

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก

โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PID

ธนพล ศรีวงษา^{* 1)} และ วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย²⁾

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วง 25 ปีที่ผ่านมา เกือบทั้งหมดของกังหันลมที่ถูกออกแบบหรือติดตั้งใหม่ในปัจจุบันมีระบบควบคุมความเร็วเป็นส่วนประกอบสำคัญ โดยมีเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การควบคุมความเร็วรอบโดยการปรับมุมพิชท์ของใบพัด ระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมที่มีประสิทธิภาพมีความสำคัญคือ ทำให้ในช่วงลมน้อย กังหันลมมีความเร็วรอบตามความเร็วค่าหนึ่งๆ เพื่อให้การสร้างกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดในค่าความเร็วลมนั้นๆ และในช่วงลมมาก กังหันลมจะคงความเร็วไว้ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ไม่กระชาก ทำให้คุณภาพของกระแสไฟฟ้าจากกังหันลมดีขึ้น โดยระบบควบคุมนี้ส่วนมากมีใช้เฉพาะกับกังหันลมขนาดใหญ่เท่านั้น งานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก โดยได้ออกแบบและสร้างกังหันลมขนาดเล็กจำลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 1.14 เมตร ซึ่งมีโครงสร้างและองค์ประกอบเหมือนกังหันลมทั่วไป แต่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กลไกการปรับมุมพิชท์ถูกออกแบบและติดตั้งโดยไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับโรเตอร์ของกังหันลม ทำให้ยังคงสามารถใช้ได้กับช่วงความเร็วลมค่าเดิม แต่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบซึ่งสร้างจากตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อนและเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมคือแบบ PID การออกแบบระบบควบคุมเป็นแบบต่อเรียงโดยมีวงรอบภายในคือ ระบบควบคุมมุมพิชท์ และวงรอบภายนอกคือ ระบบควบคุมความเร็วรอบ โดยสามารถควบคุมการติดตามความเร็วรอบที่ต้องการได้ดี และมีสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบให้คงที่เนื่องจากลมซึ่งเปลี่ยนแปลงได้ดีเช่นกัน

คำสำคัญ: กังหันลม การปรับมุมพิชท์ ระบบควบคุมความเร็วรอบ อินพุตเซปิง ค่าถ่วงน้ำหนักแบบ PD

^{* 1)} ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพฯ

อีเมล: tanapon_srivongsa@hotmail.com

²⁾ อาจารย์ ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสันสะเทือน (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพฯ อีเมล: fengwtc@ku.ac.th

*Corresponding Author

Rotor-Speed Control-System Design for Small Wind Turbine by using the PID Controller Techniques.

Tanapon Srivongsa ^{*1)} and Withit Chatlatanagulchai ²⁾

Abstract

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.

Keywords: Wind Turbine, Pitch Control, Speed Control System, Input Shaping, Set-Point Weighted

^{*1)} Master's Degree, Department of Mechanical Engineering, Kasetsart University, Bangkok
10900, E-mail: tanapon_srivongsa@hotmail.com

²⁾ Lecturer, Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab), Department of Mechanical Engineering
Kasetsart University, Bangkok, 10900, E-mail: fengwtc@ku.ac.th

*Corresponding Author

บทนำ

การควบคุมความเร็วรอบของกังหัน ทำได้โดยการปรับมุมของใบกังหัน ซึ่งมีจุดประสงค์สองประการ ประการแรก เพื่อให้กังหันลมมีประสิทธิภาพในการปั่นไฟสูงสุดในช่วงลมน้อย เนื่องจากที่ความเร็วลมค่าหนึ่ง จะมีค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมของกังหันค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้กังหันมีประสิทธิภาพในการปั่นไฟสูงสุด ประการที่สอง เพื่อให้กำลังไฟที่ผลิตได้มีค่าคงที่ในช่วงลมมาก ด้วยการรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่และป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับกังหันในช่วงเวลาที่ลมมากเกินไปหรือเกิดลมมรสุม

ระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมยังมีใช้เฉพาะกับกังหันลมขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมเพื่อควบคุมกลไกการปรับมุมพิชท์ของกังหันลมขนาดเล็ก ให้สามารถรักษาความเร็วรอบของกังหันลมและสามารถติดตามค่าความเร็วรอบที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พื้นฐานของระบบควบคุม

Visioli (2006) กล่าวว่าในปัจจุบันการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติมีการพัฒนาเทคนิคและวิธีใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมอย่างต่อเนื่อง การควบคุมแบบ PID Control เป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมที่ยังคงเห็นได้ชัดเจนว่าเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางมากที่สุดในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาต่ำเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับ และแม้ว่าการออกแบบจะง่ายไม่ซับซ้อนแต่ให้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมในหลากหลายงานควบคุม

สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งต่อแบบขนานแสดงดังสมการที่ 1

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

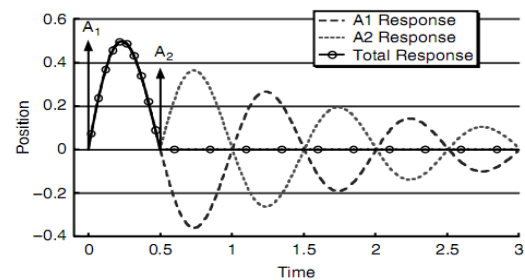
การถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย (Set-Point Weighted)

Chen *et al* (2008) เสนอเทคนิคการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายของระบบควบคุมแบบ PID สำหรับกระบวนการที่ไม่เสถียรหน่วงเวลา (Time-Delayed Unstable Processes) โดยเทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลของกระบวนการ การจำลองผลการ

ควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ค่าตัวถ่วงน้ำหนักที่ปรับโดยเทคนิคนี้ มีประสิทธิภาพในการลดค่าโอเวอร์ชูต (Overshoot) และลดค่าการรบกวนที่สมรรถนะแบบอินทิกรัลค่าความผิดพลาดกำลังสอง (ISE) กับแบบอินทิกรัลค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) โดยเทียบผลกับการควบคุมแบบ PID ซึ่งไม่มีการถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย

การควบคุมการสั่นด้วยเทคนิคอินพุตเชปปีง (Vibration Control With Input Shaping)

เทคนิคการปรับปรุงอินพุตหรืออินพุตเชปปีงเป็นเทคนิคการหน่วงเวลาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการปรับเปลี่ยนสัญญาณอินพุตเพื่อทำให้ระบบมีการการสั่นลดน้อยที่สุด



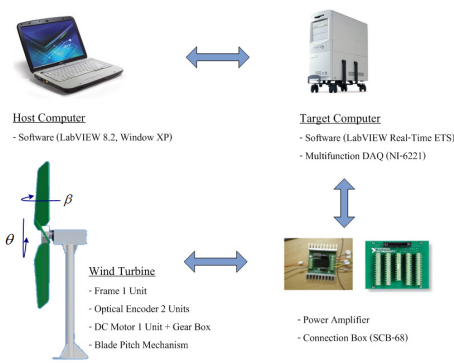
รูปที่ 1 การหักล้างการสั่นโดยใช้ลำดับของอิมพัลส์

พิจารณารูปที่ 1 ซึ่งสามารถใช้อธิบายหลักการหักล้างการสั่นจากสัญญาณอินพุตแบบอิมพัลส์ได้คือ เมื่อให้อิมพัลส์ขนาด A_1 เป็นสัญญาณอินพุตเข้าระบบ ทำให้ผลตอบสนองเกิดการสั่น (เส้นประ) และให้อิมพัลส์ลำดับ 2 ขนาด A_2 ซึ่งมีผลตอบสนองเกิดการสั่น (จุด) หักล้างการสั่นซึ่งกันและกัน ทำให้ผลตอบสนองมีการสั่นตกค้างเท่ากับศูนย์

