



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบทันเวลา
Real-time Wind Turbine Simulator with Induction Motor

คณะผู้วิจัย

นายสรรรถพล คุ่มทรัพย์

นายบุญช่วย เจริญผล

นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
งบประมาณผลประโยชน์ ปี พ.ศ. 2553

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

RMUTK - CARIT



3 2000 00094360 7

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยได้จัดทำเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบ Real-time เพื่อช่วยสนับสนุนนักวิจัยที่ต้องการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับพลังงานลม โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ และอุตสาหกรรมวิจัย ปีงบประมาณ 2553 ทั้งนี้ที่มวิจัยขอขอบคุณนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าสองท่านคือ นายนพรัตน์ ม่วงคุ้มและนายวิษณุ เหมือนแตร ที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำเครื่องต้นแบบ และเก็บผลการทดลอง

หัวข้อวิจัย	เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบทันเวลา
ผู้วิจัย	นายสรรรพพล คุ้มทรัพย์ นายบุญช่วย เจริญผล นายชาญฤทธิ์ ธาราตันดิสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีงบประมาณ	2553

บทคัดย่อ

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบ Real-time มีข้อดีที่ทำให้การทดสอบระบบกังหันลมทำได้สะดวก รวดเร็ว ประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่าย และมีประสิทธิภาพคุ้มทุนมากขึ้น เนื่องจากการทดสอบกับกังหันลมจริง ทำได้ยาก มีค่าใช้จ่ายสูง และไม่เหมาะกับการนำมาออกแบบระบบควบคุมเพราะการทดสอบระบบควบคุมต้องการทดสอบด้วยความเร็วลมคงที่ ที่ค่าๆหนึ่ง หรือความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามที่กำหนด แต่กังหันลมจริงไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความเร็วลมจริงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่แน่นอน เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟส จะใช้วิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมือนกับแรงบิดที่เกิดจากกังหันลมจริง โดยการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดให้มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลม โดยใช้วิธีการสร้างแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) และควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Matlab/Simulink และส่งข้อมูลผ่านการ์คอินเตอร์เฟส ออกมาในลักษณะแบบทันเวลา (Real Time) ไปที่ตัวอินเวอร์เตอร์สั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1kW สร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลม ทำให้สามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริงได้

Abstract

The propose of Real-time Wind Turbine Simulator with Induction Motor made for test control system to the development of wind turbine design to optimal and reduce the costs of wind power how to make wind turbine more economical and efficient. Cause from difficult of testing need to wind speed constant value but actual wind speed has to variable and turbulence. There can't control its.

The Wind Turbine Simulator with Induction Motor Controlled and Display by Interface card use a squirrel cage induction motor is proposed for a wind simulator as a torque-generating source. A torque-generating relation to power coefficient (C_p). The program Matlab/Simulink include the mathematical model of the wind turbine to calculate reference signal (Torque reference) to interface card for passed generated code to real-time signal sent to an torque control inverter create a torque-generating relation to power coefficient (C_p) and implement to induction motor 1 kW create a torque-generating relation to power coefficient (C_p). The Wind Turbine Simulator with Induction Motor Controlled and Display by Interface card responses confirms that the system can perform satisfactorily under step changes of torque reference, power reference and load disturbances.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 หลักการของพลังงานลม	4
2.2 ประเภทของกังหันลม	6
2.3 ประเภทของการจำกัดพลังงาน	7
2.4 ช่วงการทำงานของกังหันลม	9
2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบเหนี่ยวนำ	12
2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	17
2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น	25
2.8 สักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย	25
บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย	
3.1 โครงสร้างของเครื่องจำลองกังหันลม	36
3.2 การพิกัดการจำลองของเครื่องจำลองกังหันลม	37
3.3 ตำราและเก็บข้อมูล	39
3.4 แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)	41
3.5 แบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Rotor Model)	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การ์ดอินเตอร์เฟสDS1104	47
3.7 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJI รุ่น FRENIC MEGA	48
3.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นขนาด 1 kW	49
บทที่ 4 ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์	
4.1 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมกับโปรแกรม Matlab/Simulink	53
4.2 การทดสอบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	57
4.3 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วย การ์ดอินเตอร์เฟส	59
4.4 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผล ด้วยการ์ดอินเตอร์เฟสที่ค่าความเร็วลมต่างๆ	64
4.5 การทดสอบโหลดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	77
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย	77
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก ก. รูปงานวิจัย	79
ภาคผนวก ข. รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	80
ภาคผนวก ค. บทความวิจัย	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง	37
3.2 ข้อมูลศึกษาภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี	39
3.3 ข้อมูลของสถานที่เก็บข้อมูลความเร็ว	40
3.4 ค่าของ C_p เทียบกับ λ	46
4.1 ข้อมูลการทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น	67

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปริมาณการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม	5
2.2 กระบวนการเกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์	7
2.3 การทำงานของกังหันลม	9
2.4 กราฟการทำงานของกังหันลม	10
2.5 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_T) กับแอมพลิจูด (λ)	11
2.6 เส้นทางการควบคุมกังหันลม ณ ความเร็วลมต่างๆ	12
2.7 มอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ	13
2.8 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	13
2.9 ภาพตัดขวางของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก	14
2.10 ลักษณะสมบัติของแรงบิดต่อความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก	15
2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก	16
2.12 การลดลงของแรงบิดเมื่อความเร็วสูงกว่ามาตรฐาน	17
2.13 พื้นฐานของอินเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM	18
2.14 Three Phase Pulse Width Modulation	19
2.15 การควบคุมแบบ V/f	19
2.16 แนวแกนสนามแม่เหล็ก d และ q	20
2.17 แนวแกนสนามแม่เหล็ก d และ q เปรียบเทียบระบบ DC กับ AC	21
2.18 วงจรการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	22
2.19 วงจรพื้นฐานของการควบคุมแบบเวกเตอร์คอนโทรล	23
2.20 การควบคุมแรงบิดโดยอินเวอร์เตอร์	24
2.21 วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้น	25
2.22 อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	27
2.23 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย	28
3.1 ฟังก์ชันคอนโทรลดำเนินการ	36
3.2 โครงสร้างและรายละเอียดของเครื่องจำลองกังหันลม	37
3.3 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพมหานคร ช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4 การวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง	40
3.5 ข้อมูลผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง ณ.ชั้น 11 คึกคะณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	41
3.6 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร	42
3.7 ความเร็วลมที่วัดได้จริง กรุงเทพฯ	43
3.8 ความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)	43
3.9 แบบจำลองกังหันลม	44
3.10 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม	45
3.11 บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink	46
3.12 ค่าของ C_p เทียบกับ λ	46
3.13 การ์ดอินเทอร์เฟซ DS1104 และอุปกรณ์ต่อพ่วง	47
3.14 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJI รุ่น FRENIC MEGA	48
3.15 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นขนาด 1 kW	49
4.1 การทดสอบระบบของเครื่องกังหันจำลองกังหันลมใน Matlab/Simulink	53
4.2 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองความเร็วลม	54
4.3 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองกังหันลม	55
4.4 ค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองกังหันลม	55
4.5 ค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Model) ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ	56
4.6 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย L1, L2	57
4.7 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย L2, L3	57
4.8 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย L1, L3	57
4.9 กระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย L1	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10 กระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย L2	58
4.11 กระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย L3	58
4.12 การเชื่อมต่อคาร์ดิเตอร์เฟสระหว่างคอมพิวเตอร์กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	59
4.13 การเลือก Block set D/A	60
4.14 เลือกช่องเอาต์พุตของ Block set D/A	60
4.15 การกำหนดค่าคุณลักษณะการจำลอง	61
4.16 การส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์ดิเตอร์เฟสทำการประมวลผลแบบทันเวลา	61
4.17 สัญญาณแรงบิดเมื่อความเร็วลม 3 m/s	62
4.18 สัญญาณจากโปรแกรม Matlab/Simulink	62
4.19 สัญญาณแบบทันเวลา	63
4.20 สัญญาณที่ได้จากแรงบิดของมอเตอร์	64
4.21 หน้าต่างของโปรแกรม Control Desk	65
4.22 สัญญาณความเร็วลม 3 m/s	65
4.23 สัญญาณแรงบิดที่ได้จากความเร็วลม 3 m/s	65
4.24 สัญญาณความเร็วลม 5 m/s	66
4.25 สัญญาณแรงบิดที่ได้จากความเร็วลม 5 m/s	66
4.26 วงจรการทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น	67
4.27 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดแต่ละชั้น	68
4.28 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดแต่ละชั้น	68

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่ก่อมลพิษ และยั่งยืน ซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นพลังงานสะอาด (Green Power) อาทิเช่นพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวภาพ เป็นต้น โดยเฉพาะด้านพลังงานสะอาดในประเทศไทยเองก็มีการวิจัยด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมค่อนข้างหลากหลายและติดตั้งอยู่หลายแหล่งตามศักยภาพของความเร็วลมในประเทศไทย

โครงการวิจัยนี้มีข้อดีที่ทำให้การทดสอบระบบควบคุมที่ทำให้สะควก รวดเร็ว ประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่าย ทำให้การออกแบบกังหันลมมีการลดต้นทุน ประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่าย สะควก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพคุ้มทุนมากขึ้น เนื่องจากการทดสอบกับกังหันลมจริงทำได้ยาก มีค่าใช้จ่ายสูงและไม่เหมาะกับการนำมาออกแบบระบบควบคุมเพราะการทดสอบระบบควบคุมต้องการทดสอบที่ความเร็วลมคงที่ ที่ค่าๆหนึ่ง หรือที่ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามที่กำหนด แต่กังหันลมจริงไม่สามารถทำได้เนื่องจากความเร็วลมจริง มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่แน่นอน การสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการดิสเพลย์ จะใช้วิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมือนกับแรงบิดที่เกิดจากกังหันลมจริง โดยการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดให้มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลม โดยใช้วิธีการสร้างแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) และควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และส่งข้อมูลผ่านการดิสเพลย์ ออกมาในรูปแบบทันเวลา ไปที่ชุดอินเวอร์เตอร์สั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลม ทำให้สามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริงได้ การสำรวจวิเคราะห์ระบบพลังงานลมที่ดีจะนำไปสู่การสร้างกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะจะทำให้ระบบควบคุมทำงานได้เต็มประสิทธิภาพคุ้มทุนมากขึ้น และในงานวิจัยนี้เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการดิสเพลย์ ยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการค้นคว้า และพัฒนาการนำพลังงานลมไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 ค้นหาข้อมูลของความเร็วลมและศักยภาพของความเร็วลมในประเทศ และขนาดของกังหันลมที่มีอยู่ในท้องถิ่น

1.1.2 ศึกษาคุณลักษณะของกังหันลมเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.1.3 ศึกษาและพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสำหรับการควบคุมทอร์กของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 kW

1.1.4 ศึกษาและสร้างระบบควบคุมทอร์กและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อให้จำลองพฤติกรรมของกังหันลมตามกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กและความเร็วด้วยการควบคุมแบบทันเวลาได้

1.1.5 ศึกษาและสร้างระบบควบคุมและแสดงผลเครื่องจำลองกังหันลมด้วยการคิอินเตอร์เฟส และ GUI เพื่อให้ใช้งานได้สะดวกและเป็นพื้นฐานสำหรับการวิจัยด้านกังหันลมในอนาคต

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1.2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจำลองกังหันลมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.2.2 สร้างอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสที่สามารถควบคุมทอร์กมอเตอร์เหนี่ยวนำตามแบบจำลองคณิตศาสตร์กังหันลมขนาด 1 kW ที่ออกแบบได้

1.2.3 สร้างระบบควบคุมทอร์กและความเร็วของเครื่องจำลองกังหันลมด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ตรวจจับทอร์ก (Torque sensor)

1.2.4 มีระบบควบคุมและแสดงผลเครื่องจำลองกังหันลมในลักษณะของ GUI และสามารถปรับค่าพารามิเตอร์แบบทันเวลาได้

1.2.5 เป็นเครื่องมือพื้นฐานและความรู้ในการวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทน

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.3.1 ศึกษาหลักวิธีการควบคุมกังหันลมและ การจำกัดพลังงานแบบสตอล

1.3.2 ใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับสร้างแรงบิด (Torque Control Inverter)

1.2.3 ใช้การคิอินเตอร์เฟส เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ ADC, DAC

1.2.4 จำลองการควบคุมกังหันลมชนิดมุมใบพัดคงที่แบบปรับความเร็วได้ที่ใช้ในการจำกัดพลังงานแบบสตอลด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.2.5 สร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซเพื่อควบคุมแรงบิดผ่าน Torque Control Inverter และมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 kW ให้มีพฤติกรรมเหมือนกังหันลมจริง

1.2.6 ทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซ แล้วเก็บผลการทดลอง

1.2.7 ทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซ แล้วเก็บผลการทดลองอีกครั้ง

1.2.8 เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ เช่น การผลิตกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของแรงบิด และการจำกัดพลังงานเป็นต้น

1.2.9 จัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 รวบรวมข้อมูลที่เป็นของกังหันลมปรับความเร็วแบบหมุนใบพัดคงที่ที่ใช้ในการจำกัดพลังงานแบบสตัดล ซึ่งจะเป็นพื้นฐานของการศึกษากังหันลมภายในประเทศไทย

1.4.2 อุปกรณ์การ์ดอินเตอร์เฟซ และ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นประสิทธิภาพสูงใช้งานง่ายเหมาะสมที่จะเป็นต้นแบบในการพัฒนา

1.4.3 เครื่องจำลองกังหันลมที่สร้างขึ้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการทดสอบระบบควบคุมกังหันลมเพื่อความสะดวกรวดเร็วและยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ

1.4.4 เครื่องจำลองกังหันลมที่สร้างขึ้นทั้งหมดสามารถใช้งานได้จริงอีกทั้งยังสามารถใช้เป็นต้นแบบในการสร้างและพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.4.5 ผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ข้อดี ข้อเสียได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่มีต้นกำเนิดจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม กล่าวคือพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในภาคตัดขวางของโลกประมาณ 178,000 ล้านล้านวัตต์ มีเพียง 0.2% เท่านั้นที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนไหวของอากาศที่เรียกว่าพลังงานลมและส่วนนี้ก็ยังผลให้เกิดคลื่นในมหาสมุทรด้วย การใช้ประโยชน์จากพลังงานลมในภาพแบบของกังหันลมเริ่มมาตั้งแต่ 1700 ปีก่อนคริสตกาลมีการพัฒนาใช้ประโยชน์กังหันลมแบบแกนตั้ง (Vertical Axis) ในแคว้นเมโสโปเตเมียและในประเทศจีน ต่อมาราว 400 ปีก่อนคริสตกาล ชาวอียิปต์ได้เริ่มพัฒนา กังหันลมแบบแกนนอน (Horizontal Axis) และมีการพัฒนาต่อเนื่องแพร่หลายเข้าไปในทวีปยุโรปในราวศตวรรษที่ 7 การใช้ประโยชน์ในระยะแรก ๆ นี้เป็นการประยุกต์ใช้งานกลเป็นส่วนใหญ่การพัฒนาใช้ประโยชน์ในลักษณะกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine Generator) เพิ่งจะขยายตัวในระหว่างปี ค.ศ.1930-1960

2.1 หลักการของพลังงานลม

พลังงานลม (E_{wind}) เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้นอากาศที่มีมวล m ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์

$$E_{wind} = \frac{1}{2}mv^2 \quad 2.1$$

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใดๆ (A) เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลาดังนี้ว่า

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

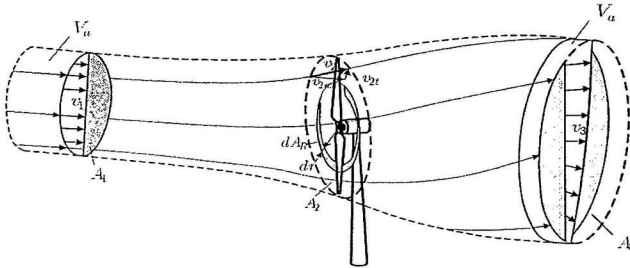
แทนสมการ 2.2 ใน 2.1 จะได้สมการของพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลา ซึ่งก็คือสมการของกำลังงานลม นั่นเอง

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad 2.3$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของอากาศ ($\approx 1.25 \text{ kg/m}^3$)

จากภาพที่ 2.1 พลังงานลมที่สกัดได้จากปริมาตรของอากาศ V_o ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_i และมีความเร็วลม v_1 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมทำให้ความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็น v_3 ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่หน้าตัด A_3 ถูกขยายขึ้นเมื่อ V_o เคลื่อนที่ผ่านกังหัน สามารถเขียนสมการพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_o \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad 2.4$$



ภาพที่ 2.1 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

จะได้สมการของพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดต่อหน่วยเวลา

$$P_{urb} = V_o \frac{dW_w}{dt} = d \frac{V_o \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2)}{dt} \quad 2.5$$

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม

$$\frac{dV_o}{dt} = A_{urb} v_2 \quad 2.6$$

ฉะนั้นจะได้

$$P_{urb} = A_{urb} \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 \quad 2.7$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม A_{turb} ความเร็วลม และลักษณะของใบของกังหันลม ตามทฤษฎีของเบตซ์ (Betz) กำลังงานสูงสุดที่กังหันลมสกัด ได้คือ

$$P_{turb}^{max} = \frac{16}{27} A_{turb} \frac{\rho}{2} V_1^3 \quad 2.8$$

โดยมีความสัมพันธ์ความเร็วลม

$$V_2 = \frac{3}{2} V_1 \text{ และ } V_3 = \frac{1}{3} V_1 \quad 2.9$$

C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยที่กราฟคุณสมบัติจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัด

$$C_p = \frac{P_{turb}}{P_{Wind}} \quad 2.10$$

จากสมการที่ 2.3 ซึ่งจะได้กำลังงานของลมที่ผ่านกังหัน แต่กำลังงานที่กังหันลมสกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตาม ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p ด้วย เพราะฉะนั้นสมมุติให้กังหันมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Power, P_o) จะเป็นดังนี้

$$P_o = \frac{\rho}{2} \pi R^2 V^3 C_p \quad 2.11$$

2.2 ประเภทของกังหันลม

กังหันลมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอาจแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือกังหันแกนตั้ง และกังหันแนวนอน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกังหันแกนนอน ซึ่งโดยทั่วไปนิยมแบ่งประเภทของกังหันแนวนอนนี้ตามลักษณะของใบพัดดังนี้

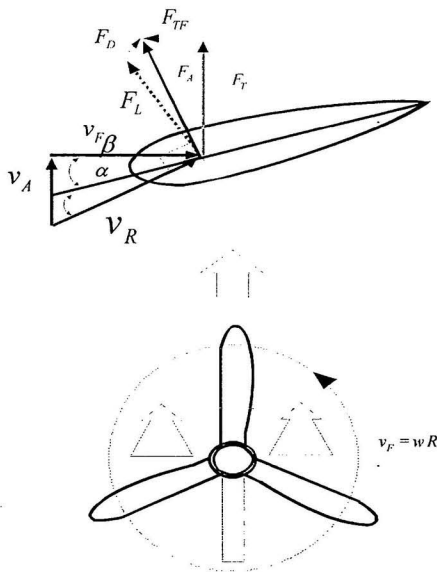
2.2.1 แบบมุมใบพัดคงที่

2.2.2 แบบปรับมุมใบพัดได้

2.3 ประเภทของการจัดพลังงาน

ภาพที่ 2.2 แสดงกังหันลม 3 ใบพัด ที่มีความเร็วลม v_A กระทำต่อใบพัดจากด้านหน้า และแสดงภาคตัดของใบพัดเมื่อมองจากด้านบน (Top View)

พิจารณาภาคตัดของใบพัด v_A คือเวกเตอร์ของความเร็วลมที่กระทำต่อใบพัดจากด้านหน้า และกังหันกำลังหมุนทวนเข็มนาฬิกา จะทำให้ใบพัดเสมือนได้รับความเร็วลมอีกตัวหนึ่ง ในทิศทางตรงข้ามกับการหมุน ซึ่งก็คือเวกเตอร์ v_F ดังแสดงในภาพนั่นเอง เรียกเวกเตอร์นี้ว่า ความเร็วลมเพิ่มเติม(Additional Wind Speed) ผลบวกของ v_A และ v_F ทำให้เกิดเวกเตอร์ความเร็วลมลัพธ์ (Resulting Wind Speed) v_R เวกเตอร์ v_R ที่กระทำต่อใบพัดจะทำให้เกิดแรงขึ้น 2 แรง คือ แรงยก (Lifting Force F_L) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางตั้งฉากกับ v_R และแรงดูด (Drag Force F_D) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางเดียวกับ v_R โดยขนาดของเวกเตอร์ทั้งสอง ขึ้นอยู่กับภาพร่างของใบพัดและขนาดของ v_R



