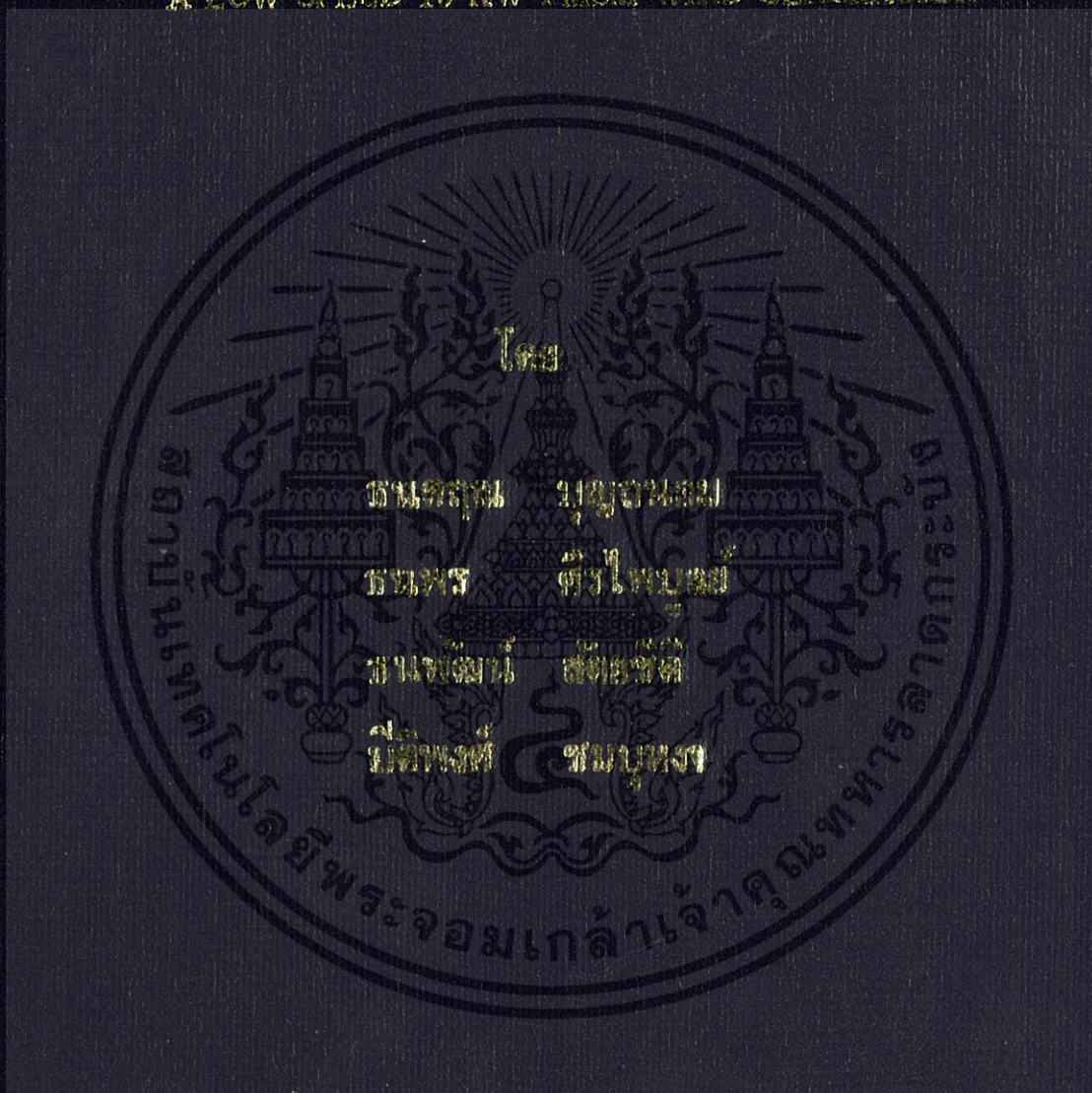


ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและนำไปใช้จริงของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม PMSM ขนาด 10 KW ที่ความเร็วลมต่ำ
FUTURE CENTER PROJECT: THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF
A LOW SPEED 10 KW PMSM WIND GENERATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๖

ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและนำไปใช้งานจริงของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม PMSM ขนาด 10 KW ที่ความเร็วลมต่ำ
FUTURE CENTER PROJECT: THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF
A LOW SPEED 10 KW PMSM WIND GENERATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUTURE CENTER PROJECT: THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF
A LOW SPEED 10 KW PMSM WIND GENERATION



THIS PROJECT 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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและนำไปใช้งานจริงของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม PMSM ขนาด 10 KW ที่ความเร็วลมต่ำ
FUTURE CENTER PROJECT: THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF
A LOW SPEED 10 KW PMSM WIND GENERATION



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและนำไปใช้งานจริงของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม PMSM ขนาด 10 KW ที่ความเร็วลมต่ำ
ผู้จัดทำ

1. นายชนตฤณ บุญนอม
2. นางสาวธนพร ศิริไพบุลย์
3. นายธนพัฒน์ สัตยชิตี
4. นายปิติพงศ์ ชมบุหงา



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและนำไปใช้งานจริงของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม PMSM ขนาด 10 KW ที่ความเร็วลมต่ำ

นายชนตฤณ บุญนอม
นางสาวธนพร ศิริไพบุลย์
นายธนวัฒน์ สัตยชาติ
นายปิติพงศ์ ชมบุหงา
ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและการออกแบบเทคโนโลยีกังหันลมที่เหมาะสมกับประเทศไทยซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ โดยทำการศึกษาด้านเทคโนโลยีกังหันลมแบบ Permanent Magnet Synchronous Generator โดยทำการวิเคราะห์ความเร็วลมในพื้นที่ทำการติดตั้ง และนำผลที่ได้มาทำการออกแบบ Power Curve เพื่อใช้ในการออกแบบสร้าง Generator ที่สามารถให้พลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับ Power Curve ที่ออกแบบมากที่สุดซึ่งตัว Generator ดังกล่าวได้ทำการออกแบบโดย รศ.พิชิต ล้ายอง จากนั้นทำการออกแบบระบบพลังงานลมที่เหมาะสมกับ Generator รวมถึงเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ อาทิเช่น คอนโทรลเลอร์และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้สามารถดึงพลังงานที่ผลิตจากกังหันลมให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังได้ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นอื่นๆที่เกี่ยวข้องเช่น ระบบควบคุม ระบบป้องกัน เสา ใบพัด และเบรค เป็นต้น หลังจากเราได้ทำการสร้างกังหันลมขึ้นมาแล้ว จะนำมาทำการติดตั้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ รวมทั้งทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้ได้กังหันลมที่สอดคล้องกับความเร็วลมประเทศไทยโดยกังหันลมที่เราออกแบบนี้จะถูกติดตั้งใน โครงการ Future Center ใช้ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าจ่ายโหลดร่วมกับ เซลล์แสงอาทิตย์ (Hybrid solar and wind energy system)

FUTURE CENTER PROJECT: THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A LOW SPEED 10 KW PMSM WIND GENERATION

Mr. Thanatin Boonthanom
Miss Thanaporn Sirapaibool
Mr. Thanapat Sattayachiti
Mr. Pitipong Chombunga
Asst.Prof.Dr.ChaiChompoo-inwai Supervisor
Year 2013

Abstract

The objective of this thesis is to present the study and design of wind turbine technology which suitable for Thailand that has low speed wind. This thesis examines the study of horizontal wind turbine technology, Permanent Magnet Synchronous Generator. Then analysis the wind speed of installation area and use the result to design a power curve for design's generator that give an electrical power efficiently. This PMSG is designed by Asso. Prof. Pichit Lumyong. Furthermore, Design the wind energy conversion system which appropriate to the Permanent Magnet Synchronous Generator and also choose power electronic devices such as controller and inverter so that the extraction of energy is at their maximum efficiency. Lastly, the basic design which related to the system. For example, control system, protection system, tower, blade and bearing. After manufacture wind turbine will be installed to compare the efficiency with the wind turbine which are ordered from international, Also the thesis include an analysis of economical reason accordingly with the wind speed in Thailand. This wind turbine will be installed at future center project that use wind solar hybrid turbine system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินไหว ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นและคำแนะนำ ตลอดทั้งตรวจสอบแก้ไขเนื้อหา รูปแบบ ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น คณะจัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์พิชิต ล้ายอง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าของเอกสาร บทความ ตำรา หนังสือทุกท่านที่ผู้วิจัยใช้ในการสืบค้นข้อมูลที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโททุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมต่างๆ รวมไปถึงให้ความรู้และคำแนะนำในการทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณและขอใจ ครอบครัวยุติและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ของคณะผู้จัดทำที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษา ซึ่งทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์จากการค้นคว้าอันพึงมีของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบทดแทนบุญคุณค่าต่อครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน III การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	5
Abstract	8
กิตติกรรมประกาศ	9
สารบัญ	10
สารบัญรูป	12
สารบัญตาราง	13
บทที่ 1 บทนำ	14
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	15
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	17
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	18
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	21
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	22
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	23
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	24
2.1 สมและความเร็วลม	24
2.2 นิยามพลังงานลม	25
2.3 การวิเคราะห์ความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ (Statistical models for wind data analysis)	25
2.4 พลังงานลม (Wind Power)	26
2.5 หลักการทำงานของกังหันลม	26
2.6 กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน	27
2.7 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า	28
2.8 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	29
2.9 การประมาณการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้	29
2.10 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System)	31
2.11 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	31
2.12 รายละเอียดเบื้องต้นของการออกแบบ PMSG	32
2.13 การทำนาย Power Curve	33
2.14 ระบบพลังงานลม	33
2.15 รูปแบบของระบบควบคุมในกังหันลม	34
2.16 ระบบ Brake	34
2.17 ระบบ Yaw	35
2.18 เครื่องมือวัดความเร็วลม	35
2.19 ตลับลูกปืน (Bearing)	35
2.20 Power Converter	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.21 Maximum Power Point Tracking (MPPT)	43
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	46
3.1 Flow Chart การทำงาน	46
3.2 การออกแบบติดตั้งกังหันลมในพื้นที่โครงการ Future Center ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเขตลาดกระบังกรุงเทพมหานคร	47
3.3 การพิจารณาเลือกกังหันลมสำหรับโครงการ Future center.....	48
3.4 การออกแบบหาขนาดใบพัดที่เหมาะสมของกังหันลมที่กำลังการผลิต 10 kW	51
3.5 ออกแบบ Power Curve เพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วลมในโครงการ Future Center.....	56
3.6 การเปรียบเทียบค่า Capacity Factor ของกังหันลม.....	59
3.7 การออกแบบ Generator.....	61
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	63
4.1 เลือกระบบจากข้อมูลเบื้องต้น	63
4.2 อุปกรณ์ Power Electronic.....	65
4.3 โครงสร้างกังหันลม	69
4.4 ระบบอื่นๆ.....	71
4.5 สรุประบบโดยรวม	74
บทที่ 5 สรุปการทำงานและแก้ไขปัญหา.....	76
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	81
ประวัติผู้เขียน.....	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อะนีโมมิเตอร์.....	5
2.2 ค่า C_p เมื่อค่า λ และ β เปลี่ยนแปลง.....	8
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระดับความสูง และกับกำลังงานต่อพื้นที่.....	9
2.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในอุดมคติของกังหันลม.....	10
2.5 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	12
2.6 กังหันลมที่มีแกนเพลลาในแนวนอน (Horizontal-axis type wind turbine, HAWT).....	13
2.7 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน.....	14
2.8 ส่วนประกอบสำคัญของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไป.....	15
2.9 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบ Stall limit และแบบ Pitch control.....	17
2.10 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่ง.....	18
2.11 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังโรเตอร์เทียบกับ tip speed ratio.....	21
2.12 โลคส์การทำงานที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงสำหรับการกำหนดกราฟกำลัง.....	22
2.13 การแบ่งระบบพลังงานลม.....	23
2.14 ระบบพลังงานลม SG ของ two-level VSC และ three-level NPC converter.....	24
2.15 ระบบพลังงานลม SG แรงดันกลางใช้เทคโนโลยี CSC.....	24
2.16 ระบบพลังงานลม SG ที่ใช้ diode rectifier และ boost converter.....	25
2.17 WECS แรงดันต่ำที่ใช้ diode rectifier และ three-level boost converter.....	25
2.18 WECS แรงดันกลางที่ใช้ three-level boost converter และ NPC converter.....	26
2.19 WECS ระดับแรงดันกลางที่ใช้ buck converter และ current source inverter.....	26
2.20 องค์ประกอบระบบควบคุม.....	27
2.21 กลวิธีการควบคุมของกังหันลมความเร็วคงที่และกังหันลมความเร็วแปรเปลี่ยน.....	28
2.22 Variable speed, stall-regulated operation.....	29
2.23 ดิสก์เบรก.....	29
2.24 รูปแบบทั่วไปของ Yaw Drive ที่มีเบรก.....	31
2.25 มาตรฐานวัดความเร็วลมแบบหมุน.....	31
2.26 เครื่องมีดัดลมแอร์เวน.....	32
2.27 ลักษณะและส่วนประกอบต่างๆของตลับลูกปืน.....	33
2.28 Deep Groove Ball.....	33
2.29 Deep Groove Ball Bearing Double Row.....	34
2.30 Angular Contact Ball Bearing.....	34
2.31 ตลับลูกปืนสองแถวรับแรงแนวเอียง.....	35
2.32 Angular Contact Ball Bearing Double Row.....	35
2.33 Cylindrical Roller Bearing.....	35
2.34 Tapered Roller Bearing.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.35 Spherical Roller Bearing.....	36
2.36 Needle Roller Bearing	37
2.37 ส่วนประกอบของวงจร Converter	37
2.38 Diode bridge rectifier ที่ใช้ในแหล่งจ่ายสามเฟส.....	38
2.39 แรงดัน DC จาก Rectifier สามเฟส.....	38
2.40 Controlled bridge rectifier ที่ใช้แหล่งจ่ายสามเฟส.....	39
2.41 แรงดัน DC จาก phase-controlled rectifier	39
2.42 Line-commutated silicon-controlled rectifier	40
2.43 วงจร Voltage source inverter	41
2.44 รูปคลื่นแรงดัน Self-commutated inverter.....	41
2.45 คลื่นควบคุม Pulse width modulation (PWM).....	42
2.46 Pulse width modulation (PWM) voltage pulse train.....	42
2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความเร็ว รวมถึงจุดการทำงานที่กำลังสูงสุด	43
2.48 Maximum power control with wind turbine power profile	44
2.49 Optimal TSR control of wind turbine	44
2.50 MPPT with optimal torque control of wind turbine.....	45
3.1 Flow Chart การทำงาน.....	46
3.2 พิกัดพื้นที่ที่ติดตั้งกังหันลมจากโปรแกรม Google map	47
3.3 พื้นที่ติดตั้งกังหันลมภายในโครงการ Future Center.....	47
3.4 Surface-mount Non silent PMSG	51
3.5 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 8 m	52
3.6 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 10 m.....	53
3.7 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 12 m.....	53
3.8 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 14 m.....	54
3.9 กราฟเปรียบเทียบ Power Curve ของกังหันลมที่เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดขนาดต่างๆ.....	54
3.10 ค่า C_p เมื่อค่า λ และ β เปลี่ยนแปลง	55
3.11 Power curve ของกังหันลมที่ได้ทำการออกแบบ Generator	56
3.12 Power curve ของกังหันลมของ Aeolos	57
3.13 Power curve ของกังหันลมของ Hopeful	57
3.14 การเปรียบเทียบ Power curve ของกังหันลม	58
3.15 โปรแกรม Wind Cap.....	59
3.16 ค่า Capacity Factor ของกังหันลมที่ออกแบบ	60
3.17 ค่า Capacity Factor ของกังหันลมของ Hopeful.....	60
3.18 ค่า Capacity Factor ของกังหันลมของ Aeolos.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 สรุปค่า Capacity Factor ของกังหันลมจากโปรแกรม Wind Cap	61
3.20 แบบจำลอง Generator ที่ได้ทำการออกแบบ	62
3.21 กราฟแรงดันของ Generator	62
4.1 Power Curve ของกังหันลมที่ออกแบบ	63
4.2 Single-channel boost converter.....	64
4.3 กราฟแรงดันของ PMSG	66
4.4 Ginlong Inverter รุ่น GCI-10K-W	67
4.5 Ginlong Controller 20 kW	68
4.6 เสากังหันลมแบบ Monopole Tower	69
4.7 ใบพัด NREL's s822	69
4.8 การรับแรงในแนวแกนและแรงในแนวรัศมีของตลับลูกปืน	70
4.9 ระบบ Grounding.....	72
4.10 Dump Load	73
4.11 ระบบโดยรวม.....	74
4.12 Specification ของ PMSG	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 การแยกประเภทความเร็วลมของมาตรา Beaufort	6
2.2 ค่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆวัดที่ความดันระดับน้ำทะเล	8
2.3 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนนอน	15
2.4 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	16
3.1 ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือนตลอด 1 ปี	48
3.2 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการควบคุมระหว่าง Fixed speed กับ Variable speed	49
3.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิด Asynchronous Generator (Gear box) และ Synchronous Generator (Gearless)	50
3.4 การออกแบบ Power Curve	52
3.5 การหมุนของใบพัด	55
3.6 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของกังหันลมของ Hopefull, Aeolos และที่ออกแบบเอง ที่ความเร็วลมต่างๆ	58
4.1 Specification ของ Generator	64
4.2 ตารางเปรียบเทียบ Specification ระหว่าง Inverter เทคโนโลยีของ Ginlong รุ่น GCI-10K-W กับ Aeolos รุ่น PVI-12.5-TL-OUTD-W	67
4.3 Specification ของ Controller เทคโนโลยี Ginlong	68
4.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของตลับลูกปืนแต่ละชนิด	71
4.5 Specification ของ Dump load	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในแต่ละปีแนวโน้มการเติบโตของชุมชนเศรษฐกิจ และสังคมมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความต้องการใช้พลังงานที่มีสูงขึ้นในขณะที่พลังงานที่ใช้กันอยู่มีอย่างจำกัด พลังงานไฟฟ้าที่เข่นกันถือว่าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญและความต้องการสูงมากในปัจจุบันส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นอาจไม่เพียงพอต่อการใช้งานภายในอนาคตเนื่องมาจากการลดลงของเชื้อเพลิงต่างๆที่มีอยู่อย่างจำกัดและเริ่มจะหมดไป ดังนั้นการคิดค้นพัฒนาหรือการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนก็ถือเป็นสิ่งสำคัญและน่าจะเป็นทางออกที่ดีในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ในอนาคต

ปัจจุบันประเทศไทยเริ่มหันมาให้ความสำคัญและสนใจพลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากต้องการลดปริมาณการนำเข้าเชื้อเพลิงและไฟฟ้าจากต่างประเทศที่นับวันยังมีราคาสูงขึ้น อีกทั้งเพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงานภายในประเทศให้มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น กระทรวงพลังงานจึงได้กำหนดกลยุทธ์การส่งเสริมพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตพลังงานทดแทนเพื่อเป็นการส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น

พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับการส่งเสริมจากทางภาครัฐ และยังเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกเนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดไม่มีต้นทุนทางเชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้ในชุมชนห่างไกล หรือบนเกาะที่ห่างไกลได้และที่สำคัญยังเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด ดังนั้นการศึกษาเทคโนโลยีกังหันลมจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในอนาคตเพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดดังกล่าว ทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาพัฒนา และออกแบบกังหันลมขนาดเล็กเพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทยโดยจะมุ่งเน้นศึกษาไปที่ตัว Generator ของกังหันลมเป็นหลัก รวมไปถึงผลกระทบในระยะสั้นและระยะยาวเพื่อทำให้เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนด้านพลังงานลมและสามารถนำมาปรับให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอนาคต โดยจะอยู่ภายใต้โครงการ Future Center ซึ่งเป็นโครงการศึกษา พัฒนาและประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้าที่ประกอบด้วย พลังงานลม พลังงานน้ำและพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งนำมาใช้ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาและออกแบบ Permanent Magnet Synchronous Generator ที่มี ความเหมาะสมกับความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้ง
2. เพื่อศึกษา เปรียบเทียบการทำงานและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมที่ ติดตั้งในประเทศไทยระหว่างกังหันลมที่ออกแบบเองกับกังหันลมที่นำเข้าจากต่างประเทศ
3. เพื่อศึกษาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก และระบบ การจ่ายภาระไฟฟ้าร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ ในโครงการ Future Center
4. เพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพื่อเป็นการสนับสนุนและส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศมากยิ่งขึ้นและเป็นแบบอย่างเพื่อการศึกษาลงทุนด้านพลังงานลม

6. เพื่อออกแบบระบบกังหันลม รวมถึงเลือกซื้ออุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมกับ Permanent Magnet Synchronous Generator ที่ออกแบบขึ้น

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบ Permanent Magnet Synchronous Generator ของกังหันลมขนาดเล็ก (Small wind Turbine) พิกัด 10 kW และศึกษาข้อมูลความเร็วลมในประเทศไทยจากฐานข้อมูลพลังงานลมประเทศไทยโดยใช้โปรแกรม Windmap เพื่อนำข้อมูลมาทำการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับโปรแกรม Windcap โดยต้องการให้ได้กังหันลมที่ผลิตไฟฟ้าได้ที่มีความเร็วลมต่ำกว่าในท้องตลาดซึ่งเป็นความเร็วลมที่เหมาะสมกับประเทศไทยและพื้นที่ของโครงการ Future Center รวมไปถึงการออกแบบ Power curve ของกังหันลมให้ได้ความเร็วเริ่มหมุนที่ 2 เมตรต่อวินาที (cut in = 2 m/s) ความเร็วพิกัดที่ 8 เมตรต่อวินาที (Rated Speed = 8 m/s) และความเร็วหยุดหมุนที่ 25 เมตรต่อวินาที (cut out = 25 m/s) จากนั้นนำข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เราได้มาใช้ออกแบบระบบกังหันลมขนาดเล็กที่เหมาะสม รวมถึงศึกษาและเลือกซื้ออุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำมาใช้ในการตั้งพลังงานที่ผลิตได้ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้กังหันลม (Wind Turbine) ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหนดในโครงการ Future Center และทำยาสถิติวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าระหว่างกังหันลมที่ออกแบบเองกับกังหันลมที่นำเข้าจากต่างประเทศ

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า
2. ศึกษาความเร็วลมประเทศไทยจากฐานข้อมูลพลังงานลมประเทศไทยจากสถาบันทางราชการ
3. วิเคราะห์และเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้งในพื้นที่ประเทศไทย
4. ออกแบบ Power Curve ที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีกังหันลมที่เลือกใช้และตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้อง

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม
- ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลม										
- ศึกษาและรวบรวมข้อมูลความเร็วลมของประเทศไทย										
- วิเคราะห์คุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าในแต่ละแต่ประเภท										
- ศึกษาและออกแบบ Power Curve ที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีกังหันลมที่เลือกใช้										
- ศึกษาและวิเคราะห์ความเร็วลมโดยการทำแบบจำลองทางสถิติ และใช้โปรแกรม Wind Cap คำนวณกำลังผลิตไฟฟ้าของกังหันลมในพื้นที่ที่ติดตั้ง										
- ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับกังหันลม (ได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.พิชิต ถ้ายอง ที่ช่วยออกแบบให้)										
- ศึกษาและออกแบบระบบกังหันลมและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องรวมถึงเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม										
- จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับพลังงานลมและข้อมูลลมในประเทศไทย ซึ่งนำไปใช้ในการออกแบบ Power Curve ของกังหันลมในการผลิตไฟฟ้าได้
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกับกังหันลมรวมถึงระบบการทำงานของกังหันลม
3. ได้กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งานในสภาพแรงลมของประเทศไทย
4. เป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าต้นแบบที่สามารถนำไปปรับปรุงพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นในอนาคต
5. ได้ออกแบบระบบเบื้องต้นที่ใช้ในกังหันลมขนาดเล็ก รวมถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์
6. เป็นแนวทางในการผลิตต้นและกระตุ้นให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้าภายในประเทศเพิ่มมากขึ้น



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลมและความเร็วลม [12]

ลม (wind) สาเหตุหลักของการเกิดลม คือ ดวงอาทิตย์ ซึ่งเมื่อมีการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์มายังโลก แต่ละตำแหน่งบนพื้นโลกได้รับปริมาณความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศในแต่ละตำแหน่ง บริเวณใดที่มีอุณหภูมิสูงหรือความกดอากาศต่ำอากาศในบริเวณนั้นก็จะลอยตัวขึ้นสูง อากาศจากบริเวณที่เย็นกว่าหรือมีความกดอากาศสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้คือการทำให้เกิดลมนั่นเอง และจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้ ทำให้เกิดเป็นพลังงานจลน์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้ลมมีความเร็วไม่คงที่แต่ตลอดเวลาที่มีความเร็วเป็นเท่าใด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศในบริเวณนั้นๆ และ ความสูงของบรรยากาศในระดับที่ต่างกัน

ปัจจุบันได้มีการผลิตเครื่องมือวัดความเร็วลม เรียกว่า อะนิโมมิเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยลูกถ้วยครึ่งวงกลม ทำด้วยอะลูมิเนียม หรือ พลาสติก แล้วแต่ประเภทการใช้งานจากการหมุนของลูกถ้วยจะมีผลทำให้เราทราบถึงจำนวนรอบในการหมุน จึงทำให้สามารถหาความเร็วลมได้ซึ่งมีหน่วยเป็น นอต, ไมล์ต่อชั่วโมง, กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมที่ใช้กันในปัจจุบันมีรูปร่างลักษณะดังในรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.1 อะนิโมมิเตอร์ [11]

2.2 นิยามพลังงานลม [3]

พลังงานลมสามารถบอกได้โดยใช้ Beaufort Scale ซึ่งค่าที่ได้จะสามารถนำมาใช้ประมาณพลังงานลมได้ในเบื้องต้น แต่ค่าดังกล่าวมีประโยชน์น้อยในทางเทคนิค ซึ่งในการนำมาใช้ในทางเทคนิคนั้นนิยมที่จะใช้ ลักษณะการกระจายตัวของลมมาใช้มากกว่า โดยจะทำการวัดความเร็วลมในบริเวณที่ต้องการทราบถึงพลังงานเป็นระยะๆ อาจจะทำทุก 10 นาที หรือทุกชั่วโมง ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำมาพล็อตกราฟ แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังไม่สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจว่าพื้นที่ดังกล่าวมีพลังงานลมมาก แต่ก็สามารถนำมาตัดสินใจได้ว่า พื้นที่นั้นมีคุณภาพเพียงไรในการใช้พลังงานจากลม ซึ่งปกติแล้วความเร็วลมเฉลี่ยตามแนวชายฝั่งทะเลจะมีค่ามากกว่า 6 m/s และในพื้นที่ราบจะมีความเร็วลมเฉลี่ยน้อยกว่า 3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การแยกประเภทความเร็วลมของมาตรา Beaufort [4]

มาตรา Beaufort	ความเร็วลม (m/s)	ชนิดลม	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น
0	0 - 0.2	ลมสงบ	ลมสงบควันลอยขึ้นตรง
1	0.3 - 1.5	ลมเบา	ทิศทางลมสังเกตได้จากควันแต่ไม่ใช่จากศรลม
2	1.6 - 3.3	ลมอ่อน	รู้สึกมีลมปะทะหน้าใบไม้เคลื่อนไหว ศรลมเริ่มหัน
3	3.4 - 5.4	ลมเฉื่อย	ใบไม้และกิ่งไม้เล็กๆเคลื่อนไหวตลอดเวลา ธงคลี่
4	5.5 - 7.9	ลมปานกลาง	ฝุ่นฟุ้ง กระจดาชปลิวกิ่งไม้เล็กๆ โยก
5	8.0 - 10.7	ลมกระโชก	ต้นไม้อ่อนโยกโยกแหล่งน้ำบนบก เช่น แม่น้ำ ลำ
6	10.8 - 13.8	ลมแรง	กิ่งไม้ใหญ่โยกสายโทรเลขตั้งหวิวๆ ไม่สะดวกที่จะ
7	13.9 - 17.1	พายุปานกลาง	ต้นไม้อ่อนโยกเดินด้านลมไม่สะดวก
8	17.2 - 20.7	พายุกระโชก	กิ่งไม้หักเดินไปข้างหน้าไม่สะดวก
9	20.8 - 24.4	พายุแรง	สิ่งก่อสร้างเสียหายเล็กน้อย
10	24.5 - 28.4	พายุจัด	ต้นไม้อ่อนรากสิ่งก่อสร้างเสียหายมาก
11	28.5 - 32.6	พายุจัด	สิ่งก่อสร้างเสียหายเป็นบริเวณกว้าง
12	≥ 32.7	เฮอริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก

2.3 การวิเคราะห์ความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ (Statistical models for wind data analysis) [10]

การวิเคราะห์ความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ ที่เป็นที่ยอมรับและใช้งานอย่างกว้างขวาง มี 2 วิธีหลักๆ คือ

1) Weibull Distribution

เป็นวิธีที่ให้ผลที่มีความถูกต้อง แม่นยำสูง แต่ใช้งานค่อนข้างยาก เนื่องจากมีตัวแปรที่แปรเปลี่ยนค่า 2 ตัว คือ k และ c

2) Rayleigh Distribution

เป็นส่วนหนึ่งของวิธีการ Weibull Distribution โดยปรับให้ง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น โดยกำหนดให้ค่าตัวแปร k คงที่และมีค่าเท่ากับ 2 เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า c

โดยข้อมูลความเร็วลมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี ควรเป็นข้อมูลที่มีการเก็บในระยะเวลาที่นานเป็นเดือน เป็นปีหรือมากกว่า และมีความละเอียดของข้อมูลไม่น้อยจนเกินไป ซึ่งระยะเวลาและความละเอียดของการเก็บข้อมูลจะส่งผลถึงความถูกต้อง แม่นยำของการวิเคราะห์ด้วย

การศึกษานี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะในส่วนของ Weibull Distribution เท่านั้น เนื่องจากว่าเป็นวิธีที่มีความถูกต้อง แม่นยำสูง และสามารถนำไปใช้กับการใช้งานจริงได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 พลังงานลม (Wind Power)

กังหันลมสามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์จากลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการให้ลมเป็นตัวขับเคลื่อนที่ต่ออยู่กับชุดเกียร์และส่งถ่ายกำลังงานกลไปยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาซึ่งพลังงานจลน์ทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่การหมุนของใบพัดของกังหันลม (Swept Area) ต่อหนึ่งหน่วยเวลามีค่าเท่ากับ

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} S_{rotor} V_{wind}^3 \quad (2.1)$$

เมื่อ P_{wind} คือ พลังงานจลน์ของลมทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่การหมุนของใบพัด
 ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ
 S_{rotor} คือ พื้นที่การหมุนของใบพัด
 V_{wind} คือ ความเร็วลม

สมการที่ (2.1) บอกถึงพลังงานจลน์ของลมทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่การหมุนของใบพัดแต่อย่างไรก็ตามกังหันลมจะไม่สามารถดึงพลังงานจลน์มาได้ทั้งหมดโดยพลังงานจลน์ที่กังหันลมสามารถดึงมาใช้ได้จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$P_{turb} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho_{air} S_{rotor} V_{wind}^3 \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{turb} คือ พลังงานจลน์ที่กังหันลมสามารถดึงมาใช้ได้
 $C_p(\lambda, \beta)$ คือ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน (Coefficient of performance) โดยทั่วไปเรียก C_p เป็นตัวแปรที่อยู่ในฟังก์ชันของอัตราส่วนของ Tip-speed (λ) และมุมของใบพัด (β)

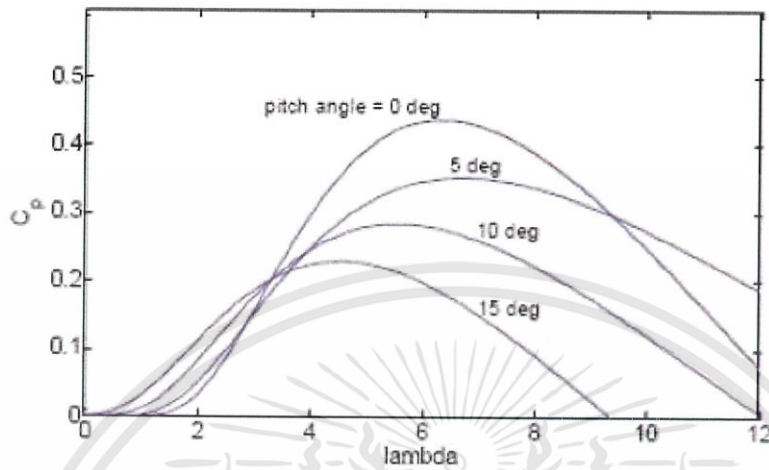
โดยที่ค่าอัตราส่วน Tip-speed (λ) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{R_{turb} \cdot \Omega_{turb}}{V_{wind}} \quad (2.3)$$

