

การพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าแรงดันต่ำด้วยกังหันลมแนวแกนตั้งขนาดกะทัดรัด

The Development of Low Voltage Generation System Using a Compact Vertical Axis Wind Turbine

พงษ์พันธุ์ อุทัยชุมทรัพย์* และ เพ็ญลักษณ์ ยิ้มเสมอจิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถ.พระรามที่ 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 E-mail: pongpun@ptwit.ac.th

Pongpun Rerkkumsup* and Penlapas Yimsamerjit

Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

833 Rama I Rd., Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand. E-mail: pongpun@ptwit.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการพัฒนากระบวนผลิตไฟฟ้าแรงดันต่ำโดยใช้กังหันลมแนวแกนตั้งขนาดกะทัดรัดเป็นตัวขับเคลื่อน ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยกังหันลมแนวแกนตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 1 เมตร เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร และชุดควบคุมโหลด ผลการจำลองและวิเคราะห์กังหันลมแนวแกนตั้งที่มีโครงสร้างต่างกัน 3 ชนิดด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks Flow Simulation แสดงให้เห็นว่ากังหันลมชนิด Lenz 3 ใบ มีสมรรถนะสูงสุด จึงถูกสร้างและต่อตรงเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร 5 เฟส 350 รอบ/ชด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นเริ่มผลิตแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 0.6 เมตร/วินาที และเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับที่สามารถนำไปชาร์จแบตเตอรี่เมื่อความเร็วลมตั้งแต่ 5.2 เมตร/วินาทีขึ้นไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะพัฒนาต่อและประยุกต์ใช้ในภาคสนามได้ในอนาคตอันใกล้

คำสำคัญ: กังหันลมแนวแกนตั้งขนาดกะทัดรัด, ระบบผลิตไฟฟ้าแรงดันต่ำ

Abstract

This research describes the development of the low voltage generation system using a compact vertical axis wind turbine (VAWT) as a prime mover. The

developed system consists of a VAWT with diameter of 1 meter and height of 1 meter, a permanent magnet alternator and a load control unit. The results of simulation and analysis of 3 VAWT with different structure using SolidWorks Flow Simulation software illustrate that 3 blades - Lenz type VAWT has the highest performance then it is constructed and direct coupled to a 5 phase permanent magnet alternator with 350 turn/coil. The experimental results show that the developed system starts to generate the electrical voltage at wind speed of 0.6 m/s and increases the electrical voltage to the level that can use for battery charging when the wind speed is of 5.2 m/s or higher. The experimental results illustrate that the developed system has sufficient efficiency to continuously develop and to apply in the sight in the near future.

Keywords: compact VAWT, low voltage generation system

1. บทนำ

วิกฤตการณ์พลังงานในประเทศ [1] ทำให้หลายภาคส่วนหันมาพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อใช้พลังงานทดแทนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมและเกิดการพัฒนางานอย่างต่อเนื่อง

Research Paper

*Corresponding author.

Received 13 Februaryr 2013

Accepted 30 April 2013

และติดตั้งเพื่อใช้งานในหลายพื้นที่ [2] อย่างไรก็ตาม ลมมีลักษณะเฉพาะตามแต่ภูมิประเทศและภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่ [3] – [4] ทำให้อุปกรณ์และชุดผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานลมเกิดการใช้งานที่ไม่คุ้มค่า [5] โดยเฉพาะอุปกรณ์จากต่างประเทศที่นำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยได้อย่างไรไม่เต็มประสิทธิภาพ ลมในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลเป็นลมความเร็วต่ำถึงปานกลาง และมีลมกรรโชกเป็นครั้งคราว [6] การติดตั้งกังหันลมแนวอนดองต้องการทำเลในการติดตั้งเป็นพิเศษ เพราะมีความสูงของเสามาก และสูงจนอาจเกิดอันตรายเมื่อกังหันลมโค่นล้มในเขตที่พักอาศัย ทางด่วนและทางพิเศษหลายเส้นทาง [7] มีความสูงเฉลี่ยกว่า 10 เมตร มีลมธรรมชาติพัดผ่านตลอดเวลา อีกทั้งความเร็วของรถยนต์ที่แล่นในช่วงที่การจราจรมีสภาพคล่องตัวทำให้เกิดลมวนวิ่งตามท้ายรถยนต์บนเส้นทางจราจรในปริมาณมากและความเร็วลมสูง

