ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก

Rotor-Speed Control-System Design for Small Wind Turbine

นามผู้วิจัย นายธนพล ศรีวงษา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(อาจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก

Rotor-Speed Control-System Design for Small Wind Turbine

โดย

นายธนพล ศรีวงษา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2552

ธนพล ศรีวงษา 2552: การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 68 หน้า

เทคโนโลยีของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วง 25 ปีที่ผ่านมา เกือบทั้งหมดของกังหันลมที่ถูกออกแบบหรือติดตั้งใหม่ในปัจจุบันมีระบบควบคุมความเร็วเป็นส่วนประกอบสำคัญ โดยมีเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ การควบคุมความเร็วรอบโดยการปรับมุมพิตช์ของใบพัด ระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมที่มีประสิทธิภาพมีความสำคัญ คือ ทำให้ในช่วงลมน้อย กังหันลมมีความเร็วรอบตามความเร็วค่าหนึ่งๆ เพื่อให้การสร้างกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดในค่าความเร็วลมนั้นๆ และในช่วงลมมาก กังหันลมจะคงความเร็วไว้ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ไม่กระชาก ทำให้คุณภาพของกระแสไฟฟ้าจากกังหันลมดีขึ้น โดยระบบควบคุมนี้ส่วนมากมีใช้เฉพาะกับกังหันลมขนาดใหญ่เท่านั้น

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก โดยได้ออกแบบและสร้างกังหันลมขนาดเล็กจำลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 1.14 เมตร ซึ่งมีโครงสร้างและองค์ประกอบเหมือนกังหันลมทั่วไป แต่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กลไกการปรับมุมพิตช์ถูกออกแบบและติดตั้งโดยไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับโรเตอร์ของกังหันลม ทำให้ยังคงสามารถใช้ได้กับช่วงความเร็วลมค่าเดิม แต่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบซึ่งสร้างจากตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อนและเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือแบบ PID การออกแบบระบบควบคุมเป็นแบบต่อเรียงโดยมีวงรอบภายในคือ ระบบควบคุมมุมพิตช์ และวงรอบภายนอก คือ ระบบควบคุมความเร็วรอบ โดยสามารถควบคุมการติดตามความเร็วรอบที่ต้องการได้ดี และมีสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบให้คงที่เนื่องจากลม ซึ่งเปลี่ยนแปลงได้ดีเช่นกัน

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Tanapon Srivongsa 2009: Rotor-Speed Control-System Design for Small Wind Turbine. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 68 pages.

Wind turbine technology has changed tremendously in the past twenty five years. Most of the wind turbines, which are currently designed or installed, have some rotor speed control systems as their significant components. The most popular control technique is rotor speed control by adjusting the blade's pitch angle. At low wind speed, good rotor speed control is important to obtain a specific rotor speed to generate as high electricity as possible for that specific wind speed. At high wind speed, good rotor speed control is important to maintain a constant rotor speed so that the resulting electricity is constant without any jerk. This will result in better-quality electricity. The rotor speed control system is mainly installed in large wind turbines only.

This research designs the rotor speed control system of a small wind turbine. A small-scaled wind turbine was designed and built with 1.14 meters in diameter. This wind turbine has the same structure and components as the regular wind turbine, but it cannot generate electricity. A mechanism to adjust the blade pitch angle was designed and installed without adding more weight to the rotor. As a result, the wind turbine can be operated at the same wind speed range but with higher efficiency.

The rotor speed control system was created from a PID controller, which is not complicated and is well-known in the industry. There are two cascading loops in the control system, namely the inner and the outer loops. The inner loop controls the pitch angle, and the outer loop controls the rotor speed. The experimental result has shown that the wind turbine was able to follow the desired speed closely and is able to robustly maintain the speed very well in the presence of the disturbance from the changing wind.

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และให้คำแนะนำช่วยเหลือและตรวจสอบข้อบกพร่อง จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.ธเนศ อรุณศรีโสภณ ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศกร เกิดช้าง ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบัน ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (RDiPT), ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (Control of Robot and Vibration Laboratory, CRVlab) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมไปถึงญาติๆ สำหรับความรัก กำลังใจ ที่มอบให้ข้าพเจ้าเสมอมา และขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนสำหรับคำแนะนำช่วยเหลือ และกำลังใจที่มีต่อข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธนพล ศรีวงษา

กันยายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	58
สรุป	58
ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	60
ภาคผนวก	62
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	68

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและพื้นที่ในการติดตั้งกังหันลม	6
2	ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	10
3	พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์	21
4	พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก	22

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

1 การจำแนกลักษณะการวางตัวของแกนหมุน 3
2 สัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient, C_p) และอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip Speed Ratio) ของกังหันลมแบบต่างๆ 4
3 ส่วนประกอบที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้า 5
4 ชนิดของกังหันลมแบบแกนระดับ แบบทวนลม (a) และแบบตามลม (b) 7
5 ระบบส่งกำลังแบบผ่านชุดเกียร์ (a) และแบบขับตรง (b) 8
6 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเดี่ยว 9
7 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง 9
8 แผนที่ศักยภาพลมโดยรวมช่วงเวลาลมสงบของประเทศไทย 13
9 การควบคุมกังหันลมในช่วงลมน้อย (Region 1) และช่วงลมมาก (Region 2) 15
10 ปริมาณการใช้ของวิธีการควบคุมความเร็วของกังหันลมขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง 16
11 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมแบบ Stall Control (เส้นประ) และแบบ Pitch Control (เส้นทึบ) 16
12 กลไกของระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์ 17
13 กลไกและอุปกรณ์ของระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์แบบรวม 18
14 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ 19
15 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบ PID 20
16 การวัดคาบเวลาการแกว่งสำหรับวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ 21
17 การวัดคาบเวลาสำหรับวิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก หรือซีเฮสอาร์ 21
18 การหักล้างการสั่นโดยใช้ลำดับของอิมพัลส์ 23
19 สัญญาณอินพุตแบบสองขั้นโดยเทคนิคอินพุตเชปปิง 23
20 สภาพไวของความถี่ธรรมชาติซึ่งผิดพลาดจากการหาแบบจำลอง 24
21 ผลของการเพิ่มสภาพทนทานต่อเวลาขึ้นของผลตอบสนองของระบบ 24
22 อุปกรณ์การทดลองและการเชื่อมต่อ 25
23 กังหันลมจำลอง 26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ห้องเครื่องของกังหันลมจำลอง	27
25	การส่งแรงบิดจากมอเตอร์ไปยังเฟืองดอกจอกเพื่อปรับมุมพิตช์	27
26	เฟืองดอกจอกสำหรับปรับมุมพิตช์	28
27	ตัวตรวจวัดตำแหน่ง (Incremental Encoder)	28
28	วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power amplifier)	29
29	การ์ดรับส่งข้อมูล (Data acquisition) รุ่น NI PCI 6221 และบอร์ดรับส่งสัญญาณ	29
30	แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบต่อเรียงของระบบควบคุมความเร็วรอบ	30
31	แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์	30
32	แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมมุมพิตช์	31
33	ผังวัตถุอิสระของกังหันลมจำลอง	32
34	วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรง	33
35	แผนภาพบล็อกของส่วนการปรับค่าสัญญาณควบคุมมุมพิตช์	35
36	ความเร็วของโรเตอร์ ($\dot{\theta}_1$) และความเร็วของมอเตอร์ ($\dot{\theta}_2$)	35
37	เส้นกระแสการไหลของลมผ่านแพนอากาศแบบแผ่นเรียบ	36
38	มุมพิตช์ของกังหันลมจำลอง	37
39	ความเร็วช่วงขึ้นของโรเตอร์เมื่อกำหนดมุมพิตช์คงที่ค่าต่างๆ	37
40	ความเร็วของโรเตอร์เมื่อปรับเพิ่มมุมพิตช์	38
41	การแกว่งของผลตอบสนองเมื่อกังหันลมเริ่มต้นทำงาน	39
42	ผลการหาเอกลักษณ์ของระบบเทียบกับผลตอบสนองจริง	43
43	แผนภาพบล็อกโปรแกรมจำลองผลการออกแบบด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิง	44
44	ผลตอบสนองจำลองเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง	44
45	ผลตอบสนองจริงจากการวัดเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง	45
46	แผนภาพบล็อกโปรแกรมจำลองผลการออกแบบด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิงโดยกำหนดให้ $A_1 = A_2$	45
47	ผลตอบสนองจำลองเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง โดยกำหนดให้ $A_1 = A_2$	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	ผลตอบสนองจริงจากการวัดเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง โดยกำหนดให้ $A_1 = A_2$	47
49	แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย	48
50	แผนภาพบล็อกสมมูลของระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนัก ค่าเป้าหมาย	48
51	แผนภาพบล็อกสมมูลของระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนัก ค่าเป้าหมาย โดยมีตัวควบคุมแบบ PD เป็นวงรอบภายใน	50
52	ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งมีตัวถ่วงน้ำหนัก ค่าเป้าหมายแบบ PD เทียบกับ ระบบควบมุมพิตช์แบบ PID	50
53	ส่วนขยาย A ของผลตอบสนองตามภาพที่ 52	51
54	ส่วนขยาย B ของผลตอบสนองตามภาพที่ 52	51
55	ส่วนขยาย C ของผลตอบสนองตามภาพที่ 52	52
56	แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมุมพิตช์	52
57	แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมความเร็วรอบ	53
58	ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#1)	54
59	สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง การติดตามค่า ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#1)	55
60	ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#1)	56
61	สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง สภาพทนทาน ในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#1)	56
62	ผลการทดลองการควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

1	ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#2)	63
2	สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#2)	63
3	ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#3)	64
4	สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง การติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#3)	64
5	ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#4)	65
6	สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง การติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#4)	65
7	ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#2)	66
8	สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง สภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#2)	66
9	ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#3)	67
10	สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง สภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#3)	67

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดรับลมของกังหัน
A_i	=	แอมพลิจูดของอิมพัลส์
α	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นที่ติดตั้งกังหันลม
β		สัญญาณมุมพิตช์จากกระบวนการ
β_s	=	ค่ามุมคงที่ขณะความผิดพลาดเกินลิมิต
β_{ref}	=	สัญญาณมุมพิตช์อ้างอิง
C_p	=	สัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม
$C_{p\max}$	=	สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด
d_i	=	สัญญาณรบกวนที่อินพุตของกระบวนการ
E	=	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ
e	=	สัญญาณความผิดพลาด
F	=	ตัวกรองสัญญาณ
G	=	ตัวควบคุม
γ	=	พารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายในเทอมควบคุมแบบ D
h	=	ความสูงของกังหันลม
h_0	=	ความสูงอ้างอิงที่ 10 เมตร
$I_{x,R}$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนเพลาของโรเตอร์
i	=	กระแสไฟฟ้า
IAE	=	ดรรชนีสมรรถนะอินทิกรัลค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์
ISE	=	ดรรชนีสมรรถนะแบบอินทิกรัลค่าความผิดพลาดกำลังสอง
k_E	=	ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (Back-emf constant)
k_m	=	ค่าคงตัวแรงบิดมอเตอร์ (Motor torque constant)
λ	=	อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด
n	=	สัญญาณรบกวนจากการวัด
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติของระบบ
P	=	กระบวนการ หรือระบบ
P	=	กำลังของกังหันลม
P_{kin}	=	กำลังของลม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R = ค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์เมเจอร์

r = สัญญาณอินพุตอ้างอิง

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

t_i = ตำแหน่งของเวลาที่ให้อิมพัลส์กับระบบ

T_m = แรงบิดที่จากมอเตอร์

T_R = แรงบิดที่โรเตอร์

u = สัญญาณควบคุมป้อนเข้ากระบวนการ

u_{cs} = สัญญาณควบคุมออกจากตัวควบคุมแบบ PID

V_I = อัตราเร็วลมเริ่มงาน

V_∞ = ความเร็วลม

V_O = อัตราเร็วลมหยุดงาน

V_R = อัตราเร็วลมพิกัด

V_T = ความเร็วปลายใบพัด

y = สัญญาณเอาต์พุต

$\dot{\theta}_{ref}$ = อินพุตอ้างอิงค่าความเร็วรอบของโรเตอร์

θ_1 = สัญญาณป้อนกลับ มุมของโรเตอร์

θ_2 = สัญญาณป้อนกลับ มุมของมอเตอร์

ζ = อัตราส่วนการหน่วง

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก

Rotor-Speed Control-System Design for Small Wind Turbine

คำนำ

เป็นที่ทราบดีอยู่แล้วว่าปัญหาพลังงานในปัจจุบันมีสองเรื่องใหญ่ๆ เรื่องแรกคือการมีอยู่จำกัดและกำลังจะหมดไปของเชื้อเพลิงที่มาจากฟอสซิลได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เรื่องที่สองคือ ผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมได้แก่ภาวะโลกร้อน และรูในชั้นบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้จึงมีการเร่งศึกษาและพัฒนาพลังงานสะอาด เพื่อเป็นพลังงานทางเลือก ตลอดจนเป็นพลังงานหลักในอนาคตต่อไป

พลังงานสะอาดทั้งหลายได้แก่ พลังงานจากน้ำ ลม แสงแดด ความร้อน และคลื่น โดยที่พลังงานลมและแสงแดดได้รับความนิยมสูงสุดในปัจจุบัน แต่ข้อจำกัดของแสงแดดคือจะหมดไปในเวลากลางคืนและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงกว่า ทำให้พลังงานจากลมมีข้อได้เปรียบและได้รับความสนใจ โดยเฉพาะในที่ตั้งซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยสูงๆ

การควบคุมความเร็วรอบของกังหัน ทำได้โดยการปรับมุมของใบกังหัน ซึ่งมีจุดประสงค์สองประการ ประการแรก เพื่อให้กังหันลมมีประสิทธิภาพในการปั่นไฟสูงสุดในช่วงลมน้อย เนื่องจากที่ความเร็วลมค่าหนึ่ง จะมีค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมของกังหันค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้กังหันมีประสิทธิภาพในการปั่นไฟสูงสุด ประการที่สอง เพื่อให้กำลังไฟที่ผลิตได้มีค่าคงที่ในช่วงลมมาก ด้วยการรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่และป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับกังหันในช่วงเวลาที่ลมมากเกินไปหรือเกิดลมมรสุม

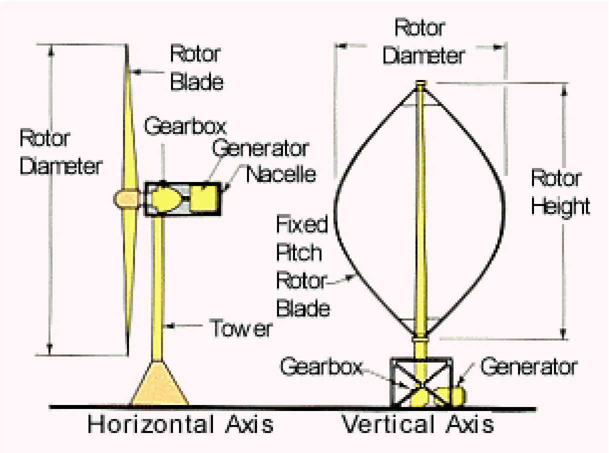
ระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมยังมีใช้เฉพาะกับกังหันลมขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม เพื่อควบคุมกลไกการปรับมุมพิตช์ของกังหันลมขนาดเล็ก ให้สามารถรักษาความเร็วรอบของกังหันลมและสามารถติดตามค่าความเร็วรอบที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์

ออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก ที่สามารถปรับกลไกการควบคุมมุมพิตช์ได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ความเร็วรอบของกังหันลมสามารถติดตามค่าความเร็วรอบที่ต้องการและมีสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบให้คงที่เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลง

การตรวจเอกสาร

พลังงานลมจะถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ ซึ่งเปลี่ยนรูปของพลังงานจลน์จากกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล อุปกรณ์ดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่ากังหันลม ซึ่งวิธีการจำแนกประเภทของกังหันลมที่นิยมใช้คือ การจำแนกจากลักษณะการวางตัวของแกนหมุน กล่าวคือ แบบแกนระดับ (Horizontal Axis) และแบบแกนดิ่ง (Vertical Axis)



ภาพที่ 1 การจำแนกลักษณะการวางตัวของแกนหมุน

กังหันลมแบบแกนระดับได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่ง Tony (Burton *et al.*, 2001) กล่าวว่าแบบแกนระดับมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแกนดิ่ง และจำนวน 3 ใบ ให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามกังหันลมแบบแกนดิ่งนั้น ก็ยังคงได้รับความสนใจ เนื่องจากมีข้อดีที่ได้เปรียบอยู่อย่างน้อย 2 ข้อเมื่อเทียบกับแบบแกนดิ่งคือ

1. กังหันลมแบบแกนระดับนั้น ปรกติแล้วต้องมีชุดควบคุมการปรับมุมยอว์ (Yaw Angle) คือ ควบคุมให้กังหันลมหันหน้าเข้าหาลมเพื่อจะได้รับพลังงานมากที่สุด แต่กังหันลมแบบแกนดิ่งไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ประเภทนี้

2. ระบบส่งกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถติดตั้งอยู่บนระดับพื้นดินได้ ซึ่งต่างกับกังหันลมแบบแกนระดับที่ปรกติแล้วจะต้องติดตั้งอุปกรณ์เหล่านั้นไว้กับกังหันซึ่งอยู่บนหอคอยสูง

Golding (1976) กล่าวว่ากำลังของลมนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการกำลังจากพลังงานจลน์ของของไหลทั่วไปคือ

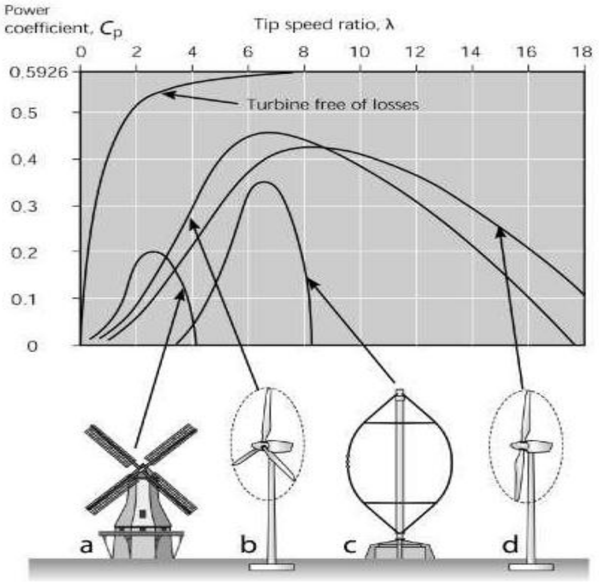
$$P_{kin} = \frac{1}{2}\rho A V_{\infty}^{3} \qquad (1)$$

Eggleston and Stoddard (1987) ความสามารถของกังหันลมในการเปลี่ยนกำลังจากพลังงานจลน์ของลมนั้น สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient, C_p) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดไว้ได้ ดังนั้น กำลังที่ได้จากกังหันลมคือ

$$P = C_p \frac{1}{2}\rho A V_{\infty}^{3} \qquad (2)$$

เมื่อ P คือ กำลังของกังหันลม, V_{∞} คือ ความเร็วลมหน้ากังหัน, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศซึ่งแปรผันกับอุณหภูมิและความดันตามกฎของก๊าซ, A คือ พื้นที่หน้าตัดรับลมของกังหัน

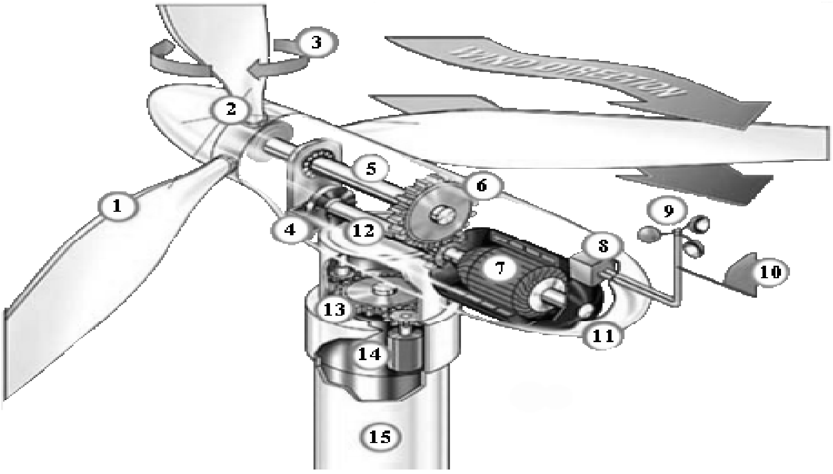
Twidell (1987) กล่าวว่า ความเร็วลมขนาด 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป มีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2 สัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient, C_p) และอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip Speed Ratio) ของกังหันลมแบบต่างๆ

อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip Speed Ratio, λ) คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของปลายใบพัด (Tip Speed, V_T) กับความเร็วลม V_∞ โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดและสัมประสิทธิ์กำลังงานเป็นฟังก์ชัน ซึ่งมีกราฟความสัมพันธ์แตกต่างกันไปตามชนิดของกังหันลม ดังที่แสดงในภาพที่ 2

Albert Betz เป็นผู้เสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด $C_{p\max}$ (Turner, 2004) ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าสูงสุดทางทฤษฎีของการสกัดกำลังงานจากกระแสลมให้ได้สูงสุด เรียกว่า Betz Coefficient โดยได้ค่า $C_{p\max}$ เท่ากับ $\frac{16}{27}$ หรือประมาณ 0.5926



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ส่วนประกอบที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 3 โดยมีหมายเลขซึ่งกำกับชื่อของชิ้นส่วนต่างๆตามลำดับคือ 1) ใบกังหัน 2) โรเตอร์ 3) การปรับมุม 4) เบรก 5) เพลาความเร็วต่ำ 6) ชุดเกียร์ 7) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 8) อุปกรณ์ควบคุม 9) เครื่องวัดความเร็วลม 10) เครื่องวัดทิศทางลม 11) ห้องเครื่องหรือเรือนกังหันลม 12) เพลาความเร็วสูง 13) ตัวขับเปลี่ยนทิศทาง 14) มอเตอร์ขับเปลี่ยนทิศทาง 15) หอคอย

หอคอย (Tower) ทำหน้าที่ยึดตัวกังหันลมให้อยู่ในระดับสูง เพื่อรับกระแสลมได้มากขึ้นในทุกทิศทาง หอคอยอาจเป็นท่อตรงที่มีสายยึดหรืออาจเป็นโครงสร้างเหล็กที่สามารถรับน้ำหนักและการสั่นสะเทือนเนื่องจากตัวกังหันได้ ปัจจุบันหอคอยมีใช้งานอยู่ 2 แบบ คือ แบบเสากลมกลวง (Tubular) และแบบเสาโครงถัก (Lattice) ซึ่งแบบที่นิยมใช้มากกว่า คือ แบบเสากลมกลวง ความสูง

ของหอคอยนั้นมีผลกับกำลังงานที่กังหันลมผลิตได้ อันเนื่องมาจากผลของแรงเสียดทานระหว่างลมกับพื้นผิวโลกซึ่งสมการที่นิยมใช้คือ

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\alpha} \tag{3}$$

เมื่อ V คือความเร็วลมที่ความสูง h , V_0 คือ ความเร็วลมที่ความสูง h_0 ซึ่งนิยมอ้างอิงที่ความสูง 10 เมตร และ α คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการติดตั้งกังหันลม

ความสูงของกังหันลมสามารถระบุได้สองแบบ คือ ความสูงฮับ (Hub Height) คือ ความสูงจากพื้นถึงฮับ หรือดุมแกนหมุนของกังหันลม ซึ่งความสูงนี้มากกว่าความสูงของหอคอยเล็กน้อย ส่วนแบบที่สอง คือ ความสูงรวม (Total Height) คือ ความสูงฮับรวมกับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์

