ่มขึ้น จะทำให้ได้กำลัง ไฟฟ้ามากขึ้น จนถึงจุดหนึ่งจะลดลงมา โดยจะมีจุดที่ให้กำลัง ไฟฟ้าสูงสุดไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน (10Ω, 30Ω) แต่ในความเร็วต้านทานสูง (100Ω) พบว่าจุดที่ให้กำลัง ไฟฟ้าสูงสุดจะเคลื่อนออกไปที่ Duty Cycle สูงๆ และจะคงที่อยู่นั้น

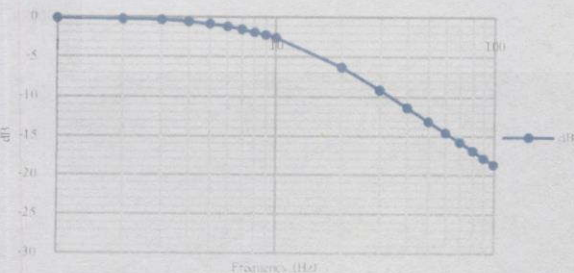
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลัง ไฟฟ้า



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลัง ไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 6 m/s

แรงดัน ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้กำลัง ไฟฟ้ามากขึ้น จนถึงจะจุดหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่ให้กำลัง ไฟฟ้าสูงสุด จากนั้นก็จะลดลงในลักษณะเช่นเดียวกับคอนเซ็ปต์ โดยที่ผลแบบเดียวกันในทุกค่าความต้านทาน

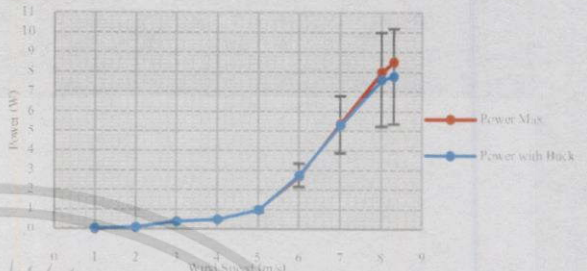
5.5 ระดับการกรองสัญญาณของวงจร Low-Pass Filter



รูปที่ 8 กราฟระดับการกรองสัญญาณความถี่ของวงจรกรอง ดัชนี Current Sensor

Low-Pass Filter ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง โดยพบว่าตั้งแต่ 10 Hz ขึ้นไปจะถูกกรองออกจนหมด เพื่อนำสัญญาณที่แท้จริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจนับ

5.6 กำลัง ไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลมกับกำลัง ไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลัง ไฟฟ้าสูงสุด



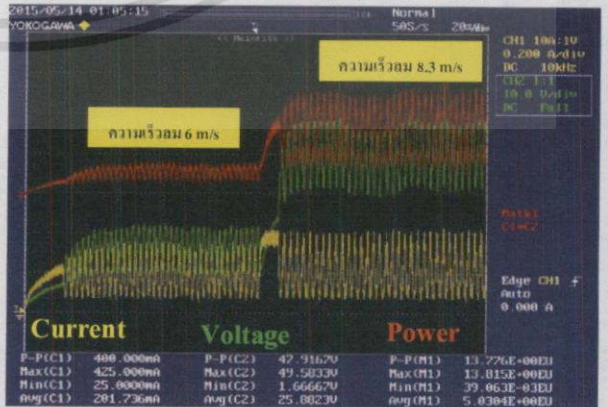
รูปที่ 9 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างกำลัง ไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกังหันลม กับกำลัง ไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอยกำลัง ไฟฟ้าสูงสุด พร้อมทั้งแสดงขอบเขตความคลาดเคลื่อน (Max, Min)

จากการนำวงจรตามรอยกำลัง ไฟฟ้าสูงสุดไปใช้งานจริง พบว่าวงจรสามารถรักษาจุดทำงานที่ให้กำลัง ไฟฟ้าสูงสุดได้ในแต่ละความเร็วลม ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