ภาพที่ 2.2 กระบวนการเกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์

ผลบวกของ F_L และ F_D ทำให้เกิดเวกเตอร์ที่เรียกว่า แรงอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Force F_A) ซึ่งส่วนหนึ่งของแรงนี้จะทำให้เกิดแรงผลัก (Thrust Force F_T) ซึ่ง กระทำต่อใบพัด ในทิศทางเดียวกับความเร็วลม มีผลโดยตรงต่อเสาของกังหันลม (Tower) ส่วนที่เหลือจะกลายเป็น แรงสร้างแรงบิด (Tangential or Torque Force $F_{T\tau}$) กระทำต่อใบในทิศทางเดียวกับการหมุน แรงดังกล่าวนี้เองเป็นตัวทำให้เกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์ ที่กระทำต่อใบพัด จะเห็นว่า ขนาดของ แรงบิดที่กระทำต่อใบพัด สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการควบคุมเวกเตอร์ v_R ซึ่งสามารถทำได้โดย มุม β, α นั้นเอง

β คือมุมที่ v_R กระทำต่อแนวแกนใบพัด เรียกว่ามุมพิช (Pitch Angle) เราสามารถปรับ ขนาดของมุมนี้ได้ด้วยการปรับใบพัด ให้แกนใบพัดเอียงด้วยองศาเล็กน้อยตามต้องการ ด้วยวิธีทาง กล ส่วน α คือมุมที่ v_R กระทำต่อแนวแกนใบพัดเรียกว่ามุมปะทะ (Attack Angle) เราสามารถ ปรับขนาดของมุมนี้ได้ 2 วิธีคือ ปรับใบพัดโดยวิธีเดียวกับการปรับ β หรือปรับเวกเตอร์ v_R

เวกเตอร์ v_R ประกอบด้วย v_A และ v_F แต่เนื่องจาก v_A คือความเร็วลมที่กระทำต่อใบพัด ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบใบพัด ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมขนาดและทิศทางได้ ส่วน v_F คือ ความเร็วลมที่ใบพัดมองเห็นเมื่อเกิดการหมุน ดังนั้นจึงสามารถควบคุมได้เฉพาะขนาด โดยการ ปรับความเร็วรอบของกังหันนั้นเอง ซึ่งจะส่งผลต่อ เวกเตอร์ v_R โดยตรง

การจำกัดพลังงานที่เกิดขึ้นบนกังหัน ทำให้ได้โดยการควบคุมแรงบิดอากาศพลศาสตร์ ดังกล่าว ซึ่งแบ่งวิธีควบคุมได้เป็น 2 แบบหลักๆ ดังนี้

2.3.1 จำกัดพลังงานโดยการบังคับให้เกิดปรากฏการณ์สตอล

สตอล เป็นปรากฏการณ์ทางอากาศพลศาสตร์อย่างหนึ่ง ที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่วางอยู่ ในทางไหลของอากาศ เช่น ปีกเครื่องบิน หรือใบพัดกังหัน โดยจะทำให้อากาศที่กำลังไหลผ่านวัตถุ ทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น เกิดการแยกตัวออกจากกัน ส่งผลให้แรงยกลดลง ถ้าปีกเครื่องบินเกิด การสตอล เครื่องบินจะตก แต่สำหรับใบพัดกังหันนั้น สามารถนำปรากฏการณ์นี้มาใช้ประโยชน์ ในการจำกัดพลังงานได้ ซึ่งพบว่าปรากฏการณ์สตอลนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อมุมกระแทก มีขนาดเพิ่มขึ้น จนถึงค่าๆ หนึ่ง ดังนั้น การบังคับให้เกิดปรากฏการณ์สตอล จึงทำได้โดยปรับมุมกระแทกนั่นเอง จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่ามุมกระแทกสามารถควบคุมได้ 2 วิธี ดังนั้นการบังคับให้เกิดสตอลจึง แบ่งเป็น 2 แบบ เช่นกันคือ

2.3.1.1 พาสซีฟสตอล (Passive Stall) คือการทำให้เกิดการสตอล บนใบพัดของ กังหันลม เมื่อความเร็วลมเกินกว่าพิกัดที่ออกแบบไว้ (เกิดได้เองโดยไม่มีการควบคุม) ทำให้เกิด การจำกัดพลังงาน

2.3.1.2 แอ็คทีฟสตอล (Active Stall) คือการทำให้เกิดการสตอล โดยการปรับมุมกระทบบด้วยเวกเตอร์ v_R ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

ก) การควบคุมมุมใบพัดโดยวิธีทางกล

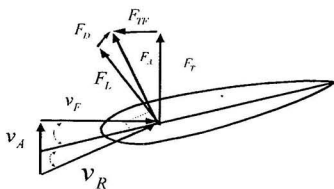
ข) การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบทำให้ v_F มีขนาดซึ่งส่งผลโดยตรงกับ

เวกเตอร์ v_R

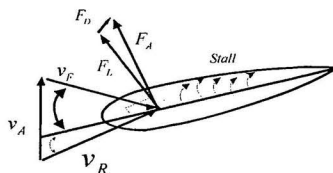
2.3.1.3 จำกัดพลังงานโดยการปรับมุมพิช (Pitch Regulation) ถ้ามุมพิชเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงทุกตัวบนใบพัดมีค่าลดลง รวมทั้งแรงที่ทำให้เกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์ด้วย ดังนั้นพลังงานจึงลดลง

2.4 ช่วงการทำงานของกังหันลม

ช่วงการทำงานของกังหันลม ปกติจะเป็นตัวกำหนดว่า กังหันลมจะเริ่มและหยุดทำงานเมื่อใด ก็คือพลังงานที่กังหันได้รับจากลมในขณะนั้นนั่นเอง โดยกังหันลมจะยังไม่เริ่มทำงานจนกว่า



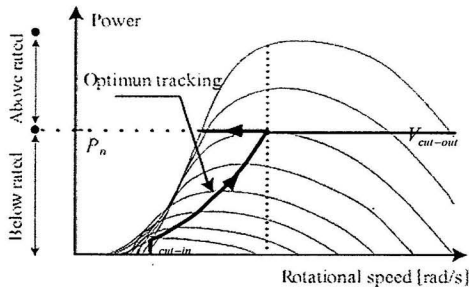
(ก) กังหันทำงานตามปกติ



(ข) เมื่อเกิดปรากฏการณ์สตอล

ภาพที่ 2.3 การทำงานของกังหันลม

พลังงานที่ได้รับจะมีค่ามากเพียงพอและจะหยุดการทำงานเมื่อพลังงานที่ได้รับมีค่ามากเกินไป แล้วเนื่องจากพลังงานดังกล่าวแปรผันตามความเร็วลมที่กระทำต่อกังหัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนกราฟการทำงานของกังหันลมได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟการทำงานของกังหันลม

จากภาพที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า V_{cut-in} จะทำให้กังหันไม่ทำงาน เช่นเดียวกับ ช่วงที่ ความเร็วลมมีค่าสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้กังหันเกิดความเสียหายได้ กังหันจะถูกสั่งให้หยุดทำงานทันที กังหันจะทำงานเมื่อความเร็วลมมีค่ามากกว่า V_{cut-in} ถ้าลมมีความเร็วอยู่ในช่วง Optimum tracking โดยที่พลังงานที่สกัดได้จะอยู่ที่ 100 % คือค่าที่คำนวณไว้แล้วว่าเมื่อลมมีความเร็วเท่ากับค่า ดังกล่าว กำลังที่สกัดได้จะมีค่าเท่ากับพิกัดกำลังพอดี

เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่เรียกว่าความเร็วลมต่ำกว่าพิกัดซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะแปรผันกับความเร็วมกำลังสาม แต่เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ $V_{cut-out}$ จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมสูงกว่าพิกัดซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะต้องถูกจำกัดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดกำลังโดยใช้วิธีจำกัดพลังงานทางอากาศพลศาสตร์ แบบใดแบบหนึ่ง ระหว่างแบบควบคุมให้เกิดปรากฏการณ์การสตอล กับวิธีการปรับมุมพิช สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะกังหันแบบปรับความเร็วได้ ซึ่งใช้วิธีจำกัดพลังงานแบบสตอล

ภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหันกับพลังงานที่สกัดได้จากลมดังภาพที่ 2.6 สามารถใช้ภาพนี้เพื่อเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมกังหันที่ความเร็วลมต่างๆ

โดยกังหันที่มีขนาดและลักษณะของใบพัดต่างกันก็จะมีกราฟคุณลักษณะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังที่กังหันสกัดได้จากลมดังสมการที่ 2.12

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p(v, w, \beta) \quad 2.12$$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มีการปรับมุมพิช ดังนั้นที่มุมพิชคงที่ค่าหนึ่ง C_p จะขึ้นอยู่กับค่าของ v และ w เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วขอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 2.13

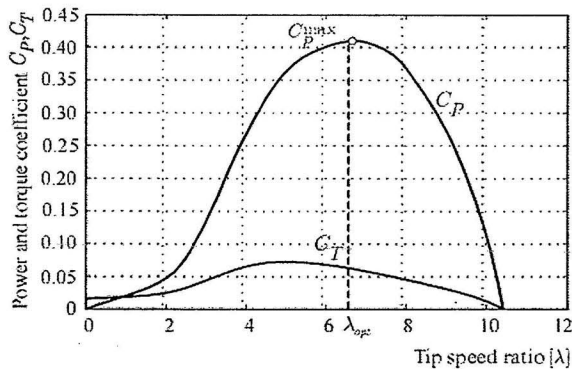
$$\lambda = \frac{wR}{v} \quad 2.13$$

จะได้

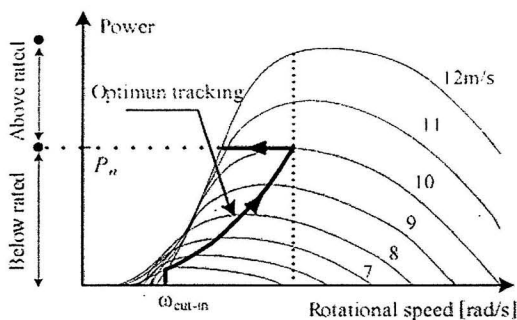
$$P_a = \frac{P}{2} \pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \quad 2.14$$

โดย $C_p(\lambda) = \frac{P_{mrb}}{P_{Wind}}$ ของกังหันลมจริงที่ใช้ในการทดลองนี้ขนาด 1 kW มีลักษณะเป็นดังภาพที่ 2.5

จากสมการที่ 2.14 และจากกราฟของ C_p จึงสามารถหากราฟคุณลักษณะของกังหันที่ใช้ในการทดลองได้ดังภาพที่ 2.6 ถ้าทราบความเร็วลมที่กระทำต่อกังหันก็จะสามารถเลือกงานที่ความเร็วรอบอันจะทำให้เกิดการสกัดกำลังตามที่ต้องการได้ แต่ในทางปฏิบัติ พบว่าการวัดค่าความเร็วลมมีปัญหามากหลายประการและอาจได้ค่าที่ไม่แม่นยำ ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p), สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_t) กับแลมด้า (λ)



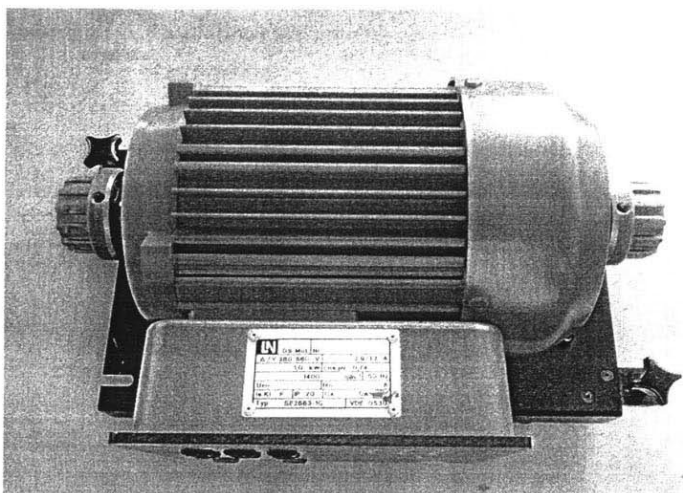
ภาพที่ 2.6 เส้นทางการควบคุมกังหันลม ณ ความเร็วลมต่างๆ

2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบเหนี่ยวนำ

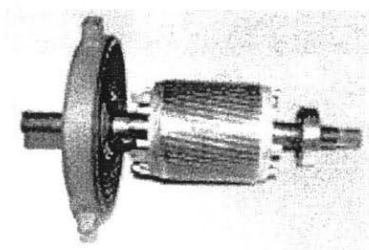
มีคุณสมบัติที่ดีคือมีความเร็วรอบคงที่เนื่องจากความเร็วรอบเหนี่ยวนำมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความถี่ (Frequency) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีราคาถูก โครงสร้างไม่ซับซ้อนสะดวกในการบำรุงรักษาเพราะไม่มีคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมความเร็วแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สามารถควบคุมความเร็ว (Speed Control) ได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึงความเร็วตามพิกัดของมอเตอร์นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม, ขั้วเคลื่อนลิฟท์, ขั้วเคลื่อนสายพานลำเลียง, ขั้วเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้า, เครื่องไต้, เครื่องกลึง มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งตามลักษณะตัวหมุนได้ 2 แบบ คือ

2.5.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Motor)

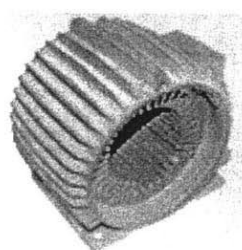
มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบนี้ ตัวโรเตอร์จะมีโครงสร้างแบบกรงกระรอกเหมือนกับโรเตอร์ของสลิปเฟสมอเตอร์ ซึ่งในโครงนี้จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Motor)



ภาพที่ 2.7 มอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ



(ก) โรเตอร์แบบกรงกระรอก



(ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

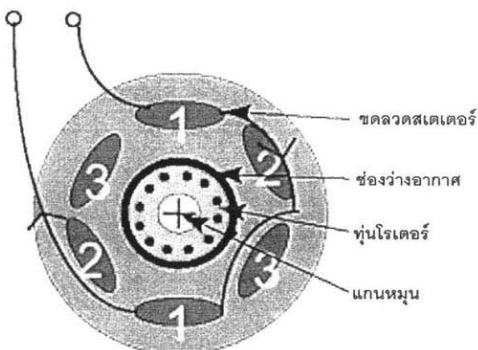
ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.5.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบขดลวด (Wound Rotor Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดนี้ตัวโรเตอร์จะทำจากเหล็กแผ่นบางๆอัดซ้อนกันเป็นตัวหมุนคล้ายๆ อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีร่องสำหรับวางขดลวดของตัวโรเตอร์เป็นขดลวด 3 ชุดสำหรับสร้างขั้วแม่เหล็ก 3 เฟส ปลายของขดลวดทั้ง 3 ชุดต่อกับสลีปรिंग (Slip Ring) จำนวน 3 อันสำหรับเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าครบวงจรทั้ง 3 เฟส การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อจ่ายไฟฟ้าสลับ 3 เฟสให้ที่ขดลวดทั้ง 3 ของตัวสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบๆ ตัวสเตเตอร์ทำให้ตัวหมุน (Rotor) ได้รับการเหนี่ยวนำทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์และขั้วแม่เหล็กนี้จะพยายามดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่รอบๆ ทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนไปด้วยความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัวสเตเตอร์นี้คงที่ตามความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำของจึงหมุนตามสนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน

2.5.3 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบเหนี่ยวนำ

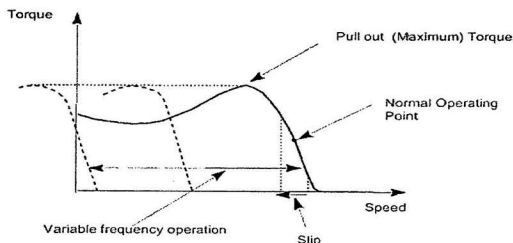
การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะคล้ายกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อขดลวดสเตเตอร์เป็นชุดปฐมภูมิซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่มีขดลวดอยู่ภายนอกต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนเท่ากับความเร็วของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ผลของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน ช่องว่างอากาศ (air gap) ระหว่าง สเตเตอร์ และทุ่นโรเตอร์ทำให้เกิดการไหลของกระแสในขดลวดโรเตอร์ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันจากสนามแม่เหล็กขึ้นบนแกนตัวโรเตอร์โดยเป็นปฏิกิริยาของกระแสที่ไหลรวมกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจึงทำให้โรเตอร์หมุนได้เนื่องจากแรงผลักดันของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในแกนโรเตอร์นั่นเอง



ภาพที่ 2.9 ภาพตัดขวางของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก [3]

2.5.4 ลักษณะสมบัติของแรงบิดต่อความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก

ถ้าการหมุนของโรเตอร์เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนั้นก็คือจะไม่มีการตัดกันของสนามแม่เหล็กหมุนกับแท่งตัวนำโรเตอร์ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลในแท่งตัวนำจึงไม่มีสนามแม่เหล็กย้อนกลับมาด้านจึงไม่มีแรงบิดเกิดขึ้นด้วยเหตุผลดังกล่าวทวน โรเตอร์จึงต้องหมุนด้วยความเร็วที่ช้ากว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยอยู่เสมอทั้งนี้เพื่อให้เกิดการตัดกันของสนามแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดแรงผลัก ผลจึงได้แรงบิดเกิดขึ้นความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กกับความเร็วของโรเตอร์นี้เรียกว่า สลิป (Slip) ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ลักษณะสมบัติของแรงบิดต่อความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก [3]

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนว่าจะหมุนเร็วหรือช้าขนาดไหนจะทำให้ทวนโรเตอร์หมุนช้าหรือเร็วตามสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้น แต่สนามแม่เหล็กหมุนเองก็ขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กที่ออกแบบมาดังนั้นการจะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์จำเป็นต้องควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ตามสมการ

$$Speed(n) = \frac{120f}{P} \quad (2.15)$$

เมื่อ

Speed (n) = ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

Frequency (f) = ความถี่แรงดันไฟฟ้า (Hz)

Pole (P) = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

2.5.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงระรอก

เนื่องจากค่าประกอบส่วนใหญ่ในตัวมอเตอร์จะเป็นค่าอินดักแตนซ์ (Inductance) หรือค่า L เป็นส่วนใหญ่จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงระรอกดังภาพที่ 2.11 ในกรณีที่ต้องการปรับความเร็วรอบลดความเร็วไฟฟ้าจะต้องถูกลดลงตามสมการจะส่งผลทำให้ค่า X_L หรือความต้านทานรวมทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำลดลงตามไปด้วยเมื่อค่าความต้านทานรวมลดลงจะทำให้กระแสไหลเข้าสู่มอเตอร์มากขึ้นอาจทำให้มอเตอร์เสียบได้จึงจำเป็นจะต้องลดแรงดันไฟฟ้าลงด้วยเพื่อควบคุมไม่ให้กระแสไหลเข้าสู่มอเตอร์จนเกินพิกัดจนทำให้มอเตอร์ไหม้และจากภาพที่ 2.11 จะเขียนสมการได้ว่า

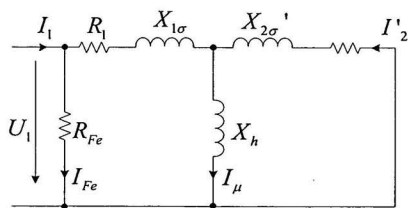
$$I_1 = \frac{U_1}{Z_r} \quad (2.16)$$

เมื่อ

Z_r คือค่าความต้านทานรวมทางไฟฟ้าของมอเตอร์

U_1 คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

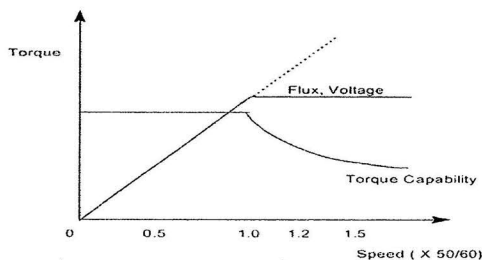
I_1 คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากับมอเตอร์



ภาพที่ 2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงระรอก [3]

แต่ถ้าเป็นการเพิ่มความถี่ขึ้นเกินกว่าค่ามาตรฐาน เช่น มากกว่า 50 Hz เพื่อปรับรอบให้หมุนเร็วขึ้นเกินพิกัดส่งผลให้ Z_r มีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากความถี่ที่ปรับเพิ่มมากขึ้น ตามหลักการจะต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นตามเพื่อจะรักษาระดับของกระแสไฟฟ้า หรือฟลักแม่เหล็กให้มีค่าคงที่ ($I_1 = \frac{U_1}{Z_r}$) เพื่อให้มีความสามารถขับเคลื่อนได้คงที่ และมากเพียงพอต่อการขับเคลื่อนโหลดได้ใน