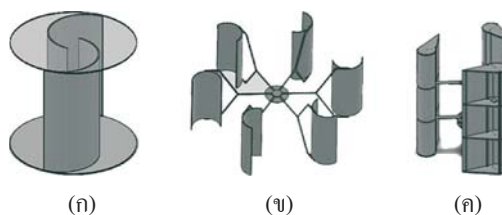
ด้วยข้อดีของกังหันลมแนวแกนตั้ง [8] ที่สามารถรับลมจากทุกทิศทาง คณะวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบ และสร้างระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้กังหันลมแนวแกนตั้งเป็นตัวขับเคลื่อน เพื่อประยุกต์ใช้กับความเร็วลมธรรมชาติและลมผวนบนทางด่วนในอนาคต

2. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม

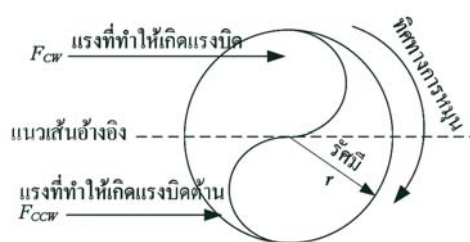
ระบบที่ออกแบบประกอบด้วยกังหันลมแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันต่ำ และชุดควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่และตัดต่อ โหลดในระบบผลิตไฟฟ้า

2.1 กังหันลมแนวแกนตั้ง

กังหันลมแนวแกนตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ความสูง 1 เมตร 3 ชนิด ได้แก่ ชนิด Savonius 2 ใบ ชนิด C 6 ใบ และ ชนิด Lenz 3 ใบ ถูกออกแบบและวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการปะทะของลมด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks Flow Simulation [9] ดังแสดงตัวอย่าง



รูปที่ 1 กังหันลมแนวแกนตั้งชนิด (ก) Savonius 2 ใบ (ข) C 6 ใบ และ (ค) Lenz 3 ใบ



รูปที่ 2 แนวคิดการวิเคราะห์แรงบิดของกังหันลม

ในรูปที่ 1 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบศักยภาพของกังหันลมก่อนทำการสร้างขึ้นทดสอบคำนึงถึงตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ ความเร็วรอบเชิงมุม (Angular velocity, ω) และแรงบิด (Torque, T) โดยที่

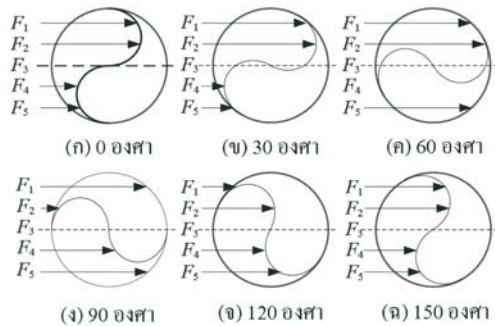
$$\omega \propto \frac{v}{r_e} \quad (1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วลมในแนวเชิงเส้น (m/s)

r_e คือ รัศมีประสิทธิภาพที่ลมเข้าปะทะกับกังหันลม (m)

เนื่องจากเงื่อนไขการออกแบบกังหันลมกำหนดให้กังหันลมทั้ง 3 ชนิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน การวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุมของกังหันลมแต่ละชนิดซึ่งมีค่ารัศมีประสิทธิภาพ r_e ต่างกันเพียงเล็กน้อย การวิจัยครั้งนี้จึงพิจารณาให้ความต่างนี้ละเลยได้ รูปที่ 2 แสดงแนวคิดการวิเคราะห์แรงบิด T ที่เกิดจากการปะทะของแรงลม

$$T = (F_{CW} - F_{CCW})r_e \quad (2)$$



รูปที่ 3 แนวคิดการวิเคราะห์แรงบิด ณ ตำแหน่งลมปะทะแบบหลายเฟรมเพื่อวิเคราะห์แรงบิดรวมต่อเครื่องรอบการหมุน



