

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ทั้งในรูปแบบน้ำมันเชื้อเพลิง ถ่านหิน และพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น พลังงานทางเลือกเช่นพลังงานจากพืชในรูปแบบน้ำมันไบโอดีเซล พลังงานจากลมที่ถูกเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กังหันลม และพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยโซลาร์เซลล์ เหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับการส่งเสริมจากทางรัฐบาลอย่างเร่งรัด เนื่องจากช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และช่วยลดอัตราการขาดดุลการค้าอย่างชัดเจนเนื่องจากพลังงานเป็นต้นทุนหลักในทุกธุรกิจ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตพลังงานทางเลือกยังขาดการพัฒนาอย่างเพียงพอ การที่มีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าส่งผลให้การผลิตพลังงานทางเลือกอย่างมีประสิทธิภาพ และได้รับผลตอบแทนคุ้มค่ากับการลงทุน

โครงการวิจัยนี้เน้นการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่ในธรรมชาติ เพียงแต่ต้องอาศัยอุปกรณ์ในการเก็บเกี่ยวพลังงานลม และแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ จึงจะได้พลังงานไฟฟ้ามาใช้อย่างคุ้มค่าการลงทุน อุปกรณ์นี้คือกังหันลมเพื่อการปั่นกระแสไฟฟ้า (wind turbine) การพัฒนากังหันลมมีทั้งในส่วนของใบพัด(wind blade), อุปกรณ์ส่งกำลัง(drivetrain), อุปกรณ์แปลงพลังงาน(energy converter) เป็นต้น โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาในส่วนของอุปกรณ์ส่งกำลัง (drivetrain) โดยพัฒนาระบบเกียร์ และระบบควบคุมเกียร์ ภายในอุปกรณ์ส่งกำลัง เนื่องจากงานวิจัยในส่วนนี้ยังไม่เคยได้รับการพัฒนาในประเทศไทย ในต่างประเทศการวิจัยอุปกรณ์ส่งกำลังได้รับการพัฒนาอยู่ การพัฒนาระบบเกียร์โดยเพิ่มชุดเกียร์แบบระบบหมู่ (planetary gear sets) ระบบเกียร์ชนิดนี้สามารถเปลี่ยนอัตราทดได้ตามแรงบิดและความเร็วของใบพัดที่เปลี่ยนไปตามความเร็วลม ระบบเกียร์นี้จะต้องได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับแรงบิดและความเร็วที่ได้จากใบพัด ณ จุดทำงานที่ได้ ประสิทธิภาพสูงสุด หากชุดเกียร์ที่ออกแบบไม่เหมาะสมจะไม่สามารถได้อัตราทดที่เหมาะสมกับการส่งกำลังไปยังเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ผลิตไฟฟ้า จุดทำงานที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องคำนวณหาโดยทฤษฎีทาง Optimization โดยมีตัวแปรหลักเช่น ความเร็วลม แรงบิดที่ใบพัด ความเร็วของใบพัด อัตราทดของระบบส่งกำลัง กำลังไฟฟ้าที่ผลิต เป็นต้น ส่วนของขนาดและรูปร่างเกียร์ ใช้ทฤษฎีการออกแบบเครื่องจักรกลในการหาขนาดเกียร์และจำนวนฟันเกียร์ที่เหมาะสม การควบคุมเกียร์ใช้ระบบนิวเมติกส์ส่งกำลังไปยังคลัตช์ ที่จับอยู่กับเกียร์เพื่อทำการเปลี่ยนเกียร์ ในส่วนของระบบควบคุมเกียร์อาศัยทฤษฎีการควบคุมระบบเพื่อหาตัวควบคุมที่เหมาะสม และทำการแปลงเป็นระบบควบคุมทางดิจิทัลเพื่อใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อความคุมชุดเกียร์อีกทีหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าแก่กังหันลมขนาดไม่เกิน 500 watt จากเดิมที่ไม่มีระบบส่งกำลังจะมีประสิทธิภาพต่ำ

1.2.2 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติแก่กังหันลมขนาด 500 watt ที่ได้ติดตั้งระบบส่งกำลังที่ได้รับการออกแบบ ระบบควบคุมนี้สามารถควบคุมอัตราการผลิตไฟฟ้าตามกระแสลมที่เปลี่ยนไป

1.2.3 กังหันลมที่ได้รับการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบใหม่นี้พร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเดิม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ระบบส่งกำลังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยวัดจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบใหม่เทียบกับระบบเดิมที่ไม่มีระบบส่งกำลัง

1.3.2 ทำการออกแบบและสร้างระบบส่งกำลังของกังหันลมโดยใช้ระบบเกียร์แบบหุ้ม โดยมีชุดนิวเมติกส์ในการให้กำลังชุดคลัตช์เพื่อเปลี่ยนเกียร์

1.3.3 ออกแบบและสร้างชุดควบคุมเกียร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถทำงานได้กับชุดนิวเมติกส์ในการให้กำลังชุดคลัตช์เพื่อเปลี่ยนเกียร์เพื่อควบคุมอัตราทดเกียร์

1.4 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่ได้รับ

1.4.1 งานตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการและวารสารวิชาการ

1.4.2 สิทธิบัตรของระบบส่งกำลังที่ได้วิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีกังหันลมและการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นการวิจัยเกี่ยวกับกังหันลมต่างๆ ดร.ปฎิญา สมานหัตถ์ และทีมงานพบว่า ไม่เคยมีการทำการทดสอบระบบส่งกำลังในกังหันลมในประเทศไทย ทำให้ไม่มีวิธีการวิเคราะห์ให้อ้างอิง ส่งผลให้การออกแบบสร้างระบบส่งกำลังกังหันลมชนิดนี้อ้างอิงจากต่างประเทศประกอบกับบทความที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมที่พบในประเทศไทย

ดังนั้นดร.ปฎิญา สมานหัตถ์และทีมงานจึงทำการสืบค้นจากข้อมูลในต่างประเทศเพิ่มเติมพบว่า ในปี ค.ศ. 1891 แदन พอล ลาคูร์ (Dane Poul LaCour) วิศวกรชาวเดนมาร์กเป็นคนแรกที่สร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าขึ้น เทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาระหว่างช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 และ 2 โดยใช้เทคโนโลยีนี้เพื่อทดแทนการขาดแคลนพลังงานในขณะนั้น บริษัท เอฟ เอล สมิธ (F.L. Smidth) ของเดนมาร์กถือได้ว่าเป็นผู้ริเริ่มกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสมัยใหม่ในปี ค.ศ. 1941-1942 กังหันลมของบริษัทนี้เป็นกังหันลมแบบสมัยใหม่ตัวแรกที่ใช้แพนอากาศ (airfoils) ซึ่งใช้ความรู้ชั้นสูงทางด้านอากาศพลศาสตร์ในเวลานั้น ในช่วงเวลาเดียวกัน พาลเมอร์ พุทแนม (Palmer Putnam) ชาวอเมริกันได้สร้างกังหันลมขนาดใหญ่ให้กับบริษัท มอร์แกน สมิธ (Morgan Smith Co.) กังหันลมที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 53 เมตร ซึ่งมีความแตกต่างจากกังหันลมของเดนมาร์กทั้งในเรื่องของขนาดและหลักการออกแบบ กังหันลมของเดนมาร์กมีหลักการอยู่บนพื้นฐานของการหมุนโดยลมส่วนบน (upwind rotor) กับการควบคุมผ่านตัวล่อ (stall regulation) ทำงานที่ความเร็วลมต่ำ ส่วนกังหันลมของพุทแนมออกแบบอยู่บนพื้นฐานของการหมุนโดยลมส่วนล่าง (downwind rotor) กับการควบคุมโดยการปรับใบพัด (variable pitch regulation) อย่างไรก็ตามกังหันลมของพุทแนมก็ไม่ประสบความสำเร็จและถูกรื้อออกในปี ค.ศ. 1945 (Thomas & Lennart. 2002 : 67-128)

หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงปี ค.ศ. 1956 – 1967 โจฮันเนส จูล (Johannes Juul) ชาวเดนมาร์กได้พัฒนาและออกแบบกังหันลมใหม่เพิ่มเติมและทำการติดตั้งที่เมืองเกดเซอร์ (Gedser) ประเทศเดนมาร์กสามารถผลิตไฟฟ้าได้กว่า 2.2 ล้านหน่วย และในเวลาเดียวกันนี้ ฮุตเตอร์ (Hutter) ชาวเยอรมันก็ได้พัฒนากังหันลมรูปแบบใหม่เหมือนกัน โดยกังหันลมของฮุตเตอร์ประกอบด้วยใบกังหันมีลักษณะเรียวยาวทำจากไฟเบอร์กลาสส์ (fiberglass) 2 ใบ กังหันลมชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามแม้ว่ากังหันลมของจูลและฮุตเตอร์จะประสบความสำเร็จในตอนแรก แต่ความสนใจในกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ก็ลดลงหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 มีเพียงกังหันลมขนาดเล็กสำหรับผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกล หรือสำหรับการประจุแบตเตอรี่เท่านั้นที่ยังได้รับความสนใจ ต่อมาหลังเกิดปัญหาวิกฤตการณ์น้ำมันในปี ค.ศ. 1973 ทำให้ความสนใจในพลังงานลมได้กลับมาอีกครั้ง จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีการสนับสนุนเงินทุนเพื่อการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับพลังงานลมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในประเทศเยอรมัน สหรัฐอเมริกา และสวีเดน ซึ่งได้ใช้เงินนี้ในการพัฒนาต้นแบบกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ในระดับเมกะวัตต์ อย่างไรก็ตามกังหันลมต้นแบบหลายๆแบบ

ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรทั้งที่ผ่านมาเป็นเวลานาน สาเหตุมาจากปัญหาทางเทคนิคหลายๆ ประการ เช่น กลไกการบิดของใบพัด (pitch mechanism) เป็นต้น

ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการสนับสนุนเงินทุนเพื่อกระตุ้นให้มีการพัฒนาพลังงานลมเป็นอย่างมาก ตัวอย่างที่สามารถเห็นได้ชัดเจนถึงผลของการกระตุ้นในครั้งนี้ เช่น ทำให้เกิดฟาร์มกังหันลม (wind farms) ขนาดใหญ่ติดตั้งอยู่ตามเทือกเขาทางตะวันออกของซานฟรานซิสโก และทางตะวันออก เฉียงเหนือของลอสแอนเจลิส ฟาร์มกังหันลมแห่งแรกนี้ประกอบไปด้วยกังหันลมขนาด 50 กิโลวัตต์ เป็นส่วนใหญ่ หลายปีผ่านไปขนาดของกังหันลมรุ่นใหม่เพิ่มขึ้นเป็น 200 กิโลวัตต์ ซึ่งเกือบทั้งหมดนำเข้าจากประเทศเดนมาร์ก ในช่วงสิ้นปี ค.ศ. 1980 มีกังหันลมติดตั้งอยู่ในแคลิฟอร์เนีย ประมาณ 15,000 ตัว ด้วยขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้ารวม 1,500 เมกะวัตต์

สราวุธ วังพลับ และ สราวุธ สุขเจริญ(2543)ได้ทำการวิจัย เรื่อง การออกแบบและสร้าง กังหันลมแกนตั้ง ผลการวิจัยกล่าวว่า การออกแบบและสร้างกังหันลมแกนตั้งอัตราเร็วรอบต่ำสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้วัสดุที่เป็นเหล็กเกือบทุกส่วนจึงมีความแข็งแรงทนทานมาก สามารถหมุนด้วยอัตราเร็วรอบสูงได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และพบว่ากังหันลมที่สร้างขึ้นนี้ให้ประสิทธิภาพต่ำ คือ ประมาณ 3-6 % และอัตราเร็วที่ได้ค่อนข้างช้าอันเนื่องมาจากปัจจัย คือ ลม สถานที่ตั้ง และน้ำหนัก

เดช ดำรงค์ศักดิ์ และ ยงยศ วุฑฒิโกวิทย์ (2547) ได้ทำการวิจัยการวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลการวิจัยกล่าวว่า อัตราเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีที่สำนักงานเขตนอร์เทิร์น สตีลตีวป่าสะเมิง อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ มีค่า 4.1 m/s ซึ่งสูงกว่า 3 m/s ซึ่งเป็นอัตราเร็วเริ่มต้น ที่สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้ และมีอัตราเร็วลมกรรโชกสูงสุด 25 m/s โดยระบบกังหันลมจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 507,264 ยูนิิตต่อปี เมื่อกังหันรับลมในทิศ ตะวันออกเฉียงเหนือ

วิกันดา ศรีเดช (2551) ได้ทำการวิจัยเรื่องการกำหนดลักษณะใบกังหันลม เพื่อผลิตพลังงานให้ได้มากที่สุด ในสถิติลมเฉพาะพื้นที่ ผลการวิจัยกล่าวว่า กังหันลมมักจะถูกออกแบบให้เปลี่ยนพลังงานลมที่อัตราเร็วค่าหนึ่งไปเป็นพลังงานกลให้ได้มากที่สุด โดยคำนึงถึงตัวแปรออกแบบ (Design variable) หลายตัว เช่น ขนาดใบ อัตราเร็วรอบ ความสอบ (Tapper) มุมบิด (Twist angle) อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) และ มุมเฟิน (Pitch angle) มุมเฟินที่กำหนดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก เพราะจะส่งผลโดยตรงต่อค่ามุมประทะ (Angle of attack) ที่ใบกังหันกระทำต่อลม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงลมที่กระทำต่อกังหัน ดังนั้นมุมเฟินที่ดีที่สุดในแต่ละพื้นที่หรือภูมิภาคย่อมแตกต่างกัน แม้ว่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยจะเท่ากันก็ตาม เพราะสถิติลมในแต่ละพื้นที่จะมีความแตกต่างกัน ทำให้อัตราเร็วลมที่ให้ ความหนาแน่นพลังงานสูงสุดมีค่าต่างกัน งานวิจัยนี้ มุ่งหามุมเฟินที่ดีที่สุดของใบกังหัน โดยใช้วิธีเชิงทฤษฎีร่วมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่ เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด ทฤษฎีสำคัญที่ใช้ คือ ทฤษฎี Blade element momentum ร่วมกับแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหล เพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลองของกังหันลมในสองลักษณะ คือ กังหันลมแบบใบตรงและกังหันลมชนิดใบบิด ได้ใช้โปรแกรมค้นหามุมเฟินที่ดีที่สุด สถิติลมอันหนึ่ง โดยการปรับมุมเฟินไปจนกระทั่งได้งานรายปีสูงสุด จากนั้นได้คำนวณหามุมเฟินที่ดีที่สุด ในกรณีสถิติลมเปลี่ยนไปจากเดิม โดยยังมีอัตราเร็วลมเฉลี่ยเท่าเดิม แต่มีความเบ้ของสถิติลมต่างไป

จากเดิม พบว่ามุมเฟินที่ดีที่สุดเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งนี้ น่าจะเป็นสาเหตุจากการที่ค่าอัตราเร็วลมที่ให้ค่าความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดเปลี่ยนไป ตามความเบ้ของสถิติลมพบว่า การปรับมุมเฟินเพียงเล็กน้อย อาจส่งผลให้ได้งานรายปีต่างกันพอสมควร ในสถิติลมที่มีความเบ้แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบของกังหันลมได้มากพอสมควร

โซวาน เลง(2551) ได้ทำการวิจัยเรื่อง เสถียรภาพของกริดขนาดเล็กที่มีแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าจากลม ผลการวิจัยกล่าวว่า การพัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัตของกริดขนาดเล็กประกอบด้วยกังหันลมขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และแบบดับลิเฟด(Doubly-fed) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส และโหลดที่มีองค์ประกอบบางส่วนเป็นแบบโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การแปรผันของอัตราเร็วลมตามธรรมชาติ ถูกจำลองด้วยค่าสุ่มที่มีการกระจายแบบไวน์บูล ทำการศึกษาสมรรถนะเชิงพลวัตของระบบดังกล่าว ภายใต้การรบกวนทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก รวมถึงสมรรถนะของระบบภายใต้ การทำงานแบบแยกอิสระจากกริดหลัก พร้อมทั้งเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่างกันไปในสามแบบ ได้แก่ แบบอัตราเร็วโรเตอร์คงตัว แบบอัตราเร็วโรเตอร์แปรผัน เพื่อควบคุมค่ากำลังไฟฟ้านอกทีฟ และแบบอัตราเร็วโรเตอร์แปรผัน เพื่อควบคุมแรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยให้ความสำคัญเป็นพิเศษกับการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม และผลกระทบของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าดังกล่าวต่อกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านจุดเชื่อมต่อกับกริดหลัก เพื่อรักษาเสถียรภาพของกำลังในกริดขนาดเล็กนั้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการสับปลดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งไว้บริเวณสถานีไฟฟ้าพลังงานลมเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้านอกทีฟที่มีต่อเสถียรภาพของกริดขนาดเล็กนี้ด้วย นอกจากนี้การศึกษาดังกล่าวโดยจำลองแบบเชิงเวลาแล้ว ยังได้วิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของระบบที่ ทำให้เป็นเชิงเส้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพเชิงสัญญาณขนาดเล็กของระบบ ผลจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้กำหนดความต้องการเชิงสมรรถนะของการควบคุมกริดขนาดเล็กที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพต่อไปในอนาคต

ปกรณ อเนกพรพิบูลย์ และคณะ(2552) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนากังหันลมแนวตั้งเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลการวิจัยกล่าวว่า การทำงานของกังหันลมแนวตั้งซึ่งสามารถปรับองศาของใบพัดในการรับลมได้นั้นสามารถใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมสำหรับอัตราเร็วลมต่างๆกัน และได้ใช้ความรู้ในด้านพลศาสตร์และอากาศพลศาสตร์ประกอบการออกแบบกังหันลม โดยตัดแปลงจากกังหันลมทั่วไปให้มี 3 ชั้น และทำจากวัสดุที่ ง่ายเพื่อให้เกิดประโยชน์ สูงสุดในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ประไพ จักษุจินดา (2552) ได้ทำการวิจัยโดยการสร้างแบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้า และศึกษาข้อมูลทางเทคนิคและหลักการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์โบลเวอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm หมุน 2880 rpm เป็นต้นกำเนิดของลมเป่าไปยังกังหันลมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีแม่เหล็กทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ความเข้มสนามแม่เหล็ก 70 mT และมีใบพัดลมจำนวน 7 ใบ เส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมดเป็น 74 mm สวมติดกับแกนกลางของกังหันลมหมุนตัดกับขดลวดทองแดงเบอร์ 40 จำนวน 550 รอบ พบว่า เมื่อวางกังหันลมผลิตไฟฟ้าห่างจากต้นกำเนิดของลมประมาณ 8 cm มีอัตราเร็วลม 7.14 m/s ทำให้กังหันลมหมุน 855 rpm และแม่เหล็กหมุนตัดขดลวดจะเกิดไฟฟ้ากระแสสลับมี ความต่างศักย์ 4.9 V และ

กระแสสลับ 17.52 mA ส่งไปยังวงจร เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีความต่างศักย์ 3.60 V และกระแสตรง 14.90 mA ทำให้หลอด LED จำนวน 7 หลอดสว่าง แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้านี้มีประสิทธิภาพประมาณ 9% และสามารถนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับนาฬิกา เครื่องคิดเลข วิทยุ ใฝ่ฉายที่ใช้หลอด LED และอื่นๆ ที่สามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้

วรพงษ์ พวงแก้ว นำเสนอการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมและความเป็นไปได้ในการติดตั้งโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดกลางตามแนวชายฝั่งทะเลของจังหวัดนครศรีธรรมราชและจังหวัดสงขลา โดยได้ทำการติดตั้งสถานีตรวจวัดลมจำนวน 10 สถานี ณ บริเวณอำเภอขนอม ลีชลท่าศาลา ปากพนัง และอำเภอหัวไทร ของจังหวัดนครศรีธรรมราช และบริเวณอำเภอระโนด สทิงพระ 1 สทิงพระ 2 สิงหนคร และอำเภอจะนะ ของจังหวัดสงขลา ซึ่งได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอัตราเร็วและทิศทางของลม และอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติกับเสาถักโครสสามเหลี่ยมสูง 45 เมตร ณ ตำแหน่ง 20 เมตร 30 เมตร และ 40 เมตร ทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 10 นาที ในระหว่างเดือนมกราคม-ธันวาคม 2551 โดยพิจารณาการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 0.225 เมกะวัตต์ 0.3 เมกะวัตต์ 0.5 เมกะวัตต์ และ 0.75 เมกะวัตต์ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมมีค่าอยู่ในช่วง 0.03-2.07 จิกะวัตต์ต่อปี และมีประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าประมาณร้อยละ 0.9-51.5 โดยมีพื้นที่ที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงและมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานลมในบริเวณอำเภอ ปากพนัง หัวไทร ท่าศาลา และขนอมของจังหวัดนครศรีธรรมราช