เมื่อ R_{turb} คือ รัศมีของใบพัดกังหันลม
 Ω_{turb} คือ ความเร็วการหมุนของใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีของเบทซ์ (Betz's law) กังหันลมสามารถดึงพลังงานจลน์จากลมที่ผ่านพื้นที่การหมุนของใบพัดได้ไม่เกิน 59% ดังนั้น C_p จึงมีค่าไม่เกิน 0.59



รูปที่ 2.2 ค่า C_p เมื่อค่า λ และ β เปลี่ยนแปลง [17]

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวที่เกี่ยวข้องในการดึงพลังงานจลน์จากลมก็คือความหนาแน่นของอากาศ (ρ_{air}) ซึ่งก็คือ อัตราส่วนของมวลอากาศต่อปริมาตรและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของอากาศก็คือ ความดัน (Pressure) และอุณหภูมิ (Temperature) กล่าวคือถ้าอุณหภูมิคงที่แล้วความดันเปลี่ยนแปลงที่ความดันสูงโมเลกุลของอากาศจะเคลื่อนที่ได้ช้าและที่ความดันต่ำโมเลกุลของอากาศจะเคลื่อนที่ได้เร็วทำให้ความหนาแน่นของอากาศที่ความดันสูงมีมากกว่าที่ความดันต่ำอีกกรณีหนึ่งถ้าให้ความดันคงที่แล้วให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของอากาศจะเคลื่อนที่เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำจึงทำให้ที่อุณหภูมิต่ำมีความหนาแน่นมากกว่าที่อุณหภูมิสูงตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆโดยวัดที่ความสูงระดับน้ำทะเล

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ วัดที่ความดันระดับน้ำทะเล [12]

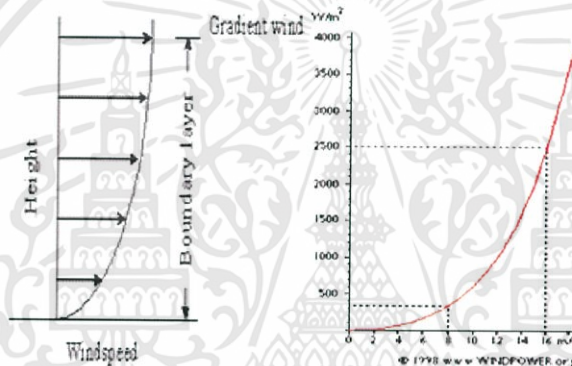
Temperature (C°)	Air density	Temperature (C°)	Air density
-25	1.423	10	1.247
-20	1.395	15*	1.225*
-15	1.368	20	1.204
-10	1.342	25	1.184
-5	1.317	30	1.165
0	1.292	35	1.146
5	1.269	40	1.127

หมายเหตุ : * คือค่าความหนาแน่นของอากาศมาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกังหันลมใช้ในการออกแบบและทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักการทำงานของกังหันลม

ลมที่เกิดขึ้นถูกใช้ประโยชน์จากส่วนที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่า ลมผิวพื้น ซึ่งหมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีการผสมผสานของอากาศกับอนุภาคอื่นๆ และมีแรงเสียดทานในระดับต่ำ โดยเริ่มต้นที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไปแรงเสียดทานจะลดลง ทำให้ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.3 จนกระทั่งที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบไม่มีแรงเสียดทาน ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระดับความสูง และสภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกับกับทิศทางของลม ซึ่งกังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ความเร็วลมเท่าๆ กัน แต่มีทิศทางลมที่ต่างกัน เมื่อลมเคลื่อนที่พุ่งเข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลมเป็นอย่างมาก ผลคือแรงลัพท์ที่ได้ออกมาจากกังหันลมแตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยเบื้องต้นที่เป็นตัวกำหนดในการใช้พลังงานลม คือ ความเร็ว และทิศทางของลม



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระดับความสูง และกับกำลังงานต่อพื้นที่ [11]

พลังงานที่ได้รับจากกังหันลมจะมีเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1-3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่ทำงานจึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ที่ความเร็วลมระหว่าง 2.5-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่าช่วงเริ่มความเร็วลม (cut in wind speed) และที่ความเร็วลมช่วงประมาณ 12-15 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงที่เรียกว่าช่วงความเร็วลม (nominal หรือ rate wind speed) ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง ในช่วงที่ความเร็วลมได้ระดับไปสู่อะไรก็ตาม เป็นการทำงานของกังหันลมด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (maximum rotor efficiency) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ้นความเร็ว (tip speed ratio) และในช่วงเลยความเร็วลม (cut out wind speed) เป็นช่วงที่ความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้

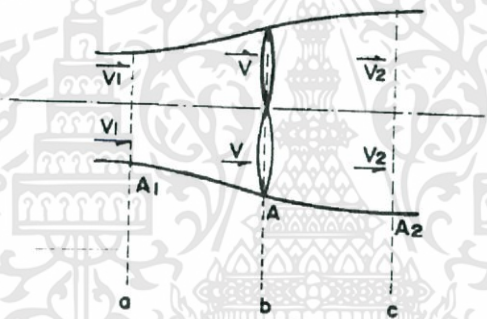
การเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล อุปกรณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่ากังหันลม พิจารณากระแสลมที่มีความหนาแน่นและมีความเร็วลม V พัดผ่านพื้นที่หน้าตัด A ในช่วงหนึ่งหน่วยเวลา จะมีกำลังลม P ที่ได้จากพลังงานจลน์ดังนี้

$$P = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.4)$$

กังหันลมจะทำหน้าที่สกัดกำลังงานที่มีอยู่ในกระแสลมมาใช้ประโยชน์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น กำหนดให้ C_p เป็นสัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient) ซึ่ง C_p จะเป็นตัวบ่งชี้สัดส่วนของกำลังงานที่กังหันจะสามารถสกัดได้จากกระแสลม ถ้า P แทนกำลังงานที่ได้จากกังหันลม ดังนั้น

$$P = C_p P_1 = \frac{1}{2} C_p \rho Av^3 \quad (2.5)$$

พิจารณากังหันลมที่พื้นที่หน้าตัดรับลม A ตั้งรับกระแสลมซึ่งมีความเร็วลม V_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในอุดมคติของกังหันลม [3]

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.4 ณ ที่หน้าตัด A_1 , A และ A_2 ของตำแหน่ง a , b , และ c มีความเร็วลม V_1 , V และ V_2 ตามลำดับจะพบว่า

$$P_T = \frac{1}{4}\rho v(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (2.6)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของพลังงานได้

$$C_p = \frac{P_T}{P} = \frac{(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{2v_1^3} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (2.7)$$

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง (Continuity Equations) ได้ดังนี้

$$A_1 v_1 = AV = A_2 v_2 \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของกระแสลม หน่วยเวลา t

$$P = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.9)$$

และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมที่มีต่อกังหันโดยแรง F

$$F = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (2.10)$$

คิดเป็นกำลังงาน

$$P = Fv = \rho A v P v^2 (v_1 - v_2) \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$\rho A v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.12)$$

และ

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (2.13)$$

Betz Coefficient Betz เสนอแนวทางการหาค่าสูงสุดของการสกัดกำลังงานจากกระแสลมให้ได้สูงสุดโดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วลม V_1 และ V_2 ถ้ากำหนดให้ $V_2 = d \cdot V_1$ แทนค่าลงในสมการที่ (2.12)

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A \left\{ \frac{1}{2} (v_1 - d v_1) \right\} (v_1^2 - d^2 v_1^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1 + d)(1 - d^2) \end{aligned}$$

ค่า P มีค่าสูงสุดเมื่อ $\frac{\partial P}{\partial d} = 0$ และ ณ จุดนี้พบว่า $d = 1/3$

ดังนั้น

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 \left(1 + \frac{1}{3} \right) \left(1 - \frac{1}{9} \right) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

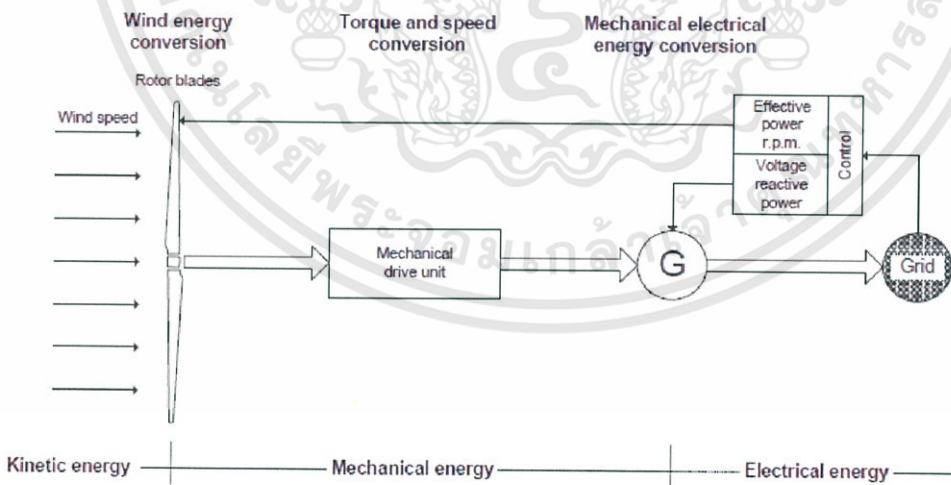
$$P_{\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{16}{27} \right) \rho A v_1^3 \quad (2.15)$$

ค่า $\left(\frac{16}{27} \right)$ ก็คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด ($C_{P\max}$) เรียกว่า Betz Coefficient

ซึ่งในความจริงแล้วค่า C_p ที่ได้จริงของระบบที่ดีจะมีค่าประมาณ 0.4-0.5 เนื่องมาจากค่าความสูญเสียอื่นๆ โดยเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพของระบบได้จาก

$$\eta = \frac{P_T}{P_{id}} = \frac{P_T}{P_o C_{P,Betz}} = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 C_{P,Betz}} = \frac{C_p}{C_{P,Betz}} \quad (2.16)$$

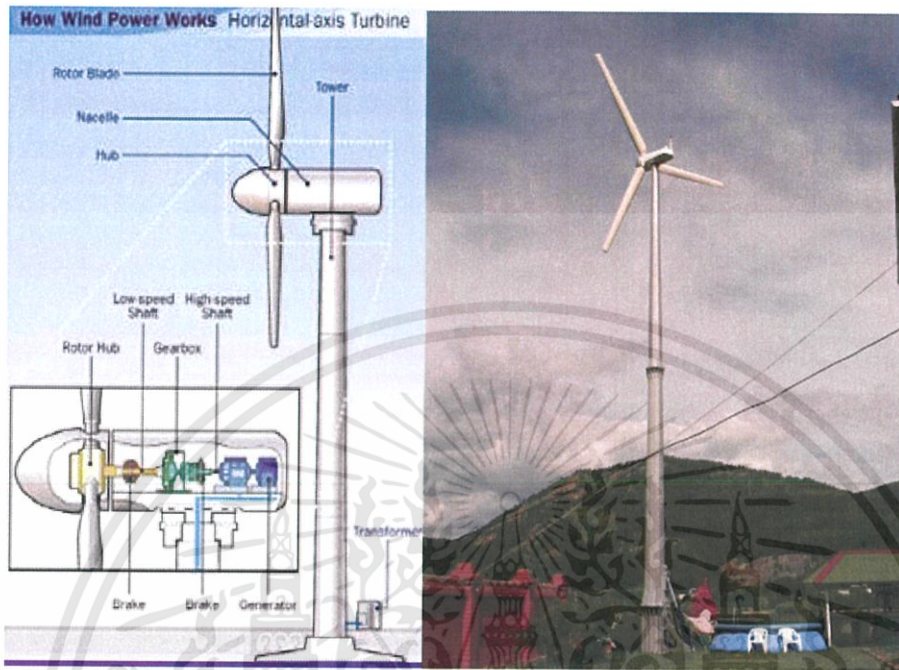
สำหรับหลักการทั่วไปในการนำพลังงานลมมาใช้ คือ เมื่อมีลมพัดมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกล โดยการหมุนของใบพัด แรงจากการหมุนของใบพัดนี้จะถูกส่งผ่านแกนหมุนทำให้เฟืองเกียร์ที่ติดอยู่กับแกนหมุนเกิดการหมุนตามไปด้วย พลังงานกลที่ได้จากการหมุนของเฟืองเกียร์นี้เองที่ถูกประยุกต์ใช้ประโยชน์ตามความต้องการ เช่นในกรณีที่ต้องการใช้กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าจะต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งเมื่อเฟืองเกียร์ของกังหันลมเกิดการหมุนจะไปขับเคลื่อนให้แกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามไปด้วย ด้วยหลักการนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนในกรณีของการใช้กังหันลมในการสูบน้ำหรือสีข้าวสามารถนำเอาพลังงานกลจากการหมุนของเฟืองเกียร์นี้ไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรง



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน [11]



รูปที่ 2.6 กังหันลมที่มีแกนเพลลาในแนวนอน (Horizontal-axis type wind turbine, HAWT) [11]

กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน (Horizontal-axis type wind turbine, HAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนวางตัวอยู่ในทิศขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม กังหันลมประเภทนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการนำมาใช้งานมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงแต่ต้องติดตั้งบนเสาที่มีความสูงมาก และมีชุดควบคุมให้กังหันลมหันหน้าเข้ารับแรงลมได้ทุกทิศทางในแนวนอนตลอดเวลา โดยกังหันแบบนี้มีส่วนประกอบคือ

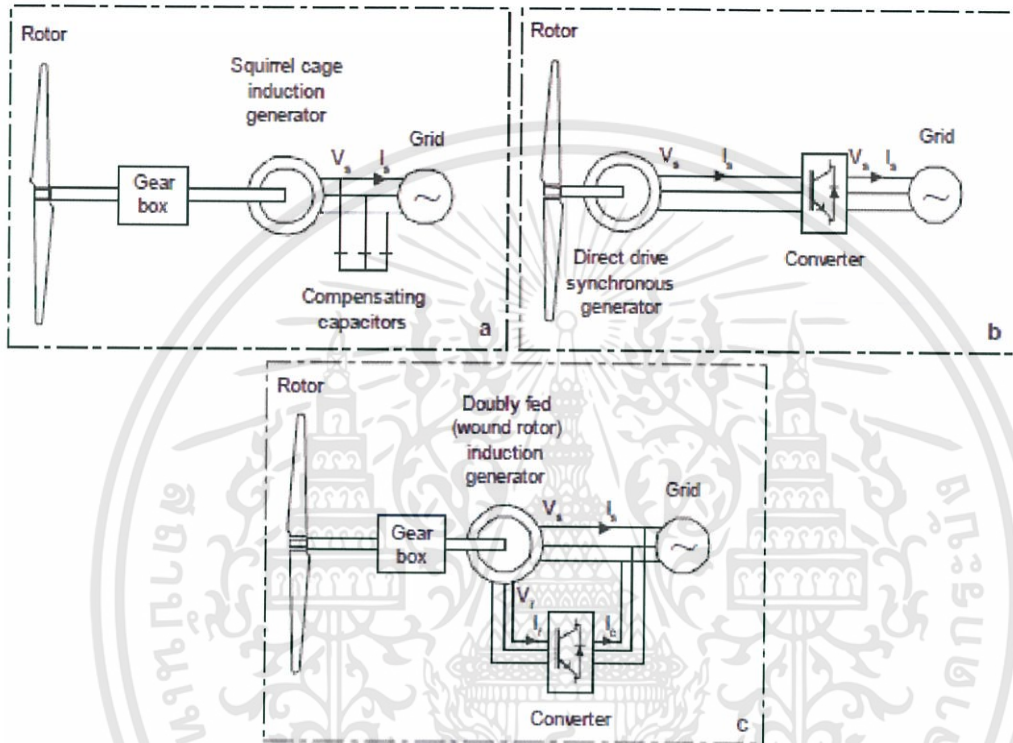
- Rotor blade, Rotor hub, Rotor brake, Pitch mechanism (มีหรือไม่มีก็ได้)
- เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า, Gearbox (มีหรือไม่มีก็ได้)
- เครื่องวัดความเร็วลม, Yaw drive (Azimuth tracking)
- Nacelle, เสา, ฐาน
- อุปกรณ์ควบคุม, สถานีย่อย

กังหันลมแกนขนอนสมัยใหม่นิยมสร้างให้มีใบพัด 3 ใบ เนื่องจากใบพัดใบเดียวไม่มีความสม่ำเสมอของความเร็วทำให้ใบพัดต้องรับความเครียดสูง และใบพัด 3 ใบให้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานที่สูงกว่าและมีความสม่ำเสมอของการหมุนมากกว่าแบบ 2 พัดเล็กน้อย เพื่อให้ได้พลังงานสูงสุดและมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ปัจจุบันจึงนิยมแบบ 3 ใบพัดเนื่องจากมีใบพัดมากกว่าอุปกรณ์ก็จะสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามในรายละเอียดของรูปแบบ องค์ประกอบ และลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบนี้ที่นิยมใช้กันสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) Fixed speed with directly grid-couple (asynchronous) squirrel cage induction generator (รูปที่ 2.7a)
- 2) Variable speed based on a direct drive synchronous generator (รูปที่ 2.7b)
- 3) Variable speed with doubly fed induction generator (รูปที่ 2.7c)



รูปที่ 2.7 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน [11]

กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (Fixed speed turbine) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัด Gearbox ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel cage induction generator) ชุดสแตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า (รูปที่ 2.7a) ในความเป็นจริงแล้วกังหันลมแบบนี้มีค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator slip) ไม่คงที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมากเพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์ดังนั้นจึงเรียกกังหันลมแบบนี้ว่าเป็นแบบความเร็วคงที่ (Fix speed turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำมักจะดึงพลังงาน (Reactive power) จากสายส่งมาใช้โดยเฉพาะที่ในที่มีระบบสายส่งที่ไม่เสถียรภาพสำหรับเหตุการณ์ลักษณะดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการชดเชยพลังงานจากตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้งอยู่ภายในตัวกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้

กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable speed) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัด, Gear box เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟ็ด (Doubly fed induction generator), เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า, ชุดสแตเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้ากังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้านั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้กังหันลมแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

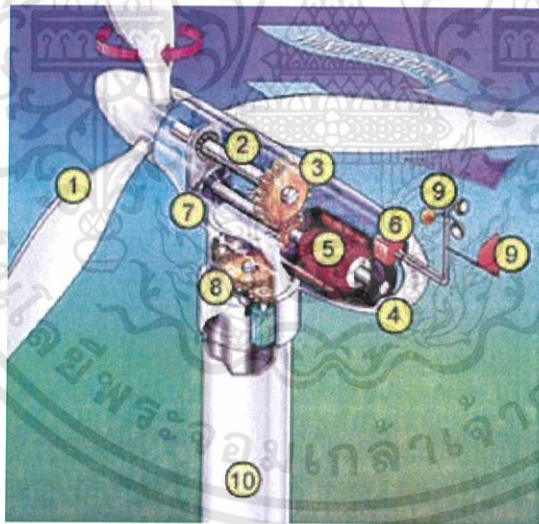
ความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (Variable speed with direct drive) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัดเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรงและมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนนอน [3]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. มีพื้นที่รับลมมากกว่าเมื่อน้ำหนักเท่ากัน	1. มีปัญหาในการหมุนใบรับทิศทางลมที่เปลี่ยนไป
2. มีประสิทธิภาพสูง	2. มีปัญหาในการประกอบใบพัดกับฐาน
3. มีแรงบิดสูง	
4. รอบจืดกว่าเมื่อความเร็วเท่ากัน ความเร็วคงที่กว่า	

2.7 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า

ส่วนประกอบสำคัญของระบบกังหันลมโดยทั่วไปอาจแบ่งได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบสำคัญของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไป [11]

- 1) ใบพัดเป็นตัวรับพลังลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกลซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน
- 2) เพลาแกนหมุนซึ่งรับแรงจากแกนหมุนใบพัดและส่งผ่านระบบกำลังเพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 3) ห้องส่งกำลังซึ่งเป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุนระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ห้องเครื่องซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลมใช้บรรจุระบบต่างๆของกังหันลมเช่นระบบเกียร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเบรกและระบบควบคุม
- 5) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
- 6) ระบบควบคุมไฟฟ้า ซึ่งใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานและจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ
- 7) ระบบเบรกเป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลากลางหมุนของกังหันเมื่อได้รับความเร็วลมเกินความสามารถของกังหันที่จะรับได้และในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา
- 8) แกนคอกหมุนรับทิศทางลมเป็นตัวควบคุมการหมุนห้องเครื่องเพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลมโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อให้มีความสัมพันธ์กับทางเสื่อรับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง
- 9) เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลมซึ่งเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลมเพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกอื่นๆ ได้ถูกต้อง
- 10) เสากังหันลมเป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน

2.8 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีขนาดต่างๆ มีพิกัดกำลังไฟฟ้า เส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นที่กวาดที่เหมาะสม เป็นไปดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า [13]

ขนาดของกังหันลม	ขนาดกำลังผลิต (kW)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่กวาด (m ²)
ขนาดจิ๋ว (Micro Wind Turbine)	<1.5	<3	<7
ขนาดเล็ก (Small Wind Turbine)	1.5-20	3-10	7-80
ขนาดกลาง (Medium Wind Turbine)	20-200	10-25	80-500
ขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine)	200-1,500	25-70	500-3,850
ขนาดใหญ่่มาก (Very Large Wind Turbine)	>1,500	>70	>3,850

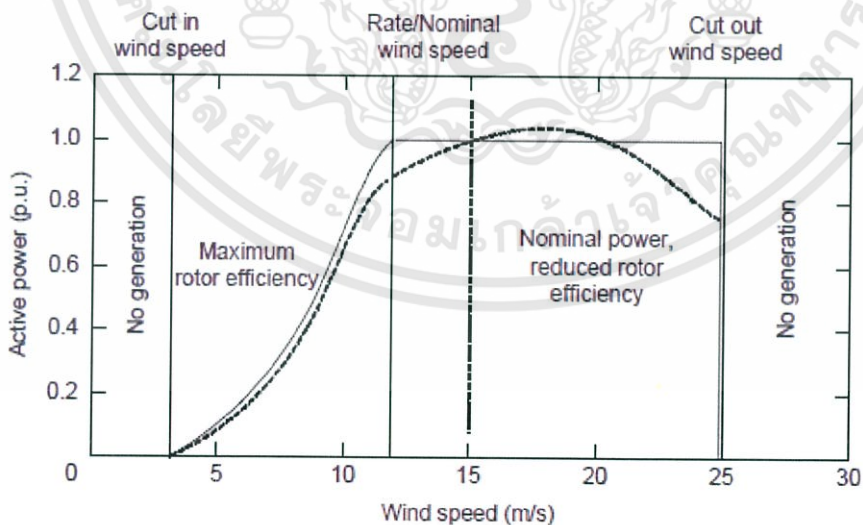
2.9 การประมาณการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

เมื่อแปลงข้อมูลความเร็วลมใน Wind Speed Frequency Distribution ที่ได้จากการตรวจวัดตลอดเวลา 1 ปีแล้ว จึงนำไปประมาณการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยคำนวณจาก Power Curve ของกังหันลม ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแต่ละยี่ห้อ และรุ่นที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น รูปที่ 2.9 เป็น Power Curve ของกังหันลม แสดงลักษณะการผลิตไฟฟ้า ซึ่งแปลความหมายดังนี้

1. Cut in speed: ความเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ ประมาณ 3 m/s หากความเร็วลมต่ำกว่า Cut in speed กังหันลมจะไม่ผลิตไฟฟ้า

2. Rated speed: ความเร็วลมที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด เมื่อความเร็วลมเพิ่มสูงขึ้นกว่า Cut in speed กังหันลมจะเริ่มผลิตไฟฟ้า และกำลังผลิต (Production Capacity) จะเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ โดยแปรตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อความเร็วลมถึงระดับความเร็วลมพิกัด (Rated speed) ของกังหันลม ประมาณ 14 m/s กังหันลมจะผลิตไฟฟ้าออกมาเริ่มคงที่ ซึ่งจากรูปกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมอยู่ที่ 250 kW

3. Cut out speed: ความเร็วลมที่กังหันลมจะหยุดการทำงาน เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างของกังหันลม เมื่อมีความเร็วลมสูงกว่า Cut out speed ของกังหันลม ประมาณ >25 m/s นั่นคือพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh) มีค่าเท่ากับผลของค่าการกระจายของความเร็วลม (Speed frequency distribution: hrs) x Power Curve โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น ยังไม่รวมค่าความสูญเสีย (Loss) ที่เกิดขึ้นในระบบ (ค่าความสูญเสียใน Generator, Mechanical part, Aerodynamic part, ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า รวมทั้งระบบควบคุม และความแปรปรวนของอากาศ) ดังนั้นหากต้องการหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้จริงต้องคูณด้วย Efficiency factor ของกังหันลมซึ่งมีค่าประมาณ 80%



รูปที่ 2.9 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบ Stall limit (เส้นประ) และแบบ Pitch control (เส้นทึบ) [11]

ดังนี้

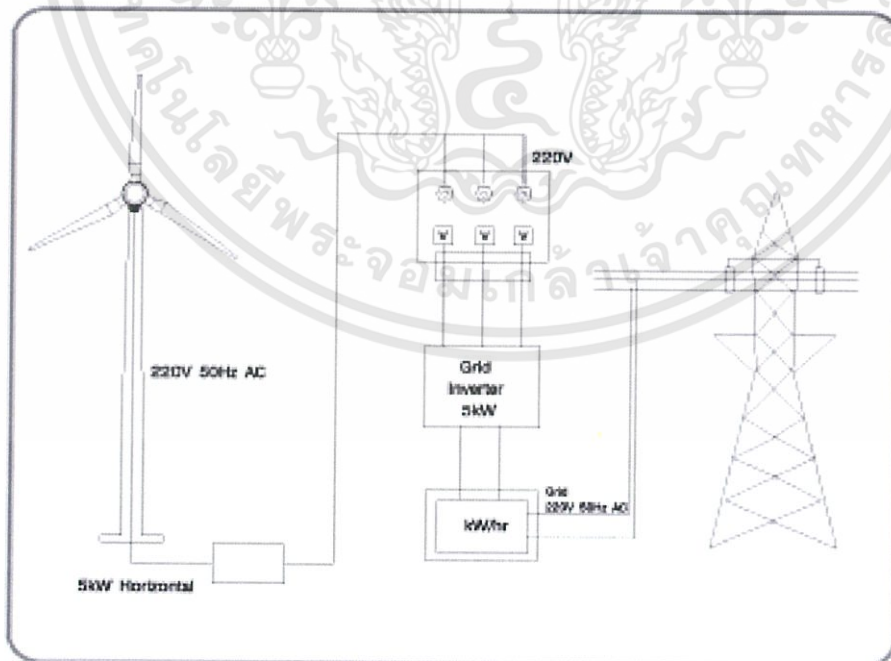
การคำนวณหาความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ (Hub Height) ใช้สูตรคำนวณ

$$V(y) = V(x) \left[\frac{h(y)}{h(x)} \right]^{\sigma} \quad (2.17)$$

เมื่อ $V(y)$ คือ ความเร็วลมที่ความสูง y เมตร หน่วยเป็น เมตร/วินาที
 $V(x)$ คือ ความเร็วลมที่ความสูง x เมตร หน่วยเป็น เมตร/วินาที
 $h(y)$ คือ ความสูงที่ระดับ y เมตร หน่วยเป็น เมตร
 $h(x)$ คือ ความสูงที่ระดับ x เมตร หน่วยเป็น เมตร
 $\sigma = 1/7 = 0.142857$

2.10 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System)

ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System) การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในระบบนี้เป็นการติดตั้งใช้งานในกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งจะทำการเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องมีชุดเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่ (Battery Bank) โดยชุดแปลงไฟฟ้า (Inverter) ของระบบนี้จะมีราคาสูงกว่าชุดแปลงไฟฟ้าทั่วไป เนื่องจากมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนและต้องสามารถเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่งได้ (Grid Tie Transfer) นอกจากนี้ชุดแปลงไฟฟ้าของระบบนี้ยังมีหน้าที่สำคัญที่จะต้องควบคุมแรงดันหรือความถี่ทางไฟฟ้าให้เหมาะสมและสามารถป้อนกระแสไฟฟ้าขนานไปกับไฟฟ้าจากสายส่งหลักได้



รูปที่ 2.10 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของระบบควบคุมกังหันลมนั้นจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างชุดควบคุมการปล่อยไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายใต้ชุดแปลงไฟฟ้า (Inverter) และระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine Controller) เพื่อให้ระบบมีการปล่อยพลังงานไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องเหมาะสมต่อความเร็วลมขนาดต่าง ๆ กันออกไป

2.11 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Permanent Magnet Synchronous Generator คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรแทนที่ขดลวดสนามที่โรเตอร์ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งแม่เหล็กถาวรนั้นสามารถคงสนามแม่เหล็กไว้ได้นานในสถานะต่างๆ ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบทั่วไปใช้ขดลวดไฟฟ้าที่โรเตอร์ เรียกว่า ขดลวดกระตุ้นเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก แต่การที่ Permanent Magnet Synchronous Generator นั้นเปลี่ยนจากการใช้ขดลวดกระตุ้นมาใช้แม่เหล็กถาวรแทน ส่งผลให้สามารถกำจัดการใช้กำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายไปยังขดลวด, ลดขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลง และสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าที่หลายๆ ความเร็วได้

2.11.1 ข้อดีของแม่เหล็กถาวรในเครื่องจักรกลเชิงโรตอร์

- 1) ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่าย DC สำหรับวงจรกระตุ้น
- 2) Permanent Magnet Synchronous Generator ไม่ต้องการ Slip ring จึงบำรุงรักษาง่าย
- 3) ไม่จำเป็นต้องมี Condenser ในการรักษา Power factor ในตัว Synchronous generator
- 4) ไม่มีกำลังสูญเสียที่ขดลวดกระตุ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีขึ้น

2.11.2 ข้อเสียของแม่เหล็กถาวรในเครื่องจักรกลเชิงโรตอร์

- 1) แม่เหล็กถาวรขนาดใหญ่มีราคาสูง
- 2) แม่เหล็กถาวรที่มีสมรรถนะสูง มีปัญหาทางด้านโครงสร้างและความร้อน
- 3) ไม่สามารถควบคุมความหนาแน่นของ flux ในช่องอากาศได้ จึงทำให้เกิดแรงดันเกิน ไม่คงที่และความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ต่ำ
- 4) สนามแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดปัญหาในระหว่างการสร้าง
- 5) กระแสทอร์ค MMF ผสมกันทางเวกเตอร์กับ flux ถาวรของแม่เหล็กถาวร ทำให้ความหนาแน่น flux ในช่องอากาศสูงขึ้น และทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก
- 6) ความหนาแน่น flux นั้นมีข้อจำกัด

ในการเลือกวัสดุแม่เหล็กสำหรับการสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิการทำงาน

โดยสรุปแล้ว NdFeB นั้นเหมาะสมที่สุดเนื่องจากราคาไม่แพงมาก มีความหนาแน่น flux ตกค้างสูง ดังนั้นสนามกระตุ้นที่ rotor สูง จึงใช้ทองแดงน้อยลงในการเหนี่ยวนำแรงดัน และยังใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย

2.12 รายละเอียดเบื้องต้นของการออกแบบ PMSG

2.12.1 รายละเอียดของ Generator

การออกแบบกังหันลมนั้นไม่ใช้การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไป การออกแบบต้องคำนึงถึงความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ด้วย ทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนเล็กน้อย หรืออาจมีข้อจำเป็นบางอย่างที่นำมาใช้เป็นพิเศษในกังหันลม คุณลักษณะพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในกังหันลมนั้นต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) ความเร็วในการทำงาน
- 2) ประสิทธิภาพที่โหลดเต็มพิกัดและโหลดต่างๆ
- 3) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและแหล่งกำเนิด Reactive Power (Induction Machine)
- 4) การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Synchronous Machine)
- 5) วิธีการในการ Start
- 6) กระแสเริ่มทำงาน (Induction Machine)
- 7) การซิงโครไนซ์ (Synchronous Machine)
- 8) ขนาดของโครงสร้างและน้ำหนักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 9) ชนิดของฉนวน
- 10) การป้องกัน
- 11) ความสามารถในการรับมือกับการสั่นของแรงบิดการระบายความร้อน
- 12) ความสามารถในการรองรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายตัว
- 13) การทำงานภายใต้การรบกวนทางไฟฟ้า

2.12.2 ข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบ

- 1) การวางแนวของโรเตอร์: แนวนอน หรือแนวตั้ง
- 2) การควบคุมกำลัง: Stall, Variable pitch, Controllable aerodynamic surface หรือ Yaw control
- 3) ตำแหน่งโรเตอร์: ลมบนหรือลมล่าง
- 4) การควบคุม Yaw: Driven Yaw, Free Yaw, Fixed Yaw
- 5) ความเร็วโรเตอร์: คงที่ หรือเปลี่ยนแปลง
- 6) ออกแบบ Tip speed ratio และความแข็งแรง
- 7) ประเภทของฮับ : rigid, teetering, hinged blade หรือ gimbaled