อุปกรณ์การทดลอง

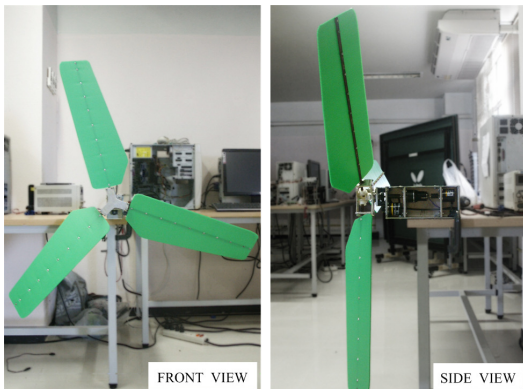
อุปกรณ์หลักของการทดลองประกอบไปด้วย ชุดกังหันลมจำลอง วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง Host computer และ Target computer ดังแสดงในรูปที่ 2

กังหันลมจำลองที่สร้างขึ้นคือชนิดแกนระดับแบบ 3 ใบพัด สามารถปรับมุมพิชท์ได้ เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดขนาด 1.14 เมตร ไม่ได้ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

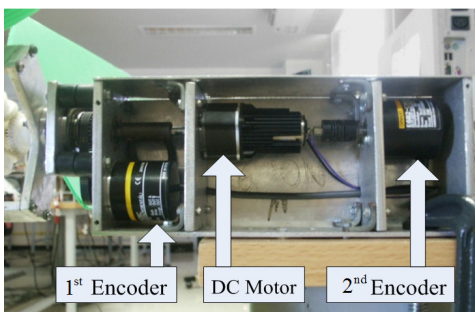


รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลองและการเชื่อมต่อ

ห้องเครื่องแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกติดตั้งตัวตรวจวัดตำแหน่ง (1st Encoder) ความละเอียด 2000 P/R สำหรับวัดสัญญาณป้อนกลับของมุมที่โรเตอร์หมุนไป ส่วนที่สองติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ส่วนที่สามติดตั้งตัวตรวจวัดตำแหน่ง (2nd Encoder) ความละเอียด 360 P/R สำหรับวัดสัญญาณป้อนกลับของมุมที่มอเตอร์หมุนไป



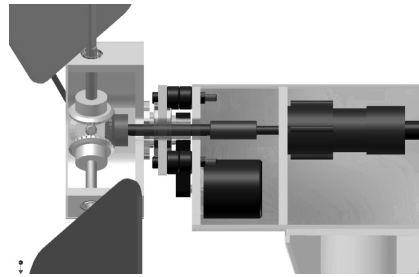
รูปที่ 3 กังหันลมจำลอง



รูปที่ 4 ห้องเครื่องของกังหันลมจำลอง

เพลาลงของโรเตอร์ออกแบบให้มีรูกลวง ภายในมีเพลาลงของมอเตอร์ทำหน้าที่หลักในการควบคุมความเร็ว

รอบของกังหันลม โดยการหมุนปรับเปลี่ยนมุมพิชท์ตามคำสั่งของระบบควบคุมดังนี้คือ หนึ่งควบคุมให้มุมพิชท์คงที่ โดยการควบคุมมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วเช่นเดียวกันกับที่โรเตอร์หมุน ทำให้เฟืองดอกจอกที่ปลายของใบพัดทั้งสาม และปลายเพลาลงของมอเตอร์หมุนไปพร้อมกัน และสองควบคุมให้กังหันลมเปลี่ยนมุมของใบพัด คือควบคุมให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่มากกว่า (เพิ่มมุมพิชท์) หรือน้อยกว่า (ลดมุมพิชท์) ความเร็วของโรเตอร์ ทำให้เฟืองที่ปลายของมอเตอร์หมุนขับให้เฟืองที่ปลายของใบพัดหมุนไปเป็นมุมที่ต้องการเท่ากันทั้งสามใบ



รูปที่ 5 การส่งแรงบิดจากมอเตอร์ไปยังเฟืองดอกจอกเพื่อปรับมุมพิชท์

วิธีการออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุม ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ การออกแบบระบบควบคุมมุมพิชท์ และการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ โดยต่อรวมทั้งสองระบบเข้าด้วยกันให้เป็นการควบคุมแบบต่อเรียง (Cascade Control)