ชลอทร ธรรมแท้ และ ทวี ช จิตรสมบูรณ์ ได้ทำการวิจัยเรื่อง การจำลองเชิงตัวเลขของกังหันลมแกนนอนแบบใบปิด ผลการวิจัยกล่าวว่า การจำลองการไหลที่สภาวะคงตัว ผ่านกังหันลมแกนนอนที่มีการปิดใบกังหันลมด้วยโปรแกรม 'Fluent' เพื่อทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม การจำลองการไหลทำโดยหาผลเฉลยของสมการที่เขียนแทน กฎการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม ด้วยวิธีปริมาตรจำกัดในสามมิติ โดยใช้วิธีการของอัตราเร็วสัมพัทธ์ที่ให้กังหันอยู่กับที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนไป ได้ศึกษาสองกรณีหลักคือ การไหลแบบไม่คิดความหนืด และแบบคิดความหนืด(โดยคำนวณร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon) ได้ใช้ วิธีการปรับกริดแบบละเอียดเฉพาะที่ (Local Grid Refinement) และได้ศึกษาความเป็นอิสระของผลลัพธ์ ต่อขนาดของกริดด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทดลองกังหันลมของ National Renewable Lab. (USA) พบว่าผลจากการคำนวณสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดีทั้งกรณีที่ไม่คิดความหนืดและคิดความหนืด โดยเฉพาะในกรณีที่ ไม่เกิดการstall แสดงว่า การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Fluent มีความแม่นยำ เพียงพอที่จะใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลของลมผ่านกังหันลมแบบแกนนอนได้ ซึ่งจะใช้โปรแกรม Fluent ช่วยในการออกแบบกังหันลมได้

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2554) ได้ทำการ ออกแบบ สร้าง และทดสอบกังหันลม เพื่อผลิตไฟฟ้า ในเขตพื้นที่จังหวัดนครพนม โดยทำการติดตั้ง และทดสอบใช้งานจริง จากการศึกษาพบว่า ความเร็วลมในจังหวัดนครพนม เฉลี่ยตลอดทั้งปีประมาณ 2.85 m/s ที่ความสูง 14 m ในส่วนของการทดสอบกังหันลมพบว่า กังหันลมเริ่มหมุนที่ ความเร็วลม 1.5 m/s และเริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าที่ ความเร็วลม 2.0 m/s โดยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ สูงสุดเท่ากับ 785 W ที่ความเร็วลม 11.5 m/s และมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดเท่ากับ 0.34 ที่ความเร็วลม 3.5 m/s ตามลำดับ กังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 495 kWh/y จากการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่ามี ต้นทุนในการผลิตพลังงาน

ไฟฟ้าเท่ากับ 15.0 บาท/หน่วย โดยมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 26.6 ปี นอกจากนั้นยังพบว่า การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมจะน่าสนใจมากยิ่งขึ้น ถ้าราคาพลังงานต่อหน่วยมีค่ามากกว่า 8 บาทต่อหน่วย

สุรักษ์ จันทร์บาง และ สุทธิ ตั้งแสงพรกุล (2554) ได้ทำการออกแบบและสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ จากลมระบายความร้อนของคอมเพรสเซอร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ใบพัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการประจุแบตเตอรี่ ใบพัดที่ทำการทดลองมีสองลักษณะดังนี้ 1) ใบพัดโลหะ 2) ใบพัดท่อ พีวีซี ความยาว 25 cm ซึ่งสามารถทำงานได้ตั้งแต่ความเร็วลม 2 m/s ความเร็วลมของคอมเพรสเซอร์ระบายความร้อน มีความเร็ว 6m/s ใบพัดทั้งสองสามารถทำงานได้ดี ผลการทดลองของใบพัดโลหะ ทำงานที่ความเร็วลม 6 m/s สามารถวัดแรงดันกระแสตรงได้เฉลี่ย 51.1 V ใบพัดโลหะสามารถผลิตแรงดันกระแสตรงได้มากกว่าใบพัดที่ทำจากท่อ พีวีซี ประมาณ 14.3 V เพราะใบพัดโลหะมีเนื้อที่รับลมมากจึงทำให้หมุนเร็วกว่าใบพัดที่ทำจากท่อ พีวีซี กระแสที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เฉลี่ย 0.5 A ปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ที่ติดตั้งกังหันลมมากกว่าคอมเพรสเซอร์ที่ไม่ติดตั้งกังหันลมอยู่เล็กน้อย

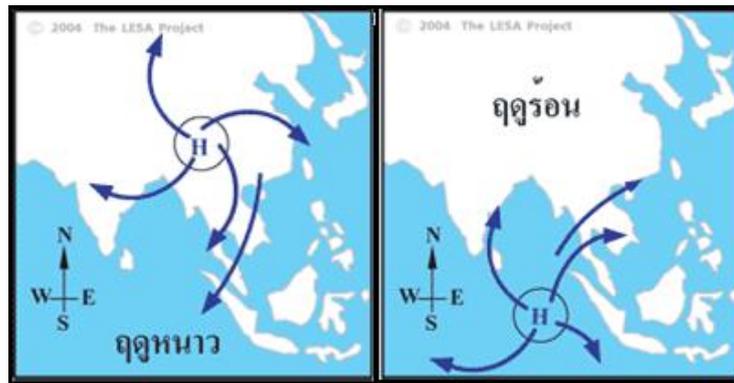
2.2 การเกิดลม

ลมเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ ทั่วโลก ลมที่มักจะได้ยินชื่ออยู่บ่อยๆ ก็คือ ลมมรสุม ซึ่งหมายถึงลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางกับการเปลี่ยนฤดู คือฤดูร้อนจะพัดอยู่ในทิศทางหนึ่งและจะพัดเปลี่ยนทิศทางในทางตรงกันข้ามในฤดูหนาว นอกจากนี้ลมยังอาจเกิดขึ้นจากอิทธิพลของภูมิประเทศและความเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งเรียกลมชนิดนี้ว่าลมประจำถิ่น ซึ่งลมประจำถิ่นยังสามารถแบ่งออกเป็น ลมบกและลมทะเล ลมภูเขาและลมหุบเขา นอกจากนี้ในประเทศไทยยังมีลมประจำถิ่นที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ ลมตะเภา และลมว่าว (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544)

2.2.1) ลมประจำฤดู

ลมประจำฤดูหรือลมประจำฤดูกาล เป็นลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางตามฤดู เรียกว่า ลมมรสุม สำหรับลมมรสุมจัดว่าเป็นลมที่มีความสำคัญมาก ถ้าสามารถศึกษาและสังเกตของช่วงระยะเวลาที่เกิดขึ้นได้ จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนได้มาก ลมมรสุมในประเทศไทยแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "ลมมรสุมฤดูหนาว"
2. ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "ลมมรสุมฤดูร้อน"



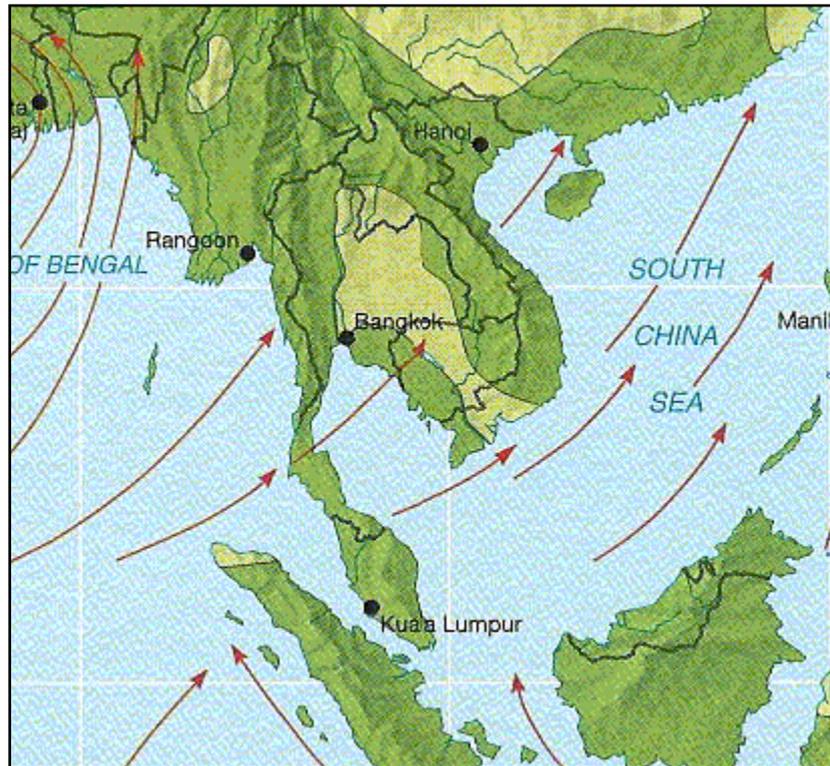
รูปที่ 2.1 ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

1) ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงเดือนพฤศจิกายน – กุมภาพันธ์ อากาศแห้ง บริเวณตอนกลางของทวีปมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศชื้นเหนือมหาสมุทรอินเดีย กระแสลมพัดจากห่อม ความกดอากาศสูงในเขตไซบีเรีย ในลักษณะตามเข็มนาฬิกา (แอนตี้ไซโคลน) มายังห่อมอากาศต่ำใน มหาสมุทรอินเดีย ทำให้เกิด “ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ” พัดผ่านประเทศไทย ทำให้อากาศหนาว เย็นและแห้งแล้ง ท้องฟ้าใส ทางภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง ส่วนภาคใต้ฝั่ง ตะวันออก ลมนี้จะพัดผ่านอ่าวไทยจึงนำฝนมาตกด้วย



รูปที่ 2.2 ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

2) **ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้** ในช่วงเดือนมีนาคม – ตุลาคม อากาศบริเวณตอนกลางทวีปมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศเหนือมหาสมุทรอินเดีย อากาศร้อนยกตัวพัดเข้าหาแผ่นดินใจกลางทวีป ในลักษณะทวนเข็มนาฬิกา (ไซโคลน) ทำให้เกิด “ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้” เมื่ออากาศชั้นปะทะเข้ากับชายฝั่งและภูมิประเทศซึ่งเป็นภูเขา มันจะยกตัวอย่างรวดเร็วและควบแน่น ทำให้เกิดเมฆและพายุฝนฟ้าคะนอง

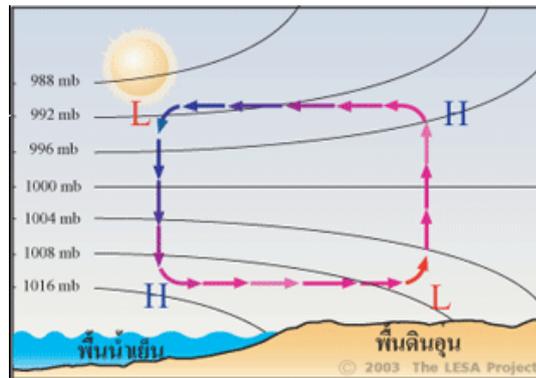


รูปที่ 2.3 ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

2.2.2) ลมประจำเวลา

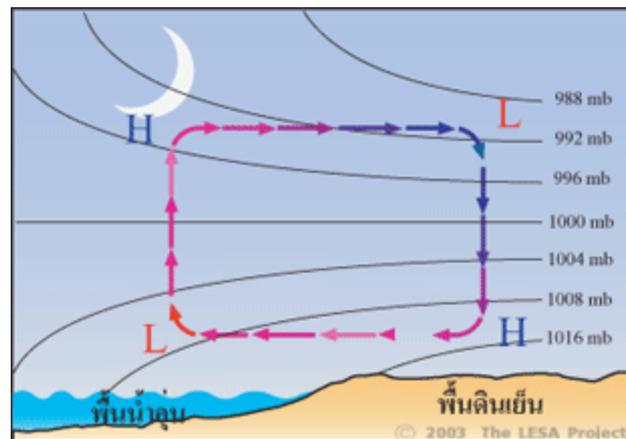
ลมประจำเวลา เป็นลมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความกดอากาศระหว่าง 2 บริเวณในระยะเวลาสั้นๆ ได้แก่ ลมบก ลมทะเล ลมภูเขา และลมหุบเขา

1) **ลมบก (Land Breeze)** ลมบก เป็นลมเฉื่อยที่พัดอย่างเด่นชัดตามบริเวณชายฝั่งทะเลในตอนกลางคืนและพัดจากชายฝั่งลงสู่ทะเล เนื่องจากในช่วงตอนกลางคืนพื้นดินจะคลายความร้อนได้เร็วกว่าพื้นน้ำ จึงทำให้อากาศเหนือพื้นน้ำที่ยังอุ่นและลอยตัวสูงขึ้นสู่เบื้องบน อันเป็นเหตุทำให้กระแสอากาศจากภาคพื้นดินเคลื่อนลงไปแทนที่ ทำให้เกิดลมบก (Land Breeze) ขึ้นมา ลมชนิดนี้จะพัดตั้งแต่เวลา 22.00 น. จนกระทั่งถึงเวลา 10.00 น.ของวันรุ่งขึ้น



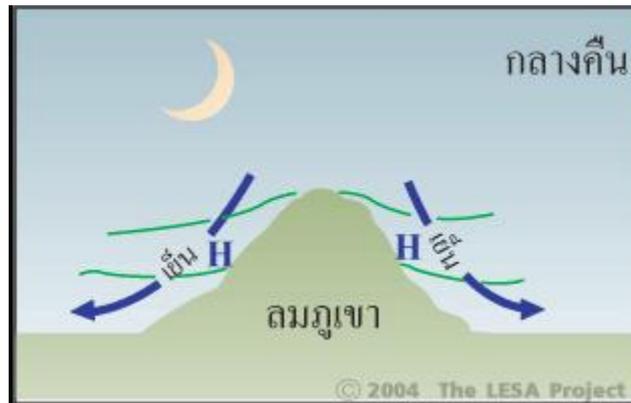
รูปที่ 2.4 ลมบก

2) ลมทะเล (Sea Breeze) ลมทะเล เป็นลมที่พัดอย่างเด่นชัดในตอนกลางวันและพัดจากทะเลเข้าสู่ชายฝั่ง เนื่องจากลมนี้เป็นลมเย็น การเกิดลมชนิดนี้เนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศเหนือพื้นดินและพื้นน้ำ ลมทะเลจะเริ่มพัดตอนเช้าตั้งแต่เวลา 10.00 น.และมีกำลังแรงที่สุดในตอนบ่าย จะสิ้นสุดลงเมื่อดวงอาทิตย์ตกประมาณเวลา 21.00 น.



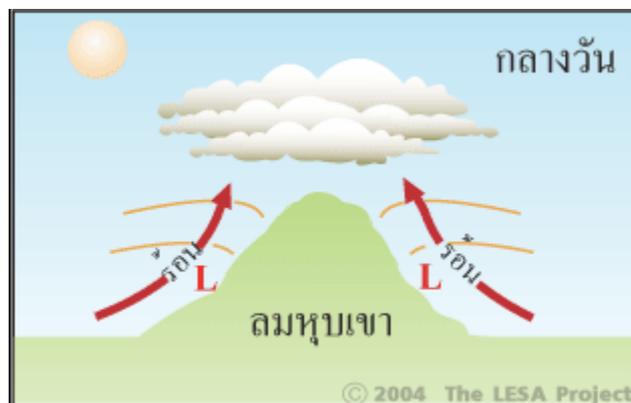
รูปที่ 2.5 ลมทะเล

3) ลมภูเขา (Mountain Breeze) ลมภูเขาหรือลมพัดลงลาดเขา เป็นลมเฉื่อยที่พัดตามแดนภูเขาในตอนกลางคืน กล่าวคือในตอนกลางคืนมวลอากาศที่อยู่ตามหุบเขา ที่มีพืชพรรณธรรมชาติขึ้น อยู่อย่างหนาแน่นกว่าบนไหล่เขาที่สูงขึ้นไป จึงทำให้อากาศเหนือหุบเขาอุ่นกว่าและลอยตัวสูงขึ้น กอปรกับอุณหภูมิของอากาศตามไหล่เขาและยอดเขาลดต่ำอย่างรวดเร็ว ทำให้มวลอากาศตามไหล่เขาและยอดเขาเย็นและมีน้ำหนักเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขาตามอำนาจแรงดึงดูดของโลก



รูปที่ 2.6 ลมภูเขา

4) ลมหุบเขา (Valley Breeze) ลมหุบเขาหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "ลมพัดขึ้นลาดเขา" เป็นลมที่พัดในตอนกลางวันและช่วยลดอุณหภูมิที่ร้อนอบอ้าว จะเกิดความแตกต่างของมวลอากาศ มีปรากฏระหว่างหุบเขากับยอดเขาสูงกล่าวคือในตอนกลางวันตามไหล่เขาและยอดเขาสูง ซึ่งมีพื้นผิวที่มีพืชพรรณธรรมชาติปกคลุมอยู่น้อยมาก และมีโขดหินใหญ่น้อยปรากฏกระจายทั่วไป ส่งผลให้การดูดซับความร้อนได้ดีและรวดเร็วกว่าหุบเขา ซึ่งทำให้มวลอากาศเหนือพื้นผิวยอดเขาลอยตัวสูงขึ้น และมีมวลอากาศเย็นกว่าเบื้องล่างเคลื่อนที่ไปแทนที่ซึ่งทำให้เกิดลมหุบเขาขึ้น



รูปที่ 2.7 ลมภูเขา

2.2.3) ลมประจำถิ่น

ลมประจำถิ่นในประเทศไทย (Local Wind) คือลมที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ของช่วงปี ซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามท้องถิ่นต่างๆ ของประเทศไทย แบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

1) ลมว่าว เป็นลมเย็นที่พัดลงมาตามลำน้ำแม่น้ำเจ้าพระยาและเป็นลมที่พัดนำลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยจะเริ่มพัดในช่วงปลายเดือนกันยายน - เดือนตุลาคม ในช่วงที่ลมนี้เริ่มพัดจะเป็นระยะที่ข้าวเบอกกำลังออกรวง ชาวบ้านจึงมักเรียกลมประจำถิ่นชนิดนี้ว่า "ลมข้าวเบา" หรือ "ลม

โยกข้าวเบา" สาเหตุที่เกิดลมว่าวขึ้น เพราะเกิดหย่อมความกดอากาศต่ำขึ้นในอ่าวไทย แต่เนื่องจากความแตกต่างของหย่อมความกดอากาศที่ปรากฏขึ้นมีน้อยมาก จึงทำให้กระแสลมที่พัดไม่รุนแรงนัก

2) **ลมตะเภา** เป็นลมเย็นที่พัดจากทะเลเข้าสู่ชายฝั่งในช่วงเดือนมีนาคมและเดือนเมษายน โดยจะเริ่มพัดในราวเวลา 11.00 น. และพัดแรงขึ้น จะลดลงในราวเวลา 23.00 น.จนถึง 24.00 น. ลมชนิดนี้จะทำให้เกิดฝนตกในภาคกลาง เป็นฝนแบบฟ้าคะนอง ฟ้าแลบ ปริมาณน้ำฝนไม่แน่นอน สาเหตุการเกิดลมตะเภาเนื่องจากเกิดหย่อมความกดอากาศต่ำปรากฏ ในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนในท้องน้ำอ่าวไทยจะเป็นหย่อมความกดอากาศสูง แต่เนื่องจากความแตกต่างหย่อมความกดอากาศมีไม่มากนัก จึงทำให้กระแสลมที่พัดปรากฏขึ้นไม่รุนแรง จากการที่ลมนี้พัดจากอ่าวไทยเข้าสู่ชายฝั่ง จึงช่วยพาเรือสำเภาที่มาจากชายในประเทศไทยเข้าเทียบท่าเรือบริเวณก้นอ่าวไทย ชาวบ้านจึงเรียกลมนี้ว่า "ลมตะเภา" หรือ "ลมพญา" เพราะเป็นลมที่พัดเด่นชัดมากในแถบชายฝั่งแห่งนี้

3) **ลมพญา** เป็นลมที่พัดจากภาคตะวันออกเฉียงใต้ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ จะเริ่มพัดในต้นฤดูฝนราวเดือนพฤษภาคม ลมชนิดนี้เป็นลมร้อนและชุ่มชื้น

4) **ลมตะไก่** เป็นลมที่พัดจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ จะเริ่มพัดในตอนปลายฤดูฝนราวเดือนตุลาคม

5) **ลมอุตรา** เป็นลมที่พัดจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปยังทิศตะวันออกเฉียงใต้ โดยจะเริ่มพัดในต้นฤดูร้อนราวๆ เดือนมีนาคม โดยจะพัดเป็นครั้งคราวทำให้เกิดฝนตกฟ้าคะนอง อากาศแปรปรวนหลายวัน

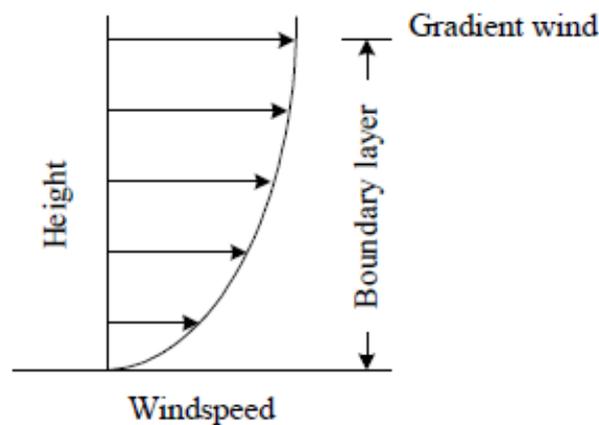
2.3 ทฤษฎีกังหันลมที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันพลังงานถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ไม่ว่าจะ เป็นกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่จนไปถึงการใช้งานในระดับครัวเรือนทั่วไป กอปรกับแหล่งทรัพยากรที่ต้องใช้ในการผลิตพลังงานนั้นมีอยู่อย่างจำกัด ทำให้วันยังทำให้ทรัพยากรเหล่านั้นลดน้อยลง ขณะที่ความต้องการใช้พลังงานยังคงสูงขึ้นเรื่อยๆ ผลลัพธ์ที่ตามก็คือ มนุษย์จะต้องแบกรับกับต้นทุนของพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น และปัญหาการถดถอยของสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติอันเนื่องมาจากมลภาวะจากการใช้พลังงาน พร้อมทั้งปัญหาการขาดแคลนพลังงานตามมาในที่สุด จากที่กล่าวมาจึงได้เกิดความพยายามที่จะหาแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีอยู่อย่างไม่จำกัด และสามารถนำมาใช้งานได้ตลอดไป ซึ่งหนึ่งในแหล่งพลังงานดังกล่าวก็คือพลังงานจากลม