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) จำนวนใบพัด
- 9) ความเร็วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า: ความเร็วเชิงโคโรนัส, ความเร็วเชิงโคโรนัสหลายค่าหรือความเร็วแปรเปลี่ยน
- 10) โครงสร้างเสา

2.13 การทำนาย Power Curve [7]

2.13.1 การทำนาย Power Curve

การทำนายกราฟกำลังของกังหันลมนั้นสำคัญมากเนื่องจากเกี่ยวข้องกับโรเตอร์, Gear box, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบควบคุม กระบวนการนั้นค่อนข้างจะแตกต่างกันระหว่างกังหันลมความเร็วคงที่ และความเร็วแปรเปลี่ยน

ส่วนแรกวิธีการที่ใช้ในการทำนายกราฟกำลังของกังหันลมความเร็วคงที่และระดับคงที่ คือ การเทียบกำลังขาออกจากโรเตอร์เป็นค่าของความเร็วลมและความเร็วการหมุนของกำลังที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึงประสิทธิภาพก็ต้องนำมาพิจารณาด้วย

กำลังโรเตอร์นั้นมียังประกอบเป็นความเร็วการหมุน ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p ซึ่งมีองค์ประกอบของ tip speed ratio โดยสมการกำลังโรเตอร์ P_{rotor} คือ

$$P_{rotor} = C_p \eta \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3 \quad (2.18)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพ

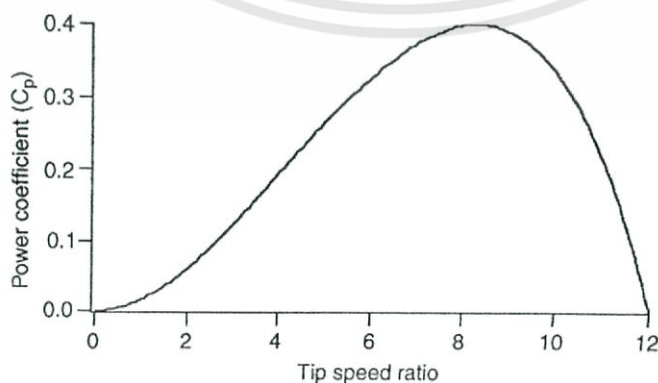
ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ

R คือ รัศมีโรเตอร์

U คือ ความเร็วลม

โดยความเร็วโรเตอร์ (n_{rotor}) ในหน่วย rpm หาได้จาก tip speed ratio (λ)

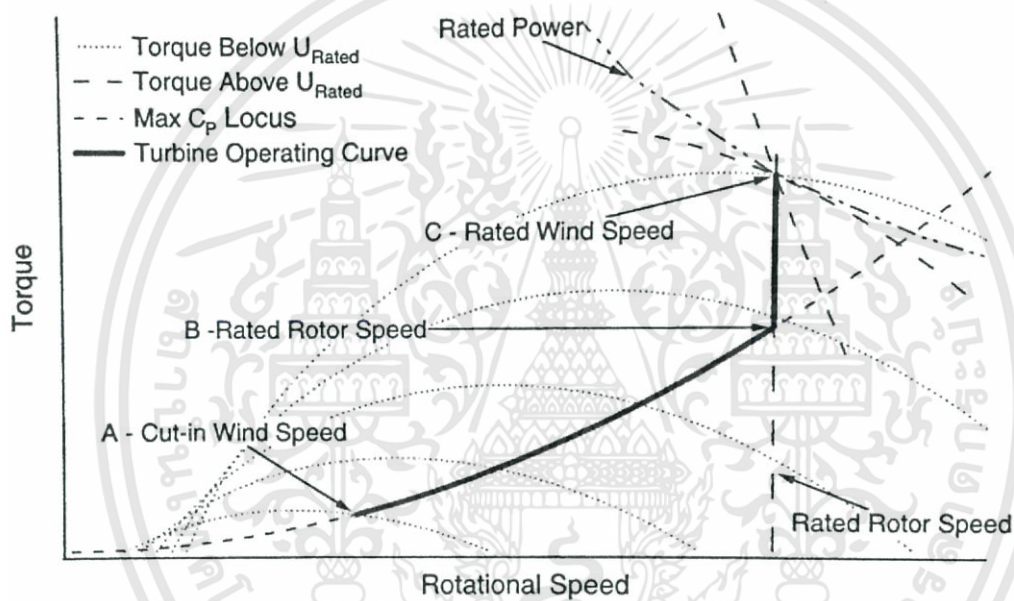
$$n_{rotor} = \frac{30}{\pi} \lambda \frac{U}{R} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังโรเตอร์เทียบกับ tip speed ratio [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกังหันลมความเร็วแปรเปลี่ยนนั้นไม่สามารถต่อกับกริดได้โดยตรง ซึ่งรูปแบบโดยทั่วไปคือ Synchronous Generator หรือ Wound rotor induction Generator พร้อมกับคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง แต่หลักการโดยรวมจะคล้ายกับด้านบน โดยเราต้องเปรียบเทียบกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกราฟความเร็ว ซึ่งในรูปที่ 2.12 แสดงในกรณีของกังหันลม variable-speed และ variable-pitch ที่มีการทำงานในองค์ประกอบของแรงบิดโรเตอร์และความเร็วการหมุน กังหันลมที่ทำงานที่ความเร็วแปรเปลี่ยนเพื่อตรวจจับค่า tip speed ratio สูงสุดเพื่อให้มั่นใจว่ากังหันลมทำงานที่ค่า C_p สูงสุด เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจนความเร็วโรเตอร์ถึงพิกัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานที่ความเร็วคงที่

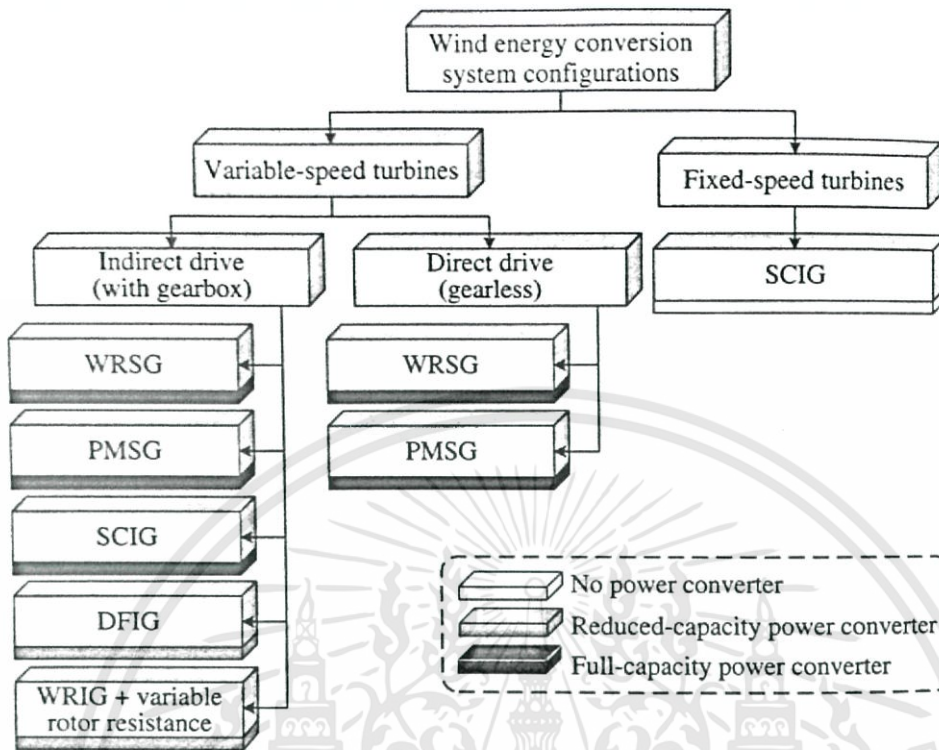


รูปที่ 2.12 โลคัสการทำงานที่ความเร็วแปรเปลี่ยนแปรสำหรับการกำหนดกราฟกำลัง [7]

2.14 ระบบพลังงานลม [7]

2.14.1 ระบบพลังงานลม

ในการอธิบายจะขอเจาะจงที่ระบบพลังงานลมสำหรับความเร็วลมแปรเปลี่ยนที่จะนำมาพิจารณาจริง

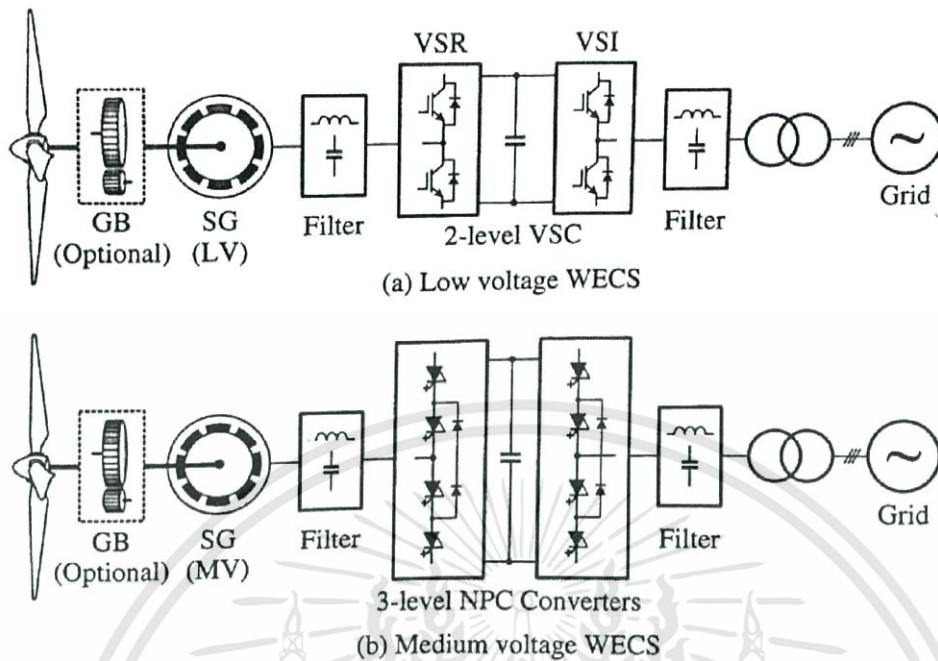


รูปที่ 2.13 การแบ่งระบบพลังงานลม [7]

2.14.2 ระบบแปลงพลังงานลมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสความเร็วแปรเปลี่ยน ซึ่งระบบที่ใช้สำหรับ Synchronous Generator จะเป็นระบบที่ใช้ Full-Capacity Back-to-Back Power Converters โดยแบ่งออกเป็น

1) Two-Level VSC และ Three-Level NPC Converter

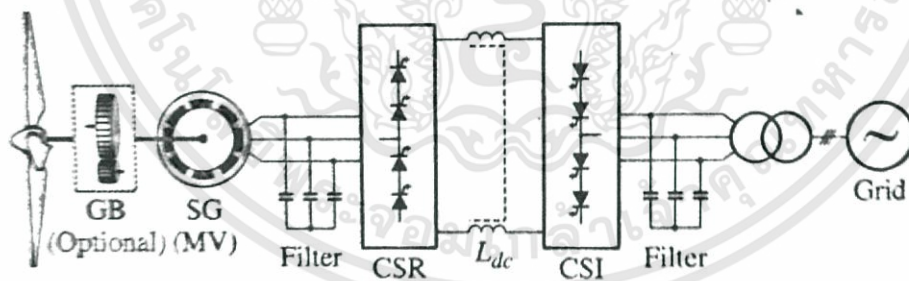
การใช้งาน back-to-back two-level voltage source converter จะถูกนำมาใช้งานในระบบพลังงานลมแรงดันต่ำและ three-level NPC converter จะถูกนำมาใช้งานในระบบพลังงานลมแรงดันกลาง



รูปที่ 2.14 ระบบพลังงานลม SG ของ two-level VSC และ three-level NPC converter [7]

2) PWM Current Source Converter

PWM Current Source Converter เป็นระบบที่เหมาะสมกับระบบพลังงานลมแรงดันกลางถึงประมาณ 3kV ถึง 4 kV



รูปที่ 2.15 ระบบพลังงานลม SG แรงดันกลางใช้เทคโนโลยี CSC [7]

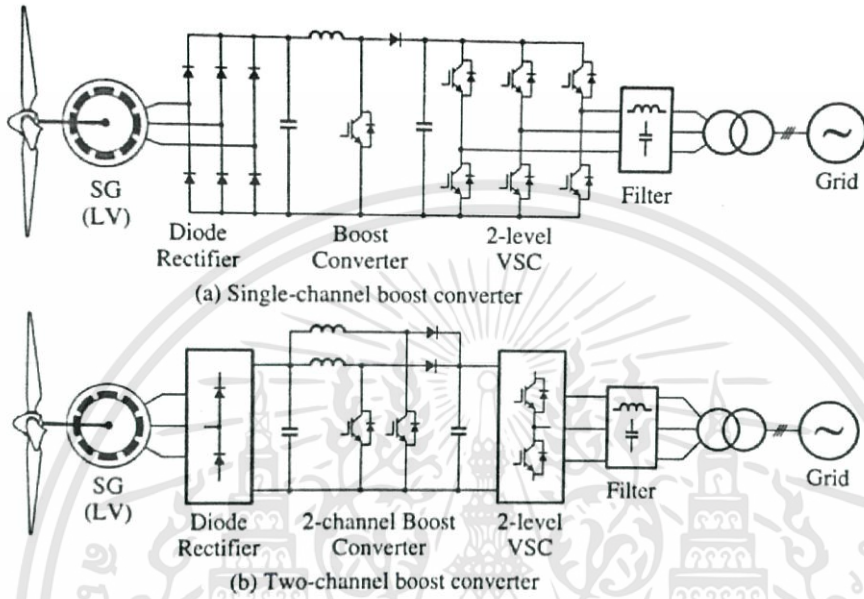
2.14.3 ระบบที่ใช้ Diode Rectifier และ DC/DC Converter โดยแบ่งออกเป็น

1) Diode Rectifier กับ Multichannel Boost Converters

ระบบนี้ไม่สามารถใช้งานกับ SCIG ได้เนื่องจากไม่สามารถสร้างพลังงานเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ การทำงานคือ วงจรบริดจ์ไดโอดจะแปลงแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น DC จากนั้นถูกยกกระตบขึ้นด้วย Boost converter ซึ่งจำเป็นที่จะต้องเพิ่มระดับแรงดันที่ความเร็วลมต่ำๆ ให้สูงพอที่จะให้ inverter ทำงานได้ อีกทั้งยังให้ความมั่นใจในการผลิตพลังงานสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

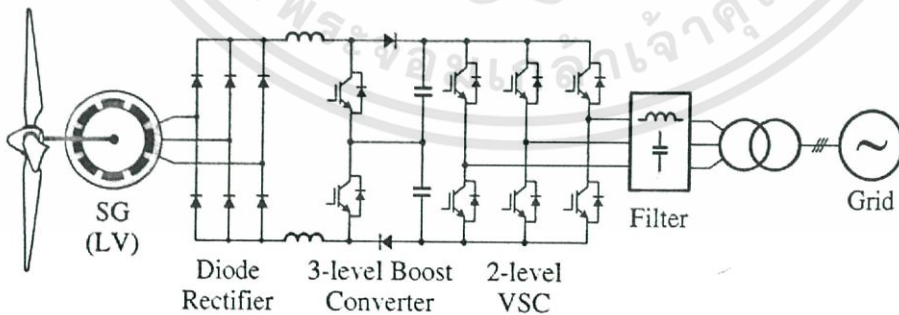
Single-channel boost converter จะเหมาะกับการใช้งานที่กําลังระดับกิโลวัตต์ ส่วนถ้าต้องการใช้งานที่ระดับเมกะวัตต์จะต้องพัฒนาเป็น two-channel boost converter ซึ่งทั้ง 2 ลักษณะนี้จะมียังงจรที่ง่ายกว่าและราคาถูกลงกว่า แต่ว่าอาจมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นจากวงจรบริดจ์ไดโอด



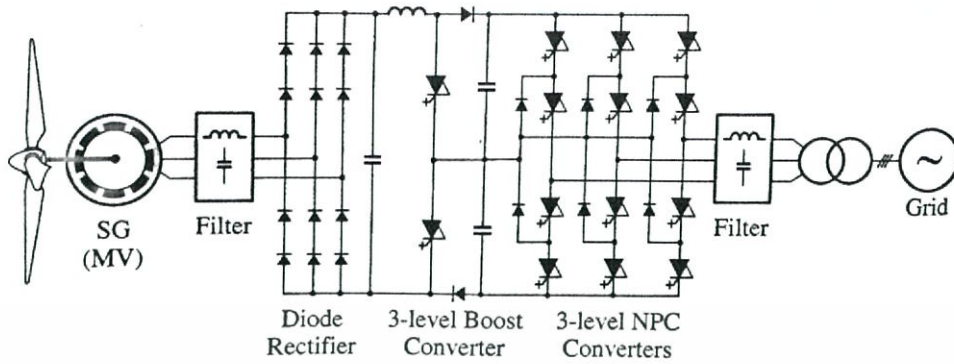
รูปที่ 2.16 ระบบพลังงานลม SG ที่ใช้ diode rectifier และ boost converter [7]

2) Diode Rectifier กับ Multilevel Boost Converters

เป็นการใช้งาน three-level boost converter ซึ่งประกอบด้วย single-boost converter 2 ตัว ต่อเรียงกันทำให้สามารถใช้งานได้ที่พิกัดกำลังถึง 1.2 MW อีกทั้งใช้งานได้ทั้งแรงดันต่ำและแรงดันกลาง



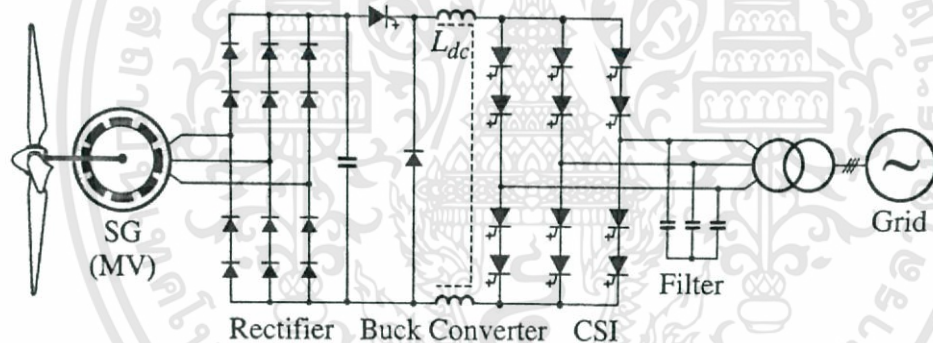
รูปที่ 2.17 WECS แรงดันต่ำที่ใช้ diode rectifier และ three-level boost converter [7]



รูปที่ 2.18 WECS แรงดันกลางที่ใช้ three-level boost converter และ NPC converter [7]

3) Diode Rectifier กับ Buck converter for CSC WECS

จะเป็นการใช้งาน Buck converter เพื่อเพิ่มระดับกระแส ทำให้สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย น่าเชื่อถือ แต่อาจมีปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกกระแสเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่งผลให้เกิดค่า THD สูง และความสูญเสียสูง โดยระบบนี้เหมาะใช้งานที่แรงดันระดับกลาง



รูปที่ 2.19 WECS ระดับแรงดันกลางที่ใช้ buck converter และ current source inverter [7]

2.15 รูปแบบของระบบควบคุมในกังหันลม [7]

2.15.1 รูปแบบของระบบควบคุมในกังหันลม

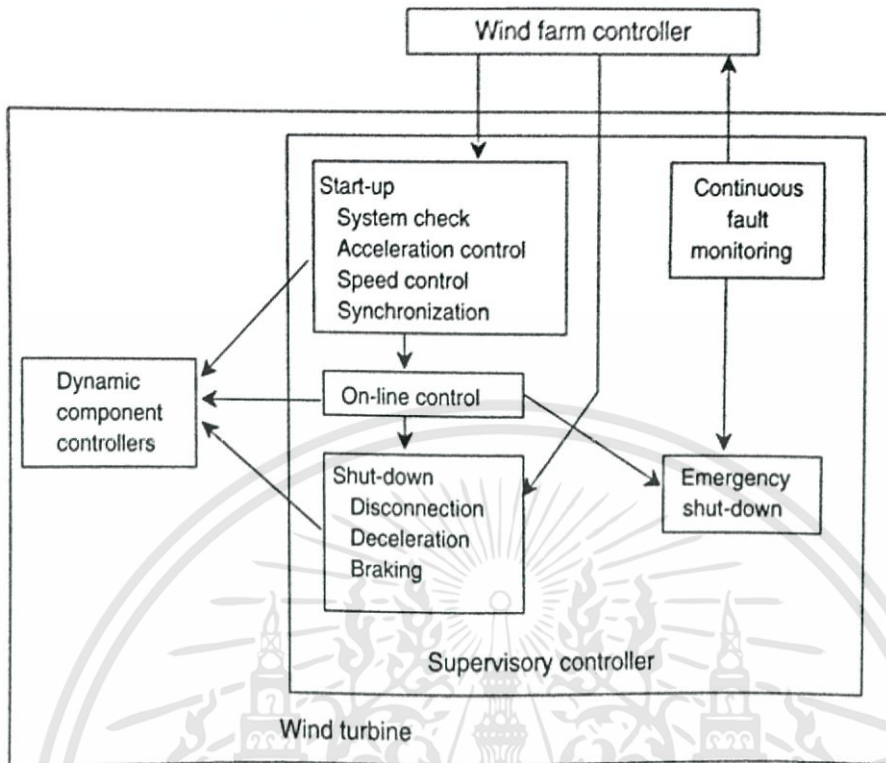
เป้าหมายของระบบควบคุมของกังหันลม คือ เมื่อจัดการความปลอดภัย, การทำงานอัตโนมัติของกังหันลม ทำให้ลดค่าการทำงาน, ให้การตอบสนองไดนามิกที่สอดคล้องกันและ พัฒนาคุณภาพของสินค้า รวมถึงเพิ่มความมั่นใจเรื่องความปลอดภัย การทำงานนี้ส่วนใหญ่แล้วจะถูกออกแบบเพื่อเพิ่มพลังงานที่ได้ต่อปีให้มากที่สุดจากลมที่เกิดขึ้น

ระบบควบคุมกังหันลมนั้นปกติแล้วแบ่งตามการทำงานออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

- 1) ตัวควบคุมที่ควบคุมกังหันลมจำนวนมากในฟาร์ม
- 2) ตัวควบคุมตรวจตรากังหันลมแต่ละตัวในฟาร์ม
- 3) ตัวควบคุมไดนามิกในแต่ละระบบย่อย ระบบการทำงานสามระดับนี้ทำงาน

ตามลำดับซึ่งอินเตอร์ล็อกกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 องค์ประกอบระบบควบคุม [7]

2.15.2 การทำงานของกังหันลมแบบต่อกริด

การควบคุมแรงบิดอากาศ, แรงบิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, แรงบิดเบรก และการหัน ถูกนำมาผสมผสานใช้งานเพื่อควบคุมกังหันลมให้แปลงพลังงานจลน์จากลมเป็นพลังงานไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ เช่น การควบคุมแรงบิดโรเตอร์เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตพลังงานให้สูงสุด, ลดความเสี่ยงสภาพของเพลลาหรือใบพัด หรือจำกัดกำลังสูงสุด การเปลี่ยนมุมใบพัดเพื่อเริ่มการหมุนโรเตอร์, ควบคุมพลังงานที่ผลิต หรือหยุดโรเตอร์

โดยทั่วไปเป้าหมายของการควบคุมกังหันลม คือ

1) เพิ่มอัตราการผลิตพลังงานให้สูงสุด ในขณะที่องค์ประกอบของกังหันลมสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย

2) ป้องกันโหลตเกินและลดความเสียหายจากการเสื่อมสภาพให้น้อยที่สุด

3) ให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ยอมรับได้เมื่อจ่ายเข้ากริด

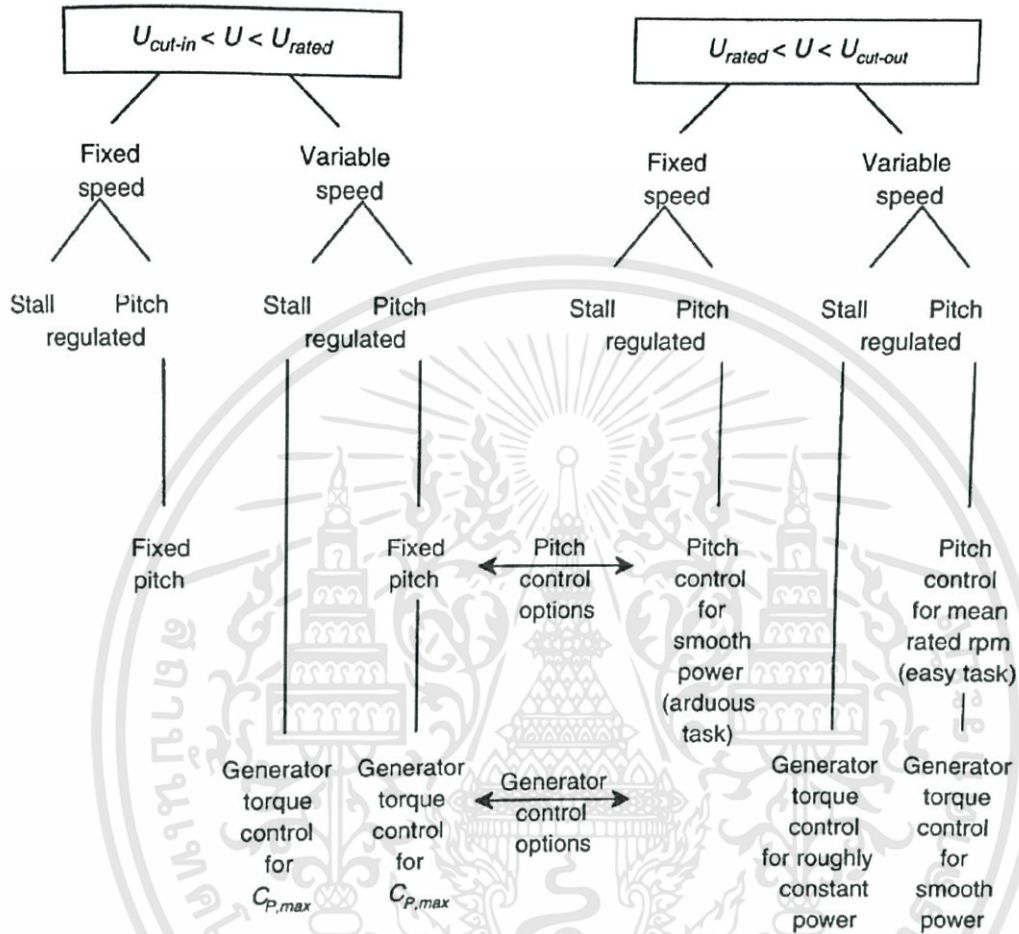
4) ให้ความมั่นใจว่ากังหันลมจะทำงานอย่างปลอดภัย

เทคนิคการควบคุมการทำงานของกังหันขึ้นอยู่กับกริดออกแบกกังหัน โดยมีข้อคำนึงถึงอยู่คือ

1) ที่ความเร็วลมต่ำกว่าที่พิกัด, ต้องการผลิตพลังงานให้ได้มากที่สุด

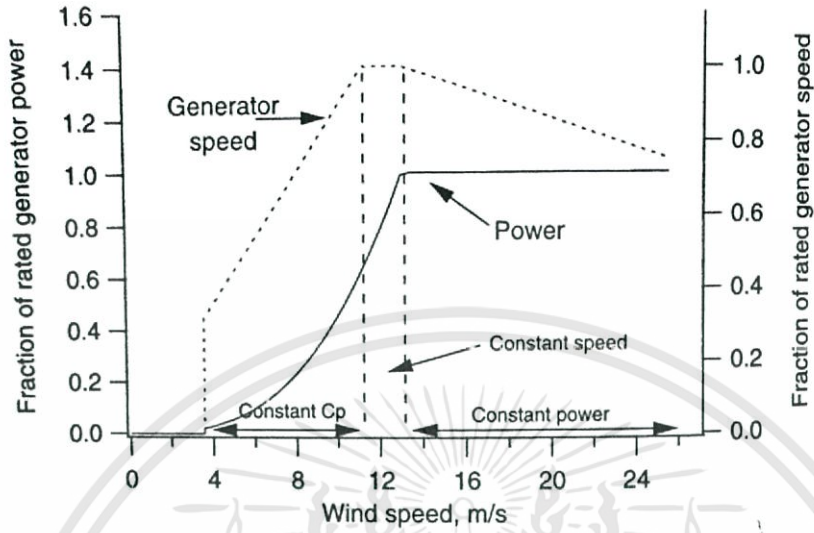
2) ที่ความเร็วลมสูงกว่าที่พิกัด, จำกัดพลังงานที่ผลิตได้

กระบวนการควบคุมกังหันลมสำหรับการควบคุม pitch และ stall แสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของความเร็วลม



รูปที่ 2.21 กลวิธีการควบคุมของกังหันลมความเร็วคงที่และกังหันลมความเร็วแปรเปลี่ยน [7]

ตัวอย่างการทำงานของ การควบคุมกังหันลมแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Variable speed, stall-regulated operation [7]

2.16 ระบบ Brake [8]

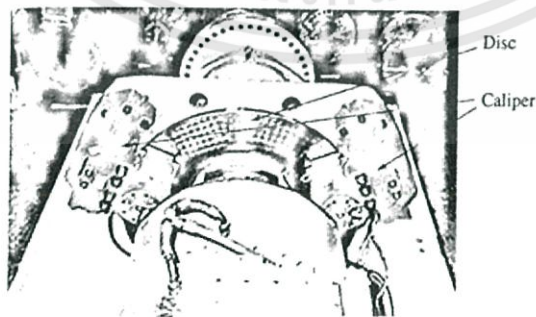
2.16.1 การทำงานของระบบ Brake

กังหันลมทุกตัวจะมีระบบเบรกทางกลรวมอยู่ด้วย ซึ่งโดยรวมแล้วระบบการเบรกจะมีทางพลวัตอากาศและทางกลรวมอยู่ในการออกแบบด้วย โดยการเบรกทางกลจะเป็นการหยุดกังหันในขณะที่กรณีอื่นจะใช้เพื่อพัก

การเบรกทางกลมีอยู่ 2 แบบที่ใช้กันทั่วไปในกังหันลม คือ

- 1) Disc brake
- 2) Clutch brake

โดยตัว Disc brake จะทำงานเหมือนในยานยนต์ทั่วไป แผ่นดิสก์เหล็กจะถูกเชื่อมติดกับเพลลา ระหว่างการเบรก ตัวไฮดรอลิกจะดันแผ่นเบรกปะทะกับดิสก์ ทำให้เกิดแรงบิดต้านกับดิสก์ส่งผลให้ตัวโรเตอร์ช้าลง



รูปที่ 2.23 ดิสก์เบรก [8]

Clutch Brake ประกอบด้วยแผ่นความดันกับแผ่นแรงต้าน โดยจะทำงานผ่านสปริงซึ่งใช้แรงอัดอากาศหรือของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรกอีกประเภทหนึ่งนั้นเป็นการเบรกทางไฟฟ้าซึ่งเป็นที่รู้จักกันว่า Dynamic brake หลักการอย่างง่าย คือ การจ่ายกำลังไปยังตัวต้านทานหลังจากการตัดกังหันลมผลิตไฟฟ้าออกจากกริด ทำให้เกิดโหลดบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแรงบิดบนโรเตอร์ ส่งผลให้ลดความเร็วลง

การทำงานของเบรคนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเบรก โดย Disc brake ต้องการแรงดันไฮดรอลิก ซึ่งปกติแล้วถูกจ่ายโดยปั๊มไฮดรอลิก

Clutch brake นั้นปกติแล้วจะมีสปริงอยู่ ทั้งระบบอัดอากาศหรือระบบไฮดรอลิกจะใช้เพื่อปล่อยเบรก

2.16.2 สมรรถภาพของระบบ Brake

ในการเลือกเบรกเราต้องพิจารณาข้อคำนึง 3 ข้อ ได้แก่

1) แรงบิดสูงสุด: เบรกที่เหมาะสมควรที่จะออกแบบเพื่อให้รับแรงบิดสูงสุดที่เกิดที่โรเตอร์ของกังหันลมได้

2) ระยะเวลาในการทำงาน: เบรกควรจะสามารถทำงานได้ทันทีเมื่อต้องการหยุดกังหันซึ่งโดยทั่วไปแล้วควรทำงานไม่เกิน 5 วินาที

3) การดูดซับพลังงาน: ความสามารถในการดูดซับพลังงานของเบรกต้องคำนึงถึงพลังงานจลน์ที่โรเตอร์ที่ความเร็วสูงสุด รวมถึงพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงการหยุด

2.17 ระบบ Yaw

2.17.1 การทำงานของระบบYaw

กังหันลมแนวอนนทุกแบบต้องมีความสามารถที่จะหันหรือวางแนวไปในทิศทางของลมได้ กังหันลมบางตัวอาจใช้ Active yaw ในการควบคุมกำลัง

2.17.2 ประเภทของระบบYaw

โดยทั่วไปแล้ว Yaw system นั้นมีอยู่ 2 แบบ คือ Active yaw และ Free yaw กังหันลมที่ใช้ Active yaw ปกติแล้วจะเป็นกังหันลมแบบลมบน ซึ่งเป็นการวางมอเตอร์อยู่ในแนวเดียวกับกังหัน กังหันลมที่ใช้ Free yaw โดยปกติแล้วจะเป็นกังหันลมแบบลมล่าง ซึ่งใช้ปลวต์อากาศในการวางแนวกับกังหัน

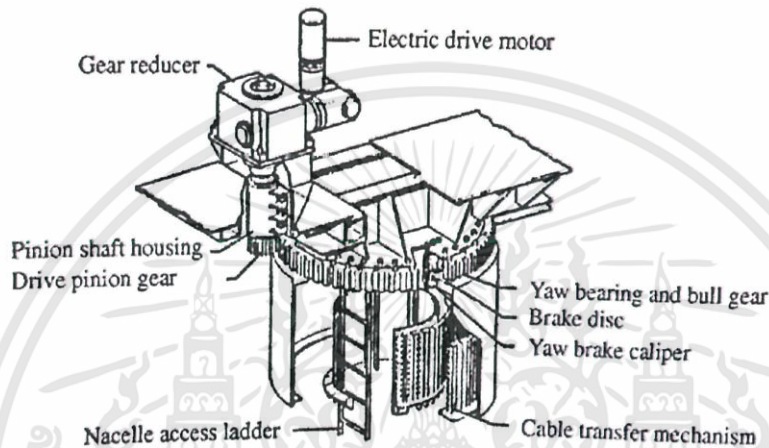
2.17.3 คำอธิบาย

Yaw Drive โดยปกติแล้วประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า, เกียร์ลดความเร็วและเฟือง เนื่องจากความเร็วต้องลดลงเพื่อให้แรงบิดที่พอเพียงจะถูกจ่ายจากมอเตอร์ตัวเล็ก

ปัญหาหลักของระบบ Active Yaw คือ การแตกของตัวไดรฟ์เนื่องมาจากการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของกังหัน ซึ่งเป็นไปได้เพราะการกระตุกอย่างเฉียบพลันระหว่างตัวไดรฟ์กับเกียร์ การเคลื่อนที่นี้ทำให้เกิดการกระชากจากโหลดระหว่างตัวเกียร์ เพื่อที่จะลดการกระชากนี้ เราต้องใช้ yaw break ซึ่งปัจจุบันมีการใช้กันเยอะ โดยตัวเบรกจะทำงานเมื่อใดก็ตามที่กังหันไม่หมุนซึ่งถูกปล่อยก่อนที่ตัวกังหันจะทำงาน โดยรูปแบบทั่วไปจะถูกแสดงในรูปที่ 6.40

การเคลื่อนที่ของ Yaw ในระบบ Active Yaw นั้นควบคุมโดยใช้ความผิดพลาดของ Yaw เป็นค่าที่ใส่เข้าไป โดยจะถูกเฟ้าสั่งเกิดจากค่าเฉลี่ยเส้นทางลมของกังหัน เมื่อค่าผิดพลาด Yaw อยู่นอกขอบเขตที่บางช่วงเวลา ระบบไคโรฟจะทำงานและกังหันจะหันไปทิศทางที่เหมาะสม

กังหันลมระบบ Free Yaw จะง่ายกว่า ซึ่งไม่มีอะไรเลยนอกจาก Yaw Bearing กังหันบางตัวอาจมี Yaw Damper ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อลดอัตรา Yaw เพื่อช่วยในการลดโหลดที่ไม่คงที่



รูปที่ 2.24 รูปแบบทั่วไปของ Yaw Drive ที่มีเบรก [8]

2.18 เครื่องมือวัดความเร็วลม [3]

การวัดความเร็วลมในที่ต่างๆ จะใช้มาตรวัดลม หรือ อะนิโมมิเตอร์ (Anemometer) มี 3 แบบ คือ

- 1) มาตรวัดความเร็วลมแบบหมุน
 - มาตรวัดลมแบบถ้วย (cup anemometer) มีลักษณะเป็นถ้วยกลมครึ่งซีกจำนวน 3-4 ใบ ติดอยู่ที่ปลายก้านซึ่งต่อกับแกนกลาง เมื่อลมพัดจะทำให้ลูกถ้วยหมุนไปรอบๆ แกนกลาง ซึ่งจำนวนรอบที่หมุนจะแสดงความเร็วของลม
 - มาตรวัดลมแบบพรอเพลเลอร์ (Propellor) มีลักษณะคล้ายกังหันลม
 - มาตรวัดลมแบบวินมิลล์ (Windmill)



รูปที่ 2.25 มาตรวัดความเร็วลมแบบหมุน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

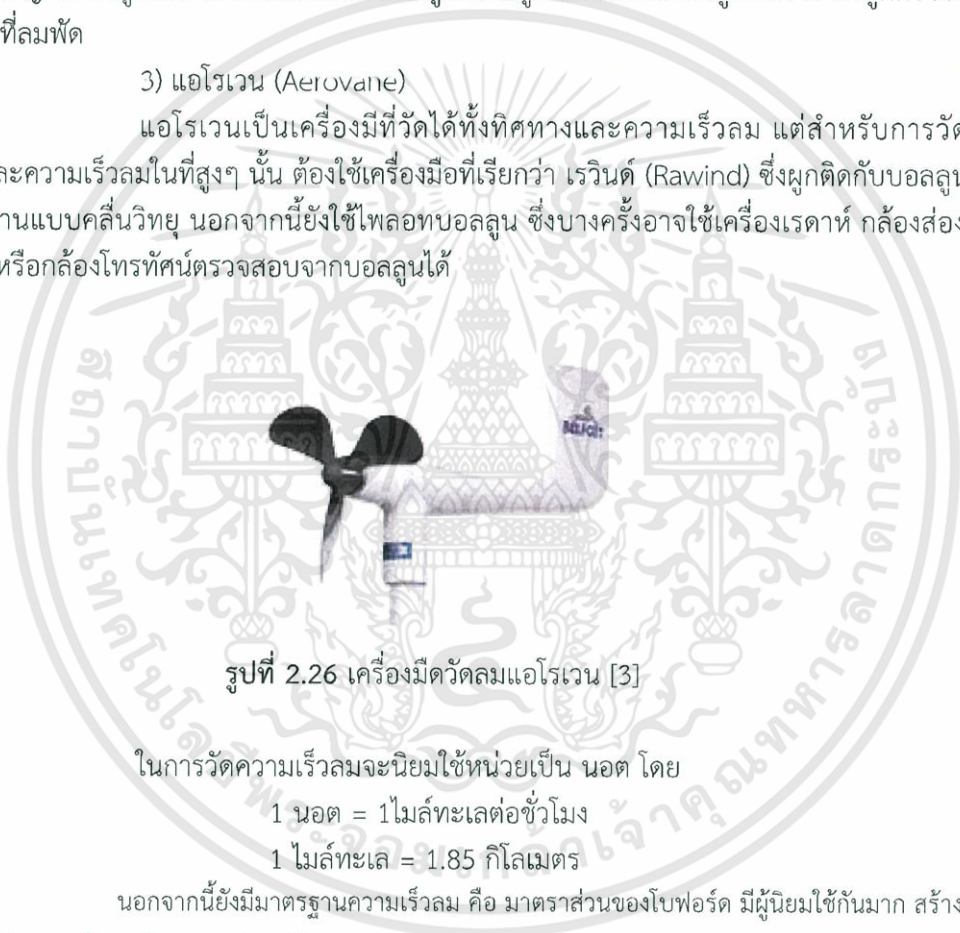
2) มาตรฐานวัดลมแบบหลอดความกดดัน

มาตรฐานวัดลมแบบหลอดความกดดันจะอาศัยแรงของลมพัดเข้าไปในหลอด เพื่อให้แรงของลมกดลงไปบนผิวโลหะที่มีแขนต่อไปยังหน้าปัดที่บอกสเกลความเร็ว การทำงานเหมือนกับแอนนิรอยด์ ซึ่งวัดความดันอากาศ มาตรฐานวัดลมแบบนี้ได้พัฒนาไปจนสามารถบอกความเร็วของลมได้ตลอดเวลา มีกระดาษกราฟเป็นม้วนหมุนได้อย่างช้าๆ ซึ่งขับเคลื่อนด้วยระบบโซลานแบบนาฬิกา จึงเป็นมาตรฐานวัดลมแบบอัตโนมัติ เรียกว่า อะนีโมกราฟ (Anemograph)

ในการวัดความเร็วลมนั้น ต้องทราบความเร็วลมที่พัดด้วย ซึ่งใช้อุปกรณ์ง่ายๆ ในการวัดทิศทางของลม เรียกว่า ศรลม (wind vane) ลักษณะจะเป็นลูกศรที่มีหาง โดยที่หางนั้นจะเป็นแผ่นใหญ่กว่าหัวลูกศรมาก เมื่อมีลมพัดมาทางลูกศรจะถูกผลักแรงกว่าหัวลูกศรมาก หัวลูกศรจึงจะไปในทางที่ลมพัด

3) แอร์เวน (Aerovane)

แอร์เวนเป็นเครื่องมือที่วัดได้ทั้งทิศทางและความเร็วลม แต่สำหรับการวัดทิศทางและความเร็วลมในที่สูงๆ นั้น ต้องใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เรวินด์ (Rawind) ซึ่งผูกติดกับบอลลูน โดยรายงานแบบคลื่นวิทยุ นอกจากนี้ยังใช้เพลอสบอลลูน ซึ่งบางครั้งอาจใช้เครื่องเรดาห์ กล้องส่องทางไกล หรือกล้องโทรทรรศน์ตรวจสอบจากบอลลูนได้



รูปที่ 2.26 เครื่องวัดลมแอร์เวน [3]

ในการวัดความเร็วลมจะนิยมใช้หน่วยเป็น นอต โดย

1 นอต = 1 ไมล์ทะเลต่อชั่วโมง

1 ไมล์ทะเล = 1.85 กิโลเมตร

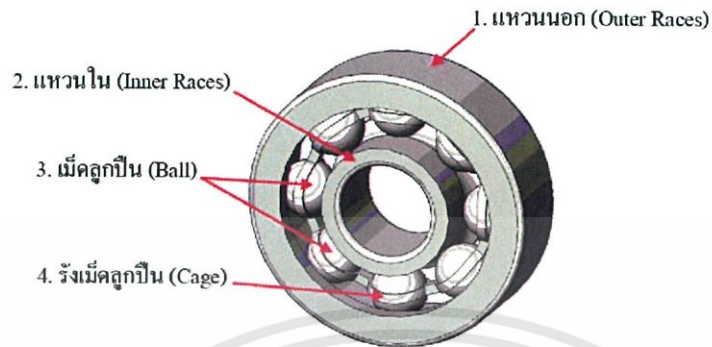
นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานความเร็วลม คือ มาตรฐานของโบฟอร์ด มีผู้นิยมใช้กันมาก สร้างโดย เซอร์ ฟรานซิส โบฟอร์ด ราชนาวีชาวอังกฤษ

2.19 ตลับลูกปืน (Bearing) [15]

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับการหมุนของเพลลา โดยตลับลูกปืนมีหน้าที่ถ่ายทอดแรงที่เกิดขึ้นจากเพลลาลงไปสู่ฐานเครื่องยนต์ และลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทำให้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องจักรกลต่างๆ ลดปริมาณพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักร และลดการสึกหรอ แต่ตลับลูกปืนมักจะเสื่อมสภาพเร็วเนื่องจากตลับลูกปืนถือว่าเป็นจุดวิกฤตของเครื่องมือกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.19.1 ส่วนประกอบของตลับลูกปืน



รูปที่ 2.27 ลักษณะและส่วนประกอบต่างๆของตลับลูกปืน [15]

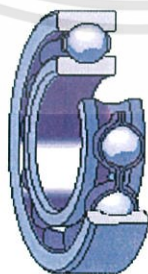
ในโครงสร้างของตลับลูกปืนดังรูปสามารถจำแนกหน้าที่ของส่วนประกอบบางประเภทได้ดังนี้

- แหวนนอก (Outer Races) ซึ่งมีหน้าที่สวมเข้ากับตัวเรือน (Housing) ของตลับลูกปืนและเป็นรางวิ่งให้กับเม็ดลูกปืนที่ผิวด้านนอกด้วย
- แหวนใน (Inner Races) ซึ่งมีหน้าที่สวมเข้ากับเพลาและเป็นรางวิ่งด้านในของเม็ดลูกปืน
- เม็ดลูกปืน (Ball) มีหน้าที่ลดความเสียดทานเพื่อให้ความฝืดน้อยที่สุดหรือเรียกว่าเป็นชิ้นส่วนรองรับที่ไม่มีคามฝืด (Antifriction) โดยมีรูปแบบต่างๆดังจะกล่าวต่อไป
- ตัวประกอบหรือรังเม็ดลูกปืน (Cage) เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างเม็ดลูกปืนให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องหรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากรอบขังระยะ

2.19.2 คุณสมบัติและการใช้งานของตลับลูกปืน

1) ตลับลูกปืนแฉกเดี่ยวร่องลึก (Deep Groove Ball Bearing)

ตลับลูกปืนชนิดนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางกรอบของลูกปืนเป็นร่องลึกจะทำให้ลูกปืนลึกลงได้สะดวกและมีความเที่ยงตรงสูง สามารถรับแรงในแนวรัศมีได้มากและรับแรงในแนวแกนได้พอสมควรเหมาะสำหรับงานที่มีความเร็วสูง



รูปที่ 2.28 Deep Groove Ball [15]

2) ตลับลูกปืนสองแถวร่องลึก (Deep Groove Ball Bearing Double Row)
 ตลับลูกปืนมีลักษณะเหมือนกับตลับลูกปืนแถวเดี่ยวร่องลึกแต่จะเพิ่มจำนวนลูกปืน
 จะเป็นสองแถวจึงสามารถรับ Load ได้มากกว่าแบบแถวเดี่ยวร่องลึก



รูปที่ 2.29 Deep Groove Ball Bearing Double Row [15]

3) ตลับลูกปืนแถวเดี่ยวรับแรงแนวเอียง (Angular Contact Ball Bearing)
 ลักษณะของตลับลูกปืนคล้ายกับตลับลูกปืนแถวเดี่ยวร่องลึกจะแตกต่างกันที่แหวน
 นอกและแหวนในซึ่งจะมีเพียงบ่าเดียวโดยจะทำให้แหวนในและแหวนนอกแยกออกจากกันเหมาะกับ
 ส่วนที่เข้า-ออกอยู่เสมอๆ สามารถใช้รับแรงได้ทั้งแรงในแนวรัศมีและแรงในแนวแกนทิศทางเดียว

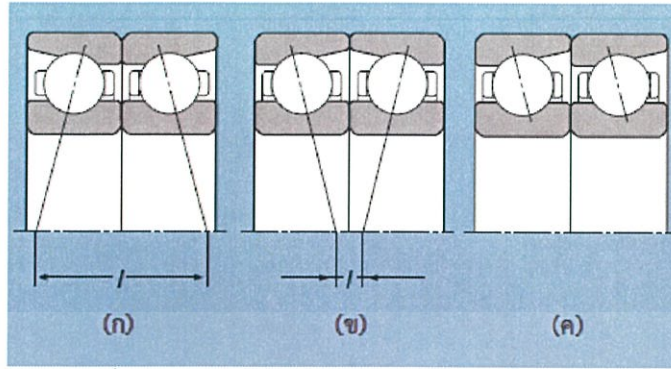


รูปที่ 2.30 Angular Contact Ball Bearing [15]

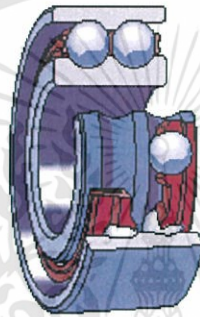
4) ตลับลูกปืนสองแถวรับแรงแนวเอียง (Angular Contact Bearing Double Row)

ตลับลูกปืนชนิดนี้สามารถรับแรงในแนวแกน 2 ทิศทาง เป็นการนำเอาตลับลูกปืน
 แบบเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุม 2 อันมาชนกัน ซึ่งทำได้ 3 ลักษณะ

- 1) แบบให้หลังชนกัน (Back to Back) ใช้สัญลักษณ์ DB (รูปที่ 2.31ก)
- 2) แบบให้หน้าชนกัน (Face to Face) ใช้สัญลักษณ์ DF (รูปที่ 2.31ข)
- 3) แบบให้หน้าชนหลัง (Tandem) ใช้สัญลักษณ์ DT (รูปที่ 2.31ค)



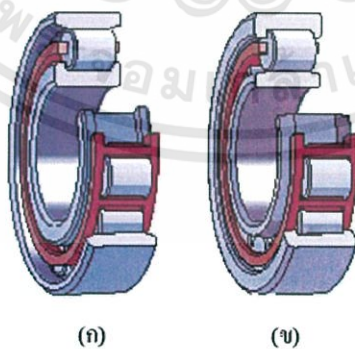
รูปที่ 2.31 ตลับลูกปืนสองแถวรับแรงแนวเอียง [15]



รูปที่ 2.32 Angular Contact Ball Bearing Double Row [15]

5) ตลับลูกปืนลูกกลิ้งทรงกระบอก (Cylindrical Roller Bearing)

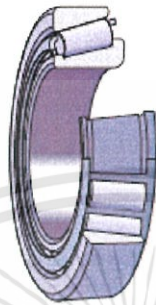
ตลับลูกปืนชนิดนี้สามารถที่จะรับแรงในแนวรัศมีมากใช้ได้กับความเร็วสูงจะสามารถรับแรงแนวแกนได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งตลับลูกปืนชนิดนี้มีด้วยกันหลายแบบเช่นชนิดที่มีร่องทางเดินของลูกกลิ้งทรงกระบอกที่แหวนวงใน (รูปที่ 2.33ก) หรือแบบที่มีร่องที่แหวนวงนอก (รูปที่ 2.33ข)



รูปที่ 2.33 Cylindrical Roller Bearing [15]

6) ตลับลูกปืนลูกกลิ้งเรียว (Tapered Roller Bearing)

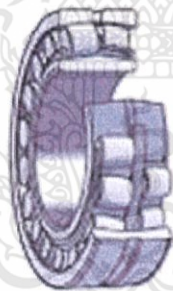
จะมีร่องทางเดินของลูกกลิ้งเอียงเป็นเรียวอยู่ในวงแหวนมีพื้นที่สัมผัสมากจึงสามารถรับแรงในแนวรัศมีได้มากตลับลูกปืนชนิดนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางเช่นโรงงานย่อยหินในรถยนต์ในเครื่องจักรการก่อสร้าง เป็นต้น



รูปที่ 2.34 Tapered Roller Bearing [15]

7) ตลับลูกปืนลูกกลิ้งผิวโค้งทรงกระบอก (Spherical Roller Bearing)

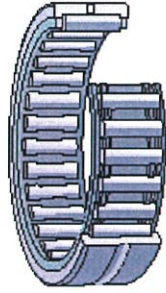
ตลับลูกปืนชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับตลับลูกปืนสองแถวที่สามารถเบี่ยงแกนได้ (Self-Aligning Ball Bearing) จะแตกต่างกันตรงลูกกลิ้งโดยจะใช้ลูกกลิ้งลักษณะผิวโค้งทรงกระบอกกลมแทนส่วนลักษณะการใช้งานจะเหมือนกันโดยสามารถรับแรงในแนวแกนได้มากกว่าเพราะมีพื้นที่สัมผัสมาก เหมาะสำหรับใช้รับแรงกระแทก (Shock Load)



รูปที่ 2.35 Spherical Roller Bearing [15]

8) ตลับลูกปืนลูกกลิ้งเข็ม (Needle Roller Bearing)

ตลับลูกปืนชนิดนี้สามารถที่จะรับแรงในแนวรัศมีได้มากและลักษณะลูกกลิ้งของตลับลูกปืนชนิดนี้คล้ายกับตลับลูกปืนลูกกลิ้งทรงกระบอกโดยการที่จะเรียกตลับลูกปืนชนิดนี้ว่าตลับลูกปืนลูกกลิ้งเข็มได้นั้นก็ต่อเมื่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 5 มิลลิเมตรลักษณะการใช้งานจะใช้คล้ายกับตลับลูกปืนลูกกลิ้งทรงกระบอกแบบที่ไม่มีวงแหวนในโดยลูกกลิ้งแบบเข็มจะกลิ้งอยู่บนเพลลาโดยตรงทั้งนี้จะใช้เมื่อกรณีที่มีพื้นที่จำกัดและ Load สูงๆ



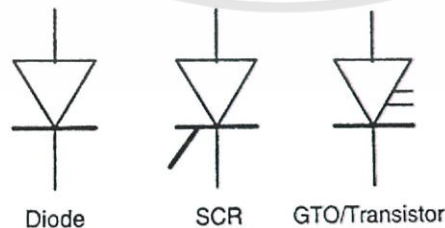
รูปที่ 2.36 Needle Roller Bearing [15]

2.20 Power Converter [6]

2.20.1 พื้นฐานของ Power Converter

Power Converter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากรูปแบบหนึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง เช่น จาก AC เป็น DC, DC เป็น AC, จากระดับแรงดันหนึ่งเป็นอีกระดับแรงดันหนึ่งหรือจากความถี่หนึ่งเป็นอีกความถี่หนึ่ง เทคโนโลยี Power Converter ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากมายในระบบพลังงานลมและถูกใช้มากขึ้นเมื่อเทคโนโลยีได้พัฒนาไปเรื่อยๆ ทำให้ราคาลดลง ยกตัวอย่างเช่น Power Converter ถูกใช้ในการสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, กังหันลมแบบความเร็วเปลี่ยน, และในเครือข่ายแยก

คอนเวอร์เตอร์สมัยใหม่นั้นเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งประกอบด้วยระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เปิด-ปิดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปแล้วเรียกว่า “valves” ชิ้นส่วนสำคัญบางชิ้นที่ใช้ในวงจร Inverter คือ Diodes, Silicon-controlled rectifiers (SCRs หรือที่เรียกว่า Thyristor), Gate turn off thyristor (GTOs), และ Power transistors โดยไดโอดทำงานเป็น valve ทิศทางเดียว SCRs เป็นไดโอดที่สามารถทำงานได้โดยมีพัลส์ภายนอกเข้ามาที่ Gate แต่จะหยุดทำงานเมื่อแรงดันกลับทิศทาง GTOs คือ SCRs ที่เปิดและปิดได้เลย Transistor จำเป็นต้องมีสัญญาณ Gate เข้ามาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ทำงาน ส่วน Power transistors นั้นคล้าย GTOs แต่วงจรจุดฉนวนมีความง่ายกว่า ซึ่ง Power transistors คือ Darlington, power MOSFETS และ Insulated gate bipolar transistors (IGBTs) ในปัจจุบันจะนิยมใช้ IGBT มากขึ้นดังรูปที่ 2.37 แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอุปกรณ์ต่างๆ ที่สำคัญในวงจร Converter ซึ่งได้แก่ SCR (Silicon-controlled rectifier), GTO (Gate turn off thyristor)

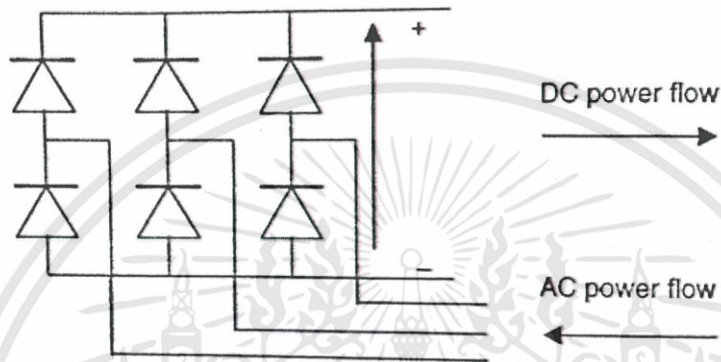


รูปที่ 2.37 ส่วนประกอบของวงจร Converter [6]

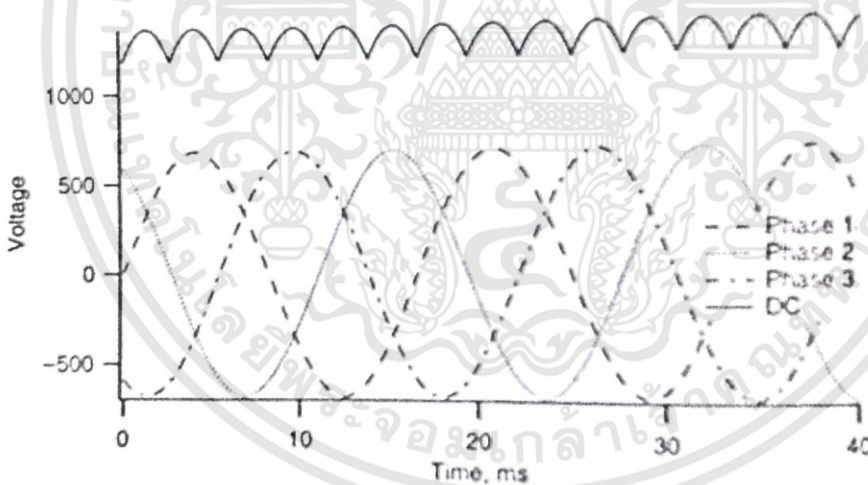
2.20.2 Rectifier

Rectifier คือ อุปกรณ์ที่แปลง AC เป็น DC ซึ่งอาจถูกใช้งานใน Battery-charging wind systems หรือเป็นส่วนหนึ่งของ Variable-speed wind power system

รูปแบบที่ง่ายที่สุดของ Rectifier คือ Diode rectifier ที่ใช้แปลง AC ไปเป็น DC ที่ผันผวน ยกตัวอย่างเช่น Rectifier ที่แสดงในรูปที่ 2.38 ใน Rectifier นี้ขาเข้าเป็นไฟสามเฟสและขาออกเป็น DC



รูปที่ 2.38 Diode bridge rectifier ที่ใช้ในแหล่งจ่ายสามเฟส [6]



รูปที่ 2.39 แรงดัน DC จาก Rectifier สามเฟส [6]

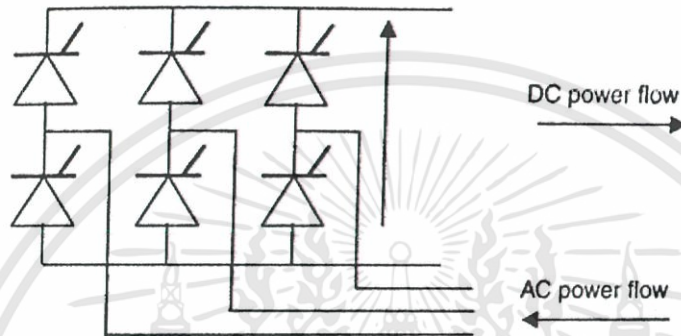
จากรูปที่ 2.39 แสดงแรงดัน DC ที่ถูกสร้างจากไฟสามเฟสแหล่งจ่าย 480 V ที่ใช้ Diode bridge rectifier อาจมีการใช้ตัวกรองเพื่อลดความผันผวนของแรงดัน ค่าเฉลี่ยแรงดัน DC (V_{DC}) ผลจากการแปลงแรงดันสามเฟส RMS (V_{rms}) คือ

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \quad (20)$$

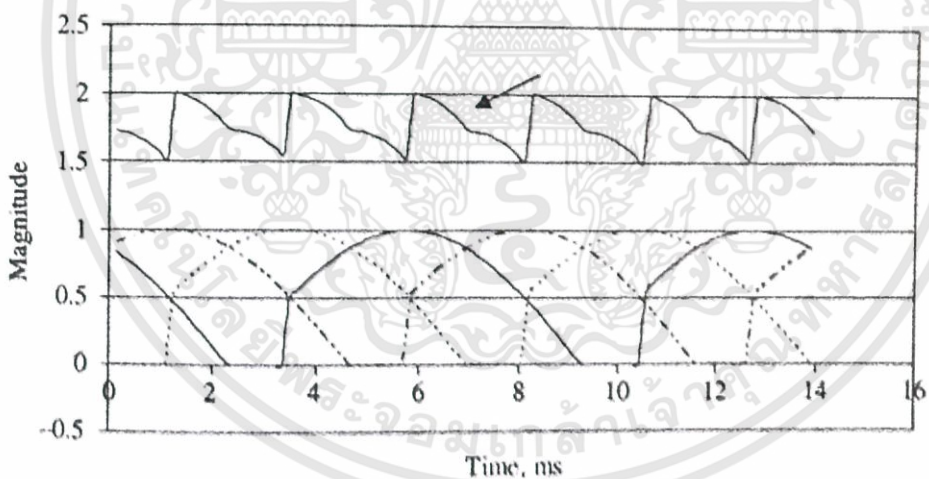
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20.3 Controlled Rectifier

ในบางกรณีก่อนข้างจะมีประโยชน์ที่จะสามารถปรับเปลี่ยนแรงดันขาออกของ Rectifier โดยเราสามารถทำได้โดยใช้ Controlled Rectifier โดยทั่วไปแล้วจะเป็นการใช้ SCR แทน Diode ใน วงจร bridge อย่างที่แสดงในรูปที่ 2.40 SCR จะถูกปิดไว้จนกว่าจะมีการสั่งให้ทำงานซึ่งเกี่ยวข้องกับมุมจุดชนวน α แรงดันเฉลี่ยออกจาก SCR นั้นจะลดลงจากค่า cosine ของมุมจุดชนวน โดยรูปคลื่นทั่วไป (ที่มุมจุดชนวน 60°) ถูกแสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.40 Controlled bridge rectifier ที่ใช้แหล่งจ่ายสามเฟส [6]



รูปที่ 2.41 แรงดัน DC จาก phase-controlled rectifier [6]

2.20.4 พื้นฐานของ Inverter

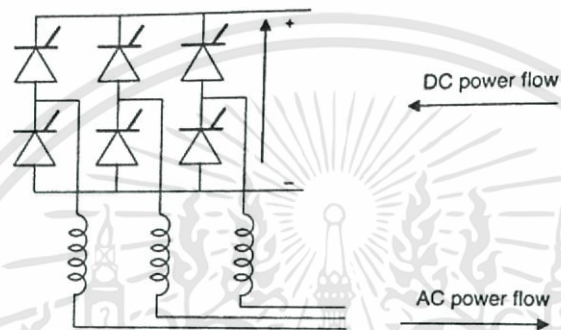
เพื่อที่จะแปลง DC ไปเป็น AC เช่น จาก battery หรือจาก AC ที่แปลงแล้วใน variable-speed wind turbine, inverter ในอดีต MG Set ถูกใช้ในการแปลง DC เป็น AC เครื่องกำเนิดไฟฟ้า AC เหล่านี้ถูกขับโดยมอเตอร์ DC วิธีนี้ค่อนข้างน่าเชื่อถือแต่ราคาแพงและประสิทธิภาพต่ำ แต่เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือของ MG Set จึงทำให้ยังถูกใช้งานในบางส่วน

ปัจจุบัน Inverter ส่วนใหญ่จะเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยปกติแล้ว Electronic Inverter ประกอบด้วยวงจรที่มีสวิตช์กระแสสูงและวงจรควบคุมที่ทำงานร่วมกัน วงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดการตั้งค่ามากมายที่ทำให้ Inverter ทำงานได้สำเร็จ โดยมีรูปแบบพื้นฐานสองอย่างของ Electronic Inverter คือ Line-commutated Inverter และ Self-commutated Inverter ซึ่งการ commutation หมายถึง การสวิตซ์การไหลของกระแสจากส่วนหนึ่งของวงจรไปอีกส่วนหนึ่ง

Inverter ถูกต่อกับ AC grid ที่รับสัญญาณสวิตซ์ซึ่งจากกริดนั้นก็คือ Line-commutated inverter ดังรูปที่ 2.42 ซึ่งแสดงวงจร SCR bridge ที่ถูกใช้ใน three-phase line-commutated inverter วงจรนี้จะคล้ายกับ three-phase bridge rectifier แต่ในกรณีนี้เวลาของการสวิตซ์ของวงจรจะถูกควบคุมจากภายนอกและกระแสไหลจากแหล่งจ่าย DC ไปยังสามเฟส AC



รูปที่ 2.42 Line-commutated silicon-controlled rectifier [6]

Self-commutated inverter ไม่จำเป็นต้องต่อกับ AC grid ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ได้อย่างอิสระซึ่งมีแนวโน้มว่าจะแพงกว่า line-commutated inverter