รูปที่ 4 ตัวอย่างโรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร

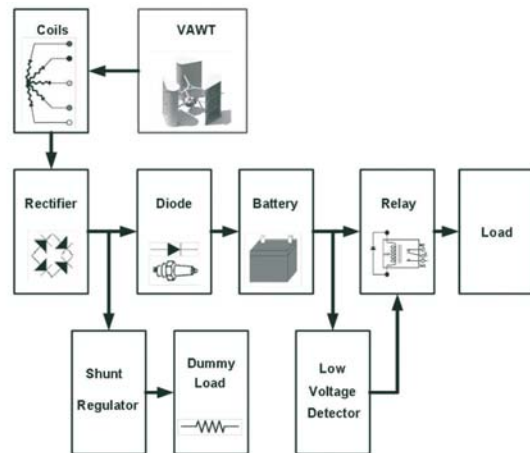
เมื่อ F_{cw} คือ แรงลมที่ปะทะในทิศทางทำให้กังหันหมุนตามเข็มนาฬิกา (N)

F_{ccw} คือ แรงลมที่ปะทะในทิศทางทำให้กังหันหมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือแรงต้านการหมุน (N)

การวิเคราะห์แรงบิดของกังหันลมอาศัยหลักการแบ่งเครื่องรอบการหมุนของกังหันลมออกเป็น 6 เฟรม โดยในแต่ละเฟรมจะหมุนตำแหน่งของกังหันลมต่างไปจากเดิม 30 องศา ดังแสดงตัวอย่างการหมุนมุมกังหัน และการแบ่งแนววิเคราะห์แรง 5 เส้นในรูปที่ 3

2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดควบคุม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรมีความเหมาะสมและประสิทธิภาพสูงสำหรับประยุกต์ใช้งานร่วมกับกังหันลม [10] – [11] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของระบบกำเนิดไฟฟ้าด้วยกังหันลม

แม่เหล็กถาวรจำนวน 12 คู่ จัดวางอยู่บนโรเตอร์ทั้ง 2 แผ่น ดังแสดงตัวอย่างเพียง 1 แผ่นในรูปที่ 4 เส้นแรงแม่เหล็กบนโรเตอร์จะวิ่งตัดกับขดลวดทั้ง 10 ขดที่แบ่งออกเป็น 5 เฟสบนสเตเตอร์เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้า E

$$E = \frac{nNAPB\omega}{60} \quad (3)$$

เมื่อ n คือ จำนวนขดลวดต่อเฟส (ขด/เฟส)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ/ขด)

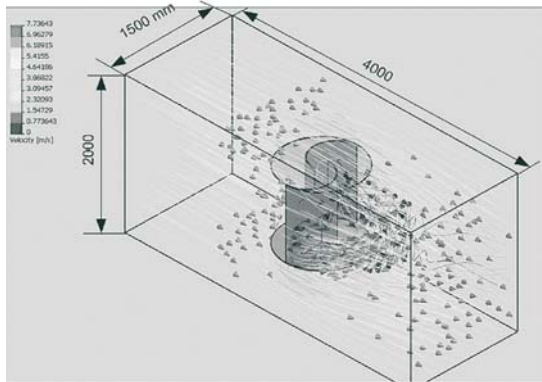
A คือ พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวร (m^2)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กถาวร (ขั้ว)

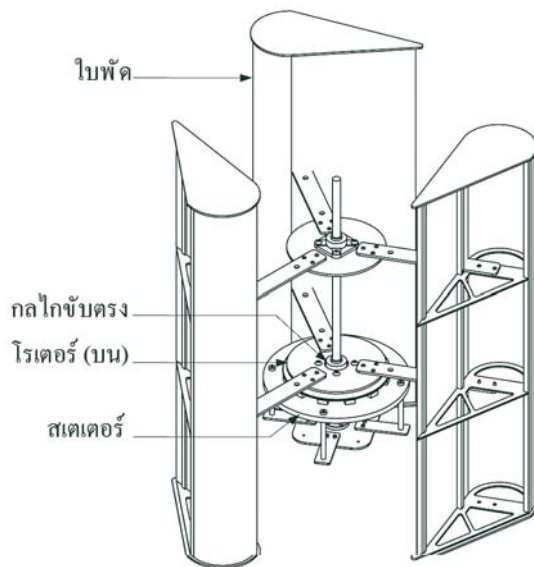
B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