1. การออกแบบระบบควบคุมมุมพิชท์

ระบบควบคุมมุมพิชท์ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบ PID และส่วนของการปรับค่าสัญญาณควบคุม u_{cs} จากตัวควบคุมแบบ PID ให้เป็นสัญญาณควบคุมเข้ากระบวนการ (u) ขนาด 0-5 โวลต์

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของส่วนการปรับค่าสัญญาณควบคุมแสดงดังสมการที่ 2 โดยพิจารณาผังวัตถุอิสระของกังหันลมจำลองและวงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรง โดยที่ T_R คือ แรงบิดที่โรเตอร์

T_m คือ แรงบิดจากมอเตอร์

และ $I_{x,R}$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์

อย่างมากภายในช่วงเวลาอันสั้น การควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมให้คงที่ในกรณีเช่นนี้นั้นทำได้ยากและมักต้องการอัตราการปรับมุมพิชท์ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกังหันลมขนาดเล็กนั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมค่อนข้างมาก เนื่องจากมีโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าโอเวอร์ชูตมาก

การออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักแบบ PD เป็นเทคนิคการปรับสัญญาณความผิดพลาดที่จะส่งให้กับเทอมควบคุมแบบ P และแบบ D ของระบบควบคุม เพื่อลดการเกิดโอเวอร์ชูตของผลตอบสนอง

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายดังแสดงในสมการที่ 4

$$U(s) = G_{sp}Y(s) - G_c(s)Y(s) \quad (4)$$

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

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

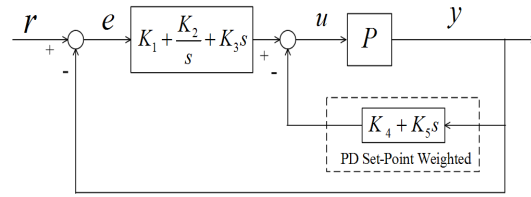
เมื่อ β และ γ คือพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายในเทอมควบคุมแบบ P และ D ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 $G_{sp}(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายแบบ PD และ $G(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ PID

จากสมการที่ 4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบใหม่ (Chen et al, 2008) ซึ่งเทียบเท่ากับระบบควบคุมป้อนกลับค่าความผิดพลาดแบบ PID โดยมีระบบควบคุมแบบ PI เป็นวงรอบภายในได้ดังสมการที่ 5 และมีแผนภาพบล็อกแสดงดังรูปที่ 10

$$u(t) \equiv \left\{ K_1 e(t) + K_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + K_3 \frac{de(t)}{dt} \right\} - \left\{ K_4 y(t) + K_5 \frac{dy(t)}{dt} \right\} \quad (5)$$

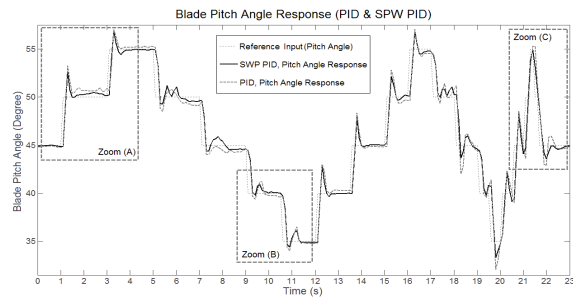
โดยที่ $K_1 = K\beta$, $K_2 = K/T_i$, $K_3 = K\gamma T_d$

$$K_4 = K(1-\beta) \text{ และ } K_5 = K(1-\gamma)T_d$$

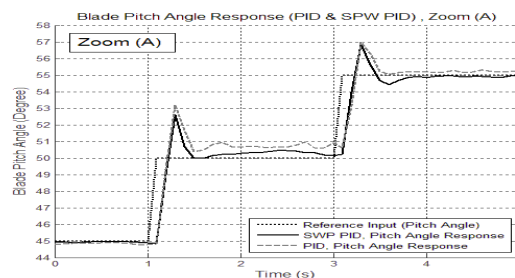


รูปที่ 10 แผนภาพบล็อกสมมูลของระบบควบคุมแบบ PID ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายแบบ PD

