

**การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด
โดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ
Wind Turbine Generator with Maximum Power Point Tracking
Using Wind form Evaporative Cooling System**

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง¹ กองพัน อารีรักษ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹ อธิษฐ์ เสรีขจรจารุ² วรวิทย์ ศรีมะเร็ง²

¹กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

²บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) 128 ถ. เจริญจิต แขวงทุ่งวัดดอน เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

Koson Chaicharoenaudomrung¹ Kongpan Areerak^{1*} Kongpol Areerak¹

Theesit Sereekhajornjaru² Woravit Srimaroeng²

¹Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group, School of Electrical
Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology 30000

²CPF (Thailand) Public Company Limited, 128 Yenichit Road, Thungwatdom, Sathorn,
Bangkok 10120, Thailand

*Corresponding author Email: kongpan@sut.ac.th

(Received: September 3, 2018; Accepted: October 30, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ โดยอาศัยระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า พลังงานเอาต์พุตของกังหันลมที่สกัดได้จากพลังงานลมโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความเร็วลมและมีความไม่เป็นเชิงเส้น ในแต่ละความเร็วลมจะมีจุดการทำงานที่มีค่ากำลังสูงสุดเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอจะแสดงให้เห็นว่าสามารถดึงกำลังสูงสุดจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ การดำเนินงานวิจัยในเบื้องต้นเป็นการศึกษาและการจำลองสถานการณ์ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด รวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดให้มีประสิทธิภาพ สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่ได้นำเสนอโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ

คำสำคัญ: ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ การตามรอยจุดกำลังสูงสุด วิธีการรบกวนและการสังเกต ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

ABSTRACT

The paper presents a wind power generator from an evaporative cooling system by wind turbine generator system. Generally, the output power of wind turbines extracted from wind energy depends on wind speed in which the characteristic is non-linear. Only one operating point providing

the maximum power is available. Therefore, the maximum power point tracking control is important. The proposed technique will show that the maximum power can be obtained. The simulation and experiment are used to study and develop the maximum power point tracking algorithm. Hardware experimental results from prototype are presented to verify performance of the proposed power generation from evaporative cooling system.

Keyword: Evaporative cooling system, stand-alone wind power generator system, maximum power point tracking, perturbation and observation method, fuzzy logic control.

1. บทนำ

ปัจจุบันความเจริญทางสังคมและอุตสาหกรรมมีการเติบโตเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการทางพลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่แหล่งพลังงานส่วนใหญ่ เช่น น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ กลับมีแนวโน้มลดลงประกอบกับกระบวนการได้มาซึ่งพลังงาน มักก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มีการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการใช้เป็นพลังงานทางเลือกสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น[1] แหล่งกำเนิดพลังงานลมส่วนใหญ่ได้จากธรรมชาติ แต่ในปัจจุบัน พบว่าตามภาคอุตสาหกรรมที่มีระบบระบายอากาศขนาดใหญ่มีการปลดปล่อยพลังงานลมออกมาตลอดเวลา โดยเฉพาะโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ (evaporative cooling system) หรือโรงเรือนแบบปิด โรงเรืوندังกล่าวเป็นเทคโนโลยีที่มีการนำเข้ามาใช้สำหรับการปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยอย่างแพร่หลาย เทคโนโลยีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ อย่างไรก็ตามโรงเรือนที่มีการทำความเย็นนี้ มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบค่อนข้างมาก โดยใน 1 โรงเรือนจำเป็นต้องใช้พัดลมระบายอากาศขนาด 50 นิ้ว จำนวน 5-8 ตัว อยู่ด้านท้ายของโรงเรือน เมื่อระบบควบคุมทำงานจะมีพัดลมระบายอากาศประมาณ 2-3 ตัว ทำงานตลอดเวลา ส่วนพัดลมระบายอากาศที่เหลือจะทำงานเมื่ออุณหภูมิในโรงเรือนสูงขึ้นตามที่ได้ปรับตั้งค่าของระบบควบคุมความเย็นแบบ

อัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้จึงมีพลังงานลมที่เกิดขึ้นจากระบบระบายอากาศดังกล่าวตลอดเวลา ซึ่งมีความเร็วลมพอสมควร ทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำพลังงานลมดังกล่าวกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วยการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้า จำเป็นต้องมีระบบควบคุมการแปลงผันพลังงาน เนื่องจากกังหันลมมีพฤติกรรมพลังงานเอาต์พุตที่ไม่เป็นเชิงเส้นแปรผันตามความเร็วลม[2] กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีจุดการทำงานของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตช่วงกว้าง แต่จุดที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีเพียงจุดเดียว ปัญหาที่พบคือ จุดการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ห่างจากจุดที่ได้กำลังสูงสุด ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมได้ไม่เต็มที่ ดังนั้น ระบบควบคุมการตามรอยกำลังงานสูงสุด (maximum power point tracking: MPPT) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการแปลงพลังงานลม ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำหน้าที่สกัดกำลังงานให้ได้มากที่สุดแล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอีกด้วย โดยงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบัน พบว่า วิธีการตามรอยกำลังงานสูงสุดที่ใช้สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ แบบที่ต้องทราบข้อมูลคุณลักษณะของกังหันลมและแบบที่ไม่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลม MPPT แบบที่อาศัยคุณลักษณะของกังหันลมจะมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่ 1) Tip speed ratio (TRS)[3] และ 2) Power signal feedback (PSF)[4] ทั้งสองวิธีนี้ต้องวัดความเร็วลมและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ วิธีที่ 3) Optimal torque control (OTC)[5]

เป็นวิธีที่ไม่ต้องวัดความเร็วลม แต่การควบคุมยังคงต้องใช้พารามิเตอร์เฉพาะตัวของกังหันลม

ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบไต่เขา (hill-climb searching: HCS) หรือวิธีการรบกวนและการสังเกต (perturbation and observation: P&O) เป็นวิธีควบคุม MPPT แบบที่ไม่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลม[6]-[8] วิธีการนี้อยู่บนพื้นฐานการวนรอบค้นหาจุดการทำงานที่เหมาะสมเป็นวิธีที่เรียบง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ยังสามารถดำเนินการควบคุมในแบบไม่มีตัวตรวจวัดความเร็วรอบได้อีกด้วย จึงทำให้มีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการควบคุมที่อาศัยคุณลักษณะของกังหันลม อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขนาดก้าวของการค้นหา (step size) [9]-[11] ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกปรับปรุงวิธีการดังกล่าวโดยนำตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมาผสมผสานในการกำหนดขนาดก้าวของการค้นหาให้เหมาะสมตามสถานการณ์ต่าง ๆ [12], [13] เพื่อให้การตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น การตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลศึกษาที่ได้จากวิธีที่พัฒนานี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการทดสอบจริงจากชุดต้นแบบ กลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุด โดยหลักการแล้วเป็นการจัดการให้กำลังเอาต์พุตของกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ในระดับที่สูงที่สุดสอดคล้องกับความเร็วลม ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อสกัดพลังงานให้ได้มากที่สุดตามศักยภาพของพลังงานลมที่เกิดจากระบายอากาศของระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำเพื่อเป็นการนำพลังงานที่ทิ้งเปล่ากลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

บทความนี้ประกอบด้วย 7 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ แบบจำลองกังหันลมและพฤติกรรมของระบบแปลงผันพลังงานลมแบบอิสระแสดงในส่วนที่ 2 ส่วนที่ 3 แสดงหลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O และวิธีการที่ได้พัฒนา ผลการจำลองสถานการณ์แสดงในส่วนที่ 4 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบด้วยชุดต้นแบบแสดงใน

ส่วนที่ 5 และส่วนที่ 6 ตามลำดับ ในส่วนที่ 7 เป็นการสรุปของบทความ

2. การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

พลังงานลมที่เกิดจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำมีความเร็วลมที่วัดจากระยะห่างพัดลมระบายอากาศ 1.2 m ได้ความเร็วลมประมาณ 3-5 m/s เพียงพอสำหรับการเริ่มหมุนกังหันลม เพราะความเร็วเริ่มหมุนของกังหันลมขนาดเล็กโดยทั่วไปอยู่ที่ 2 m/s จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำพลังงานลมดังกล่าวมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่เป็นระบบแบบอิสระดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบดังกล่าวประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ระบบทางกลและระบบทางไฟฟ้า โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 ระบบทางกล