ที่จริงแล้ววงจร Inverter อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามการออกแบบ แต่โดยหลักแล้วจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

- 1) Voltage source inverter
- 2) Current source inverter

โดยใน current source inverter กระแสจากแหล่งจ่าย DC จะถูกทำให้คงที่โดยค่านึงจากโหลด โดยปกติแล้วจะใช้จ่ายโหลดที่มีตัวประกอบกำลังสูงที่อิมพีแดนซ์คงที่หรือลดลงที่ความถี่ฮาร์โมนิก ประสิทธิภาพโดยรวมนั้นดี (ประมาณ 96%) แต่วงจรควบคุมนั้นค่อนข้างซับซ้อน Voltage source inverter ทำงานจากแหล่งจ่ายแรงดัน DC ที่คงที่ ซึ่งใช้กันแพร่หลายในการใช้งานพลังงานลม

2.20.5 Voltage Source Inverter

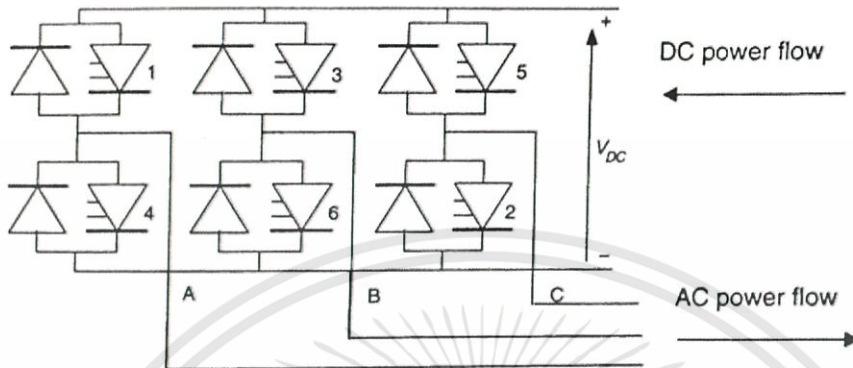
โดยปกติแล้วจะมี 2 แบบที่นิยมใช้คือ

- 1) Six-pulse inverter
- 2) Pulse width modulation (PWM) inverter

Self-commutated voltage source inverter ที่ง่ายที่สุด คือ six-pulse inverter ทำงานโดยสวิตซ์ซึ่งเปิด-ปิดแหล่งจ่าย DC ผ่านช่วงเวลาต่างๆ อุปกรณ์สวิตซ์นั้นจะเป็น GTOs หรือ power transistor แต่ SCRs ก็อาจนำมาใช้ได้ วงจรจะทำการผสมผสานพัลส์ให้เป็นสัญญาณ stair-case ซึ่งประมาณแล้วใกล้เคียง sinusoid ดังรูปที่ 2.43 แสดงองค์ประกอบหลักของ inverter

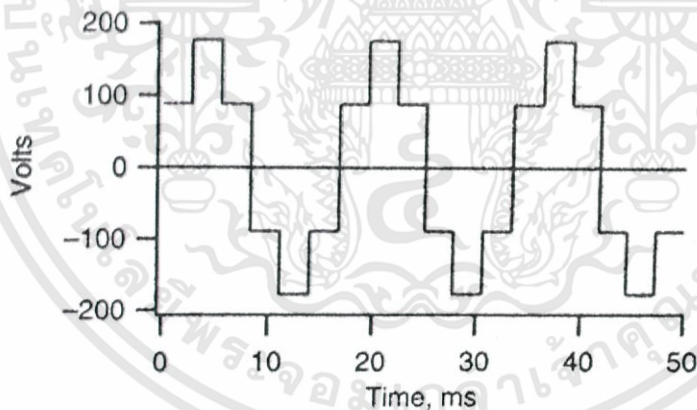
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวงจรมอดูล์ประกอบการสวิตซ์ซึ่ง 6 ชุด ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของ three-phase inverter และ วงจร rectifier แต่ในกรณีนี้การสวิตซ์เปิด-ปิดสามารถควบคุมภายนอกได้



รูปที่ 2.43 วงจร Voltage source inverter [6]

ถ้า valve ทำงานบน 1 ใน 6 ของไซเคิลเป็นลำดับตามรูปและคงอยู่จนเป็น 1 ใน 3 ของไซเคิล แรงดันขาออกจะออกมาเป็นสามเฟส A B C โดยมีตัวอย่างรูปคลื่น 60 Hz แสดงอยู่ในรูปที่ 2.44

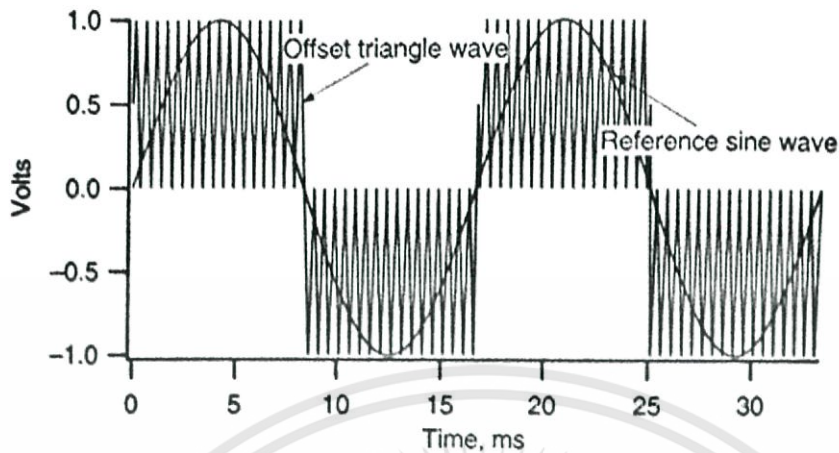


รูปที่ 2.44 รูปคลื่นแรงดัน Self-commutated inverter [6]

ชัดเจนว่าแรงดันนั้นมีความแคบแต่ยังคงค่อนข้างแตกต่างจากกราฟไซน์บริสุทธิ์ ความแตกต่างนั้นเกิดมาจากฮาร์มอนิกที่เป็นผลมาจากการสวิตซ์ ซึ่งเป็นธรรมชาติของการสวิตซ์อยู่แล้วที่จะกำเนิดฮาร์มอนิก ตัวกรองบางแบบนั้นจำเป็นเพื่อที่จะใช้มาลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

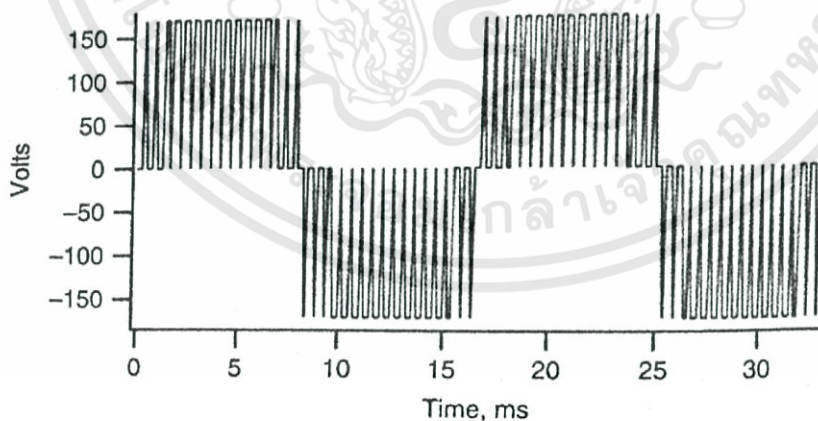
ใน Pulse width modulation (PWM) สัญญาณ AC จะสังเคราะห์มาจากการสวิตซ์เปิด-ปิดความถี่สูง ของแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อที่จะให้เกิดพัลส์ที่มีความสูงคงที่ ระยะห่างของพัลส์นั้นอาจแปรเปลี่ยนได้ ความถี่การสวิตซ์ที่ใช้ทั่วไปคือ 8-20 kHz อัตราการสวิตซ์นั้นจำกัดโดยการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสวิตซ์ แต่ประสิทธิภาพของ Inverter ยังอยู่ที่ประมาณ 94% โดย PWM inverter โดยทั่วไปแล้วจะใช้ IGBTs หรือ GTOs เป็นองค์ประกอบการสวิตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.45 คลื่นควบคุม Pulse width modulation (PWM) [6]

ในรูปที่ 2.45 แสดงหลักการเบื้องต้นของ PWM โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นไซน์อ้างอิงที่มีความถี่ที่ต้องการกับคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง เมื่อไรก็ตามที่คลื่นสามเหลี่ยมมีขนาดน้อยกว่าคลื่นไซน์ ทราานซิสเตอร์จะทำงาน และเมื่อไหร่ก็ตามที่คลื่นสามเหลี่ยมมีขนาดน้อยกว่าคลื่นไซน์ ทราานซิสเตอร์จะหยุดทำงาน โดยทำซ้ำไปเรื่อยๆ ซึ่งรูปที่ 2.45 แสดงรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ แต่ความถี่ของคลื่นสามเหลี่ยมนั้นน้อยกว่าที่ใช้งานจริงมาก Pulse train ที่ใช้ในรูปที่ 2.45 จะถูกแสดงในรูปที่ 2.46 จะเห็นได้ค่อนข้างชัดเจนว่าพัลส์จะกว้างที่สุดเมื่ออยู่จุดสูงสุด ทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันสูงสุด เพียงแต่ว่ารูปคลื่นแรงดันยังไม่เป็นไซน์บริสุทธิ์เนื่องจากยังมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกความถี่ต่ำอยู่ ดังนั้นจึงใช้วงจรกรองที่ไม่ซับซ้อน



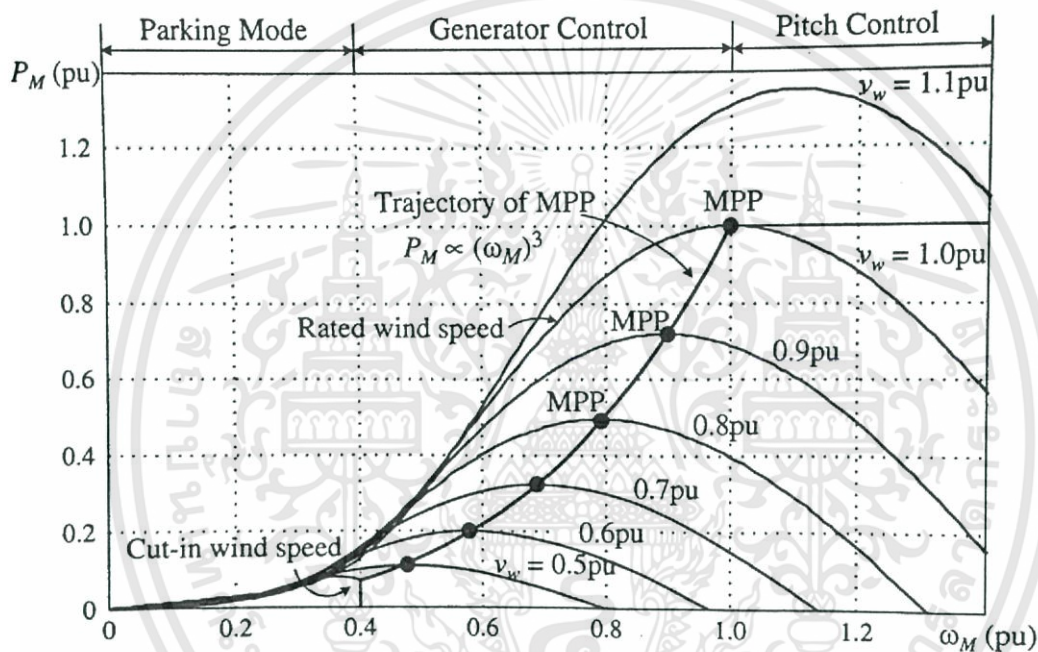
รูปที่ 2.46 Pulse width modulation (PWM) voltage pulse train [6]

2.21 Maximum Power Point Tracking (MPPT) [8]

2.21.1 Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control

การควบคุมกังหันลมความเร็วแปรเปลี่ยนที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดสามารถควบคุมได้โดยการจัดการกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเป้าหมายหลัก คือ เพิ่มอัตราการจับพลังงานของกังหันลมที่ความเร็วต่างๆ ให้มากที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับความเร็วกังหันให้อยู่ในทางที่ค่า tip speed ratio ดีที่สุด

จากรูปที่ 2.47 จะเป็นกราฟลักษณะการทำงานของกังหันที่ความเร็วลมต่าง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกลและความเร็วทางกล



รูปที่ 2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความเร็ว รวมถึงจุดการทำงานที่กำลังสูงสุด [8]

โดยจากรูปที่ 2.47 การทำงานที่โหมด MPPT สามารถแบ่งได้เป็น 3 โหมด คือ

1) Parking Mode: เมื่อความเร็วลมต่ำกว่า cut-in speed ระบบกังหันลมจะสร้างพลังงานได้น้อยกว่าที่ใช้งาน กังหันจึงหยุดทำงานโดยหันมุมใบพัดออกจากแนวลมและเบรกทำงาน

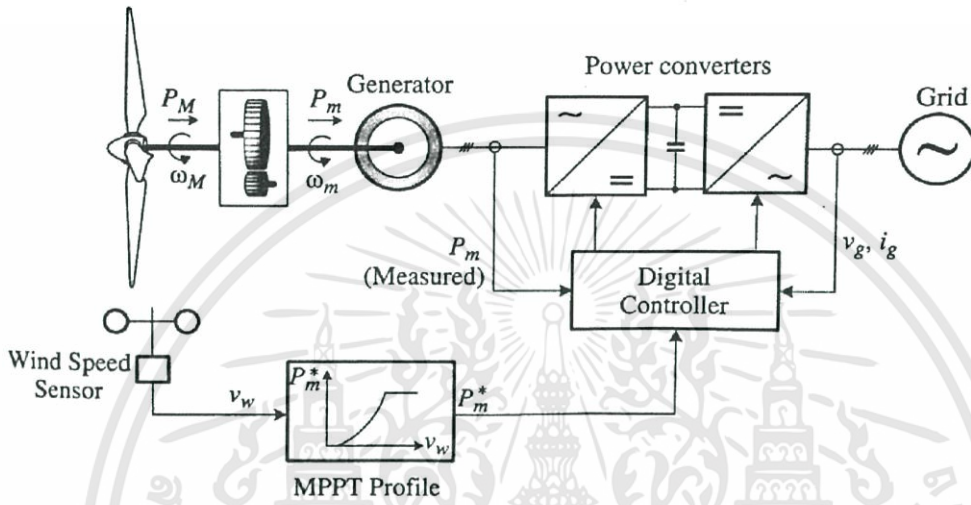
2) Generator-control mode: เมื่อความเร็วลมอยู่ระหว่าง cut-in และ rated speed ใบพัดจะปรับมุมให้ได้มุมปะทะที่ดีที่สุด เพื่อให้สามารถจับพลังงานมาได้มากที่สุดที่ความเร็วต่างๆ

3) Pitch-control mode: เมื่อความเร็วลมสูงกว่าความเร็วลมที่พิกัด แต่ต่ำกว่า cut-out speed การจับพลังงานจะคงที่ที่พิกัดเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเมื่อได้พลังงานมากเกินไป

ซึ่งวิธีการ MPPT แบ่งออกได้เป็น 3 วิธีย่อย คือ

1) MPPT with Turbine Power Profile

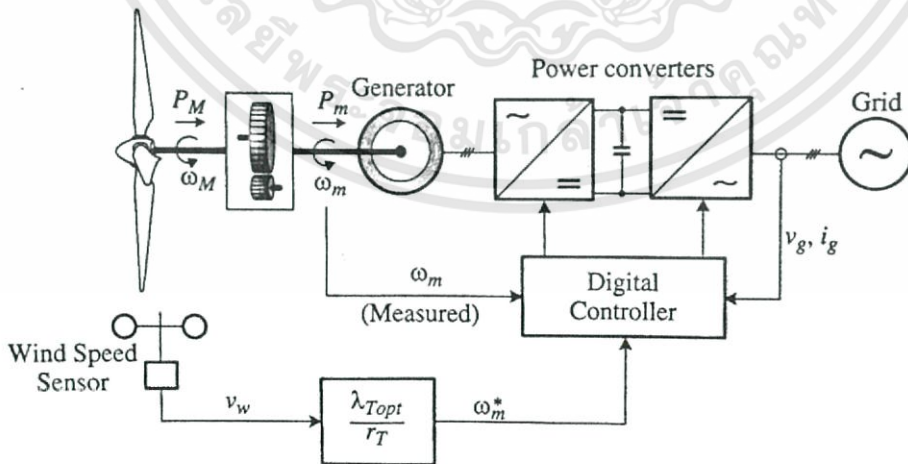
วิธีนี้จะใช้ข้อมูลจาก Power curve ที่ผู้ผลิตให้มาใช้ในการตั้งค่าวงจรถควบคุม โดยใช้ตัววัดลมเป็นวิธีในการวัดลม ณ เวลานั้นซึ่ง block diagram ของวิธีนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 Maximum power control with wind turbine power profile [8]

2) MPPT with Optimal Tip Speed Ratio

วิธีการนี้จะเป็นการควบคุมค่า tip speed ratio ให้อยู่ที่ค่าที่ดีที่สุด $\lambda_{T,opt}$ โดยหลักการการทำงานจะแสดงในรูปที่ 2.49

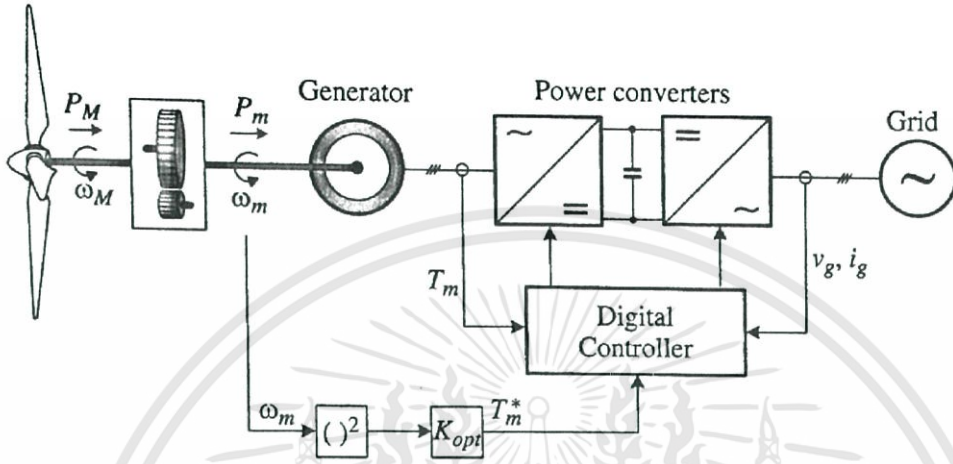


รูปที่ 2.49 Optimal TSR control of wind turbine [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) MPPT with Optimal Torque Control

วิธีนี้จะเป็นการควบคุมแรงบิดให้ได้แรงบิดตามต้องการ ซึ่งจะดึงกำลังงานมาได้มากที่สุด ซึ่งวิธีการควบคุมได้แสดงในรูปที่ 2.50



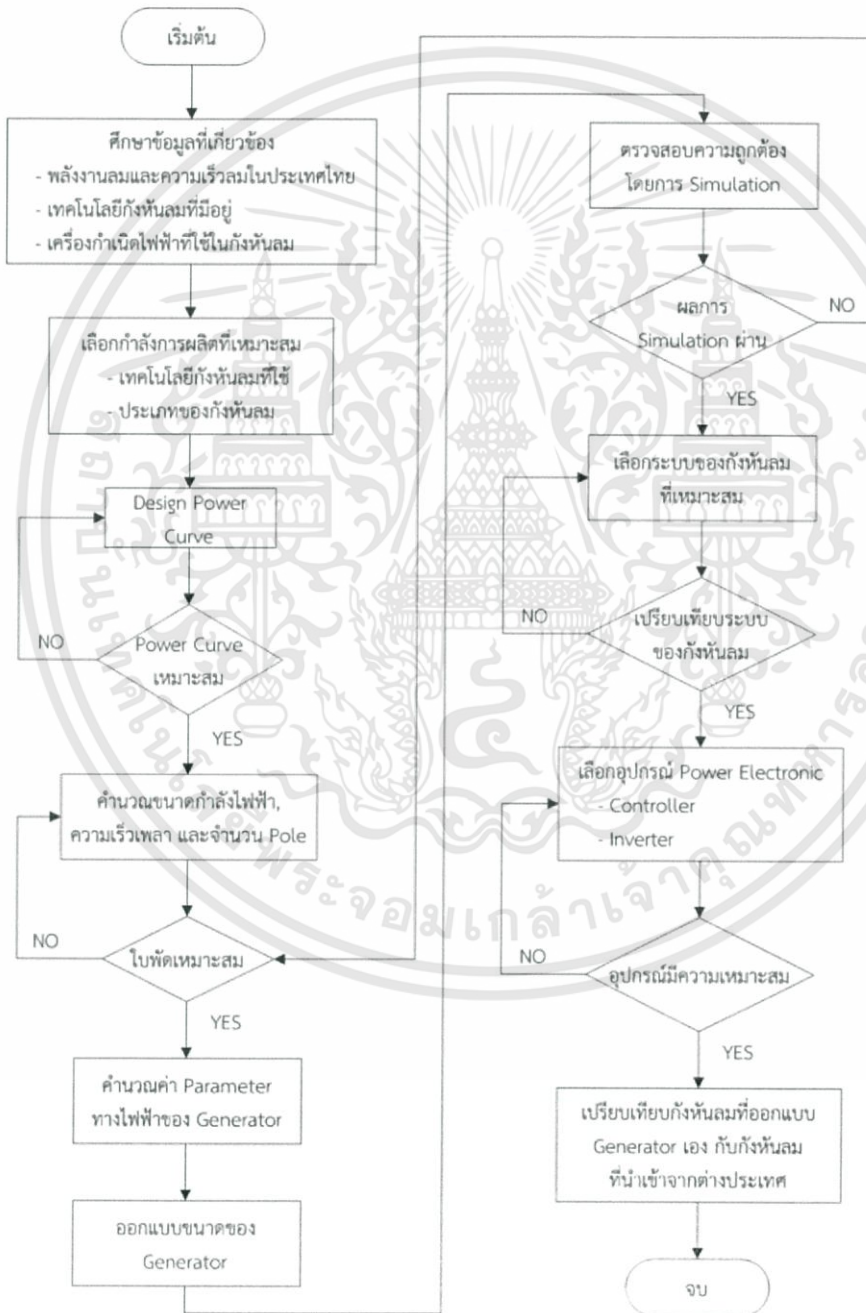
รูปที่ 2.50 MPPT with optimal torque control of wind turbine

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 Flow Chart การทำงาน

ขั้นตอนการออกแบบและสร้าง Generator สำหรับใช้กับกังหันลม เพื่อติดตั้งในโครงการ Future Center เป็นไปตาม Flow Chart ดังนี้



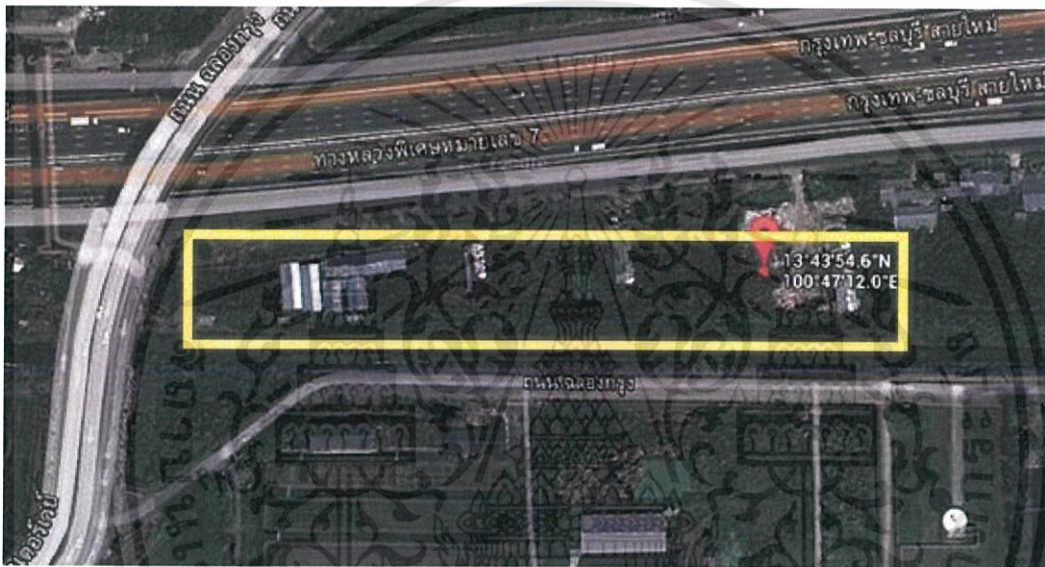
รูปที่ 3.1 Flow Chart การทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบติดตั้งกังหันลมในพื้นที่โครงการ Future Center ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเขตลาดกระบังกรุงเทพมหานคร

3.2.1 พื้นที่ติดตั้งกังหันลม

พื้นที่ของโครงการ Future Center อยู่ในเขตของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พบว่าในบริเวณโครงการไม่มีอาคารสูงหรือต้นไม้ใหญ่ที่ขวางทิศทางลมสู่กังหันลม พื้นที่นี้เป็นพื้นที่โล่งด้านหน้าติดกับถนนมอเตอร์เวย์และด้านหลังติดกับศูนย์ปฏิบัติการดาวเทียมภาคพื้น โดยพื้นที่นี้อยู่ใกล้กับสนามบินสุวรรณภูมิแต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อกังหันลมเพราะว่าไม่ได้อยู่ในแนวที่เครื่องบินบินผ่าน



รูปที่ 3.2 พิกัดพื้นที่ที่ติดตั้งกังหันลมจากโปรแกรม Google map



รูปที่ 3.3 พื้นที่ติดตั้งกังหันลมภายในโครงการ Future Center

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การติดตั้งกังหันลม

การติดตั้งกังหันลมจะถูกนำไปติดตั้งร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อจ่ายโหลดให้กับโครงการ Future Center โดยจะทำการติดตั้งกังหันลมทั้งหมด 3 ตัว ประกอบด้วยกังหันลม PMSG ขนาด 10 kW ที่ทำการออกแบบขึ้นมา 1 ตัว และกังหันลม PMSG ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศขนาด 10 kW อีกจำนวน 2 ตัว ซึ่งจะวางตัวเป็นแนวยาวห่างกันประมาณ 120 เมตร ตามทางยาวของโครงการ Future Center เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนของลมที่ผ่านกังหันลมตัวอื่น

3.2.3 ความเร็วลมเฉลี่ยในโครงการ Future center

จากปฏิญานพันธ์เรื่องการออกแบบและการบริหารจัดการระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมของนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2555 ซึ่งมีการวัดความเร็วลมเฉลี่ย ณ จุดติดตั้งกังหันลมในแต่ละเดือน และคำนวณหาค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง 20 เมตร ด้วยโปรแกรม Windmap แสดงเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือนตลอด 1 ปี [12]

เดือน	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)
มกราคม	3.9
กุมภาพันธ์	4.3
มีนาคม	4.6
เมษายน	4.6
พฤษภาคม	4.4
มิถุนายน	4.5
กรกฎาคม	4.5
สิงหาคม	4.2
กันยายน	4.3
ตุลาคม	3.7
พฤศจิกายน	3.7
ธันวาคม	3.6

เมื่อนำค่าในตารางมาทำการคำนวณพบว่า ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูง 20 เมตรเฉลี่ยอยู่ที่ 4.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งถือว่าเป็นความเร็วลมที่อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำ

3.3 การพิจารณาเลือกกังหันลมสำหรับโครงการ Future center

3.3.1 การเลือกชนิดกังหันลม

การออกแบบติดตั้งใช้งานกังหันลมในโครงการ Future Center เราจะพิจารณาเลือกใช้กังหันลมชนิดที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวแกนนอน เนื่องจากกังหันลมแนวนอนมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง ทำให้เราสามารถที่จะออกแบบใบพัดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ติดตั้งได้ง่าย ยิ่งไปกว่านั้นกังหันลมแนวนอนจะมีประสิทธิภาพที่สูง Cut-in Speed ที่ต่ำ ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดเริ่มหมุนที่สูงอีกด้วย และในการติดตั้งใช้งานเราติดตั้งที่เสาสูง 18 เมตร จึงเหมาะกับกังหันลม
 แนวนอนมากกว่าโดยจะส่งผลให้ได้รอบจัดและความเร็วคงที่กว่ากังหันลมแนวแกนตั้ง นอกจากนี้
 กังหันลมแนวนอนนั้นมีลักษณะที่สวยงาม เด่น ซึ่งจะเป็นที่สนใจแก่ผู้คนที่ผ่านไปมา

3.3.2 การพิจารณาเลือกประเภทของกังหันลมแนวนอน

กังหันลมชนิดที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวแกนแนวนอนนั้นมีรายละเอียดของรูปแบบ
 องค์ประกอบและลักษณะการทำงานที่นิยมนำมาใช้งานแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- Fixed speed with directly grid-couple (asynchronous) squirrel
 cage induction generator

- Variable speed based on a direct drive synchronous generator

- Variable speed with doubly fed induction generator

ในการศึกษาข้อมูลสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 อย่างด้วยกัน คือ

1) พิจารณาความแตกต่างของการควบคุมแบบ Fixed speed กับ Variable
 speed

2) พิจารณาความแตกต่างของชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่าง Induction
 (Asynchronous) กับ Synchronous

ซึ่งสามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการควบคุมระหว่าง Fixed speed กับ Variable
 speed [6]

การควบคุม	ข้อดี	ข้อเสีย
ความเร็วคงที่ (Fixed Speed)	<ul style="list-style-type: none"> - การควบคุมง่าย, มีความแม่นยำ, มีความน่าเชื่อถือ - ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ - ไม่ต้องใช้ระบบแปลงไฟฟ้า 	<ul style="list-style-type: none"> - เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นแล้วประสิทธิภาพจะค่อนข้างต่ำ - มีความเค้นทางกลสูง - กำลังที่จ่ายสู่กริดมีความผันผวน - จะจ่ายกำลังเข้ากริดได้ก็ต่อเมื่อความเร็วลมถึงที่จุดพิคก์เท่านั้น - ต้องใช้ Soft Start
เปลี่ยนแปลง ความเร็ว (Variable Speed)	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพสูง - ลดแรงเค้นทางกลลงได้ - กำลังงานที่ผลิตได้มีคุณภาพดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาสูงและเกิดการสูญเสียในระบบแปลงไฟฟ้า - มีระบบร่วมที่ค่อนข้างซับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิด Asynchronous Generator (Gear box) และ Synchronous Generator (Gearless) [13]

รายละเอียด	Asynchronous	Synchronous
1. ชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิด	ใช้เฟืองทด	ต่อตรงไม่ต้องใช้เฟืองทด
2. ระบบระบายความร้อนของชุดขับเคลื่อน	น้ำมันหรือน้ำ	ไม่มี
3. ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเสมือนจากระบบ	ต้องการ	ไม่ต้องการ
4. แรงดันไฟฟ้าจากระบบสายส่ง	ต้องการ	ไม่ต้องการ
5. ชุด Converter และ Inverter	ไม่ต้องการ	ต้องการ
6. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา	สูง	ต่ำ
7. คุณภาพและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า	ค่อนข้างสูง	สูง
8. ความเร็วลมที่ใช้ในการเริ่มหมุน	สูงกว่า	ต่ำ
9. มลภาวะทางเสียง	ปานกลาง	ต่ำ
10. ราคาที่ใช้ต่อกิโลวัตต์	ปานกลาง	สูง

โดยสรุปจากข้อดีข้อเสียของแต่ละชนิด กังหันลมที่เหมาะสมกับพื้นที่ติดตั้งโครงการ Future Center มากที่สุด คือ กังหันลมแนวอนแบบ Variable Speed ชนิด Synchronous Generator หรือก็คือ Permanent Magnet Synchronous Generator ที่มีข้อดีที่ ประสิทธิภาพสูง เริ่มทำงานที่ความเร็วลมค่อนข้างต่ำ ไม่มีเกียร์ทดรอบ รวมถึงเหมาะที่จะเป็นกังหันลมขนาดเล็กที่ใช้ในการศึกษาทำวิจัย

3.3.3 PMSG (Surface Mount Non-Salient) กับกังหันลม

การใช้ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) กับกังหันลมเริ่มเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อดีมากมายคือ

1) ใช้จำนวนขั้วแม่เหล็กสูงทำให้ต่อตรงได้เลย ไม่ต้องการเกียร์ทดรอบทำให้ลดการสูญเสียในระบบ

2) ไม่ต้องใช้ขดลวดในการสร้างสนามแม่เหล็ก ใช้แม่เหล็กถาวร ทำให้ลดการสูญเสีย

3) ประสิทธิภาพสูงและทำงานที่ความเร็วลมต่างๆได้

4) มี Cut-in Speed ที่ต่ำเหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย

แต่ก็มีข้อเสียอยู่คือ

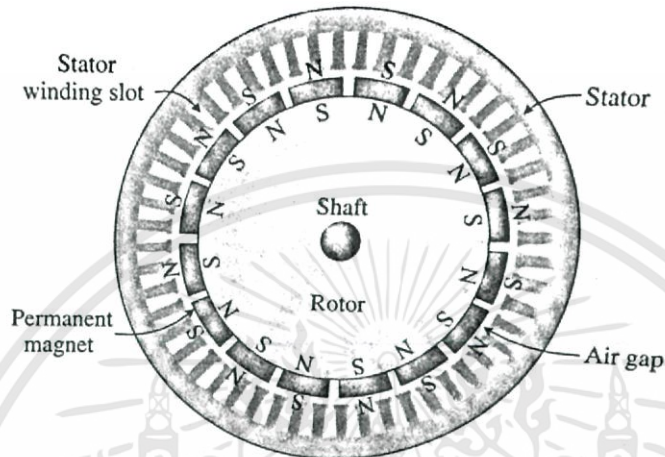
1) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรจะควบคุมได้ยากและอาจลดลงตามกาลเวลา

2) ระบบซับซ้อนเพราะต้องการอุปกรณ์แปลงพลังงานจำพวกคอนเวอร์เตอร์

3) ขนาดใหญ่เพราะมีจำนวนขั้วแม่เหล็กมากและราคาต้นทุนแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ Permanent Magnet Synchronous Generator ชนิดนี้จะเป็นชนิด Surface-Mount ซึ่งแม่เหล็กถาวรจะถูวางอยู่บนโรเตอร์ ทำให้วางแม่เหล็กถาวรได้จำนวนเยอะ จึงเหมาะกับการใช้งานที่ความเร็วลมต่ำ ทำให้เป็นที่นิยมใช้ใน Direct Drive WECS ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเพิ่มวงแหวนแม่เหล็กรอบโรเตอร์ได้อีกชั้นด้วย



รูปที่ 3.4 Surface-mount Non silent PMSG [6]

3.4 การออกแบบหาขนาดใบพัดที่เหมาะสมของกังหันลมที่กำลังการผลิต 10 kW

3.4.1 การออกแบบ Power Curve ของกังหันลม

เนื่องจากการออกแบบ Permanent Magnet Synchronous Generator เราต้องทำการคำนวณพลังงานจลน์ที่ได้รับจากลม จากสมการ

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} S_{rotor} V_{wind}^3 \quad (3.1)$$

เมื่อ P_{wind} คือ พลังงานจลน์ของลมทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่การหมุนของใบพัด

ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ

S_{rotor} คือ พื้นที่การหมุนของใบพัด

V_{wind} คือ ความเร็วลม

จากนั้นทำการคำนวณพลังงานกลที่เพลารับได้เพื่อนำไปคำนวณหา Power Curve ที่เราต้องการ

$$P_{turb} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho_{air} S_{rotor} V_{wind}^3 \quad (3.2)$$

เมื่อ P_{turb} คือ พลังงานจลน์ที่กังหันลมสามารถดึงมาใช้ได้

$C_p(\lambda, \beta)$ คือ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน (Coefficient of performance)

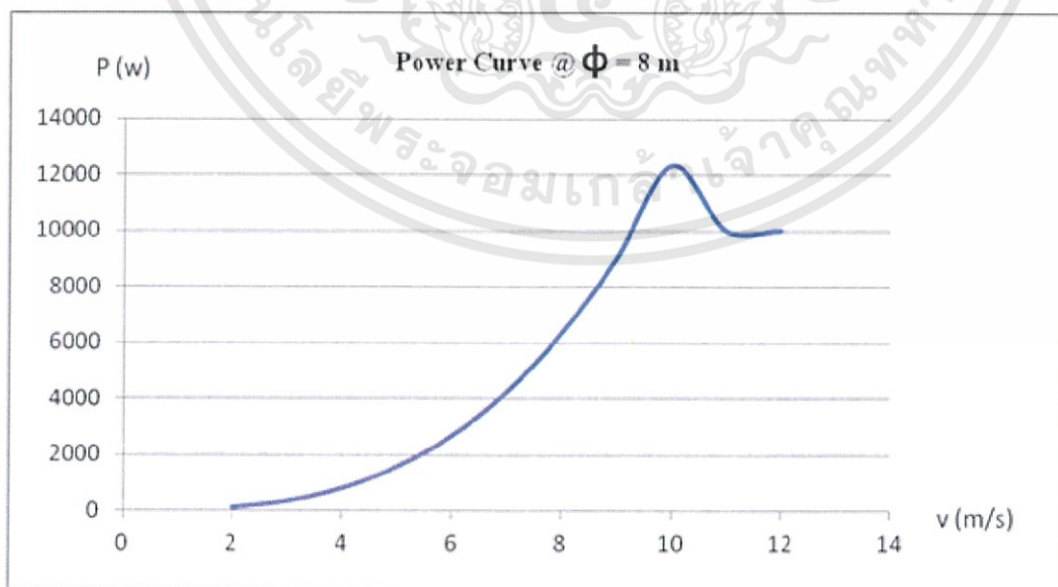
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเราสามารถเพิ่มพลังงานกลที่กังหันลมสามารถรับได้โดยทำการเปรียบเทียบที่ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8, 10, 12, 14 เมตร และใช้ค่า $C_p = 0.4$ ซึ่งตามปกติแล้ว C_p จะมีค่าประมาณ 0.35-0.59 และค่า $\rho_{air} = 1.225 \text{ Kg/m}^3$

ตารางที่ 3.4 การออกแบบ Power Curve

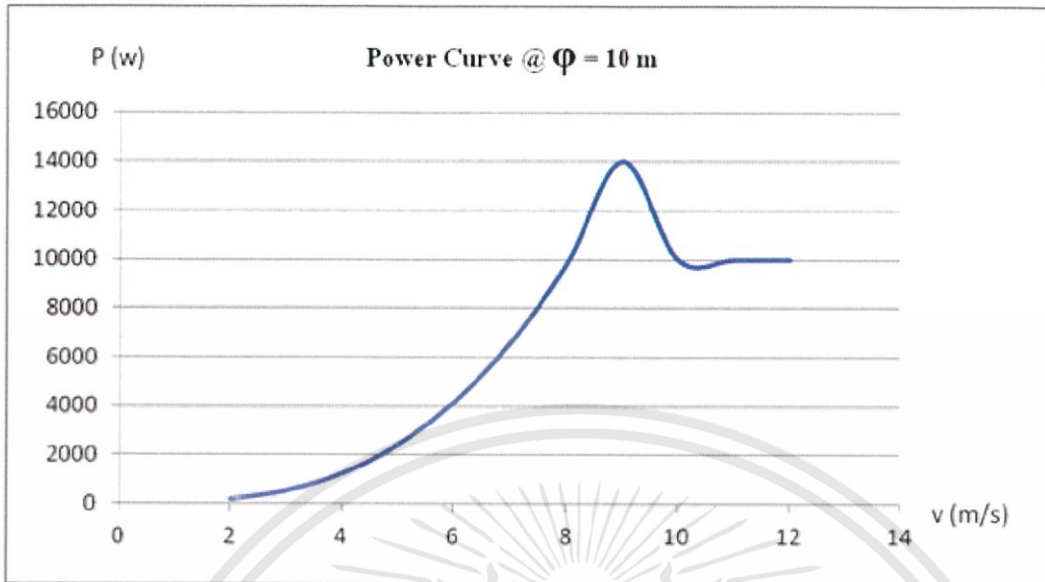
ความเร็วลม (m/s)	เส้นผ่านศูนย์กลางกังหัน ϕ (m)							
	พลังงานจลน์จากลม P_v (W)				พลังงานกล P_m (W)			
	ϕ (m)=8	ϕ (m)=10	ϕ (m)=12	ϕ (m)=14	ϕ (m)=8	ϕ (m)=10	ϕ (m)=12	ϕ (m)=14
2	246.3	384.84	554.17	754.29	98.52	153.93	221.67	301.71
3	831.26	1298.85	1870.34	2545.75	332.5	519.54	748.13	1018.3
4	1970.4	3078.76	4433.41	6034.37	788.16	1231.5	1773.36	2413.74
5	3848.45	6013.2	8659.01	11785.88	1539.38	2405.28	3463.6	4714.35
6	6650.12	10390.81	14962.77	20366	2660.04	4156.32	5985.11	8146.4
7	10560.14	16500.23	23760.33	32340.45	4224.05	6600.09	9504.13	12936.18
8	15763.25	24630.08	35467.32	48274.96	6305.3	9852.03	14186.92	19309.98
9	22444.16	35069	50499.37	68735.25	8977.66	14027.6	20199.74	27494.1
10	30787.6	48105.63	69272.11	94287.04	12315.04	19242.25	27708.84	37714.81
11	40978.3	64028.6	92201.18	125496.1	16391.32	25611.44	36880.47	50198.42
12	53200.98	83126.54	119702.2	162928	21280.39	33250.61	47880.88	65171.2

จากนั้นทำการ Plot Power Curve ของกังหันลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดขนาดต่าง ๆ

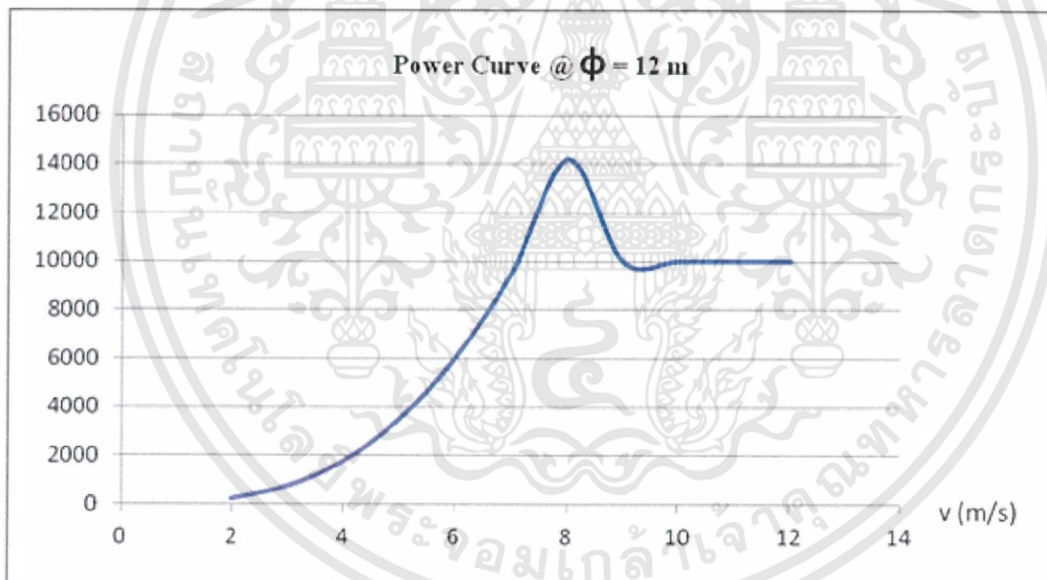


รูปที่ 3.5 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 8 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

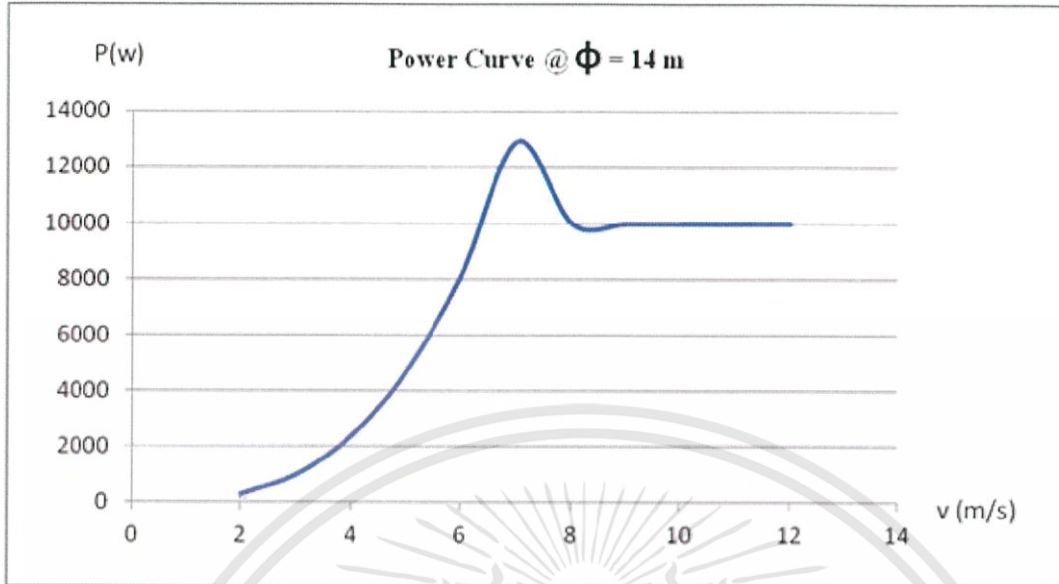


รูปที่ 3.6 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 10 m

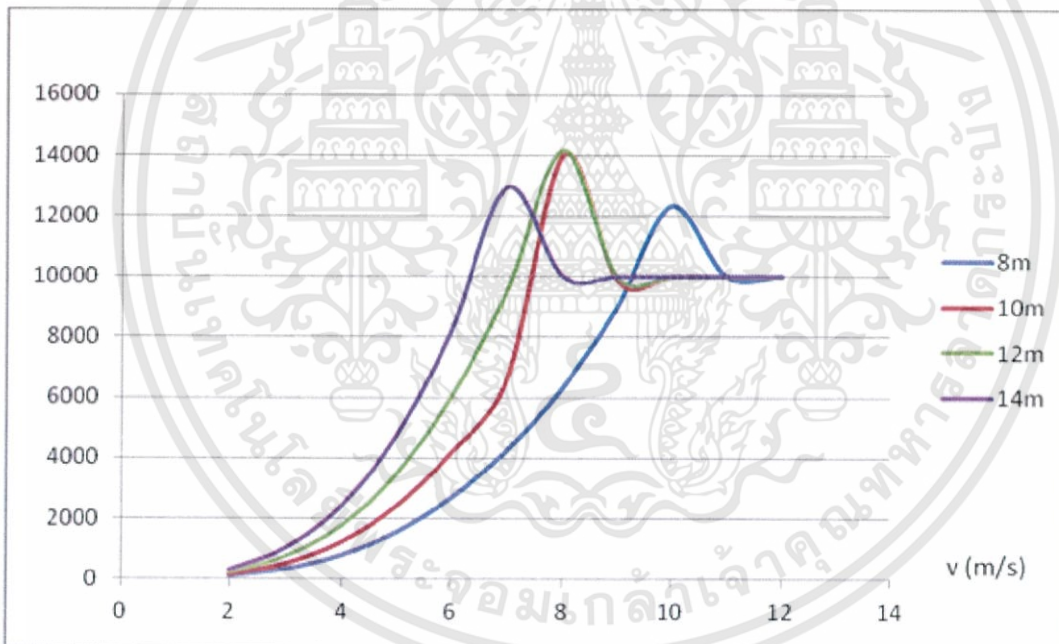


รูปที่ 3.7 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 12 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ขนาด 14 m



รูปที่ 3.9 กราฟเปรียบเทียบ Power Curve ของกังหันลมที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดขนาดต่างๆ

3.4.2 จำนวนความเร็วของเพลลาที่ใบพัดขนาดต่างๆ

โดย C_p นั้นเป็นตัวแปรที่อยู่ในฟังก์ชันของอัตราส่วนของ Tip-speed (λ) และมุมของใบพัด (β) โดยที่ค่าอัตราส่วน tip-speed (λ) หาได้จากสมการต่อไปนี้

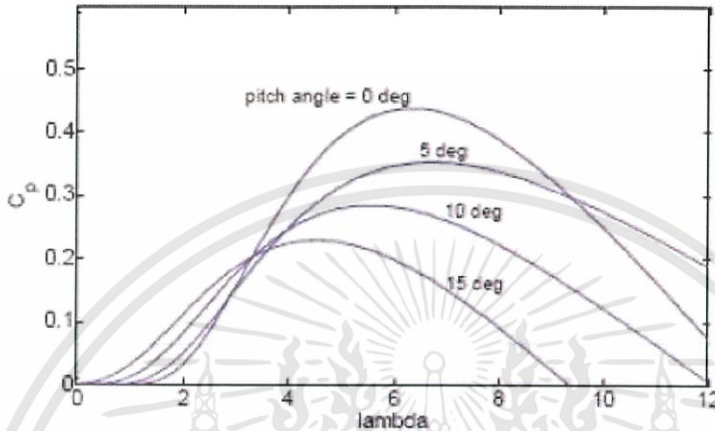
$$\lambda = \frac{R_{turb} \cdot \Omega_{turb}}{V_{wind}} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R_{turb} คือ รัศมีของใบพัดกึ่งหันลม

Ω_{turb} คือ ความเร็วการหมุนของใบพัด

ในรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า C_p เมื่อค่า λ และ β เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.10 ค่า C_p เมื่อค่า λ และ β เปลี่ยนแปลง [17]

จากกราฟเราเลือกค่า $C_p = 0.4$ และค่า Pitch angle (β) = 0 deg จึงได้ค่า λ (Tip speed Ratio) = 8 เราจึงสามารถคำนวณ Ω_{turb} ความเร็วการหมุนของใบพัดซึ่งมีหน่วยเป็น (rad/s) ได้จากสมการข้างต้น

$$\Omega_{turb} = \lambda \frac{V_{wind}}{R_{turb}} \tag{3.4}$$

ตารางที่ 3.5 การหมุนของใบพัด

ความเร็วลม U (m/s)	Speed (ω_r) rad/s				Speed (n) rpm			
	ϕ (m)=8	ϕ (m)=10	ϕ (m)=12	ϕ (m)=14	ϕ (m)=8	ϕ (m)=10	ϕ (m)=12	ϕ (m)=14
2.00	4.00	3.20	2.67	2.29	38.20	30.56	25.46	21.83
3.00	6.00	4.80	4.00	3.43	57.30	45.84	38.20	32.74
4.00	8.00	6.40	5.33	4.57	76.39	61.12	50.93	43.65
5.00	10.00	8.00	6.67	5.71	95.49	76.39	63.66	54.57
6.00	12.00	9.60	8.00	6.86	114.59	91.67	76.39	65.48
7.00	14.00	11.20	9.33	8.00	133.69	106.95	89.13	76.39
8.00	16.00	12.80	10.67	9.14	152.79	122.23	101.86	87.31
9.00	18.00	14.40	12.00	10.29	171.89	137.51	114.59	98.22
10.00	20.00	16.00	13.33	11.43	190.99	152.79	127.32	109.13
11.00	22.00	17.60	14.67	12.57	210.08	168.07	140.06	120.05
12.00	24.00	19.20	16.00	13.71	229.18	183.35	152.79	130.96

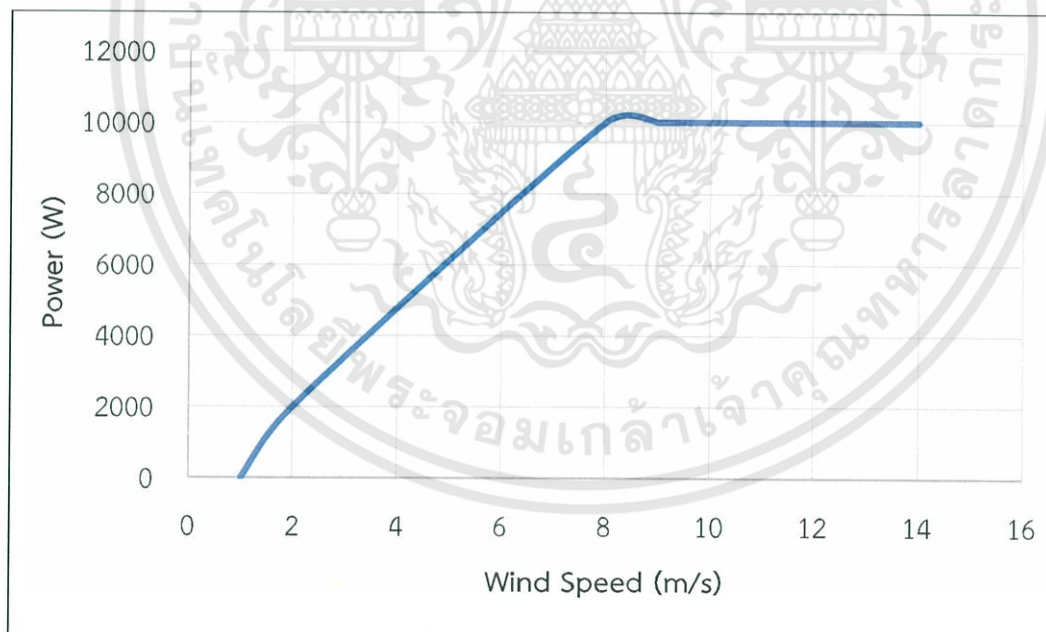
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุปแล้วเราเลือก Power curve ขนาด 10 kW ที่ใช้ใบพัดขนาด 10 m เนื่องจากมี cut-in speed ที่ประมาณ 3 m/s และ rated speed ที่ประมาณ 8 m/s ดังแสดงในรูปที่ 3.6

แต่ยังพบข้อเสียที่ว่า กำลังที่ได้ที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ 4 m/s ซึ่งเป็นความเร็วลมในที่ติดตั้งจะได้ประมาณ 1200 kW ซึ่งถือว่าต่ำมาก เราจึงต้องทำการปรับปรุง Power Curve ให้พลังงานที่ได้ในช่วงความเร็วลมต่ำๆ สูงขึ้น

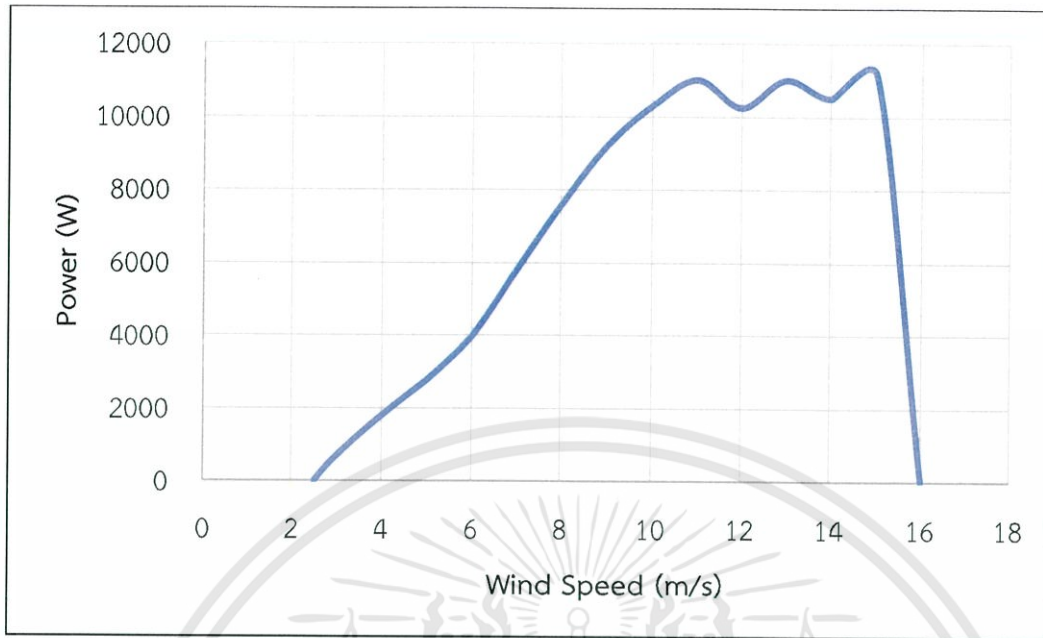
3.5 ออกแบบ Power Curve เพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วลมในโครงการ Future Center

การออกแบบ Power Curve ของกังหันลมขนาด 10 kW ต้องการออกแบบให้สามารถสร้างพลังงานที่ความเร็วลมต่างๆได้โดยเบื้องต้นเราต้องการค่าดังนี้: Cut in Speed ที่ 2 m/s, Rated Speed ที่ประมาณ 8 m/s และ Cut out Speed ที่ 25 m/s ดัง Power Curve ในรูปที่ 3.5 ซึ่งจาก Power Curve ของกังหันลมที่ได้ทำการออกแบบ Generator นี้ จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วลม 2 m/s จะได้กำลังไฟฟ้า 2000 W ที่ความเร็วลม 4 m/s จะได้กำลังไฟฟ้า 5000 W และกำลังไฟฟ้าจะเริ่มเข้าสู่พิกัด (10 kW) ที่ความเร็วลมประมาณ 8 m/s ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้ง

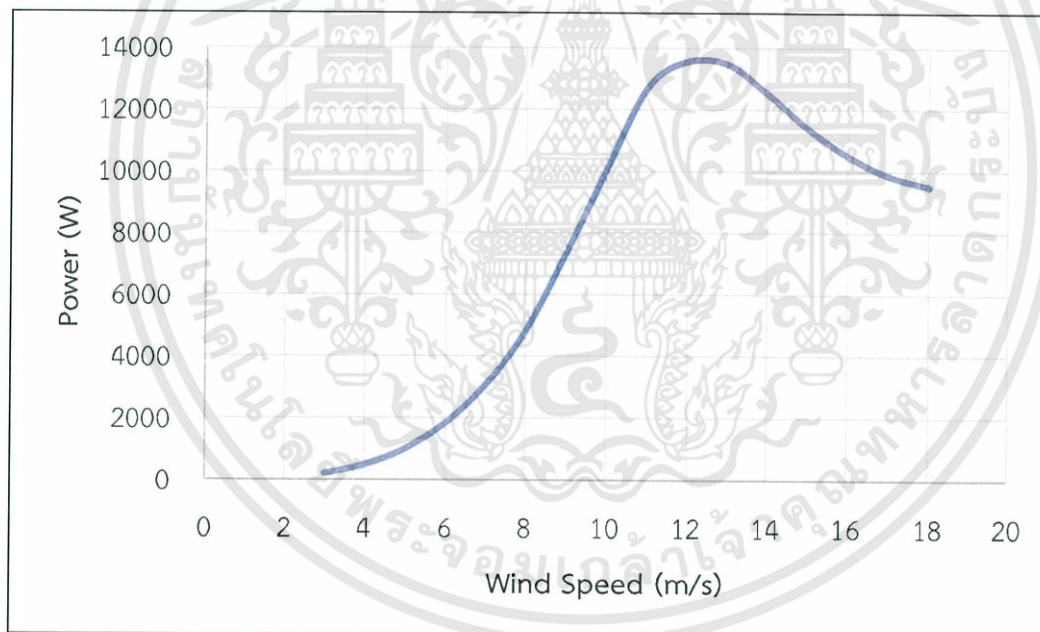


รูปที่ 3.11 Power curve ของกังหันลมที่ได้ทำการออกแบบ Generator

เมื่อนำ Power Curve ของกังหันลมที่ได้ทำการออกแบบ Generator มาทำการเปรียบเทียบกับ Power Curve ของกังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งได้ทำการเลือกมา 2 ยี่ห้อคือ Hopeful และ Aeolos ดังรูปที่ 3.12 และ รูปที่ 3.13 ตามลำดับ

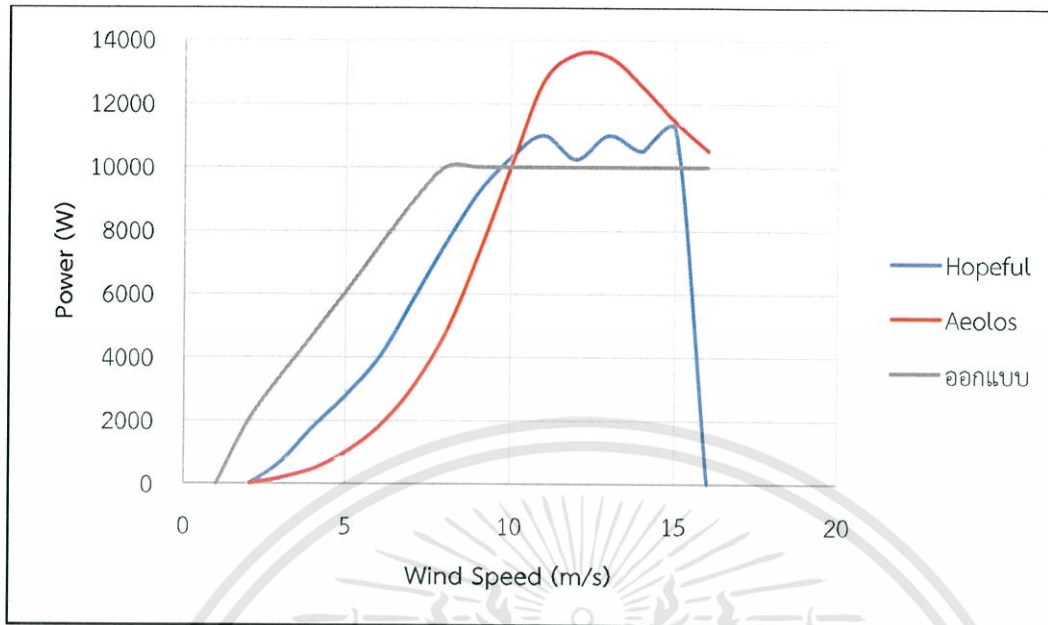


รูปที่ 3.12 Power curve ของกังหันลมของ Aeolos



รูปที่ 3.13 Power curve ของกังหันลมของ Hopeful

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบ Power curve ของกังหันลม

จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า Power Curve ที่ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำ หรือเฉลี่ยที่ 4 m/s ได้มากกว่ากังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ อีกทั้งยังมี cut in speed ต่ำ ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมสำหรับความเร็วลมในประเทศไทยโดยสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของกังหันลมของ Hopefull, Aeolos และที่ออกแบบเอง ที่ความเร็วลมต่างๆ

Wind Speed (m/s)	กำลังไฟฟ้า (W)		
	Hopeful	Aeolos	ออกแบบ
1	0	0	0
2	0	0	2000
3	700	200	3400
4	1800	480	4700
5	2800	1020	6050
6	4000	1850	7500
7	5800	3100	8900
8	7600	4850	10000
9	9200	7320	10000
10	10300	10080	10000

จากตารางจะเห็นได้ว่าที่กังหันลมที่ทำการออกแบบ Generator เองสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ตั้งแต่ความเร็วลมเพียง 2 m/s และจากการศึกษาความเร็วลม ณ บริเวณพื้นที่ติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่ามีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 4 m/s ซึ่งเมื่อเทียบกับที่ความเร็วลมเฉลี่ยดังกล่าวแล้ว จะพบว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอยู่มาก

3.6 การเปรียบเทียบค่า Capacity Factor ของกังหันลม

นอกจากกราฟ Power Curve ที่เหมาะสมแล้ว เราต้องพิจารณาค่า Capacity Factor โดยค่า Capacity Factor คือ อัตราส่วนของพลังงานที่กังหันลมผลิตออกมาได้จริงต่อพลังงานที่ติดตั้งกังหันลมตัวนั้นผลิตได้

$$C_F = \frac{E_T}{TPR} \quad (3.5)$$

โดยปกติเราจะคำนวณค่าพลังงานที่ได้ต่อปี โดยโดยปกติค่าจะอยู่ที่ 0.25-0.40 ซึ่งสามารถทำการคำนวณค่า Capacity Factor โดยใช้โปรแกรม Wind Cap

The screenshot shows the Wind Cap software interface. It includes sections for Duration (8760 h), Wind Turbine selection (New Wind Turbine Fixed Speed), New Wind Turbine configuration (Fixed Speed table), Distribution (Weibull), Weibull input data (Height, Hub height, Roughness length, k, c), Rayleigh Graph, and Result (Energy Production, Capacity Factor).