ความเป็นจริงเราไม่สามารถที่จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงกว่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ เพราะจะทำให้ฉนวนที่ขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดความเสียหาย และลัดวงจรภายในตัวมอเตอร์ได้ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ต้องลดลงตามสมการ ($I_1 = \frac{U_1}{Z_T}$) เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ลดลงจะทำให้สนามแม่เหล็กลดลงตามไปด้วย มอเตอร์จึงไม่สามารถขับโหลดที่มีแรงบิดที่เพิ่มขึ้นได้จำเป็นจะต้องลดแรงบิดลงเราเรียกช่วงนี้ว่า Field Weakening Rang เมื่อความเร็วรอบเกินพิกัดเส้นกราฟแรงบิดจะต้องลดลงจากค่าแรงบิดสูงสุด ดังภาพที่ 2.12

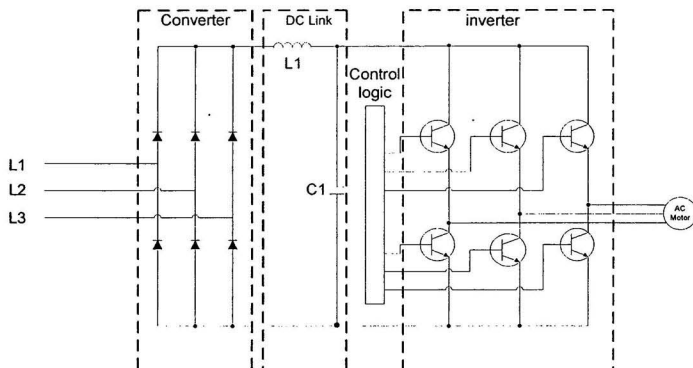


ภาพที่ 2.12 การลดลงของแรงบิดเมื่อความเร็วสูงกว่ามาตรฐาน [3]

2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

การจะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำโดยการควบคุมความถี่เพียงอย่างเดียวไม่ได้ จึงต้องมีการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ด้วย จึงเป็นที่มาของการควบคุมแบบ V/f เมื่อพิจารณาจากข้อดีในด้านราคาของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้ว ทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์ และทางการค้า การพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบหรืออินเวอร์เตอร์สามารถกระทำได้และมีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงง่ายต่อการใช้งานและราคาลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถที่เพิ่มขึ้น อิเล็กทรอนิกส์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยปกติจะแปลงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อน โดยใช้ชุดเรกติไฟเออร์ (rectifier) แล้วนำไฟฟ้ากระแสตรงนี้ไปแปลงผันกลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนความถี่และแรงดันโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์การ

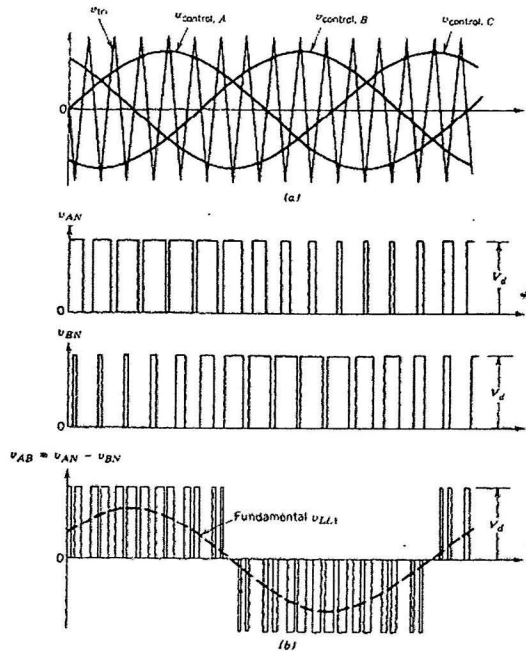
เชื่อมต่อระหว่าง เรกติไฟเออร์กับอินเวอร์เตอร์เรียกว่า DC Link โดยได้แสดงบล็อกไดอะแกรมของ ตัวควบคุมความเร็วหรือที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ดังภาพที่ 2.13



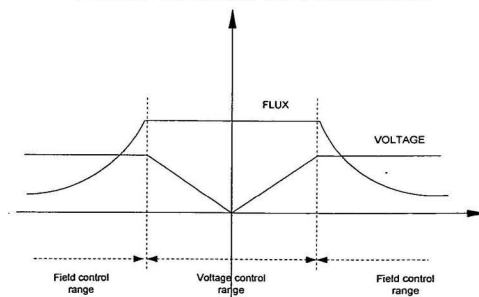
ภาพที่ 2.13 พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบPWM Voltage Source

แหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสป้อนให้กับเรกติไฟเออร์แบบเต็มพิกัดซึ่งจ่ายผ่านให้กับตัวเก็บประจุใน DC link ตัวเก็บประจุจะทำให้ ripple ของแรงดันลดลงและทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าในกรณีที่แหล่งจ่ายขาดหายไปในช่วงเวลาสั้นๆ แรงดันในตัวเก็บประจุจะไม่สามารถควบคุมได้แต่จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสูงสุด (Peak) ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงผันกลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้วิธี Pulse Width Modulation (PWM) ภาพคลื่นที่ต้องการจะถูกสร้างขึ้นมาได้โดยใช้เทคนิคการสวิทช์ของเอาต์พุตทรานซิสเตอร์ (Insulated Gate Bipolar Transistors : IGBTs) ซึ่งเปิดและปิดด้วยความถี่ของการสวิทช์คงที่ที่กระแสดังกล่าวสามารถกำเนิดออกมาได้โดยเปลี่ยนแปลงเวลาเปิดและปิดของ IGBT แต่แรงดันเอาต์พุตจะยังคงเป็นภาพคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมอนุกรมกันไป ดังภาพที่ 2.14

สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



ภาพที่ 2.14 Three Phase Pulse Width Modulation

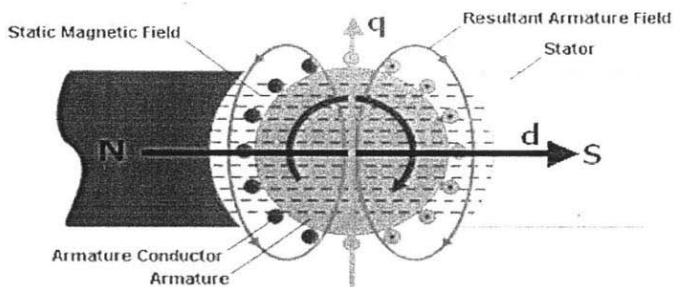


ภาพที่ 2.15 การควบคุมแบบ V/f

2.6.1 อินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์คอนโทรล (Vector Control Inverter)

เวกเตอร์คอนโทรล หรือ ฟิวดออเรียนเต็ดคอนโทรล (Field Oriented Control) คือ วิธีการและระบบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่พัฒนามาจากการควบคุมจากแบบเดิมซึ่งเป็น V/f โดยอาศัยวิธีผสมผสานและหลักการเปลี่ยนแบบการควบคุมความเร็วรอบจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดกระตุ้นแยก เพื่อให้ได้กราฟของแรงบิดและกำลังต่อความเร็วรอบใหม่ความใกล้เคียงกันมากที่สุดดังแสดงในภาพที่ 2.15 เปรียบเทียบกับภาพที่ 2.12 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คำนวณอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนไปพร้อมกับฟลักเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์ให้มาอยู่ในภาพเทียบเคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่เดิมนั้นเวกเตอร์คอนโทรลใช้อุปกรณ์อนาลอกในการคำนวณจึงมีความสั่นเปลี่ยน และราคาสูงมากทำให้ระยะแรกจึงไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายมากนักแต่ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาทั้งทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ความเร็วสูงและอุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการคิดค้นและพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างมากทำให้เวกเตอร์คอนโทรลรุ่นปัจจุบันมีราคาถูกลงใกล้เคียงกับการควบคุมแบบ V/f มีขนาดเล็กลงใช้งานง่ายขึ้นและมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการทำงานมากขึ้นจากแนวคิดที่กล่าวถึงไปแล้วข้างต้นนั้นหากจะทำความเข้าใจ การควบคุมมอเตอร์แบบเวกเตอร์ ก็ต้องเริ่มทำความเข้าใจกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดกระตุ้น ก่อนดังนี้

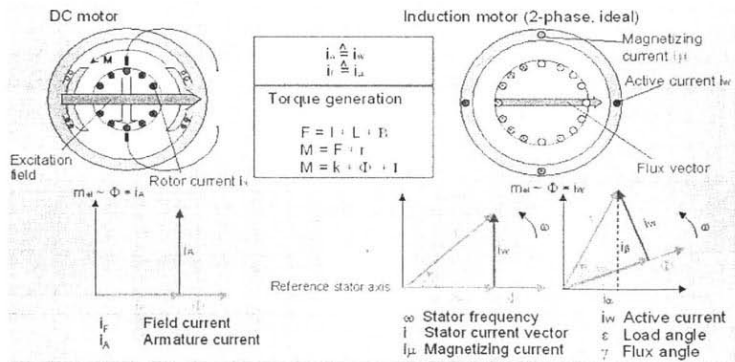
ในการควบคุมความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำได้สองวิธีด้วยกันคือการควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็ก จากขดลวดชุด Field หรือ Separated Exciting Field และจากขดลวดในทุ่นโรเตอร์ หรือขดลวดอาร์เมเจอร์ นั้นเอง



ภาพที่ 2.16 แสดงแนวแกนสนามแม่เหล็ก d และ q [3]

การควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็ก จากขดลวดชุด Field สามารถทำได้โดยวิธีการควบคุมกระแสที่นำไปสร้างสนามแม่เหล็กหลัก หรือ I_f ดังภาพที่ 2.16, 2.17, 2.18 องค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก I_f นี้เกิดขึ้นจากขดลวดบนสเตเตอร์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก มีทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา ดังภาพที่ 2.16, 2.17 และเรียกสนามแม่เหล็กแนวแกนนี้ว่า แกน d หรือ Direct axis

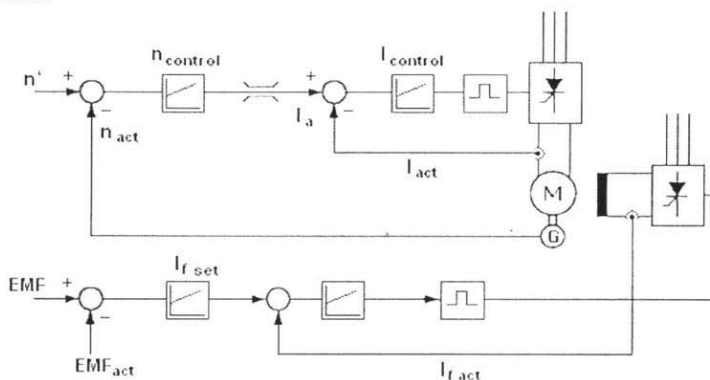
ส่วน I_q หรือกระแสที่นำไปสร้างสนามแม่เหล็กรอบออร์เบเจอร์ องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กนี้จึงเกิดขึ้นโดยรอบขดลวดบนโรเตอร์ โดยมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กหลัก จากทิศได้ขึ้นไปยังทิศเหนือดังภาพที่ 2.16 จึงเรียกแนวแกนของสนามแม่เหล็กนี้ว่า แกน q หรือ Quartered axis ดังภาพที่ 2.16, 2.17 ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงนั้น วิธีที่ง่ายในทางปฏิบัติเราจะให้องค์ประกอบหรือ สนามแม่เหล็กในแนวแกน d มีค่าคงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ เฉพาะในแนวแกน q กล่าวคือ โดยปกติจะให้ I_f มีค่าคงที่ และเมื่อต้องการเปลี่ยนความเร็วรอบ หรือเปลี่ยนแปลงแรงบิด ก็จะมาควบคุม I_q เป็นหลักต่อเมื่อต้องการควบคุมความเร็วเกินพิกัด จึงจะทำการลด I_f ลงการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงจึงแยกออกเป็นสองลักษณะดังภาพที่ 2.17, 2.18 ในสภาวะปกติ I_f จะถูกตั้งค่าไว้ให้คงที่ ตามพิกัดของมอเตอร์ ส่วน I_q จะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการเร่งของมอเตอร์ และแรงบิดของโหลดที่ต้องการ I_{act} ในสภาวะปกติของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงจะควบคุมเพียงตัวเดียวเท่านั้นโดยไม่ต้องไปควบคุมกระแสหรือสนามแม่เหล็กทางด้านขดลวดสนาม I_f ทำให้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงจึงง่ายแก่การควบคุมไม่สลับซับซ้อนเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



ภาพที่ 2.17 แสดงแนวแกนสนามแม่เหล็ก d และ q เปรียบเทียบกับระบบ DC กับ AC [3]

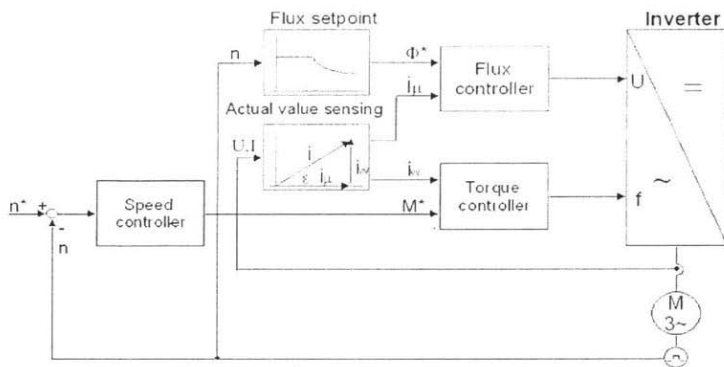
การควบคุมแบบเวกเตอร์ได้ลอกเลียนแบบแนวความคิดและวิธีการของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกล่าวคือ ให้อิมมูนาภาพสนามแม่เหล็กและวิธีการควบคุมแยกออกเป็นสองส่วนคือ

ก. ส่วนที่เป็นองค์ประกอบในแกน d เรียกว่า I_d ทำหน้าที่ควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กในแกน d โดยปกติจะมีค่าคงที่ขั้วแวนกรณี่มอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบเกินพิคค
ข. ส่วนที่เป็นองค์ประกอบในแกน q เรียกว่า I_q ทำหน้าที่เหมือน I_a ของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดย I_q จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร่งและแรงบิดด้านของโหลดคั้งนั้นเมื่อต้องการเปลี่ยนความเร็ว (มีความเร่ง) และเพิ่มหรือลดโหลดทางกลก็จะปรับที่ I_q โดยตรง



ภาพที่ 2.18 วงจรการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [3]

จากที่กล่าวมาข้างต้นภาพแบบแนวความคิดของการควบคุมแบบเวกเตอร์เมื่อทำการเปรียบเทียบจึงเหมือนกับวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงเกือบทุกประการดังภาพที่ 2.17 ที่แสดงโครงสร้างการทำงานเมื่อเปรียบเทียบกัน



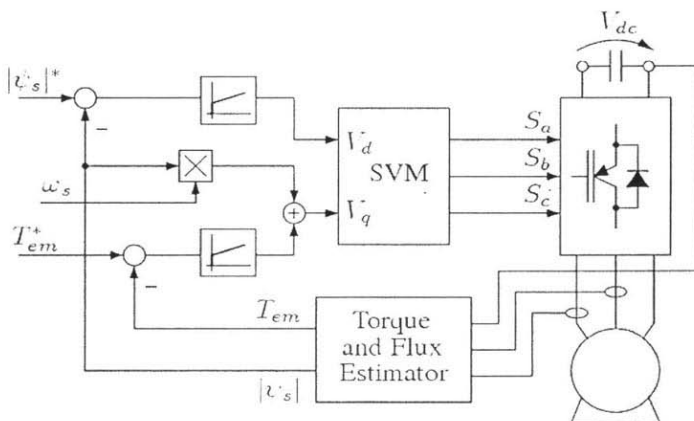
ภาพที่ 2.19 วงจรพื้นฐานของการควบคุมแบบเวกเตอร์คอนโทรล []

การทำงานของระบบนํ้าอยู่ที่การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสซึ่งเป็นสามแม่เหล็กหมุนห่างกัน 120° ทางไฟฟ้าต้องแปลงมาให้อยู่ในภาพของสมการทางคณิตศาสตร์ให้เป็น I_d และ I_q ซึ่งวิธีปกติที่ใช้กันทั่วไปคือวิธีที่แสดงในภาพที่ 2.17, 2.19 เมื่อ I_μ ก็เปรียบเสมือนกับ I_f หรือ I_d ส่วน I_w ก็เปรียบเสมือน I_a หรือ I_q ของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพที่ 2.19 กระแส I จะถูกแปลงให้อยู่ในภาพของ I_μ หรือ I_w หรือแตกเวกเตอร์ออกมาเป็น แกน d และ q ระบบควบคุมจะพยายามรักษายางค์ประกอบในแกน d ให้คงที่ส่วนองค์ประกอบในแกน q นั้นจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการต้องการของโหลดแต่ถ้าทำงานในย่านความเร็วรอบที่สูงกว่าความเร็วพิกัดระบบจะต้องลดแรงดันไฟฟ้าลงเพื่อทำ field weakening ให้กับมอเตอร์ ซึ่งเมื่อสามารถควบคุมได้ดังนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่เรา กำลังควบคุมอยู่ก็จะมีคุณสมบัติเทียบเสมือนได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหากมองในแง่การซ่อมบำรุงรักษาจะดีกว่าเพราะการบำรุงรักษามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบกรงกระรอกทำได้ง่ายกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอย่างมาก

2.6.2 การควบคุมแรงบิดโดยอินเวอร์เตอร์

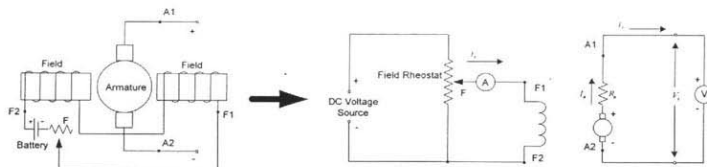
อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยนี้ มีความสามารถในการคำนวณค่าแรงบิด และนำมาแสดงผลได้ โดยใช้หลักการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า เข้ามาประมวลผลในโปรแกรมของอินเวอร์เตอร์ และตั้งค่าการทำงานให้อยู่ในโหมดเวกเตอร์ คอนโทรล จุดเด่นของการควบคุมแรงบิดแบบนี้ คือระบบที่ควบคุมจะให้การตอบสนองต่อแรงบิดได้เร็ว, ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งการหมุน (Position Encoder), ความถี่ในการสวิตชิ่งกึ่งที่, ค่าความผิดพลาดของกระแสมีค่าต่ำมาก และค่าแรงบิดกระเพื่อมน้อยมาก ในส่วนของแรงบิดที่แสดงออกมานั้นเกิดจากการคำนวณในทางคณิตศาสตร์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของระบบมาคำนวณในโปรแกรมการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การควบคุมแรงบิดโดยอินเวอร์เตอร์

2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้น เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับการกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็กจากแหล่งจ่ายภายนอก



ภาพที่ 2.21 วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้น

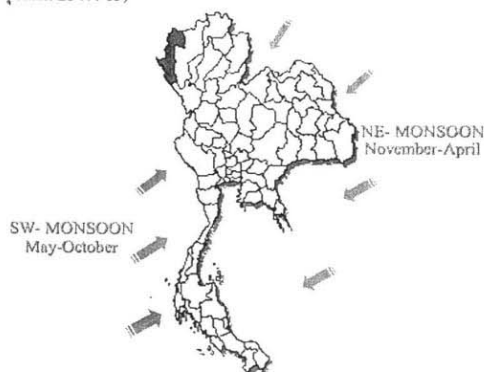
วงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกกระตุ้นจะแสดงในภาพที่ 2.20 ซึ่งประกอบด้วยวงจรฟิลด์และวงจรอาร์เมเจอร์แยกจากกัน และเขียนวงจรเทียบเคียงได้ สำหรับ F ในภาพที่ 2.20 หมายถึง ฟิลด์รีโอสตัท (Field Rheostat) ซึ่งเป็นความต้านทานที่ปรับค่าได้ เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดฟิลด์ ส่วนเบดเตอร์หรือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดฟิลด์

2.8 สักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

สำหรับประเทศไทยพบว่าศักยภาพพลังงานลมทั่วประเทศมีค่า 44 เทอราวัตต์ชั่วโมงต่อปี จากการศึกษาเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ต่างๆ โดยกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า แหล่งแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทยมีกำลังลมเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 3 (class3) ดังแสดงในภาพที่ 2.22 หรือมีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 6.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ที่ระดับความสูง เมตร ในแถบภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกเริ่มตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดสงขลา จังหวัดปัตตานี และอุททยานแห่งชาติคอกยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ อันเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม และยังพบแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีอีกแหล่งหนึ่งอยู่บริเวณเทือกเขาด้านทิศตะวันตก ตั้งแต่ทิศใต้ตอนบนจรดทิศเหนือตอนล่างในจังหวัดเพชรบุรี จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดตาก อันเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ระหว่างเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนตุลาคม นอกจากนี้ยังมีแหล่งพลังงานลมที่ดีที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อยู่