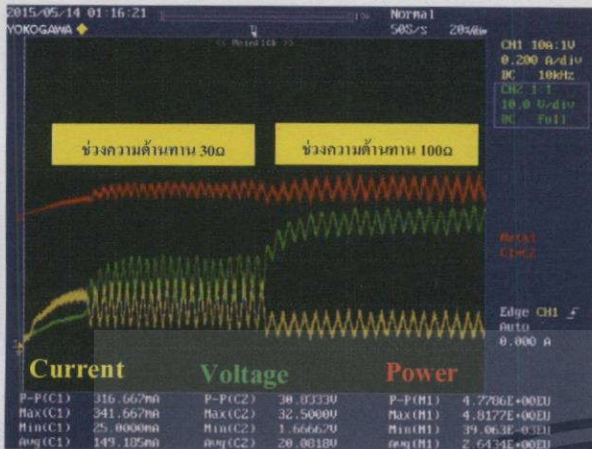
5.7 ผลของการตามรอยกำลัง ไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการ Perturb and Observe (P&O)



รูปที่ 10 ผลการตามรอยกำลัง ไฟฟ้าสูงสุด Step Duty Cycle ที่ 5%



รูปที่ 11 ผลการตามรอยกำลัง ไฟฟ้าสูงสุด Step Duty Cycle ที่ 10%



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์เมื่อมีการปรับความต้านทานเพิ่มขึ้น จาก 30Ω เป็น 100Ω

ผลจากการ Tracking ของวงจรถามรอยกำลังไฟสูงสุด โดยเปรียบเทียบผลจากการปรับ Step Duty Cycle ที่ 5% และ 10% ซึ่งเมื่อมีการปรับ Step Duty มากขึ้น จะส่งผลให้การ Tracking วดเร็วยิ่งขึ้น สำหรับการปรับความต้าน พบว่า เมื่อเพิ่มความต้านทาน จะส่งผลทำให้กระแสลดลง แรงดันจึงเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้กำลังไฟที่คงที่ ในกระบวนการตามรอยกำลังไฟสูงสุด

6. สรุป

ในการตามรอยกำลังไฟสูงสุดนั้น จุดสำคัญคือการรักษาระดับกำลังไฟที่ผลิตได้จากกังหันลม โดยจะต้องมีการควบคุมกังหันลมให้มีจุดทำงานอยู่ในย่านที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งอาศัยการปรับแรงดัน ในลักษณะของการปรับค่า Duty Cycle ของวงจร Buck-Converter ี่ต้องการเพิ่มความเร็วกังหันลมในการที่ระดับผลิตไฟที่มากที่สุดให้ค่ากำลังไฟสูงสุด จะต้องทำการปรับลดค่า Duty Cycle ในทางตรงกันข้าม หากความเร็วกังหันลมลดลงทำให้ค่ากำลังไฟสูงสุด จะต้องทำการปรับเพิ่มค่า Duty Cycle เพื่อออกกลับมาในจุดที่ให้ค่ากำลังไฟสูงสุด ซึ่งจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางไฟที่กับกระแสในขดลวดอาร์มเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการปรับ Duty Cycle นั้น จะส่งผลกระทบต่อกรณีที่ปรับค่าความต้านทานสูงน้อยกว่ากรณีที่ปรับค่าความต้านทานต่ำ

สำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังเพื่อปรับ Duty Cycle ที่เหมาะสม นั้น จุดที่ให้กำลังไฟสูงสุดจะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันที่ค่าความต้านทานต่ำๆ แต่ที่ค่าความต้านทานสูง จุดที่ให้กำลังไฟสูงสุดจะเลื่อนออกไปที่ค่า Duty Cycle สูงกว่า

ในการปรับ Duty Cycle จะส่งผลให้ต้องการเพิ่มขึ้นและลดลงของ กำลังไฟและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจากการทดสอบในหลายๆ กรณีนั้น พบว่าการปรับ Duty Cycle มีความสำคัญต่อกระบวนการหาจุดที่ให้ค่ากำลังไฟสูงสุด การวิเคราะห์

ของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการปรับ Duty Cycle จึงมีความสำคัญมาก การนำสัญญาณเข้ามาจึงต้องมีการกรองสัญญาณรบกวน โดยใช่วงจรกรองชนิด Low-pass Filter ซึ่งพบว่า ที่ความถี่ตั้งแต่ 10 Hz ขึ้นไปจะถูกกรองออกไปเป็นจำนวนมาก และเมื่อทำการ Tracking จะพบว่ามีความแม่นยำในการควบคุมระดับ Step Duty สูงขึ้น

จากทดลองการทำงานของวงจรโดยรวม พบว่า วงจรสามารถกำหนดจุดทำงานที่ให้อำนาจไฟฟ้าได้ตามค่ากำลังสูงสุดที่กังหันลมผลิตได้ในแต่ละค่าความเร็วลมต่างๆ โดยให้อำนาจไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ถึง 10.1919 วัตต์ (ที่ความเร็วลม 8.3 m/s) ซึ่งเป็นผลการทดลองที่น่าพึงพอใจ แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อกำลังไฟที่มีค่ามาก สำหรับการวัดการตามรอยกำลังไฟสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe) เพื่อที่จะ Tracking ได้อย่างแม่นยำนั้นจะต้องรอจังหวะการปรับความเร็วลมอย่างช้าๆ จึงไม่เหมาะสมกับบริเวณที่มีอากาศแปรปรวน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche (2011). **MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems**, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2, InTech, [cited 2015 May 11]. Available from: <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advancedtopics-in-wind-power/mppt-control-methods-in-wind-energy-conversion-systems>.
- [2] Siegfried Heier. **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**, 2nd ed, Chichester English: John Wiley & sons Ltd., 2006.
- [3] S.M. Muyeen. **Wind energy conversion systems: technology and trends**, 1st ed, London: Springer, 2012.
- [4] วีระเวทย์ ขันเงิน และจตุพล ชารวีศรีเศรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 13. กรุงเทพฯ : วี.เจ. พรินติ้ง, 2555.
- [5] Daniel W. Hart. **Power Electronics**, Singapore: McGRAW-HILL, 2011.
- [6] Mike Thomson. **DC-DC switching voltage regulator: Buck converter**, 2011; [cited 2015 May 11]. Available from: <http://mike-thomson.com/blog/?p=246>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Features and Benefits

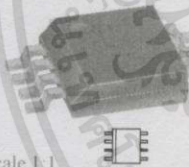
- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage



TUV America
Certificate Number:
U8V 06 05 54214 010



Package: 8 Lead SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1

Description

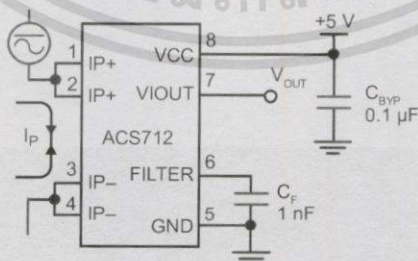
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

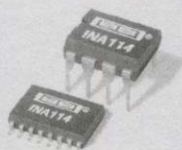
The output of the device has a positive slope ($>V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

Continued on the next page.

Typical Application



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_p , within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.



INA114

Precision INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- LOW OFFSET VOLTAGE: 50 μ V max
- LOW DRIFT: 0.25 μ V/ $^{\circ}$ C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 2nA max
- HIGH COMMON-MODE REJECTION: 115dB min
- INPUT OVER-VOLTAGE PROTECTION: \pm 40V
- WIDE SUPPLY RANGE: \pm 2.25 to \pm 18V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 3mA max
- 8-PIN PLASTIC AND SOL-16

APPLICATIONS

- BRIDGE AMPLIFIER
- THERMOCOUPLE AMPLIFIER
- RTD SENSOR AMPLIFIER
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION