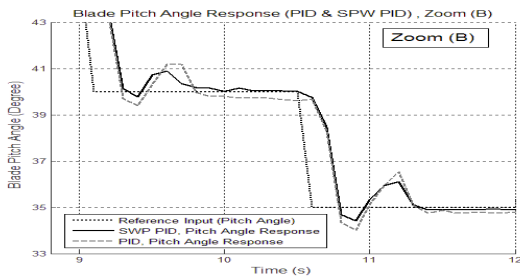
จากสมการที่ 5 ค่า K_1 , K_2 และ K_3 ที่ใช้คือค่าอัตราส่วนขยายของตัวควบคุมแบบ PID หรือคือค่า K_p , K_i และ K_d ตามลำดับ และสำหรับค่า K_4 และ K_5 หาได้จากการทดลองโดยค่าที่เลือกใช้คือ 0.34 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมาย β และ γ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ได้เท่ากับ 0.87 และ 0.78 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งลดค่าโอเวอร์ชูตได้ไม่มากนัก แม้ว่าจากการทดลองจะพบว่า การออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักแบบ PD สามารถกำจัดโอเวอร์ชูตได้มากจนเกือบหมดไป แต่ทำให้ผลตอบสนองเกิดการสั่นที่แอมพลิจูดต่ำๆ ไม่ราบเรียบนัก และทำให้มีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) มากขึ้น



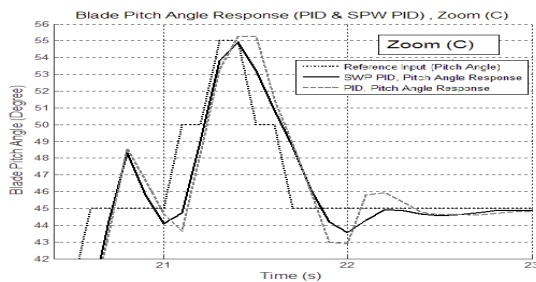
รูปที่ 11 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งมีตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายแบบ PD เทียบกับระบบควบคุมมุมพิชท์แบบ PID



รูปที่ 12 ส่วนขยาย A ของผลตอบสนองตามรูปที่ 11

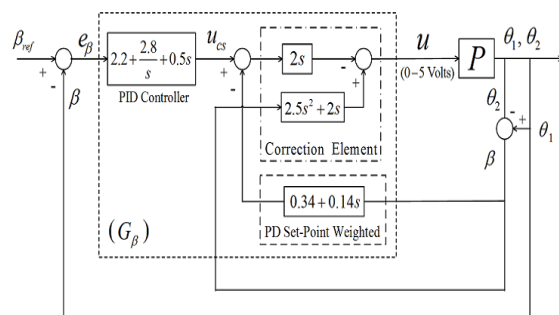


รูปที่ 13 ส่วนขยาย B ของผลตอบสนองตามรูปที่ 11



รูปที่ 14 ส่วนขยาย C ของผลตอบสนองตามรูปที่ 11

จากการออกแบบระบบควบคุมมุมพิชท์ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนการปรับค่าสัญญาณควบคุม ส่วนของตัวควบคุมแบบ PID โดยหาค่าอัตราส่วนขยายจากการทดลอง และส่วนสุดท้ายคือการออกแบบตัวถ่วงน้ำหนักค่าเป้าหมายแบบ PD สามารถนำมาเขียนแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมุมพิชท์ได้ดังรูปที่ 15



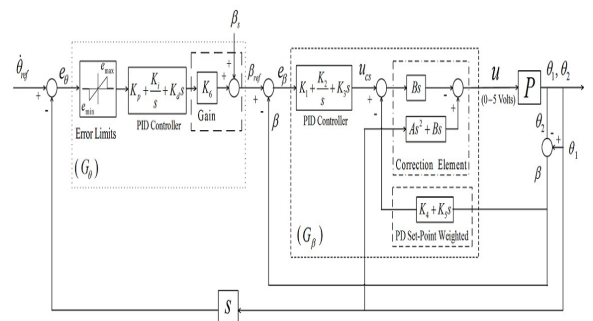
รูปที่ 15 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมุมพิชท์

2. การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ

ระบบควบคุมมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนการจำกัดค่าความผิดพลาด ส่วนที่สองคือ ตัวควบคุมแบบ PID และส่วนสุดท้ายคือการปรับและขยายสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมแบบ PID ให้เป็นสัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ

ระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม

แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 16 โดยที่ θ_{ref} คือค่าความเร็วรอบของโรเตอร์อ้างอิง β_{ref} คือค่ามุมพิชท์อ้างอิงป้อนเข้ากระบวนการ β_s คือค่ามุมคงที่ของความผิดพลาดเกินลิมิต β คือสัญญาณมุมพิชท์จากกระบวนการ θ_1 คือ สัญญาณป้อนกลับมุมของโรเตอร์ θ_2 คือ สัญญาณป้อนกลับมุมของมอเตอร์ G_β คือ ระบบควบคุมมุมพิชท์ และ G_θ คือ ระบบควบคุมความเร็วรอบ



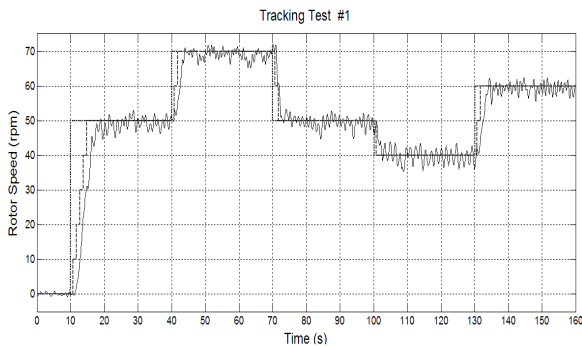
รูปที่ 16 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมความเร็วรอบ

ผลการทดลอง

ผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก แบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ ผลจากการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของลม และผลการทดลองการควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม

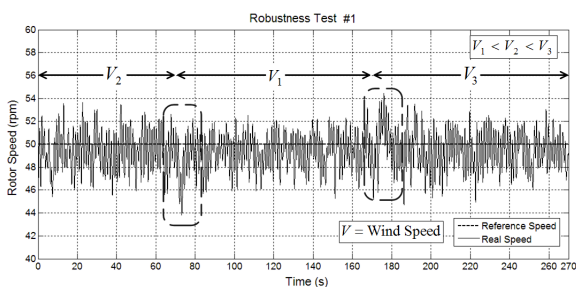
การทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการนั้นมีการกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ กำหนดให้ลมที่ใช้ในการทดลองมีความเร็วคงที่ กำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงคือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได โดยการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนค่าอินพุตอ้างอิงนี้ไปมาเพื่อพิจารณาผลการติดตามความเร็วรอบของระบบควบคุม และผลตอบสนองของระบบคือ สัญญาณความเร็วรอบของโรเตอร์จริงจากการวัด ทั้งนี้ระบบควบคุมซึ่งถูกกำหนดให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมากที่สุดเท่ากับ 10 รอบต่อ

วินาที เมื่อสัญญาณอินพุตอ้างอิงที่กำหนดให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าจะทำให้ระบบควบคุมสร้างสัญญาณ (เส้นประ) ขึ้นใหม่เพื่อใช้เป็นอินพุตอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าระบบควบคุมสามารถติดตามความเร็วรอบได้เป็นอย่างดี