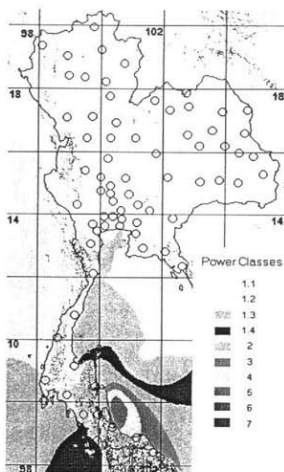
ในบริเวณเทือกเขาอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี อุทยานแห่งชาติเขาลงและอุทยานแห่งชาติได้ร่มเย็น จังหวัดนครศรีธรรมราช อุทยานแห่งชาติศรีพังงาจังหวัดพังงา อุทยานแห่งชาติเขาค้อมเบญจา จังหวัดกระบี่ ส่วนแหล่งที่มีศักยภาพรองลงมา โดยมีกำลังเฉลี่ยทั้งปีตั้งแต่ระดับ 1.3 ถึง 2 (class1.3 – class2) หรือมีความเร็วลม 4.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปถึงความสูง 50 เมตร พบว่าที่ภาคใต้ตอนบนบริเวณอ่าวไทยชายฝั่งตะวันตกตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดชุมพรถึงจังหวัดสุราษฎร์ธานีและบริเวณเทือกเขาในภาคเหนือคือจังหวัดเชียงใหม่ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือคือจังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดเลย โดยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และพบที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตกตั้งแต่ จังหวัดพังงา จังหวัดภูเก็ต จังหวัดกระบี่ จังหวัดตรังถึงจังหวัดสตูลและชายฝั่งตะวันออกบริเวณอ่าวไทยคือ จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี โดยได้รับอิทธิพลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

จากข้อมูลศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น หากเทียบกับประเทศในยุโรปแล้วถือว่ามีความศักยภาพต่ำมาก ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วแล้วความเร็วลมในระดับประมาณ 6 เมตรต่อวินาทีถือว่ายังไม่เหมาะกับการ ติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ระดับเมกะวัตต์ เพราะกังหันลมขนาดดังกล่าวต้องการความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12 – 13 เมตรต่อวินาที ดังนั้นทางเลือกที่เหมาะสมของประเทศไทยหากจะมีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานลมในการผลิตไฟฟ้าควรจะเป็นระบบขนาดเล็กในช่วงพักักกำลังกิโลวัตต์จะมีความเหมาะสมกว่า(นิพนธ์ เกตุชัย และอชิตพล ศศิธรานุวัฒน์, 2547: 65)



ภาพที่ 2.22 ภาพอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับตะวันออกเฉียงเหนือที่ประเทศไทย
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

ถึงแม้ผลจากการศึกษาศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับที่อื่น แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าพลังงานลมที่มีอยู่ไม่สามารถใช้ได้ จากผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการลงทุนระหว่างพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมพบว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีต้นทุนถูกกว่าประมาณ 8 – 10 เท่า และยังสามารถผลิตใบพัดของกังหันลมได้เองจะดีกว่าถึง 10 เท่า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์)



ภาพที่ 2.23 แสดงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

ในปัจจุบันในประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและจ่ายเข้าระบบสายส่งในปริมาณที่น้อยมากหากเทียบกับพลังงานอื่นๆ โดยมีการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 150 กิโลวัตต์ ซึ่งผลิตโดยบริษัทนอร์ดแทงก์ ประเทศเดนมาร์กในพื้นที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ณ แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 เพื่อสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 กิโลวัตต์ โดยจ่ายไฟเข้าระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จนถึงปัจจุบันระบบยังสามารถทำงานได้ดีอยู่ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์)

พลังงานลมและกังหันลม

การใช้ประโยชน์พลังงานลมโดยทั่วไป เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ กล่าวคือ

1. การสูบน้ำ
2. การผลิตไฟฟ้า

การที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล อุปกรณ์นี้เรียกว่า กังหันลม โดยพิจารณาจากกระแสลมที่มีความหนาแน่นและมีความเร็วและเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด ดังที่กล่าวมาแล้วในบทข้างต้น กังหันลมจะทำหน้าที่สกัดกำลังงานที่อยู่ในกระแสลมมาใช้ประโยชน์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

ส่วนประกอบของระบบกังหันลม

ส่วนประกอบที่สำคัญ ของกังหันลมโดยทั่วไปอาจแบ่งได้ดังนี้

1. ใบกังหัน

ใบกังหันนับเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดพลังงานกลที่เพลลาของกังหัน จำนวนใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งถึงหลายสิบใบ กังหันลมที่มีจำนวนใบมากส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิดสูง ในทางตรงข้ามกังหันที่มีจำนวนใบน้อยส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง เช่น การผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

โดยรูปหน้าตัดของใบพัดของกังหันอาจมีตั้งแต่ลักษณะแบนอากาศ หรือลักษณะคล้ายปีกเครื่องบิน เป็นแผ่นโค้งและเป็นแผ่นราบตรง วัสดุที่ใช้ทำใบกังหันควรเป็นวัสดุที่เบาและแข็งแรงซึ่งอาจเป็นอลูมิเนียมอัลลอยด์ แผ่นเหล็ก ไม้ และไฟเบอร์กลาสขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ออกแบบ

2. ระบบควบคุม

ระบบควบคุมในชุดกังหันลมส่วนใหญ่มี 2 ชนิด

2.1 การควบคุมเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากความเร็วลมแรงจัดๆ

2.2 การควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาทิศทางลม ส่วนมากระบบนี้จะใช้ระบบทางเสือ โดยเฉพาะกังหันลมชนิดเล็ก

3. ระบบส่งกำลัง

การส่งกำลังจากตัวกังหันเพื่อไปใช้งานอาจต่อกับเพลลาได้โดยตรง หรือผ่านระบบส่งกำลัง เช่น เพือง สายพาน สายไฮดรอลิกส์ ซึ่งจะมีการทอรอบให้สอดคล้องกันระหว่างความเร็วรอบของแกนของกังหันกับการใช้งานในลักษณะต่างๆรวมถึงลักษณะของตัวช่วยในการส่งกำลัง เช่น เครื่องกำเนิด

4. หอคอย

หอคอยทำหน้าที่ยึดตัวกังหันลมให้อยู่ในระดับสูง เพื่อรับกระแสลมได้มากขึ้นทุกทิศทาง หอคอยอาจเป็นโครงสร้างที่มีสายยึดหรืออาจเป็น โครงสร้างเหล็ก ที่สามารถรับน้ำหนักและ การสั่นสะเทือนเนื่องจากตัวกังหันได้

กังหันลมกับการใช้งาน

เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความเร็วลมที่แปรผันตามธรรมชาติ และความต้องการ พลังงานที่สม่ำเสมอให้เหมาะกับการใช้งานแล้ว จะต้องมีส่วนเก็บพลังงานหรือกักพลังงานและใช้ แหล่งพลังงานอื่นที่เชื่อถือได้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง หรือใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น

ตัวกักพลังงานมีอยู่หลายชนิด ส่วนมากขึ้นอยู่กับงานที่ใช้ เช่น ถ้าเป็นกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้า ขนาดเล็กมักใช้แบตเตอรี่เป็นตัวกักเก็บ การสูบน้ำไปกักเก็บไว้ในลักษณะของพลังงานศักย์และการ เก็บในรูปของพลังงานกล ฯลฯ

การใช้แหล่งพลังงานอื่นที่เป็นตัวหมุน ระบบนี้ปกติกังหันลมจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้ ตลอดเวลาที่มีความเร็วลมเพียงพอ หากความเร็วลมต่ำหรือลมสงบ แหล่งพลังงานชนิดอื่นจะทำ หน้าที่จ่ายพลังงานทดแทน

การใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่นๆ ระบบนี้ปกติมีแหล่งพลังงานชนิดอื่นจ่ายพลังงานอยู่แล้ว กังหันลมจะจ่ายพลังงานที่มีความเร็วลมเพียงพอซึ่งในขณะเดียวกันก็ลดการจ่ายพลังงานจากแหล่ง อื่น (เช่น ลดการใช้น้ำมันดีเซลของเครื่องยนต์ดีเซล) ระบบนี้ต่างจากระบบอื่นๆ คือ ระบบอื่นจะใช้ พลังงานลมเป็นหลักและใช้พลังงานอื่นๆ เป็นพลังงานสำรอง แต่ระบบนี้ใช้พลังงานอื่นเป็น พลังงานหลักและใช้พลังงานลมเป็นพลังงานสำรองนั่นเอง พลังงานอย่างอื่นที่กล่าวถึงอาจเป็น เครื่องจักรดีเซล หรือพลังงานที่ได้จากเขื่อน ฯลฯ

สถานภาพการวิจัยกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1. สหรัฐอเมริกา

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การศึกษาความเหมาะสมทางเทคนิค และเศรษฐศาสตร์
- การทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่วางขายตามท้องตลาด
- การทดสอบกังหันลมแบบ แคร่เรียวส ขนาดกำลังผลิต 2-32 กิโลวัตต์
- การทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ 100 kW Mod 0 ขนาด

200 kW Mod 0A จำนวน 3 ชุด และขนาด 2,000 kW

- การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในลักษณะ Wind Farm รวมกำลังผลิตมากกว่า 600,000 kW

2. แคนาดา

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมแควร์เรียสขนาดกำลังผลิต 200 kW
- การศึกษาระบบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 2,000 kW

3. สวีเดน

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การทดสอบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 65 kW

4. เดนมาร์ก

- การปรับปรุงทดสอบกังหันลมขนาดกำลังผลิต 200 kW
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 2,000 kW

5. ฮอลแลนด์

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การศึกษาการใช้ประโยชน์กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
- การทดสอบติดตั้งกังหันลมแควร์เรียสขนาดผ่าศูนย์กลาง 25 เมตร

6. เยอรมัน

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าพรอเพลเลอร์ขนาดผ่าศูนย์กลาง 52 เมตร
- การทดสอบกังหันลมแกนตั้งขนาดกำลังผลิต 20 kW

7. ฝรั่งเศส

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 100-1,000 kW
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมแบบแกนตั้ง

พลังงานลมในประเทศไทย

จากสมการที่กล่าวถึงข้างต้น จะเห็นว่ากำลังงานที่ได้จากกังหันลมแปรผันตามกำลังสามของความเร็วลมที่พัดผ่าน ดังนั้นความเร็วลมเฉลี่ยจึงเป็นตัวบ่งบอกศักยภาพของการใช้กังหันลมได้เป็นอย่างดีในขั้นแรก หน่วยงานในประเทศไทยที่ทำการบันทึกข้อมูลไว้ก็คือ กรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่ง

ได้บันทึกข้อมูลทั่วประเทศไทยมานานไม่น้อยกว่า 25 ปี การบันทึกข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยานั้น ส่วนใหญ่จะบันทึกค่าทุก ๆ 3 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลนั้นนำไปใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยามากกว่าการใช้ประโยชน์ในแง่พลังงาน กรมอุตุนิยมวิทยาได้ตีพิมพ์เอกสารข้อมูลสถิติลมพร้อมทั้งสถิติภูมิอากาศอื่น ๆ โดยเฉลี่ยข้อมูลเป็นรายเดือน ในคาบ 25 ปี และอีกฉบับหนึ่งเป็นแผนผังลมของประเทศไทย ในคาบ 20 ปี นอกจากนี้ยังมีสถาบันการศึกษาอีก 2 แห่ง ที่ได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ตีพิมพ์เป็นเอกสารแล้ว โดยอาศัยข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา เช่น การวิเคราะห์ของสถาบันทั้งสองนี้จะแยกช่วงเวลาที่ลมสงบ (ความเร็วลมเป็นศูนย์) ออกต่างหาก ซึ่งต่างจากของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ได้รวบรวมเวลาที่ลมสงบเข้าไปในการวิเคราะห์ด้วย เช่น การหาความเร็วลมเฉลี่ยเป็นรายเดือน ดังนั้นผลของข้อมูลที่ได้นี้จะมีประโยชน์ในแง่ของพลังงานลมมากกว่าของกรมอุตุนิยมวิทยาสถาบันทั้งสองดังกล่าวคือ

ปริญญาณิพนธ์ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การแสดงผลการวิเคราะห์นี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกราฟ เช่น การกระจายความถี่ของความเร็วลม ความยาวนานของความเร็วลม (Duration Curve) การกระจายความถี่ และความยาวนานของพลังงานลม

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดย Dr. Excell [2] การแสดงผลงานอยู่ในรูปของ Parameter 2 ตัว ของสมการคณิตศาสตร์ Weibul Distribution

พารามิเตอร์ทั้งสองคือ c และ k สมการนี้เป็นที่ยอมรับกันว่าใกล้เคียงกับการกระจายความถี่ของข้อมูลความเร็วลมมากและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย Weibul Distribution นี้เหมาะสำหรับงานวิเคราะห์ทางด้าน Mathematical Model ของการวิเคราะห์ระบบกังหันลมซึ่งต้องอาศัยความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ และสถิติเป็นอย่างมาก

เป็นที่น่าสังเกตว่าการวิเคราะห์นี้ได้อาศัยข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งมีสถานีตรวจอากาศหลายแห่ง ในตอนแรกตั้งสถานีใหม่ ๆ นั้นก็อาจถูกต้องตามหลักของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งต้องการพื้นที่โล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ แต่ปัจจุบันบริเวณนั้น ส่วนมากกลายเป็นชุมชนที่มีอาคารหรือต้นไม้สูงอยู่ล้อมรอบ ทำให้ข้อมูลที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้อุปกรณ์การวัดความเร็วลมควรมีการตรวจสอบเทียบมาตรฐานอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้วมักจะไม่มีการตรวจสอบหลังการติดตั้งเลย

กรมอุตุนิยมวิทยาได้รับความช่วยเหลือทางการเงินการเก็บข้อมูลพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และลม จาก USIAD ทำให้ได้รับอุปกรณ์ที่ทันสมัยหลายชนิดพร้อมทั้งอุปกรณ์สอบเทียบมาตรฐานของเครื่องวัดด้วย กรมอุตุนิยมวิทยาได้ร่วมมือกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในการวิเคราะห์ข้อมูลลมใหม่พร้อมกันนี้ Dr. Excell ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญได้ให้

คำปรึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติม จึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าอีกไม่นานนัก ก็คงจะได้ข้อมูลและ
ศักยภาพของพลังงานลมที่ใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

Meier และ Merson ได้จำแนกระดับความเร็วเฉลี่ยที่ความสูง 10 เมตร จากพื้นดินที่
เหมาะสม สำหรับการใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าออกเป็น 3 ระดับดังนี้

- ระดับต่ำ 4 – 5 เมตรต่อวินาที
- ระดับปานกลาง 5 – 7 เมตรต่อวินาที
- ระดับสูง ตั้งแต่ 7 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป

ส่วนกังหันลมเพื่อการสูบน้ำ เช่น กังหันลมแบบหลายใบพัดที่จำหน่ายในประเทศสามารถ
ใช้งานได้กับความเร็วลมเฉลี่ยต่ำถึง 3 เมตรต่อวินาที หากความเร็วเฉลี่ยต่ำกว่านี้พลังงานที่ได้จะ
น้อยจนไม่นำมาใช้ประโยชน์ได้

หากพิจารณาถึงสถิติข้อมูลลม เท่าที่กรมอุตุนิยมวิทยาได้บันทึกไว้ในสถิติภูมิอากาศของ
ประเทศและใช้ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี 3 เมตรต่อวินาที เป็นเกณฑ์ จะมีจำนวนสถานีตรวจอากาศ
ประมาณร้อยละ 80 ที่มีความเร็วลมต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที สำหรับประเทศไทยโดยทั่ว ๆ ไปจัดได้
ว่ามีศักยภาพต่ำ แต่บริเวณตามชายฝั่งอ่าวไทย และทางภาคใต้ของประเศรวมทั้งบริเวณที่ราบใกล้
ปากแม่น้ำเจ้าพระยาจัดได้ว่าพอมีความหวังอยู่บ้างดังแสดงในรายละเอียดในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลลมที่กรมอุตุนิยมวิทยาจะจัดทำขึ้นใหม่อาจให้ข้อสรุปที่ดีกว่านี้

กังหันลมที่ใช้กันมากในประเทศไทยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ได้แก่ กังหันลมแบบใบกังหัน
ไม้ ใช้วิดน้ำเข้านาข้าวบริเวณจังหวัดฉะเชิงเทรา กังหันใบเสือลำแพนใช้วิดน้ำเก็บเข้านาเกลือ
บริเวณจังหวัดสมุทรสงคราม และกังหันลมแบบใบกังหันหลายใบทำด้วยแผ่นเหล็กใช้สำหรับสูบน้ำ
ลึก เช่น น้ำบาดาล น้ำบ่อ ขึ้นไปเก็บในถังกักเก็บ

กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าในเมืองไทย ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาและทดสอบและยังไม่
ถึงขั้นจำหน่ายในท้องตลาด เช่นเดียวกับกังหันลมที่ใช้ในการสูบน้ำ อย่างไรก็ตาม การไฟฟ้าฝ่าย
ผลิตแห่งประเทศไทย โดยการร่วมมือกับสถาบันการศึกษาในประเทศได้ทำการศึกษาค้นคว้าสร้าง
กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับสภาพพลังงานลมของประเทศไทยเนื่องจากพลังงานลมใน
ประเทศไทยมีกำลังค่อนข้างน้อยและบางประเทศมีกำลังลมที่แรงแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้อง
ออกแบบกังหันให้เหมาะสมแต่ละสถานที่ ภูมิอากาศ กล่าวคือ ทำการศึกษาระบบกังหันลมแบบ
แตรรีเรียด ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระบบกังหันลมแบบพรอเพลเลอร์
กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

นอกจากนี้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยก็ทำการทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบ
พรอเพลเลอร์ที่จัดหาจากต่างประเทศ โดยติดตั้งทดสอบบริเวณแหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต

กังหันลม BWC EXCEL-R/240 ขนาด 10 kW 2 ตัว จากประเทศอเมริกา และกังหันลม Nord Tank ขนาด 150 kW จากประเทศเดนมาร์ก จ่ายไฟเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 10 kW

การศึกษาวិเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

1. ต้นทุนกังหันลมผลิตไฟฟ้า กรณีผลิตกังหันลมในเชิงพาณิชย์ราคากังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 600,000 บาท/kW (ขนาดกำลังผลิตประมาณ 30 วัตต์) ถึง 30,000 บาท/kW (ขนาดกำลังผลิต 10-15kW)

กรณีกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่จะเป็นกังหันลมทดลองต้นแบบในขนาดกำลังผลิต 100-1,000 kW ซึ่งราคาอยู่ระหว่าง 20,000-30,000 บาท/kW ราคาที่ลดลงตามขนาดของกังหันลมที่โตขึ้นก็ยังไม่สามารถจะกำหนดได้แน่นอน

2. ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา กังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีการควบคุมการทำงานโดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามนักวิชาการที่ทำการติดตั้งทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ากำหนดให้ค่าดำเนินการและค่าบำรุงรักษาปีละ 4% ของราคากังหันลม

3. ราคากระแสไฟฟ้า ตัวประกอบหลักของราคากระแสไฟฟ้าขึ้นกับคุณลักษณะของกังหันลม และสถานที่ติดตั้ง อย่างไรก็ตามตัวประกอบอื่นๆ อาทิ เช่น อัตราดอกเบี้ย ก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงราคากระแสไฟฟ้าเช่นกัน