Fixed Speed	
m/s	KW
1	8
2	9
3	10
4	11
5	12
6	13
7	14

รูปที่ 3.15 โปรแกรม Wind Cap

ทำการใส่ค่าข้อมูลลงในโปรแกรม โดยค่าที่ต้องใส่ คือ

- Cut-in Speed
- Rated Speed
- Cut-out Speed

โดยพิจารณากังหันลม 1) ที่ออกแบบเอง 2) Hopeful 3) Aeolos (พิจารณาที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4 m/s ต่อปี)

กังหันลมที่ออกแบบเอง

Wind Turbine - [Wind]

File Help

Duration: Duration (h) 8760 Hint Enter

Wind Turbine:

- Wind Turbine from Data
- New Wind Turbine Variable Speed Back
- New Wind Turbine Fixed Speed Hint Enter

New Wind Turbine:

- Rate Power: Rated Power (kW) 10
- Variable Speed:
 - Wind Turbine name: PC
 - Cut-in Velocity (m/s): 2
 - Rated Velocity (m/s): 8
 - Cut-out Velocity (m/s): 25
 - n: 1
 - Back Enter Save
- Fixed Speed:

m/s	kW	m/s	kW	m/s	kW	m/s	kW
1	8	15	21				
2	9	16	22				
3	10	17	23				
4	11	18	24				
5	12	19	25				
6	13	20	26				
7	14						

- Back Enter

Distribution:

- Weibull
- Rayleigh Hint Back Enter

Weibull:

- Weibull "k" and "c" Site Wind Data Back Enter

Input Data:

- Height: 20 m Roughness length: 0.1 m
- Hub height: 18 m Hint
- k = 4.21 c = 4.83 Back Calculate

Rayleigh Graph:

- f(v)
- 0 5 10 15 20 25
- v(m/s)

Result:

- Energy Production = 33790.61 kWh POB WIND
- Capacity Factor = 39.562 % Back Exit

รูปที่ 3.16 ค่า Capacity Factor ของกังหันลมที่ออกแบบ

กังหันลมของ Hopeful

Wind Turbine - [Wind]

File Help

Duration: Duration (h) 8760 Hint Enter

Wind Turbine:

- Wind Turbine from Data
- New Wind Turbine Variable Speed Back
- New Wind Turbine Fixed Speed Hint Enter

New Wind Turbine:

- Rate Power: Rated Power (kW) 10
- Variable Speed:
 - Wind Turbine name: Hopeful
 - Cut-in Velocity (m/s): 2.5
 - Rated Velocity (m/s): 10
 - Cut-out Velocity (m/s): 16
 - n: 1
 - Back Enter Save
- Fixed Speed:

m/s	kW	m/s	kW	m/s	kW	m/s	kW
1	8	15	21				
2	9	16	22				
3	10	17	23				
4	11	18	24				
5	12	19	25				
6	13	20	26				
7	14						

- Back Enter

Distribution:

- Weibull
- Rayleigh Hint Back Enter

Weibull:

- Weibull "k" and "c" Site Wind Data Back Enter

Input Data:

- Height: 20 m Roughness length: 0.1 m
- Hub height: 18 m Hint
- k = 4.21 c = 4.83 Back Calculate

Rayleigh Graph:

- f(v)
- 0 5 10 15 20 25
- v(m/s)

Result:

- Energy Production = 21440.05 kWh POB WIND
- Capacity Factor = 24.474 % Back Exit

รูปที่ 3.17 ค่า Capacity Factor ของกังหันลมของ Hopeful

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กังหันลมของ Aeolos

The screenshot shows the 'Wind Turbine' software interface. The 'Duration' is set to 8760 hours. The 'Weibull' distribution is selected. The 'Input Data' section shows: Height = 20 m, Roughness length = 0.1 m, Hub height = 18 m, k = 4.21, and c = 4.83. The 'New Wind Turbine' section shows: Rated Power = 10 kW, Variable Speed, Wind Turbine name = Aeolos, Cut-in Velocity = 3 m/s, Rated Velocity = 10 m/s, Cut-out Velocity = 18 m/s, n = 1. The 'Fixed Speed' table is as follows:

	m/s	kW	m/s	kW	m/s	kW	m/s	kW
1	8	15	21					
2	9	10	22					
3	10	17	23					
4	11	18	24					
5	12	19	25					
6	13	20	26					
7	14							

The 'Rayleigh Graph' shows a plot of f(v) vs v(m/s) with a peak around 10 m/s. The 'Result' section shows: Energy Production = 17327.7 kWh, Capacity Factor = 19.780%.

รูปที่ 3.18 ค่า Capacity Factor ของกังหันลมของ Aeolos

จากโปรแกรม Wind Cap สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.19

ตารางที่ 3.19 สรุปค่า Capacity Factor ของกังหันลมจากโปรแกรม Wind Cap

กังหันลม	พลังงานที่ผลิตได้ใน 1 ปี	Capacity Factor
ออกแบบเอง	33780.61 kWh	38.56%
Hopeful	21440.05 kWh	24.47%
Aeolos	17327.70 kWh	19.18%

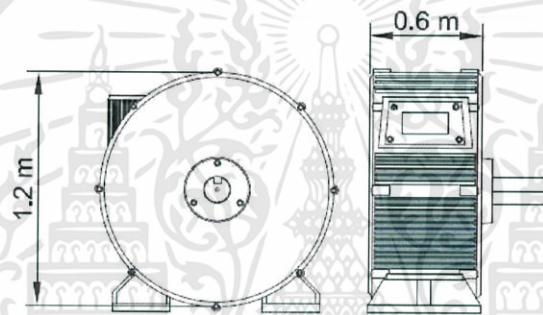
ทำให้เราคาดว่ากังหันลมที่เราออกแบบเองจะผลิตพลังงานได้สูงมากกว่ากังหันลมที่ซื้อจากต่างประเทศ นั่นก็คือ กังหันลมเราเหมาะสมกับความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้ง Future Center นั่นเอง

3.7 การออกแบบ Generator

การออกแบบ Generator สำหรับกังหันลมขนาด 10 kW นั้น ได้ความร่วมมือจาก รศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญทางด้าน Machine เป็นผู้ออกแบบ Dimension รวมทั้งพิกัดต่างๆ ของ Generator เพื่อใช้สำหรับกังหันลม โดยรายละเอียดต่างๆ ของ Generator เป็นดังนี้

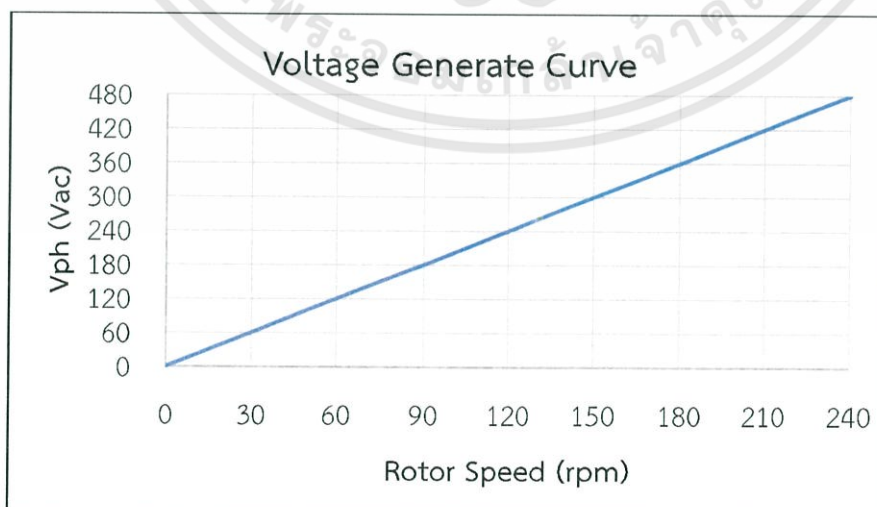
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- น้ำหนัก: 500 kg
- ความยาว: 50-60 cm
- เส้นผ่านศูนย์กลาง: 1.20 m
- ชนิดโรเตอร์: Surface Mounted (Non-Silent Pole)
- Pole: 40 pole
- ความถี่: 40 Hz
- ความเร็วพิกัด: 120 rpm
- พิกัดกำลัง: 10 kW
- Output Voltage: 380 V_{line-line}
- ที่ความเร็วรอบ 30 rpm จะได้แรงดัน 60 V_{ac} (V_{phase}) และที่ความเร็วรอบ 120 rpm จะได้แรงดัน 220 V_{ac} (V_{phase})



รูปที่ 3.20 แบบจำลอง Generator ที่ได้ทำการออกแบบ

ด้านล่างเป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแรงดันที่ได้ออกแบบไว้โดยระดับแรงดันที่ต่อเข้ากริดคือ 240 V_{ac} จะต้องให้ PMSG หมุนที่ความเร็วพิกัด 120 rpm และอาจเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กให้เพิ่มแรงดันจนถึง 480 V_{ac} ได้ ซึ่งข้อมูลแรงดันจะสำคัญเพราะต้องนำไปใช้เลือกอุปกรณ์ Converter



รูปที่ 3.21 กราฟแรงดันของ Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

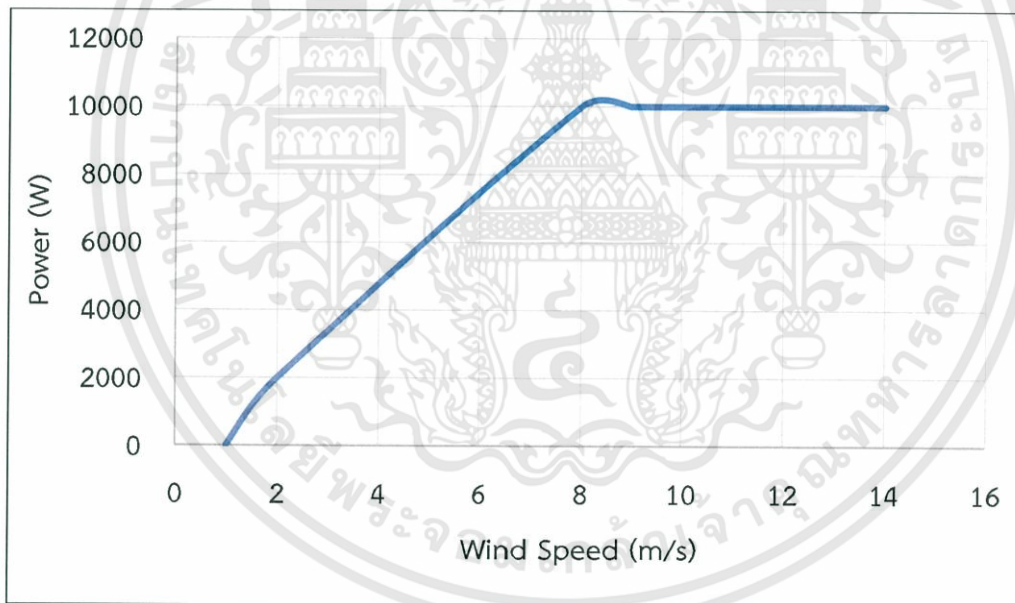
จากการออกแบบเบื้องต้นในบทที่ 3 เราทราบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ติดตั้งนั้นค่อนข้างต่ำซึ่งจะอยู่ที่ประมาณ 4 m/s ทำให้กังหันลมที่ใช้กันในท้องตลาดไม่สามารถทำงานให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด เราจึงได้ออกแบบ PMSG ตัวใหม่ที่คาดว่าจะทำงานได้ดีที่โครงการ Future Center โดยเบื้องต้นนั้นค่า Capacity Factor บอกเราว่า PMSG ตัวนี้จะให้พลังงานที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกังหันลมตัวอื่น

ในขั้นตอนต่อไปเราจะต้องทำการออกแบบระบบที่เหมาะสม รวมถึงการติดตั้งที่ควรใช้ซึ่งกังหันลมขนาด 10 kW จะมีระบบที่สามารถใช้ได้อยู่หลากหลาย

4.1 เลือกระบบจากข้อมูลเบื้องต้น

การเลือกระบบนั้นเราสามารถทำได้จากข้อมูลเบื้องต้นที่เราทราบมาคือ

1) Power Curve



รูปที่ 4.1 Power Curve ของกังหันลมที่ออกแบบ

2) Specification of Generator

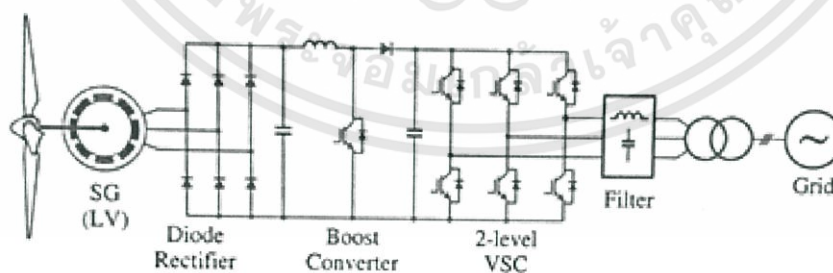
ตารางที่ 4.1 Specification ของ Generator

Permanent Magnet Synchronous Generator	
น้ำหนัก	500 Kg
ความยาว	50-60 cm
เส้นผ่านศูนย์กลาง	1.2 m
ชนิดโรเตอร์	Surface Mounted (Non-Silent Pole)
Pole	40 Pole
ความถี่	40 Hz
ความเร็วพิกัด	120 rpm
พิกัดกำลัง	10Kw
Output Voltage	380 V

จากข้อมูลเราจะทราบว่

- 1) PMSG ตัวนี้ จะเป็นขนาด 10 kW แรงดันต่ำที่ 380 V
- 2) ความเร็วเฉลี่ยที่ต่ำถึง 4 m/s อาจทำให้ระดับแรงดันที่ผลิตได้ไม่ถึง 380 V

ระบบที่ควรนำมาใช้คือ Single-channel boost converter ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วย Diode Rectifier, DC boost converter และ inverter



รูปที่ 4.2 Single-channel boost converter [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของระบบนี้ คือ

- 1) ระบบไม่ซับซ้อน ราคาถูก เหมาะกับการใช้งานที่ระบบระดับ kW
- 2) ใช้งานกับที่แรงดันต่ำ
- 3) มีวงจร Boost Converter ช่วยเพิ่มระดับแรงดันให้สูงพอที่ Inverter จะ

ทำงานได้

ข้อเสียของระบบนี้ คือ

- 1) รูปคลื่นกระแสจะผิดเพี้ยนเนื่องจากวงจร Diode Rectifier ทำให้เกิดความสูญเสียในระบบ
- 2) เกิด Torque Ripple

4.2 อุปกรณ์ Power Electronic

จากระบบที่เราเลือกใช้ คือ Single-channel boost converter อุปกรณ์หลักของระบบนี้ คือ

- 1) Diode Rectifier ทำหน้าที่แปลงไฟ AC เป็น DC
- 2) DC Boost Converter ทำหน้าที่เพิ่มแรงดัน DC ให้ Inverter ทำงานได้
- 3) Inverter ทำหน้าที่แปลงไฟ DC เป็น AC ที่ความถี่กริด

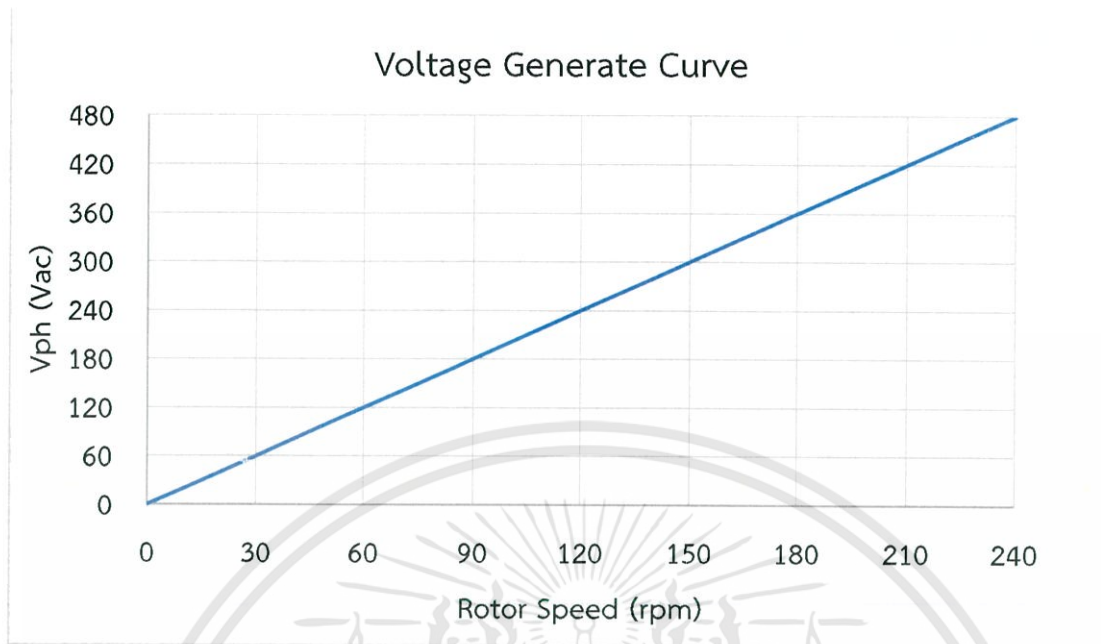
โดยตามท้องตลาดแล้วอุปกรณ์ที่มีขายอยู่ก็คือ

- Controller ซึ่งจะประกอบด้วยวงจร Diode Rectifier และ DC Boost Converter
- Inverter ที่มีโหมด MPPT โดยเป็นโหมดที่ทำให้ Inverter สามารถส่งผ่านพลังงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด

หลักการในการพิจารณาเลือก Controller และ Inverter โดยหลักแล้วจะพิจารณาจาก

- 1) กราฟแรงดันของ PMSG เข้ากับ Specification ของ Controller และ Inverter
- 2) ระดับการแปลงแรงดันของ Controller ไปเป็น DC
- 3) ระดับแรงดันการทำงานโหมด MPPT ของ Inverter

จากกราฟแรงดันของ PMSG ที่เราออกแบบมาดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแรงดันของ PMSG

4.2.1 Inverter

นำกราฟแรงดันมาพิจารณากับ Inverter โดยตัวที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย Inverter ขนาด 10 kW ยี่ห้อ Ginlong ซึ่งมาพร้อมกับกังหันลมของบริษัท Hopeful และ Inverter ขนาด 12.5 kW ยี่ห้อ Powerone ซึ่งมาพร้อมกับกังหันลม Aeolos โดยนำมาเปรียบเทียบ specification ได้ดังนี้

ซึ่งเราต้องพิจารณา

- 1) แรงดันสูงสุด (V_{dc}) ที่รับได้จาก DC Boost Converter
- 2) ช่วงการทำงานของโหมด MPPT

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบ Specification ระหว่าง Inverter เทคโนโลยีของ Ginlong รุ่น GCI-10K-W กับ Aeolos รุ่น PVI-12.5-TL-OUTD-W

เทคโนโลยี	Ginlong GCI-10K-W	Power one PVI-12.5-TL-OUTD-W
Max DC in-put voltage	1000 V	900 V
MPPT operation range	30-810 V _{dc}	100-850 V _{dc}
MPPT mode	Power curve tracking	
Max DC in-put current	30 A _{dc}	36 A _{dc}
Max input power	10 kW	12.5 kW
Rated grid voltage	400 V _{ac}	400 V _{ac}
Grid voltage range	313-470 V _{ac}	320-480 V _{ac}
Phase operation	3 phase	3 phase
Rating grid output	14.5 A _{ac}	20 A
Output power factor	>0.99	>0.995 ,adj
Grid current THD	<4%	<2%
Rating grid frequency	50/60 Hz	50/60 Hz
Efficiency	>97.5%	97.70%
Size	430x600x220 mm	761x645x222 mm
Weight	27 kg	38 kg
Cost	2766 USD	5960 USD

จากตารางเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า Inverter ของ Ginlong เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบควบคุมของกังหันลม เนื่องจากช่วงการทำงานของ MPPT ที่กว้างกว่าที่ 30-810 V_{dc} จะทำให้ได้พลังงานจากการผลิตสูงกว่า อีกทั้งยังสามารถรับแรงดัน DC ได้ถึง 1000 V ดังนั้นเราจึงเลือก Inverter ของ Ginlong ซึ่งมี spec ดังด้านบน



รูปที่ 4.4 Ginlong Inverter รุ่น GCI-10K-W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 Controller

การเลือก Controller เราจะพิจารณา Controller เทคโนโลยีของ Ginlong ขนาด 20 kW ว่า

- 1) รับแรงดันสูงสุด (V_{ac}) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้หรือไม่
- 2) แรงดันที่แปลงไปเป็น (V_{dc}) แล้ว Boost ขึ้นนั้น สูงพอที่จะทำให้ Inverter ทำงานได้หรือไม่

ตารางที่ 4.3 Specification ของ Controller เทคโนโลยี Ginlong

Controller Specification	
Rating Input power	20 kW
Max input voltage	500 V _{ac}
Max input current	40 A _{ac}
Rating DC output voltage	12 kW
Max DC output voltage	750 V _{dc}
Max DC current	40 A _{dc}
The range of connect dump load	1) 300-400 V 2) 400-500 V 3) 500-600 V
Rating Dump load output power	8 kW
Max Dump load output voltage	750 V _{dc}
Max Dump load output current	30 A _{dc}
Efficiency	>99.3%
Operation degree	25-26 °C
Protection degree	IP65
Width/height/depth	370x275x135 mm
Weight	6.4 kg

จากข้อมูลพบว่า Controller เทคโนโลยีของ Ginlong สามารถทำงานได้ตามที่เรา
ต้องการ



รูปที่ 4.5 Ginlong Controller 20 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุปแล้ว เราทำการเลือก Controller และ Inverter ของเทคโนโลยี Ginlong มาทำการใช้ในกังหันลมของเราเนื่องจากช่วงการทำงานของแรงดันที่กว้าง ประสิทธิภาพสูง และราคาไม่แพงจนเกินไป อีกทั้งยังมีมาตรฐานยืนยันด้วย

4.3 โครงสร้างกังหันลม

4.3.1 เสา

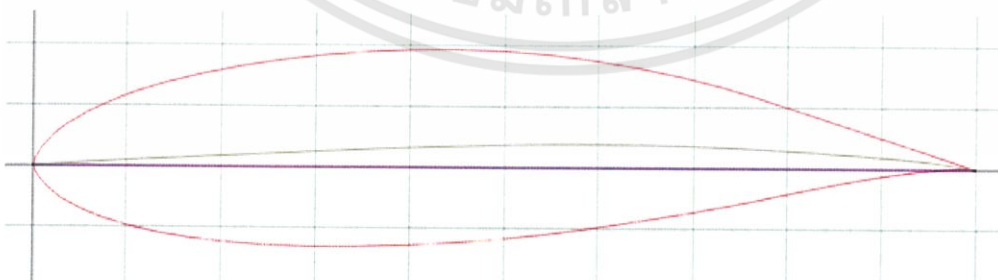


รูปที่ 4.6 เสากังหันลมแบบ Monopole Tower [16]

เราทำการเลือกเสาประเภท Monopole Tower ที่มีความสวยงามแข็งแรง รูปร่างเพรียว มีการสั่นสะเทือนน้อย มีความน่าเชื่อถือ ใช้พื้นที่น้อยและ ฐานมีขนาดเล็ก ใช้พื้นที่น้อย มาใช้สำหรับติดตั้งกังหันลมที่ Future Center

Monopole Tower เป็นโครงสร้างเสาแบบท่อเดี่ยวขนาดใหญ่ ข้อดีของเสาแบบ Monopole Tower คือ ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยมาก มีโครงสร้างที่สวยงาม และด้วยเหตุผลนี้ทำให้เสาแบบนี้เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน และใน Generator ขนาดใหญ่ ตัวเสามีขนาดใหญ่มาก สามารถสร้างบันไดหรือลิฟท์ไว้ภายในเสาได้เพื่อง่ายต่อการบำรุงรักษา และการติดตั้งต้องใช้รถเครนยกเสาขึ้น ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบ Lattice Tower และ Guyed-wire Tower

4.3.2 ใบพัด



รูปที่ 4.7 ใบพัด NREL's s822

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกใบพัดเราต้องคำนึงถึงปัจจัย 4 ประการคือ

- 1) ลมที่ไหลออกไปด้านข้างรอบๆของโรเตอร์
- 2) การสูญเสียอันเนื่องมาจากการหมุน
- 3) การสูญเสียที่ปลายใบพัด
- 4) การสูญเสียจากแรงต้าน

โดยสรุปว่าที่ค่า Reynold Number ที่ 50000-100000 ซึ่งคิดเป็นความเร็วลมที่ 1-10 m/s เป็นความเร็วลมในพื้นที่ของโครงการ Future Center ใบพัดที่เหมาะสม คือ ใบพัดรุ่น s882 ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

4.3.3 ตลับลูกปืน (Bearing)

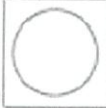











เนื่องจากกังหันลมที่นำมาพิจารณาเป็นกังหันลมที่มีแกนเพลอยู่ในแนวแกนนอน (Horizontal-axis type wind turbine) ซึ่งกังหันลมประเภทนี้จะมีแรงในแนวรัศมี (Radial Load) สูงกว่าแรงในแนวแกน (Axial Load) ดังนั้นในการเลือกใช้ตลับลูกปืนก็ควรเลือกใช้ให้เหมาะสม ซึ่งจะทำให้กังหันลมมีประสิทธิภาพดีขึ้น ลดการสึกหรอ และการบำรุงรักษาต่ำ



รูปที่ 4.8 การรับแรงในแนวแกนและแรงในแนวรัศมีของตลับลูกปืน [15]

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าตลับลูกปืนแบบตลับลูกปืนสองแถวร่องลึกหรือทรงกลม (Deep Groove Ball Bearing Double Row) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับกังหันลมแนวนอน นั่นคือ สามารถรับแรงในแนวรัศมีได้ดี แต่การรับแรงในแนวแกนถือว่าไม่ดีมากนัก นอกจากนี้ตลับลูกปืนชนิดทรงกลมยังเป็นที่ยอมรับนำมาใช้กับกังหันลม อีกทั้งการที่มีสองแถวยังสามารถรับโหลดได้มากขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของตลับลูกปืนแต่ละชนิด [15]

Radial bearing type	Contact Area	High speed (grease lube)	Loads		Misalignment capability
			Radial	Thrust	
Ball 		Excellent	Good	Poor	Limited to none (depending on configuration)
Spherical 		Very good	Excellent	Fair to good	Excellent
Hourglass 		Good	Very good	Fair to poor	Very good
Cylindrical 		Excellent	Excellent	Poor to none	None
Tapered 		Good	Excellent	Very good	None
Needle 		Good	Good	Poor to none	None

4.4 ระบบอื่นๆ

4.4.1 ระบบวัดลม

ในระบบพลังงานกังหันลมของเราจำเป็นต้องวัดทั้ง

- 1) ความเร็วลม
- 2) ทิศทางลม

เพื่อใช้กับระบบ Yaw Control จึงเหมาะที่จะใช้ Sonic Anemometer ซึ่งมีความละเอียดแม่นยำสูง Class 1A

4.4.2 ระบบควบคุมและป้องกัน

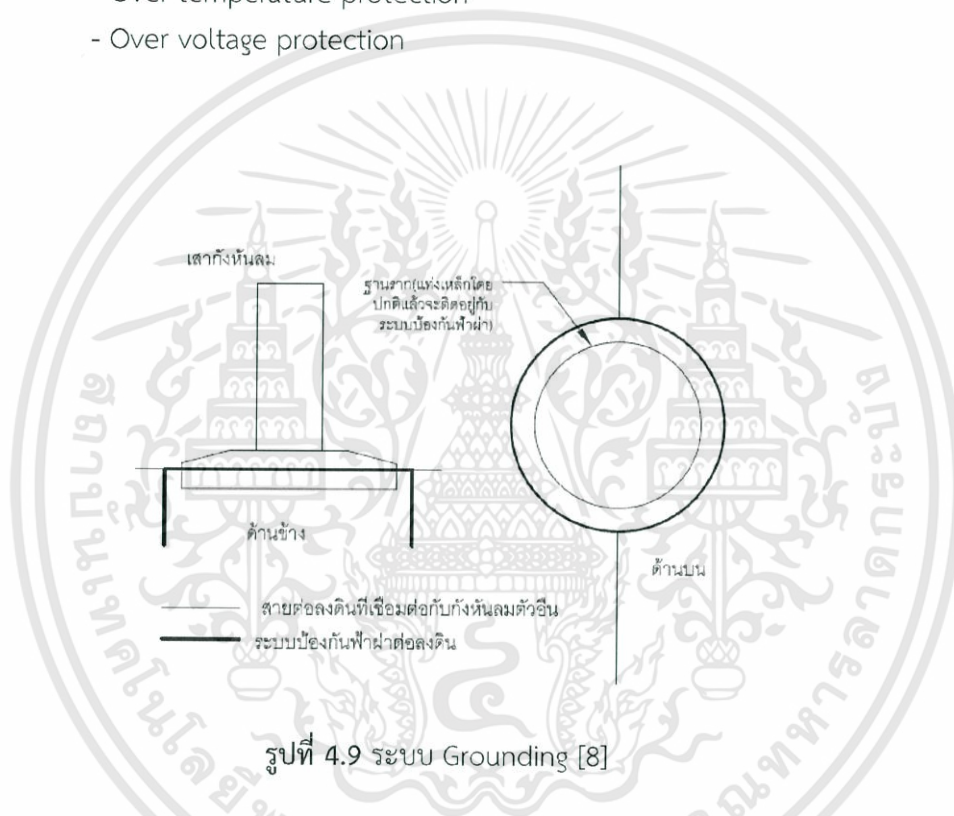
- Yaw control เป็น PLC control ควบคุมทิศทางของกังหันลมเพื่อให้ใบพัดหันเข้ารับลม

- Electronic break โดย dump load ทำโดย PWM technology ทำให้ความเร็วโรเตอร์อยู่ภายใต้ช่วงที่คงที่ เพื่อป้องกันการทำงานของกังหัน เมื่อความเร็วสูงเกิน (output power สูงกว่า 125% ของพิกัด) dump load จะตัวเป็นความต้านทานเพื่อจัดการกับไฟฟ้าที่ผลิตเกินเพื่อให้ความเร็วโรเตอร์อยู่ในสภาวะคงที่

- Mechanical break จะทำการหยุดเมื่อเกิด over speed, overvoltage, over temperature หรือ grid failure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Tail-bend protection เมื่อความเร็วลมเกิน 25 m/s โรเตอร์จะทำการเปลี่ยนทิศทางทันที เพื่อให้ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ต่ำลง
- Pitch control เมื่อเครื่องกำเนิดผลิตไฟฟ้าเกินพิกัด จะมีการปรับ pitch เพื่อให้ผลตกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วงพิกัด และสามารถทำให้พลังงานลมที่สูงอยู่ในจุดที่เที่ยงตรงได้
- Tilt angle of rotor shaft เป็นฟังก์ชันหลักสำหรับการป้องกันใบพัดและ tower เสียหาย
- Over wind speed protection ป้องกันให้ความเร็วลมอยู่ในจุดที่มั่นใจได้ว่าปลอดภัย
- Over temperature protection
- Over voltage protection



4.4.5 Dumb Load Box

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวต้านทานสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก สามารถเก็บความร้อนได้ดี และเมื่อเกิดความเร็วลมสูงสุดเกิน Rated wind speed จะเป็นตัวสลายพลังงานที่เกินพิกัดกำลังของ PMSG ที่ Dumb Load Box โดยชนิดที่เราเลือกจะเป็นเทคโนโลยีของ Ginglong

ตารางที่ 4.5 Specification ของ Dump load

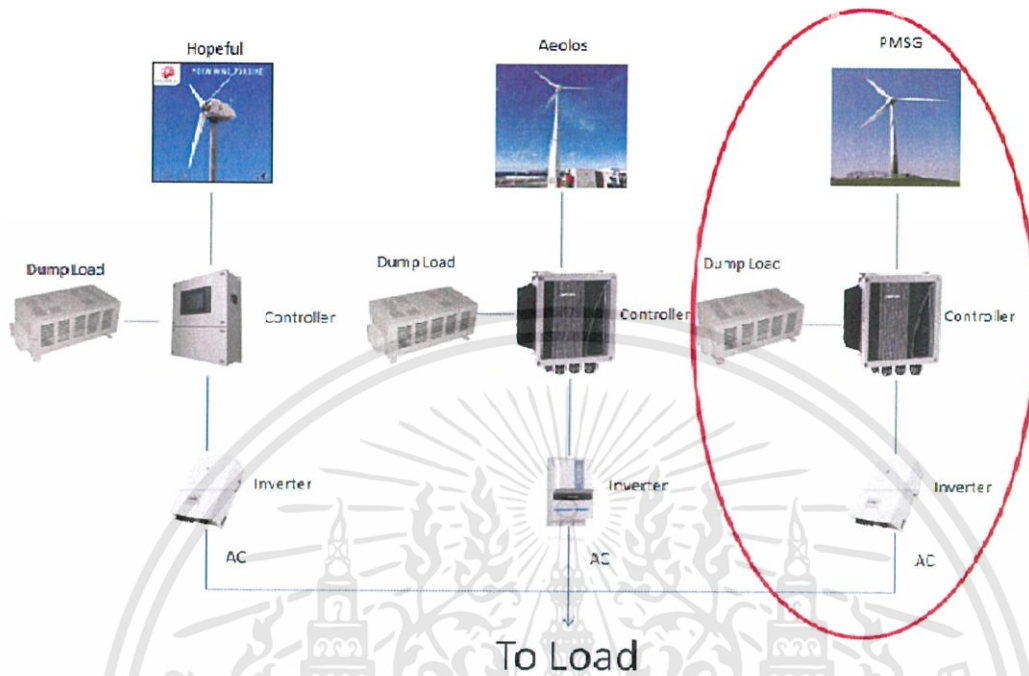
Dump load Specification	Unit	Parameter	
		6.4	-
Item		6.4	-
Model	-	GLL-5K	GLL-4K
Rating input power	W	5000	4000
Maximum input power	W	5500	4500
Maximum input voltage	Vdc	500	500
Maximum input current	Adc	16.6	9
Resistance value	ohms	30	50
Operation enviroment Temperature	Celsius	-50~60	-50~60
Protection degree	-	IP54	IP54
Insulated voltage	Vac	1500(1min)	1500(1min)
Width/height/depth	mm2	850*390*265	830*285*180
Weight	Kg	24.5	24.2
Size of cable	mm2	2.5	2.5