2.3.1) พลังงานลมและกังหันลม

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าลมผิวพื้น หมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้าของอากาศ และมีแรงเสียดทานเกิดจากการปะทะกับสิ่งกีดขวางร่วมกระทำด้วยในระดับต่ำ แต่ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไปแรงต้านจะลดลงและ ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.8) ส่วนที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบไม่มีแรงเสียดทาน ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระดับความสูงและสภาพภูมิ

ประเทศ เช่นเดียวกันกับทิศทางของลม จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่ากังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่ นั่นก็จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ความเร็วลมเท่าๆ กันแต่มีทิศทางลมที่ต่างกันไป เมื่อพองเข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลมเป็นอย่างมาก ผลคือแรงลัพธ์ที่ได้ ออกมาจากกังหันลมแตกต่างกัน สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ่านได้จากเอกสารอ้างอิง (Siegfried, 1998)



รูปที่ 2.8 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ (atmosphere boundary layer)

พลังงานลมจะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ของกระแสลม ดังนั้นการจะนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ได้นั้นจะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถพลังงานจลน์ของกระแสลมไปเป็นพลังงานรูปอื่นที่เราต้องการได้ อุปกรณ์ที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือกังหันลม

กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์ของกระแสลมไปเป็นพลังงานกล และเราสามารถนำพลังงานกลที่ได้ไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยนำไปใช้ในการปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป ทั้งนี้พลังงานจลน์ของกระแสลมที่ไหลผ่านกังหันลมสามารถหาได้จากสมการ 2.1 และ 2.2

$$Ek = \frac{1}{2} \rho AV^3 T \quad (2.1)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (2.2)$$

เมื่อ

Ek = พลังงานจลน์ของกระแสลม (J)

P = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (W)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.225 kg/m^3

A = พื้นที่หน้าบวมของกังหัน (m^2)

V = ความเร็วของลม (m/s^2)

T = เวลา (sec)

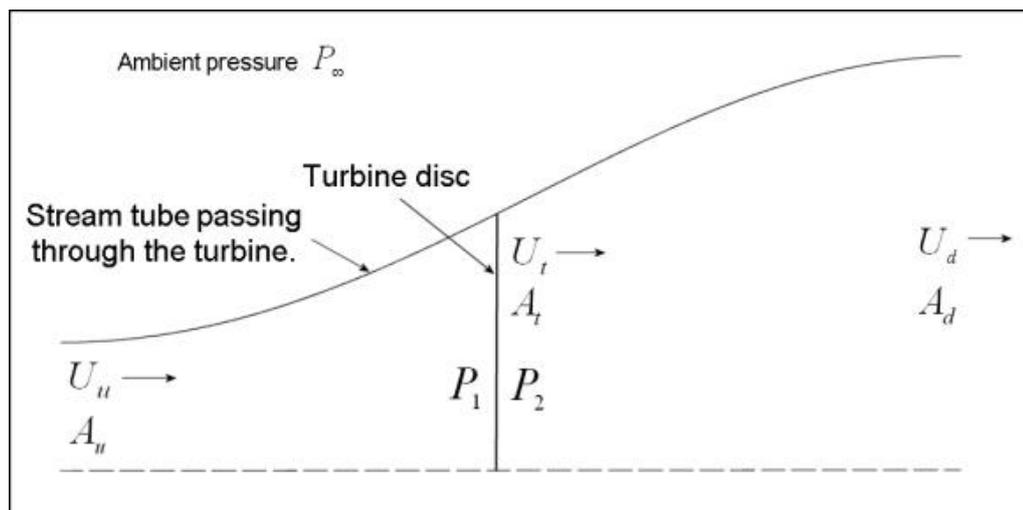
โดยทั่วไปพลังงานจลน์ที่ได้จากกระแสลม เมื่อไหลผ่านกังหันลมจะมีพลังงานบางส่วนสูญเสียไป ดังนั้น เพื่อเป็นการระบุถึงพลังงานที่แท้จริงที่ได้จากกังหันลม จึงต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์กำลังงาน, C_p เป็นตัวระบุพลังงานจริงๆที่ได้ ดังนั้นสมการที่ 3.2 จึงเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.3

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (2.3)$$

เมื่อ $C_p =$ Betz coefficient = (16/27) or 59%

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วค่าสัมประสิทธิ์กำลังงาน C_p จะมีค่าอยู่เพียง 0.35-0.45 เท่านั้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเราสามารถเปลี่ยนพลังงานลมไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 10 – 30 เปอร์เซ็นต์ (Wind Turbine Power Calculations RWE npower renewable Mechanical and Electrical Engineering Power Industry)

แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้เน้นเรื่องการออกแบบใบพัดดังนั้นการเราจึงศึกษาเรื่อง aerodynamics เพียงเพื่อเข้าใจผลกระทบของใบพัดต่อกังหันลมทั้งระบบ อีกทั้งสมการทางคณิตศาสตร์ในเรื่อง aerodynamics ของใบพัดมีความซับซ้อนเกินความจำเป็นในการศึกษาพัฒนาในงานวิจัยนี้ซึ่งเน้นระบบส่งกำลังและชุดควบคุม ซึ่งติดตั้งในระบบกังหันลม เราจึงสมมติให้กังหันลมเป็นจานหมุนได้ โดยมีลมไหลผ่านด้วยความเร็ว v_t และความดันลดลงจาก P_1 เป็น P_2 เมื่อลมทางด้านหน้า upstream ซึ่งมีความเร็ว v_u ไหลผ่านกังหันลมความเร็วจะลดเหลือ v_d ทางด้านหลังกังหันลม downstream แต่ขณะลมอยู่ที่ใบพัดมีความเร็ว v_t



รูปที่ 2.9 air stream flow through wind turbine

อัตราของพลังงานจลน์ที่มากที่สุดที่ลมจะให้แก่งังหันลมจะเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลคูณกับพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวล ซึ่งกังหันลมจะนำพลังงานจลน์จากลมมาใช้ในการหมุนตัวเอง ความเร็วลมก่อนผ่านกังหันมีค่าเท่ากับ v_u เมื่อลมอยู่ในอยู่ในระยะที่ผ่านกังหันจะมีความเร็วเท่ากับ v_t และเมื่อผ่านกังหันไปแล้วจะมีค่าลดลงเป็น v_d ซึ่งอยู่ด้านหลังของกังหัน

กำลังของกังหันลมคือ

$$Power = (P_1 - P_2)A_t v_t \quad (2.4)$$

เมื่อ A_t เป็นพื้นที่ของกังหันลมที่เป็นจานวงกลม แต่เนื่องจากของไหลไหลอย่างต่อเนื่อง (Continuity flow) ดังนั้น

$$A_u v_u = A_t v_t = A_d v_d \quad (2.5)$$

จากการอนุรักษ์โมเมนตัมแรงกระทำกับกังหันจะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมระหว่างของไหลด้านหน้าของแผ่นดิสก์กับด้านหลังของแผ่นดิสก์ ดังนั้น

Rate of Momentum Change = mass flow rate times velocity difference

$$(P_1 - P_2)A_t = \rho A_u v_u (v_u - v_d) \quad (2.6)$$

จากสมการ Bernoulli เราพิจารณาที่ upstream และ downstream ของกังหันลมจะได้

$$P_{ambient} + \frac{1}{2}\rho v_u^2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho v_t^2 \quad (2.7)$$

$$P_{ambient} + \frac{1}{2}\rho v_d^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_t^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ $P_{ambient}$ คือความดันบรรยากาศในการไหลที่ตำแหน่ง upstream และ downstream ของกังหันลม

ดังนั้นจากสมการข้างต้น

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\rho(v_u^2 - v_d^2) \quad (2.9)$$

และจากสมการการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$(P_1 - P_2) = \frac{\rho A_u v_u}{A_t} (v_u - v_d) \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{2}\rho(v_u^2 - v_d^2) = \frac{\rho A_t v_t}{A_t} (v_u - v_d) \quad (2.11)$$

$$\rho v_t (v_u - v_d) = \frac{1}{2}\rho(v_u^2 - v_d^2) \quad (2.12)$$

$$v_t = \frac{1}{2}(v_u + v_d) \quad (2.13)$$

นั่นคือความเร็วลม, v_t ณ จุดที่ลมผ่านกังหันลม เป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วลม upstream, v_u และความเร็วลม downstream, v_d

สุดท้ายประสิทธิภาพของกังหันจะสามารถคำนวณได้จากโดย

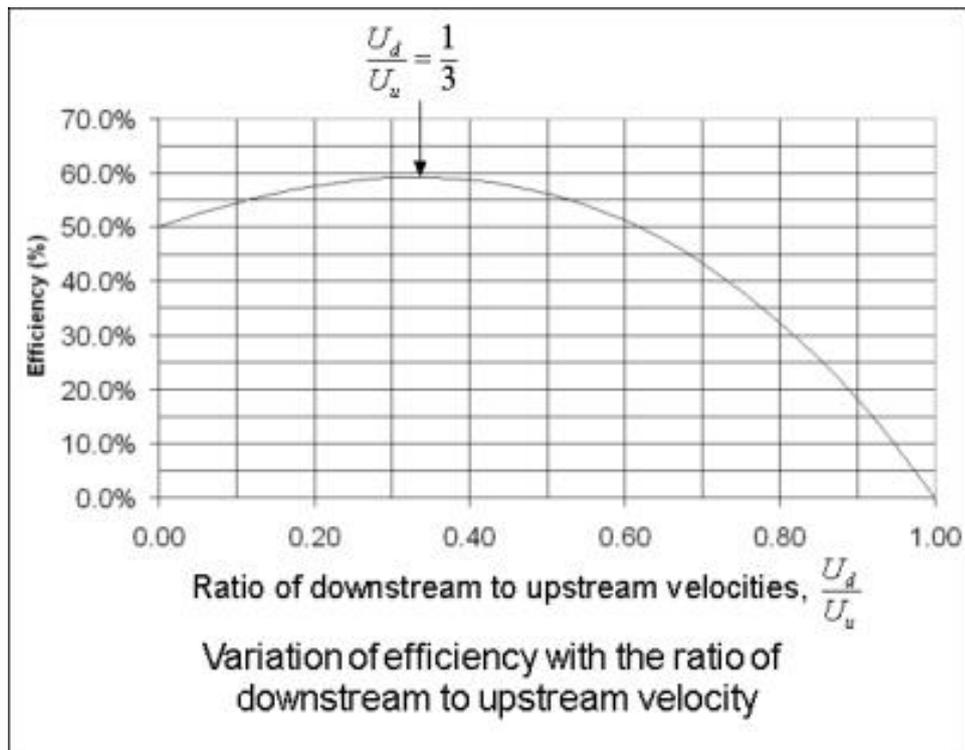
$$\eta = \frac{\text{Turbine Power}}{\text{Wind Power}} \quad (2.14)$$

$$\eta = \frac{(P_1 - P_2) A_t v_t}{\frac{1}{2} \rho A_t v_u^3} \quad (2.15)$$

จัดทางขวามือของสมการจะได้

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_d}{v_u}\right)^2 \left(1 - \frac{v_d}{v_u}\right) \quad (2.16)$$

รูปด้านล่างแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของกังหันลมต่ออัตราส่วนของความเร็วลม downstream ต่อ ความเร็วลม upstream (มักจะเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน, cp) หากเราทำการ differentiate สมการประสิทธิภาพข้างต้น ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ากังหันลมมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ $v_d / v_u = 1/3$ หรือ $A_d / A_u = 3$ ดังนั้นที่จุดนี้ประสิทธิภาพ, $\eta = 16/27 \approx 59\%$ นี้เป็นประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมและค่านี้เป็นที่รู้จักแพร่หลายว่าเป็นขีดจำกัดเบตซ์ Betz limit เสนอโดยอัลเบิร์ตเบตซ์ซึ่งตีพิมพ์ผลในปี 1920



รูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพของกังหันลม

ประสิทธิภาพของกังหันลมในสมการข้างต้นสามารถแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Efficiency, C_p) ซึ่งนิยามตามสมการ

$$C_p = \frac{\text{Turbine Power}}{\frac{1}{2}\rho A_t v_u^3} \quad (2.17)$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Efficiency, C_p) ควรจะมีค่าน้อยกว่า $\frac{16}{27}$ และเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความเร็วและมุมพิทช์ (Pitch Angle) ตามรูปที่ 2.11 ถ้าค่าอัตราส่วนความเร็วต่ำจะพบว่ามุมของใบพัดมีค่ามากไป ทำให้เกิดแรงทวนมากส่งผลให้กำลังลดลง ในขณะที่ค่าอัตราส่วนความเร็วสูง มุมของใบพัดจะน้อยไปทำให้แรงยกลดลง ส่งผลให้กำลังลดลง สมการที่ (2.18) เป็นสมการที่ใช้หาค่า C_p สำหรับกังหันลมโดยทั่วไป[1]

$$c_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5/\lambda_i} + c_6\lambda \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, $c_6 = 0.0068$

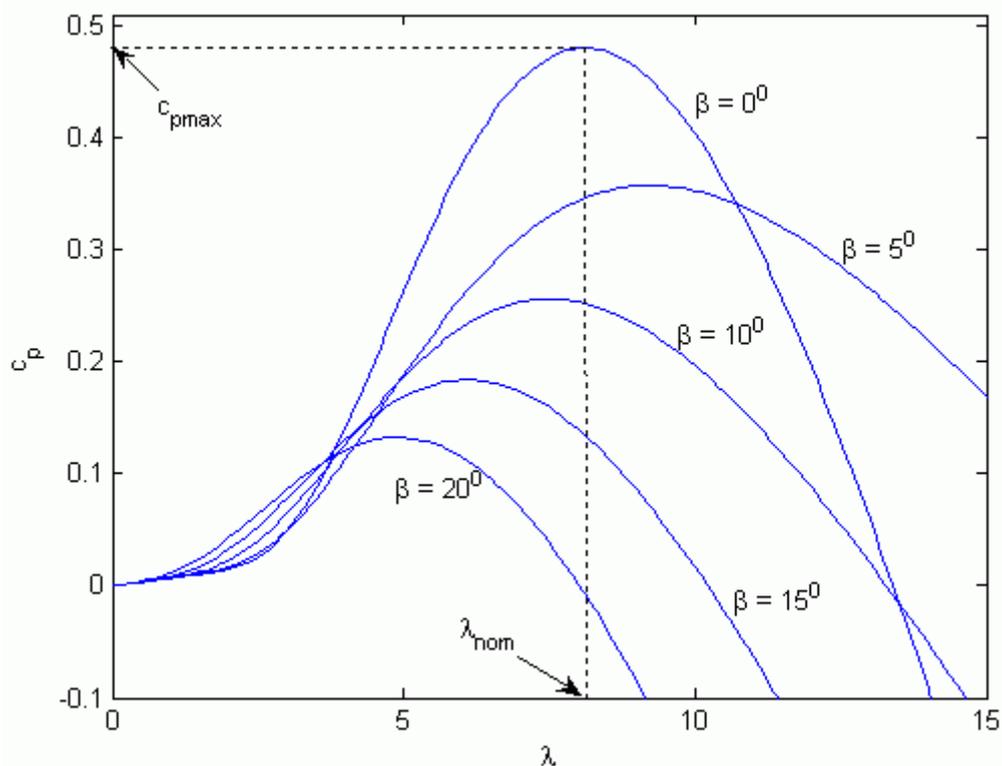
อัตราส่วนความเร็ว (Tip Speed Ratio, λ) บอกถึงสัดส่วนระหว่างความเร็วปลายใบพัดและความเร็วลม

นิยามโดยสมการ

$$\lambda = \frac{\text{Turbine Tip Speed}}{\text{Wind Speed}}$$

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v_w} \quad (2.19)$$

เมื่อ ω_t คือความเร็วรอบของโรเตอร์กังหันลม (rad/s) และ v_w คือความเร็วลม (m/s)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง c_p - λ ที่ค่ามุม pitch β ต่างๆ

ถ้า Tip Speed Ratio ต่ำเกินไป ลมที่พัดผ่านพื้นที่หน้าตัดของกังหันลมจะผ่านใบพัดกังหันโดยสัมผัสใบพัดของกังหันน้อยซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำต่อใบพัดน้อย ถ้า Tip Speed Ratio มากเกินไป กังหันจะต้านลมมากเกินไปซึ่งจะทำให้ลมหมุนอ้อมไปรอบๆใบพัด แทนที่จะหมุนใบพัด

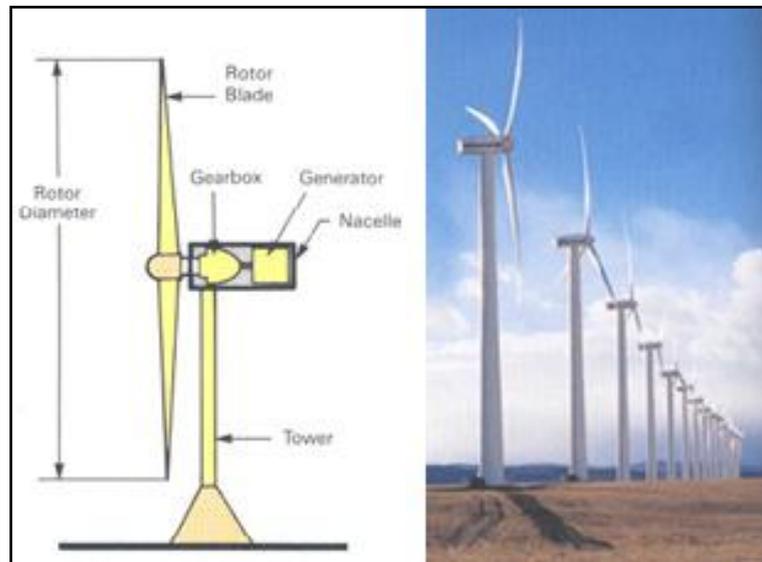
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง c_p - λ ที่ค่ามุม pitch β ต่างๆ ค่าสูงสุดของ $c_p = 0.48$ ที่มุม pitch, $\beta = 0^\circ$ และอัตราส่วนความเร็ว, $\lambda = 0.81$ ซึ่งค่า λ นี้ถูกใช้เป็นค่า nominal λ_{nom} จะเห็นได้ว่ากรณีนี้ค่า c_p สูงสุดเพียง 0.48 ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ได้ทางทฤษฎีของ Betz

2.3.2) กังหันลม

กังหันลมอาจแบ่งประเภทของการจำแนกชนิดออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

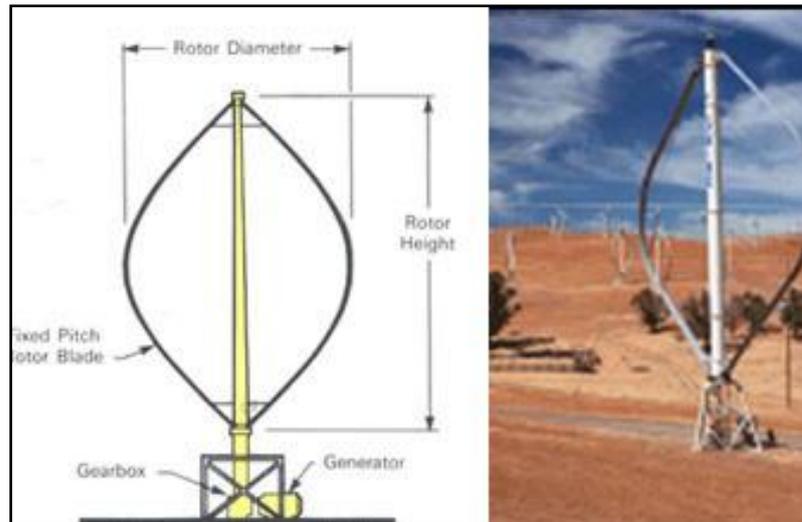
1) จำแนกตามลักษณะการวางตัวของแกนหมุน แบบแกนนอน หรือแกนตั้ง

- **กังหันลมแบบแกนนอน** หมายถึงกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของกระแสลม โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลมเรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง เช่น ลมพายุและตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรง กังหันลมแบบแกนนอนได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมพروبเพลลเลอร์ (Propeller) และกังหันลมใบเสื่อลำแพน เป็นต้น



รูปที่ 2.12 กังหันลมแบบแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)

- **กังหันลมแบบแกนตั้ง** เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง กังหันลมแบบแกนตั้งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลมปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมแบบนี้้น้อยมาก อาทิเช่น กังหันลมแดร์เรียส (Darrius) หรือกังหันลมซาโวเนียส (Savonius) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)

2) จำแนกตามลักษณะของแรงขับที่กระแสลมกระทำต่อกังหัน ดังนี้

- การขับด้วยแรงยก (Lift Force)
- การขับด้วยแรงฉุด หรือแรงหน่วง (Drag Force)

การจำแนกในข้อที่ 1 เป็นวิธีที่เด่นชัด สามารถเข้าใจได้ง่าย จึงนิยมมากกว่าแบบข้อ 2 ซึ่งต้องพิจารณาโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับ Aerodynamics ประกอบด้วย นอกจากนี้ก็ยังมีกังหันลมที่ไม่เข้าประเภททั้ง 2 ชนิดดังกล่าว อาทิเช่น กังหันลมเทอร์นาโด หรือกังหันลมที่เพิ่มดิฟฟิวเซอร์ หรือคอนเซนเตรเตอร์ (Diffuser or Concentrator)