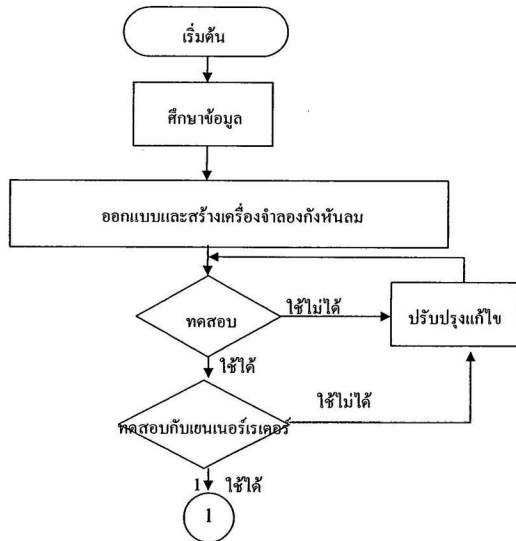
ตัวอย่างการศึกษา

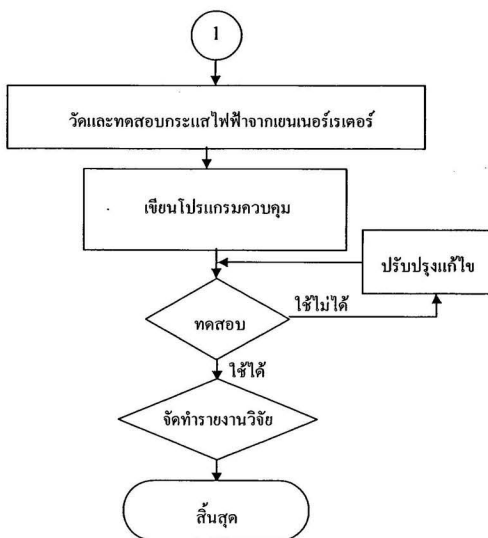
- ราคากังหันลม	50,000 บาท/kW
- ค่าบำรุงรักษา/ดำเนินการ	2,000 บาท/kW
- อายุการใช้งาน	20 ปี
- อัตราดอกเบี้ย	10 %
- ช่วยเวลาการใช้งานเต็มกำลังผลิต	3,000-4,500 ชม/ปี
- ราคาเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า	2.6-2 บาท /kWh

บทที่ 3

การออกแบบงานวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะเป็นการออกแบบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟส และทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟส จากทฤษฎีที่ได้ศึกษามาในบทที่ 2 จึงได้แนวความคิดในการออกแบบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟส โดยแยกพิจารณาออกแบบงานวิจัยในแต่ละส่วนรวมทั้งการเขียน โปรแกรมในส่วนต่างๆ ซึ่งแสดงเป็นผังการดำเนินงานดังนี้





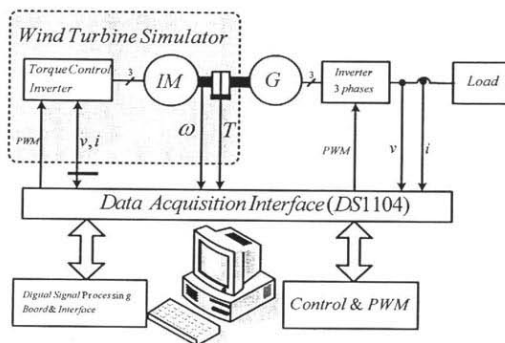
ภาพที่ 3.1 ฟังก์ชันตอนการดำเนินงาน

3.1 โครงสร้างของเครื่องจำลองกังหันลม

โครงสร้างโดยรวมของเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส ซึ่งจะประกอบไปด้วยสองส่วนหลักดังภาพที่ 3.2

ในส่วนแรกประกอบไปด้วยแบบจำลองความเร็วลมใช้สร้างความเร็วลมที่ต้องการ รูปแบบของพลังงานความเร็วของลมสามารถสร้างได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหลักการสุ่มของ Kaimal Spectrum โดยโปรแกรม Matlab/Simulink หรือสร้างจากการปรับค่าขึ้นลงด้วยตัวเองหรือจากข้อมูลบันทึกความเร็วลมจริงจากกรมอุตุนิยมวิทยาและต่อมาเป็นแบบจำลองกังหันลมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลักการและทฤษฎีถึงกังหันลมที่คำนวณสัญญาณอ้างอิงในลักษณะของแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทันเวลา แล้วส่งไปให้ตัวอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งอยู่ในส่วนที่สอง

ในส่วนที่สองคือส่วนที่รับสัญญาณแบบทันเวลา มาควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้แสดงคุณลักษณะของกังหันลม ที่แกนโรเตอร์ออกมาเป็นแรงบิดเข้าฟุต (Torque Output) ของกังหันลม



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องจำลองกังหันลม

3.2 การจัดการจำลองของเครื่องจำลองกังหันลม

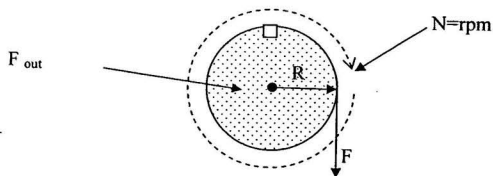
จากที่ได้อธิบายถึงหลักการและสมการที่ใช้กับกังหันลมในการทำงานแต่ละช่วงไปแล้วต่อไปจะอธิบายวิธีการออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ นั้น จะอธิบายถึงแบบจำลองของกังหันลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การกำหนดค่าพิกัดการจำลองของ เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการคอตินเตอร์เฟส จะมีพิกัดการจำลอง เนื่องจากพิกัดของมอเตอร์มีพิกัดที่ 1 kW ฉะนั้นแรงบิดของมอเตอร์จะต้องมีพิกัดด้วย โดยคำนวณจากข้อมูลของ มอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง

พิกัดกำลัง	1 kW
ความเร็วรอบ	1400 RPM
ความถี่	50 Hz
ค่า PF	0.74
พิกัดกระแส (เคลด้า / สตาร์)	2.9/1.7 A
พิกัดแรงดัน (เคลด้า / สตาร์)	380/660 V

การคำนวณหาทอร์กแรงบิด (Rated Torque) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้จะหาได้จากสูตรดังนี้



เมื่อ $T = F \times R$ 3.1

และ $W = F \times \ell$ 3.2

$$P \times t = F \times 2\pi \times R \times N$$
 3.3

$$P = F \times R \times \frac{2\pi N}{60}$$
 3.4

ดังนั้น $T = \frac{60}{2\pi} \frac{P}{N} \dots\dots\dots (\text{N}\cdot\text{m})$ 3.5

จากสมการ 3.5 ทอร์กแรงบิด (Rated Torque)

$$= (9.55 \times \text{Power}) / \text{ความเร็วรอบ}$$

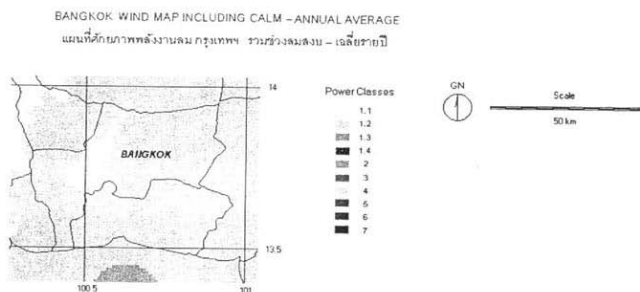
$$= (9.55 \times 1000 \text{ W}) / 1400 \text{ RPM}$$

$$= 6.821 \text{ N}\cdot\text{m}$$

จะเห็นว่ามอเตอร์ 1 kW มีค่าแรงบิดทอร์กของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้มีค่า 6.821 N-m ดังนั้นแรงบิดที่ใช้ในการจำลองจะมีค่าไม่เกิน 6.821 N-m

3.3 ดำรงและเก็บข้อมูล

เพื่อนำข้อมูลที่ได้มา เปรียบเทียบขึ้นอันผลระหว่างความเร็วลมที่ได้วัดได้จริง และความเร็วลมจากแบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model) จากโปรแกรม Matlab/Simulink โดยการศึกษาจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลมในกรุงเทพ ทำให้ทราบถึงปริมาณพลังงานลมบนบริเวณกรุงเทพ และนำมาเปรียบเทียบกับการวัดกำลังงานลมที่วัดได้จริงบริเวณที่จะทำการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มา เปรียบเทียบขึ้นอันผลต่อไป



ภาพที่ 3.3 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี
ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

THAILAND WIND POWER CLASSES												
Elevation		1.1	1.2	1.3	1.4	2	3	4	5	6	7	
10 m	m/s	0	2.8	3.6	4.0	4.4	5.1	5.6	6.0	6.4	7.0	9.4
	W/m ²	0	25	50	75	100	150	200	250	300	400	1,000
30 m	m/s	0	3.3	4.1	4.7	5.2	5.9	6.5	7.0	7.4	8.2	11.0
	W/m ²	0	40	80	120	160	240	320	400	480	640	1,600
50 m	m/s	0	3.8	4.4	5.1	5.6	6.4	7.0	7.5	8.0	8.8	11.9
	W/m ²	0	50	100	150	200	300	400	500	600	800	2,000

จากภาพที่ 3.3 แสดงข้อมูลสัณยภาพสิ่งแวดล้อมในกรุงเทพ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี หลังจากนั้นจะมาถึงขั้นตอนของการนำเครื่องมือวัดความเร็วลมไปวัดความเร็วลมจริง ณ บริเวณที่จะทำการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับขั้นผลต่อไป

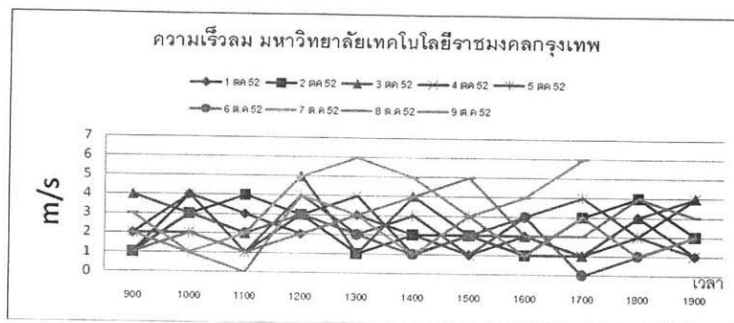
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลของสถานที่ที่เก็บข้อมูลความเร็วลม

สถานที่	ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ระดับความสูง	ชั้นที่ 11 ประมาณ 30 เมตร
ช่วงเวลา	09.00-19.00
ระหว่างวันที่	6 ตุลาคม 2552 – 9 ตุลาคม 2552
ความถี่การเก็บข้อมูล	1 ชั่วโมง ต่อ ครั้ง



ภาพที่ 3.4 การวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง

จากภาพที่ 3.4 แสดงเครื่องมือวัดความเร็วลม ที่ความสูงจากพื้นดิน ประมาณ 30 เมตร โดยใช้บริเวณชั้น 11 ของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 6 ตุลาคม 2552 ถึง วันที่ 9 ตุลาคม 2552 เวลา 09.00 น ถึง 19.00 น บันทึก 1 ชั่วโมงต่อครั้ง



ภาพที่ 3.5 ข้อมูลผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง ณ.ชั้น 11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

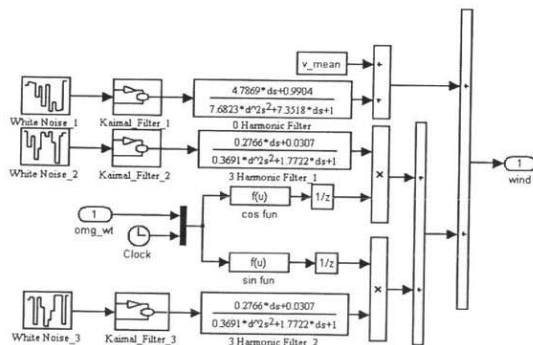
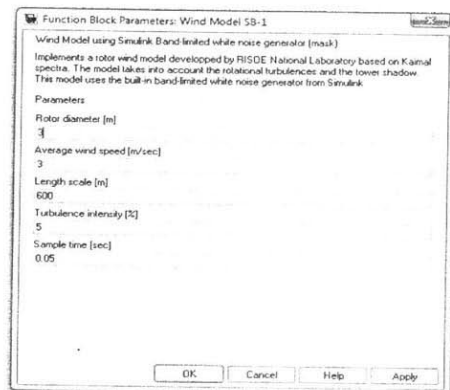
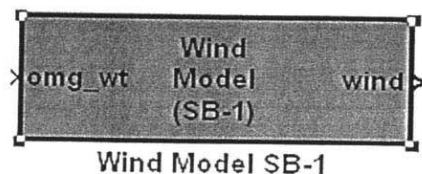
จากข้อมูลผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริงบริเวณคาเฟ่ ชั้น 11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ซึ่งจะทำให้การทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม มีผลออกมาดังภาพที่ 3.5 ความเร็วลมที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที

3.4 แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

แบบจำลองความเร็วลมมีความสำคัญในการบอกค่าสมรรถนะของแหล่งกำเนิดลมและพฤติกรรมของลมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำผลจากแบบจำลองความเร็วลมไปวิเคราะห์และนำพลังงานลมนี้ไปสังเคราะห์ให้ประโยชน์ต่อไป ในธรรมชาติของความเร็วลมจะมีปัจจัย 2 ส่วนคือ

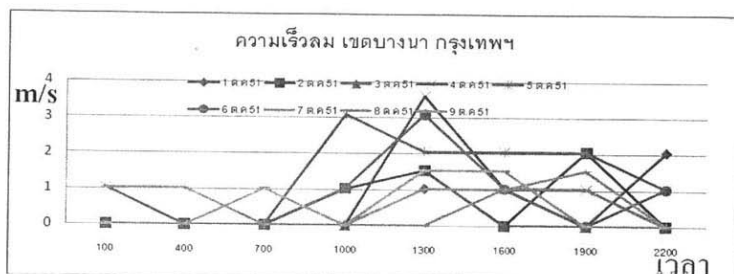
(ก) ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย (Steady State) ซึ่งจะเฉลี่ยจากค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และลดลงต่ำสุด

(ข) ส่วนที่สองคือส่วนของค่าความแปรปรวน (Turbulence) เป็นคุณลักษณะของการสุ่มค่าไปแบบไม่เป็นปกติกับส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ยกับเวลาและระยะทาง และนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมได้ดังนี้



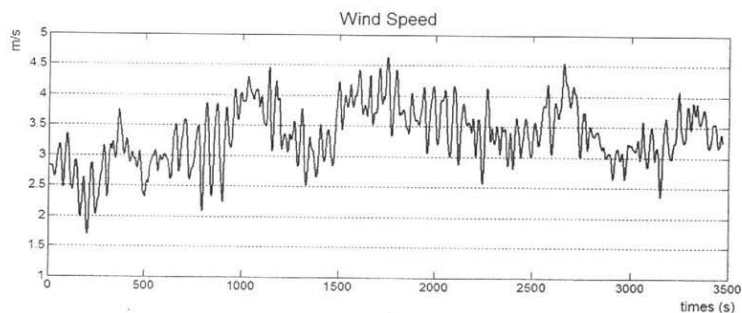
ภาพที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร

จากข้อมูลที่ได้ทั้งหมดของความเร็วลมจากข้อมูลศึกษาภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี ดังภาพที่ 3.7 และจากการนำเครื่องมือวัดความเร็วลมไปวัดความเร็วลมจริง ณ บริเวณที่จะทำการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมดังภาพที่ 3.5 เราสามารถนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบขึ้นอันผลกับภาพที่ 3.8 ได้ดังนี้



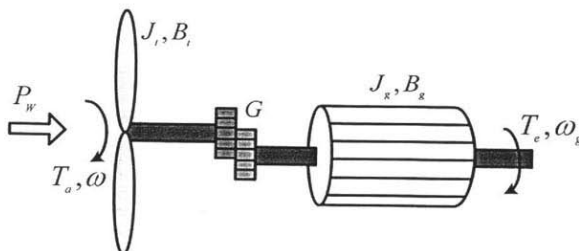
ภาพที่ 3.7 ความเร็วลมที่วัดได้จริง กรุงเทพฯ

ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา เขตบางนา กรุงเทพฯ



ภาพที่ 3.8 ความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

3.5 แบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Rotor Model)



ภาพที่ 3.9 แบบจำลองกังหันลม

สมมุติให้อัตราทดเกียร์ $G = 1$ เพราะฉะนั้น $\omega_g = \omega$ สามารถเขียนสมการไดนามิกของกังหันได้เป็น

โดยที่ $J = J_r + J_g$ และ $B = B_r + B_g$

แปลงให้อยู่ในรูปแบบพีชคณิต

$$T_a - T_e = (JD + B)\omega \quad 3.7$$

โดยกำหนดตัวดำเนินการ $D = \frac{d}{dt}$

แรงบิดอากาศพลศาสตร์ T_a เป็นค่าที่ได้รับผลส่วนหนึ่งจาก ω ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{P}{2} \pi R^3 v^3 C_p(\lambda) \quad 3.8$$

แทนค่าใน $T_a = \frac{P_a}{\omega}$ จะได้ว่า

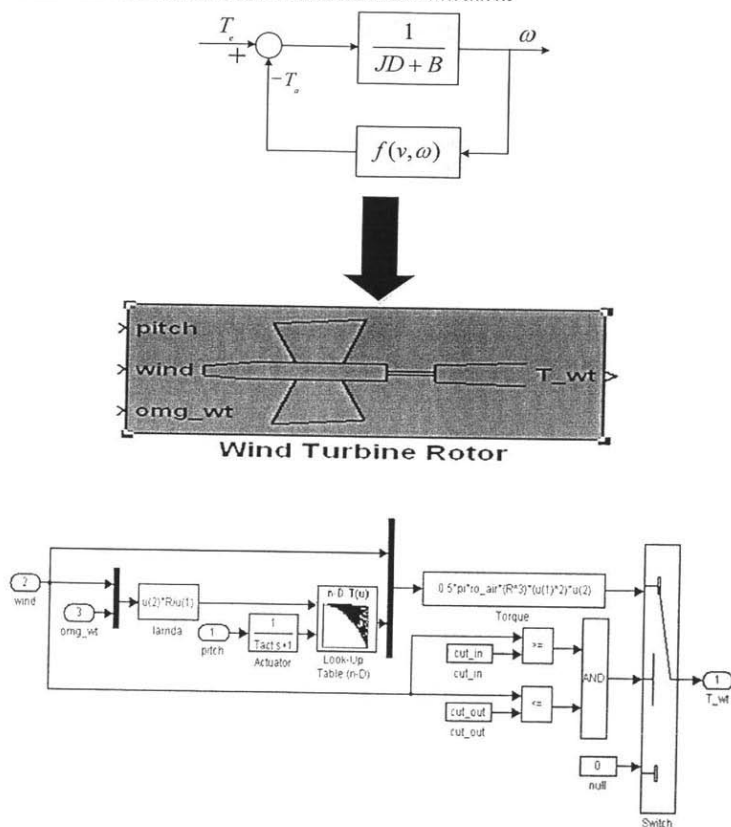
$$T_a = \frac{P}{2} \pi R^3 \frac{v^3}{\omega} C_p(\lambda) \quad 3-9$$

แทนค่าใน $\omega = \frac{\lambda v}{R}$ จะได้

$$T_a = \frac{P}{2} \pi R^3 v^2 \frac{1}{\lambda} C_p(\lambda) = \frac{P}{2} \pi R^3 v^2 C_T(\lambda) = \frac{P}{2} \pi R^3 v^2 C_T(v, \omega) \quad 3-10$$

โดยที่ค่าของ $C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

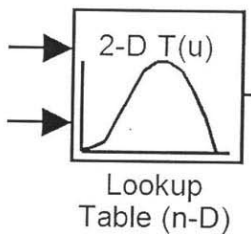
จากภาพที่ 3.10 กังหันเป็นระบบที่มีอินพุตคือแรงบิดของกังหันลม มีเอาต์พุตคือความเร็วรอบ และถือว่าลมที่กระทำต่อกังหันคือสัญญาณรบกวน (Disturbance) ดังนั้นจากสมการ 3.7 และ สมการ 3.10 จึงเขียนบล็อกไดอะแกรม แบบจำลองของกังหันได้ดังนี้



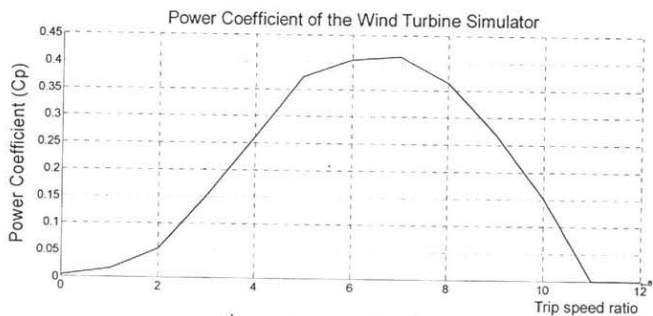
ภาพที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม

จากภาพที่ 3.10 จะเห็นว่า จากสมการพื้นฐานของกังหันลม เราสามารถที่นำมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรม Matlab/Simulink ได้โดยในส่วนของการคำนวณค่า C_p จะใช้บล็อกของ Look-Up

Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink ในภาพที่ 3.11 ช่วยในการคำนวณค่า C_p โดยใช้หลักการ Interpolation ค่าในตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.11 บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink



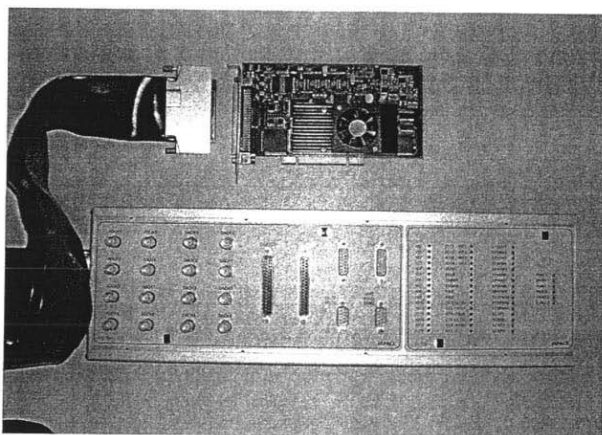
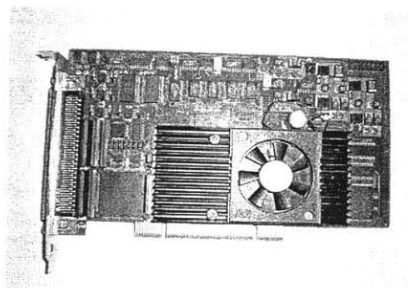
ภาพที่ 3.12 ค่าของ C_p เทียบกับ λ

ตารางที่ 3.4 ค่าของ C_p เทียบกับ λ

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C_p	0.003	0.015	0.052	0.151	0.261	0.373	0.405	0.411	0.364	0.268	0.151	0

3.6 การ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104

งานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีของการ์ดอินเตอร์เฟซควบคุมแบบหันทเวลา (Real-time) ใช้งานร่วมกับโปรแกรม Matlab/Simulink ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้แสดงคุณลักษณะของกังหันลมออกมาให้มีพฤติกรรมเหมือนกังหันลมจริงและมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลมจริง ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท dSPACE เป็นการ์ดอินเตอร์เฟซที่ออกแบบสำหรับใช้กับงานพัฒนาด้านแบบ (Prototype) และงานวิจัยในอุตสาหกรรมรถยนต์



ภาพที่ 3.13 การ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104 และอุปกรณ์ต่อพ่วง

3.7 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJI รุ่น FRENIC MEGA

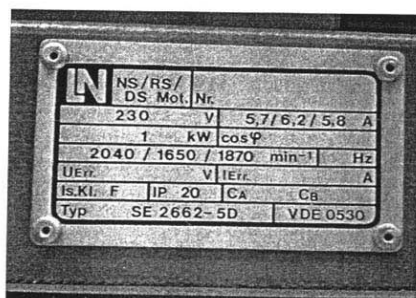
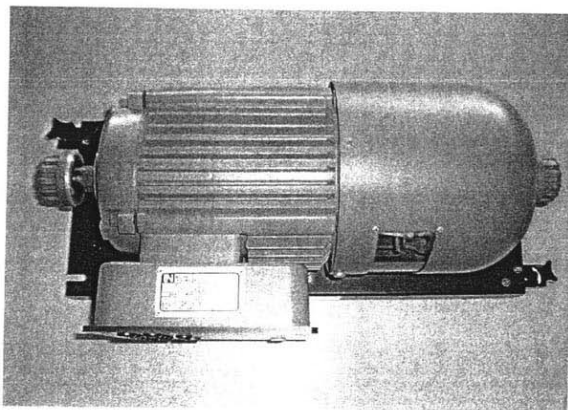
งานวิจัยนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟส ควบคุมแรงบิดเพื่อสั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลมทำให้สามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริงได้โดยรับสัญญาณแรงบิดอ้างอิงผ่านการคอนโทรลเฟส ออกมาในรูปแบบทันเวลา



ภาพที่ 3.14 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJI รุ่น FRENIC MEGA

3.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นขนาด 1 kW

การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น ในงานวิจัยนี้เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของกังหันลมที่กระทำต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะที่มีโหลด ซึ่งเป็นทราบอยู่แล้วว่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันที่ได้ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีคุณภาพที่ไม่ดีเท่าที่ควร กล่าวคือมีลักษณะที่ไม่คงที่นั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้คงที่ก่อนที่จะนำไปจ่ายให้กับโหลด การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นในงานวิจัยนี้เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงปัญหาดังกล่าวเท่านั้น



ภาพที่ 3.15 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นขนาด 1 kW

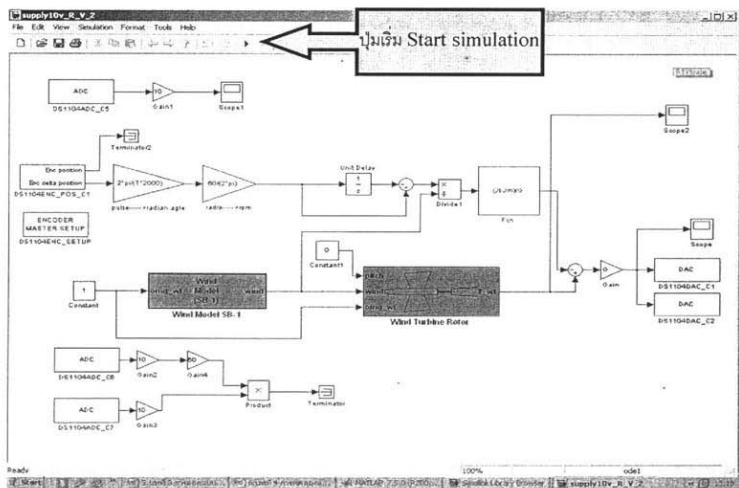
บทที่ 4

ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

เมื่อเราได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการคอร์ดเฟสเป็นที่ยอมรับแล้ว จึงได้ทำการทดลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และทดลองกับเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการคอร์ดเฟส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมกับโปรแกรม Matlab/Simulink

ในการทดลองเครื่องจำลองกังหันลมกับโปรแกรม Matlab/Simulink เราสามารถทำการทดลองได้โดยไม่ต้องต่อวงจรภายนอก เพียงแต่ทำการทดลองจากตัวโปรแกรม Matlab/Simulink ที่ได้ออกแบบมาแล้ว โดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดลอง ในส่วนแบบจำลองของแต่ละส่วน

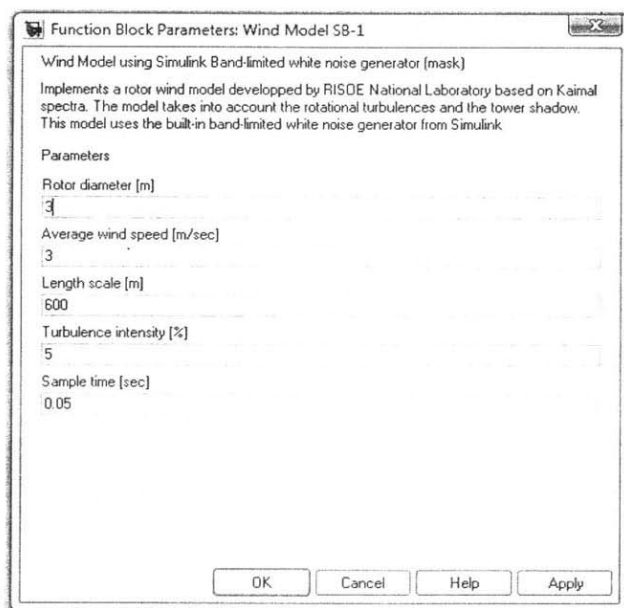


ภาพที่ 4.1 การทดสอบระบบของเครื่องกังหันจำลองกังหันลมใน MATLAB/SIMULINK

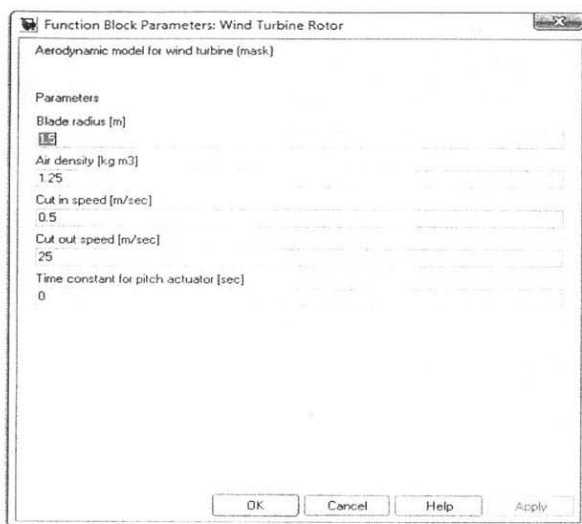
ในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบจากทฤษฎีในบทที่ 2 สามารถใช้ตัวแปรในการกำหนดค่าต่างๆ ได้เช่น ค่าความเร็วลม (Wind Speed) ขนาดของใบพัด (Blade Radius) พื้นที่การสกัดพลังงานของใบพัด (Rotor Diameter) ในช่องใส่พารามิเตอร์ได้เลย

โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- ค่าความเร็วลมเฉลี่ย 3 m/s (v)
- ขนาดความยาวของต่อ 1 ใบพัด 1.5 m
- พื้นที่การสกัดพลังงานของใบพัด 3 m
- ความหนาแน่นของอากาศ 1.25 kg/m³

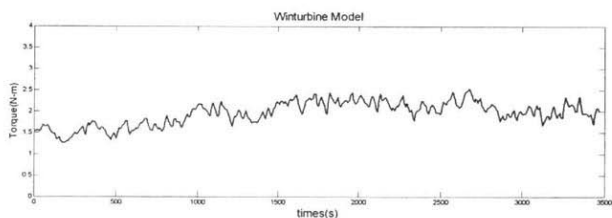


ภาพที่ 4.2 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองความเร็วลม



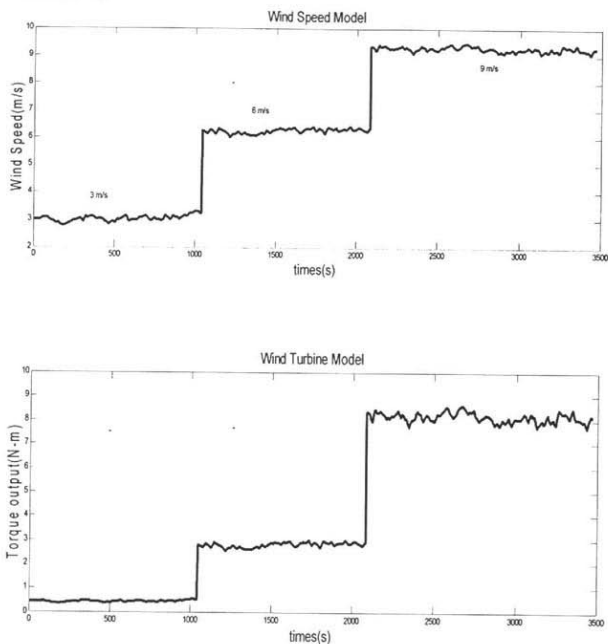
ภาพที่ 4.3 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองกังหันลม

เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบแล้วทดลองเริ่มการจำลองเพื่อจำลองสัญญาณแรงบิดอ้างอิง (Torque reference) ที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ และจากสัญญาณที่ได้ก็จะเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีจริงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองกังหันลม

จากนั้นทำการทดลองที่ค่าความเร็วลมในระดับต่างๆ โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบเมื่อตอนต้น แล้วทดลองเริ่มการจำลองต่อไปเพื่อดูสัญญาณแรงบิดอ้างอิง (Torque reference) ที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ และจากสัญญาณที่ได้ก็จะเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีจริงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ค่าแรงบิดอากาศยานที่ได้จากแบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Model) ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

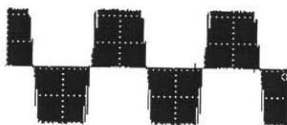
4.2 การทดสอบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

เนื่องจากว่าในระบบเครื่องจ่ายลงกังหันลมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะนั้น จำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีสมรรถนะสูงในการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงผลของแรงบิดที่มีความเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยเพื่อให้แน่ใจว่าจะสามารถทำงานได้โดยทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ดังนี้

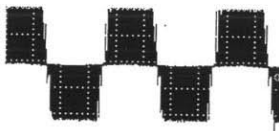
ก. ทดสอบลักษณะของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย L_1 , L_2

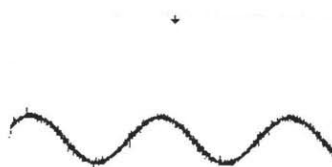


ภาพที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย L_2 , L_3

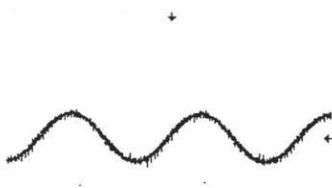


ภาพที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย L_1 , L_3

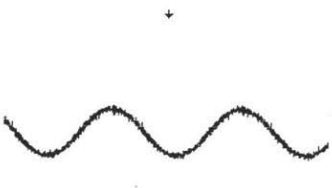
ข. ทดสอบลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย ที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.9 กระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย L_1



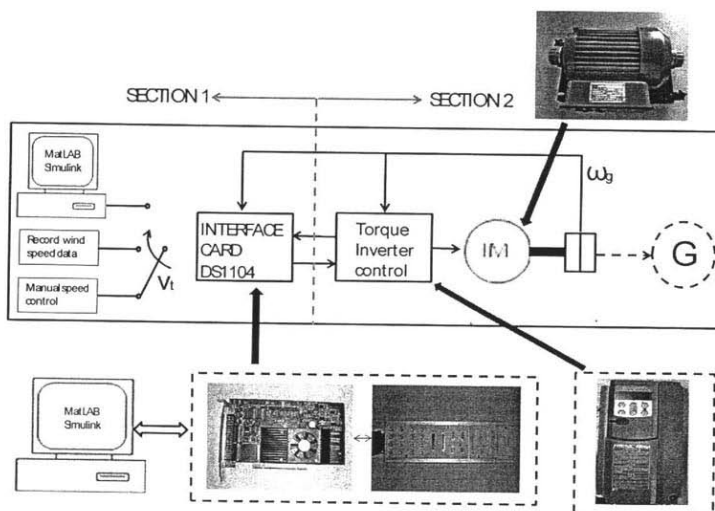
ภาพที่ 4.10 กระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย L_2



ภาพที่ 4.11 กระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย L_3

4.3 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส

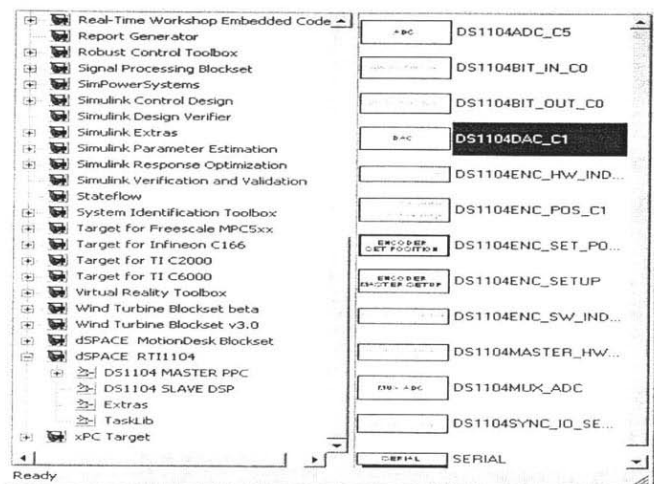
ในขั้นตอนนี้จะมีการนำการ์ดอินเตอร์เฟสเข้ามาใช้ควบคุมและแสดงผลแบบทันเวลา นอกจากการสังเกตพฤติกรรมของสัญญาณที่ได้ในโปรแกรม Matlab/Simulink แล้วสามารถที่จะวัดสัญญาณแบบทันเวลาที่ตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส การกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นจะกำหนดในโปรแกรม Matlab/Simulink มีขั้นตอนเหมือนเดิม



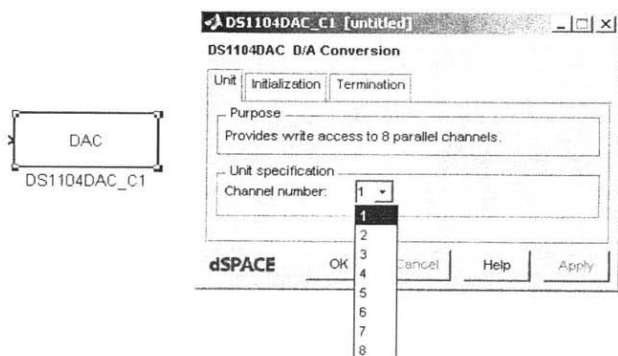
ภาพที่ 4.12 การเชื่อมต่อการ์ดอินเตอร์เฟสระหว่างคอมพิวเตอร์กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลังจากผ่านขั้นตอนการกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นแล้วจะเป็นการส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์ดอินเตอร์เฟส ทำการแปลงโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นแบบทันเวลา โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เลือกชุดฮาร์ดแวร์ของ Block set D/A โดยเข้าไปที่หน้าต่างของ Simulink Library Browser ดังภาพที่ 4.13 และดังภาพที่ 4.14



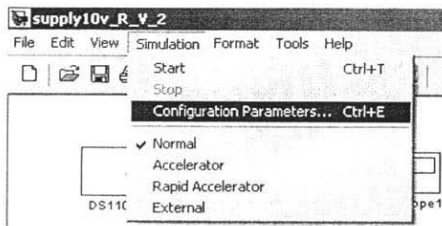
ภาพที่ 4.13 การเลือก Block set D/A



ภาพที่ 4.14 เลือกช่องเอาต์พุตของ Block set D/A

ทำการกำหนดค่าคุณลักษณะการจำลองโดยเข้าไปที่

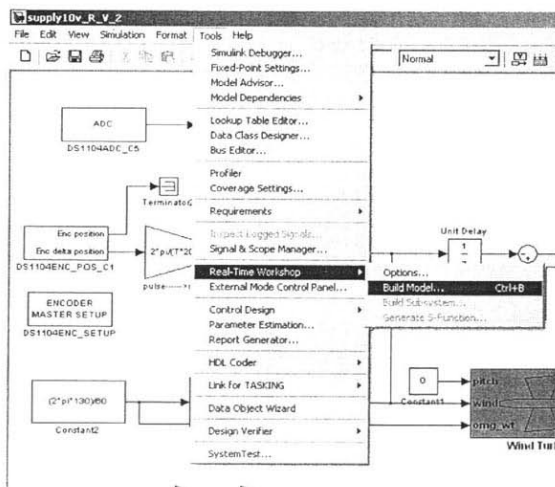
- Simulation > Configuration Parameter... ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 การกำหนดค่าคุณลักษณะการจำลอง

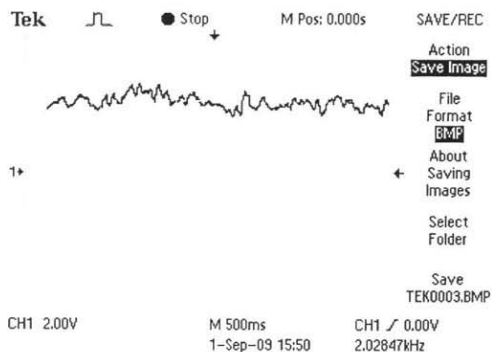
ทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์ดคอนโทรลเลอร์เฟส DS1104 ทำการประมวลผล (Generate Code) แปลงเป็นแบบทวินเวลา โดยเข้าไปที่

- Tool > Real Time Works > Build Model > Enter ดังภาพที่ 4.16



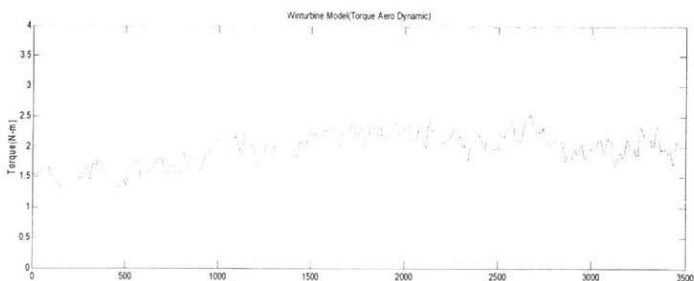
ภาพที่ 4.16 การส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์ดคอนโทรลเลอร์เฟสแบบทวินเวลา

หลังจากทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับคาร์ดิโอเฟส ทำการประมวลผลแบบทันทีแล้ว มอเตอร์เหนี่ยวนำตอบสนองตามคุณลักษณะของแรงบิดอากาศพลศาสตร์ของกังหันลม แสดงดังภาพที่ 4.17