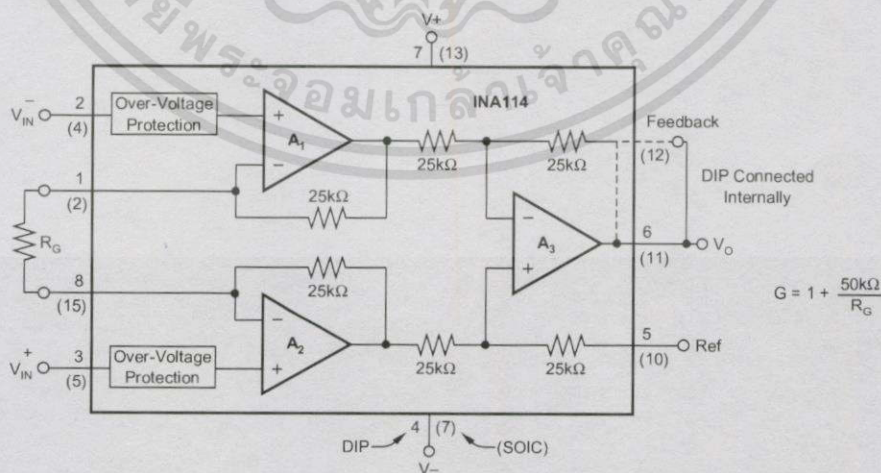
DESCRIPTION

The INA114 is a low cost, general purpose instrumentation amplifier offering excellent accuracy. Its versatile 3-op amp design and small size make it ideal for a wide range of applications.

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. Internal input protection can withstand up to \pm 40V without damage.

The INA114 is laser trimmed for very low offset voltage (50 μ V), drift (0.25 μ V/ $^{\circ}$ C) and high common-mode rejection (115dB at G = 1000). It operates with power supplies as low as \pm 2.25V, allowing use in battery operated and single 5V supply systems. Quiescent current is 3mA maximum.

The INA114 is available in 8-pin plastic and SOL-16 surface-mount packages. Both are specified for the -40° C to $+85^{\circ}$ C temperature range.



5.6A, 100V, 0.540 Ohm, N-Channel Power MOSFET

This N-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistor is an advanced power MOSFET designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching convertors, motor drivers, relay drivers, and drivers for high power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

Formerly developmental type TA17441.

Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRF510	TO-220AB	IRF510

NOTE: When ordering, include the entire part number.

Features

- 5.6A, 100V
- $r_{DS(ON)} = 0.540\Omega$
- Single Pulse Avalanche Energy Rated
- SOA is Power Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance
- Related Literature
 - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

Symbol



Packaging



TLP250

Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditionor
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

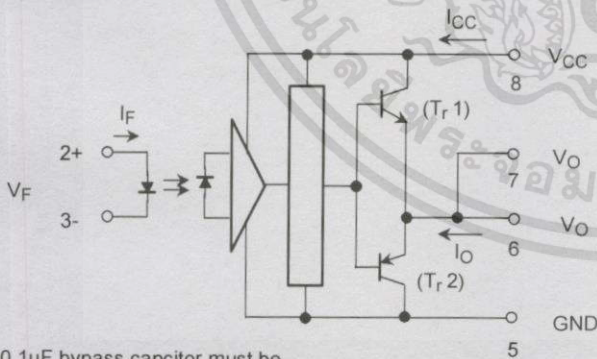
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
 This unit is 8-lead DIP package.
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823
 Maximum operating insulation voltage: 630V_{PK}
 Highest permissible over voltage: 4000V_{PK}

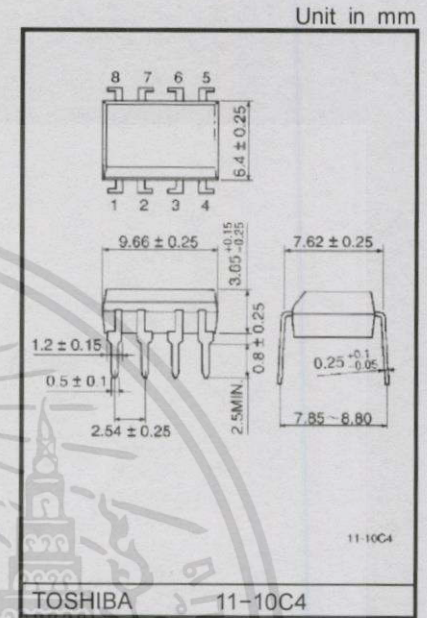
(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$