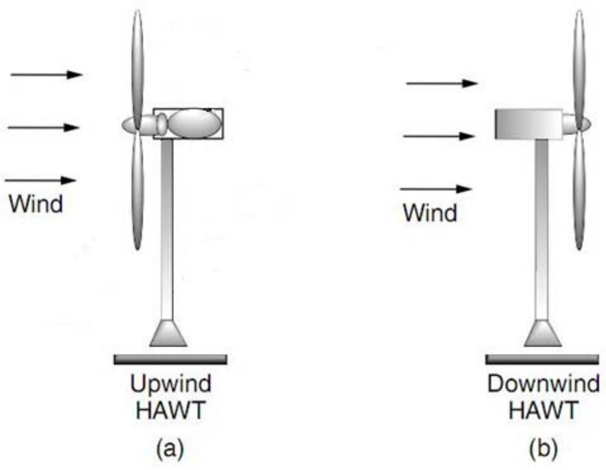
ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและพื้นที่ในการติดตั้งกังหันลม

ลักษณะของบริเวณโดยรอบพื้นที่ติดตั้งกังหันลม	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน α
พื้นดินหรือพื้นน้ำราบเรียบ	0.10
พื้นดินมีหญ้าขึ้นสูง	0.15
พื้นที่มีพืชผล พุ่มไม้ หรือต้นไม้สูง	0.20
พื้นที่ป่าไม้ ที่มีต้นไม้มาก	0.25
พื้นที่ในเมืองขนาดเล็ก ที่มีต้นไม้และพุ่มไม้	0.30
พื้นที่เมืองขนาดใหญ่ ที่มีตึกสูง	0.40

ใบกังหัน (Blade) ซึ่งทำหน้าเปลี่ยนพลังงานที่รับจากลมให้เป็นพลังงานกลที่เพลาของกังหัน จำนวนใบของกังหันลมมีตั้งแต่หนึ่งถึงหลายสิบใบ โดยจำนวนใบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน คือ จำนวนใบมากๆ นั้นจะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิด (Torque) สูงความเร็วรอบต่ำ เช่น การใช้เพื่อการสูบน้ำ ในทางตรงข้ามกังหันที่มีจำนวนใบน้อยส่วนใหญ่ใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง แรงบิดต่ำ เช่น การผลิตไฟฟ้า จำนวนใบพัดน้อยที่สุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า คือ

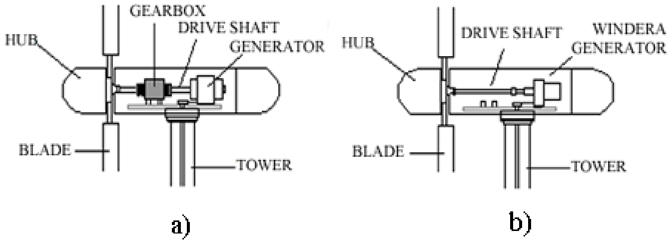
หนึ่งใบ ซึ่งมีข้อดี คือ น้ำหนักใบพัดน้อย แต่การหมุนนั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร กังหันลมแบบสองใบเป็นที่นิยม แต่การหมุนยังไม่ราบเรียบนัก ปัจจุบันกังหันลมแบบสามใบเป็นที่นิยม แม้ว่ามีน้ำหนักจากใบพัดมากทำให้ต้องการโครงสร้างรองรับที่แข็งแรง ส่งผลให้มีต้นทุนสูงกว่า แต่มีข้อดี คือ ให้การหมุนของแกนกังหันที่ดี รูปลักษณ์สวยงาม และเสียงดังรบกวนน้อย

Masters (2004) กล่าวว่ากังหันลมแบบแกนระดับชนิดตามลมมีข้อดี คือ สามารถปรับทิศทางของกังหันเข้าหาทิศทางลมได้ด้วยตัวเอง ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีกลไกและระบบควบคุมการปรับมุมยอว์ แต่ปัญหาของกังหันลมชนิดนี้ คือ ผลกระทบจากไหลของลมผ่านหอคอย ซึ่งเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อใบพัดหมุนผ่านด้านหลังของหอคอย ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วลมมีค่าต่ำ ทำให้ใบพัดเกิดความเค้นและมีผลอย่างมากกับการเสียหายเนื่องจากความล้า อีกทั้งยังเพิ่มเสียงลบกวนและลดกำลังที่กำหันลมสามารถผลิตได้ สำหรับกังหันลมแบบแกนระดับชนิดทวนลมต้องการระบบควบคุมมุมยอว์ซึ่งทำให้ระบบมีความซับซ้อน และราคาสูงขึ้น แต่มีข้อดีคือการหมุนมีความราบเรียบ และให้กำลังที่สูงกว่าทำให้กังหันลมแบบแกนระดับชนิดทวนลมได้รับความนิยมและใช้กันมากในปัจจุบัน



ภาพที่ 4 ชนิดของกังหันลมแบบแกนระดับ แบบทวนลม (a) และแบบตามลม (b)

ระบบส่งกำลัง ทำหน้าที่ส่งกำลังจากเพลาของกังหันเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งอาจส่งแรงบิดผ่านเพลาโดยตรง หรือผ่านระบบส่งกำลัง เช่น เฟือง สายพาน และมักจะต้องมีการทดรอบโดยต่อกับชุดเกียร์ (Gear Box) เพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ สำหรับกังหันลมขนาดเล็กในระบบที่มีการเก็บประจุไฟฟ้าในชุดแบตเตอรี่นั้น นิยมใช้ระบบส่งกำลังแบบผ่านเพลาเพื่อไปหมุนขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง



ภาพที่ 5 ระบบส่งกำลังแบบผ่านชุดเกียร์ (a) และแบบขับตรง (b)

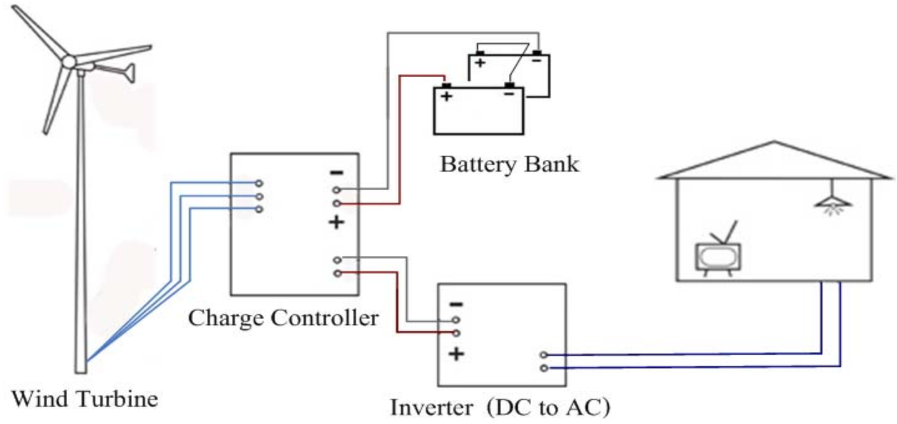
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางกลจากการหมุนของเพลาโรเตอร์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงกังหันลมขนาดเล็กที่ประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่นิยมติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับกังหันลมขนาดใหญ่ซึ่งติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่งนิยมติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงกระแสตรง เนื่องจากหลายเหตุผล เช่น ราคา และการบำรุงรักษาต่ำกว่า

Richardson and Mcnerney (1993) กล่าวว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับของกังหันลมมีสองแบบ คือ แบบเหนี่ยวนำ (Induction) และแบบซิงโครนัส (Synchonous) ซึ่งแบบที่นิยมใช้มากกว่า คือ แบบเหนี่ยวนำ เนื่องจากมีระบบกลไกที่เหมาะสมกับลมซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีราคาถูกกว่าและทนทานต่อสภาพแวดล้อมการใช้งานสูงกว่า

อัตรากำลัง (Rated Power) คือ กำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมอาจถูกออกแบบให้มีได้มากกว่าหนึ่งตัว โดยมีอัตรากำลังแตกต่างกัน เช่น 20/10 ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่มีอัตรากำลังต่ำออกแบบให้ทำงานในช่วงลมทั่วไป และเครื่องกำเนิดฟ้าที่มีอัตรากำลังสูงทำงานในช่วงลมแรง

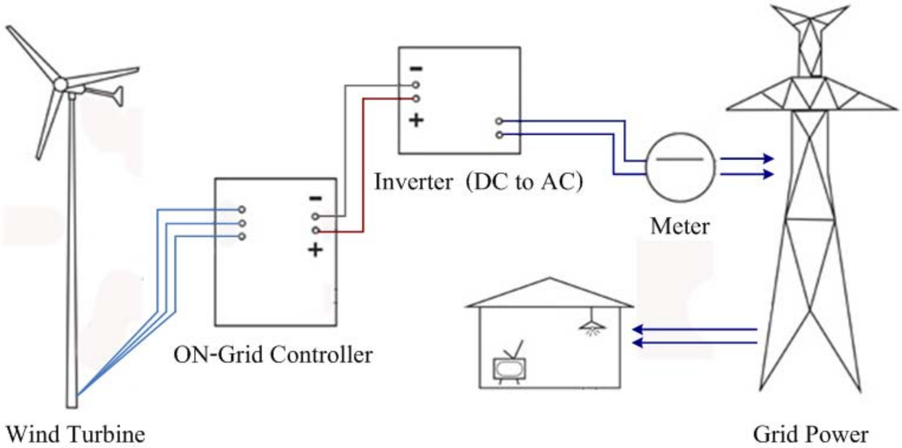
ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ระบบการติดตั้งแบบเดี่ยว (Stand Alone System) และระบบการติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System) ระบบการติดตั้งแบบเดี่ยว เหมาะสำหรับการใช้งานในที่พักอาศัย ชุมชน หรือพื้นที่ห่างไกลจากสายส่งหลัก มีส่วนประกอบสำคัญ คือ ระบบควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Charge Controller) ชุดแบตเตอรี่ (Battery Bank) และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ระบบการติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง มีส่วนประกอบโดยทั่วไปเหมือนกับระบบการติดตั้งแบบเดี่ยวยกเว้นชุดแปลง

กระแสไฟฟ้า ซึ่งปกติจะมีราคาสูงกว่า เนื่องจากมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนและต้องสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบสายส่งได้ นอกจากนั้นการอออกแบบระบบการติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่งยังสามารถแบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ แบบที่มีชุดแบตเตอรี่ และแบบที่ไม่มีชุดแบตเตอรี่ซึ่งมีข้อดีคือ ราคาในการติดตั้งและการบำรุงรักษาต่ำ



ภาพที่ 6 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเดี่ยว

ระบบควบคุมการประจุแบตเตอรี่ ทำหน้าที่ควบคุมระดับของการประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ เพื่อรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ป้องกันการประจุมากเกินความจุของแบตเตอรี่ และป้องกันระดับของประจุต่ำเกินซึ่งจะส่งผลให้แบตเตอรี่ไม่สามารถประจุได้เต็มความจุอีกครั้ง โดยปกติแล้วระดับการประจุไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 50 ของความจุแบตเตอรี่



ภาพที่ 7 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง

การกำหนดขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดกำลังการผลิต (Capacity) เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (Rotor Diameter) และพื้นที่หน้าตัดรับลม (Swept Area) ซึ่งกังหันลมขนาดเล็กนั้นเหมาะสำหรับติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกล มีภาระทางไฟฟ้าไม่สูงมากนัก โดยจัดเก็บกระแสไฟฟ้าในรูปของแบตเตอรี่ เพื่อใช้ในครัวเรือนหรือสำนักงานขนาดเล็ก

ตารางที่ 2 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ขนาดของกังหันลม	ขนาดกำลังผลิต (kW)	เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (m)	พื้นที่หน้าตัดรับลม (m^2)
ขนาดจิ๋ว (Micro Wind Turbine)	< 1.5	< 3	< 7
ขนาดเล็ก (Small Wind Turbine)	1.5 - 20	3 - 10	7 – 80
ขนาดกลาง (Medium Wind Turbine)	20 - 200	10 - 25	80 – 500
ขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine)	200 - 1,500	25 - 70	500 - 3850
ขนาดใหญ่มาก (Very Large Wind Turbine)	> 1,500	> 70	> 3,850

การศึกษาเรื่องศักยภาพของพลังงานลมของประเทศไทย ได้เริ่มดำเนินการมาต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518 ทั้งนี้ จากฐานข้อมูลศักยภาพลม ในโครงการติดตามประเมินผลการดำเนินงานพัฒนาและส่งเสริมพลังงานลม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้กล่าวถึงลำดับเหตุการณ์และวิธีการที่ใช้ในการหาศักยภาพของพลังงานลม โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับพลังงานลมในหลายๆ ครั้งดังนี้

ปี พ.ศ. 2518 (ครั้งที่ 1) สำนักงานพลังงานแห่งชาติ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) ได้จัดทำแผนที่แสดงความเร็วลมต่างๆ โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยจากกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อแสดงศักยภาพพลังงานลมที่มีกำลังสูงและกำลังปานกลางทั่วประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อใช้ประโยชน์

วางแผนสร้างกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ จึงได้สร้างสถานีวัดความเร็วลมแห่งแรก ความสูงระดับ 10 เมตร ที่บริเวณเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี ระหว่างปี พ.ศ. 2522-2524

ปี พ.ศ. 2524 (ครั้งที่ 2) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ร่วมกันจัดทำแผนที่พลังงานลมโดยใช้ข้อมูลลมจากกรมอุตุนิยมวิทยาช่วงเวลา 13 ปี พ.ศ. 2509-2521 จำนวน 53 สถานี เป็นข้อมูลความเร็วเฉลี่ยและปรับระดับความสูงให้เป็นความสูงมาตรฐานที่ 10 เมตร โดยใช้สูตรกฎของกำลัง (Power Law)

ปี พ.ศ. 2524 (ครั้งที่ 3) สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ได้ทำการศึกษา จัดทำโดยใช้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยามาปรับเป็นความเร็วลมที่ระดับ 10 เมตร

ปี พ.ศ. 2527 (ครั้งที่ 4) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ด้วยทุนสนับสนุนจาก USAID ตรวจสอบและกำกับโดยกรมอุตุนิยมวิทยา ทั้งนี้แผนที่ศักยภาพพลังงานลมแสดงความเร็วและกำลังลม ซึ่งปรับระดับโดยใช้ Logarithmic Law ที่ความสูง 10 เมตร พิจารณารวมช่วงลมสงบและไม่รวมลมสงบ ผลการวิเคราะห์ประเมินได้ว่าบริเวณภาคใต้และชายฝั่งทะเล มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด รองลงมา คือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือตามลำดับ และพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีความเร็วลมอยู่ในระดับ 1.1

ปี พ.ศ. 2544 (ครั้งที่ 5) กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย โดยโครงการนี้อยู่ภายใต้การจัดการของ บริษัทเฟลโลว์ เอ็นจิเนียร์ สคอนซัลแตนส์ จำกัด (Fellow Engineers Consultants Co. Ltd.) ซึ่งจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้จากการวิเคราะห์พบว่า แหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทยมีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ในระดับ 3 (Class 3) ซึ่งให้ความเร็วลม 6.4 เมตร/วินาที ขึ้นไปที่ความสูง 50 เมตร อยู่ที่ภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก ตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และปัตตานี และที่อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่

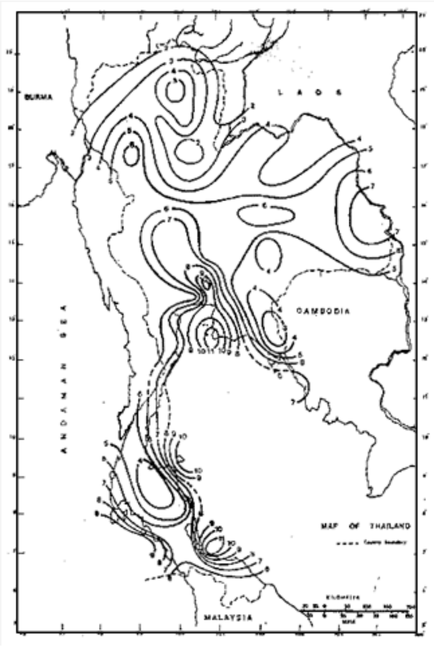
ปี พ.ศ. 2544 (ครั้งที่ 6) กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ได้สนับสนุนโครงการศึกษาศักยภาพของทรัพยากรลมในพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคใต้ ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีจุดมุ่งหมายหลัก คือ หาความเป็นไปได้ในการติดตั้งกังหันลม หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ชายหาดอำเภอสทิงพระ มีศักยภาพลมสูงที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5.6 เมตรต่อวินาที เหมาะต่อการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจำหน่ายผลของโครงการ ทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคตัดสินใจติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เฟืองทดกำลังการผลิต 1.5 เมกะวัตต์ เพื่อเป็นโครงการนำร่องผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม

ปี พ.ศ. 2544 (ครั้งที่ 7) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง ในบริเวณพื้นที่ 5 จังหวัดภาคใต้ ประกอบด้วย จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี สตูล และพัทลุง การดำเนินการได้ตรวจสอบความเร็วลมและเลือกจุดที่ตั้งเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลมเพิ่มเติมอีก 3 สถานีที่ ตำบลท่ามะเดื่อ อำเภอบางแก้ว จังหวัดพัทลุง ที่ตำบลสนามชัย อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา และที่ตำบลเกาะแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ภายหลังการศึกษาพบว่า บริเวณที่มีแหล่งลมดีและพื้นที่เหมาะสมต่อการติดตั้งฟาร์มกังหันลมได้ ที่เนินควรสีปาน ตำบลเกาะใหญ่ อำเภอกระแสสินธุ์ จังหวัดสงขลา ความเร็วลมเฉลี่ย 5.38 เมตรต่อวินาที

ปี พ.ศ. 2549 (ครั้งที่ 8) สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โดยให้ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่งในเขตภาคเหนือตอนบน ในพื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน แพร่ และน่าน ผลการศึกษาพบพื้นที่ซึ่งมีศักยภาพพลังงานลมดีเหมาะสมที่จัดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ 3 แห่ง คือ บริเวณบ้านดอยม่อนล้าน อำเภอพร้าว จังหวัดเชียงใหม่ ความเร็วลมเฉลี่ย 5.73 เมตรต่อวินาที บริเวณบ้านกิ่วลม อำเภอปาย จังหวัดแม่ฮ่องสอน ความเร็วลมเฉลี่ย 6.24 เมตร/วินาที บริเวณบ้านแม่แฮ อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ ความเร็วลมเฉลี่ย 5.72 เมตรต่อวินาที

ปี พ.ศ. 2549 (ครั้งที่ 9) สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ โดยให้มหาวิทยาลัยทักษิณและมหาวิทยาลัยอื่นๆ ร่วมดำเนินการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง โครงการประเมินศักยภาพของพลังงานเฉพาะพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งจากการศึกษาปรากฏว่ามีพื้นที่ตามเนินเขาที่มีศักยภาพพลังงานลมสูงสุด ซึ่งมีความเหมาะสมสามารถทำเป็นฟาร์มกังหันลมได้ รวม 291 เมกะวัตต์ และตามบริเวณที่สถานีวัดลม ซึ่งมีศักยภาพรองลงมาอีก 64 เมกะวัตต์ รวม 355 เมกะวัตต์

ปี พ.ศ. 2549 (ครั้งที่ 10) บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ได้ศึกษาศักยภาพพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย พบว่า ศักยภาพพลังงานลมผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยมีประมาณ 1,454 เมกะวัตต์ บริเวณที่มีศักยภาพสูง พบว่า เป็นบริเวณอ่าวไทยภาคใต้ ตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และบริเวณบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ความเร็วลมเฉลี่ย 3-4.2 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 8 แผนที่ศักยภาพลมโดยรวมช่วงเวลาลมสงบของประเทศไทย

กังหันปั่นไฟแบบแกนระดับขนาดเล็กในประเทศไทย มีที่ใช้กันบ้างแล้ว บริษัท Masterpower ของประเทศไทย ขายกังหันปั่นไฟขนาดเล็กตั้งแต่ 300 วัตต์ไปจนถึง 20 กิโลวัตต์ โดยผู้ติดตั้งสามารถขายไฟคืนให้กับการไฟฟ้าได้ด้วย แต่ปัญหาของกังหันขนาดเล็ก คือ ความที่ไม่สูงมาก ลมในส่วนที่ใกล้พื้นดินมีความปั่นป่วนสูง (Turbulence) ทำให้การรักษาความเร็วรอบให้เท่ากับค่าที่เหมาะสมกระทำได้ยาก ทำให้กระแสไฟที่ผลิตได้ไม่คงที่หรือไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจะเป็น

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยตั้งสถานีพลังงานทดแทนพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยตลอดทั้งปีประมาณ 5 เมตรต่อวินาที เป็นสถานีทดลองผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม โดยได้เริ่มติดตั้งกังหันลมขนาดเล็ก และทำการทดลองผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ให้แสงสว่างในบริเวณสถานีทดลอง โดยใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังคงมีปัญหาเรื่องชิ้นส่วน

บางชนิด เช่น ใบกังหันและตลับลูกปืนชำรุด รวมถึงปัญหาเรื่องการจัดซื้ออะไหล่จากต่างประเทศ เดือนสิงหาคม ปี 2533 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตโดยร่วมมือกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สามารถนำไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลมเชื่อมโยงเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้เป็นครั้งแรกของประเทศไทย

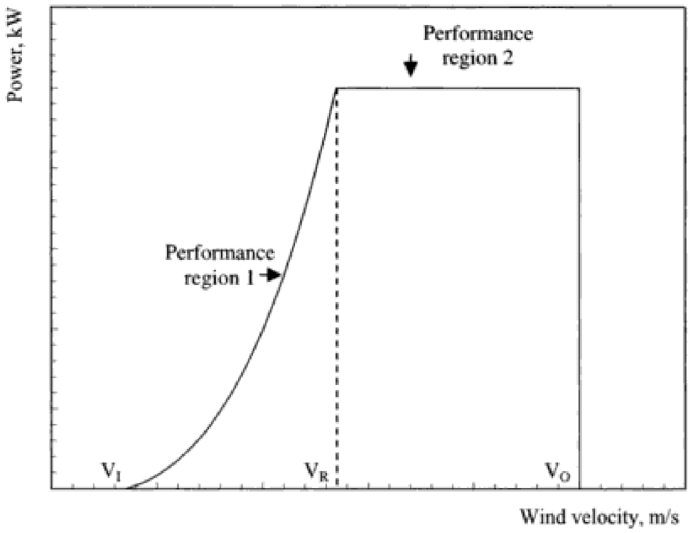
บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) ติดตั้งกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 10 เมตร และมีค่าเฉลี่ยในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ที่ประมาณ 2.5 กิโลวัตต์ ที่ชายหาดบ้านอำเภอ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี นับเป็นแห่งแรกของประเทศไทยที่ประยุกต์ใช้กังหันลม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่อกับระบบสายส่งเพื่อจ่ายไฟให้กับระบบไฟฟ้าแสงสว่างบริเวณสวนสาธารณะชายหาดบ้านอำเภอได้อีกด้วย

บริษัท แคนนอน มาร์เก็ตติ้ง (ไทยแลนด์) จำกัด ติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า ให้กับห้องสมุดของโรงเรียนบ้านหนองพลับ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งเป็นแห่งแรกของประเทศไทยที่ประยุกต์ใช้กังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในห้องสมุดของโรงเรียน กังหันลมที่ติดตั้งมีขนาด 1 กิโลวัตต์ ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที เป็นต้นไป ต่ออยู่กับชุดแบตเตอรี่เพื่อสะสมกระแสไฟฟ้า และต่อเข้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้าภายในห้องสมุด

ปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานลมที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย เปิดเมื่อเดือนพฤษภาคม 2552 คือ โรงไฟฟ้ากังหันลมลำตะคอง ตั้งอยู่บริเวณอ่างเก็บน้ำตอนบนของเขื่อนลำตะคอง ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ขนาดกำลังผลิต 1.25 เมกะวัตต์ เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 64 เมตร ความสูง 68 เมตร จำนวน 2 ตัว รวมกำลังการผลิต 2.5 เมกะวัตต์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณปีละ 4.6 ล้านหน่วย ทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงได้ 1.1 ล้านลิตรต่อปี และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 2,300 ตันต่อปี

ระบบควบคุมในการควบคุมความเร็วรอบของกังหัน ทำได้โดยการปรับมุมพิตช์ (Pitch Angle) และมุมยอว์ (Yaw Angle) การควบคุมความเร็วนี้ มีจุดประสงค์สองประการ ประการแรก เพื่อให้กังหันลมมีประสิทธิภาพในการปั่นไฟสูงสุดในช่วงลมน้อย เนื่องจากที่ความเร็วลมค่าหนึ่ง จะมีค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมของกังหันค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้กังหันมีประสิทธิภาพในการปั่นไฟสูงสุด ประการที่สอง เพื่อให้กำลังไฟที่ผลิตได้มีค่าคงที่ในช่วงลมมาก ด้วยการรักษาระดับความเร็วรอบให้

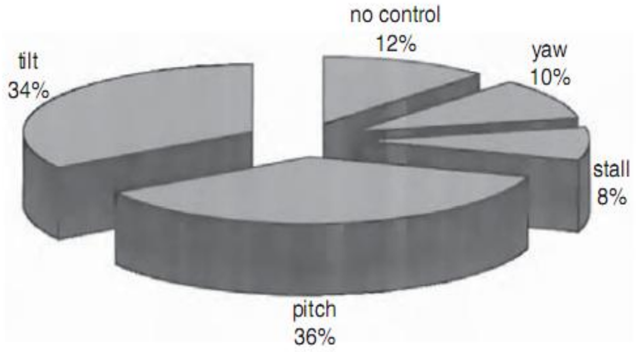
คงที่ ซึ่งระบบควบคุมที่ได้รับความนิยมในการใช้ควบคุมกังหันลม คือ ระบบควบคุมแบบ PID Controller นอกจากนั้นกังหันลมยังมีระบบควบคุมเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากลมที่มีความเร็วมากๆ ซึ่งจะทำให้มีแรงกระทำกับใบกังหันอย่างมากจนอาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจะต้องออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานที่ความเร็วสูงสุดที่กังหันจะรับได้ค่าหนึ่ง ซึ่งการควบคุมจะมีลักษณะการทำงานอยู่ 2 แบบดังนี้ แบบที่หนึ่ง คือ ควบคุมให้พื้นที่รับกระแสลมของกังหันลดลง โดยการหันหน้าของกังหันไปด้านข้างหรือเงยหน้าขึ้น แบบที่สองคือ บิดมุมของกังหันให้เกิดแรงหน่วงมากกว่าแรงขับ



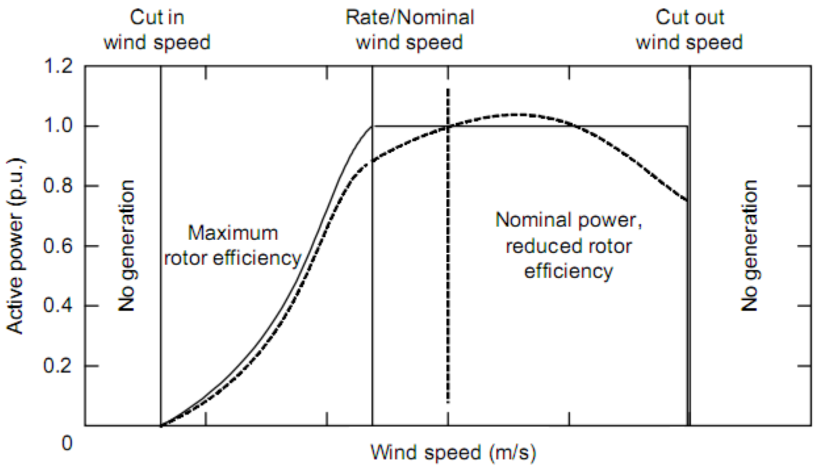
ภาพที่ 9 การควบคุมกังหันลมในช่วงลมน้อย (Region 1) และช่วงลมมาก (Region 2)

เส้นโค้งกำลัง (Power Curve) คือ ข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญที่สุดในการระบุคุณลักษณะของกังหันลมใดๆ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและกำลังที่ผลิตได้จากกังหันลม โดยเส้นโค้งกำลังทางอุดมคติและตัวแปรที่สำคัญแสดงดังภาพที่ 9 กำหนดให้ V_I คือ อัตราเร็วลมเริ่มงาน (Cut-in Wind Speed) ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมน้อยที่สุดที่ต้องการสำหรับการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากค่าความเร็วลมที่น้อยกว่านี้ ไม่สามารถหรือไม่มีความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า V_R คือ อัตราเร็วลมพิกัด (Rated Wind Speed) ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ทำให้กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้ามากเท่ากับค่าที่ออกแบบ โดยกำลังไฟฟ้าจะถูกควบคุมให้คงที่เมื่อความเร็วลมมากขึ้นป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ V_O คือ อัตราเร็วลมหยุดงาน (Cut-out Wind Speed) กังหันลมจะทำการหยุดการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมสูงกว่าค่านี้ เนื่องจากโรเตอร์มีค่าความเร็วรอบที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับกังหันลม

เทคโนโลยีของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วง 25 ปีที่ผ่านมา เกือบทั้งหมดของกังหันลมที่ถูกออกแบบ หรือติดตั้งใหม่ในปัจจุบันมีระบบควบคุมความเร็วเป็นส่วนประกอบสำคัญ นอกเหนือจากประสิทธิภาพในการควบคุมแล้ว โดยมากการออกแบบยังคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ความไม่ซับซ้อนของระบบ และราคา ทำให้เกิดเทคนิคต่างๆ ในการควบคุมความเร็วดังภาพที่ 10 โดยเทคนิคที่มีความเหมาะสม และได้รับความนิยมมากที่สุด คือ การควบคุมความเร็วโดยการปรับมุมพิตช์ของใบพัด

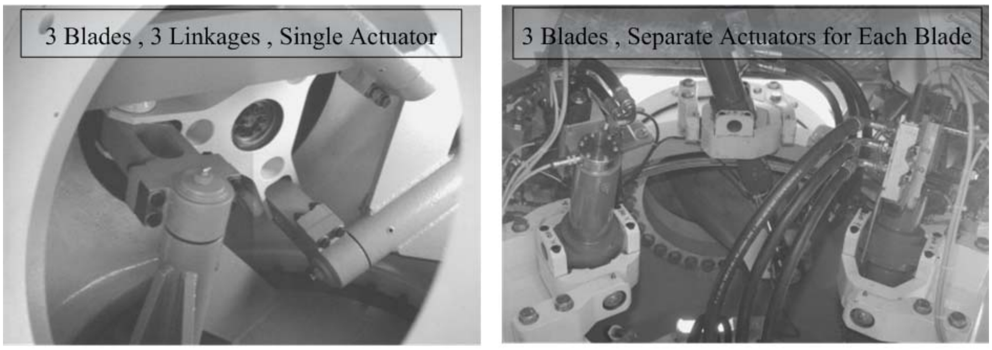


ภาพที่ 10 ปริมาณการใช้ของวิธีการควบคุมความเร็วของกังหันลมขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง



ภาพที่ 11 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมแบบ Stall Control (เส้นประ) และแบบ Pitch Control (เส้นทึบ)

ระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์ของกังหันลมมีด้วยกัน 2 แบบ คือ ระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์แบบแยกปรับ (Individual Pitch Control) ซึ่งมีใช้กับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตสูง สามารถช่วยลดความเสียหายของใบพัด และเสาจากการล้า เนื่องจากลมที่พัดผ่านพื้นที่หน้าตัดรับลมของกังหันแบบไม่สมมาตร ระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์แบบที่สอง คือ ระบบการปรับมุมพิตช์แบบปรับรวม (Collective Pitch Control) โดยใช้ตัวทำงาน (Actuators) เพียงตัวเดียว ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับความนิยม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกังหันลมขนาดเล็กเนื่องจากไม่ซับซ้อนและราคาต่ำ

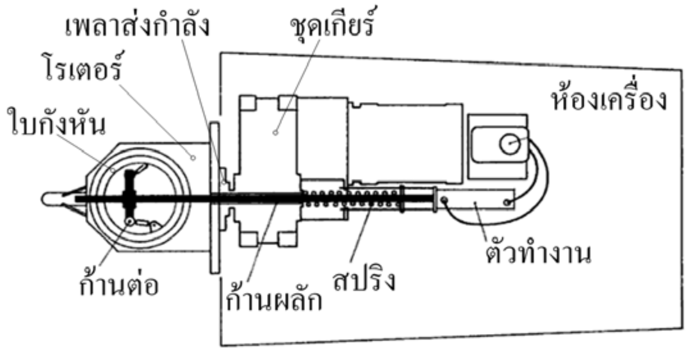


a) กลไกของระบบควบคุมการปรับมุมพิชท์แบบปรับรวม (Collective Pitch Control Mechanism)

b) กลไกของระบบควบคุมการปรับมุมพิชท์แบบแยกปรับ (Individual Pitch Control Mechanism)

ภาพที่ 12 กลไกของระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์

ตัวทำงานในระบบกลไกการปรับมุมพิตช์ที่ได้รับความนิยมมี 2 ชนิด ชนิดแรก คือ ระบบไฮดรอลิก โดยอาศัยการควบคุมวาล์วเพื่อกำหนดอัตราการไหลหรือความดันของน้ำมันเข้ากระบอกสูบซึ่งไฮดรอลิกให้สัมพันธ์กับอัตราการปรับมุมพิตช์ที่ต้องการ และชนิดที่สอง คือ ตัวทำงานแบบระบบไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์เซอร์โว ตัวทำงานของระบบควบคุมมุมพิตช์แบบรวมติดตั้งอยู่ที่ห้องเครื่องควบคุมการปรับมุมพิตช์ผ่านก้านผลัก (Push-Rod) ซึ่งเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นผ่านชุดเกียร์และแกนกลางแบบกลวงของเพลาโรเตอร์ ก้านต่อ (Linkage) ซึ่งเชื่อมระหว่างก้านผลักและเพลาของใบกังหันลมเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงเส้นของก้านผลักเป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม เพื่อหมุนใบกังหันไปยังมุมที่ต้องการ สำหรับตัวทำงานระบบไฟฟ้า มอเตอร์เซอร์โวต้องติดตั้งอุปกรณ์เปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นเพื่อใช้ผลักก้านผลักให้เคลื่อนที่ เช่นเดียวกับกระบอกสูบในระบบตัวทำงานแบบไฮดรอลิก



ภาพที่ 13 กลไกและอุปกรณ์ของระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์แบบรวม

Neal and Clark (2007) ได้เสนอวิธีการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก โดยวิธีการใช้ภาระทางไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทแม่เหล็กถาวร โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ควบคุมกระแสในขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้สร้างหรือลดแรงบิดเพื่อต้านการหมุนของโรเตอร์ วิธีนี้สามารถความลดความเค้นที่เกิดบนใบกังหันที่มีกลไกการควบคุมความเร็วรอบแบบแพสซิฟ (Passive Mechanisms) และลดสัญญาณรบกวน (Noise) ในการควบคุมความเร็วรอบได้

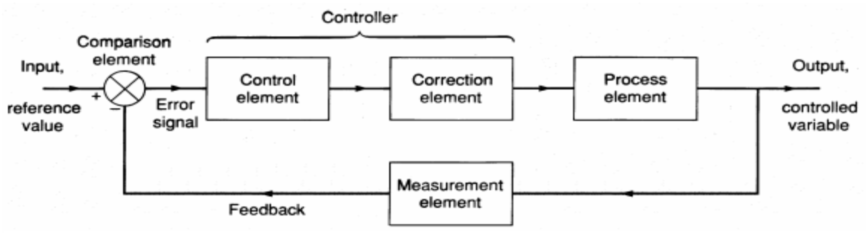
Tous (2008) ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์ของกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed Wind Turbine) สองวิธี คือ วิธีการควบคุมแบบปิดซึ่งกำหนดขอบเขตและอัตราการปรับมุมพิตช์ วิธีที่สอง การควบคุมแบบเปิดซึ่งกำหนดอัตราการปรับแบบสามขั้นตามค่าความผิดพลาดของระบบ คือ ช่วงค่าความผิดพลาดน้อยกำหนดอัตราการปรับมุมพิตช์เท่ากับศูนย์ และช่วงค่าความผิดพลาดมีค่าเป็นค่าบวกหรือลบมาก กำหนดอัตราการปรับมุมพิตช์คงที่เป็นบวกหรือลบคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งได้จำลองผลการควบคุมด้วยโปรแกรม Matlab แสดงผลตอบสนองที่ดีกว่าของหลักการควบคุมแบบสามขั้น

Thiemrat (2007) ได้ศึกษาความเหมาะสมของการใช้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมขนาดเล็กกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternator) ชนิดความเร็วรอบต่ำในประเทศไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน กังหันลมเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ชุดแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจาก 24 VDC เป็น 220 VAD เมื่อกังหันลมทำงานและผลิตกระแสไฟฟ้าได้ กระแสไฟฟ้าจะถูกเก็บและแปลงไปใช้ในทันที โดยทดลองใช้กับเครื่องสูบน้ำ 220 โวลต์ ภายในบ้านขนาด 200 วัตต์

Song (2000) ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ โดยการปรับมุมพิตช์ของกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ ด้วยวิธีฐานความจำ (memory-based method) ซึ่งอาศัยการรวบรวมข้อมูลที่ผ่านมาในคาบเวลาหนึ่งของสัญญาณควบคุม ผลตอบสนองของระบบ และสัญญาณอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ และจำลองผลการควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถตามรอยสัญญาณ (tracking) ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ออกแบบได้ดีโดยไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์วัดความเร็วลม และไม่ต้องใช้ข้อมูลพลศาสตร์ของระบบ

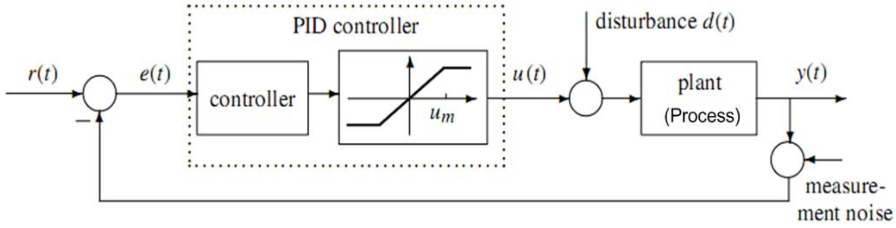
ระบบควบคุม (Control System)

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงานได้เป็นสองแบบ คือ ระบบควบคุมแบบเปิด (Open-loop Control Systems) และระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop Control Systems) หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



ภาพที่ 14 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

Visioli (2006) กล่าวว่าในปัจจุบันการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติมีการพัฒนาเทคนิคและวิธีใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมอย่างต่อเนื่อง การควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับแบบปริพันธ์ และรวมกับแบบอนุพันธ์ (PID Control) เป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมที่ยังคงเห็นได้ชัดเจนว่าเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางมากที่สุดในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาต่ำเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับ และแม้ว่าการออกแบบจะง่ายไม่ซับซ้อน แต่ให้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมในหลากหลายงานควบคุม



ภาพที่ 15 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบ PID

การควบคุมแบบ PID ใช้สัญญาณความผิดพลาด $e(t)$ ในการสร้างการทำงานของเทอมควบคุมแบบ P-Control, I-Control และ D-Control สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการควบคุมแบบ PID บนโดเมนเวลา คือ

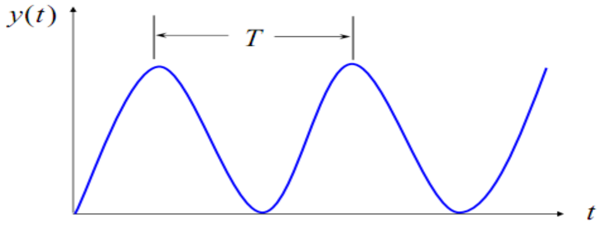
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{4}$$

เมื่อ $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุมป้อนเข้ากระบวนการ, $e(t)$ คือ สัญญาณความผิดพลาด ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง $r(t)$ และสัญญาณเอาต์พุต $y(t)$, $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนจากการวัด และ $d(t)$ คือ สัญญาณรบกวนที่อินพุตของกระบวนการ ฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งใช้อธิบายการควบคุมแบบ PID รูปแบบขนาน (Parallel form) คือ

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{5}$$

วิธีการหาค่าอัตราส่วนขยาย K_p, K_i และ K_d ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ได้รับความนิยมมีอยู่ 2 วิธี ดังนี้

1. วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Methods) เป็นวิธีซึ่งทดสอบกระบวนการโดยการทดลองหรือทดสอบโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ด้วยระบบควบคุมแบบปิดที่มีอัตราการขยายป้อนกลับ (Feedback Gain) เท่ากับหนึ่ง โดยการป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit-Step Input) และปรับอัตราส่วนขยาย (Gain, K) ของตัวควบคุมแบบ P-Control จนกระทั่งผลตอบสนองเกิดการแกว่ง บันทึกค่าอัตราส่วนขยาย K ที่ใช้และวัดคาบเวลาการแกว่ง T เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราส่วนขยายของตัวควบคุมแบบ PID ดังตารางที่ 3

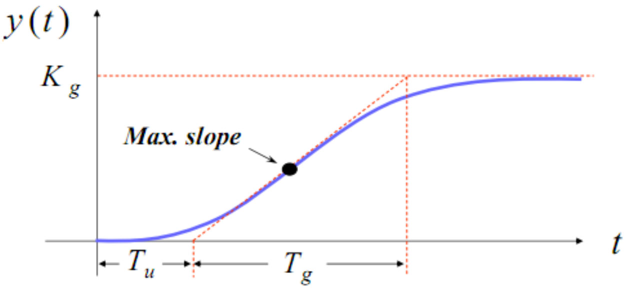


ภาพที่ 16 การวัดคาบเวลาการแกว่งสำหรับวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์

ระบบควบคุม	ค่าอัตราส่วนขยาย		
	K_p	K_i	K_d
P-Control	0.5 K	-	-
PI-Control	0.45 K	$K_p/0.83T$	-
PID-Control	0..6 K	$K_p/0.5T$	$K_p \times 0.125T$

1. วิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก หรือซีเฮสอาร์ (Chien-Hrones-Reswick or CHR) เป็นวิธีซึ่งทดสอบกระบวนการด้วยระบบควบคุมแบบเปิด โดยการป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย แล้ววัดค่าอัตราส่วนขยาย K_g และช่วงเวลา T_u กับ T_g เลือกระบบควบคุมและคำนวณค่าอัตราส่วนขยายดังตารางที่ 4



ภาพที่ 17 การวัดคาบเวลาสำหรับวิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก หรือซีเฮสอาร์

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการของเชน-ฮรอน-เรสวิก

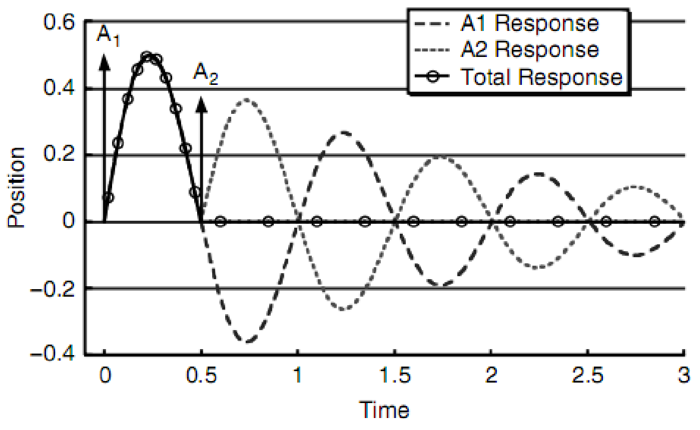
ระบบควบคุม	$R = T_g / T_u$	20% Overshoot	Least Overshoot
P-Control	$R > 10$	$K_p = 0.7 R/K_g$	$K_p = 0.3 R/K_g$
PI-Control	$7.5 < R < 10$	$K_p = 0.6 R/K_g$ $K_i = K_p/T_g$	$K_p = 0.35 R/K_g$ $K_i = K_p/1.2T_g$
PID-Control	$3 < R < 7.5$	$K_p = 0.95 R/K_g$ $K_i = K_p/1.35T_g$ $K_d = K_p \times 0.47T_u$	$K_p = 0.6 R/K_g$ $K_i = K_p/T_g$ $K_d = K_p \times 0.5T_u$

การถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย (Set-Point Weighted)

Chen *et al.* (2008) เสนอเทคนิคการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายของระบบควบคุมแบบ PID สำหรับกระบวนการที่ไม่เสถียรหน่วงเวลา (Time-Delayed Unstable Processes) โดยเทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลของกระบวนการ แต่ใช้ข้อมูลจากอัตราส่วนขยายของตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งได้มาจากการปรับตามเทคนิคหรือวิธีทั่วไป นำมาใช้เป็นข้อมูลในการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย β ซึ่งคือพารามิเตอร์สำหรับปรับรูปร่างของสัญญาณความผิดพลาดในเทอมการควบคุมแบบสัดส่วน และ γ คือ พารามิเตอร์สำหรับปรับรูปร่างของสัญญาณความผิดพลาดในเทอมการควบคุมแบบอนุพันธ์ การจำลองผลการควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า ค่าตัวถ่วงน้ำหนักที่ปรับโดยเทคนิคนี้ มีประสิทธิผลในการลดค่าโอเวอร์ชูต (Overshoot) และลดค่าดรรชนีสมรรถนะแบบอินทิกรัลค่าความผิดพลาดกำลังสอง (ISE) กับแบบอินทิกรัลค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) โดยเทียบผลกับการควบคุมแบบ PID ซึ่งไม่มีการถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย

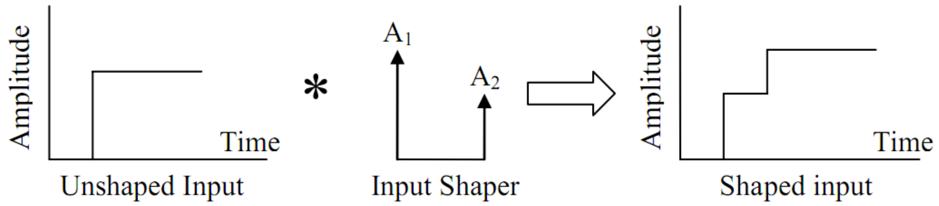
การควบคุมการสั่นด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิง (Vibration Control With Input Shaping)

เทคนิคการปรับรูปร่างอินพุตหรืออินพุตเชปปิง เป็นเทคนิคการหน่วงเวลาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับเปลี่ยนสัญญาณอินพุตเพื่อทำให้ระบบมีการการสั่นลดน้อยที่สุด



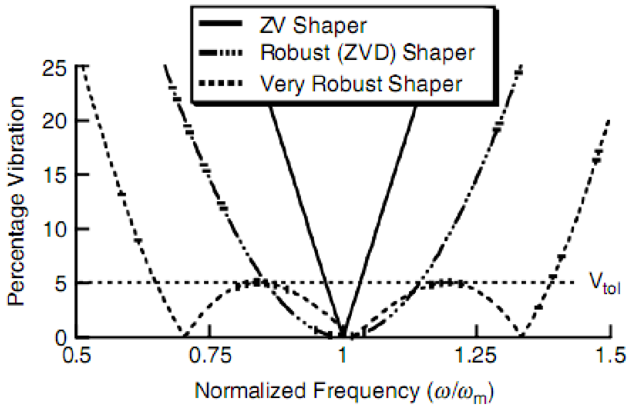
ภาพที่ 18 การหักล้างการสั่นโดยใช้ลำดับของอิมพัลส์