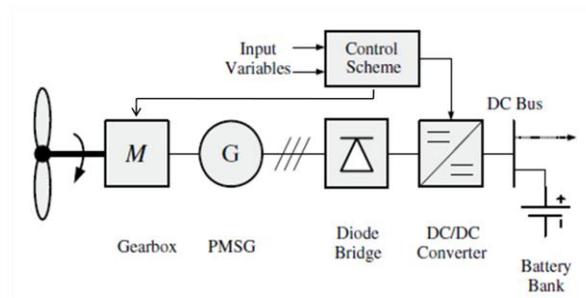
กังหันลมแบบแกนนอนเป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายรวมทั้งในการศึกษาครั้งนี้ด้วย อย่างไรก็ตามกังหันลมแบบแกนตั้งซึ่งได้รับการพัฒนามาในระยะหลังนี้ก็ได้รับความสนใจมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เพราะกังหันลมแบบนี้มีข้อดีอยู่อย่างน้อย 2 ข้อ เมื่อเทียบกับแบบแกนนอนกล่าวคือ

- ปกติแล้วกังหันลมแบบแกนนอน ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาลมเพื่อจะได้รับพลังงานมากที่สุด แต่กังหันลมแบบแกนตั้งไม่ต้องมีอุปกรณ์ชนิดนี้

- ระบบการส่งกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถติดตั้งอยู่บนระดับพื้นดินได้ซึ่งปกติแล้วกังหันลมแบบแกนนอนจะติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบการส่งกำลังติดกับกังหันซึ่งอยู่บนหอคอยสูง

บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม

การศึกษาระบบส่งกำลังที่ประยุกต์ใช้กับกังหันลมนี้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองลม แบบจำลองของใบพัด แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองของ bridge diode แบบจำลอง Buck/Boost Converter แบบจำลอง Inverter และแบบจำลองของโหลดทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆของกังหันลม

3.1 แบบจำลองลม

ความเร็วของลมถูกจำลองโดยสมมติว่าลมประกอบไปด้วย ความเร็วพื้นฐาน (v_b), ความเร็วลม gust (v_g), ความเร็วลมแบบ ramp (v_r), ความเร็วลมแบบสุ่ม random (v_n) ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$v_{wind} = v_b + v_g + v_r + v_n \quad (3.1)$$

3.2 แบบจำลองของกังหันลม

พลังงานที่แท้จริงที่ได้จากกังหันลมถูกจำลองโดยสมการที่ (2.3) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันเมื่อเราไม่เน้นที่ลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของใบพัด โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังลม C_p เป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของกังหันลม ค่า C_p เป็นฟังก์ชันของมุมพิท และ ค่า Tip Speed Ratio ดังแสดงในสมการที่ (2.4) กำลังที่กังหันลมผลิตได้เปลี่ยนเป็นแรงบิด ดังสมการที่ (3.2)

$$T_w = \frac{P_{wind}}{\omega_r} \quad (3.2)$$

เมื่อ T_w คือแรงบิดที่กระทำโดยลม, P_{wind} คือพลังงานลม และ ω_r คือความเร็วรอบของกังหันลม (rad/s)

3.2.1 แบบจำลองของชุดส่งกำลัง

$$n_g = \frac{\omega_g}{\omega_r} = \frac{T_w}{T_g} \quad (3.3)$$

$$J_{eq} \dot{\omega}_g = T_e - \frac{T_w}{n_g} - B_m \omega_g \quad (3.4)$$

เมื่อ J_{eq} คือโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน (Equivalent moment of inertia)

$$J_{eq} = J_g + \frac{J_w}{n_g^2} \quad (3.5)$$

เมื่อ J_g และ J_w เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโรเตอร์กังหันลมตามลำดับ

n_g เป็นอัตราทดเกียร์, T_e คือแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ω_g คือความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, $\dot{\omega}_g$ คือความเร่งเชิงมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG ในกรอบ synchronous reference frame

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_{ds} + L_{ls}} (-R_s i_d + \omega_e (L_{qs} + L_{ls}) i_q + u_d) \quad (3.6)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_{qs} + L_{ls}} (-R_s i_q - \omega_e [(L_{ds} + L_{ls}) i_d + \psi_f] + u_q) \quad (3.7)$$

เมื่อ u คือแรงดันไฟฟ้าด้านนอก, i คือกระแสไฟฟ้าด้านนอก, ψ_f คือเส้นแรงแม่เหล็กค้ำ, R_s คือความต้านทานของสเตเตอร์, L_{ds} และ L_{qs} คือค่าความเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกน d-q ตามลำดับ L_{ls} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลในสเตเตอร์, ω_e คือความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\omega_e = p \omega_g \quad (3.8)$$

เมื่อ p เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
แรงบิดทางไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก

$$T_e = 1.5p((L_{ds} - L_{ls})i_d i_q + i_q \psi_f) \quad (3.9)$$

3.2.3 แบบจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟส (bridge diode rectifier)

วงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดเป็นวงจรที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรม แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามารถคำนวณได้จาก

$$V_{d,in} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \quad (3.10)$$

เมื่อ $V_{d,in}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรเรียงกระแส หรือ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าของวงจรทบทระดับ (Buck/Boost Converter), V_{LL} เป็นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG

3.2.4 แบบจำลอง Boost Converter และการควบคุม

วงจร Boost Converter จะทำหน้าที่ให้แรงดันด้านออกมากกว่าแรงดันด้านเข้า การควบคุมจะทำได้โดยการควบคุมคาบเวลาการสวิตช์เมื่อแรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและออกแสดงได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\frac{V_{d,out}}{V_{d,in}} = \frac{1}{1-D} \quad (3.11)$$

เมื่อ $V_{d,out}$ เป็นแรงดันด้านออก และ D คืออัตราส่วนคาบเวลา ค่าพารามิเตอร์ของวงจรทบทหาได้จาก

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.12)$$

$$C = \frac{D}{Rf_s \frac{\Delta v}{v}} \quad (3.13)$$

เมื่อ L เป็นค่าความเหนี่ยวนำ, C เป็นค่าตัวเก็บประจุ Δv เป็นค่าระลอกของแรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับ, f_s เป็นความถี่ของสวิตช์วงจรทบทระดับ การควบคุมทำได้โดยการ ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในการทดลองนี้ค่า K_p , K_i ใช้การทดลอง Trial and Error

3.2.5 แบบจำลอง Inverter

วงจรอินเวอร์เตอร์มีการควบคุมสวิตช์แบบปรับความกว้างของพัลส์ การควบคุมนี้ใช้ดัชนีการมอดูเลชัน (m_a) ดังสมการที่ (14)

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} = \frac{V_{LLC}}{V_{d,out}} \quad (3.14)$$

เมื่อ $V_{control}$ คือค่ายอดของสัญญาณควบคุม, V_{tri} คือค่ายอดสัญญาณสามเหลี่ยม

อัตราส่วนมอดูเลชันความถี่ m_f ดังสมการที่ (3.15)

$$m_f = \frac{f_s}{f_f} \quad (3.15)$$

เมื่อ f_s เป็นความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์, f_f เป็นความถี่หลักมูล

3.3 การออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับกังหันลม

ระบบส่งกำลังที่ประยุกต์ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เพื่อรักษาความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG ให้อยู่ที่ระดับความเร็วที่ผลิตไฟฟ้าได้ดีที่สุด

3.3.1 พลังงานลม

พลังงานลมที่กังหันลมหนึ่งๆ สามารถผลิตได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3) โดยสัมประสิทธิ์ของกำลังที่กังหันลมผลิตได้, C_p , เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของกังหันลม

$$P_{wind} = \frac{1}{2} C_p \rho_{air} A_{wind}^3 \quad (2.3)$$

C_p เป็นฟังก์ชันของมุมพิท (pitch angle) ของใบพัด และ Tip Speed Ratio (λ)

$$C_p = f^n(\beta, \lambda) \quad (2.18)$$

ค่า C_p จะมีค่าได้มากที่สุดคือ 0.59 ตามกฎของ Betz (Betz Limit)

ค่า Tip Speed Ratio, λ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18)

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_{wind}} \quad (2.19)$$

เมื่อ ω_r คือความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของใบพัด (rad/s) R เป็นรัศมีของใบพัด(m), v_{wind} คือความเร็วของลม (m/s)

ค่า λ ที่มากที่สุดเท่ากับ 0.81 เมื่อ C_p เท่ากับ 0.59 ตามกฎของ Betz ดังนั้น

$$\omega_{r_optimal} = \frac{0.81}{R} v_{wind} \quad (3.16)$$

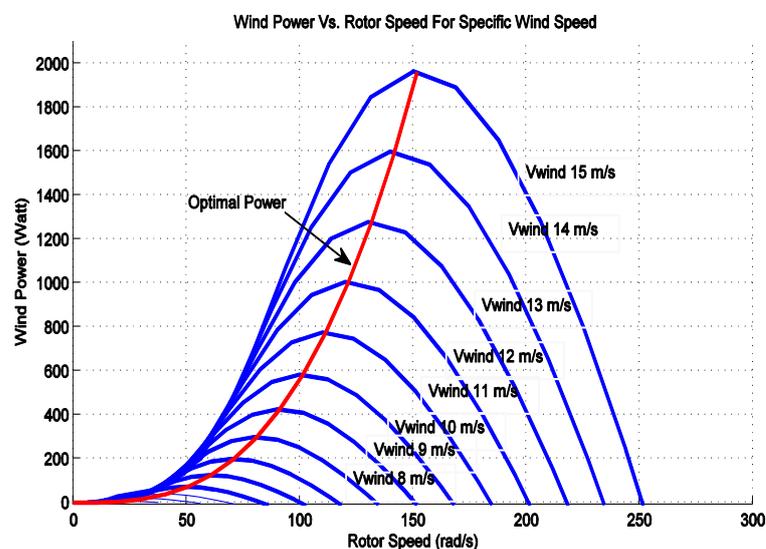
3.3.2 อัตราทดเกียร์

ระบบส่งกำลังที่ทำการออกแบบเป็นชุดเกียร์ระบบหมู่หรือชุดเกียร์ดาวพระเคราะห์ (Planetary Gear Set) เนื่องจากระบบเกียร์ชนิดนี้มีขนาดที่กะทัดรัด และสามารถให้อัตราทดที่ต้องการได้ อัตราทดนี้จะต้องสามารถรักษาความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ดีที่สุด ดังสมการที่ (3.20)

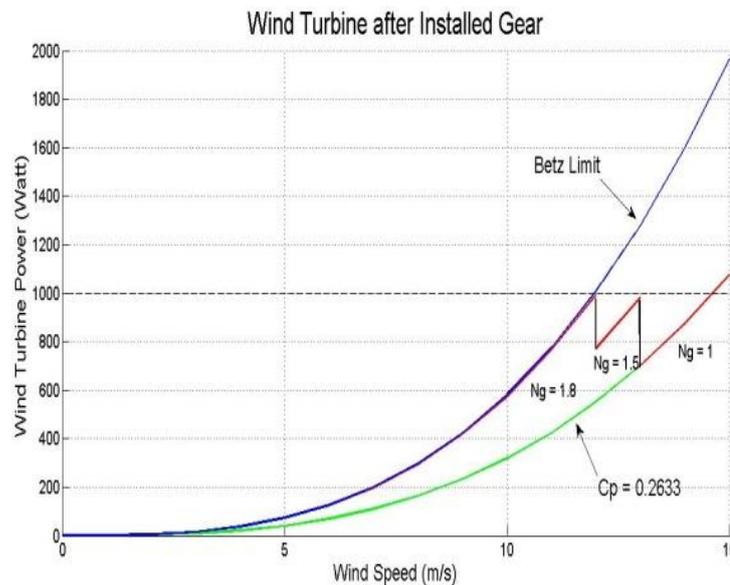
$$\omega_g = n_g \omega_{r_optimal} \quad (3.17)$$

ในการออกแบบระบบส่งกำลัง รูปที่ 3.2 แสดงพลังงานลมที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นความเร็วของโรเตอร์ที่ Optimal point ณ ความเร็วลมต่างๆ จะเป็นไปตามเส้นสีแดง ซึ่งเป็นจุดที่กักเก็บลมผลิตพลังงานได้ดีที่สุด หรือ $C_p = 0.48$

ถ้าหากความเร็วของโรเตอร์ของใบพัดไม่อยู่ที่จุด Optimal อัตราทด n_g จะทำการปรับเปลี่ยนให้ได้ความเร็วที่ดีที่สุด ส่งผลให้ สามารถรักษาความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ดีที่สุด รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า อัตราทด n_g ในช่วงความเร็วลมต่ำกว่า 10 m/s จะเท่ากับ 1.8 เพื่อเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้อยู่ที่ Optimal และเมื่อ ความเร็วลมอยู่ในช่วง 11-12 m/s อัตราทดเท่ากับ 1.5 เพราะความเร็วของโรเตอร์สามารถผลิตพลังงานได้มากที่สุดที่ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ ที่นี้คือ 1000 วัตต์ เมื่อความเร็วลมมากกว่า 12 m/s อัตราทดเท่ากับ 1 เพราะที่ความเร็วลมช่วงนี้มีพลังงานมากพอที่จะหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช่วง rated speed หรือช่วงความเร็วที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้ดีที่สุด จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยอัตราทด



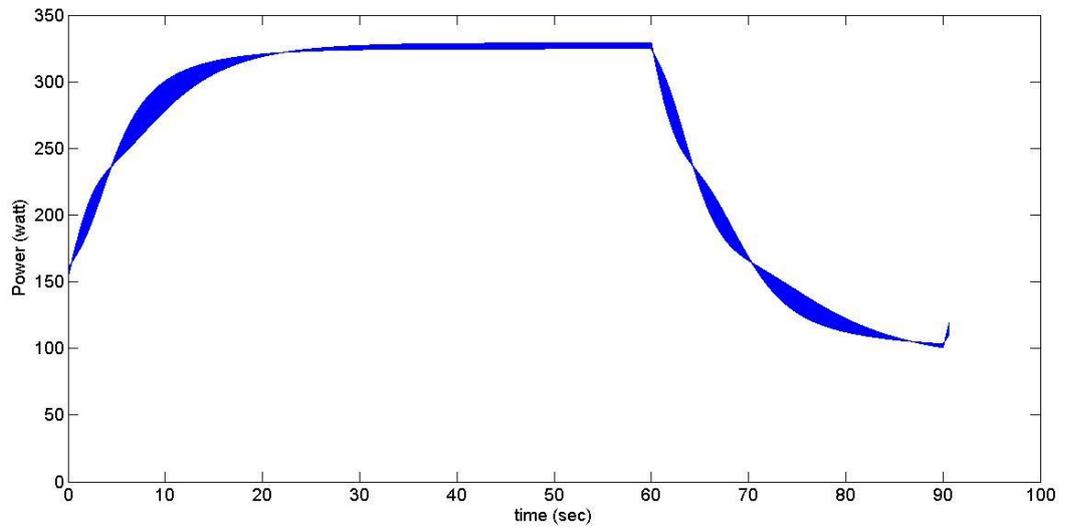
รูปที่ 3.2 Optimal Wind Power ที่ความเร็วลมต่างๆ



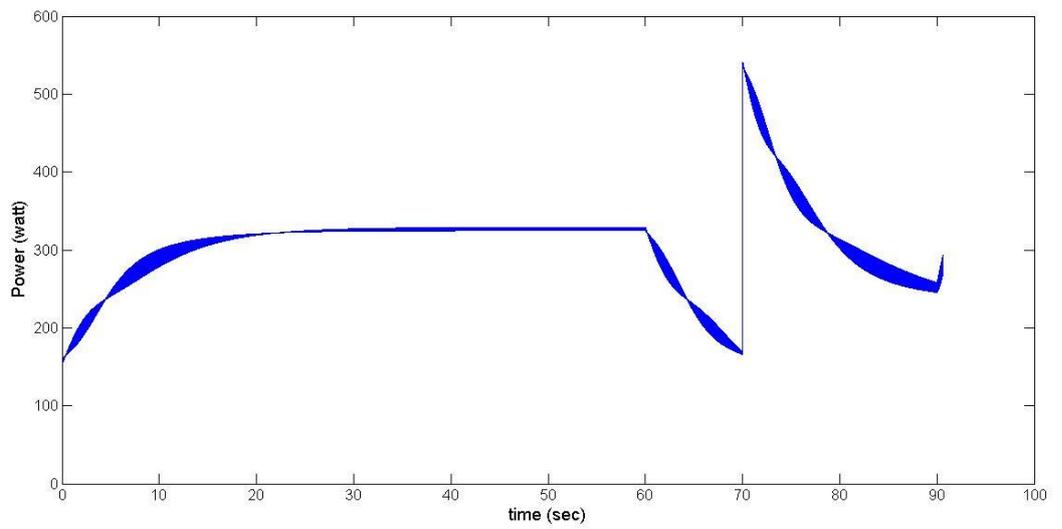
รูปที่ 3.3 พลังงานลมของกังหันลมที่ระดับความเร็วลมต่างๆ เมื่อมีการประยุกต์ใช้ชุดเกียร์ส่งกำลัง

ระบบส่งกำลังที่ได้จากขั้นตอนการออกแบบ คือ อัตราทด 1.8, 1.5 และ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เราได้นำไปประกอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสังเกตกำลังไฟฟ้าที่ได้ แต่เพื่อความสะดวกเราได้อัตราทดที่ใช้คือ 1.8 และ 1 เพื่อง่ายต่อการสังเกต ในการทดสอบเราใช้ความเร็วลมที่ 12 m/s และ 7 m/s โดยในช่วงแรกจาก 0 – 60 วินาที ลมมีความเร็ว 12 m/s หลังจากนั้นความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 7 m/s จนกระทั่งเวลาที่ 90 วินาที ความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 12 m/s จากการทดสอบพบว่าเมื่อไม่มีชุดส่งกำลัง กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 3.4 โดยในช่วงแรก 0-60 วินาที ความเร็วลม 12 m/s กำลังไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 300 watt จากนั้นเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 7 m/s กำลังไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว จนถึงประมาณ 100 watt ณ ที่ 90 วินาที ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 12 m/s ทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.4

เมื่อมีการติดตั้งชุดส่งกำลังเข้าไปในกังหันลม พบว่าจากสมการอัตราทดสมการที่ (20) อัตราทดในช่วงแรกที่ 12 m/s คือ 1 จากนั้นที่ เมื่อความเร็วลมลดลงเป็น 7 m/s อัตราทดเปลี่ยนเป็น 1.8 จากรูปที่ 3.5 ในช่วงแรก 0 – 60 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นเช่นเดียวกันกับ เมื่อกังหันลมไม่มีชุดส่งกำลัง เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 7 m/s กำลังไฟฟ้าลดลง ณ ที่ 70 วินาที อัตราทดเปลี่ยนเป็น 1.8 ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเพิ่มขึ้นกว่าเดิมอย่างมาก



รูปที่ 3.4 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 500 วัตต์ ที่ติดตั้งชุดส่งกำลัง



รูปที่ 3.5 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 500 วัตต์ ที่ติดตั้งชุดส่งกำลัง

3.4 สรุปผลการทดลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาพบว่าการใช้ชุดส่งกำลังที่มีอัตราทดที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ ดังที่ได้แสดงไว้ในผลการทดลอง โดยชุดส่งกำลังมีชุดเกียร์ระบบหมู้อ้อมระบบควบคุมคลัตช์ที่ใช้เปลี่ยนเกียร์ เมื่อลมนอยู่ในช่วงความเร็วต่ำ (1- 10 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องสูง เพื่อให้เพลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เมื่อลมนอยู่ในช่วงความเร็วปานกลาง (11- 12 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องปรับลงจากช่วงความเร็วลมต่ำ เพื่อให้เพลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เหมาะสม เมื่อลมนอยู่ในช่วงความเร็วสูง (มากกว่า 12 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องอยู่ที่เกียร์ต่ำเพื่อให้เพลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่ยังพอเหมาะพอสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยไม่เร็วเกินไปจนก้านลมต้องหยุดทำงานเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานหนักเกินไปจากการวิจัยครั้งนี้ทำให้พบว่าการศึกษาที่สามารถควบคุมอัตราทดของเกียร์ภายในชุดส่งกำลังให้เหมาะสมกับความเร็วลม จะสามารถรักษาความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้ก้านลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 4 การทดสอบกังหันลมและกังหันลมที่ติดตั้งระบบส่งกำลัง

ความเร็วรอบของใบพัดกังหันลมมีความสำคัญต่อการออกแบบ กังหันลมผลิตไฟฟ้ากับขนาดของเพลาส่งกำลัง, มุมบิดใบกังหัน, แรงแหวนหนีศูนย์กลาง, วัสดุที่ใช้สร้างใบกังหันลม ที่สำคัญที่สุด กังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ หมุนได้เป็นกี่เท่าของความเร็วลมที่มาปะทะเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนความเร็วปลายใบกังหันลม(Tip Speed Ratio) ซึ่งมีผลต่อการควบคุมการทำงาน และใช้ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าหมุนได้โดยการได้เปรียบเชิงกลของแรงยกตัว หรือประสิทธิภาพของแรงยกตัวของใบกังหัน หากลักษณะของใบกังหันลมสามารถได้เปรียบเชิงกล ในเรื่องของไหลของอากาศที่ไหลผ่านใบกังหันลมมากเท่าใด ก็จะทำให้รอบการทำงานของใบกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆสูงตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำอย่างประเทศไทย หรือในโซนเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ระหว่าง 3 – 4 เมตรต่อวินาที จึงจำเป็นต้องหารูปปร่างใบกังหันลมที่สามารถหมุนได้เร็วกว่าความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันให้สูง เพื่อเพิ่มจำนวนรอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการสร้างใบกังหันลมจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติความแข็งแรง และโมเมนต์ความเฉื่อย ซึ่งการนำไปสร้างให้มีขนาดเท่าของจริงขึ้นมาทดสอบ มีความยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายสูงมาก อีกทั้งใบพัดที่หมุนอยู่ที่ความเร็วลมต่างๆ มีอันตรายมาก โดยเฉพาะในสภาพพริโหลต ซึ่งใบพัดจะหมุนเร็วกว่าปกติ และหากแรงลมทำให้เกิดแรงผลึกมากกว่าแรงยกตัว จะเกิดมุมเขี้ยววิกฤต (stall angle) ซึ่งทำให้ใบกังหันฉีกขาด และโครงสร้างกังหันแตกหักได้ ดังนั้นในการทดลองจึงทำการจำลองหรือย่อส่วนกังหันลมลงมาขนาด 50 กิโลวัตต์ลงมา 12 เท่า เพื่อหาประสิทธิภาพและความเร็วรอบที่ดีที่สุดกับการออกแบบต่อไป