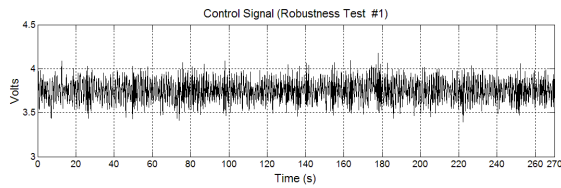


รูปที่ 17 ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต้องการ

การทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของลมมีการกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ กำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงคงที่ กำหนดความเร็วลมที่พัดผ่านกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลง โดยค่าความเร็วลมที่ใช้มีทั้งสิ้น 3 ค่า ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 18 และ 19 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์ ที่สภาวะคงตัวของความเร็วลมค่าต่างๆได้เป็นอย่างดี และในช่วงที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าอินพุตอ้างอิงในช่วงสั้นๆประมาณ 1-2 รอบต่อนาที และกลับมามีความเร็วรอบเฉลี่ยเท่าเดิมอีกครั้งภายในเวลาประมาณ 10 วินาที



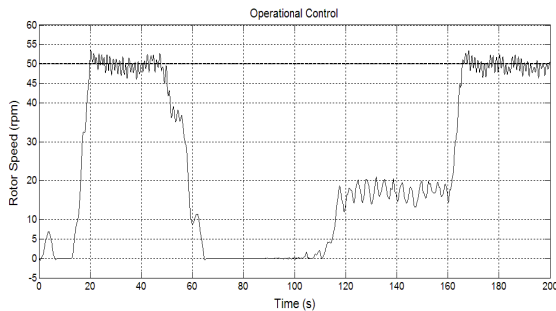
รูปที่ 18 ผลการทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์



รูปที่ 19 สัญญาณควบคุมเข้าสู่กระบวนการ ในการทดลอง สภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบของโรเตอร์

การทดลองระบบควบคุมการดำเนินงานของกังหันลมแสดงไว้ในรูปที่ 20 โดยมีการกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ กำหนดค่าอินพุตอ้างอิงคงที่ไว้ที่ค่าหนึ่งค่าใดตั้งแต่กังหันลมเริ่มต้นการทำงาน กำหนดความเร็วลมเปลี่ยนแปลงโดยจำลองแบบและลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เพื่อดูผลการดำเนินงานของกังหันลม ผลการทดลองระบบควบคุมการดำเนินงานของกังหันลมดังรูปที่ 20 สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ที่เวลาเริ่มต้นกังหันลมปรับมุมพิชท์ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นทำงานคือที่มุมคงที่เท่ากับ 45 องศาจากภาพประมาณที่ 5 วินาทีแรกจะเห็นว่าการเปลี่ยนมุมดังกล่าวส่งผลทำให้โรเตอร์มีการหมุนหรือขยับไปเล็กน้อยแต่เนื่องจากยังไม่มีลมพัดผ่านเข้ามาจึงหยุดไปอีกครึ่งหลักจากนั้นเมื่อให้ความเร็วลมค่าหนึ่งซึ่งสูงพอ โรเตอร์จึงความเร็วรอบสูงขึ้นเรื่อยๆโดยมุมพิชท์ยังคงที่ 45 องศาและเมื่อค่าความผิดพลาดของระบบลดต่ำลงมากกว่าค่าลิมิตความผิดพลาดค่าสูงสุดที่ ± 28.65 รอบต่อนาที ทำให้ระบบควบคุมเริ่มทำการติดตามค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิง หลังจากนั้นทำการสมมุติในกรณีความเร็วลมเป็นศูนย์ ที่เวลาประมาณวินาทีที่ 50 ดังรูป ทำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์ลดต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งพบว่าระบบควบคุมพยายามปรับมุมพิชท์ที่ทำให้สามารถติดตามค่าความเร็วรอบอ้างอิงได้ แต่เมื่อค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ลดต่ำลง ทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมากขึ้นจนเกินค่าลิมิตความผิดพลาด มุมพิชท์ของกังหันลมกลับมามีมุมเริ่มต้นที่ 45 องศาอีกครั้งหนึ่ง หลังจากทีเวลาประมาณ 100 วินาที ให้ความเร็วลมต่ำๆซึ่งทำให้กังหันลมหมุนไปแต่มีค่าความผิดพลาดสูงกว่าค่าลิมิตความผิดพลาดมุมพิชท์ยังคงที่เท่ากับ 45 องศา พิจารณาต่อโดยให้ลมซึ่ง