พิจารณาภาพที่ 18 ซึ่งสามารถใช้อธิบายหลักการหักล้างการสั่นจากสัญญาณอินพุตแบบอิมพัลส์ได้ คือ เมื่อให้อิมพัลส์ขนาด A_1 เป็นสัญญาณอินพุตเข้าระบบ ทำให้ผลตอบสนองเกิดการสั่น (เส้นประ) และให้อิมพัลส์ลำดับ 2 ขนาด A_2 ซึ่งมีผลตอบสนองเกิดการสั่น (จุด) หักล้างการสั่นซึ่งกันและกัน ทำให้ผลตอบสนองมีการสั่นตกค้างเท่ากับศูนย์



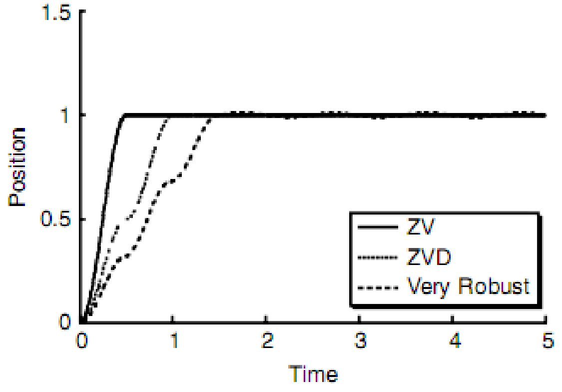
ภาพที่ 19 สัญญาณอินพุตแบบสองขั้นโดยเทคนิคอินพุตเชปปิ้ง

อินพุตเชปปิ้ง คือ สัญญาณที่ได้รับจากการสังวัตนาการ (Convolution) สัญญาณลำดับของอิมพัลส์ (Impulse Sequences) เข้ากับสัญญาณอินพุตที่ใช้ในการควบคุม ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 20 สภาพไวของความถี่ธรรมชาติซึ่งผิดพลาดจากการหาแบบจำลอง

Kurfess (2005) แอมพลิจูดและตำแหน่งเวลาของอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรของระบบ คือ ความถี่ธรรมชาติ ω และอัตราส่วนการหน่วง ζ ซึ่งการหาตัวแปรของระบบเหล่านี้มักเกิดค่าความผิดพลาด ทำให้การสั่นตกค้างไม่เท่ากับศูนย์ ภาพที่ 20 แสดงความไวของความถี่ธรรมชาติซึ่งได้รับมาจากการหาแบบจำลองของระบบ ω_m ซึ่งผิดพลาดกับความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นจริง การเพิ่มสภาพทนทานทำได้โดยเพิ่มอินพัลส์เชปเปอร์จากสอง (ZV) เป็นสาม (ZVD) หรือมากกว่า ซึ่งก็จะทำให้ผลตอบสนองมีเวลาขึ้นช้ามากขึ้นด้วยเช่นกัน



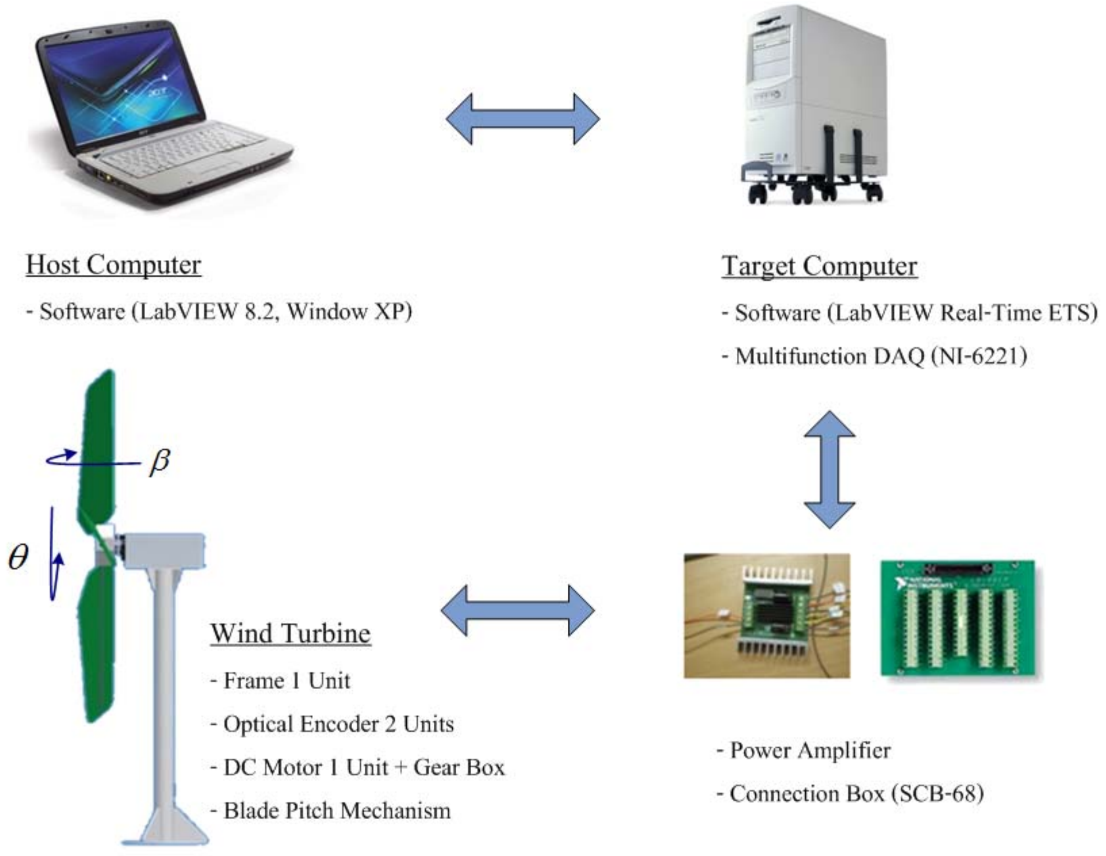
ภาพที่ 21 ผลของการเพิ่มสภาพทนทานต่อเวลาขึ้นของผลตอบสนองของระบบ

อุปกรณ์และวิธีการ

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และส่วนที่สองจะกล่าวถึงวิธีการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การออกแบบระบบควบคุมมุมพิตช์ และการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ

อุปกรณ์

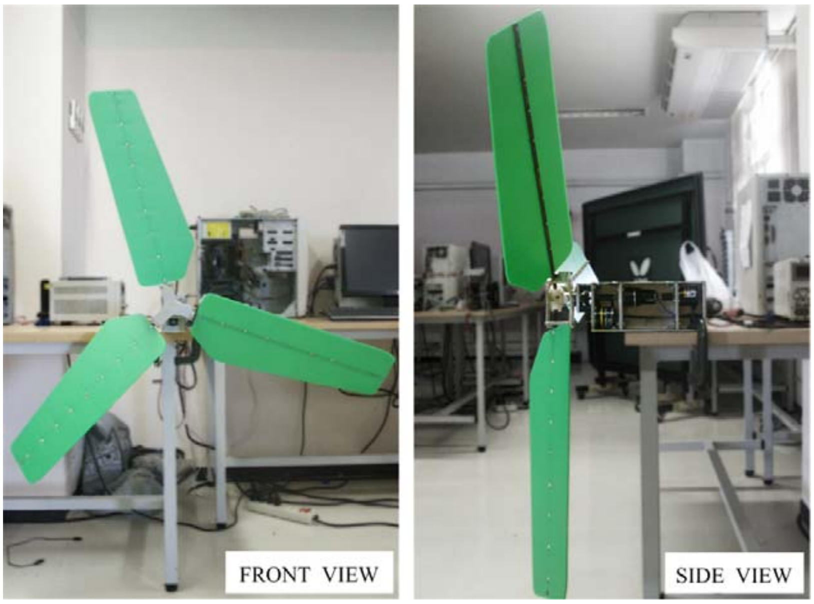
อุปกรณ์หลักของการทดลองประกอบไปด้วย ชุดกังหันลมจำลอง วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง Host computer และ Target computer ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 อุปกรณ์การทดลองและการเชื่อมต่อ

1. กังหันลมจำลอง

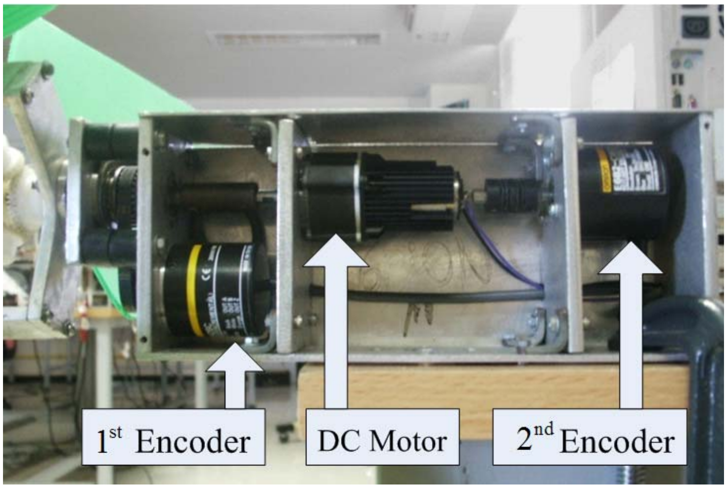
กังหันลมจำลองชนิดแกนระดับแบบ 3 ใบพัด สามารถปรับมุมพิตช์ได้ โครงสร้างของห้องเครื่องและดุมแกนหมุน (Hub) ทำจากอลูมิเนียมแผ่น เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดขนาด 1.14 เมตร พื้นที่หน้าตัดรับลมขนาด 1.02 ตารางเมตรไม่ได้ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 23 กังหันลมจำลอง

ห้องเครื่องทรงสี่เหลี่ยมขนาด 228×98×63 มิลลิเมตร แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกติดตั้งตัวตรวจวัดตำแหน่ง (1st Encoder) ของ Omron รุ่น E6B2-CWZ6C ความละเอียด 2000 P/R สำหรับวัดสัญญาณป้อนกลับของมุมที่โรเตอร์หมุนไป ส่วนที่สองติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ส่วนที่สามติดตั้งตัวตรวจวัดตำแหน่ง (2nd Encoder) ความละเอียด 360 P/R สำหรับวัดสัญญาณป้อนกลับของมุมที่มอเตอร์หมุนไป

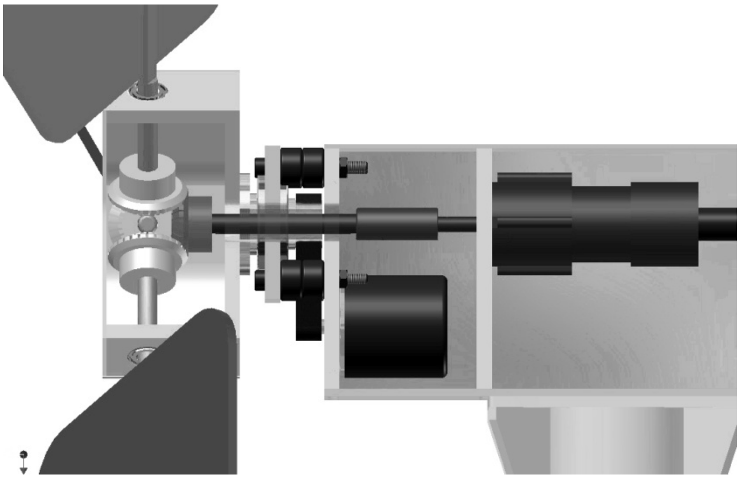
โรเตอร์ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน คือ ดุมแกนหมุนและใบพัด การหมุนของโรเตอร์เกิดจากลมซึ่งเข้าปะทะใบพัด สร้างแรงยก (Lift Force) และแรงผลัก (Drag force) แรงยกทำให้โรเตอร์หมุนโดยทำให้เกิดแรงบิดรอบแกนเพลาของโรเตอร์ มุมที่โรเตอร์หมุนไปถูกถ่ายทอดผ่านสายพานไปยังเอ็นโคดเดอร์ตัวที่ 1



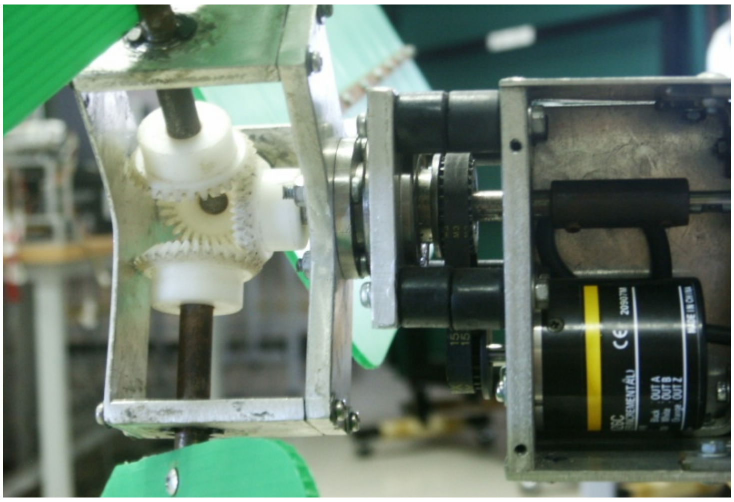
ภาพที่ 24 ห้องเครื่องของกังหันลมจำลอง

เพลาของโรเตอร์เป็นแบบกลวง ภายในมีเพลาของมอเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่หลักในการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม โดยการหมุนปรับเปลี่ยนมุมพิตช์ตามคำสั่งของระบบควบคุม ดังนี้

1) มุมพิตช์ของใบพัดคงที่ คือควบคุมให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเดียวกับที่โรเตอร์หมุน ทำให้เฟืองดอกจอกที่ปลายของใบพัดทั้งสาม และปลายเพลาของมอเตอร์หมุนไปพร้อมกัน



ภาพที่ 25 การส่งแรงบิดจากมอเตอร์ไปยังเฟืองดอกจอกเพื่อปรับมุมพิตช์



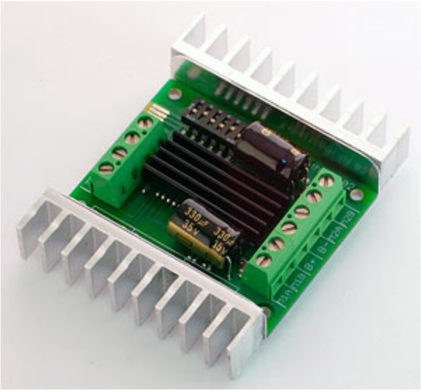
ภาพที่ 26 เฟืองดอกจอกสำหรับปรับมุมพิตช์

2) เปลี่ยนมุมของใบพัด คือควบคุมให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่มากกว่า (เพิ่มมุมพิตช์) หรือน้อยกว่า (ลดมุมพิตช์) ความเร็วของโรเตอร์ ซึ่งก็จะทำให้เฟืองที่ปลายของมอเตอร์หมุนขับให้เฟืองที่ปลายของใบพัดให้หมุนไปเป็นมุมที่ต้องการเท่ากันทั้งสามใบ

ภาพที่ 27 ตัวตรวจวัดตำแหน่ง (Incremental Encoder)

2. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier)

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงหรือวงจรขยายสัญญาณ ใช้ของ Dimension engineering รุ่น Sabertooth 2×10 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณควบคุมขนาด 0 ถึง 5 โวลต์ จากบอร์ด NI PCI 6221 เพื่อขับมอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 โวลต์



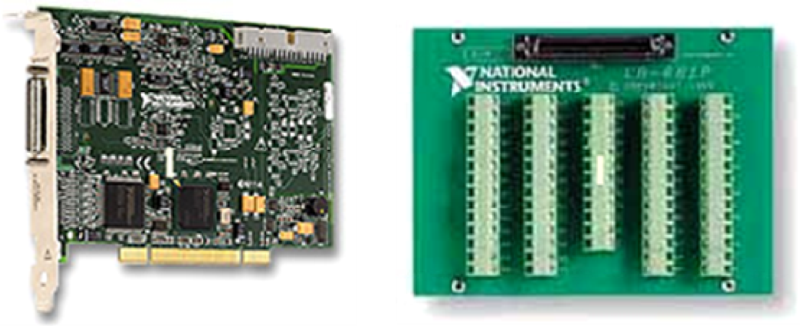
ภาพที่ 28 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power amplifier)

3. Host computer

ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งานในการสั่งการทำงานของระบบและแสดงผลการทำงานของระบบ โดยในคอมพิวเตอร์จะทำการติดตั้งโปรแกรม LabVIEW 8.2

4. Target computer

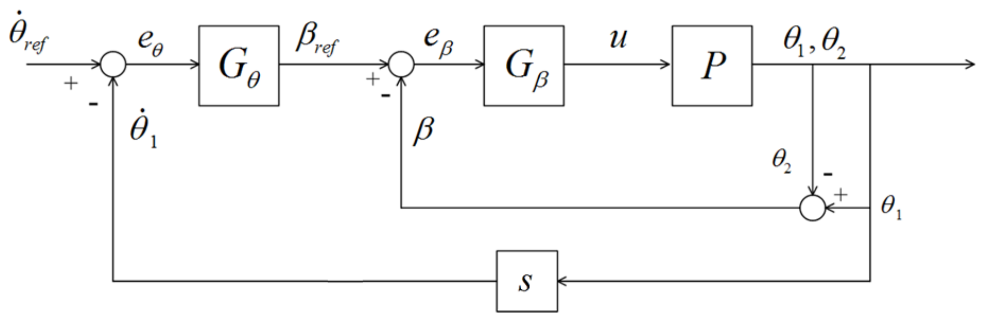
ในคอมพิวเตอร์จะติดตั้งการ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) รุ่น NI PCI 6221 และติดตั้งโปรแกรม LabVIEW Real-time module 8.2 โดยจะทำหน้าที่รับส่งสัญญาณจากตัวตรวจวัดตำแหน่งและคอมพิวเตอร์ผ่านทางบอร์ดรับส่งสัญญาณ



ภาพที่ 29 การ์ดรับส่งข้อมูล (Data acquisition) รุ่น NI PCI 6221 และบอร์ดรับส่งสัญญาณ

วิธีการ

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ การออกแบบระบบควบคุมมุมพิตช์ และการออกแบบระบบคุมคุมความเร็วรอบ โดยต่อรวมทั้งสองระบบเข้าด้วยกันให้เป็นการควบคุมแบบต่อเรียง (Cascade Control)

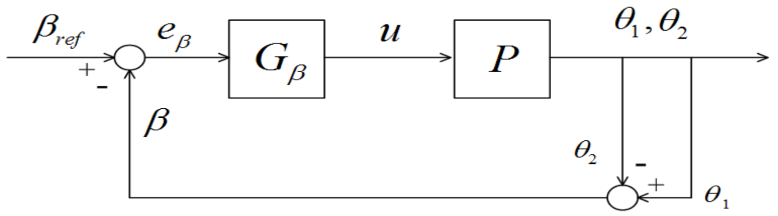


ภาพที่ 30 แผนภาพบล็อกการควบคุมแบบต่อเรียงของระบบควบคุมความเร็วรอบ

วงรอบภายนอกหรือวงรอบหลัก (Master Loop) คือ ระบบคุมคุมความเร็วรอบ สัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมของวงรอบหลักทำหน้าที่เป็นค่าอินพุตอ้างอิงสำหรับวงรอบภายในหรือวงรอบรอง (Slave Loop) ซึ่งเป็นระบบควบคุมมุมพิตช์

การออกแบบเริ่มจากออกแบบวงรอบภายในเป็นอันดับแรก จากนั้นจึงทำการออกแบบวงรอบภายนอก การออกแบบวงรอบภายนอกกำหนดให้วงรอบภายในเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการ (Process) ที่ต้องการควบคุม

1. การออกแบบระบบควบคุมมุมพิตช์



ภาพที่ 31 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์

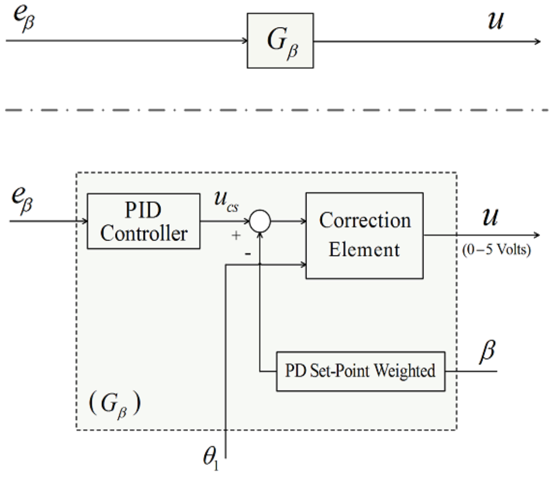
การออกแบบระบบควบคุมมุมพิตช์มีแผนภาพบล็อกดังภาพที่ 31 โดยที่ G_β คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม และ P คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ตัวแปรของสัญญาณที่ใช้ในระบบควบคุมสามารถอธิบายได้ดังนี้

β_{ref} คือ สัญญาณมุมพิตช์อ้างอิง
β คือ สัญญาณมุมพิตช์จากกระบวนการ
e_β คือ สัญญาณความผิดพลาด
u คือ สัญญาณควบคุมเข้ากระบวนการ
θ_1 คือ สัญญาณป้อนกลับ มุมของโรเตอร์
θ_2 คือ สัญญาณป้อนกลับ มุมของมอเตอร์

สัญญาณความผิดพลาด e_β ได้รับจากการเปรียบเทียบสัญญาณมุมพิตช์อ้างอิงกับสัญญาณมุมพิตช์จากกระบวนการคือ $e_\beta = \beta_{ref} - \beta$ โดยสัญญาณมุมพิตช์จากกระบวนการได้รับจากการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่โรเตอร์หมุนกับมุมของมอเตอร์ที่หมุนไป คือ

$$\beta = \theta_1 - \theta_2 \tag{6}$$

โดยที่ $\beta = 0$ เมื่อ $\theta_1 = \theta_2 = 0$
$\beta =$ ค่าคงที่ เมื่อ $\theta_1 = \theta_2 \neq 0$

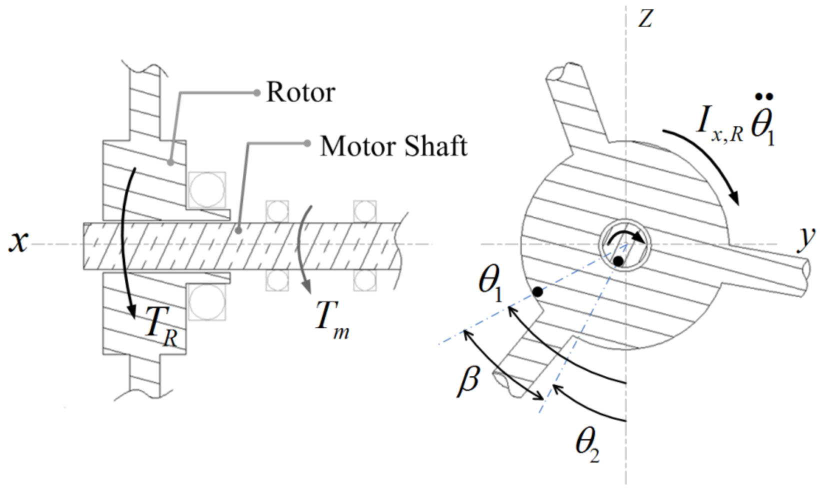


ภาพที่ 32 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมมุมพิตช์

1.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของส่วนการปรับค่าสัญญาณควบคุม (Correction Element)

ตัวควบคุมมุมพิตช์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมแบบ PID และส่วนของการปรับค่าสัญญาณควบคุม u_{cs} จากตัวควบคุมแบบ PID ให้เป็นสัญญาณควบคุมเข้ากระบวนการ (u) ขนาด 0-5 โวลต์ โดยส่งสัญญาณควบคุมผ่านการ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) เข้าสู่วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงซึ่งกำหนดให้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการ

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของส่วนการปรับค่าสัญญาณควบคุม (Correction Element) ทำได้โดยการพิจารณาผังวัตถุอิสระดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ผังวัตถุอิสระของกังหันลมจำลอง

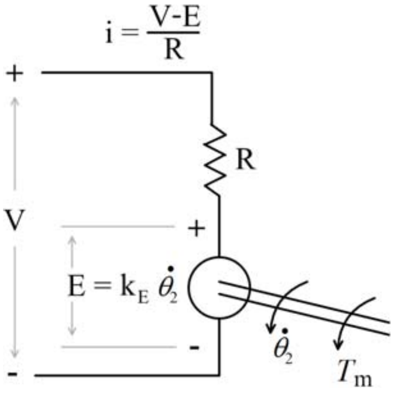
โดยที่ T_R คือ แรงบิดที่โรเตอร์

T_m คือ แรงบิดจากมอเตอร์

$I_{x,R}$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนเพลาของโรเตอร์

พิจารณาแรงบิดที่โรเตอร์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากลมที่เข้ามาปะทะใบพัด ทำให้เกิดแรงยกและแรงผลัก แรงยกสร้างแรงบิด T_R ทำให้โรเตอร์ซึ่งมีโมเมนต์ความเฉื่อย $I_{x,R}$ หมุนด้วยความเร่ง $\ddot{\theta}_1$ ความสัมพันธ์แสดงได้โดยสมการ คือ

$$T_R = I_{x,R}\ddot{\theta}_1 \qquad (7)$$



ภาพที่ 34 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรง

พิจารณาแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงขนาดเล็ก โดยกำหนดสมมุติฐานให้มีค่าฟลักซ์สนาม (Field Flux) คงที่ และมีวงจรสมมูล ดังภาพที่ 34

$$T_m = k_m \cdot i \tag{8}$$

$$E = k_E \dot{\theta}_2 \tag{9}$$

$$V = E + R \cdot i \tag{10}$$

โดยที่ T_m คือ แรงบิดจากมอเตอร์
k_m คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์
i คือ กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์
E คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ
k_E คือ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (Back-emf constant)
R คือ ค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์เมเจอร์

หารตลอดสมการที่ (8) ด้วยค่า k_m และแทนค่าใหม่ของสมการที่ (8) กับ (9) ลงใน (10) จะได้

$$T_m = \frac{k_m}{R}V - \frac{k_c k_m}{R}\dot{\theta}_2 \tag{11}$$

พิจารณาที่สภาวะสมดุลเมื่อแรงบิดที่โรเตอร์ มีขนาดและทิศทางเดียวกับแรงบิดจากมอเตอร์ ทำให้ (7) และ (11) เท่ากัน คือ

$$I_{x,R}\ddot{\theta}_1 = \frac{k_m}{R}V - \frac{k_c k_m}{R}\dot{\theta}_2 \qquad (12)$$

สัญญาณแอนะล็อกจากระบบควบคุม (u) ขนาด 0-5 โวลต์ ป้อนเข้าวงจรขับมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 10 โวลต์ เป็นแหล่งพลังงานเพื่อใช้ขยายสัญญาณต่อเชื่อมอยู่ นอกจากนั้นแล้ววงจรขับมอเตอร์กระแสตรงยังทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณควบคุม ให้เป็นแบบสามการดำเนินงาน คือ u ขนาด 2.5 มอเตอร์หยุดนิ่ง ขนาดมากกว่า 2.5 มอเตอร์หมุนในทิศทางหนึ่งและน้อยกว่า 2.5 หมุนไปอีกทิศทางหนึ่ง ซึ่งทิศทางสามารถสลับกันได้โดยการสลับขั้วของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ (V) ที่ได้รับจากวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงมีค่าสูงสุดและต่ำสุด ไม่เกินค่าซึ่งเป็นบวกและค่าซึ่งเป็นลบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณจากระบบควบคุมกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ แสดงดังสมการที่ 13 โดยประมาณกำหนดให้ k_s เป็นค่าคงที่ของการขยายสัญญาณ

$$V = k_s u \qquad (13)$$

แทนค่า (13) ลงใน (12) จัดรูปแบบสมการได้ใหม่ คือ

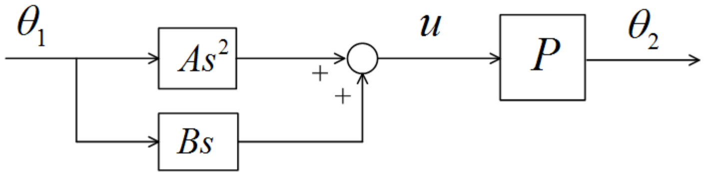
$$u = A\ddot{\theta}_1 + B\dot{\theta}_2 \qquad (14)$$

โดย A และ B เป็นค่าคงที่ซึ่งมีสมการ คือ

$$A = I_{x,R}\left(\frac{R}{k_m\ k_s}\right) \qquad (15)$$

$$B = \frac{k_c}{k_s} \qquad (16)$$

จากสมการที่ (14) ทำการทดลองโดยการใช้ระบบควบคุมแบบเปิดเพื่อหาค่าคงที่ A และ B โดยมีแผนภาพบล็อก แสดงดังภาพที่ 35 การทดลองกำหนดให้ $\dot{\theta}_2$ ใน (14) มีค่าเท่ากับ $\dot{\theta}_1$ ทำการทดลองโดยหมุนโรเตอร์ไปมา และปรับหาค่า A และ B ที่ทำให้มุม β คงที่ หรือคือ $\dot{\theta}_2$ มีความเร็วเดียวกันกับความเร็ว $\dot{\theta}_1$ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนี้คือ $A = 2.5$ และ $B = 2$



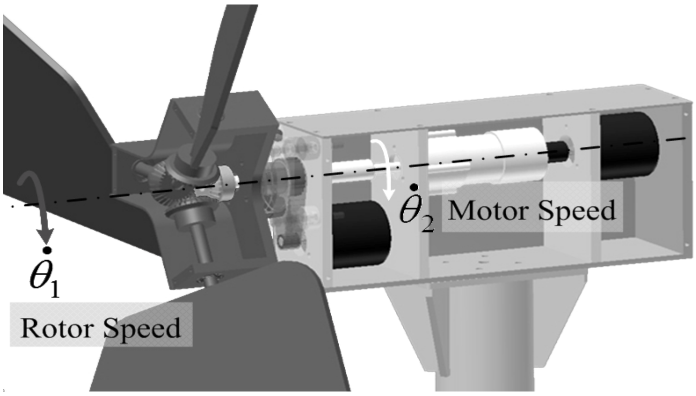
ภาพที่ 35 แผนภาพบล็อกของส่วนการปรับค่าสัญญาณควบคุมมุมพิตช์

จาก (6) จัดรูปและหาอนุพัทธ์ได้คือ

$$\dot{\theta}_2 = \frac{d}{dt}(\theta_1 - \beta) \tag{17}$$

พิจารณา β ใน (17) ซึ่งสามารถใช้เป็นสัญญาณเพื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ เหมาะสมที่จะกำหนดให้เป็นตัวแปรของสัญญาณออกจากตัวควบคุม คือ u_{cs} แทนค่า (17) ลงใน (14) จะได้

$$u = 2.5\ddot{\theta}_1 + 2\frac{d}{dt}(\theta_1 - u_{cs}) \tag{18}$$



ภาพที่ 36 ความเร็วของโรเตอร์ ($\dot{\theta}_1$) และความเร็วของมอเตอร์ ($\dot{\theta}_2$)

1.2 ตัวควบคุมการปรับมุมพิตช์แบบ PID

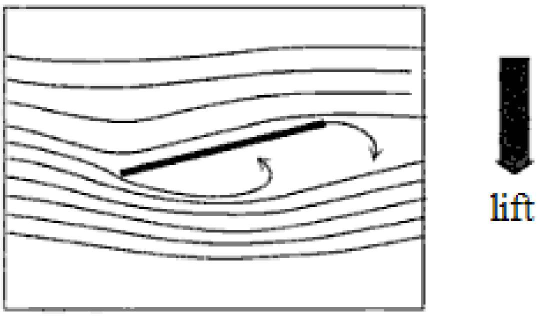
ตัวควบคุมแบบ PID ที่ใช้มีการต่อแบบขนาน (Parallel Form) มีฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ (5) เนื่องจากสะดวกในการปรับหาค่าที่ดีที่สุดโดยการทดลอง เพราะสามารถปิดการทำงานของเทอมควบคุมแบบ I (K_i) ได้อย่างสมบูรณ์และง่ายดาย โดยการกำหนดค่าอัตราส่วนขยายในเทอม I เท่ากับศูนย์ แตกต่างจากการต่อตัวควบคุมแบบอุดมคติ (Ideal Form) ดังสมการที่ (4) ซึ่งการปิดการทำงานในเทอมควบคุม I นั้น ต้องกำหนดค่า T_i เข้าใกล้ค่าอนันต์

การขยายสัญญาณรบกวนจากการวัดที่เกิดจากเทอมควบคุมแบบ D ถูกกรองออกโดยใช้ตัวกรองผ่านต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth Low-Pass Filter) อันดับ 2 ความถี่การชักตัวอย่างของระบบควบคุมการปรับมุมพิตช์ คือ 10 Hz และความถี่ตัดออก (Cut-off Frequency) ที่ใช้ คือ 0.125 Hz

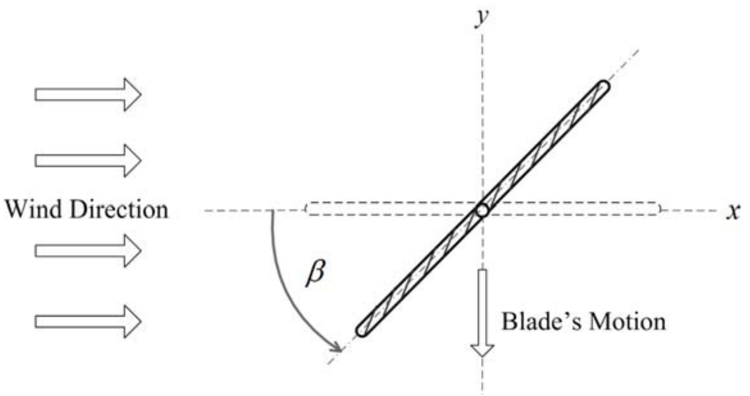
อัตราส่วนขยายของตัวควบคุมคือ $K_p = 2.2$ $K_i = 2.8$ และ $K_d = 0.5$

1.3 มุมเริ่มต้นสำหรับการทำงานของกังหันลม

การหมุนของกังหันลมจำลองซึ่งมีใบพัดสร้างขึ้นจากพลาสติกแผ่นเรียบ พิจารณาได้จากเส้นกระแสการไหลของลมผ่านแพนอากาศแบบแผ่นเรียบ แสดงดังภาพที่ 37 โดยความดันแตกต่างระหว่างพื้นที่ผิวด้านบนกับพื้นที่ด้านล่างของแพนอากาศ สร้างแรงยกและทำให้เกิดการหมุนของกังหันลม

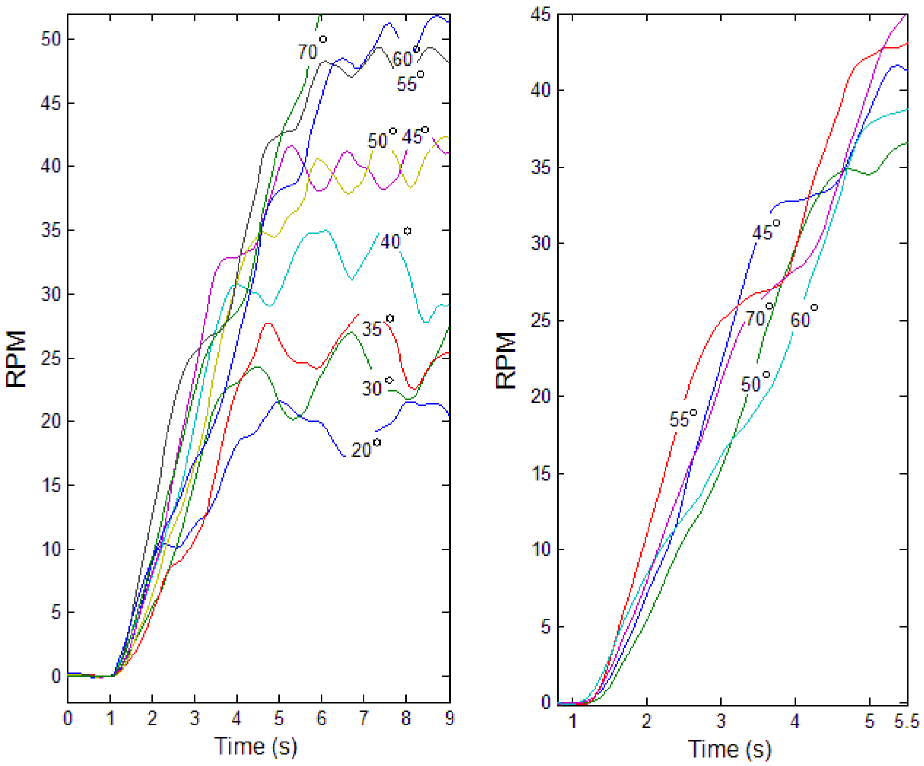


ภาพที่ 37 เส้นกระแสการไหลของลมผ่านแพนอากาศแบบแผ่นเรียบ



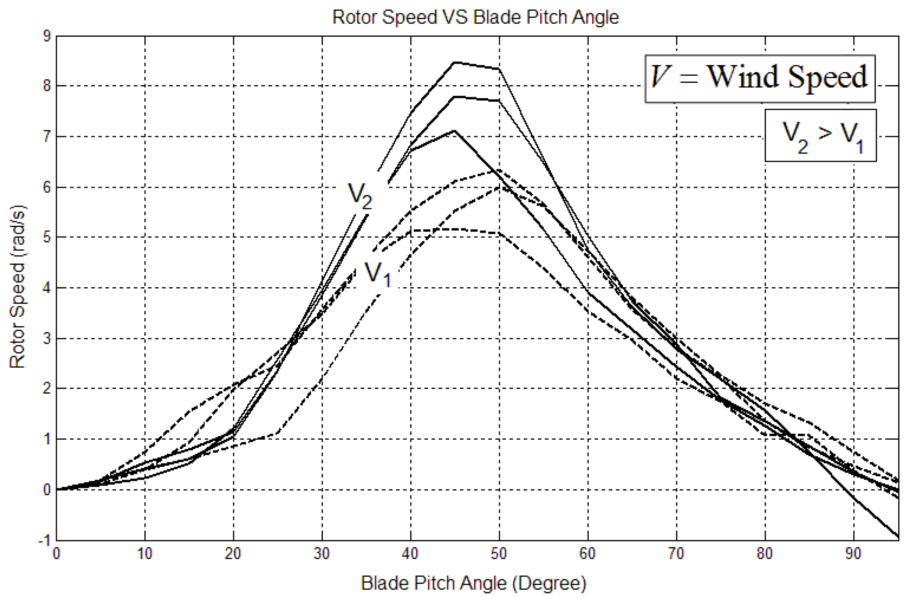
ภาพที่ 38 มุมพิตช์ของกังหันลมจำลอง

มุมพิตช์ของกังหันลมจำลองสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 38 ซึ่งโดยปรกติแล้วกังหันลมจะมีระบบควบคุมมุมยอว์เพื่อควบคุมให้กังหันลมหันหน้าเข้าหาทิศทางลมเสมอ จากภาพมุมพิตช์มีค่าเป็นศูนย์เมื่อใบพัดขนานกับทิศทางลม และตั้งฉากกับทิศทางลมที่มุมเท่ากับ 90 อาศา โดยทิศทางการหมุนจะเป็นทิศทางตรงกันข้ามเมื่อมุมพิตช์มีค่ามากกว่า 90 องศา



ภาพที่ 39 ความเร็วช่วงขึ้นของโรเตอร์เมื่อกำหนดมุมพิตช์คงที่ค่าต่างๆ

การพิจารณาหามุมเริ่มต้นสำหรับการทำงานของกังหันลม พิจารณาได้จาก 2 ผลการทดลอง ซึ่งการทดลองที่หนึ่ง คือ การทดลองหาอัตราการเพิ่มความเร็วของโรเตอร์จากค่าศูนย์ไปยังค่าความเร็วคงตัวของมุมพิตช์นั้นๆ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้ คือ ให้ลมซึ่งมีความเร็วคงที่ พัดผ่านไปยังกังหันลมซึ่งตั้งมุมพิตช์คงที่ไว้ค่าหนึ่ง วัดความเร็วของโรเตอร์ของกังหันลมจากค่าเริ่มต้นซึ่งเท่ากับศูนย์จนเริ่มเข้าสู่ช่วงคงที่ ผลการทดลองโดยการเปลี่ยนมุมพิตช์ให้คงที่ด้วยค่าต่างๆ แสดงดังภาพที่ 39 ซึ่งพิจารณาได้ว่าอัตราการเพิ่มความเร็วของโรเตอร์มีค่าสูงใกล้เคียงกันโดยประมาณอยู่ในช่วงมุมเท่ากับ 45 ถึง 70 องศา โดยมีค่าความเร็วในช่วงคงที่มากขึ้นตามขนาดของมุมพิตช์



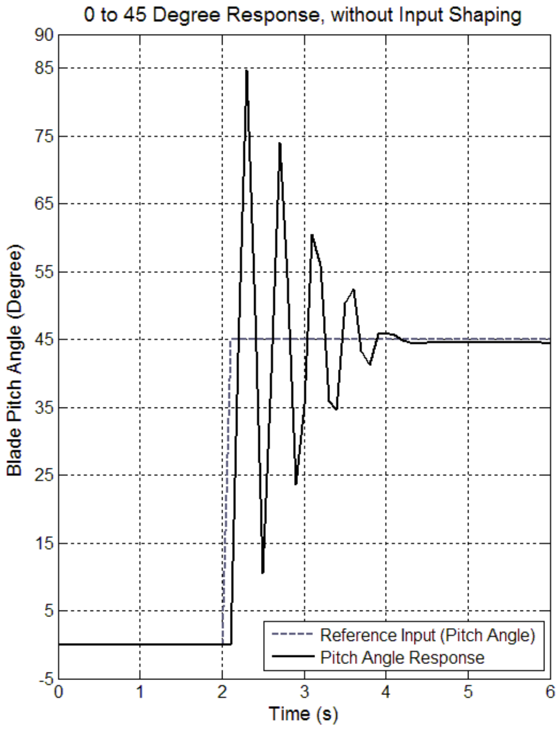
ภาพที่ 40 ความเร็วของโรเตอร์เมื่อปรับเพิ่มมุมพิตช์

การทดลองที่สอง คือ การปรับมุมพิตช์แบบต่อเนื่อง มีวิธีการทดลองคือให้ลมคงที่ค่าหนึ่งพัดผ่านกังหันลมซึ่งมีมุมพิตช์เริ่มต้นเท่ากับศูนย์ และปรับมุมพิตช์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนความเร็วของโรเตอร์ลดต่ำลงกลับมามีค่าเข้าใกล้หรือเป็นศูนย์อีกครั้ง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 40 ซึ่งมีการทดลองซ้ำๆ และเพิ่มเติมกับความเร็วลมคงที่ค่าอื่นๆ แสดงให้เห็นว่ามุมพิตช์ที่ทำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์มีค่าสูงที่สุดเมื่อความเร็วลมคงที่เกิดขึ้นที่ค่าประมาณ 45-50 องศา ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่ามุมพิตช์สำหรับการเริ่มต้นทำงานของกังหันลมเท่ากับ 45 อาศา

1.4 การควบคุมการสั่นด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิง

การปรับมุมพิตช์จากมุม 0 องศา ไปยังมุมตั้งต้นการทำงานคือ 45 องศา โดยใช้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งมาก ดังแสดงในภาพที่ 41 ทั้งนี้ สืบเนื่องมาจากระบบควบคุมมีอัตราการชักตัวอย่าง (Sampling Rate) เท่ากับ 10 Hz ทำให้มีอัตราการปรับมุมที่ใช้ค่อนข้างสูง คือ 450 องศาต่อวินาที

การควบคุมการสั่นด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิง เกี่ยวข้องกับการสังวัตนาการสัญญาณอินพุตกับลำดับของอิมพัลส์ วัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ การหาแอมพลิจูดและตำแหน่งของเวลาที่ให้อิมพัลส์กับระบบเพื่อลดการสั่น หรือการแกว่งของผลตอบสนองของระบบ



ภาพที่ 41 การแกว่งของผลตอบสนองเมื่อกังหันลมเริ่มต้นทำงาน

พิจารณาระบบสั่นสะเทือนอันดับใดๆ สามารถแบ่งย่อยเป็นระบบอันดับสอง โดยใช้หลักการทับซ้อน (Superposition Principle) สมการ (19) คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสอง

$$G(s)=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \tag{19}$$

โดยที่ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบสั่นสะเทือน และ ζ คือ อัตราส่วนความหน่วง และมีผลตอบสนองของระบบอันดับสองในโดเมนเวลาคือ

$$y(t)=\frac{A\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)}\sin\left[\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\left(t-t_0\right)\right] \tag{20}$$

โดยที่ A และ t_0 คือ แอมพลิจูดและตำแหน่งของเวลาที่ให้อิมพัลส์กับระบบ ผลตอบสนองซึ่งเกิดจากลำดับของอิมพัลส์ N จำนวน คำนวณได้จากการใช้หลักการทับซ้อนของผลตอบสนอง คือ

$$y(t)=M\sin\left(\omega_d t+\beta\right) \tag{21}$$

โดยที่ $$M=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N}B_i\cos\phi_i\right)^2+\left(\sum_{i=1}^{N}B_i\sin\phi_i\right)^2} \tag{22}$$

และ $$B_i=\frac{A_i\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)}\ ,\quad \phi_i=\omega_d t_i\ ,\quad \omega_d=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

A_i และ t_i คือ แอมพลิจูดและตำแหน่งของเวลาที่ให้อิมพัลส์กับระบบลำดับที่ i

การคำนวณแอมพลิจูดของการสั่นตกค้าง ภายหลังได้รับอิมพัลส์สุดท้ายที่เวลา t_N โดยแทนค่า $t=t_N$ ใน (22) ได้สมการ คือ

$$V=\sqrt{V_1^2+V_2^2} \tag{23}$$

$$V_1=\sum_{i=1}^{N}\frac{A_i\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\cos\left(\omega_d t_i\right)$$

$$V_2=\sum_{i=1}^{N}\frac{A_i\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega(t_N-t_i)}\sin\left(\omega_d t_i\right)$$

เพื่อทำให้การสั่นตกค้างของผลตอบสนองเท่ากับศูนย์ กำหนดให้ V ใน (23) มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้ได้รับสมการเงื่อนไขบังคับ (Constraint) จากการกำหนดดังกล่าว คือ

$$\sum_{i=1}^{N} A_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\cos(\omega_d t_i)=0 \tag{24}$$

$$\sum_{i=1}^{N} A_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\sin(\omega_d t_i)=0 \tag{25}$$