4.1 วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบประสิทธิภาพใบพัดกังหันลมมีหลายวิธีการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วพอจะสรุปได้ คือ 1) การทดสอบในอุโมงค์ลม 2) การทดสอบโดยการติดตั้งภายใต้สถานการณ์จริง และ 3) การทดสอบโดยใช้พาหนะควบคุมความเร็วลม วิธีการทดสอบที่เหมาะสมได้ถูกเลือกจากวิธีการทดสอบทั้งสาม โดยประเมินความเป็นไปได้ของวิธีการทดสอบแต่ละวิธีและนำมาเปรียบเทียบกัน โดยคำนึงถึงความพร้อมของกังหันลมและข้อจำกัดในเรื่องทรัพยากร ระยะเวลาดำเนินโครงการและทุนที่มีอยู่ โดยความพร้อมของห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ม.อุบลราชธานี มีความเหมาะสมกับวิธีการทดสอบแบบการทดสอบโดยใช้พาหนะควบคุมความเร็วลม โดยเฉพาะมีความเป็นไปได้ที่การทดสอบใบพัดกังหันลมสำหรับความเร็วลมระดับต่างๆบรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการ การทดสอบภายใต้การควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานของยานพาหนะที่จะขับเคลื่อนกังหันลมผ่านอากาศทำให้กังหันลมตอบสนองต่อโหลตอากาศพลศาสตร์ส่งผลให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีเหมาะสมตามคาดการณ์



รูปที่ 4.1 การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมในอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.2 การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมโดยการติดตั้งภายใต้สถานการณ์จริง



รูปที่ 4.3 การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมโดยใช้รถบรรทุกความคุมความเร็วลม

	ทดสอบในอุโมงค์ลม	ทดสอบโดยการติดตั้ง ภายใต้สถานการณ์จริง	ทดสอบโดยใช้ รถบรรทุกความคุม ความเร็วลม
ค่าใช้จ่ายเทียบกับ งบประมาณที่ได้รับ	1	1	5
สถานที่	1	4	4
รายละเอียดของข้อมูล ที่ต้องการ	5	2	3
ระยะเวลาดำเนิน โครงการ	2	2	5
สรุป	9	9	17

ระดับคะแนนที่ใช้ประเมินความเป็นไปได้ 5-มากที่สุด , 4- มาก , 3- ปานกลาง, 2- น้อย , 1- น้อย
ที่สุด

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกวิธีการทดสอบกังหันลม

พบว่า การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมโดยใช้รถบรรทุกทุกความคมความเร็วลมมีความเป็นไปได้มากที่สุด จึงเหมาะสมที่จะเลือกใช้ เมื่อคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนพบว่า มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ วิธีการทดสอบในอุโมงค์ลมมีค่าใช้จ่ายสูงที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบโดยการติดตั้งภายใต้สถานการณ์จริงคือวิธีที่ดีที่สุดเพราะจะได้ข้อมูลการทำงานกังหันลมตลอดปี แต่ว่าเราอาจจะไม่ได้ข้อมูลในช่วงช่วงของความเร็วมเพราะประเทศไทยมีความเร็วสูงสุดเฉลี่ยเพียง 6-8 m/s ตลอดปี

4.2 การสร้างเครื่องทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมโดยใช้รถบรรทุกติดตั้งกังหันลมในการควบคุมความเร็วลมได้รับเลือกเป็นวิธีการทดสอบ การทดสอบนี้สามารถกำหนดความเร็วลมสัมพันธ์กับความเร็วของรถบรรทุกซึ่งติดตั้งกังหันลมอยู่ วิธีนี้ได้มาจากวิธีการทดสอบกังหันลมของ National Renewable Energy Laboratory (NERL) ในการดำเนินการทดสอบความเร็วของรถบรรทุกจะถูกควบคุมและอุปกรณ์ต่างที่จำเป็นในการวัดจะถูกติดตั้งไว้กับตัวรถ รถบรรทุกที่ใช้ได้รับการตรวจสอบความพร้อมตามมาตรฐานกรมการขนส่งทางบก อุปกรณ์การจับเก็บข้อมูลที่เหมาะสมได้รับประเมินก่อนการติดตั้งจริง ในการทดสอบที่เกิดขึ้นจริง อุปกรณ์ถูกใช้ในการรวบรวมความเร็วลมความเร็ว ความเร็วในการหมุนของกังหันลมและพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยกังหันลมในระหว่างการทดสอบ จากข้อมูลเหล่านี้กราฟกำลังกังหันลมถูกสร้างขึ้น ผลของโครงการนี้ก็คือความสามารถในการประเมินผลการทำงานของการออกแบบกังหันลมในอนาคต

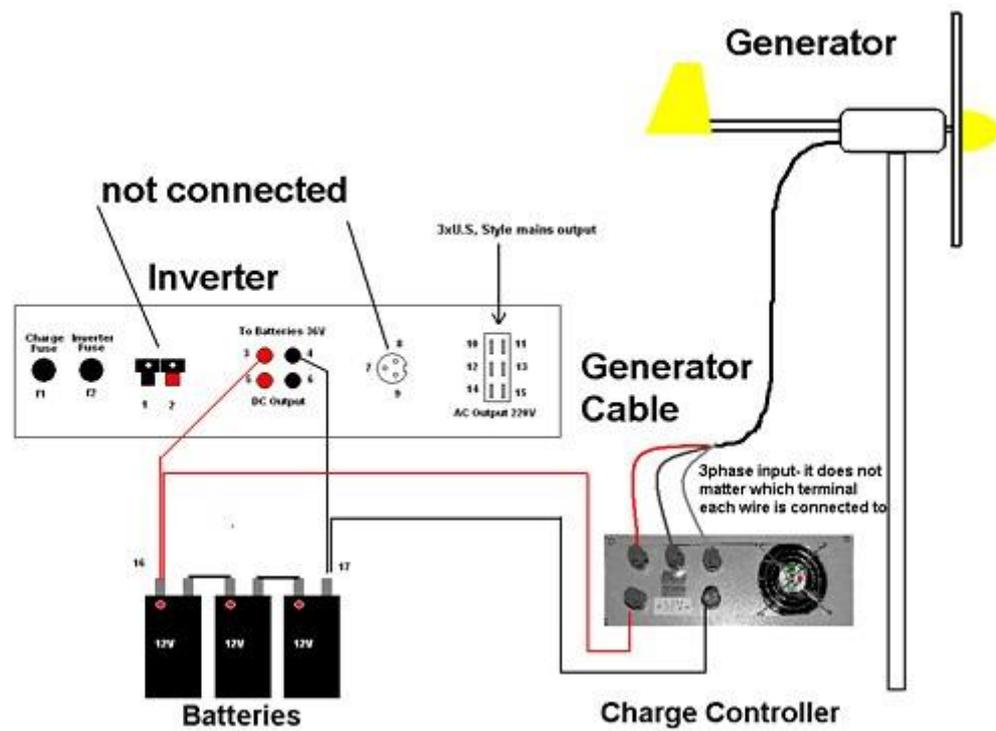


รูปที่ 4.4 รถทดสอบกังหันลมติดตั้งเครื่องทดสอบประสิทธิภาพใบพัดกังหันลม



รูปที่ 4.5 เครื่องทดสอบประสิทธิภาพใบพัดกังหันลม

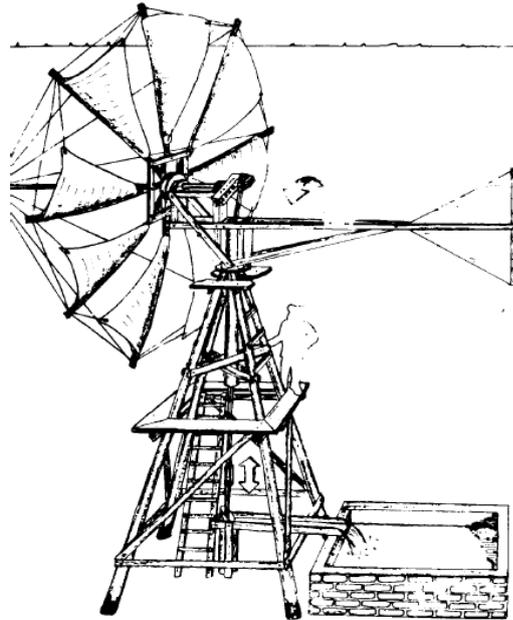
4.3 กังหันลมและอุปกรณ์ต่อพ่วง



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมขอแสดงผังวงจรเครื่องทดสอบประสิทธิภาพใบพัดกังหันลม

4.3.1 ใบพัด

ใบพัดที่ใช้ในการทดสอบ เป็นใบพัดชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในกังหันลมสูบน้ำเข้านาเกลือ ซึ่งใช้กันอยู่ในแถบจังหวัดสมุทรสงคราม และสมุทรสาคร ในต่างประเทศเรียกว่า Cretan Wind Turbine ดังรูป 4.6 ใบพัดนี้ ขนาดความยาว 2 เมตร โดยมีรายละเอียดในดังรูปที่ 4.7-8



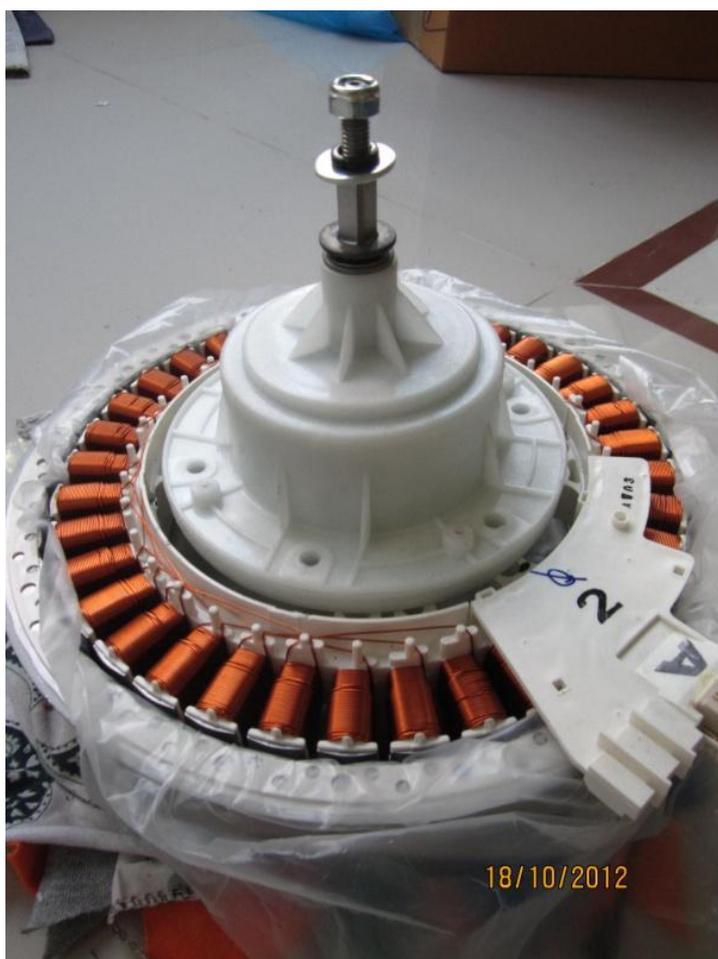
รูปที่ 4.7 กังหันลมสูบน้ำเข้านาเกลือ หรือ Cretan Wind Turbine



รูปที่ 4.8 กังหันลมที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพ

4.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบประยุกต์ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 240 VAC มอเตอร์ชุดนี้ใช้ในเครื่องซักผ้ายี่ห้อ TOSHIBA ดังนั้นเพื่อให้มีสมรรถนะเหมาะสมกับการทดสอบเราจึงทำการปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าใหม่ ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส 24 V โดยการต่อแบบ เดลต้า เพื่อให้เหมาะกับการทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำ



รูปที่ 4.9 มอเตอร์ที่ใช้ทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 24 V

การแปลงมอเตอร์เครื่องซักผ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ

โดยการต่อแบบ เดลต้า เพื่อให้เหมาะกับการทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำ มอเตอร์จะสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำได้ เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสสลับตามต้องการ



รูปที่ 4.10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 24 V หลังทำการดัดแปลง

4.3.3 ระบบส่งกำลัง

ระบบส่งกำลังใช้ชุดเกียร์เป็นเกียร์แบบดาวพระเคราะห์มีคลัทซ์ทางเดียว(planetary gear set) ต่อจากเพลาแก้งหันลมมายังเพลาของเจนเนอเรเตอร์โดยตรง มีอัตราทด 1 ต่อ 1 , 1 ต่อ 1.2, และ 1 ต่อ 1.4 ดังรูป4.11



รูปที่ 4.11 ชุดส่งกำลังจากเพลาแก้งหันลมมายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังที่ศึกษาออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ประกอบด้วยอัตราทดเกียร์ สามอัตราทด คือ 1:1, 1:1.2 และ 1:1.4 ชุดเกียร์เป็นเกียร์แบบดาวพระเคราะห์ที่มีคลัทซ์ทางเดียวช่วย ในการเปลี่ยนเกียร์ โดยสามารถเปลี่ยนเกียร์ขึ้นลงได้

4.3.4 เครื่องควบคุมการชาร์จไฟฟ้า

เครื่องชาร์จไฟฟ้าของบริษัท Naturalenergyth เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าหรือบ้างก็ เรียกว่า เครื่องควบคุมการชาร์จ Charger ชาร์จเจอร์ หรือบางทีก็เรียก Controller คอนโทรลเลอร์ บ้าง หรือบางที ก็เรียก Solar Charge หรือ Regulator จะเรียกว่าอะไรก็ตามชาร์จเจอร์นั้นถือ เป็น อุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในระบบเลยก็ว่าได้เพราะหากมีการทำงานที่ผิดพลาดแล้วละก็ระบบทั้งหมดก็จะ รวนไปด้วยจึงต้องเลือกใช้ชาร์จเจอร์ให้เหมาะ กับระบบที่ใช้ เพื่อการชาร์จแบตเตอรี่ที่ดีการเลือก ชาร์จเจอร์นั้นสำคัญที่สุด คือ ต้องหาขนาดและรุ่นที่เหมาะสมกับกัณฑ์ลมที่มีอยู่ และอีกประการคือ ฟังก์ชันที่เราต้องการใช้งานโดยชาร์จเจอร์บางรุ่นนั้นสามารถเลือกเป็นระบบ 12V. / 24V. ได้เลย หรือ ต่อพ่วง กับ DC Load โดยตั้งค่าให้เปิดแบบ Auto หรือ Manual ก็ได้และบางรุ่นก็ยังมีเครื่องแปลง ไฟ Inverter ในตัวอีกด้วย

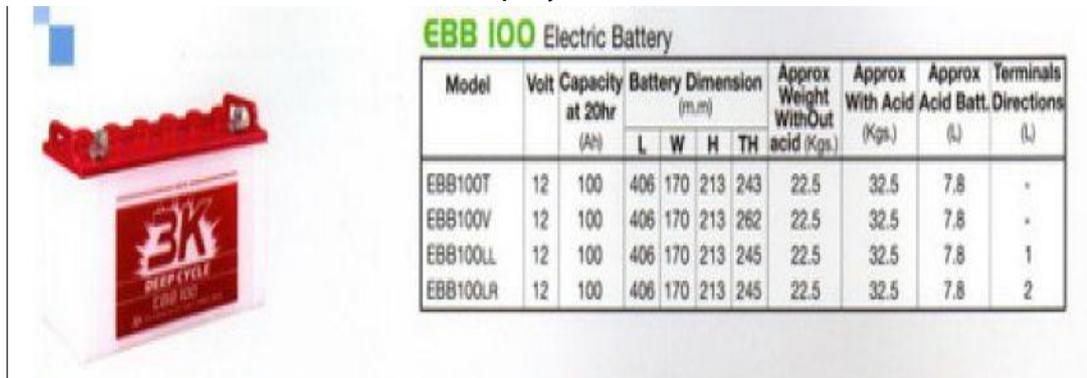


รูปที่ 4.12 เครื่องควบคุมการชาร์จไฟฟ้า

4.3.5 โหลด (แบตเตอรี่)

เป็นอุปกรณ์ชิ้นสำคัญในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าในธรรมชาติ พลังงานลมนั้นมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องเก็บสะสมพลังงานไว้ในแบตเตอรี่เสียก่อน จากนั้นจึงนำมาใช้งานได้ แบตเตอรี่ในท้องตลาดมีมากมายหลายชนิด แต่แบตเตอรี่ชนิดไหนที่ เหมาะสมกับการใช้งานในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยพลังงานลม ต้องได้รับการพิจารณาก่อนเลือกใช้ ในการทดสอบนี้เลือกใช้ แบตเตอรี่ชนิด DEEP CYCLE

แบตเตอรี่ 3K EBB125 12V 100 Ah Deep Cycle (100 แอมป์)



รูปที่ 4.13 แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle

4.4 ขั้นตอนการทดสอบ

4.4.1 การวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้า

การทดสอบมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ใช้โวลมิเตอร์และแอมมิเตอร์ต่อเข้ากับวงจรชาร์จไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่และเครื่องควบคุมการชาร์จไฟฟ้า
2. ใช้เครื่องวัดความเร็วลมวัดความเร็วลมไปพร้อมกับการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ในขณะที่รถวิ่งเพื่อควบคุมความเร็วลม
3. บันทึกผลของการทดลอง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วลมที่วัดได้

แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วัดอยู่ระหว่างวงจรชาร์จไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่และเครื่องควบคุมการชาร์จไฟฟ้า เพราะว่าไฟฟ้าที่เราสนใจจะเป็นประจุไฟฟ้าที่ถูกเก็บไว้ได้ในแบตเตอรี่ ส่วนที่ไม่สามารถชาร์จเก็บไว้นั้นเพราะว่ากังหันลมยังไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่จะทำงานได้หรืออยู่ในช่วงที่ไม่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้มากพอที่จะนำมาใช้ได้ช่วงนี้คือช่วง (cut in speed) ส่วนช่วงที่กังหันลมชาร์จไฟฟ้าได้คือช่วงปฏิบัติงาน (operating speed)

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่

ก. โวลต์มิเตอร์ ซึ่งใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างได้ โดยใช้วัดที่ตำแหน่งที่ต่อจากเครื่องควบคุมการชาร์จไปยังแบตเตอรี่

ข. แอมมิเตอร์ ซึ่งใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างได้ โดยใช้วัดที่ตำแหน่งที่ต่อจากเครื่องควบคุมการชาร์จไปยังแบตเตอรี่เช่นเดียวกับโวลมิเตอร์

ค. เครื่องแปลงสัญญาณไฟฟ้า ใช้ควบคุมสัญญาณไฟฟ้าในช่วง $-5.0 - 5.0$ V เป็นการป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเกินพิกัดที่เครื่อง Datalogger จะทนไหว และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดแก่เครื่องมือ โดยมีรายละเอียดการทำงานระบุใน Appendix

ง. Graptech midi logger GL820 ใช้เก็บข้อมูลที่ได้ในระหว่างดำเนินการทดสอบกักหนวล ตามช่วงความเร็วลมขนาดต่างๆ โดยมีรายละเอียดของเครื่องตาม Appendix

4.4.2 การวัดความเร็วลมและการควบคุม

การวัดความเร็วลมทำได้หลายแบบ เช่นใช้ Hot wire anemometer แต่ การวัดในสถานการณ์จริงควรใช้ Anemometer แบบถ้วยจะได้ค่าที่แม่นยำกว่า เพราะแบบ Hot wire anemometer นิยมใช้ในการวัดความเร็วลมในอุโมงค์ลม

การควบคุมความเร็วของลมที่ทำให้เกิดโหลดอากาศพลศาสตร์แก่ใบพัดกังหันลมนั้น ทำได้โดยการควบคุมความเร็วของรถเปรียบเทียบกับความเร็วลมที่อ่านได้จากเครื่องวัดความเร็วลมที่ติดตั้งอยู่กับตัวรถ วิธีความเร็วลมจะถูกรักษาไว้ในช่วง ± 2 m/s

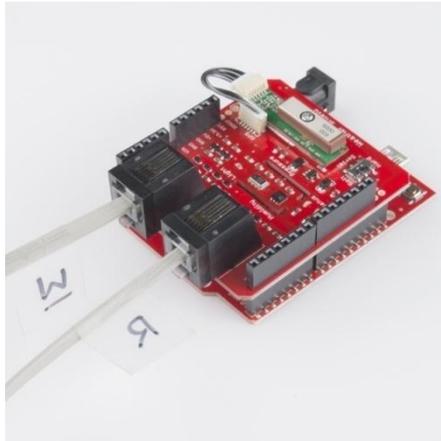
เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่

ก. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

เครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมเรียกว่า Anemometer เครื่องมือจะวัดความเร็วลมโดยอาศัยใบพัดทรงถ้วยโดยความเร็วรอบของใบพัดทรงถ้วยจะถูกคำนวณเป็นความเร็วลมโดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ทิศทางของลมถูกบันทึกโดยวัดจากมุมของแผงหาง (Vane) ที่ติดตั้งคู่กับใบพัดทรงถ้วย อย่างไรก็ตามทิศทางของลมไม่จำเป็นในการทดสอบนี้จึงไม่ได้เก็บข้อมูลไว้ สำหรับค่าความเร็วลมจะถูกบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ที่ต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.14 เครื่องวัดความเร็วลม Anemometer และทิศทางลม Vane