Schmatic

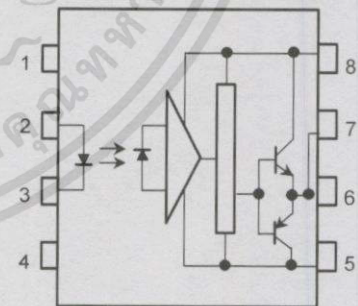


A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).



Weight: 0.54 g

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลอุปกรณ์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC GENERATOR)

- พิกัดกำลังไฟฟ้า	28	วัตต์
- กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current)	1	แอมแปร์
- แรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage)	140	โวลต์
- พิกัดความเร็วรอบ	2700	รอบ/นาที
- จำนวนโพล	8	โพล
- ความต้านทานภายใน	2	โอห์ม



รูปที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้จริง (ข) ขดลวดภายใน (ค) แกนโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กังหันลม

- เป็นหลายใบพัด (Multi blade)
- เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 เมตร
- ใบแต่ละอันมีขนาดความกว้างปลายใบ 10 เซนติเมตร ความกว้างโคนใบ 4 เซนติเมตรและมีความยาวตลอดใบ 16 เซนติเมตรประกอบกันทั้งหมด 10 ใบทั้ง 10 ใบนั้นมีความมุมพัดอยู่ที่ 7 องศา



รูปที่ 2 กังหันลมแบบหลายใบพัด

พัดลมดูดอากาศ

- พัดลมถึงกลมยี่ห้อ Delton ขนาด 380 วัตต์ 1 เฟส 220 โวลต์
- ความเร็วรอบสูงสุด 2800 รอบต่อนาที



รูปที่ 3 พัดลมดูดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดควบคุมความเร็วรอบ

- ทนกระแสสูงสุด 10A 1000W 230 Vac 50Hz
- สำหรับมอเตอร์ขนาด 1000W 220V 50Hz



รูปที่ 4 ชุดควบคุมความเร็วรอบ

อุโมงค์ลม

มีด้วยกัน 2 ส่วน คือ

- ส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction) ส่วนอากาศแพร่เข้านี้จะเป็นส่วนแรกที่อากาศจะไหลเข้าสู่อุโมงค์ลมเพื่อขยายอากาศให้มีการกระจายเพิ่มขึ้น

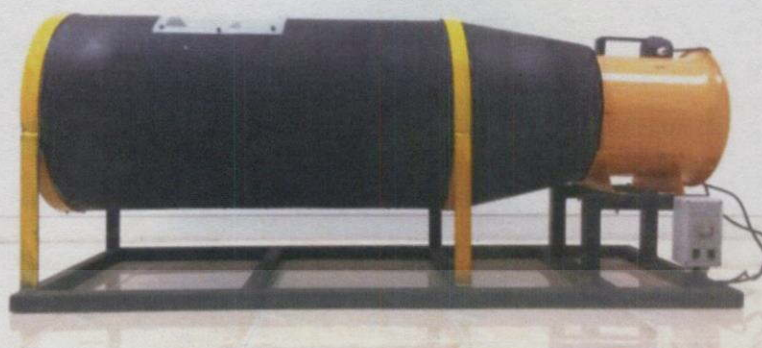
- ส่วนปฏิบัติงาน (Working Section) ส่วนที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานตามวัตถุประสงค์