มีความเร็วสูงขึ้นระบบกลับไปปรับเปลี่ยนมุมพิทช์เพื่อติดตามค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงอีกครั้ง ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการดำเนินงานของกังหันลมได้ดี



รูปที่ 20 ผลการทดลองการควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม

สรุปผลการทดลอง

ระบบควบคุมมุมพิทช์ มีอัตราการปรับมุมพิทช์ที่สูงในช่วงการเริ่มต้นทำงาน ทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งค่อนข้างมาก งานวิจัยนี้จึงใช้การลดการแกว่งด้วยเทคนิคอินพุตเซปิง มาทำการออกแบบเพื่อลดการแกว่งดังกล่าว ผลของการจำลองการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ และการทดลองใช้จริงกับกังหันลมพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถใช้ลดการแกว่งที่เกิดขึ้นได้อย่างมาก

การทดสอบระบบควบคุมมุมพิทช์ในช่วงการใช้งานที่ลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ พบว่าผลตอบสนองเกิดโอเวอร์ชูตขึ้น งานวิจัยนี้จึงใช้การออกแบบค่าถ่วงน้ำหนักเป้าหมายแบบ PD เพื่อลดการเกิดโอเวอร์ชูตดังกล่าว ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่าโอเวอร์ชูตที่เกิดขึ้นได้ แต่การทำให้โอเวอร์ชูตหมดไปทำให้ได้รับผลตอบสนองที่ช้าลงและเกิดการสั่นขึ้นพอสมควร จึงทำให้เลือกใช้ค่าซึ่งลดการเกิดโอเวอร์ชูตลงบางส่วน

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งเป็นวงรอบภายนอกของการควบคุมแบบต่อเรียงซึ่งถือว่าระบบควบคุมมุมพิทช์ที่ได้ออกแบบไว้แล้วก่อนหน้านี้คือส่วนหนึ่งของกระบวนการในการควบคุม ผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบนี้ประกอบไปด้วย ผลการทดลองการติดตามค่าความเร็วรอบที่ต้องการ ผลการ

ทดลองสภาพทนทานในการรักษาความเร็วรอบให้คงที่เนื่องจากลมซึ่งเปลี่ยนแปลงไป และผลการทดลองการควบคุมการดำเนินงานของกังหันลม ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่าระบบควบคุมสามารถติดตามค่าความเร็วรอบได้ดี มีสภาพทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่ดี และสามารถควบคุมการดำเนินงานของกังหันลมได้เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบซึ่งใช้เทคนิคที่ซับซ้อนหรืออาศัยความแม่นยำในการหาสมการคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจะมีส่วนเพิ่มในการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมจำเป็นต้องอาศัยสัญญาณป้อนกลับเพิ่มเติม เช่น ตัวตรวจรู้ความเร็วลม

สัญญาณป้อนกลับมุมพิทช์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของมุมที่โรเตอร์หมุนไปกับมุมที่มอเตอร์หมุนไป ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสะสมเมื่อใช้ไปเป็นเวลานาน เป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดความผิดพลาดในการควบคุม ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรได้รับการชดเชยเพื่อลดหรือกำจัดให้หมดไปให้มากที่สุด

การเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมความเร็วรอบของโรเตอร์ซึ่งเป็นชิ้นส่วนทางกลที่หมุนอยู่บนสเตเตอร์ จำเป็นต้องคำนึงถึงการร่วมศูนย์กลางระหว่างชิ้นส่วนทั้งสอง เนื่องจากเป็นไปได้ยากหรืออาจเป็นไปได้เลย ในการแก้ไขพฤติกรรมไม่ดีบางอย่างซึ่งส่งผลมายังผลตอบสนองของการควบคุม

เอกสารอ้างอิง

- 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.
- Visioli, A. (2006). Practical PID Control. Springer-Verlag London, Ltd., London.
- Twidell, J. (1987). A Guide to Small Wind Energy Conversion Systems. Cambridge University Press, United Kingdom.