รูปที่ 4.15 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลความเร็วลม

4.5 วิธีการวิเคราะห์

4.5.1 วิเคราะห์กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสัมพันธ์กับความเร็วลม

- นำค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ระดับความเร็วต่างๆมาศึกษา โดยเขียนกราฟขึ้นมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากทางทฤษฎี ซึ่งควรจะได้ค่าที่อยู่ใกล้เคียงกัน

4.5.2 วิเคราะห์กำลังไฟฟ้า

- คำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าซึ่งจะใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกไว้ที่ความเร็วลมต่างๆมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ได้ ณ ความเร็วลมต่างๆจะบ่งบอกประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ซึ่งกังหันลมชนิดนี้เป็นกังหันลมประเภทความเร็วลมต่ำจะมีค่าประสิทธิภาพของกังหันลมอยู่ที่ 15 – 16 %

4.6 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของใบกังหันลม

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของใบกังหันลมนานาเกลื่อ ขนาด 100 วัตต์ ในการทำสอบได้ตั้งมุมบิดของใบกังหันลมที่โคนใบ 15 องศา ตลอดทั้งใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ทำการทดสอบที่ความเร็วลม 2 – 10 เมตรต่อวินาที ด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมแบบสนาม ซึ่งติดตั้งบนรถพ่วงลาก ผลการวิเคราะห์พบว่า ใบกังหันลมนานาเกลื่อสามารถหมุนที่ความเร็วลมต่ำ และมี cut in speed ต่ำ เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นกังหันลมมีความเสี่ยงต่อความเสียหายเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความต้านทานแรงลม (drag) สูง

จากการทดสอบกังหันลมด้วยชุดทดสอบ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 ดังนี้

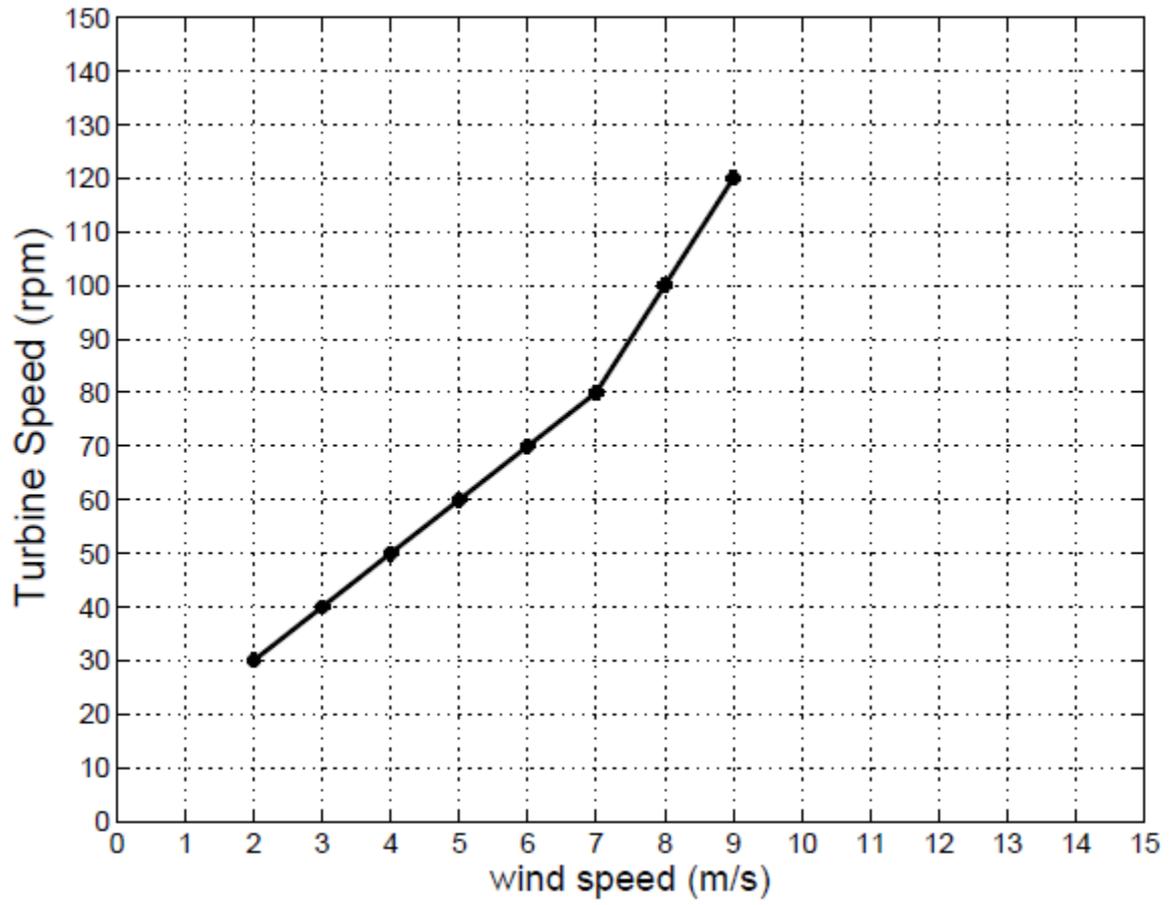
ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบ (rpm)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (W)
2	30	1.8	4	7.2
3	40	1.8	5	9
4	50	1.8	5.5	9.9
5	60	1.8	6.5	11.7
6	70	1.8	7	12.6
7	80	1.8	8	14.4
8	100	1.8	10	18
9	120	1.8	11	19.8

*Note: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย

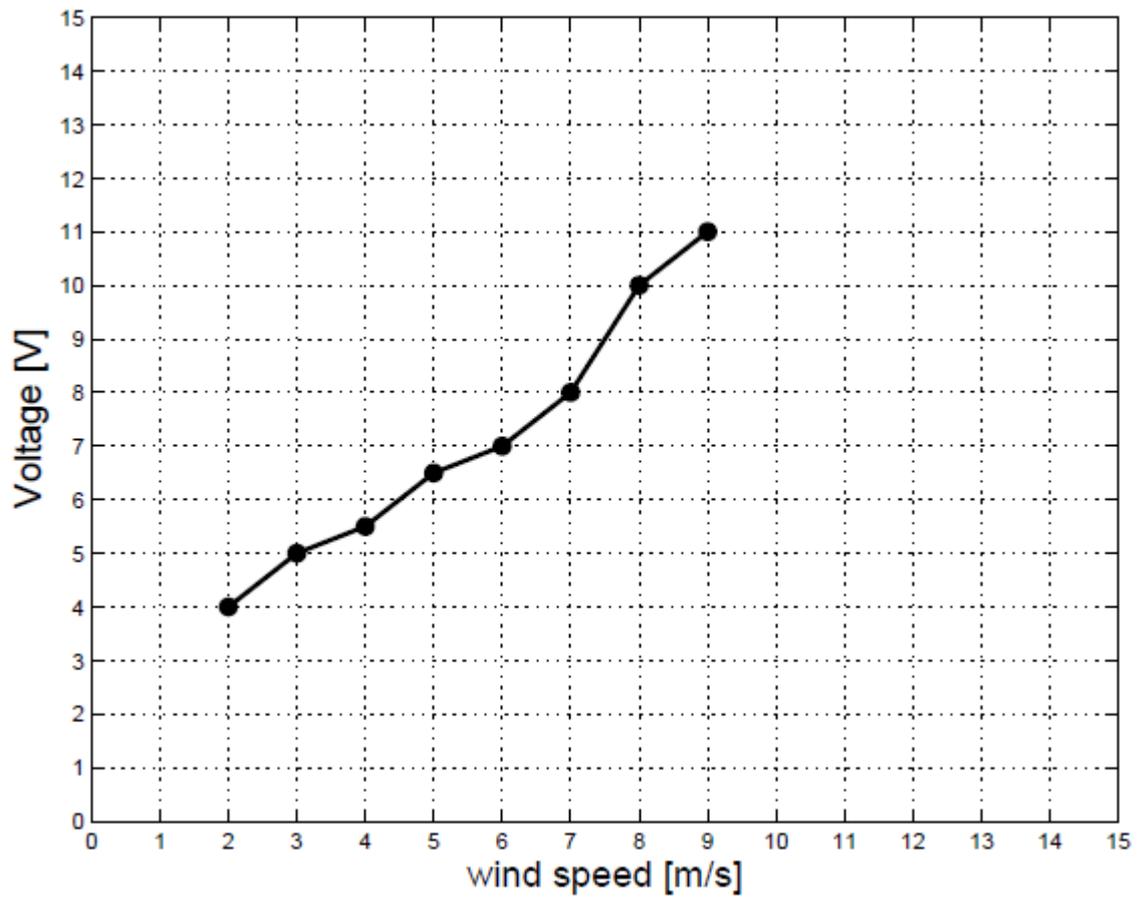
ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลอง

การบันทึกผลการทดลองนั้นทุกค่าได้มาจากการเฉลี่ยค่าในช่วงของความเร็วลมที่บันทึกได้ เช่น ความเร็วลม 2.6 – 3.4 m/s ค่าที่บันทึกคือ 3 m/s เป็นต้น เช่นเดียวกันกับค่าความเร็วรอบ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ที่วัดได้ เป็นการหาเฉลี่ยในช่วงความเร็วลมที่ทำการทดลอง

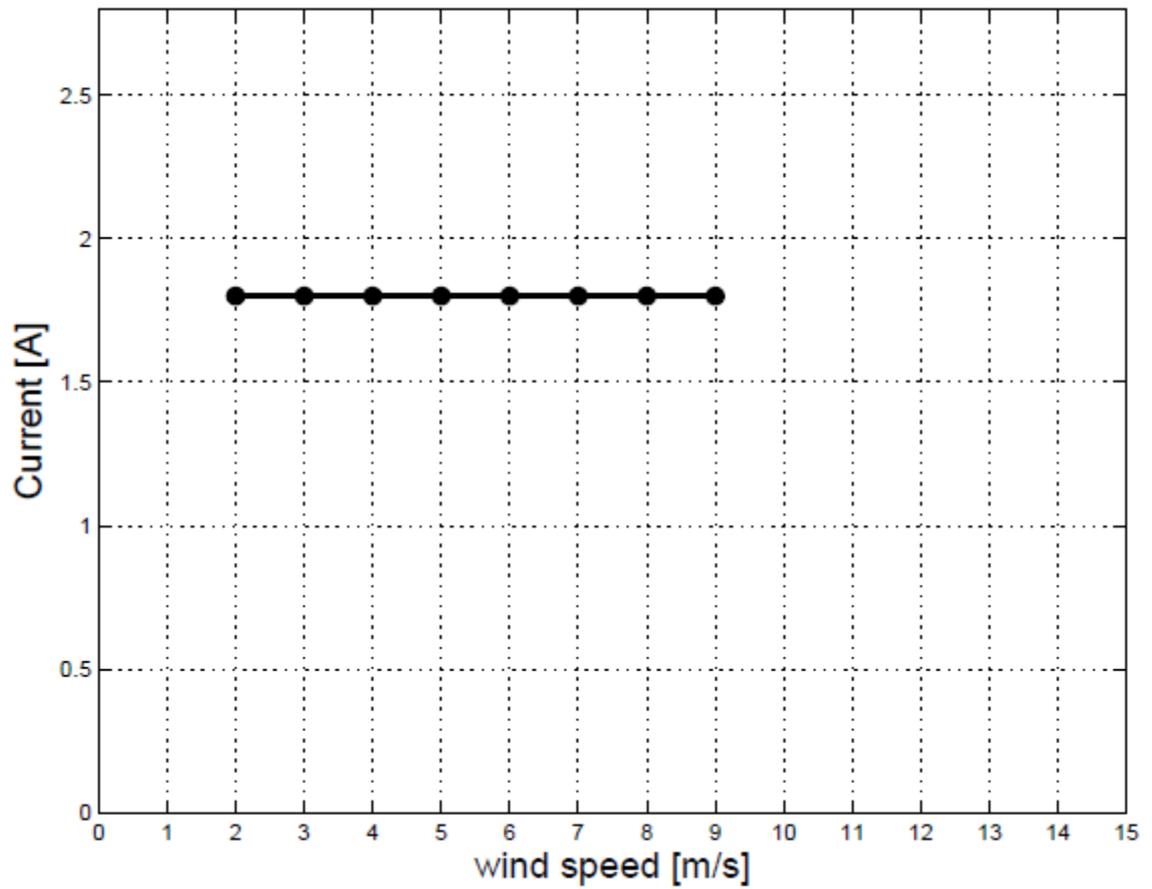
อัตราส่วนระหว่างเพลลาของกังหันลมและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ อัตราส่วน 1 : 1 ดังนั้นเสมือนว่ากังหันลมขับโรเตอร์โดยตรง คือกังหันหมุนด้วยความเร็วเท่าใด โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟการทดลองระหว่างความเร็วลมและความเร็วรอบกังหันลม



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าและความเร็วลม

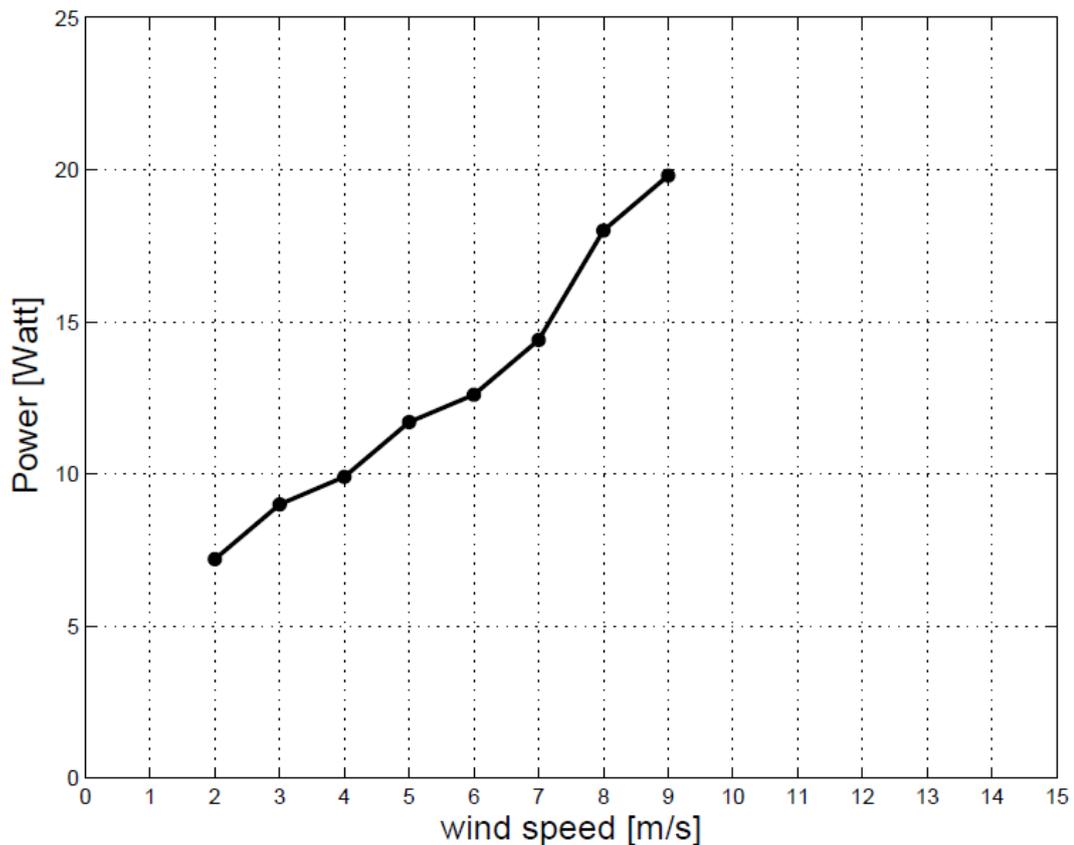


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟกระแสไฟฟ้าและความเร็วลม

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\text{กำลังไฟฟ้า (P)} = \text{กระแสไฟฟ้า (I)} \times \text{แรงดันไฟฟ้า (V)}$$

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้แสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วม



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าและความเร็วลม

การคำนวณหาแรงบิดที่เพลากังหันลม จากกำลังลมเทียบกับจากกำลังไฟฟ้า

หลักการคำนวณหาแรงบิดที่ใบพัดโดยประมาณโดยสมมติว่าไม่การสูญเสียใดๆในระบบ คือใช้ความจริงที่ว่ากำลังเท่ากับผลคูณของแรงบิดและความเร็วรอบ ดังนั้นหากเราทราบกำลังของกังหันลมที่ได้ออกมาเป็นเท่าใดเราสามารถคำนวณหาแรงบิดได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าหากกังหันลมมีความเร็วรอบที่โรเตอร์เป็น 15 รอบต่อนาที กังหันลมมีกำลัง 2,011 แรงแม้า ดังนั้น แรงบิดคือ

$$\text{กำลัง} = \text{ความเร็วรอบ} \times \text{แรงบิด}$$

ดังนั้น

$$\text{แรงบิด} = \text{กำลัง} / \text{ความเร็วรอบ}$$

ตัวอย่างเช่น กังหันลมมีกำลัง 19.8 W ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จะได้แรงบิด

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad \text{แรงบิด} &= 19.8 / (120 \times \frac{2\pi}{60}) \\ &= 1.58 \text{ N-m} \end{aligned}$$

การคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p)

ประสิทธิภาพของกังหันลมวัดจากความสามารถที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนพลังงานลมไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากน้อยเท่าใด ซึ่งคำนวณได้จาก

$$C_p = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้}}{\text{พลังงานลมที่มี}}$$

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบ (rpm)	rad/s	Tip speed ratio (TSR)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลัง ทางกล	แรงบิด (N)	กำลังลม	Cp
2	30	3.14	1.88	3.6	14.4	1.15	22.16	0.162
3	40	4.19	1.67	9	36	2.15	74.78	0.120
4	50	5.23	1.57	9.9	39.6	1.89	177.25	0.056
5	60	6.28	1.51	11.7	46.8	1.86	346.19	0.034
6	70	7.33	1.47	12.6	50.4	1.72	598.21	0.021
7	80	8.37	1.44	14.4	57.6	1.72	949.93	0.015
8	100	10.47	1.57	18	72	1.72	1417.97	0.013
9	120	12.56	1.67	19.8	79.2	1.58	2018.95	0.010

ตารางที่ 4.3 Tip Speed Ratio, กำลังทางกลและไฟฟ้า, กำลังลมและประสิทธิภาพของกังหันลม

จากข้อมูล Cp ในตารางพบว่ากังหันลมชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงความเร็วลมต่ำ นั่นคือ ที่ 2-5 m/s โดยเฉลี่ย ค่า Cp จะอยู่ที่ 0.125 และ ค่า Tip Speed Ratio (λ) เฉลี่ยอยู่ที่ 1.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น ค่า Tip Speed Ratio (λ) จะตกลงซึ่งเป็นเพราะใบพัดชนิดนี้ไม่สามารถเปลี่ยนโมเมนตัมของลม ให้เป็นแรงบิดได้ที่ช่วงความเร็วสูง (ช่วง 6-9 m/s) ทำให้ประสิทธิภาพกังหันลม Cp ตกลงอย่างมาก โดยปกติกังหันลมจะสามารถเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลได้ถึงร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่ง Betz ได้ศึกษาและพบว่า ประสิทธิภาพของกังหันลมในการเปลี่ยนแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานกล ถูกจำกัดอยู่เพียง 59 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อทฤษฎีกังหันลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าปกติจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ ประสิทธิภาพรวมของกังหันลมจะถูกจำกัดอยู่ที่ $0.70 \times 0.59 = 0.41$ หรือ 41 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้แสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วลม จากรูปที่ 4.16 กังหันลมขับโรเตอร์โดยตรง คือกังหันหมุนด้วยความเร็วเท่าใด โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากัน เพราะอัตราทดระหว่างเพลลาของกังหันลมและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้คือ อัตราส่วน 1 : 1 จากกราฟในรูปที่ 4.16 - 4.19 บ่งบอกได้ว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นความเร็วรอบของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น และหากว่ามีการเพิ่มอัตราทดระหว่างเพลลาของกังหันลมและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มากขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นตามไปด้วย เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอันนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ประมาณ 100 - 400 watt ที่ความเร็วรอบ 100 - 800 รอบต่อนาที

4.7 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมที่ติดตั้งชุดส่งกำลัง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของกังหันลมที่ติดตั้งชุดส่งกำลัง ขนาด 100 วัตต์ ในการทำสอบได้ตั้งมุมบิดของใบกังหันลมที่โคนใบ 15 องศา ตลอดทั้งใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ทำการทดสอบที่ความเร็วลม 2 – 10 เมตรต่อวินาที ชุดส่งกำลังมี เกียร์สามอัตราทด คือ เกียร์หนึ่งมีอัตราทด 1:1, เกียร์สองมีอัตราทด 1:1.2 และ เกียร์สามมีอัตราทด 1:1.4 ด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมแบบสนาม ซึ่งติดตั้งบนรถพ่วงลาก ผลการวิเคราะห์ พบว่า ใบกังหันลมสามารถหมุนที่ความเร็วลมต่ำ และมี cut in speed ต่ำ เมื่อความเร็วลม สูงขึ้นกังหันลมมีความเสี่ยงต่อความเสียหายเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความต้านทานแรงลม (drag) สูง จากการทดสอบกังหันลมด้วยชุดทดสอบ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.4