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



รูปที่ 5 ภาพด้านหน้าอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

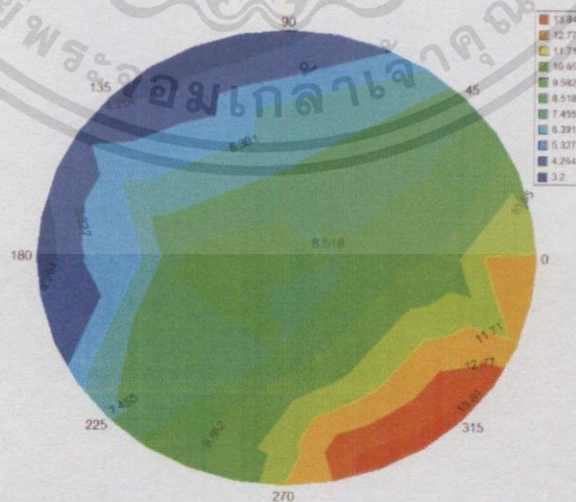


รูปที่ 6 ภาพด้านข้างอุโมงค์ลม

ในส่วนพื้นที่ทดสอบ (Test Section) เมื่อกำหนดความเร็วของพัดลม 44 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 2758 รอบต่อนาที จะได้ค่าความเร็วลมในแนวระนาบของส่วนทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความเร็วลมที่พิกัดต่างๆในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง

พิกัด (x,y)	-25,0	-15,0	-5,0	5,0	15,0	25,0	0,25	0,15	0,5	0,-5	0,-15	0,-25
ความเร็วลม(m/s)	5.3	6.1	9.2	8.5	9.7	10.8	4.8	7.3	8.3	8	10.3	11.1
ค่าเฉลี่ย (m/s)	8.380952											



รูปที่ 7 แผนภาพคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วลมต่างๆในแนวระนาบของส่วนทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบพัดลมและความเร็วลม

ความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนทดสอบ (m/s)	ความเร็วรอบพัดลม ω_{fan} (rpm)
0	0
1	512
2	752
3	1065
4	1220
5	1504
6	1245
7	2512
8	2625
8.3	2758

โหลด

- ความต้านทานปรับค่าได้ (Rheostat) ยี่ห้อ Frizlen ขนาด 1000 Ω
- พิกัด 320 วัตต์ 0.25-1.5 แอมแปร์



รูปที่ 8 ความต้านทานปรับค่าได้ (Rheostat) ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

การทดสอบคุณลักษณะของกังหันลม

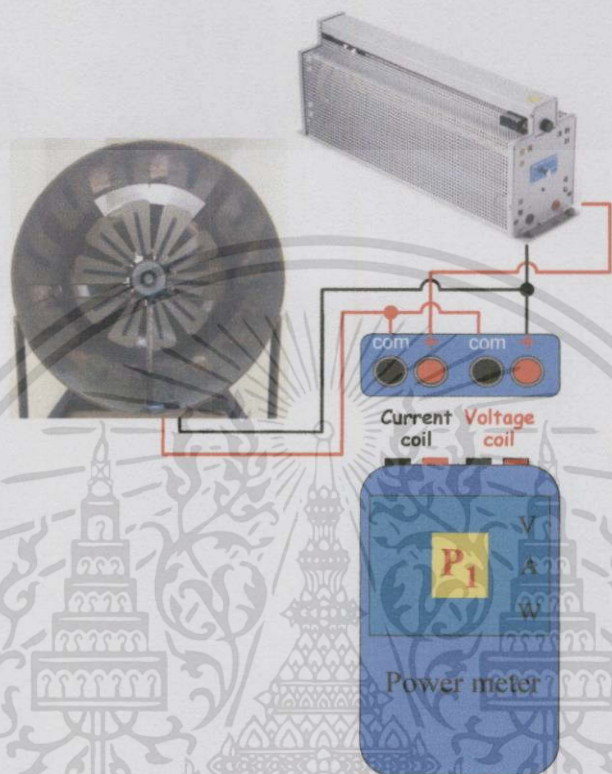
อุปกรณ์การทดลอง

1.ชุดทดสอบคุณลักษณะของกังหันลม	1	ชุด
ซึ่งประกอบไปด้วย		
- อโม่งค์ลม		
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง		
- กังหันลม		
- พัดลมดูดอากาศ		
- ชุดควบคุมความเร็วรอบ		
2. Digital Oscilloscope	1	เครื่อง
3. Current Probe	1	ชุด
4. Voltage Probe	2	ชุด
5. Power Meter	1	เครื่อง
6. Multi Meter	1	เครื่อง
7. Tachometer	1	เครื่อง
8. ความต้านทานปรับค่าได้ (Rheostat) 1000Ω	1	เครื่อง
9. สายไฟ	15	เส้น
10. Junction Box	1	ชุด