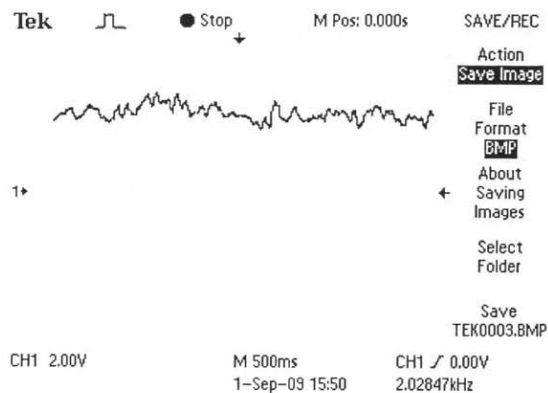


ภาพที่ 4.17 สัญญาณแรงบิดเมื่อความเร็วลม 3 m/s

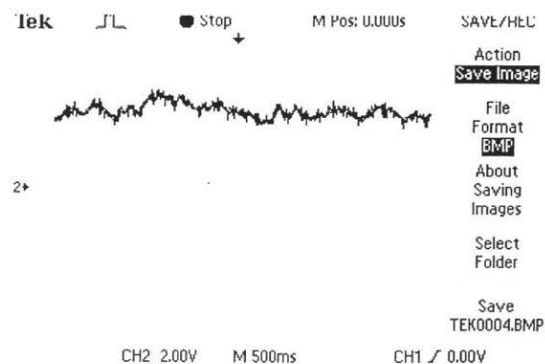
เมื่อเราทำการเปรียบเทียบสัญญาณของแบบจำลองกังหัน (Wind Turbine Model) จากโปรแกรม Matlab/Simulink สัญญาณของแบบจำลองกังหัน (Wind Turbine Model) ในรูปแบบทันที (Real-times) และสัญญาณที่ได้จากแรงบิดของมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันทั้งตามสัญญาณดังภาพที่ 4.18, 4.19, 4.20



ภาพที่ 4.18 สัญญาณจากโปรแกรม Matlab/Simulink



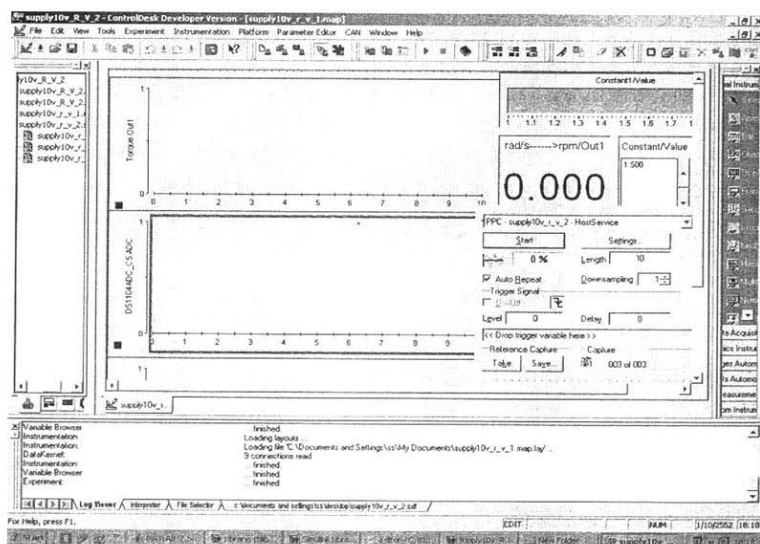
ภาพที่ 4.19 สัญญาณในรูปแบบทันเวลา (Real-time)



ภาพที่ 4.20 สัญญาณที่ได้จากแรงบิดของมอเตอร์

4.4 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟซที่ค่าความเร็วลมต่างๆ

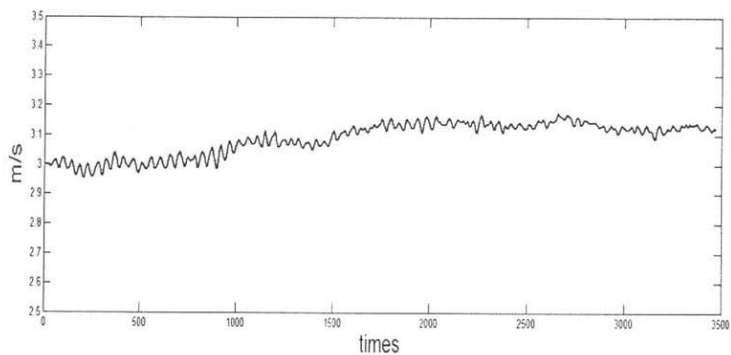
ในการทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟซ ที่ค่าความเร็วลมต่างๆ ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกังหันลมที่มีขนาดต่างกันให้กับการ์คอินเตอร์เฟซ ทำการประมวลผลแบบทันทีเวลาแต่ละครั้งซึ่งเสียเวลามาก ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้โปรแกรม Control Desk เป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคุมค่าพารามิเตอร์ผ่านหน้าตาของ Graphic User Interface (GUI) เมื่อเราได้ทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์คอินเตอร์เฟซ ทำการประมวลผลแบบทันทีเวลาครั้งแรกแล้วการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะถูกควบคุมที่หน้าตาของโปรแกรม Control Desk



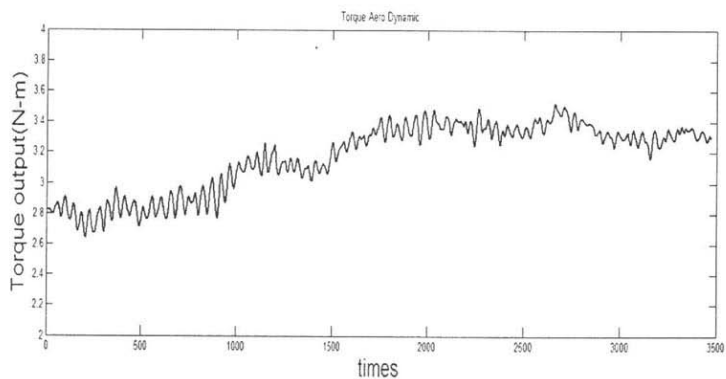
ภาพที่ 4.21 หน้าตาของโปรแกรม Control Desk

เราจะทำการทดลองจากค่าความเร็วลมที่ได้สำรวจไว้ในบทที่ 3 มาทำการทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟซ โดยเริ่มทำการทดลองดังนี้

- ที่ความเร็วลม 3 m/s

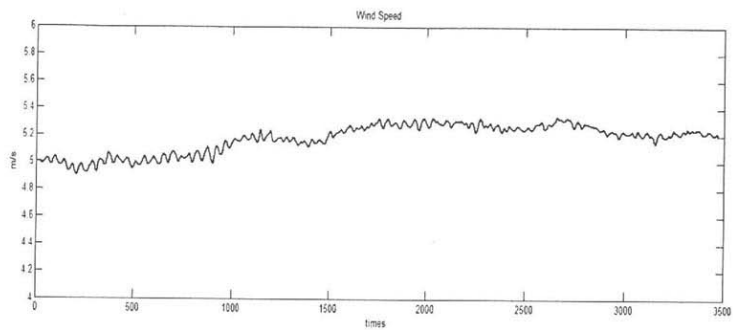


ภาพที่ 4.22 สัญญาณความเร็วลม 3 m/s

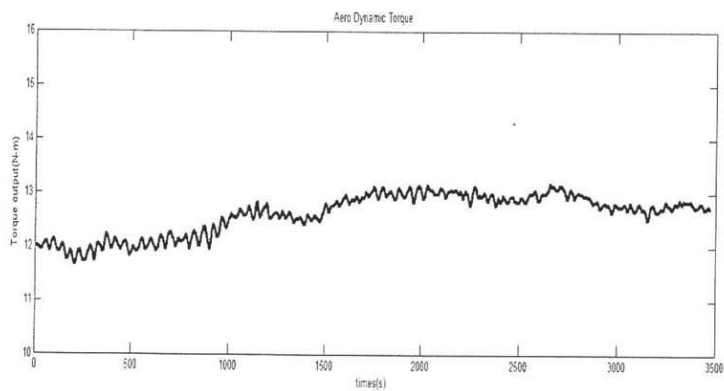


ภาพที่ 4.23 สัญญาณแรงบิดที่ได้จากความเร็วลม 3 m/s

- ที่ความเร็วลม 5 m/s



ภาพที่ 4.24 สัญญาณความเร็วลม 5 m/s



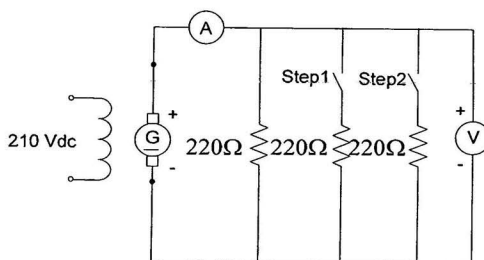
ภาพที่ 4.25 สัญญาณแรงบิดที่ได้จากความเร็วลม 5 m/s

4.5 การทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซ จะมีการทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของกังหันลมที่กระทำต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะที่มีโหลด ซึ่งเป็นทราบอยู่แล้วว่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันที่ได้ก็ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีคุณภาพที่ไม่ดีเท่าไรๆ กล่าวคือมีลักษณะที่ไม่คงที่ฉะนั้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้คงที่ก่อนที่จะนำไปจ่ายให้กับโหลด การทดสอบในหัวข้อนี้เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงปัญหาดังกล่าวเท่านั้น โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

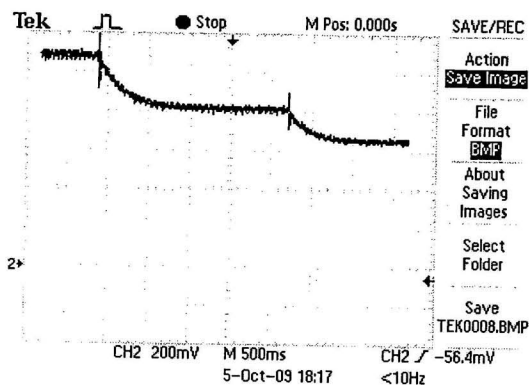
ชนิดของเครื่องกำเนิด	กระแสตรง
ชนิดการกระตุ้น	แยกกระตุ้น
ชนิดและขนาดของโหลด	ความต้านทาน 220 โอห์ม 250 วัตต์ 3 ตัว
ขนาดกระแสฟิลต์	210 Vdc
พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิด	1 kW
พิกัดกระแสของเครื่องกำเนิด	5.7/6.2/5.8 A
พิกัดแรงดันของเครื่องกำเนิด	230 Vdc
พิกัดความเร็วรอบ	2040/1650/1870
ความเร็วลมทดสอบ	3 m/s
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด	3 m

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

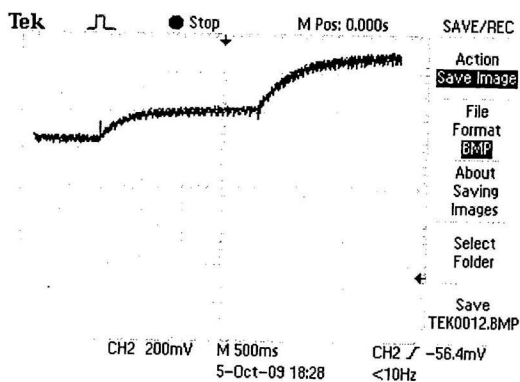


ภาพที่ 4.26 วงจรการทดสอบกับ โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

เริ่มการทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น โดยวิธีการกด สวิตช์ขั้น 1 ขนานโหลดที่ละ 220 โอห์ม 250 วัตต์ และกดสวิตช์ขั้น 2 เพื่อทำการขนานโหลดอีก 220 โอห์ม 250 วัตต์แล้ววัดขนาดของแรงดันไฟฟ้า และกระแสดังนี้



ภาพที่ 4.27 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดแต่ละชั้น



ภาพที่ 4.28 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดแต่ละชั้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยที่ได้จากการทดลอง

5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมใน โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถคำนวณค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ (Aero Dynamic Torque) ของกังหันลมในระดับความเร็วลมต่างๆ ได้จริง

5.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมใน โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถแสดงค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมในระดับความเร็วลมต่างๆออกมาในรูปแบบพื้นที่เวลา ได้จริง

5.1.3 เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถที่จะควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คินเตอร์เฟส ได้จริง

5.1.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คินเตอร์เฟส สามารถแสดงคุณลักษณะค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ ของกังหันลมในระดับความเร็วลมต่างๆ ได้จริง

5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

5.2.1 ความเร็วลมที่วัดได้จริงมีค่าน้อยทำให้ผลการทดลองที่แสดงออกมาทางหน้าต่างของ Graphic User Interface (GUI) มีค่าต่ำ

5.2.2 สัญญาณจากตัววัดกระแส (Current sensor) จะมีสัญญาณรบกวนออกมาแสดงที่หน้าต่างของ GUI

5.2.3 ที่ตัวอินเวอร์เตอร์ควบคุมแรงบิดต้องมีการควบคุมแรงบิดไม่ให้เกินพิกัด

5.2.4 สัญญาณที่ได้จาก Optical Encoder ต้องมีการลดค่าแรงดันลงจาก 12 โวลต์ ให้เหลือ 5 โวลต์ เพื่อใช้ป้อนให้กับอินพุตของการ์คินเตอร์เฟส DS1104

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 พัฒนาให้สามารถทดสอบที่ความเร็วลมสูง ๆ ได้

5.3.2 พัฒนาให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทดสอบที่แรงบิดสูง ๆ ได้

5.3.4 ในอนาคตงานวิจัยนี้สามารถนำไปวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับการควบคุมระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับได้

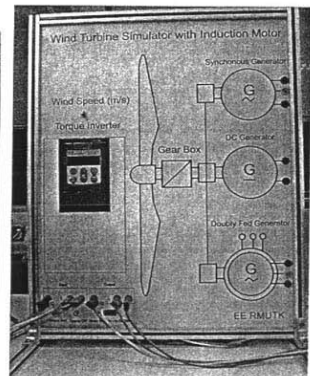
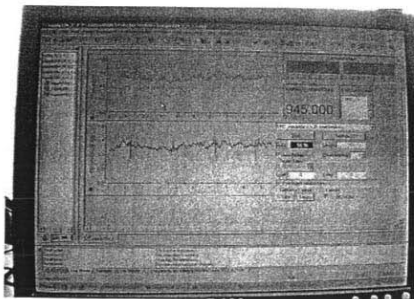
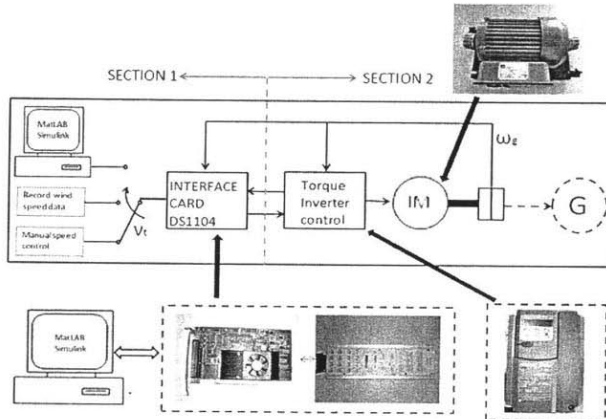
5.3.5 ในอนาคตงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มพิกัดของกังหันลมขนาดใหญ่ขึ้นโดยใช้แบบจำลองเดิม

บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย_2546.
<http://www2.dede.go.th/dede/renew/Twm/main.htm>
- [2] กองพัฒนาพลังงานทดแทน. ฝ่ายพัฒนาและแผนงาน โรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, พลังงานลม, 2552
<http://www2.dede.go.th/dede/renew/Twm/REPORT.htm>
- [3] รศ.เวทิน ปิยรัตน์, ดร.จักรพงษ์ จารุมิตร, อาจารย์ชาญฤทธิ์ ธาราลันดิสุข., ระบบควบคุมแบบ
ทันเวลาและการประยุกต์ใช้งานกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2552
- [4] D.Aouzellag, K.Ghedamsi, E.M.Berkouk. , Power Control of a Variable Speed Wind Turbine
Driving an DFIG. Electrical Engineering Department, A.Mira University, Algeria. 2008
- [5] Eric Hau., Wind Turbine Fundamentals., Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006
- [6] Fernando D.Brianchi, Hernan De Battista and Ricardo J.Mantz., Wind Turbine Control.
Springer-Verlag, London, 2007
- [7] Md.Arifujjaman, M.T.Iqbal, John E.Quaicoe. Emulator of a Small Wind Turbine System with
a separately-excited DC Machine., Faculty of Engineering and Applied Science Memorial
University of Newfoundland., St.John's, NL, Canada. 2008

ภาคผนวก ก

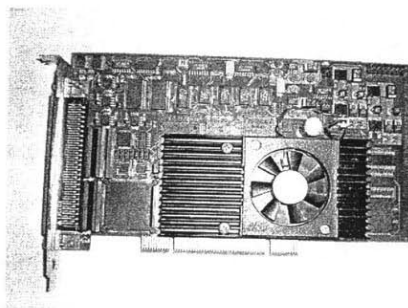
รูปเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบ Real-time



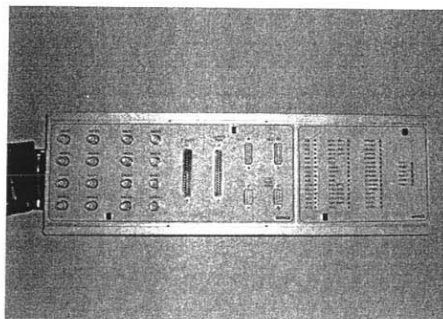
ภาคผนวก ข

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

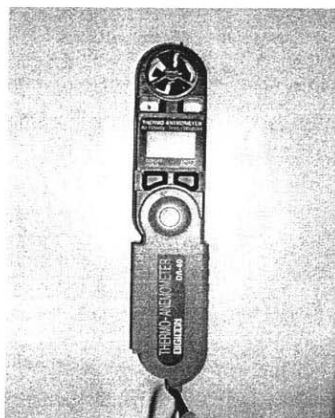
การ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104



ช่องสัญญาณเอาต์พุตของการ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104



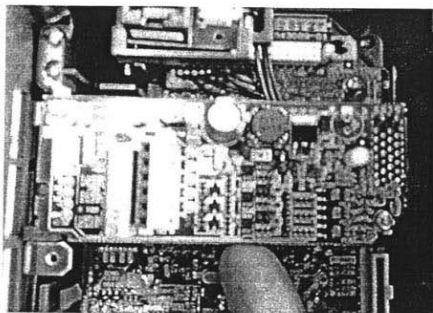
เครื่องวัดความเร็วลม DIGICON DA-40



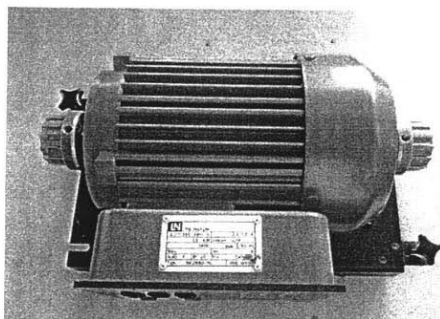
อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส รุ่น FRENIC MEGA



PG interface card OPC-G1-PG



มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



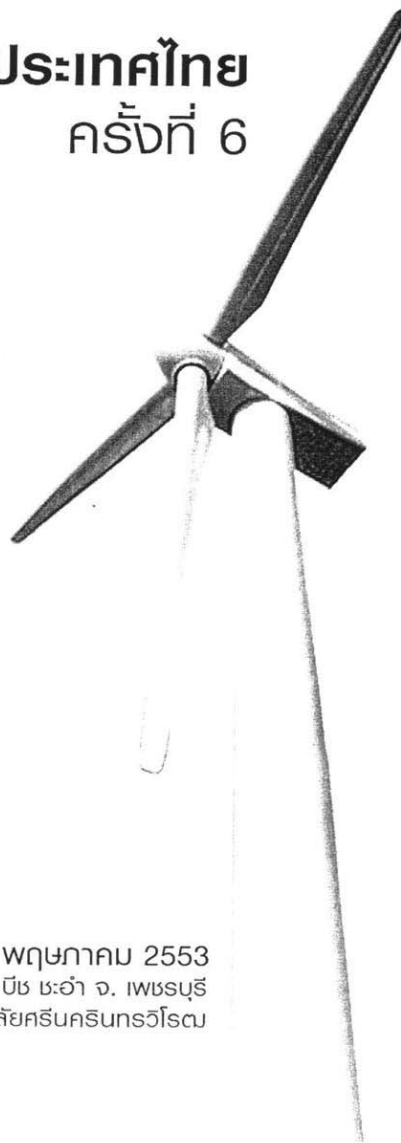
ภาคผนวก ก

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ

เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 6



5-7 พฤษภาคม 2553

ณ โรงแรมฮอลิเดย์อินน์ ธีสอร์ท ธีเจนท์ บีช ะอำ จ. เพชรบุรี
จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจาก พลังงานลม

Wind Turbine Simulator with Induction Motor for Wind Power Generation Testing System

ชาญฤทธิ์ ขาวสันติสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10330

โทร: 0-2287-9629, 089-9226826 โทรสาร 0-2287-9629 E-mail: chanrit.t@rmutk.ac.th, www.ee.rmutk.ac.th

Chanrit Tarasantisuk

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTK

2 Nanglingee Rd. Sathon Bangkok Tel 0-2287-9629, 089-9226826 Fax 0-2287-9629 E-mail: chanrit.t@rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม มีข้อดีที่ทำให้การทดสอบระบบกังหันลมทำได้สะดวก รวดเร็ว ลดเวลาและค่าใช้จ่าย และมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการทดสอบกับกังหันลมจริงนั้นทำได้ยาก มีค่าใช้จ่ายสูงและไม่เหมาะกับการนำมาออกแบบระบบควบคุมเพราะการทดสอบระบบควบคุมต้องการทดสอบด้วยความเร็วลมคงที่ หรือความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามกำหนด แต่กังหันลมจริงทดสอบได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากความเร็วลมจริงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและไม่คงที่ เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการดิอินเตอร์เฟส จะใช้หลักการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมือนกับแรงบิดที่เกิดจากกังหันลมจริง โดยการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดให้มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลม โดยใช้หลักการสร้างแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) และควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และส่งข้อมูลผ่านการดิอินเตอร์เฟส ออกมาในลักษณะแบบเรียลไทม์ (Real-time) ไปยังอินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1kW สร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด ของกังหันลม ทำให้สามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริงได้

Abstract

The wind turbine simulator with induction motor controlled and display by DS1104 interface card was made propose for test control system to the development of wind turbine design to optimal to reduce the costs of wind power how to make wind turbine more economical and efficient. Cause from

difficult of testing need to wind speed constant value but actual wind speed has to variable and turbulence. There can not control its.