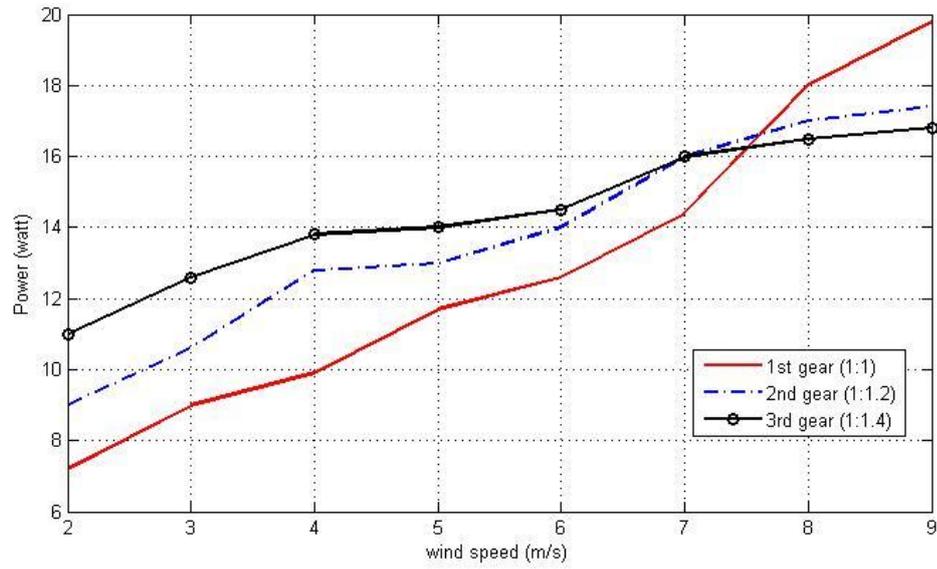
กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และกราฟรูปที่ 4.20 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วลม บ่งบอกได้ว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นความเร็วรอบของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยอัตราทดเกียร์ที่ใช้คือ เกียร์หนึ่งมีอัตราทดเป็น 1:1, เกียร์สองมีอัตราทดเป็น 1:1.2, เกียร์สามมีอัตราทดเป็น 1:1.4 โดยทำการทดสอบกังหันลมที่เกียร์ต่างๆ โดยเร็วจากความเร็วลม 2 m/s ไปยัง 9 m/s

หากว่ามีการเพิ่มอัตราทดระหว่างเพลากังหันลมและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มากขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากในช่วงความเร็วลมต่ำกว่า 6 m/s เมื่อความเร็วลม สูงขึ้นกว่า 6 m/s กังหันลมที่อัตราทด 1 : 1 จะผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า ที่เกียร์สองซึ่งมีอัตราทด 1: 1.2 และเกียร์สามซึ่งมีอัตราทด 1:1.4

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบ (rpm)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	Gear 1 กำลังไฟฟ้า (W)	Gear 2 กำลังไฟฟ้า (W)	Gear 3 กำลังไฟฟ้า (W)
2	30	1.8	4	7.2	7.2	9	11
3	40	1.8	5	9	9	10.6	12.6
4	50	1.8	5.5	9.9	9.9	12.8	13.8
5	60	1.8	6.5	11.7	11.7	13	14
6	70	1.8	7	12.6	12.6	14	14.5
7	80	1.8	8	14.4	14.4	16	16
8	100	1.8	10	18	18	17	16.5
9	120	1.8	11	19.8	19.8	17.4	16.8

*Note: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.4 บันทึกผลการทดลองกังหันลมติดตั้งชุดส่งกำลัง



รูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้ากับความเร็วลมที่อัตราเกียร์ทดต่างๆ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการวิจัย

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วลม จากรูปที่ 4.1 กังหันลมขับโรเตอร์โดยตรง คือกังหันหมุนด้วยความเร็วเท่าใด โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากัน เพราะอัตราทดระหว่างเพลลาของกังหันลมและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้คือ อัตราส่วน 1 : 1 จากกราฟในรูปที่ 4.1 และ 4.2 บอกได้ว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นความเร็วรอบของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้แสดงในตารางที่ 4.4 และกราฟรูปที่ 4.1 จากบทที่ 4 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วลม บ่งบอกว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นความเร็วรอบของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยอัตราทดเกียร์ที่ใช้คือ เกียร์หนึ่งมีอัตราทดเป็น 1:1, เกียร์สองมีอัตราทดเป็น 1:1.2, เกียร์สามมีอัตราทดเป็น 1:1.4 โดยทำการทดสอบกังหันลมที่เกียร์ต่างๆ โดยเร็วจากความเร็วลม 2 m/s ไปยัง 9 m/s

หากว่ามีการเพิ่มอัตราทดระหว่างเพลลาของกังหันลมและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มากขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากในช่วงความเร็วลมต่ำกว่า 6 m/s เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นกว่า 6 m/s กังหันลมที่อัตราทด 1 : 1 จะผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า ที่เกียร์สองซึ่งมีอัตราทด 1: 1.2 และเกียร์สามซึ่งมีอัตราทด 1:1.4

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบนี้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึงประมาณ 20 W ที่ความเร็วลม 9 m/s เมื่อระบบส่งกำลังมีอัตราทดหนึ่งต่อหนึ่ง อย่างไรก็ตามก็ดีเครื่องเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอันนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ประมาณ 100 - 400 watt ที่ความเร็วรอบ 100 - 800 รอบต่อนาที หากมีเพิ่มระบบส่งกำลังที่มีอัตราทดสูงขึ้น

แต่ที่ความเร็วลมสูง กังหันเสี่ยงต่อความเสียหายมาก หากแรงลมทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงยกตัว จะเกิดมุมเชิดวิกฤต (stall angle) ซึ่งทำให้ใบกังหันฉีกขาด และโครงสร้างกังหันแตกหักได้ ดังนั้นแทนที่จะให้กังหันลมทำงานที่ความเร็วลมสูง กังหันลมควรที่จะถูกพัฒนาให้ทำงานที่ความเร็วลมที่ต่ำ และเพิ่มขนาดของกังหันลม เพื่อเก็บพลังงานลมให้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.F. Hall and D. Chen, "Dynamic Optimization of Drivetrain Gear Ratio to Maximize Wind Turbine Power Generation, Part 1: System Model and Control Framework", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 135, (1), January 2013
- [2] Samanuhut P., and Atilla D., 2008. "Dynamics Equations of Planetary Gear Sets for Shift Quality by Lagrange Method" ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC2008), October 20–22, 2008 , Ann Arbor, Michigan, USA
- [3] Carlin, P.W., A.S. Laxson, and E.B. Muljadi, *The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology*. Wind Energy, 2003. 6: p. 129-151.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2546. แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย. กระทรวงพลังงาน.
- [5] Idan, M. and D. Lior, *Continuous Variable Speed Wind Turbine: Transmission Concept and Robust Control*. Wind engineering, 2000. 24(3): p. 151-767.
- [6] Idan, M., D. Lior, and G. Shaviv, *A Robust Controller for a Novel Variable Speed Wind Turbine Transmission*. Wind engineering, 2000. 24(3): p. 151-167.
- [7] Iqbal, M.T., A. Coonick, and L.L. Freris, *Dynamic Control Options for Variable Speed Wind Turbines*. Wind engineering, 1994(1): p. 1-12.
- [8] Samanuhut P., "Modeling and Control of Automatic Transmission with Planetary Gears for Shift Quality" Ph.D. dissertation, Mechanical and Aerospace Engineering, The University of Texas at Arlington, 2011
- [9] Mangialardi, L., and Mantriota, G., *Dynamic Behavior of Wind Power Systems Equipped with Automatically Regulated Continuously Variable Transmission*. Renewable energy, 1996. 7(2): p. 185-203.
- [10] Zhao, X. and P. Maissner, *A Novel Power Splitting Drive Train for Variable Speed Wind Power Generators*. Renewable energy, 2003. 28(13): p. 2001-2011.
- [11] Johnson, K., L. Fingersh, and A. Wright, *Controls Advanced Research Turbine: Lessons Learned During Advanced Controls Testing*. 2005, National Renewable Energy Laboratory.

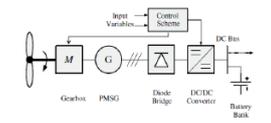
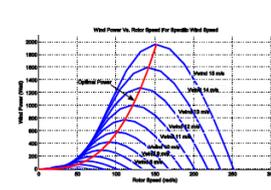
ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์

[1] ปฎิญา สمانุหัตต์, กฤตยา ไชยยศ, “การศึกษาและพัฒนาระบบส่งกำลังและระบบควบคุมของกังหันลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า”, การประชุมใหญ่โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา ครั้งที่ 3 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช วันที่ 9-11 มี.ค. 2558.

[2] ปฎิญา สมานุหัตต์, “การประยุกต์ใช้ระบบส่งกำลังในกังหันลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าในสภาวะ ความเร็วลมแปรปรวน”, การประชุมวิชาการระดับชาติ “นายเรือวิชาการ 58” ณ กองเรือดำน้ำ กองเรือยุทธการ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี, วันที่ 26-28 ส.ค. 2558.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.อุบลราชธานี

<p>ความสำคัญและที่มาของปัญหา</p> <p>ในปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นจำนวนมากทั้งในรูปแบบน้ำมันเชื้อเพลิง ถ่านหิน และพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น พลังงานทางเลือกหรือพลังงานจากชีวมวลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กังหันลม และพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยโซลาร์เซลล์ เหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับรางวัลชนะเลิศจากทางรัฐบาลอย่างแท้จริง</p> <p>เนื่องจากข้อจำกัดของพลังงานนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และข้อจำกัดของราคาชุดลดความเร็วของกังหันลมเนื่องจากพลังงานเป็นต้นทุนหลักในทุกธุรกิจ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตพลังงานทางเลือกยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อการแข่งขันในตลาดโลก โดยที่ประเทศไทยได้มีการผลิตพลังงานทางเลือกอย่างมีประสิทธิภาพ และได้รับผลตอบแทนที่คุ้มค่ากับการลงทุน</p> <p>โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่ในธรรมชาติ เพียงแต่ต้องอาศัยอุปกรณ์ในการเก็บเกี่ยวพลังงานลม และเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ จึงจะได้พลังงานไฟฟ้ามาใช้อย่างคุ้มค่าการลงทุน โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาในส่วนของการส่งกำลัง (drivetrain) โดยพัฒนาระบบเกียร์ และระบบควบคุมเกียร์</p>	<p>วิธีการดำเนินงาน</p> <p>การดำเนินการวิจัยใน 4 ขั้นตอนได้แก่</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) การออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับกังหันลมขนาดไม่เกิน 1000 วัตต์ 2) การสร้างระบบส่งกำลังที่ได้รับกรอบแบบ 3) การทดสอบระบบส่งกำลังดังกล่าวในกังหันลมต้นแบบ 4) การวิเคราะห์ผลการดำเนินงานเพื่อพัฒนาต่อไป <p>โดยการวิจัยในขั้นตอนที่ 1 นั้นจะศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาด 1000 วัตต์ ซึ่งมีระบบย่อยคือ ลม ใบพัด กังหันลม ชุดเกียร์ระบบหมุน ชุดควบคุมชุดรีดเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ โหลดทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำการทดสอบในสภาวะจำลอง และปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบกังหันลม จนได้ ชุดส่งกำลังและชุดควบคุมที่ทำงานได้ดี จากนั้นจึงดำเนินการขั้นตอนที่ 2 การสร้างระบบส่งกำลัง จากนั้นขั้นตอนที่ 3 คือการทดสอบกังหันลมต้นแบบ และขั้นตอนที่ 4 คือการวิเคราะห์ผลการทดสอบ</p>	<p>ผลการทดลอง</p> <p>จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาด 1000 วัตต์ โดยชุดส่งกำลังมีชุดเกียร์ระบบหมุนระบบควบคุมชุดรีดที่ใช้เปลี่ยนเกียร์ พบว่ามีลมอยู่ในช่วงความเร็วต่ำ (1-12 เมตร/วินาที) อัตราของเกียร์ที่สูงซึ่งทำให้เพลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เมื่อลมอยู่ในช่วงความเร็วปานกลาง (12-14 เมตร/วินาที) อัตราของเกียร์ต้องปรับจากช่วงความเร็วลมต่ำเพื่อให้เพลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่เหมาะสม เมื่อลมอยู่ในช่วงความเร็วสูง (14-15 เมตร/วินาที) อัตราของเกียร์ต้องอยู่ที่เกียร์ต่ำเพื่อให้เพลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่เหมาะสมเพื่อสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยไม่เร็วเกินไปจนกังหันลมต้องหยุดทำงานเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานหนักเกินไป</p>
<p>วัตถุประสงค์</p> <ul style="list-style-type: none"> • เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าแก่กังหันลม ซึ่งระบบส่งกำลังแบบเดิมจะมีประสิทธิภาพต่ำ • เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่ควบคุมโดยอัตโนมัติแก่กังหันลมระบบส่งกำลังที่ได้รับกรอบแบบนี้จะสามารถควบคุมอัตราการผลิตไฟฟ้าตามความเร็วลมที่เปลี่ยนไป • กังหันลมที่ได้รับการคิดค้นระบบส่งกำลังแบบนี้หรือระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเดิม 	<p>พลังงานลม</p> $P_{wind} = \frac{1}{2} C_p \rho A v_{wind}^3$ $C_p = f^n(\beta, TSR)$ $C_{p_optimal} = 0.48 \quad TSR = \frac{\omega_r R}{v_{wind}}$ <div style="background-color: #90EE90; padding: 2px; display: inline-block;"> $\omega_{r_optimal} = \frac{TSR}{R} v_{wind}, \quad TSR_{optimal} = 0.81$ </div> <div style="background-color: #FFFF00; padding: 2px; display: inline-block; margin-top: 5px;"> $\omega_{generator} = \eta_g \omega_r_{optimal}$ </div>	<div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div>
<p>เอกสารอ้างอิง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) J.F. Hall and D. Chen, "Dynamic Optimization of Drivetrain Gear Ratio to Maximize Wind Turbine Power Generation, Part 1: System Model and Control Framework", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 135, (1), January 2013 2) Sanamthit P., and Ahilla D., 2008, "Dynamics Equations of Planetary Gear Sets for Shift Quality by Lagrange Method" ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC2008), October 20-22, 2008, Ann Arbor, Michigan, USA 3) Carlini, P.V., A.S. Laxson, and E.B. Mutjaji, <i>The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology</i>: Wind Energy, 2003, 6: p. 129-151. 	<div style="text-align: center;">  </div>	<p>สรุปผลการวิจัย</p> <p>จากการวิจัยครั้งนี้ทำให้พบว่าการที่สามารถควบคุมอัตราของเกียร์ภายในชุดส่งกำลังให้เหมาะสมกับความเร็วลม จะสามารถรักษาความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น</p>
<p>กิตติกรรมประกาศ</p> <p>งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติดอกไม้ได้สำนึกงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา</p>		

การประยุกต์ใช้ระบบส่งกำลังในกังหันลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ในสภาวะ ความเร็วลมแปรปรวน

Drivetrain Application in Wind Turbine to Increase Electricity Production Performance under Variable Wind Speed Condition

ดร.ปฏินญา สมานุหัตถ์¹
Dr. Patinya Samanuhut¹

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าแก่กังหันลม ซึ่งระบบส่งกำลังแบบเดิมจะมีประสิทธิภาพต่ำ เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่ควบคุมโดยอัตโนมัติแก่กังหันลม ระบบส่งกำลังที่ได้รับการออกแบบนี้จะสามารถควบคุมอัตราการผลิตไฟฟ้าตามความเร็วลมที่เปลี่ยนไป กังหันลมที่ได้รับการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบนี้พร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเดิม การดำเนินการวิจัยใน 4 ขั้นตอนได้แก่ 1) การออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับกังหันลมขนาดไม่เกิน 500 วัตต์ 2) การสร้างระบบส่งกำลังที่ได้รับการออกแบบ 3) การทดสอบระบบส่งกำลังดังกล่าวในกังหันลมต้นแบบ 4) การวิเคราะห์ผลการดำเนินงานเพื่อพัฒนาต่อไป โดยการวิจัยในขั้นตอนที่ 1 นั้นจะศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาด 500 วัตต์ ซึ่งมีระบบย่อยคือ ลมใบพัดกังหันลม ชุดเกียร์ระบบหมู ชุดควบคุมคลัตช์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ โหลดทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำการทดสอบในสภาวะจำลอง และปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบกังหันลม จนได้ ชุดส่งกำลังและชุดควบคุมที่ทำงานได้ดี จากนั้นจึงดำเนินการขั้นตอนที่ 2 การสร้างระบบส่งกำลัง จากนั้นขั้นตอนที่ 3 คือการทดสอบกังหันลมต้นแบบ และขั้นตอนที่ 4 คือการวิเคราะห์ผลการทดสอบผลการวิจัยพบว่า จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาด 500 วัตต์ โดยชุดส่งกำลังมีชุดเกียร์ระบบหมูพร้อมระบบควบคุมคลัตช์ที่ใช้เปลี่ยนเกียร์ พบว่าเมื่อลมอยู่ในช่วงความเร็วต่ำ (1- 10 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องสูงเพื่อให้เพลลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เมื่อลมอยู่ในช่วงความเร็วปานกลาง (11-12 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องปรับลงจากช่วงความเร็วลมต่ำเพื่อให้เพลลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เหมาะสม เมื่อลมอยู่ในช่วงความเร็วสูง (>12 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องอยู่ที่เกียร์ต่ำเพื่อให้เพลลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่ยังพอเหมาะสมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยไม่เร็วเกินไปจนกังหันลมต้องหยุดทำงานเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานหนักเกินไป จากการวิจัยครั้งนี้ทำให้พบว่า การที่สามารถควบคุมอัตราทดของเกียร์ภายในชุดส่งกำลังให้เหมาะสมกับความเร็วลม จะสามารถรักษาความเร็ว

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.อุบลราชธานี 85 ถ.สถลมารค ต.เมืองศรีไค อ.วารินชำราบ จ.

อุบลราชธานี 34190

Email: happypatin@gmail.com, 089-445-1082, 045-353-308

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: กังหันลม, ชุดส่งกำลัง, การควบคุม, เกียร์ระบบหมู่

Abstract

Wind turbine is a tool to extract energy from wind by converting it into mechanical energy and producing electrical energy at the generator. Generally, PMSG wind turbine system consists of a turbine blade, drivetrain, generator, converter, DC-DC boost/buck, inverter and transformer to grid network or battery storage. This paper presents the wind turbine using permanent magnetic synchronous generator (PMSG), due to its high efficiency at higher rating power output. The DC-DC boost converter controls the voltage at constant. Thus, the maximum power at instants wind speed can be achieved. The main contribution of this research is to install the gearbox in to the typical PMSG wind turbine. The gearbox control and DC-DC boost converter works together to achieve optimal operation, by maintaining Vdc at the constant level, which is maintaining the optimal rotor speed.