ω คือ ความเร็วรอบเชิงมุม (รอบ/นาที)

แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากขดลวดทั้ง 5 เฟสถูกจ่ายไปยังชุดควบคุมดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifier) วงจรปรับระดับแรงดัน (Shunt regulator) ดั้มมีโหลด (Dummy load) วงจรตรวจสอบแรงดันต่ำ (Low voltage detector) และรีเลย์ (Relay) ควบคุมการตัดต่อโหลดออกจากวงจร ด้วยการปรับตั้งระดับแรงดันไฟฟ้าไว้ ณ ค่าที่ต้องการ V_{sp1} แรงดันไฟฟ้าส่วนเกินจากค่าที่ปรับตั้งไว้จะถูก TL431 ระบายไปที่ดั้มมีโหลด ทำให้สามารถควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดหรือชาร์จแบตเตอรี่ลงที่ ณ ค่าที่ต้องการได้ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรต่ำกว่าระดับที่ปรับตั้งไว้ V_{sp2} วงจรจะสั่งการให้รีเลย์ตัดโหลดออกจากระบบทันที



รูปที่ 6 แนวคิดการวิเคราะห์แรงลมในแบบจำลอง

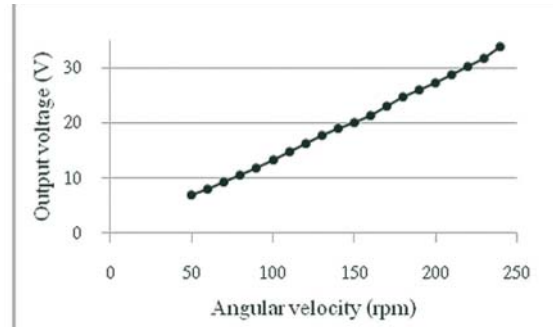


รูปที่ 7 กังหันลมแบบ Lenz 3 ใบ

3. การสร้างระบบผลิตไฟฟ้าแรงดันต่ำด้วยกังหันลม

3.1 การจำลองและวิเคราะห์กังหันลม

จากรูปที่ 3 การวิเคราะห์แรงลมที่กระทบกังหันในแบบจำลองตามสมการ (2) เพื่อคัดเลือกกังหันที่มีศักยภาพมากที่สุด พิจารณาโดยกำหนดให้เส้น F_1 เป็นแนวอ้างอิง เส้น F_1 และ F_2 เป็นกลุ่มแรงที่ทำให้กังหันลมหมุน และกำหนดให้เส้น F_4 และ F_5 เป็นกลุ่มแรงที่ต้านการหมุนของกังหันลม โดยดูแรงระหว่าง F_1 กับ F_5 และ F_2 กับ F_4 หักลบกันโดยตรง เนื่องจากอยู่ในแนวที่มีรัศมีประสิทธิผลเท่ากัน รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการจำลองและการอ่านค่าแรงลม ณ จุดที่สนใจในแต่ละเส้นเข้าปะทะกับใบกังหัน ผลการอ่านแรงลมในแต่ละจุด และ



รูปที่ 8 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการจับตรง
เมื่อ $N = 350$ รอบ/ชด

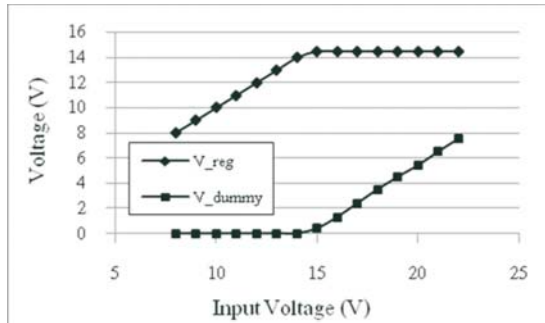
คำนวณผลต่างที่เกิดจากการหักล้างกันระหว่างกลุ่มแรงในทิศตรงข้ามสำหรับกังหันลมทั้ง 3 แบบตลอดช่วงการหมุนครึ่งรอบที่แบ่งเป็น 6 เฟรม แสดงให้เห็นว่า กังหันลมแบบ Lenz 3 ใบมีดัชนีที่ให้แรงบิดมากที่สุด คณะวิจัยจึงสร้างกังหันลมแบบ Lenz 3 ใบต้นแบบเพื่อนำไปทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดควบคุมต่อไป รูปที่ 7 แสดงแบบร่างของกังหันลมต้นแบบที่สร้างขึ้นตามโครงสร้างของ Lenz 3 ใบ