รูปที่ 4.10 Dump Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุประบบโดยรวม



รูปที่ 4.11 ระบบโดยรวม

เราได้นำข้อมูลทั้งหมดมารวมกันสรุปได้เป็นรูปที่ 4.10 ซึ่ง ประกอบด้วย

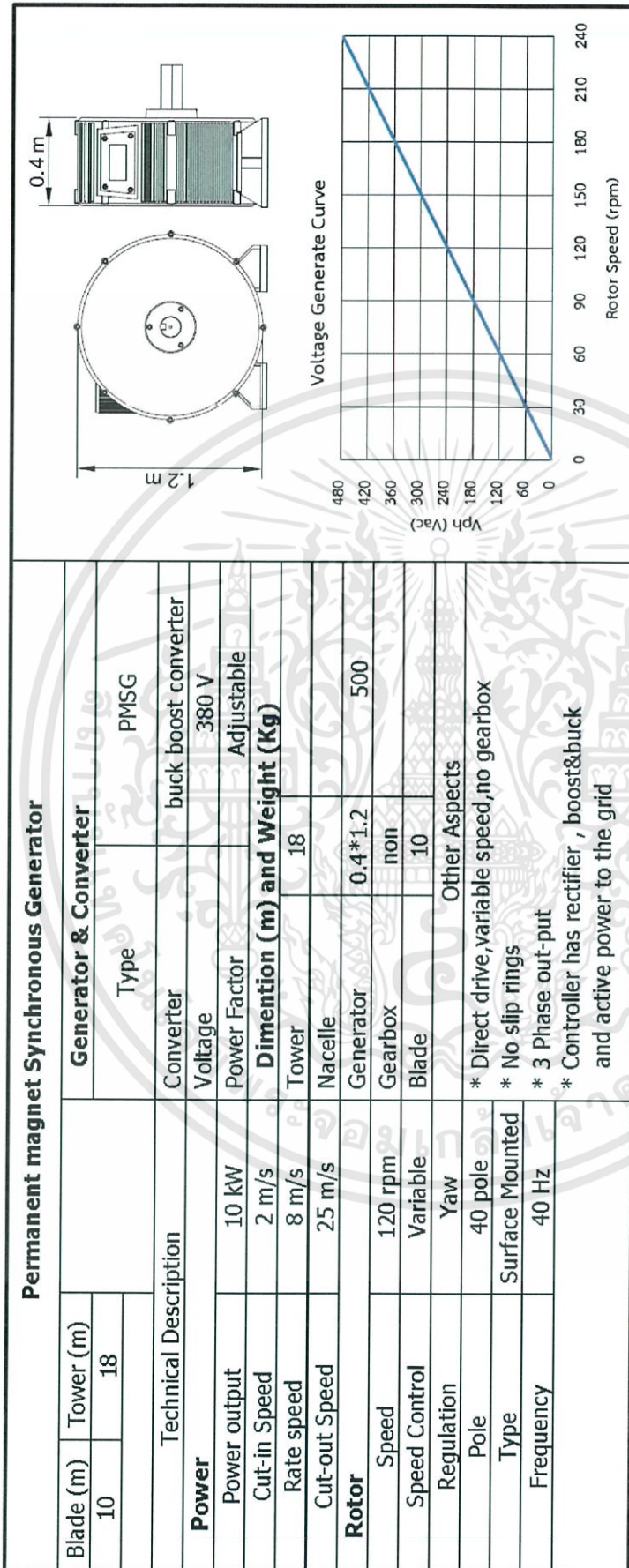
- ใบพัด: NREL's s822 ขนาด 10 เมตร
- เสา: Monopole 18 เมตร
- แบริ่ง: Ball bearing
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า: Permanent Magnet Synchronous Generator

(Surface mount Non-Salient Pole)

- ระบบ: Single channel boost converter
- Controller: Ginlong 20 kW
- Inverter: Ginlong 10 kW
- Dumb load: Ginlong 8 kW

แต่หลังจากติดตั้งแล้วต้องมีการทดสอบเพื่อหาข้อสรุปว่า ระบบที่เราออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพดีที่่สุดหรือไม่ อาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 Specification ของ PMSG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปการทำงานและแก้ไขปัญหา

โครงการ Future Center เป็นโครงการศึกษาและพัฒนาด้านพลังงานทดแทน ภายในโครงการจะมีการจำลองการจ่ายโหลดใช้งานจริงโดยอาศัยกำลังไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ประกอบไปด้วย พลังงานจากแสงอาทิตย์ และ พลังงานลม โครงการนี้จะเป็นโครงการต้นแบบในการพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างยั่งยืนและเป็นแนวทางให้แก่ผู้ที่สนใจด้านพลังงานทดแทนได้ศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป โดยโครงการจะตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ติดเรียบทางด่วนมอเตอร์เวย์

จากการศึกษาค้นคว้าสถิติข้อมูลความเร็วลมในโครงการ Future Center พบว่าที่ ความสูง 18 เมตร มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4 เมตรต่อวินาที ซึ่งถือเป็นความเร็วลมปานกลาง ด้วยเหตุนี้กังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอาจไม่เหมาะสมกับความเร็วลมของประเทศไทยและอาจทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงมีการพิจารณาออกแบบกังหันลมชนิดใหม่เพื่อให้มีความสอดคล้องกับความเร็วลมดังกล่าว โดยเลือกออกแบบสร้างกังหันลม PMSG ที่พิกัด 10 kW เป็นกังหันลมชนิดที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวแกนนอนซึ่งสามารถออกแบบใบพัดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับบริเวณพื้นที่ติดตั้งกังหันลมได้ สามารถควบคุมความเร็วได้โดยการปรับทิศทางการรับลม ให้ประสิทธิภาพสูง แรงบิดสูง และยังสามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมต่ำๆอีกด้วย

โดยเริ่มจากการออกแบบ Power Curve ให้ได้ Cut-in Speed ที่ 2 เมตรต่อวินาที ,Rated Speed ที่ประมาณ 8 เมตรต่อวินาที และ Cut out Speed ที่ 25 เมตรต่อวินาที เพื่อนำไป กำหนด specification ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมี รศ.พิชิต ล้ายอง อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นผู้ออกแบบ จากนั้นได้ทำการออกแบบระบบของกังหันลมโดยเลือกใช้เทคโนโลยีการขับเคลื่อนแบบ Variable speed based on a direct drive synchronous generator ซึ่งใช้ระบบ Single-channel boost converter เพราะเป็นระบบที่เหมาะสมกับกังหันลมที่มีพิกัดกำลังในหลักกิโลวัตต์ต่ำๆ และ แรงดันไม่สูง อีกทั้งยังเป็นระบบที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก ราคาถูก การทำงานของระบบประกอบไปด้วย Controller ขนาด 20 kW กับ Inverter ขนาด 10 kW ของ Ginlong ซึ่งมีช่วงการทำงานใน โหมด MPPT ที่กว้างและยืดหยุ่น สามารถส่งผ่านพลังงานได้กำลังสูงสุด และใช้ร่วมกับ Dump load ขนาด 8 kW

กังหันลมตัวนี้จะถูกติดตั้งร่วมกับกังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอีก 2 ตัว เพื่อใช้ในการศึกษาทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยเบื้องต้นได้คำนวณค่า capacity factor ของ กังหันลมที่ทำการออกแบบ กังหันลมของ Hopeful และกังหันลมของ Aeolos พบว่าค่า CF ของ กังหันลมที่ทำการออกแบบมีค่าสูงกว่ากังหันลมของ Hopeful และกังหันลมของ Aeolos จึงสรุปได้ว่ากังหันลมที่ออกแบบเองจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

จากการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีสามารถกำหนดข้อมูล Specification ของตัว PMSG ซึ่งค่า Parameter ที่ได้นั้น อาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นในการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่จริงจำเป็นต้องมีการปรับตั้งค่าต่างๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ ออกแบบไว้

ซึ่งโครงการ Future Center นั้นถือเป็นต้นแบบการจัดการ การใช้พลังงานทางเลือก หลากรูปแบบร่วมกัน ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายประหยัดพลังงานที่ในปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกให้ความสนใจในประเด็นนี้ ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการใช้พลังงานทางเลือก ในประเทศต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ธนิตนันทน์ แก้วสง่า, อีรพงษ์ กำลิ่งกล้า, อีรพงษ์ โพธิ์วัฒนกุล และกัมพศ วิจิตร, “ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและการบริหารจัดการระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม”, ปรินญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [2] ไพรัช กิจวรวิธ และ ھرรษา วัฒนานุกิจ, “พลังงานลม: เทคโนโลยีจากอดีต สู่ปัจจุบันและอนาคต (WIND POWER: Evolution Technology from the Past to Presence and Futurity)”, Main theme ภูมิปัญญาวิศวกรรมไทย ร่วมใจเพื่อสังคม, ปีที่ 63 ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์ 2553
- [3] เชาวลิต พิทักษ์วงษ์, “การออกแบบและควบคุมการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนาดเล็ก” ปรินญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [4] Volker Quaschnig, Understanding renewable energy systems, London, Earthscan, 2007
- [5] Jawad Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi and M. Rajabi-Sebdani and A. Khan, “Optimal Design of Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Energy Conversion Considering Annual Energy Input and Magnet Volume”, IEEE, 2009.
- [6] Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro, “Power Conversion and Control of Wind Energy Systems”, Wiley, 2011.
- [7] J.F. Manwell, J.F. Mcgowan, A.L. Rogers “Wind Energy Explained Theory, Design and Application”, second edition, Wiley, 2009.
- [8] A.R. Jha, Ph.D. “Wind Turbine Technology”, MC Graw Hill, 2011.
- [9] Pramod, “Wind Energy Engineering”, CRC, 2011.
- [10] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, พลังงานลม [ออนไลน์], แหล่งที่มา http://science.uru.ac.th/pro_doc/doc/12.doc
- [11] สำนักวิชาการพลังงานภาค 1 กระทรวงพลังงาน, องค์ความรู้กังหันลม [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanghanrom/wind.html>
- [12] ไทยกู๊ดวิว, ลม [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.thaigoodview.com/library/contest2551/science04/72/pkwy1.htm>
- [12] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, แผนที่ศักยภาพลมประเทศไทย [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www2.dede.go.th/renew/Twm/main.htm>
- [13] Prapai Technoligise Co., Ltd., Knowledge about Wind Energy [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.prapai.co.th/listgroupknowledge.php?gid=13>
- [14] TDK Corporation of America, Neodymium-Iron-Boron Magnets [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.tdk.co.jp/tefe02/e331.pdf>
- [15] บทเรียนออนไลน์เรื่องตลับลูกปืน, เรียนรู้เรื่องตลับลูกปืน [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://ebearing.samitkoyom.com/physical.php?mp=2&link=4>

[16] Southwest Windpower, Inc., Selectional monopole tower foundation & Installation [ออนไลน์], แหล่งที่มา

<http://www.windenergy.com/sites/www.windenergy.com>

[/files/3-CMLT-1367-01_Skystream_segemented_tower_manual.pdf](http://www.windenergy.com/sites/www.windenergy.com/files/3-CMLT-1367-01_Skystream_segemented_tower_manual.pdf)

[17] Aeolos Wind Energy Ltd., Aeolos Wind Turbine for Sale [ออนไลน์] แหล่งที่มา

<http://www.windturbinestar.com/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและนำไปใช้งานจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม PMSM
ขนาด 10 kW ที่ความเร็วลมต่ำ

FUTURE CENTER PROJECT: THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A LOW SPEED 10 KW
PMSM WIND GENERATION

นายชนตฤณ บุญถนอม นางสาวธนพร ศิริไพบุลย์ นายชนพัฒน์ สัตยชิตี นายปิดิพงษ์ ชมบุหงา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ซอยคลองกรุง 1 แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและการออกแบบเทคโนโลยีกังหันลมที่เหมาะสมกับประเทศไทยซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ โดยทำการศึกษานวัตกรรมกังหันลมแนวอนแบบ Permanent Magnet Synchronous Generator โดยทำการวิเคราะห์ความเร็วลมในพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง และนำผลที่ได้มาทำการออกแบบ Power Curve เพื่อใช้ในการออกแบบสร้าง Generator ที่สามารถให้พลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับ Power Curve ที่ออกแบบมากที่สุด ซึ่งตัว Generator ดังกล่าวได้ทำการออกแบบโดย รศ. พิชิต ลัยของ จากนั้นทำการออกแบบระบบพลังงานลมที่เหมาะสมกับ Generator รวมถึงเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ อาทิเช่น คอนโทรลเลอร์และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้สามารถดึงพลังงานที่ผลิตจากกังหันลมให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด หลังจากนั้นนำกังหันลมที่ออกแบบมาติดตั้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ รวมทั้งทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยกังหันลมที่เราออกแบบนี้จะถูกติดตั้งใน โครงการ Future Center ใช้ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าจ่ายโหลดร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ (Hybrid solar and wind energy system)

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, กราฟกำลัง, ระบบพลังงานลม

Abstract

The objective of this thesis is to present the study and design of wind turbine technology which suitable for Thailand that has low speed wind. This thesis examines the study of horizontal wind turbine technology, Permanent Magnet Synchronous Generator. Then analysis the wind speed of installation area and use the result to design a power curve for design's generator that give an electrical power efficiently. This PMSG is designed by Asso. Prof. Pichit Lumyong. Furthermore, Design the wind energy conversion system which appropriate to the Permanent Magnet Synchronous Generator and also choose power electronic devices such as controller and inverter so that the extraction of energy is at their maximum efficiency. Lastly, the basic design which related to the system. After manufacture wind turbine will be installed to compare the efficiency with the wind turbine which are ordered from

international, Also the thesis include an analysis of economical reason accordingly with the wind speed in Thailand. This wind turbine will be installed at future center project that use wind solar hybrid turbine system.

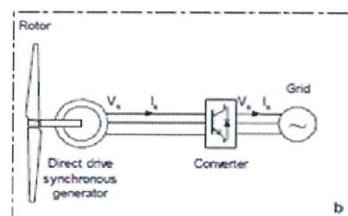
Keyword: Generator, Power Curve, Wind energy conversion system

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานมีสูงขึ้น ในขณะที่พลังงานมีอยู่อย่างจำกัด พลังงานไฟฟ้าก็เช่นกัน ซึ่งถือเป็นพลังงานที่มีความสำคัญและมีความต้องการสูงมากในปัจจุบัน ดังนั้นการคิดค้น พัฒนา หรือการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนก็ถือเป็นสิ่งสำคัญและน่าจะเป็นทางออกที่ดีในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ในอนาคต ซึ่งพลังงานลมถือเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับการส่งเสริมจากทางภาครัฐ อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ไม่มีต้นทุนทางเชื้อเพลิง และที่สำคัญยังเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด ดังนั้นการศึกษานวัตกรรมกังหันลมจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต เพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดดังกล่าวทางคณะผู้จัดทำจึงมีความคิดที่จะศึกษา พัฒนา และออกแบบระบบกังหันลมขนาดเล็ก เพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย โดยจะมุ่งเน้นศึกษาไปที่ตัว Generator ของกังหันลมเป็นหลัก เพื่อทำให้เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนด้านพลังงานลมและสามารถนำมาปรับให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอนาคต

2. Permanent Magnet Synchronous Generator

PMSG หรือ Permanent Magnet Synchronous Generator เป็นกังหันลมแนวอนแบบ Variable speed based on a direct drive synchronous generator ที่มีรูปแบบการทำงานดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานของกังหันลมแนวอนแบบ Variable speed based on a direct drive synchronous generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเป็นการใช้ Generator แบบ Synchronous ที่ไม่ต้องการ gear box ในการประกอบ และมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหตุที่เลือกใช้กังหันลมแนวอนเนื่องจาก มีพื้นที่รับลมมาก ประสิทธิภาพสูง แรงบิดสูง และรอบจลน์กว่าเมื่อความเร็วเท่ากัน และความเร็วจลน์ที่ต่ำกว่าอีกทั้งเมื่อใช้ Direct drive synchronous generator จะไม่ต้องการ Gear box ทำให้ลดการบำรุงรักษาและมลภาวะทางเสียง ส่วนเทคโนโลยี PMSG นั้นใช้ Permanent Magnet เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กแทน ขดลวดกระตุ้นที่ตัว Rotor จึงลดกำลังสูญเสียที่ขดลวดกระตุ้นและไม่ต้องการ Slip ring อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย จึงเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ เนื่องจากต้องการ cut-in speed (m/s) ที่ต่ำ

3. การทำนาย Power Curve

เราทำการเลือกกังหันลมแนวอนแบบ Variable speed based on a direct drive synchronous generator ที่ใช้เทคโนโลยี Permanent Magnet Synchronous Generator เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ให้พลังงานออกมามีประสิทธิภาพสูง โดยพิกัดของตัวกังหันลมนี้คือ 10 กิโลวัตต์ จึงต้องหาพลังงานกลที่ต้องใช้โดยพลังงานกลที่เราสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{turb} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho_{air} \pi R^2 V_{wind}^3$$

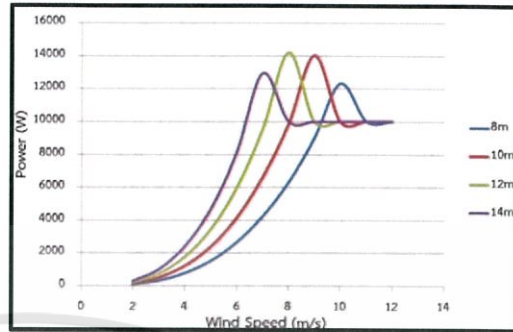
โดย ρ_{air} (ความหนาแน่นของอากาศ Kg/m^3), V_{wind} (ความเร็วลม m/s) และ $C_p(\lambda, \beta)$ คือ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน (Coefficient of performance) เราไม่สามารถควบคุมได้ จึงเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นได้จาก R คือ รัศมีของใบพัด

โดยทำการเปรียบเทียบที่ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8, 10, 12, 14 เมตร และใช้ค่า $C_p = 0.4$ ซึ่งตามปกติแล้ว C_p จะมีค่าประมาณ 0.35-0.59 และค่า $\rho_{air} = 1.225 Kg/m^2$

ตารางที่ 1 การออกแบบ Power Curve

v ความเร็วลม (m/s)	Pm พลังงานกลที่ได้ (kw)			
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (m)			
	8 m	10 m	12 m	14 m
2	98.52	153.93	221.67	301.71
3	332.50	519.54	748.13	1018.30
4	788.16	1231.50	1773.36	2413.74
5	1539.38	2405.28	3463.60	4714.35
6	2660.04	4156.32	5985.11	8146.40
7	4224.05	6600.09	9504.13	12936.18
8	6305.30	9852.03	14156.92	19309.98
9	8977.66	14027.60	20199.74	27494.10
10	12315.04	19242.25	27708.84	37714.81
11	16391.32	25611.44	36880.47	50198.42
12	21280.39	33250.61	47880.88	65171.20

แต่เนื่องจากพิกัดของกังหันลมเราคือ 10 kW จึงทำการพล็อตกราฟ Power Curve ที่ความเร็วลมสูงสุดที่ถึงพิกัดได้ดังนี้

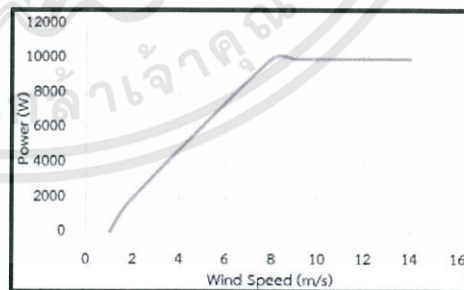


รูปที่ 2 กราฟเปรียบเทียบ Power Curve ของกังหันลมที่เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดขนาดต่างๆ

จากการพิจารณาเราพบว่าที่ใบพัดขนาด 10 m จะเริ่มให้พลังงานที่ความเร็วลมประมาณ 3 m/s และได้พลังงานเต็มพิกัดที่ความเร็วลมประมาณ 8 m/s แต่ก็ยังพบปัญหาที่ว่า ที่ความเร็วลม 4 m/s ยังให้พลังงานที่ต่ำจนเกินไป

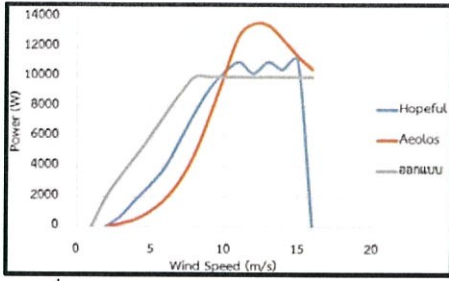
4. การออกแบบ Power Curve ที่เหมาะสมกับความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้ง

การออกแบบ Power Curve ของกังหันลมขนาด 10 kW ที่ใบพัดขนาด 10 m ต้องการออกแบบให้สามารถสร้างพลังงานที่ความเร็วลมต่ำได้ โดยเบื้องต้นเราต้องการค่าดังนี้: Cut in Speed ที่ 2 m/s, Rated Speed ที่ประมาณ 8 m/s และ Cut out Speed ที่ 25 m/s ดัง Power Curve ในรูปที่ 3.5 ซึ่งจาก Power Curve ของกังหันลมที่ได้นำการออกแบบ Generator นี้ จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วลม 2 m/s จะได้กำลังไฟฟ้า 2000 W และที่ความเร็วลม 4 m/s จะได้กำลังไฟฟ้า 5000 W และกำลังไฟฟ้าจะเริ่มเข้าสู่พิกัด (10 kW) ที่ความเร็วลมประมาณ 8 m/s ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้ง



รูปที่ 3 Power Curve เหมาะสมกับพื้นที่ติดตั้ง

เมื่อนำ Power Curve ของกังหันลมที่ได้ทำการออกแบบ มาทำการเปรียบเทียบกับ Power Curve ของกังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งได้ทำการเลือกมา 2 ยี่ห้อ คือ Hopeful และ Aeolos



รูปที่ 4 เปรียบเทียบ Power Curve กับท้องตลาด

จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า Power Curve ที่ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่ สามารถให้กำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำ หรือเฉลี่ยที่ 4 m/s ได้มากกว่ากังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่ความเร็วลมต่างๆ อีกทั้งยังมี cut in speed ต่ำ ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมสำหรับความเร็วลมในประเทศไทย

อีกทั้งได้มีการคำนวณค่า Capacity Factor ซึ่งคือค่าอัตราส่วนของพลังงานที่กังหันลมผลิตออกมาได้จริงต่อพลังงานที่ติดตั้งกังหันลมตัวนั้นผลิตได้โดยใช้โปรแกรม Wind cap (คิดที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4 m/s) ซึ่งสรุปออกมาได้เป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 2 ค่า Capacity Factor ของกังหันลมแต่ละตัว

กังหันลม	พลังงานที่ผลิตได้ในปี	Capacity Factor
ออกแบบเอง	33780.61 Kwh	38.562 %
Hopeful	21440.05 Kwh	24.474 %
Aeolos	17327.70 Kwh	19.180 %

ทำให้เราคำนวณกังหันลมที่เราออกแบบเองจะผลิตพลังงานได้สูงมากกว่ากังหันลมที่ซื้อจากต่างประเทศ นั่นก็คือ กังหันลมเราเหมาะสมกับความเร็วลมในพื้นที่ที่ตั้ง Future Center นั่นเอง

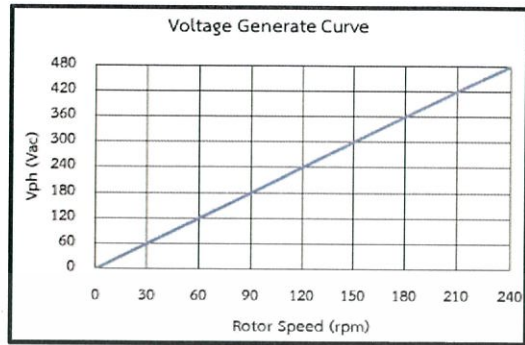
6. การเลือกระบบแปลงพลังงานลมและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบ Generator สำหรับกังหันลมขนาด 10 kW นั้นได้ความร่วมมือจาก รศ. พิเชิด สายอง อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญทางด้าน Machine เป็นผู้ออกแบบ Dimension รวมทั้งพิกัดต่างๆ ของ Generator เพื่อใช้สำหรับกังหันลม โดยรายละเอียดต่างๆ ของ Generator เป็นดังนี้

ตารางที่ 3 Specification of PMSG

Permanent Magnet Synchronous Generator	
น้ำหนัก	500 Kg
ความยาว	50-60 cm
เส้นผ่านศูนย์กลาง	1.2 m
ชนิดโรเตอร์	Surface Mounted (Non-Silent Pole)
Pole	40 Pole
ความถี่	40 Hz
ความเร็วพิกัด	120 rpm
พิกัดกำลัง	10Kw
Output Voltage	380 V

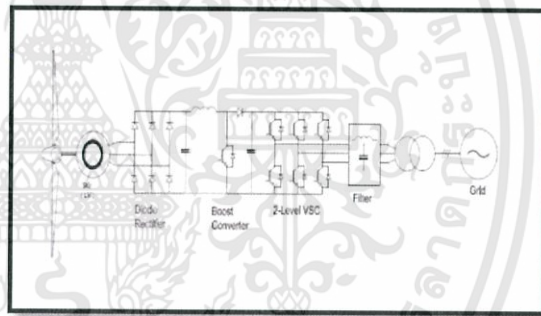
และสามารถสร้างแรงดันได้ดังกราฟ



รูปที่ 5 กราฟแรงดันของ Generator

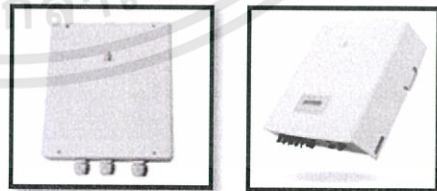
เราได้นำข้อมูลเบื้องต้นเหล่านี้มาเลือกพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

- 1) ระบบพลังงานลม
- 2) อุปกรณ์ Controller ที่ประกอบด้วย Diode Rectifier และ Boost converter
- 3) อุปกรณ์ Inverter ที่ใหม่ MPPT
- 4) เสา
- 5) ใบพัด



รูปที่ 6 Single Channel Boost Converter

- Controller และ Inverter เลือกใช้ของ Ginlong เนื่องจากหลักจากได้ทำการวิเคราะห์แล้ว ระดับแรงดันการใช้งานที่กว้างทำให้สามารถส่งผ่านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

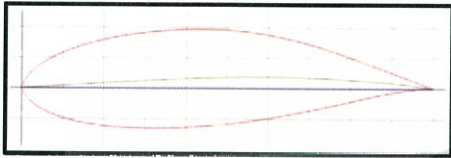


รูปที่ 7 Controller ขนาด 20 kW และ Inverter ขนาด 10 kW ของ Ginlong

- เสาใช้ประเภท Monopole สูง 18 เมตร เพราะกงาน มีความน่าเชื่อถือ และสวยงาม และใบพัดใช้รุ่น NREL's s822 เนื่องจากสามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วลม 1-10 m/s ซึ่งเป็นความเร็วลมในพื้นที่ที่ตั้ง



รูปที่ 8 เสา Monopole



รูปที่ 9 ใบพัดใช้รุ่น NREL's s822

7. สรุป

จากการศึกษาค้นคว้าสถิติข้อมูลความเร็วลมในโครงการ Future Center พบว่าที่ความสูง 18 m มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4 m/s ซึ่งถือเป็นความเร็วลมปานกลาง ด้วยเหตุนี้กังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอาจไม่เหมาะสมกับความเร็วลมของประเทศไทยและอาจทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงมีการพิจารณาออกแบบกังหันลมขึ้นใหม่เพื่อให้มีความสอดคล้องกับความเร็วลมดังกล่าว โดยเลือกออกแบบสร้างกังหันลม PMSG ที่พิกัด 10 kW เป็นกังหันลมชนิดที่มีแกนเพลอยู่ในแนวแกนนอนซึ่งสามารถออกแบบใบพัดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับบริเวณพื้นที่ติดตั้งกังหันลมได้ สามารถควบคุมความเร็วได้โดยการปรับทิศทางการรับลม ให้ประสิทธิภาพสูงแรงบิดสูง และยังสามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมต่ำๆ อีกด้วย

โดยเริ่มจากการออกแบบ Power Curve ให้ได้ Cut-in Speed ที่ 2 m/s, Rated Speed ที่ประมาณ 8 m/s และ Cut out Speed ที่ 25 m/s เพื่อนำไปกำหนด Specification ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมี รศ.พิชิต ลำยอง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นผู้ออกแบบ จากนั้นได้ทำการออกแบบระบบของกังหันลมโดยเลือกใช้เทคโนโลยีการขับเคลื่อนแบบ Variable speed based on a direct drive synchronous generator ซึ่งใช้ระบบ Single-channel boost converter เพราะเป็นระบบที่เหมาะสมกับกังหันลมที่มีพิกัดกำลังในหลักกิโลวัตต์ต่ำๆ และแรงดันไม่สูง อีกทั้งยังเป็นระบบที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก ราคาถูก การทำงานของระบบประกอบไปด้วย Controller ขนาด 20 kW กับ Inverter ขนาด 10 kW ของ Ginlong ซึ่งมีช่วงการทำงานในโหมด MPPT ที่กว้างและยืดหยุ่น สามารถส่งผ่านพลังงานได้กำลังสูงสุด และใช้ร่วมกับ Dump load ขนาด 5 kW

กังหันลมตัวนี้จะถูกติดตั้งร่วมกับกังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอีก 2 ตัว เพื่อใช้ในการศึกษาทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยเบื้องต้นได้คำนวณค่า capacity factor ของกังหันลมที่ทำการออกแบบกังหันลมของ Hopeful และกังหันลมของ Aeolos พบว่า

ค่า CF ของกังหันลมที่ทำการออกแบบมีค่าสูงกว่ากังหันลมของ Hopeful และกังหันลมของ Aeolos จึงสรุปได้ว่ากังหันลมที่ออกแบบเองจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

โดยโครงการ Future Center นั้นถือเป็นต้นแบบการจัดการใช้พลังงานทางเลือกหลายรูปแบบร่วมกัน ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายประหยัดพลังงานที่ในปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกให้ความสนใจในประเด็นนี้ ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการใช้พลังงานทางเลือกในประเทศต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนิศันต์ แก้วสง่า, ชีรพงศ์ กำลิ่งกล้า, ชีรพงษ์ โพธิ์วัฒนกุล และ กิมพศ วิจิตร, “ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและการบริหารจัดการระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม”, ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [2] เชาวลิต พิทักษ์วงษ์, “การออกแบบและควบคุมการทำงานของกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนาดเล็ก” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [3] Volker Quaschnig, “Understanding renewable energy systems”, London, Earthscan, 2007
- [4] Jawad Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi and M. Rajabi-Sebdani and A. Khan, “Optimal Design of Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Energy Conversion Considering Annual Energy Input and Magnet Volume”, IEEE, 2009.
- [5] Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro, “Power Conversion and Control of Wind Energy Systems”, Wiley, 2011.
- [6] J.F. Manwell, J.F. Megowan, A.L. Rogers “Wind Energy Explained Theory, Design and Application”, second edition, Wiley, 2009.
- [7] A.R. Jha, Ph.D. “Wind Turbine Technology”, MC Graw Hill, 2011.
- [8] Pramod, “Wind Energy Engineering”, CRC, 2011.
- [9] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, พลังงานลม [ออนไลน์], แหล่งที่มา http://science.uru.ac.th/pro_doc/doc/12.doc
- [10] สำนักวิชาการพลังงานภาค 1 กระทรวงพลังงาน, องค์ความรู้กังหันลม [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanghanrom/wind.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายชนตถุณ บุญถนอม

ที่อยู่: 699/1ร ซ.ราชฎร์ประสิทธิ์ ต.บ้านไชด อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000

เบอร์โทรศัพท์: 084-649-1007

E-mail address: thanatin_p@hotmail.com



นางสาวชนพร ศิริไพบูลย์

ที่อยู่: 76/2 หมู่ 3 ถ.สุขุมวิท ต.เสม็ด อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000

เบอร์โทรศัพท์: 081-435-3945

E-mail address: may-slam@hotmail.com



นายชนพัฒน์ สัตยชาติ

ที่อยู่: 31/108 หมู่ 19 ซ.21 ถ.พุทธมณฑลสาย 2 เขตทวีวัฒนา

จ.กรุงเทพมหานคร 10170

เบอร์โทรศัพท์: 084-107-9393

E-mail address: bomb26587@hotmail.com



นายปิติพงศ์ ชมบุหงา

ที่อยู่: 6 หมู่ 7 ต.วัดตะกุก อ.บางบาล จ.พระนครศรีอยุธยา 13250

เบอร์โทรศัพท์: 080-286-4050

E-mail address: mr.been_pitipong@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้