สัญญาณที่ได้รับจากการใช้เทคนิคอินพุตเชปปิงที่สภาวะคงตัว จะต้องมีค่าเดียวกันกับสัญญาณอินพุตดั้งเดิม ดังนั้น จำเป็นต้องสร้างสมการเงื่อนไขบังคับสำหรับแอมพลิจูดของอิมพัลส์ คือ ผลรวมของแอมพลิจูดของอิมพัลส์เท่ากับหนึ่งดังสมการที่ (25)

$$\sum_{i=1}^{N} A_i = 1 \tag{26}$$

การเพิ่มสภาพทนทานต่อความไม่แน่นอนของความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนการหน่วง ทำได้โดยการหาอนุพันธ์ของ (24) และ (25) เทียบกับความถี่ธรรมชาติ ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}\frac{dV_1}{d\omega} = \sum_{i=1}^{N} & -A_i\omega_n t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\sin(\omega_d t_i) \\ & -\frac{A_i\zeta\omega_n(t_N-t_i)e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\cos(\omega_d t_i)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \\ & +\frac{A_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\cos(\omega_d t_i)}{\sqrt{1-\zeta^2}}\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}\frac{dV_2}{d\omega} = \sum_{i=1}^{N} & A_i\omega_n t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\cos(\omega_d t_i) \\ & -\frac{A_i\zeta\omega_n(t_N-t_i)e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\sin(\omega_d t_i)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \\ & +\frac{A_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)}\sin(\omega_d t_i)}{\sqrt{1-\zeta^2}}\end{aligned} \tag{28}$$

จาก (27) และ (28) สามารถลดรูปของสมการลงได้ โดยการพิจารณาตัดเทอมสุดท้ายของทั้งสองสมการคือ เนื่องจากเมื่อคูณ (27) และ (28) ด้วย ω_n ทำให้เทอมสุดท้ายนี้ตรงกับ (23) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และสำหรับเทอมที่สองซึ่งเกี่ยวข้องกับผลจากการเปลี่ยนอัตราส่วนความหน่วงที่เกิดจากการเปลี่ยนความถี่ธรรมชาติกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$\sum_{i=1}^{N} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N - t_i)} \cos\left(\omega_d t_i\right) = 0 \tag{29}$$

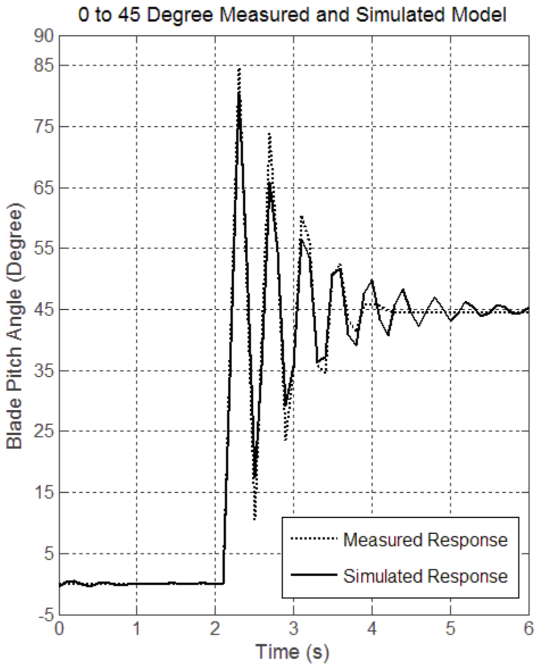
$$\sum_{i=1}^{N} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N - t_i)} \sin\left(\omega_d t_i\right) = 0 \tag{30}$$

จากสมการเงื่อนไขบังคับ (24), (25), (26), (29) และ (30) หาแอมพลิจูดและตำแหน่งของเวลาได้ดังสมการที่ (27) ซึ่งมีสภาพทนทานต่อการแปรผันของความถี่ธรรมชาติประมาณ $\pm$ 20% โดยยังคงทำให้เปอร์เซ็นต์ของการสั่นตกค้างของผลตอบสนองน้อยกว่า 5%

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(1+K)^2} & \dfrac{2K}{(1+K)^2} & \dfrac{K^2}{(1+K)^2} \\ 0 & \pi/\omega_d & 2\pi/\omega_d \end{bmatrix} \tag{27}$$

โดยที่ $K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$

จากผลตอบสนองของระบบซึ่งได้รับจากการทดลองปรับมุมที่ 0 องศา ไปยัง 45 องศา ดังภาพที่ 42 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB ได้ดังสมการที่ (28)



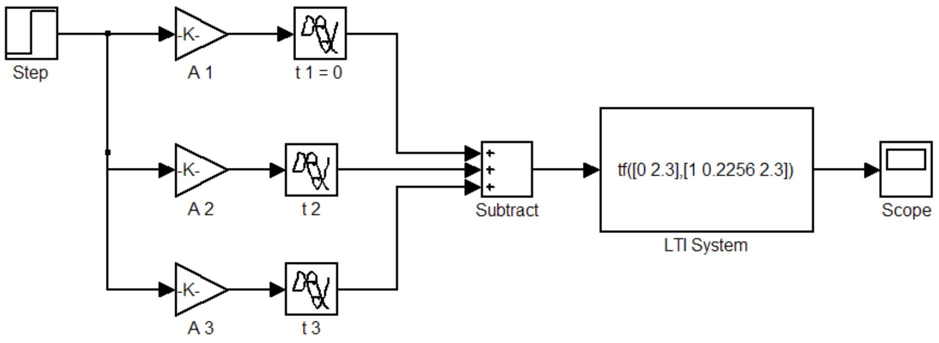
ภาพที่ 42 ผลการหาเอกลักษณ์ของระบบเทียบกับผลตอบสนองจริง

$$G(s) = \frac{2.31}{s^2 + 0.226s + 2.31} \tag{28}$$

โดยที่ $\omega_n = 1.52$ และ $\zeta = 0.0744$

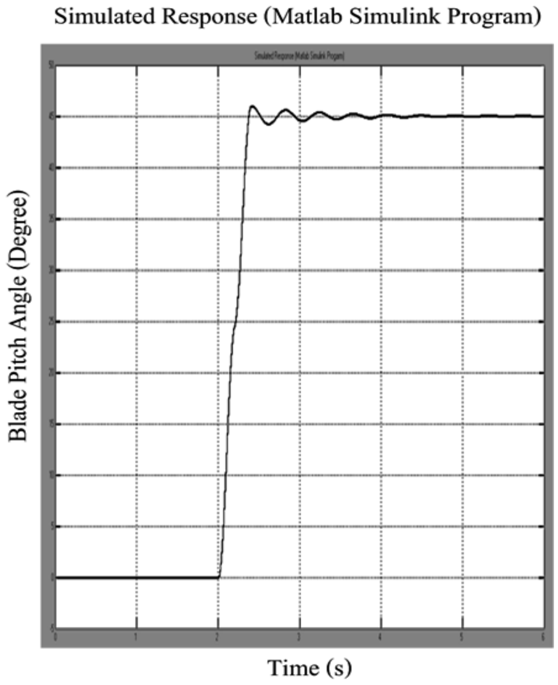
แทนค่า ω_n และ ζ ใน (27) จะได้ $A_1 = 0.31, A_2 = 0.52, A_3 = 0.19$ และ $t_1 = 0, t_2 = 2.07$ $t_3 = 4.14$ แต่จะเห็นได้ว่าผลรวมของแอมพลิจูดยังไม่เป็นไปตามสมการเงื่อนไขบังคับ (26) เนื่องจากการปัดเศษทศนิยมในการคำนวณ นอกจากนี้ตำแหน่งเวลาของอิมพัลส์ที่ได้มีจุดทศนิยมถึงสองตำแหน่งไม่สามารถใช้จริงได้ เนื่องจากระบบควบคุมที่ใช้มีอัตราการสุ่มตัวอย่างอยู่ที่ 10 Hz จำเป็นต้องปัดเศษค่าเหล่านี้โดยมีค่าที่ใช้ คือ $A_1 = 0.305$, $A_2 = 0.505$, $A_3 = 0.19$ และ $t_1 = 0$, $t_2 = 2$, $t_3 = 4$

จากค่าแอมพลิจูดและตำแหน่งของเวลาที่คำนวณได้ ทำการออกแบบการทดลองเพื่อจำลองผลตอบสนองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยมีแผนภาพบล็อกดังภาพที่ 43

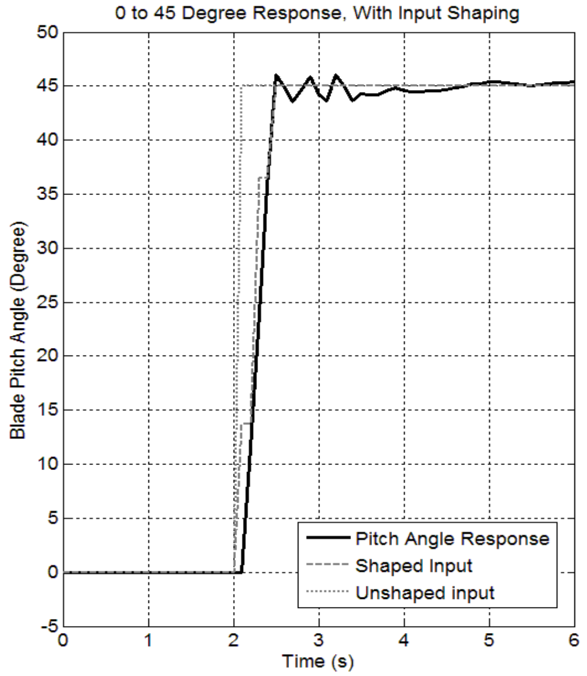


ภาพที่ 43 แผนภาพบล็อกโปรแกรมจำลองผลการออกแบบด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิง

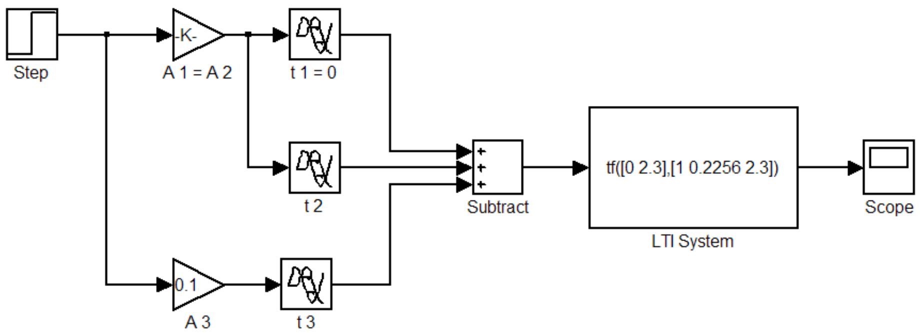
ผลการจำลองการใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง เพื่อลดการแกว่งของผลตอบสนองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 43 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าการแกว่งของผลตอบสนองมีแอมพลิจูดลดลงอย่างมากแต่ยังคงมีการสั่นตกค้างอยู่บางส่วน เนื่องมาจากการปัดเศษดังที่กล่าวมาแล้ว ภาพที่ 44 คือผลการจำลอง ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการทดลองจริงดังภาพที่ 45 แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่หามาได้มีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากพอสมควร



ภาพที่ 44 ผลตอบสนองจำลองเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง



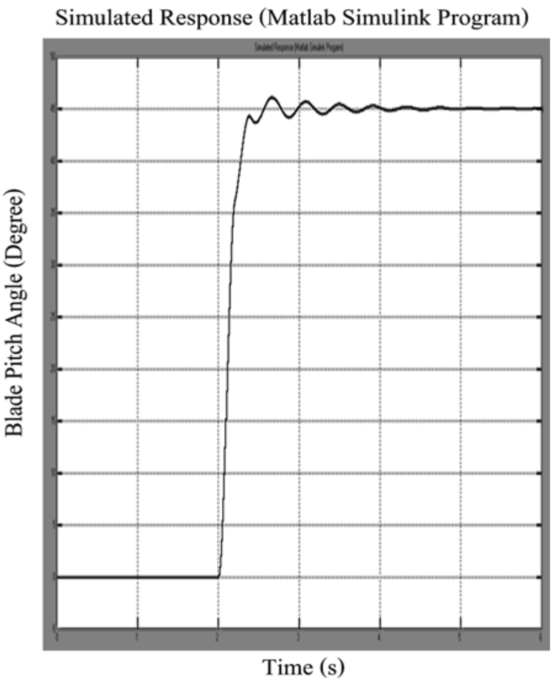
ภาพที่ 45 ผลตอบสนองจริงจากการวัดเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง



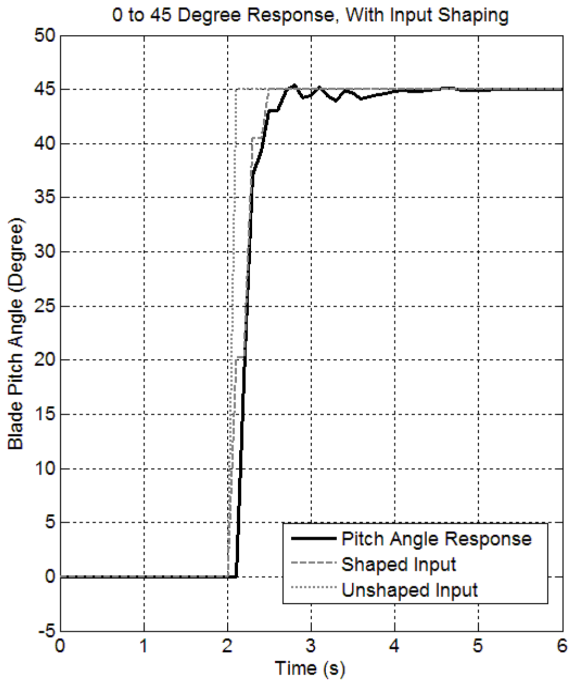
ภาพที่ 46 แผนภาพบล็อกโปรแกรมจำลองผลการออกแบบด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิง โดยกำหนดให้ $A_1 = A_2$

จากการจำลองและการนำไปทดลองใช้กับกังหันลมจริงพบว่า เทคนิคอินพุตเชปปิงมีสภาพทนทานต่อความผิดพลาดของการหาค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงอยู่มากพอควร และจากการทดลองเพิ่มเติมด้วยวิธีการลองผิดลองถูก โดยอ้างอิงกับช่วงและค่าของแอมพลิจูดเดิมที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า สามารถที่จะลดจำนวณค่าอัตราส่วนขยาย หรือก็คือ ค่าแอมพลิจูดของอิมพัลส์ลงได้หนึ่งค่า โดยการกำหนดให้แอมพลิจูดของอิมพัลส์ A_1 มีค่าเท่ากับแอมพลิจูดของอิมพัลส์ A_2 ซึ่งแผนภาพบล็อกของโปรแกรมที่ใช้แสดงดังภาพที่ 46 ทั้งนี้ยังคงทำให้ผลตอบสนอง

ที่ได้มีการสั่นตกค้างใกล้เคียงกับการใช้ค่าจากการคำนวณ แต่ใช้ค่าอัตราส่วนขยายที่น้อยกว่าคือใช้เพียงสองค่า ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงดังภาพที่ 47 แสดงให้เห็นว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับผลการใช้กับกังหันลมจริง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 48 โดยค่าแอมพลิจูดของอิมพัลส์ใหม่ที่ได้ คือ $A_1 = A_2 = 0.45$ และ $A_3 = 0.1$ โดยที่ตำแหน่งเวลาของอิมพัลส์นั้นยังคงใช้ค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี คือ $t_0 = 0, t_1 = 2$ และ $t_2 = 4$



ภาพที่ 47 ผลตอบสนองจำลองเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิง โดยกำหนดให้ $A_1 = A_2$



ภาพที่ 48 ผลตอบสนองจริงจากการวัดเมื่อใช้เทคนิคอินพุตเชปปิ้ง โดยกำหนดให้ $A_1 = A_2$

1.5 การออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักแบบ PD

ความเร็วลมโดยธรรมชาติมักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว คือ สามารถเพิ่มมากขึ้นและหยุดหรือลดลงอย่างมากภายในช่วงเวลาอันสั้น การควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมให้คงที่ในกรณีเช่นนี้นั้นทำได้ยาก และมักต้องการอัตราการปรับมุมพิตช์ค่อนข้างสูง ซึ่งกังหันลมโดยทั่วไปกำหนดค่าอัตราการปรับมุมพิตช์สูงสุดไม่เกิน 5 หรือ 10 องศาต่อวินาที แต่สำหรับกังหันลมขนาดเล็กนั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมค่อนข้างมาก เนื่องจากมีโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ งานวิจัยนี้ทำการทดสอบระบบควบคุมมุมพิตช์ ซึ่งมีเวลาการชักตัวอย่างเท่ากับ 0.1 วินาที โดยใช้สัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได ปรับที่ 5 องศา ซึ่งเท่ากับสามารถปรับมุมพิตช์ได้ 50 องศาต่อวินาที สูงกว่าถึง 10 เท่า ของอัตราการปรับมุมพิตช์ของกังหันลมขนาดใหญ่ที่มีอัตราการปรับมุมพิตช์สูงสุด 5 องศาต่อวินาที ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าโอเวอร์ชูต ดังแสดงในภาพที่ 52 การออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักแบบ PD เป็นเทคนิคการปรับสัญญาณความผิดพลาดที่จะส่งให้กับเทอมควบคุมแบบ P และแบบ D ของระบบควบคุม เพื่อลดการเกิดโอเวอร์ชูตของผลตอบสนอง

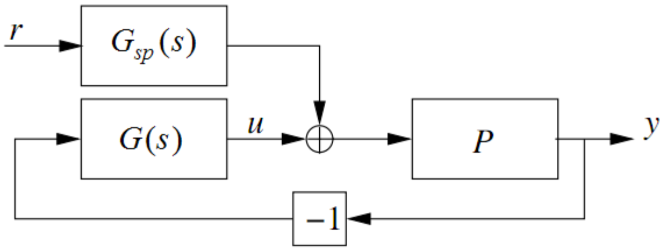
พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย (Set-Point weighted PID Control System) คือ

$$U(s) = G_{sp}Y(s) - G_c(s)Y(s) \tag{29}$$

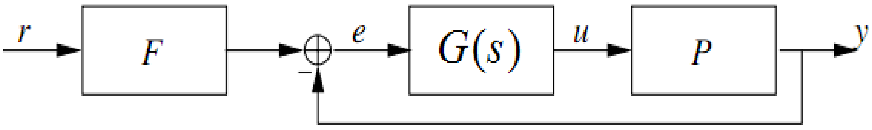
โดยที่
$$G_{sp}(s) = K(\beta + \frac{1}{sT_i} + \gamma\frac{sT_d}{1 + sT_d/N}) \tag{30}$$

$$G(s) = K(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N}) \tag{31}$$

เมื่อ β และ γ คือ พารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายในเทอมควบคุมแบบ P และ D ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 และจาก (29) สามารถเขียนแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมได้ดังภาพที่ 49 โดยที่แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมนี้สามารถจัดให้อยู่ในรูปของแผนภาพบล็อกสมมูลได้ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 49 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย



ภาพที่ 50 แผนภาพบล็อกสมมูลของระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย

พิจารณาสมการ (29), (30) และ (31) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบ PID ในรูปแบบมาตรฐาน (Standard Form) หรือที่นิยมเรียกว่ารูปแบบ ISA (Instrument Society of America) โดยตัดส่วนของตัวกรองความถี่ในเทอมการควบคุมแบบ D และเขียนให้อยู่ในรูปแบบขนานคือ

$$u(t) = K\left(e_p(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d \frac{de_d(t)}{dt} \right) \tag{32}$$

โดยที่ $e_p(t) = \beta r(t) - y(t)$

$e_D(t) = \gamma r(t) - y(t)$

$e(t) = r(t) - y(t)$

จากสมการที่ (29) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบใหม่ (Chen *et al.*, 2008) ซึ่งเทียบเท่ากับระบบควบคุมป้อนกลับค่าความผิดพลาดแบบ PID โดยมีระบบควบคุมแบบ PI เป็นวงรอบภายในได้ดังสมการที่ (33) และมีแผนภาพบล็อกแสดงดังภาพที่ 51

$$u(t) = K\left\{ \beta e(t) - (1-\beta)y(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + \gamma T_d \frac{de(t)}{dt} - (1-\gamma)T_d \frac{dy(t)}{dt} \right\}$$

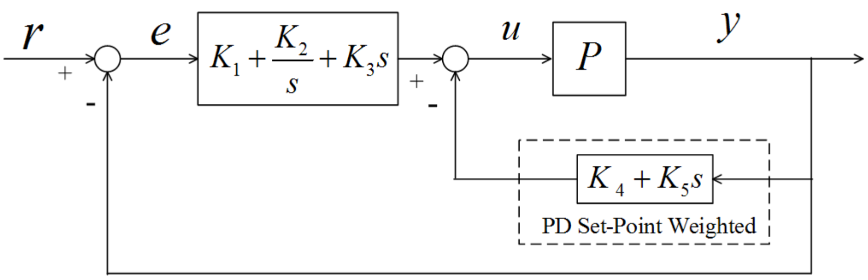
$$= \left\{ K\beta e(t) + \frac{K}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + K\gamma T_d \frac{de(t)}{dt} \right\}$$
$$- \left\{ K(1-\beta)y(t) + K(1-\gamma)T_d \frac{dy(t)}{dt} \right\}$$

$$\equiv \left\{ K_1 e(t) + K_2\int_0^t e(\tau)d\tau + K_3 \frac{de(t)}{dt} \right\} - \left\{ K_4 y(t) + K_5 \frac{dy(t)}{dt} \right\} \tag{33}$$

โดยที่ $K_1 = K\beta$, $K_2 = K/T_i$, $K_3 = K\gamma T_d$

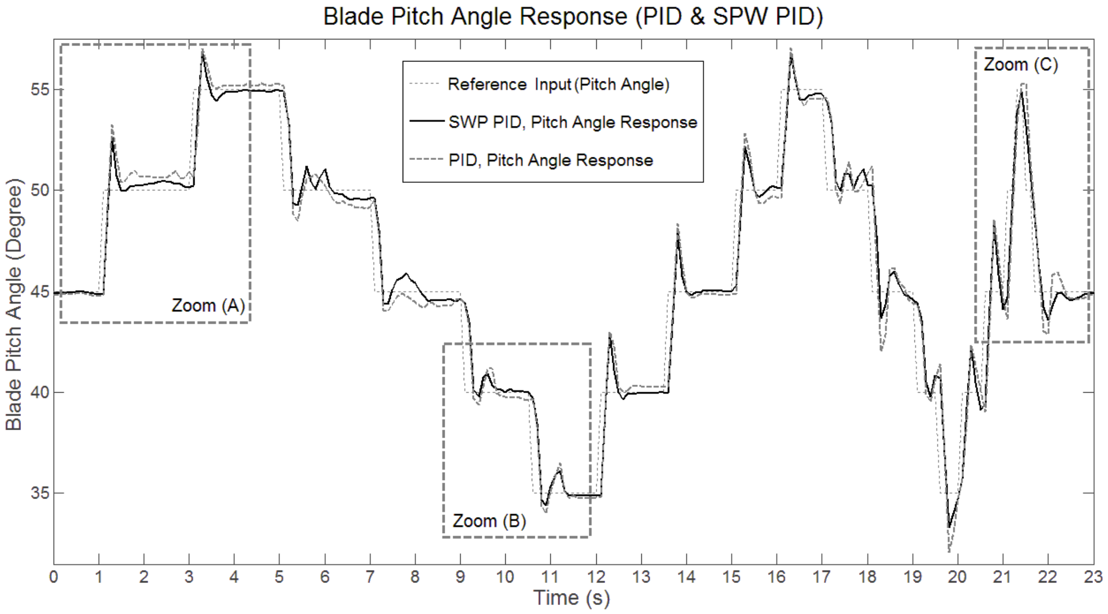
$$K_4 = K(1-\beta), \tag{34}$$

$$K_5 = K(1-\gamma)T_d \tag{35}$$

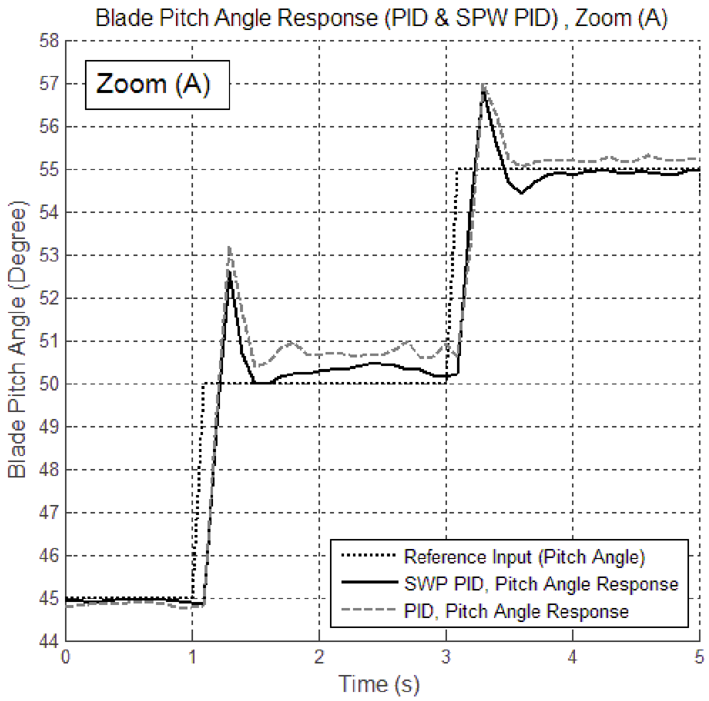


ภาพที่ 51 แผนภาพบล็อกสมมูลของระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย โดยมีตัวควบคุมแบบ PD เป็นวงรอบภายใน