3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดควบคุม

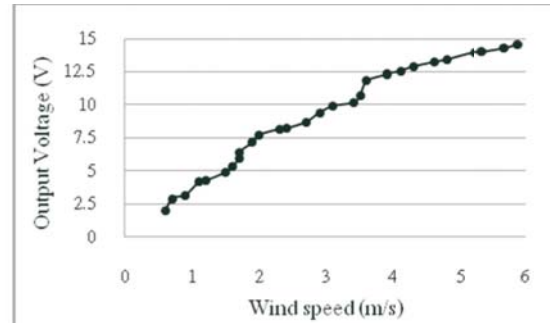
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการทดลองครั้งนี้ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรจำนวน 12 คู่ จัดวางอยู่บนโรเตอร์ 2 ชั้น ขึ้นละ 12 ก้อน โดยเลือกใช้แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียมขนาดพื้นที่หน้าตัดขึ้นละ 0.001275 ตรม. ซึ่งระบุค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กโดยประมาณไว้ที่ 0.4 T เมื่อกำหนดเงื่อนไขในการทดลองให้ขดลวดแต่ละเฟสประกอบด้วยขดลวด 2 ขด ความเร็วรอบการหมุน 90 รอบ/นาที และแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการมีค่า 12 โวลต์ สามารถใช้ (3) คำนวณจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดได้ 327 รอบ โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ลวดทองแดงขนาด 18 AWG จำนวนรอบ 350 รอบ/ชด

4. ผลการทดลอง

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นโดยการจับตรงกับกลไกที่ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบระหว่าง 50 ถึง 240 รอบ/นาที แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ ณ ความเร็ว 90 รอบ/นาที มีค่า 11.9 โวลต์ ซึ่งต่างจากค่าที่คำนวณในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการควบคุมระดับแรงดัน
และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมดัมมีโหลด



รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
และกังหันลมที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบการควบคุมระดับแรงไฟฟ้า ณ ค่าที่ปรับตั้งไว้ V_{sp1} 14.5 โวลต์ โดยทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเข้าสู่วงจรควบคุมระหว่าง 8 ถึง 22 โวลต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ V_{reg} 14.5 โวลต์ โดยระบายแรงดันไฟฟ้าส่วนเกิน V_{dummy} ไปที่ดัมมีโหลด ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ V_{sp2} 11.9 โวลต์ แสดงให้เห็นว่ารีเลย์เปลี่ยนสถานะเพื่อตัดเบตเตอร์และโหลดออกจากวงจรได้อย่างแม่นยำเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่วงจรมีค่าต่ำกว่า 11.9 โวลต์ การทดสอบศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าโดยรวมด้วยกังหันลมแนวตั้งแบบ Lenz ที่สร้างขึ้นดำเนินการภายในห้องทดลองที่ปราศจากลมรบกวน คณะวิจัยสร้างลมสำหรับใช้ในการทดสอบขึ้นจากใบพัดและมอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับเปลี่ยนความเร็วรอบและป้อนให้กับกังหันลม ผลการทดสอบด้วยการป้อนความเร็วลมระหว่าง 0.6 ถึง 5.9 เมตร/วินาที ให้กับกังหันลมดังแสดงในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ระหว่าง 2.91 ถึง 14.57 โวลต์ โดยกังหันลมเริ่มหมุนเมื่อความเร็วลมตั้งแต่ 0.6 เมตร/วินาที เข้าปะทะ และผลิตแรงดันไฟฟ้าป้อนสู่โหลด 12 โวลต์ ตั้งแต่ความเร็วลม 3.9 เมตร/วินาที โดยระบบสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าที่ 13.98 โวลต์เพื่อนำไปชาร์จเข้าสู่เบตเตอร์เมื่อความเร็วลมมีค่าตั้งแต่ 5.2 เมตร/วินาที ขึ้นไป