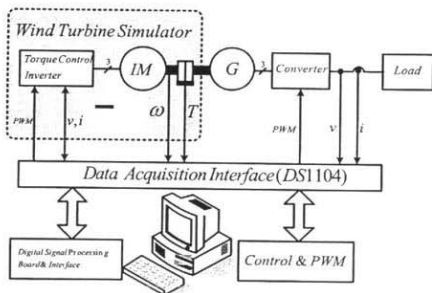
The wind turbine simulator with induction motor controlled and display by interface card use a squirrel cage induction motor is proposed for a wind simulator as a torque-generating source. A torque generating relate to power coefficient. The Matlab/Simulink program include the mathematical model of the wind turbine to calculate reference signal (torque reference) to interface card for passed generated code to real-time signal sent to a torque control inverter create a torque-generating relation to power coefficient and implement to induction motor 1 kW create a torque-generating relation to power coefficient. The wind turbine simulator with induction motor controlled and display by interface card responses confirms that the system can perform satisfactorily under step changes of torque reference, power reference and load disturbances.

1. บทนำ

ในสภาวะที่ความต้องการพลังงานของโลกที่เพิ่มมากขึ้นในเรื่องของการผลิตไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง ถ่านหิน พลังงานน้ำและพลังงานจากก๊าซธรรมชาติ ในปัจจุบันพลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีความสนใจกันอย่างกว้างขวางและในปัจจุบันพลังงานลมถูกนำมาใช้เพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้ากันมากขึ้น ซึ่งพลังงานลมเป็นพลังงานที่สะอาด ไร้มลพิษ ไม่มีวันหมดสิ้น หรือชื่อจากแหล่งอื่น และในประเทศไทยก็ยังมีมีการนำพลังงานลมมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยในหลายๆแห่ง ระบบควบคุมที่ออกแบบทำงานได้สะดวก

รวดเร็ว ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ทำให้การออกแบบและพัฒนาระบบกังหันลมมีต้นทุนที่ลดลง [2]

บทความนี้จะใช้วิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมือนกับแรงบิดที่เกิดขึ้นจริง โดยการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดให้มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดของกังหันลม โดยใช้วิธีการสร้างแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) และควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Matlab/Simulink และส่งข้อมูลผ่านการคอนโทรลเลอร์เฟส ออกมาในลักษณะแบบทวนเวลา ไปที่ชุดอินเวอร์เตอร์สั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1kW สร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดของกังหันลม ทำให้สามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริงได้ [1] โครงสร้างโดยรวมของเครื่องจำลองกังหันลมจะแสดงในรูปที่ 1 ในส่วนแรกประกอบไปด้วยแบบจำลองความเร็วลมใช้สร้างความเร็วลมที่ต้องการ [3] รูปแบบของพลังงานความเร็วลมสามารถสร้างได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหลักการสุ่มของ Kalman Spectrum โดยโปรแกรม Matlab/Simulink หรือสร้างจากการปรับค่าขึ้นลงด้วยตัวเองหรือจากข้อมูลบันทึกความเร็วลมจริงจากกรมอุตุนิยมวิทยาและต่อมาเป็นแบบจำลองกังหันลมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลักการและทฤษฎีกังหันลมที่คำนวณสัญญาณอ้างอิงในลักษณะของแรงบิดอ้างอิง ผ่านการคอนโทรลเฟส เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทวนเวลา แล้วส่งไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งอยู่ในส่วนที่สองโดยที่หาหน้าที่รับสัญญาณมาควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้แสดงคุณลักษณะของกังหันลมที่แกนโรเตอร์ออกมาเป็นแรงบิดของพลังงานลม [4]



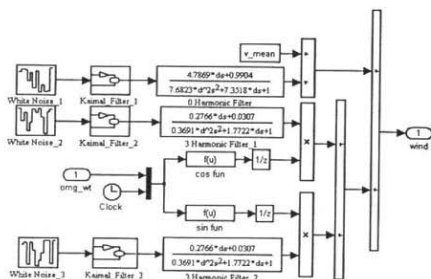
รูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องจำลองกังหันลม

2. แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

แบบจำลองความเร็วลมมีความสำคัญในการบอกค่าสมรรถนะของแหล่งกำเนิดลมและพฤติกรรมของลมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำผลจากแบบจำลองความเร็วลมไปวิเคราะห์และนำพลังงานลมนี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในธรรมชาติของความเร็วลมจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ (ก) ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย (Steady State) ซึ่งจะเฉลี่ยจากค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และลดลงต่ำสุด

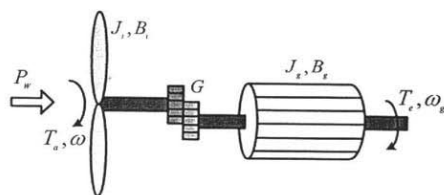
(ข) ส่วนที่สองคือส่วนของค่าความแปรปรวน (Turbulence) เป็นคุณลักษณะของการสุ่มค่าในแบบไม่เป็นปกติกับส่วนแรกคือส่วนที่

เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย (Steady State) กับเวลาและระยะทาง แล้วนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลม

3. แบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Model)



รูปที่ 3 แบบจำลองกังหันลม

สมมุติให้อัตราทดเกียร์ $G = 1$ เพราะฉะนั้น $w_g = w$ สามารถเขียนสมการไดนามิกของกังหันได้เป็น โดยที่ $J = J_r + J_g$ และ $B = B_r + B_g$ แปลงให้อยู่ในรูปแบบพีชคณิต

$$T_o - T_r = (J D + B) w \quad (1)$$

โดยกำหนดตัวดำเนินการ $D = \frac{d}{dt}$

แรงบิดอากาศพลศาสตร์ T_r เป็นค่าที่ได้รับผลส่วนหนึ่งจาก w ดังต่อไปนี้ โดยกังหันที่มีขนาดและลักษณะของใบพัดต่างกันก็จะมีกราฟคุณลักษณะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังที่กังหันสกัดได้จากผลดังสมการที่ 2

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p(v, w, \beta) \quad (2)$$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มีการปรับมุมพิช ดังนั้นที่มุมพิชคงที่ค่าหนึ่ง C_p จะขึ้นอยู่กับค่าของ v และ w เท่านั้น

ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ (3)

$$w = \frac{\lambda v}{R}$$

จะได้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^3 C_p(\lambda)$$

แทนค่าใน $T_a = \frac{P_a}{w}$ จะได้ว่า

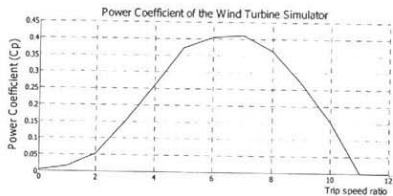
$$T_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 \frac{v^3}{w} C_p(\lambda)$$

แทนค่าใน $w = \frac{\lambda v}{R}$ จะได้

$$T_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^2 \frac{1}{\lambda} C_p(\lambda) = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^2 C_T(\lambda)$$

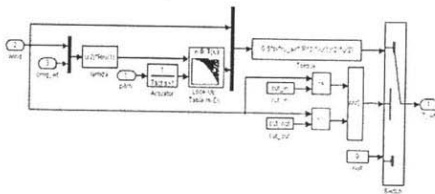
โดยที่ค่าของ $C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

และ $C_p(\lambda)$ เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลัง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับแลมด้า (λ)

จากรูปที่ 3 กังหันเป็นระบบที่มีอินพุตคือแรงบิดของกังหันลม มีเอาต์พุตคือความเร็วรอบ และถือว่าลมที่กระทำต่อกังหันคือสัญญาณรบกวน (Disturbance) ดังนั้นจากสมการ 6 จึงเขียนบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันได้ดังรูปที่ 5



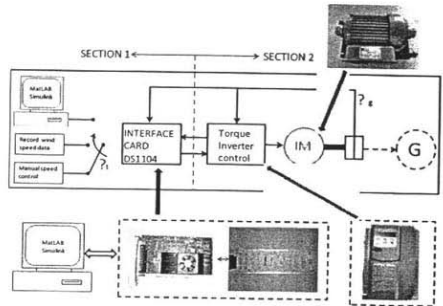
รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่า จากสมการพื้นฐานของกังหันลม สามารถที่นำมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรม Matlab/Simulink ได้โดยในส่วนของการคำนวณค่า C_p จะใช้บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink ช่วยในการคำนวณค่า C_p โดยใช้หลักการ Interpolation

(3)

4. การออกแบบเครื่องจำลองกังหันลม

(5)



รูปที่ 6 การออกแบบระบบเครื่องจำลองกังหันลม

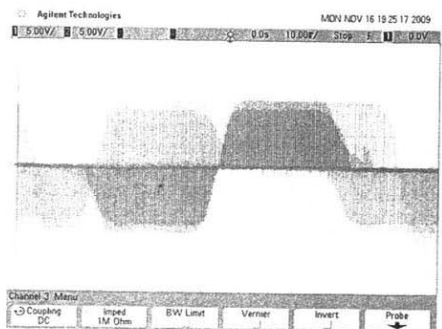
เครื่องจำลองกังหันลมที่ออกแบบขึ้นมาจะประกอบด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ 6 คือ 1) มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 kW 2) คอขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 kW 3) 2000 pulses rotary encoder 4) อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมแรงบิด และ 5) การ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น DS1104

5. ผลการทดลอง

5.1 การทดสอบสมรรถนะของทอร์กอินเวอร์เตอร์

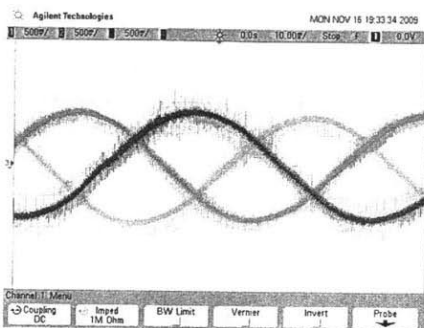
ในระบบเครื่องจำลองกังหันลมนี้แรงบิดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีสมรรถนะสูงในการควบคุมแรงบิดที่มีความเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ดังนี้

ก. ทดสอบลักษณะของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย A, B และ C

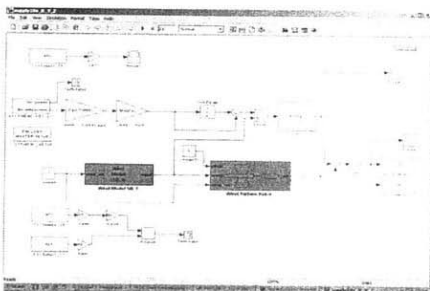
ข.ทดสอบลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่สายจ่ายให้กับมอเตอร์
เหิรยื่อนำสามเฟส



รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าที่ปลายสาย A, B และ C

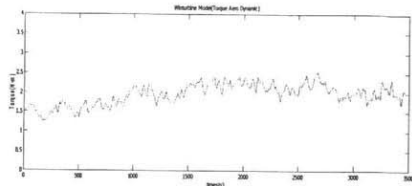
5.2 การทดลองเครื่องจำลองกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการทดลองเครื่องจำลองกับโปรแกรม Matlab/Simulink สามารถทำการทดลองได้โดยไม่ต้องตั้งรกรากนอก เพียงแต่ทำการทดลองจากตัวโปรแกรม Matlab/Simulink ที่ได้ออกแบบมาแล้ว โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดลองในส่วนแบบจำลองของแต่ละส่วน โดยกำหนดพารามิเตอร์ความเร็วลมที่ 3 m/s พื้นที่การสกัดพลังงานของใบพัด 3 m และความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m³

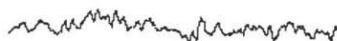


รูปที่ 9 โปรแกรม Matlab/Simulink สำหรับจำลองพลังงานลม

เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบแล้วทดลองเริ่มการจำลองเพื่อดูสัญญาณแรงบิดอ้างอิง (Torque reference) ที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ เมื่อเราทำการเปรียบเทียบสัญญาณของแบบจำลองกังหัน (Wind turbine model) จากโปรแกรม Matlab/Simulink สัญญาณของแบบจำลองกังหัน ในลักษณะสัญญาณทันเวลา และสัญญาณที่ได้จากแรงบิดของมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันทั้งสองสัญญาณ



Tek [Square Wave Icon] ● Stop M Pos: 0.000s



1+

CH1 2.00V

M 500ms

CH1 / C

1-Sep-09 15:50

2.02847k

รูปที่ 10 ค่าแรงบิดจากพลศาสตร์จากแบบจำลองกังหันลมที่
ความเร็ว 3 m/s ขนาด 3 m

5.3 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยการคอนโทรลเฟส DS1104

การนำการคอนโทรลเฟสเข้ามาเพื่อควบคุมและแสดงผลแบบทันเวลาจากการสังเกตพฤติกรรมของสัญญาณที่ได้ในโปรแกรม Matlab/Simulink แล้วเรายังสามารถที่จะเห็นสัญญาณแรงบิดแบบทันเวลาที่ได้ด้วยเครื่องเหิรยื่อนำได้โดยผ่านการคอนโทรลเฟส ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์กำหนดในโปรแกรม Matlab/Simulink

Tek [Square Wave Icon] ● Stop M Pos: 0.000s



1+

CH1 2.00V

M 500ms

CH1 / I

1-Sep-09 15:50

2.02847k

รูปที่ 11 สัญญาณแรงบิดผ่านช่องสัญญาณ DS1104DAC_CH5

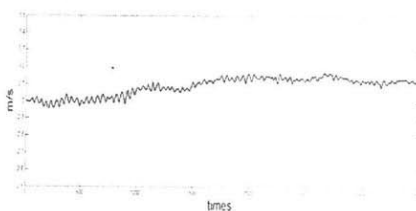
2+

CH2 2.00V M 500ms CH1

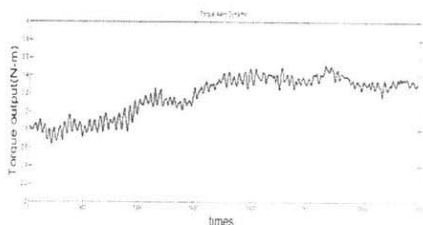
รูปที่ 12 สัญญาณประมาณแรงบิดมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์

5.4 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมที่ความเร็วลมแต่ละระดับของความเร็ว

การทดลองจากค่าความเร็วลมต่างๆ มาป้อนให้กับเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104 เพื่อให้เครื่องจำลองกังหันลมแสดงค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ (Aero Dynamic Torque) โดยเริ่มทำการทดลองดังนี้
ก) ที่ความเร็วลม 3 m/s

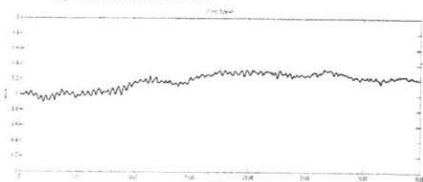


รูปที่ 13 สัญญาณค่าแรงบิดที่ความเร็วลม 3 m/s

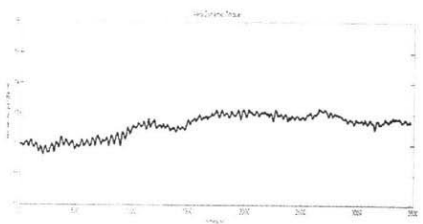


รูปที่ 14 สัญญาณแรงบิดที่ได้จากความเร็วลม 3 m/s

ข) ที่ความเร็วลม 5 m/s



รูปที่ 15 สัญญาณค่าแรงบิดที่ความเร็วลม 5 m/s



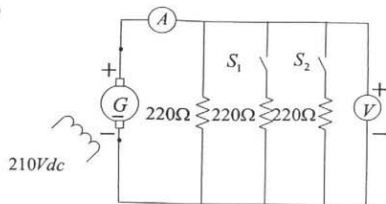
รูปที่ 16 สัญญาณแรงบิดที่ได้จากความเร็วลม 5 m/s

5.5 การทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของกังหันลมที่กระทำต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะที่มีโหลด ซึ่งกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ได้ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นไม่คงที่ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อควบคุมและแปลงผันพลังงานไฟฟ้าก่อนจะจ่ายให้กับโหลด การทดสอบในหัวข้อนี้เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงปัญหาดังกล่าวเท่านั้น โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

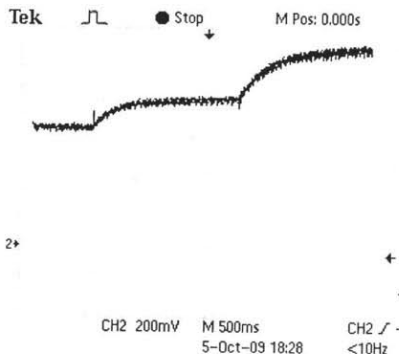
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

ชนิดเครื่องกำเนิด	กระแสตรงแยกกระตุ้น
ชนิดและขนาดของโหลด	Resistor 220 โอห์ม 250 w 3 ตัว
ขนาดกระแสฟูลล์	210 Vdc
พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิด	1 kW
พิกัดกระแสของเครื่องกำเนิด	5.7/6.2/5.8 A
พิกัดแรงดันของเครื่องกำเนิด	230 Vdc
พิกัดความเร็วรอบ	2040/1650/1870
ความเร็วลมทดสอบ	3 m/s
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด	3 m

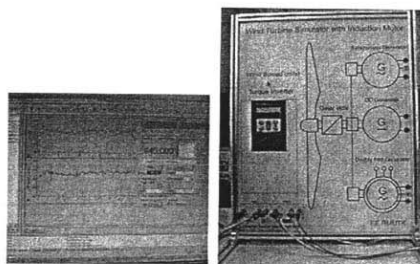


รูปที่ 17 วงจรการทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยทำการทดสอบกับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยก กระตุ้น โดยเพิ่มโหลดครั้งละ 220 โอห์มขนาด 250 วัตต์จำนวน 2 ระดับ



รูปที่ 18 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดแต่ละระดับ



รูปที่ 19 เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำ

6. สรุปผลการทดลอง

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม สามารถแสดงคุณลักษณะค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ (Aero Dynamic Torque) ของกังหันลมในระดับความเร็วลมต่างๆ ได้จริง โดยใช้งานโปรแกรม Matlab/Simulink ทำงาน

ร่วมกับการ์ดอินเตอร์เฟสทำให้สามารถคำนวณ และแสดงค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมในระดับความเร็วลมต่าง ๆ ออกมาในรูปแบบสัญญาณเห็นเวลาได้ และแสดงผลตอบสนองของกังหันลมที่กระทำต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกังหันจริงอย่างมาก ทำให้สามารถใช้งานทดสอบระบบควบคุมและคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมอัลกอริทึมติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และเลือกตำแหน่งการติดตั้งกังหันลมให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร. บัณฑิต เนียมมณี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการจัดทำเครื่องจำลองกังหันลม รวมทั้งนายณพรัตน์ ม่วงคุ้ม และ นายวิษณุ เหมือนแก้ว นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้ทุ่มเทช่วยเหลือจัดทำและทดสอบระบบ

เอกสารอ้างอิง

1. Nearnmanee, B., Sirisumrannukul, S. and Chatratana S., "Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Generator Testing" International Energy Journal, Vol.8, pp.21-28, 2007
2. Eric Hau., "Wind Turbine Fundamentals." Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006.
3. Fernando, D., Bianchi, Hernan De Battista and Ricardo J.Mantz. "Wind Turbine Control" Springer-Verlag London. 2007
4. Arifujjaman, Md., Iqbal, M.T. and Quaicoe. J. E. "Emulator of a Small Wind Turbine System with a separately-excited DC Machine" Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, St.John's, NL, Canada. 2008