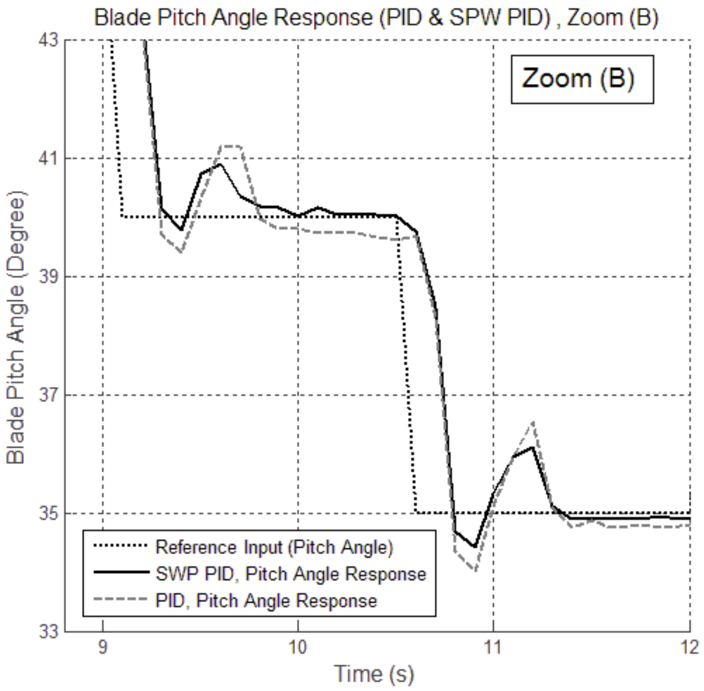
จากสมการที่ (33) ค่า K_1, K_2 และ K_3 ที่ใช้ คือ ค่า K_p, K_i และ K_d ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าเดิมที่ได้หาค่ามาแล้วตามหัวข้อที่ 1.2 และสำหรับค่า K_4 และ K_5 หาได้จากการทดลองโดยค่าที่เลือกใช้ คือ 0.34 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย β และ γ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ได้เท่ากับ 0.87 และ 0.78 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งลดค่าโอเวอร์ชูตได้ไม่มากนัก แม้ว่าจากการทดลองจะพบว่าการออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักแบบ PD สามารถกำจัดโอเวอร์ชูตได้มากจนเกือบหมดไป แต่ทำให้ผลตอบสนองเกิดการสั่นที่แอมพลิจูดต่ำๆ ไม่ราบเรียบนัก และทำให้มีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) มากขึ้น



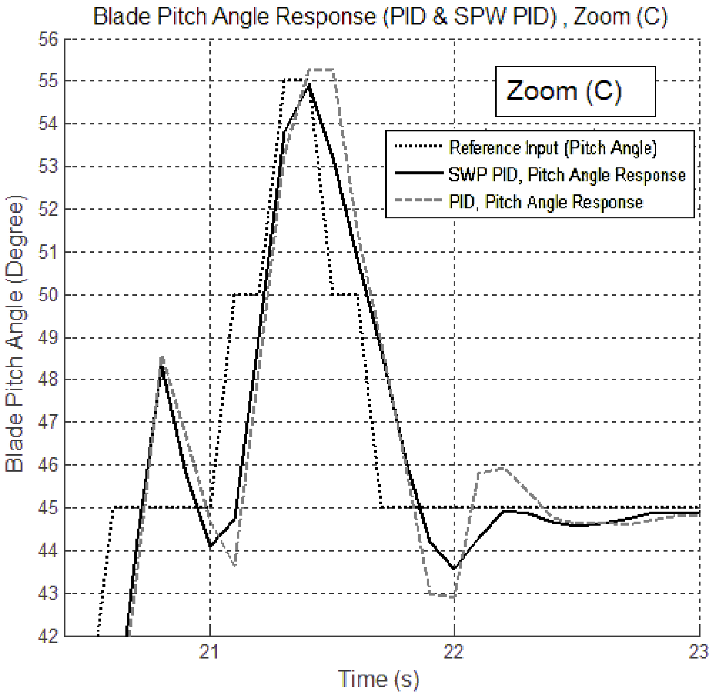
ภาพที่ 52 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งมีตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายแบบ PD เทียบกับระบบควบคุมมุมพิตช์แบบ PID



ภาพที่ 53 ส่วนขยาย A ของผลตอบสนองตามภาพที่ 52

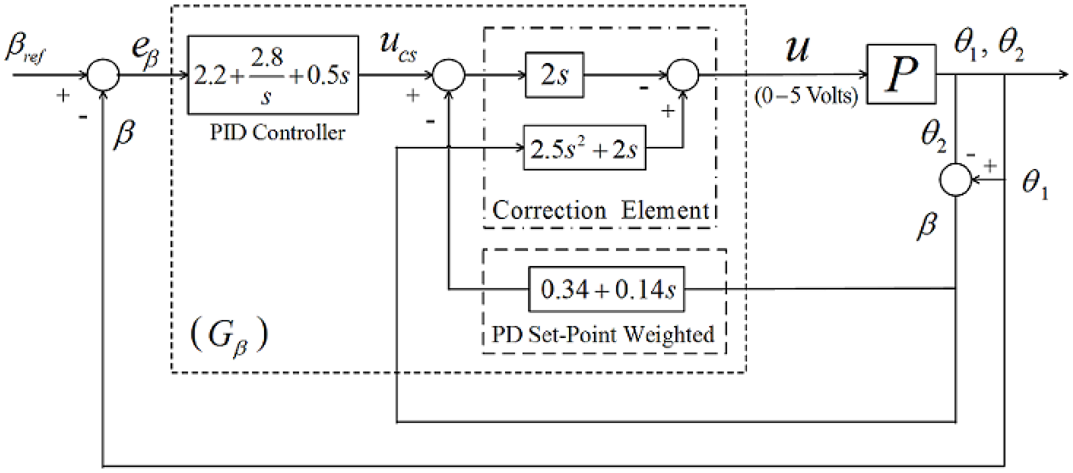


ภาพที่ 54 ส่วนขยาย B ของผลตอบสนองตามภาพที่ 52



ภาพที่ 55 ส่วนขยาย C ของผลตอบสนองตามภาพที่ 52

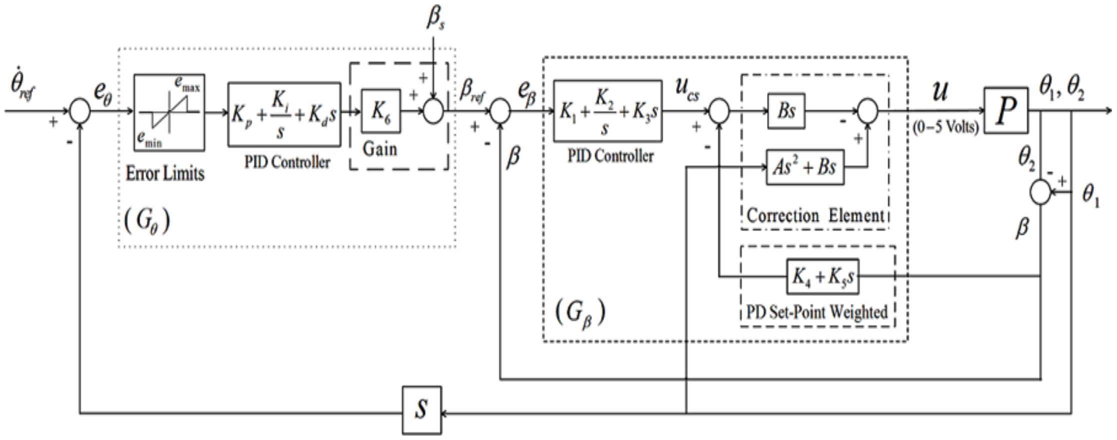
จากการออกแบบระบบควบคุมมุมพิตช์ ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนการปรับค่าสัญญาณควบคุม ดังหัวข้อที่ 1.1 ส่วนของตัวควบคุมแบบ PID ในหัวข้อ 1.2 และส่วนสุดท้ายคือการออกแบบตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายแบบ PD ในหัวข้อที่ 1.3 สามารถนำมาเขียนแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมุมพิตช์ได้ดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมุมพิตช์

2. การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยมีแผนภาพบล็อกของระบบควบคุม แสดงดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมความเร็วรอบ

โดยที่ $\dot{\theta}_{ref}$ คือ ค่าความเร็วรอบของโรเตอร์อ้างอิง

β_{ref} คือ ค่ามุมพิตช์อ้างอิงป้อนเข้ากระบวนการ

β_s คือ ค่ามุมคงที่ของความผิดพลาดเกินลิมิต

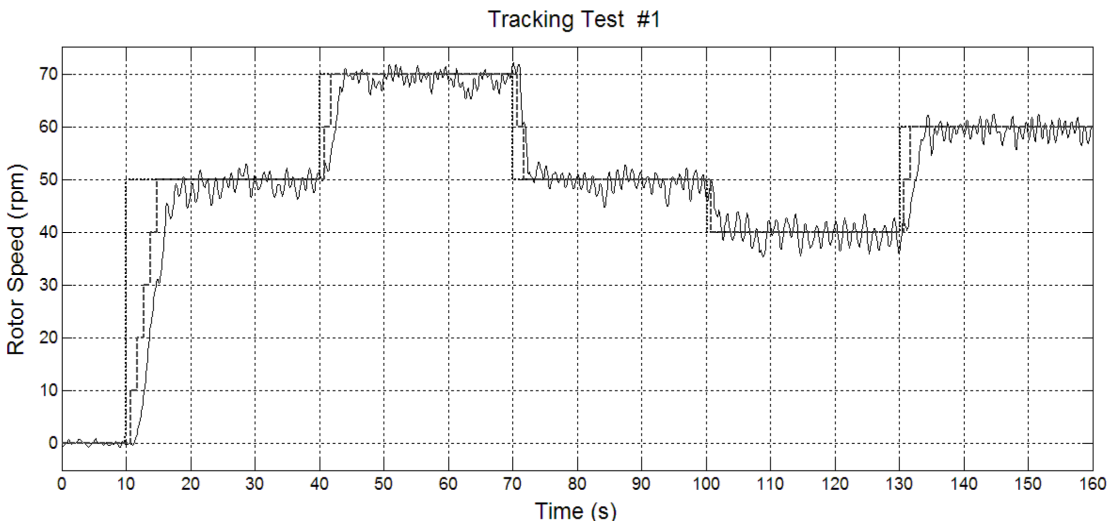
ระบบควบคุมมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรก คือ ส่วนการลิมิตค่าความผิดพลาด ส่วนที่สอง คือ ตัวควบคุมแบบ PID และส่วนสุดท้าย คือ การปรับและย่อขยายสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมแบบ PID ให้เป็นสัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ

การหาค่าอัตราส่วนขยายของตัวควบคุมแบบ PID ใช้วิธีการหาจากการทดลอง ซึ่งได้ค่าที่เลือกใช้ คือ $K_p = 3.2$, $K_i = 0.2$ และ $K_d = 2$ โดยเทอมควบคุมแบบ D นั้น ลดการขยายสัญญาณรบกวนจากการวัด โดยใช้ตัวกรองผ่านต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth Low-Pass Filter) อันดับ 2 โดยกำหนดความถี่ตัดออกอยู่ที่ 0.125 Hz และในส่วนของการลิมิตค่าความผิดพลาดกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ ± 28.65 รอบต่อนาที ค่าอัตราส่วนขยาย K_6 กำหนดค่าเท่ากับ 0.4 และค่ามุมคงที่ของความผิดพลาดเกินลิมิต β_s เท่ากับ 45 องศา

ผลและวิจารณ์

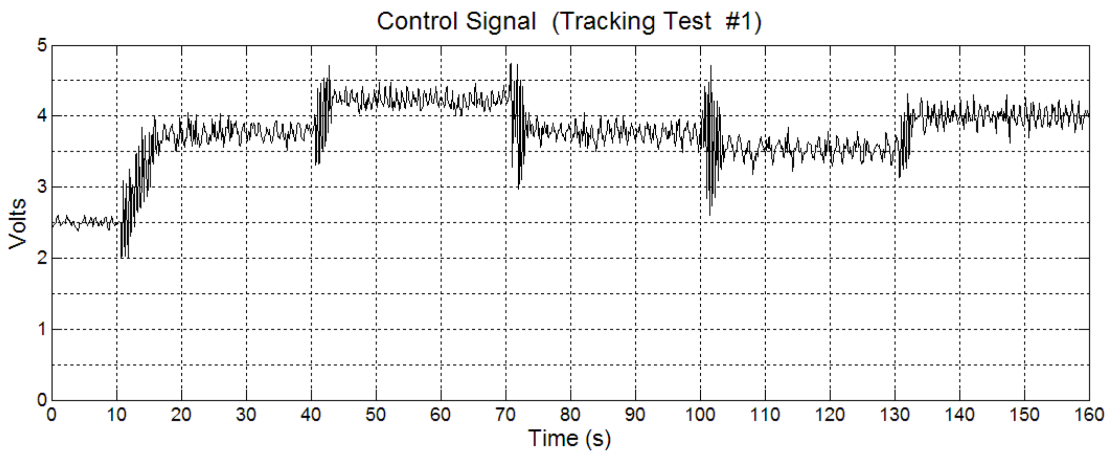
ผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก แบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ผลจากทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของลม และผลการทดลองการควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม ทั้งนี้ สำหรับผลการทดลองในสองส่วนแรกนั้นสามารถพิจารณาผลการทดลองเพิ่มเติมอีกได้ในส่วนของภาคผนวก

การทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการนั้น มีการกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ กำหนดให้ลมที่ใช้ในการทดลองมีความเร็วคงที่ กำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงคือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (เส้นจุด) ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได โดยการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนค่าอินพุตอ้างอิงนี้ไปมาเพื่อพิจารณาผลการติดตามความเร็วรอบของระบบควบคุม และผลตอบสนองของระบบคือ สัญญาณความเร็วรอบของโรเตอร์จริงจากการวัด (เส้นทึบ) ทั้งนี้ระบบควบคุมซึ่งถูกกำหนดให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมากที่สุดเท่ากับ 10 รอบต่อวินาที เมื่อสัญญาณอินพุตอ้างอิงที่กำหนดให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าจะทำให้ระบบควบคุมสร้างสัญญาณ (เส้นประ) ขึ้นใหม่เพื่อใช้เป็นอินพุตอ้างอิง ดังเสดงในภาพที่ 58



ภาพที่ 58 ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#1)

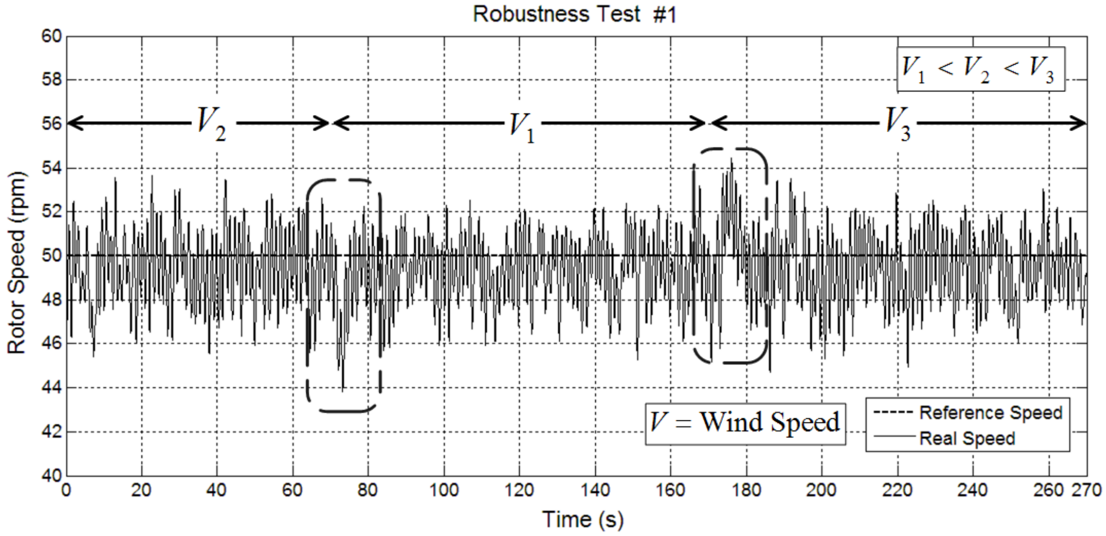
ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ แสดงดังภาพที่ 58 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าระบบควบคุมสามารถติดตามความเร็วรอบได้เป็นอย่างดี มีค่าเวลาคงตัวขึ้นมากขึ้นตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบที่ต้องการ ค่าสัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ พิจารณาภาพผนวกที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณควบคุมเริ่มมีบางส่วนเข้าสู่ค่าอิ่มตัวเมื่อความเร็วรอบที่ต้องการเท่ากับ 80 รอบต่อนาที



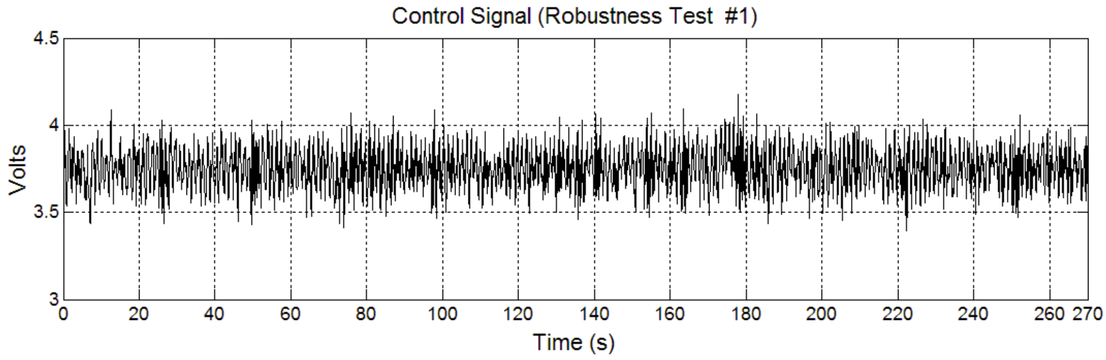
ภาพที่ 59 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง การติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#1)

การทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของลมมีการกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ กำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงคงที่ กำหนดความเร็วลมที่พัดผ่านกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลง โดยค่าความเร็วลมที่ใช้มีทั้งสิ้น 3 ค่า ซึ่งมีผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 60 และ 61

ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของลม แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ ที่สภาวะคงตัวของความเร็วลมค่าต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และในช่วงที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าอินพุตอ้างอิงในช่วงสั้นๆ ประมาณ 1-2 รอบต่อนาที และกลับมามีความเร็วรอบเฉลี่ยเท่าเดิมอีกครั้งภายในเวลาประมาณ 10 วินาที

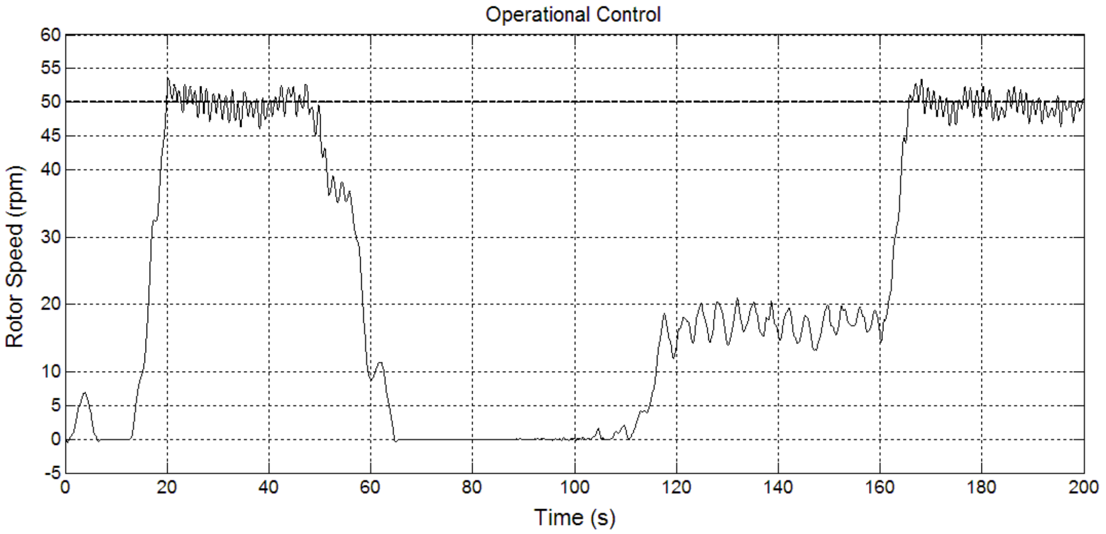


ภาพที่ 60 ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#1)



ภาพที่ 61 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง สภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#1)

การทดลองระบบควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม แสดงไว้ในภาพที่ 62 โดยมีการกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ กำหนดค่าอินพุตอ้างอิงคงที่ไว้ที่ค่าหนึ่งค่าใดตั้งแต่กังหันลมเริ่มต้นการทำงาน กำหนดความเร็วลมเปลี่ยนแปลงโดยจำลองแบบและลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เพื่อดูผลการดำเนินงานของกังหันลม



ภาพที่ 62 ผลการทดลองการควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม

ผลการทดลองระบบควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม ดังภาพที่ 62 สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ ที่เวลาเริ่มต้นกังหันลมปรับมุมพิตช์ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นทำงานคือที่มุมคงที่เท่ากับ 45 องศา จากภาพประมาณที่ 5 วินาทีแรก จะเห็นว่าการเปลี่ยนมุมดังกล่าวส่งผลทำให้โรเตอร์มีการหมุนหรือขยับไปเล็กน้อย แต่เนื่องจากยังไม่มีลมพัดผ่านเข้ามาจึงหยุดไปอีกครั้ง หลักจากนั้นเมื่อให้ความเร็วลมค่าหนึ่งซึ่งสูงพอ โรเตอร์จึงความเร็วรอบสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมุมพิตช์ยังคงที่ 45 องศา และเมื่อค่าความผิดพลาดของระบบลดต่ำลงมากกว่าค่าลิมิตความผิดพลาดค่าสูงสุดที่ ± 28.65 รอบต่อนาที ทำให้ระบบควบคุมเริ่มทำการติดตามค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิง หลังจากนั้นทำการสมมุติในกรณีความเร็วลมเป็นศูนย์ ที่เวลาประมาณวินาทีที่ 50 ดังภาพ ทำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์ลดต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งพบว่าระบบควบคุมพยายามปรับหามุมพิตช์ที่ทำให้สามารถติดตามค่าความเร็วรอบอ้างอิงได้ แต่เมื่อค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ลดต่ำลง ทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมากขึ้นจนเกินค่าลิมิตความผิดพลาด มุมพิตช์ของกังหันลมกลับมามีมุมเริ่มต้นที่ 45 อาศาอีกครั้งหนึ่ง หลังจากที่เวลาประมาณ 100 วินาที ให้ความเร็วลมต่ำๆ ซึ่งทำให้กังหันลมหมุนไปแต่มีค่าความผิดพลาดสูงกว่าค่าลิมิตความผิดพลาด มุมพิตช์ยังคงที่เท่ากับ 45 องศา พิจารณาต่อโดยให้ลมซึ่งมีความเร็วสูงขึ้นระบบกลับไปปรับเปลี่ยนมุมพิตช์เพื่อติดตามค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงอีกครั้ง ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการดำเนินงานของกังหันลมได้ดี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ มีระบบควบคุมเป็นแบบต่อเรียงโดยมีวงรอบภายใน คือ ระบบควบคุมมุมพิตช์ และวงรอบภายนอก คือ ระบบควบคุมความเร็วรอบ โดยตัวควบคุมที่เลือกใช้กับทั้งสองระบบ คือ แบบ PID