5. สรุป

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการพัฒนากระบวนการผลิตไฟฟ้าแรงดันต่ำโดยใช้กังหันลมแนวตั้งขนาดเล็กเป็นตัวขับเคลื่อน โดยต่อตรงเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยกังหันลมแนวแกนตั้งแบบ Lenz 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 1 เมตร เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร 5 เฟส และชุดควบคุมการทำงานและตัดต่อโหลด ผลการทดสอบด้วยการจ่ายลมซึ่งมีความเร็วระหว่าง 0.6 ถึง 5.9 เมตร/วินาที เข้าปะทะกังหันลมแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นเริ่มผลิตแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 0.6 เมตร/วินาที และเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนถึงระดับที่สามารถจ่ายโหลด 12 โวลต์ ได้เมื่อความเร็วลม 3.9 เมตร/วินาที และสามารถผลิตไฟฟ้าในระดับที่ชาร์จเบตเตอร์ได้ที่ 13.98 โวลต์ เมื่อความเร็วลมตั้งแต่ 5.2 เมตร/วินาที ขึ้นไป การทดสอบชุดควบคุมแสดงให้เห็นว่าวงจรควบคุมสามารถตรวจจับระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 11.9 โวลต์และตัดโหลดออกจากระบบได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ที่ 14.5 โวลต์ ตามที่ปรับตั้งไว้ได้อย่างแม่นยำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะพัฒนาต่อเนื่อง และคาดว่าจะสามารถรายงานผลการทดลองภาคสนามได้ในอนาคตอันใกล้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ นายณฤพชัย วัฒนไชย นายศักดิ์ณรงค์ ช้วนบุญ นายพิรพัฒน์ เครือวัลย์ และ

นายศศิพงษ์ วงษ์ประเสริฐ นักศึกษาด้านวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำหรับความอดสาหะในการจำลองและสร้างอุปกรณ์ในระบบทดลอง และขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้จากสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน. *สถานการณ์พลังงานไทยในช่วง 6 เดือนแรก และแนวโน้มปี 2555*. [Online]. Available: http://doceppo.eppo.go.th/Energy Situation/EnergyForecast/2012_06_energyforecast.doc [February 1, 2013].
- [2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. *การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทน*. [On-line]. Available: <http://www.pea.co.th/dstd/renewable/home.php> [February 1, 2013].
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. *พลังงานลม*. [On-line]. Available: [http://www.eppo.go.th/power/power N/File/\(17\).pdf](http://www.eppo.go.th/power/power N/File/(17).pdf) [February 1, 2013].
- [4] กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. *Wind resource assessment of Thailand*. [On-line]. Available: <http://www2.dede.go.th/renew/Twm/main.htm> [February 1, 2013].
- [5] Z. Ming, A. Sikaer, G. Weiting and L. Chen, "Economic analysis of the stability in the wind turbine selection," in *IEEE Proc. APPEEC 2010*.
- [6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย*. [On-line]. Available: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/windmap53/531112%20Windmap_Thailand_90%20m.pdf [February 1, 2013].
- [7] *แผนที่รวมระบบทางด่วน*. [On-line]. Available: http://longlat.tripod.com/exp_all.html [February 1, 2013].

- [8] C. Ke, W. Zhongwei, H. Yanchen and Y. Guangjing, "The comparison of theoretical potential application of two types of wind turbines in northern Shaanxi," in *IEEE Proc. APPEEC 2012*.
- [9] SolidWorks Flow Simulation[®] is a registered trademark of the Dassault Systemes.
- [10] E. Spooner and A.C. Williamson, "Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications," in *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 143, No. 1, January 1996.
- [11] J.R. Bumby, N. Stannard, J. Dominy and N. McLeod, "A permanent magnet generator for small scale wind and water turbines," in *IEEE Proc. ICEM 2008*.

ประวัติผู้เขียนบทความ

พงษ์พันธ์ ฤกษ์ขุมทรัพย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และระดับปริญญาเอก Mechanical Engineering – Nonmetrology จาก Nagaoka University of Technology ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ: Automation & Mechatronics system, Nanometrology, Precision Engineering, Control engineering

เพ็ญลักษณ์ ยิ้มเสมอจิต สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท เทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ: Control engineering, Measurement & Calibration system, Renewable energy solution