ขั้นตอนการทดลอง

- นำความต้านทานปรับค่าได้ (Rheostat) 1000Ω มาวัดค่าความต้านทานด้วย Multi Meter และสร้างแถบค่าความต้านทานเพื่อนำไปใช้ช่วยปรับค่าความต้านทานระหว่างทดลอง
- ต่อวงจรไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน Power Meter ไปยังโหลด ซึ่งแทนด้วยความต้านทานปรับค่าได้ (Rheostat) 1000Ω ดังรูปที่ 1
- ปรับค่าความเร็วลมที่ระดับ 1m/s (ปรับค่าความเร็วรอบพัดลมดังตารางที่1) บันทึกค่า P(W), I(A), V(V) โดยใช้ Power Meter และ วัดค่า $\omega_{\text{กังหัน}}$ (rpm) โดยใช้ Tachometer ที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 0 ถึง 1000Ω โดยค่อยๆปรับเพิ่มความต้านทานขึ้นครั้งละ 10 – 50Ω
- ทำการทดลองเช่นเดียวกัน โดยปรับความเร็วลมเป็น 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, และ 8.3m/s ตามลำดับ

5. นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า $P(W)$ และ ความเร็วของกังหันลม $\omega_{\text{กังหัน}}$ (rpm) จะได้กราฟคุณลักษณะของกังหันลม



รูปที่ 1 วงจรทดสอบคุณลักษณะของกังหันลม

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบพัดลมและความเร็วลม

ความเร็วลมเฉลี่ยในส่วนทดสอบ (m/s)	ความเร็วรอบพัดลม ω_{fan} (rpm)
0	0
1	512
2	752
3	1065
4	1220
5	1504
6	1245
7	2512
8	2625
8.3	2758

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



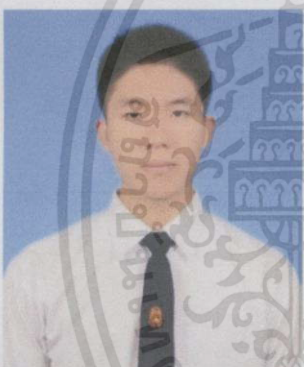
นายพงศกร สุกถณี

เกิดวันจันทร์ที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 106/2 หมู่ที่ 8 ต.คลองขนาк อ.วิเศษชัยชาญ จ.อ่างทอง 14110

จบชั้นมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย สุพรรณบุรี

E-Mail: touch.letter@gmail.com Tel. 090-1355733



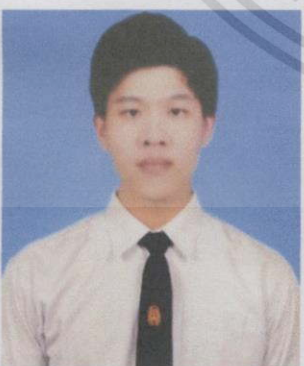
นายพงศธร ตรีโกศล

เกิดวันจันทร์ที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 63 หมู่ 1 ถ.สุขุมวิท ค.เขาบายศรี อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี 22120

จบชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี

E-Mail: pongsathon.treegosol@gmail.com Tel. 091-2279980



นายพงศธร วงศ์พราวมาศ

เกิดวันจันทร์ที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ 350/25 หมู่ 3 ต.ศิลา อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000

จบชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น (มอดินแดง)

E-Mail: pong_smd@hotmail.com Tel. 083-4570589

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้