Keyword: Wind Turbine, Drivetrain, Control, Planetary Gear Set

บทนำ (Introduction)

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าแก่กังหันลม ซึ่งระบบส่งกำลังแบบเดิมจะมีประสิทธิภาพต่ำ เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่ควบคุมโดยอัตโนมัติแก่กังหันลม ระบบส่งกำลังที่ได้รับการออกแบบนี้จะสามารถควบคุมอัตราการผลิตไฟฟ้าตามความเร็วลมที่เปลี่ยนไป กังหันลมที่ได้รับการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบนี้พร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเดิม การดำเนินการวิจัยใน 4 ขั้นตอนได้แก่ 1) การออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับกังหันลมขนาดไม่เกิน 500 วัตต์ 2) การสร้างระบบส่งกำลังที่ได้รับการออกแบบ 3) การทดสอบระบบส่งกำลังดังกล่าวในกังหันลมต้นแบบ 4) การวิเคราะห์ผลการดำเนินงานเพื่อพัฒนาต่อไป โดยการวิจัยในขั้นตอนที่ 1 นั้นจะศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาด 500 วัตต์ ซึ่งมีระบบย่อยคือ ลมใบพัดกังหันลม ชุดเกียร์ระบบหมู่ ชุดควบคุมคลัตช์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ โหลดทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำการทดสอบในสภาวะจำลอง และปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบกังหันลม จนได้ ชุดส่งกำลังและชุดควบคุมที่ทำงานได้ดี จากนั้นจึงดำเนินการขั้นตอนที่ 2 การสร้างระบบส่งกำลัง จากนั้นขั้นตอนที่ 3 คือการทดสอบกังหันลมต้นแบบ และขั้นตอนที่ 4 คือการวิเคราะห์ผลการทดสอบผลการวิจัยพบว่า จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาด 500 วัตต์ โดยชุดส่งกำลังมีชุดเกียร์ระบบหมู่พร้อมระบบควบคุมคลัตช์ที่ใช้เปลี่ยนเกียร์ พบว่าเมื่อลมอยู่ในช่วงความเร็วต่ำ (1- 10 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องสูงเพื่อให้เพลลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เมื่อลมอยู่ในช่วงความเร็วปานกลาง (11- 12 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องปรับลงจากช่วงความเร็วลมต่ำเพื่อให้เพลลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เหมาะสม

เมื่อลมนอยู่ในช่วงความเร็วสูง (มากกว่า 12 เมตร/วินาที) อัตราตของเกียร์ต้องอยู่ที่เกียร์ต่ำเพื่อให้เพลาขับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่ยังพอเหมาะพอสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยไม่เร็วเกินไป จนกังหันลมต้องหยุดทำงานเพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานหนักเกินไป จากการวิจัยครั้งนี้ทำให้พบว่า การที่สามารถควบคุมอัตราตของเกียร์ภายในชุดส่งกำลังให้เหมาะสมกับความเร็วลม จะสามารถรักษาความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

วัตถุประสงค์

- เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าแก่กังหันลม ซึ่งระบบส่งกำลังแบบเดิมจะมีประสิทธิภาพต่ำ
- เพื่อพัฒนาระบบส่งกำลังที่ควบคุมโดยอัตโนมัติแก่กังหันลมระบบส่งกำลังที่ได้รับการออกแบบนี้จะสามารถควบคุมอัตราการผลิตไฟฟ้าตามความเร็วลมที่เปลี่ยนไป
- กังหันลมที่ได้รับการติดตั้งระบบส่งกำลังแบบนี้พร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเดิม

วิธีการศึกษา

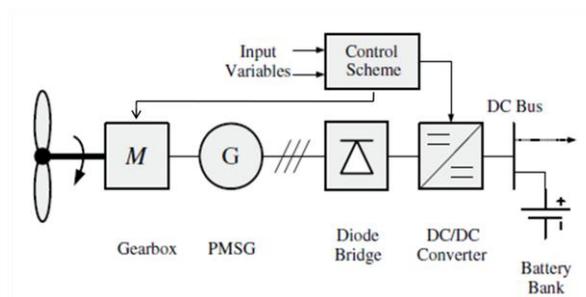
การดำเนินการวิจัยใน 4 ขั้นตอนได้แก่

- 1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาดไม่เกิน 1000 วัตต์
- 2) การออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับกังหันลมขนาดไม่เกิน 1000 วัตต์
- 3) การทดสอบระบบส่งกำลังดังกล่าวในสมการคณิตศาสตร์ของกังหันลมต้นแบบ
- 4) การวิเคราะห์ผลการดำเนินงานเพื่อพัฒนาต่อไป

โดยการวิจัยในขั้นตอนที่ 1 นั้นจะศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมขนาด 1000 วัตต์ ซึ่งมีระบบย่อยคือ ลม ใบพัดกังหันลม ชุดเกียร์ระบบหมุน ชุดควบคุมคลัทช์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ โหลดทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำการทดสอบในสภาวะจำลอง และปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบกังหันลม จนได้ ชุดส่งกำลังและชุดควบคุมที่ทำงานได้ดี การศึกษาอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม

1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม

การศึกษาระบบส่งกำลังที่ประยุกต์ใช้กับกังหันลมนี้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองลม แบบจำลองของใบพัด แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองของ bridge diode แบบจำลอง Buck/Boost Converter แบบจำลอง Inverter และแบบจำลองของโหลดทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงแผนผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆของกังหันลม

1 .1 แบบจำลองลม

ความเร็วของลมถูกจำลองโดยสมมติว่าลมประกอบไปด้วย ความเร็วพื้นฐาน(v_b), ความเร็วลม gust (v_g), ความเร็วลมแบบramp(v_r), ความเร็วลมแบบสุ่ม random (v_n) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$v_{wind} = v_b + v_g + v_r + v_n$$

(1)

1.2 แบบจำลองของกังหันลม

กังหันลมถูกจำลองโดยสมการที่ (16) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันเมื่อเราไม่เน้นที่ลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของใบพัด โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังลม C_p เป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของกังหันลม ค่า C_p เป็นฟังก์ชันของมุมพิท และ ค่า Tip Speed Ratio ดังแสดงในสมการที่ (2) กำลังที่กังหันลมผลิตได้เปลี่ยนเป็นแรงบิด ดังสมการที่ (2)

$$T_w = \frac{P_{wind}}{\omega_r}$$

(2)

เมื่อ T_w คือแรงบิดที่กระทำโดยลม, P_{wind} คือพลังงานลม และ ω_r คือความเร็วรอบของกังหันลม (rad/s)

1 .3 แบบจำลองของชุดส่งกำลัง

$$n_g = \frac{\omega_g}{\omega_r} = \frac{T_w}{T_g}$$

(3)

$$J_{eq} \dot{\omega}_g = T_e - \frac{T_w}{n_g} - B_m \omega_g$$

(4)

เมื่อ J_{eq} คือโมเมนต์ความเฉื่อยเสมือน (Equivalent moment of inertia)

$$J_{eq} = J_g + \frac{J_w}{n_g^2}$$

(5)

เมื่อ J_g และ J_w เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโรเตอร์กัณฑ์ลตามลำดับ n_g เป็นอัตราทดเกียร์, T_e คือแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ω_g คือความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, $\dot{\omega}_g$ คือความเร่งเชิงมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1. 4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG ในกรอบ synchronous reference frame

$$(6) \quad \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_{ds} + L_{ls}} (-R_s i_d + \omega_e (L_{qs} + L_{ls}) i_q + u_d)$$

$$(7) \quad \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_{qs} + L_{ls}} (-R_s i_q - \omega_e [(L_{ds} + L_{ls}) i_d + \psi_f] + u_q)$$

เมื่อ u คือแรงดันไฟฟ้าด้านนอก, i คือกระแสไฟฟ้าด้านนอก, ψ คือเส้นแรงแม่เหล็กค้ำ, R_s คือความต้านทานของสเตเตอร์, L_d และ L_q คือค่าความเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกน d-q ตามลำดับ L_{ls} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลในสเตเตอร์, ω_e คือความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$(8) \quad \omega_e = p \omega_g$$

เมื่อ p เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
แรงบิดทางไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก

$$(9) \quad T_e = 1.5p((L_{ds} - L_{ls})i_d i_q + i_q \psi_f)$$

1. 5 แบบจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟส (bridge diode rectifier)

วงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดเป็นวงจรที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรม แรงดันด้านนอกของวงจรเรียงกระแสสามารถคำนวณได้จาก

$$(10) \quad V_{d,in} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}$$

เมื่อ $V_{d,in}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของวงจรเรียงกระแส หรือ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าของวงจรทระดับ (Buck/Boost Converter), V_{LL} เป็นแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG

1. 6 แบบจำลอง Boost Converter และการควบคุม

วงจร Boost Converter จะทำหน้าที่ให้แรงดันด้านออกมากกว่าแรงดันด้านเข้า การควบคุมจะทำได้โดยการควบคุมคาบเวลาการสวิตช์เมื่อแรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและออกแสดงได้ดังสมการที่ (11)

$$\frac{V_{d,out}}{V_{d,in}} = \frac{1}{1-D}$$

(11)

เมื่อ $V_{d,out}$ เป็นแรงดันด้านออก และ D คืออัตราส่วนคาบเวลา
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรพบหาได้จาก

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f}$$

(12)

$$C = \frac{D}{Rf_s \frac{\Delta v}{v}}$$

(13)

เมื่อ L เป็นค่าความเหนี่ยวนำ, C เป็นค่าตัวเก็บประจุ Δv เป็นค่าระลอกของแรงดันด้านออกของวงจรพบ
ระดับ, f_s เป็นความถี่ของสวิตช์วงจรพบระดับ การควบคุมทำได้โดยการ ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในการทดลอง
นี้ค่า K_p , K_i ใช้การทดลอง Trial and Error

1. 7 แบบจำลอง Inverter

วงจรอินเวอร์เตอร์มีการควบคุมสวิตช์แบบปรับความกว้างของพัลส์ การควบคุมนี้ใช้ดัชนีการมอดูเลชัน (m_a) ดังสมการที่ (14)

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} = \frac{V_{LLC}}{V_{d,out}}$$

(14)

เมื่อ $V_{control}$ คือค่ายอดของสัญญาณควบคุม, V_{tri} คือค่ายอดสัญญาณสามเหลี่ยม
อัตราส่วนมอดูเลชันความถี่ m_f ดังสมการที่ (15)

$$m_f = \frac{f_s}{f_f}$$

(15)

เมื่อ f_s เป็นความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์, f_f เป็นความถี่หลักมูล

ขั้นตอนที่ 2 คือการออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับกังหันลม

ระบบส่งกำลังที่ประยุกต์ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เพื่อรักษาความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG
ให้อยู่ที่ระดับความเร็วที่ผลิตไฟฟ้าได้ดีที่สุด

2.1 พลังงานลม

พลังงานลมที่กังหันลมหนึ่งๆ สามารถผลิตได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16) โดยสัมพันธ์ของ
กำลังที่กังหันลมผลิตได้, C_p , เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของกังหันลม

$$P_{wind} = \frac{1}{2} C_p \rho_{air} A_{wind}^3$$

(16)

C_p เป็นฟังก์ชันของมุมพิท (pitch angle) ของใบพัด และ Tip Speed Ratio (TSR)

$$c_p = f^n(\beta, TSR)$$

(17)

ค่า C_p จะมีค่าได้มากที่สุดคือ 0.48 ตามกฎของ Betz (Betz Limit)

ค่า Tip Speed Ratio, TSR สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18)

$$TSR = \frac{\omega_r R}{v_{wind}}$$

(18)

เมื่อ ω_r คือความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของใบพัด (rad/s) R เป็นรัศมีของใบพัด(m), v_{wind} คือความเร็วของลม (m/s)

ค่า TSR ที่มากที่สุดเท่ากับ 0.81 เมื่อ C_p เท่ากับ 0.48 ตามกฎของ Betz ดังนั้น

$$\omega_{r_optimal} = \frac{0.81}{R} v_{wind}$$

(19)

2.2. อัตราทดเกียร์

ระบบส่งกำลังที่ทำการออกแบบเป็นชุดเกียร์ระบบหมีหรือชุดเกียร์ดาวพระเคราะห์ (Planetary Gear Set) เนื่องจากระบบเกียร์ชนิดนี้มีขนาดที่กะทัดรัด และสามารถให้อัตราทดที่ต้องการได้ อัตราทอนี้จะต้องสามารถรักษาความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ดีที่สุด ดังสมการที่ (20)

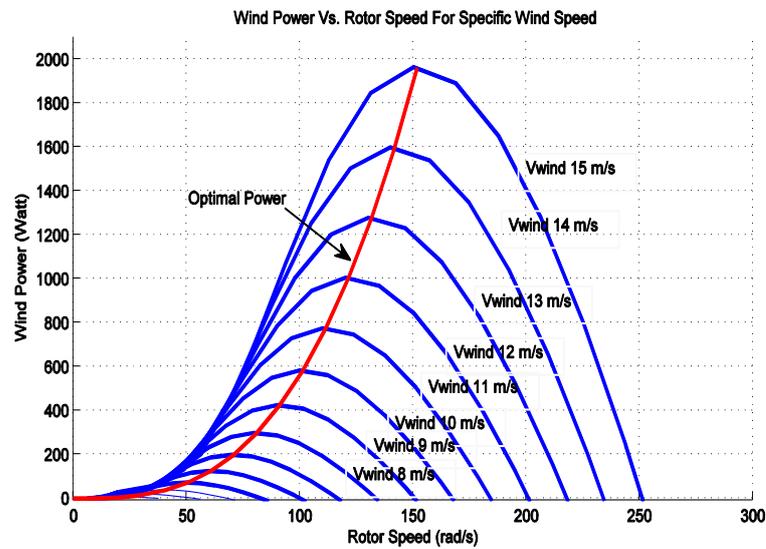
$$\omega_g = n_g \omega_{r_optimal}$$

(20)

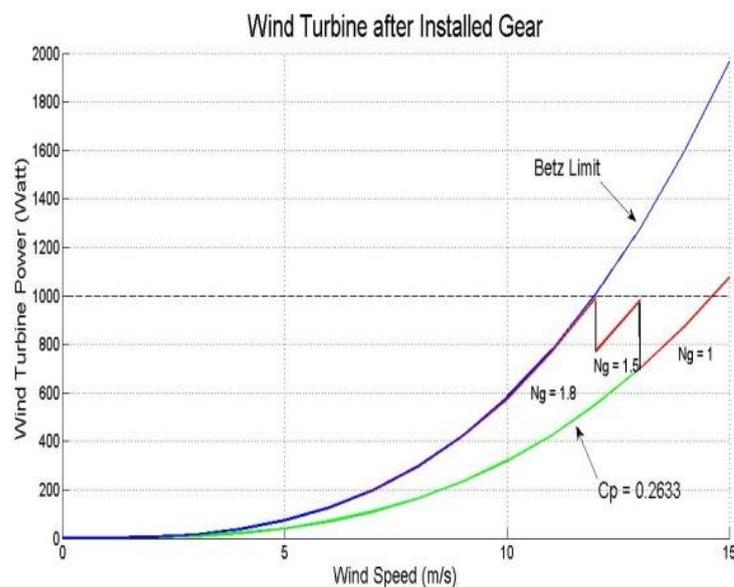
ผลการศึกษา (Results)

ในการออกแบบระบบส่งกำลัง รูปที่ 2 แสดงพลังงานลมที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อความเร็วลมเพิ่มสูงขึ้นความเร็วของโรเตอร์ที่ Optimal point ณ ความเร็วลมต่างๆ จะเป็นไปตามเส้นสีแดง ซึ่งเป็นจุดที่กั้นหั่นลมผลิตพลังงานได้ดีที่สุด หรือ $C_p = 0.48$

ถ้าหากความเร็วของโรเตอร์ของใบพัดไม่อยู่ที่จุด Optimal อัตราทด n_g จะทำการปรับเปลี่ยนให้ได้ความเร็วที่ดีที่สุด ส่งผลให้ สามารถรักษาความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ดีที่สุด รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า อัตราทด n_g ในช่วงความเร็วลมต่ำกว่า 10 m/s จะเท่ากับ 1.8 เพื่อเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้อยู่ที่ Optimal และเมื่อ ความเร็วลมอยู่ในช่วง 11 -12 m/s อัตราทดเท่ากับ 1.5 เพราะความเร็วของโรเตอร์สามารถผลิตพลังงานได้มากที่สุดที่ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ ที่นี้คือ 1000 วัตต์ เมื่อความเร็วลมมากกว่า 12 m/s อัตราทดเท่ากับ 1 เพราะที่ความเร็วความช่วงนี้มีพลังงานมากพอที่จะหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช่วง rated speed หรือช่วงความเร็วที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้ดีที่สุด จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยอัตราทด



รูปที่ 2 แสดง Optimal Wind Power ที่ความเร็วลมต่างๆ



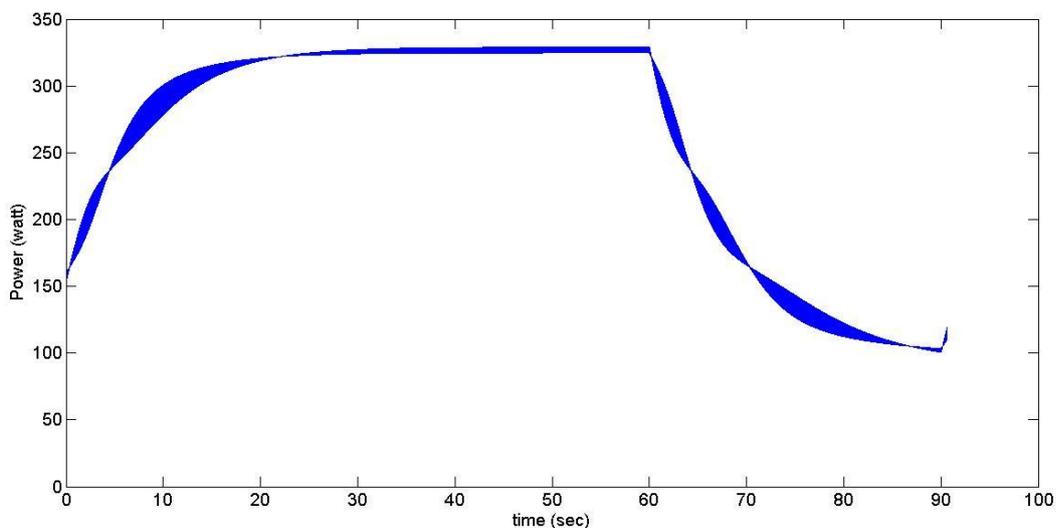
รูปที่ 3 พลังงานลมของกังหันลมที่ระดับความเร็วลมต่างๆ เมื่อมีการประยุกต์ใช้ชุดเกียร์ส่งกำลัง

ระบบส่งกำลังที่ได้จากขั้นตอนการออกแบบ คือ อัตราทด 1.8, 1.5 และ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3 เราได้นำไปประกอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสังเกตกำลังไฟฟ้าที่ได้ แต่เพื่อความสะดวกเราได้อัตราทดที่ใช้คือ 1.8 และ 1 เพื่อง่ายต่อการสังเกต ในการทดสอบเราใช้ความเร็วลมที่ 12 m/s และ 7 m/s โดยในช่วงแรกจาก 0 – 60 วินาที ลมมีความเร็ว 12 m/s หลังจากนั้น ความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 7 m/s จนกระทั่งเวลาที่ 90 วินาที ความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 12 m/s

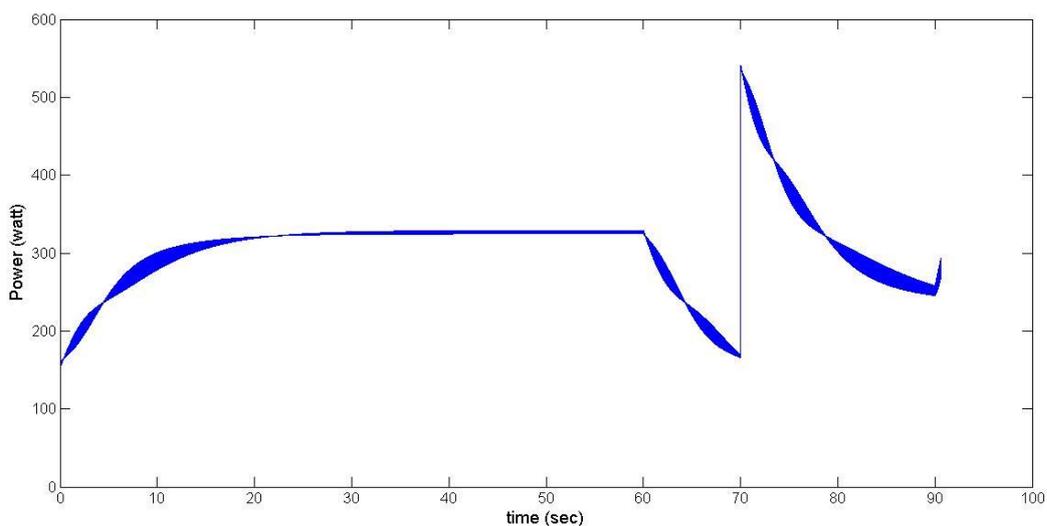
จากการทดสอบพบว่าเมื่อไม่มีชุดส่งกำลัง กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4 โดยในช่วงแรก 0-60 วินาที ความเร็วลม 12 m/s กำลังไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 300 watt จากนั้นเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 7 m/s

กำลังไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว จนถึงประมาณ 100 watt ณ ที่ 90 วินาที ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 12 m/s ทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4

เมื่อมีการติดตั้งชุดส่งกำลังเข้าไปในกังหันลม พบว่าจากสมการอัตราทดสมการที่ (20) อัตราทดในช่วงแรกที่ 12 m/s คือ 1 จากนั้นที่ เมื่อความเร็วลมลดลงเป็น 7 m/s อัตราทดเปลี่ยนเป็น 1.8 จากรูปที่ 5 ในช่วงแรก 0 – 60 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็นเช่นเดียวกันกับ เมื่อกังหันลมไม่มีชุดส่งกำลัง เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนเป็น 7 m/s กำลังไฟฟ้าลดลง ณ ที่ 70 วินาที อัตราทดเปลี่ยนเป็น 1.8 ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5 ซึ่งเพิ่มขึ้นกว่าเดิมอย่างมาก



รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 500 วัตต์ ที่ติดตั้งชุดส่งกำลัง



รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 500 วัตต์ ที่ติดตั้งชุดส่งกำลัง

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion)

การศึกษาพบว่าการใช้ชุดส่งกำลังที่มีอัตราทดที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ ดังที่ได้แสดงไว้ในผลการทดลอง โดยชุดส่งกำลังมีชุดเกียร์ระบบหมูพร้อมระบบควบคุมคลัตช์ที่ใช้เปลี่ยนเกียร์ เมื่อลมนอยู่ในช่วงความเร็วต่ำ (1- 10 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องสูงเพื่อให้เพลาชับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เมื่อลมนอยู่ในช่วงความเร็วปานกลาง (11- 12 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องปรับลงจากช่วงความเร็วลมต่ำเพื่อให้เพลาชับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วในขนาดที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เหมาะสม เมื่อลมนอยู่ในช่วงความเร็วสูง (มากกว่า 12 เมตร/วินาที) อัตราทดของเกียร์ต้องอยู่ที่เกียร์ต่ำเพื่อให้เพลาชับสามารถหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เร็วในขนาดที่ยังพอเหมาะสมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยไม่เร็วเกินไปจนกั้นลมต้องหยุดทำงาน เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานหนักเกินไป จากการวิจัยครั้งนี้ทำให้พบว่าการศึกษาที่สามารถควบคุมอัตราทดของเกียร์ภายในชุดส่งกำลังให้เหมาะสมกับความเร็วลม จะสามารถรักษาความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยจาก สกอ. ประจำปีงบประมาณ 2557 หมายเลขทุน 93562 คณะผู้วิจัยและผู้เขียนจึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง (References)

- 1) J.F. Hall and D. Chen, "Dynamic Optimization of Drivetrain Gear Ratio to Maximize Wind Turbine Power Generation, Part 1: System Model and Control Framework", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 135, (1), January 2013
- 2) Samanuhut P., and Atilla D., 2008. "Dynamics Equations of Planetary Gear Sets for Shift Quality by Lagrange Method" ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC2008), October 20–22, 2008 , Ann Arbor, Michigan, USA
- 3) Carlin, P.W., A.S. Laxson, and E.B. Muljadi, *The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology*. Wind Energy, 2003. 6: p. 129-151.