ระบบควบคุมมุมพิตช์ มีอัตราการปรับมุมพิตช์ที่สูงในช่างการเริ่มต้นทำงาน ทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งค่อนข้างมาก งานวิจัยนี้จึงใช้การลดการแกว่งด้วยเทคนิคอินพุตเชปปิง มาทำการออกแบบเพื่อลดการแกว่งดังกล่าว ผลของการจำลองการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองใช้จริงกับกังหันลมพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถใช้ลดการแกว่งที่เกิดขึ้นได้อย่างมาก

การทดสอบระบบควบคุมมุมพิตช์ในช่างการใช้งานที่ลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ พบว่า ผลตอบสนองเกิดโอเวอร์ชูตขึ้น งานวิจัยนี้จึงใช้การออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักเป้าหมายแบบ PD เพื่อลดการเกิดโอเวอร์ชูตดังกล่าว ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่าโอเวอร์ชูตที่เกิดขึ้นได้ แต่การทำให้โอเวอร์ชูตหมดไป ทำให้ได้รับผลตอบสนองที่ช้าลงและเกิดการสั่นขึ้นพอสมควร จึงทำให้เลือกใช้ค่าซึ่งลดการเกิดโอเวอร์ชูตลงบางส่วน

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งเป็นวงรอบภายนอกของการควบคุมแบบต่อเรียง ซึ่งถือว่าระบบควบคุมมุมพิตช์ที่ได้ออกแบบไว้แล้วก่อนหน้า คือ ส่วนหนึ่งของกระบวนการในการควบคุม ผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบนี้ประกอบไปด้วย ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบที่ต้องการ ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบให้คงที่ เนื่องจากลมซึ่งเปลี่ยนแปลงไป และผลการทดลองการควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่าระบบควบคุมสามารถติดตามค่าความเร็วรอบได้ดี มีสภาพทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่ดี และสามารถควบคุมการดำเนินงานของกังหันลมได้เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งใช้เทคนิคที่ซับซ้อนหรืออาศัยความแม่นยำในการหาสมการคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจะมีส่วนเพิ่มในการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมจำเป็นต้องอาศัยสัญญาณป้อนกลับเพิ่มเติม เช่น ตัวตรวจรู้ความเร็วลม

สัญญาณป้อนกลับมุมพิตช์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของมุมที่โรเตอร์หมุนไปกับมุมที่มอเตอร์หมุนไป ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสะสมเมื่อใช้ไปเป็นเวลานาน เป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดความผิดพลาดในการควบคุม ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรได้รับการชดเชยเพื่อลดหรือกำจัดให้หมดไปให้มากที่สุด

การเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมความเร็วรอบของโรเตอร์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนทางกลที่หมุนอยู่บนสเตเตอร์ จำเป็นต้องคำนึงถึงการร่วมศูนย์กลางระหว่างชิ้นส่วนทั้งสอง เนื่องจากเป็นไปได้ยากหรืออาจเป็นไปไม่ได้เลย ในการแก้ไขพฤติกรรมไม่ดีบางอย่าง ซึ่งส่งผลมายังผลตอบสนองของการควบคุม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Burton, T., D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi. 2001. **Wind Energy Handbook**. John Wiley and Sons, Ltd., United Kingdom.

Chen, C.C., H.P. Huang and H.J. Liew. 2008. Set-Point Weighted PID Controller Tuning for Time-Delayed Unstable Processes. **Ind. Eng. Chem. Res.** 47: 6983-6990.

Eggleston, D.M. and F.S. Stoddard. 1987. **Wind Turbine Engineering Design**. Van Nostrand Reinhold, New York.

Golding, E.W. 1976. **The Generation of Electricity by Wind Power**. E. & F.N. Spon Ltd., London.

Kurfess, T.R. 2005. **Robotics and Automation Handbook.** CRC Press, Inc., USA.

Masters, G.M. 2004. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.

Neal, B.A. and R.N. Clark. 2007. **Speed Control of a Small Turbine Using Electrical Loading**. UDSA-Agricultural Research Servise, Bushland, Texas.

Richardson, R.D. and G.M. Mcnerney. 1993. Wind Energy Systems, pp. 378-389. *In* **Proc. of the Institute of Electrical and Electronics Engineering Vol. 81 No. 3**. New York.

Song, Y.D. 2000. Control of Wind Turbine using memory-based method. **Jour. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. 85(2000): 263-275.

Thiemrat, S. 2007. **Study of Electric Utilization Form Small Wind Turbine**. M.S. Thesis, Naresuan University.

Tous, Y. 2008. Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine. **American J. of Engineering and Applied**. 1(2): 118-120

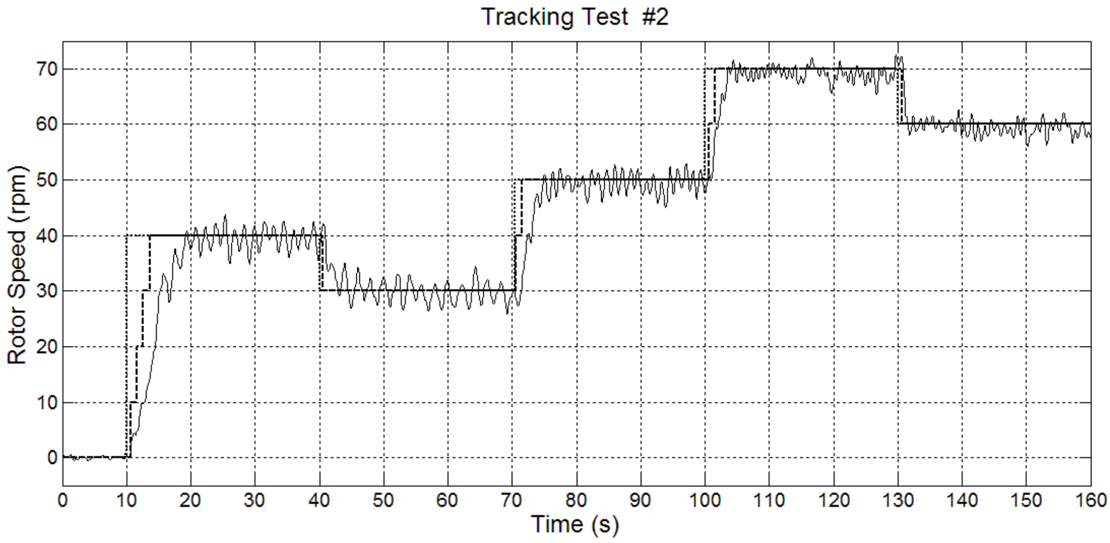
Turner, W.C. 2004. **Energy Management Handbook**. **5**th ed. Fairmont Press, Inc. Atlanta, Georgia.

Twidell, J. 1987. **A Guide to Small Wind Energy Conversion Systems**. Cambridge University Press, United Kingdom.

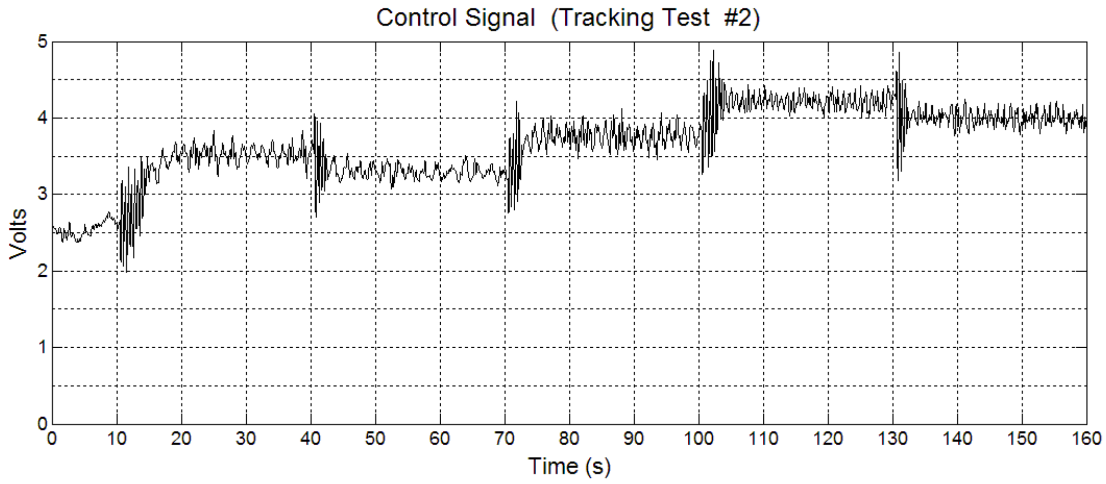
Visioli, A. 2006. **Practical PID Control**. Springer-Verlag London, Ltd., London.

ภาคผนวก

ผลจากทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#2)

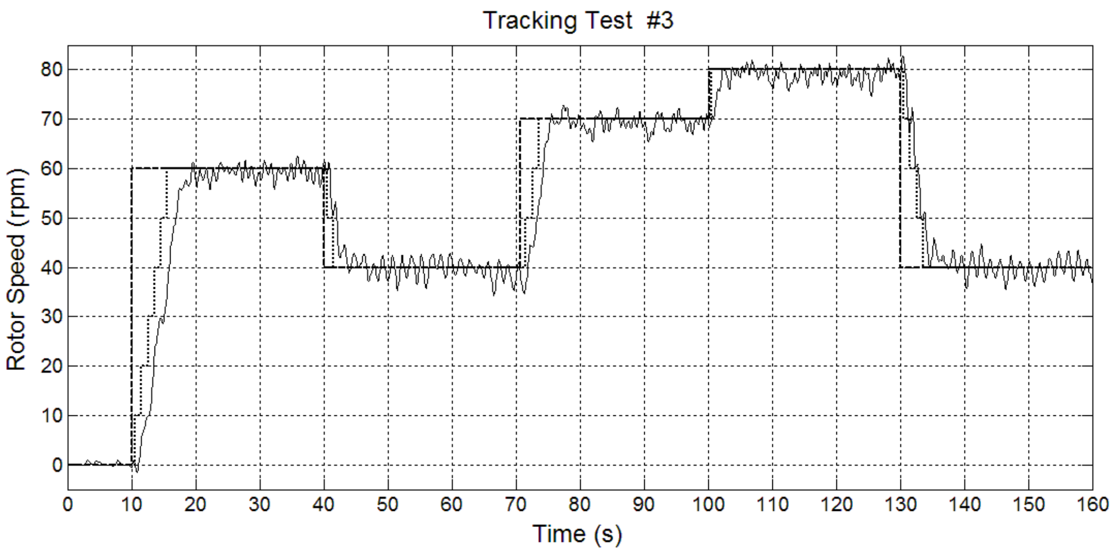


ภาพผนวกที่ 1 ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#2)

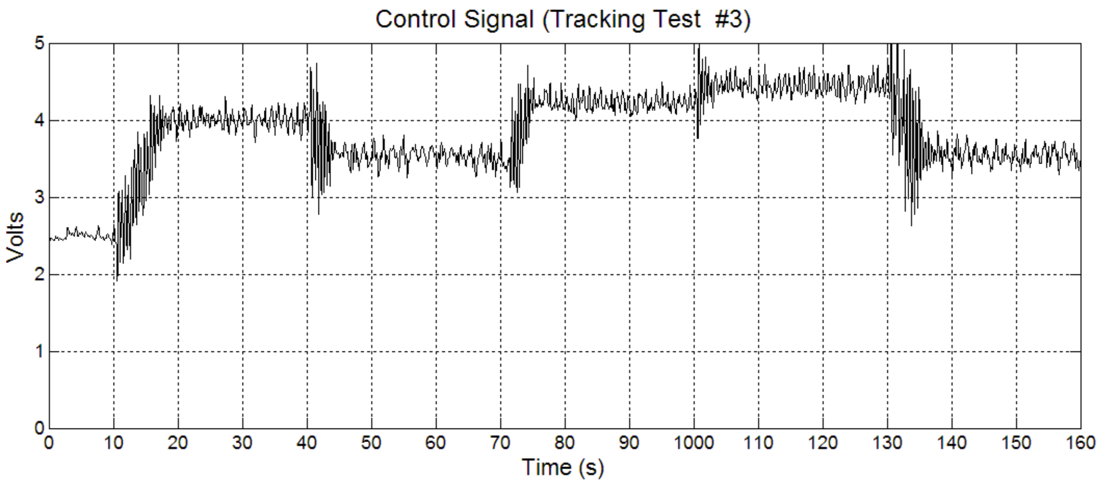


ภาพผนวกที่ 2 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง การติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#2)

ผลจากทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#3)

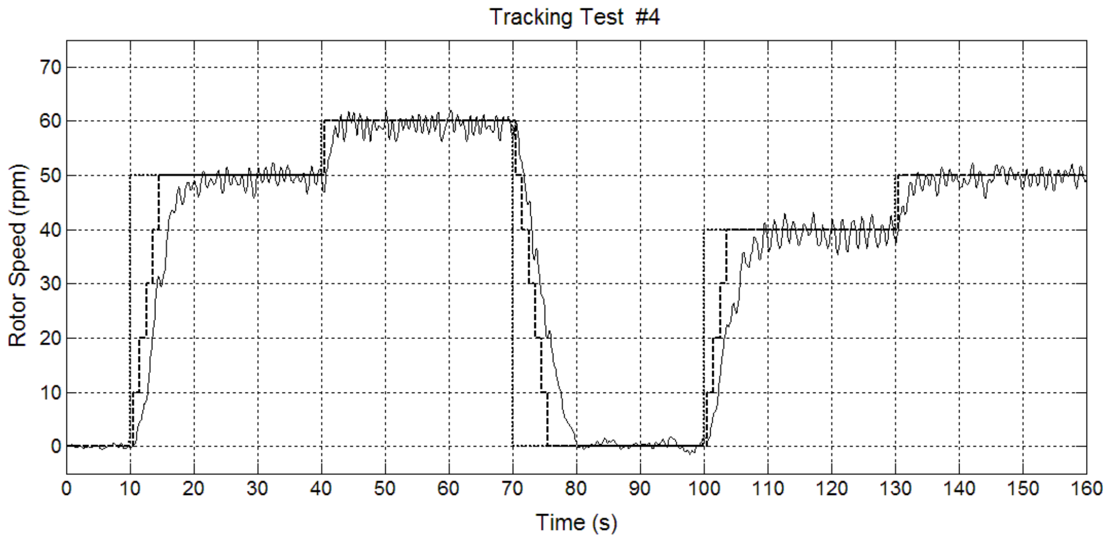


ภาพผนวกที่ 3 ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#3)

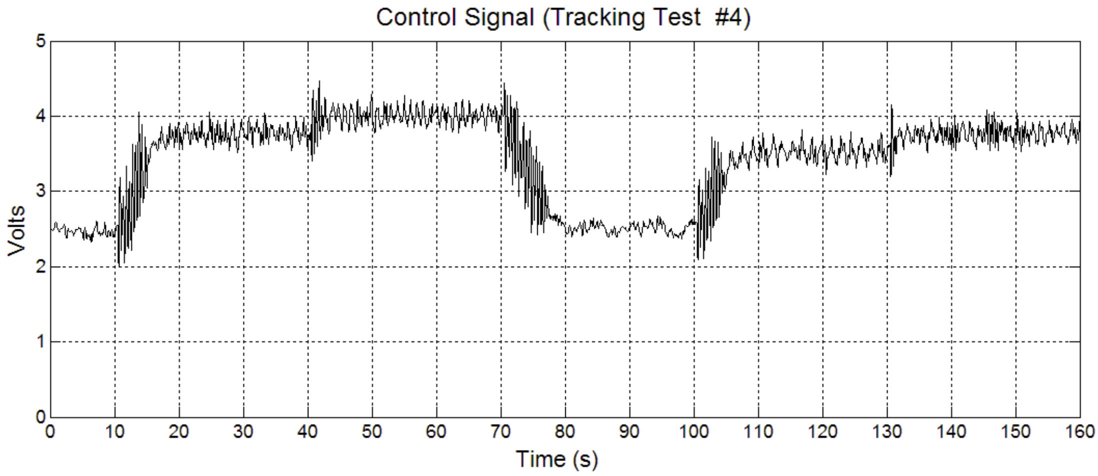


ภาพผนวกที่ 4 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง การติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#3)

ผลจากทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#4)

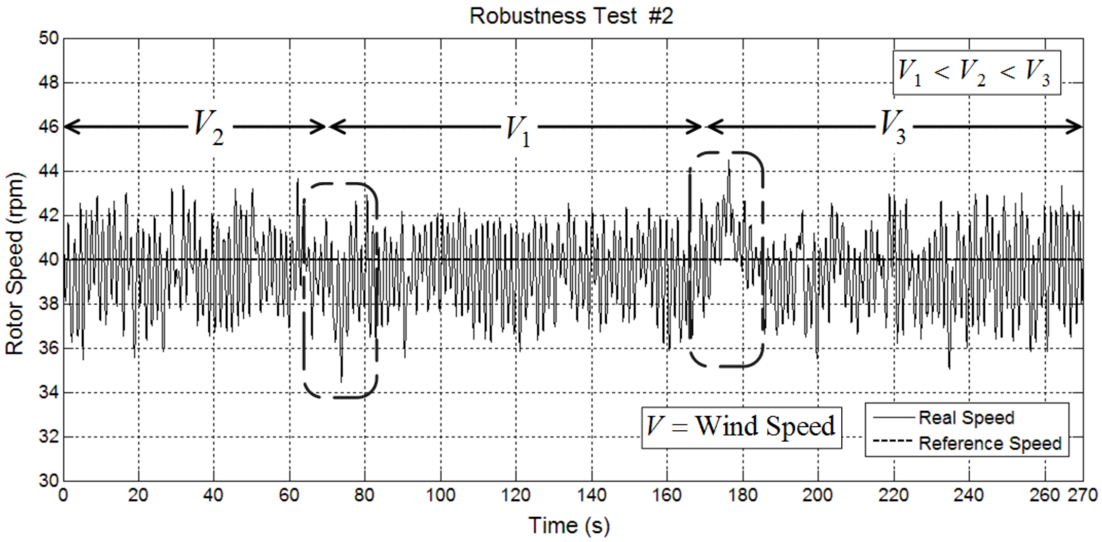


ภาพผนวกที่ 5 ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#4)

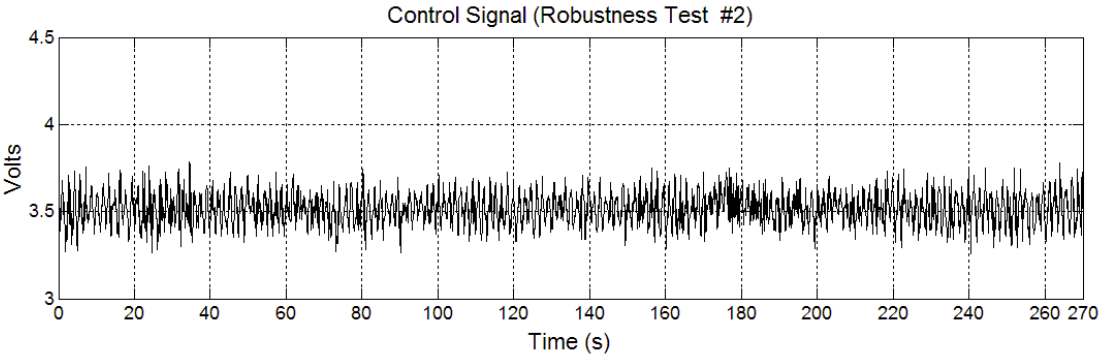


ภาพผนวกที่ 6 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง การติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ (#4)

ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของลม (#2)

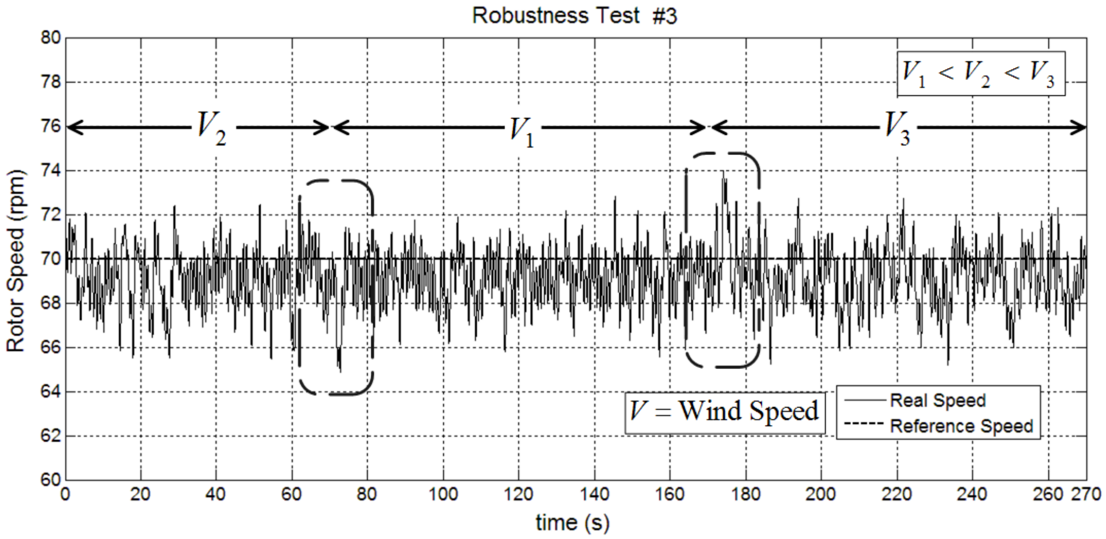


ภาพผนวกที่ 7 ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#2)

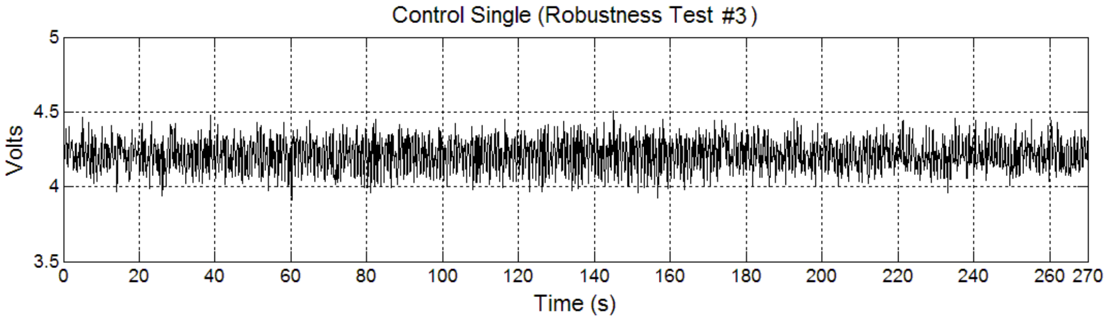


ภาพผนวกที่ 8 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง สภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#2)

ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของลม (#3)



ภาพผนวกที่ 9 ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#3)



ภาพผนวกที่ 10 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง สภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ (#3)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายธนพล ศรีวงษา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 24 ตุลาคม 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	พ.ศ. 2549
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-