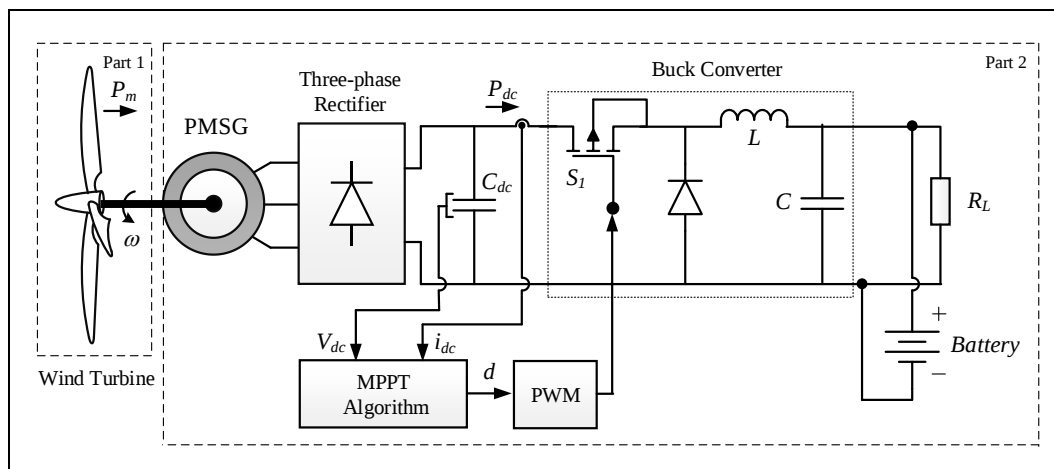
กังหันลมแนวนอนถูกใช้ทำหน้าที่สกัดพลังงานจากลมซึ่งเป็นพลังงานจลน์และเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทางกลที่เพลลาของกังหันลม สามารถอธิบายดังสมการที่ (1)

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p \quad (1)$$

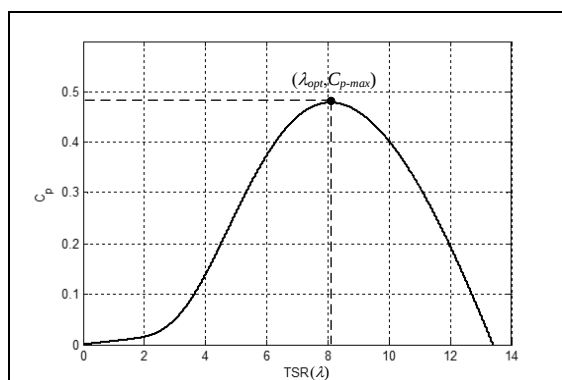
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ R คือ รัศมีของกังหันลม v_w คือ ความเร็วลม และ C_p คือ ประสิทธิภาพการสกัดพลังงานของกังหันลมเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับ Tip speed ratio (TSR) λ ตามสมการที่ (2) และมุมบิด β ของกังหันลม C_p สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (3)

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (2)$$

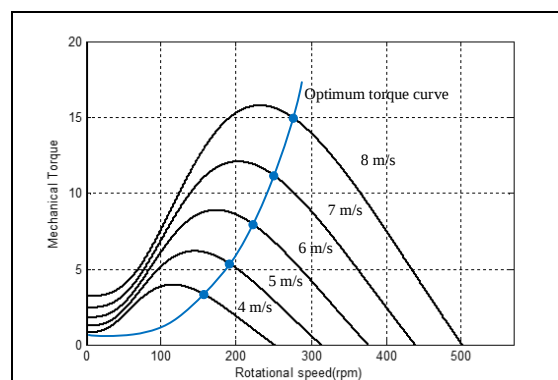
$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (3)$$



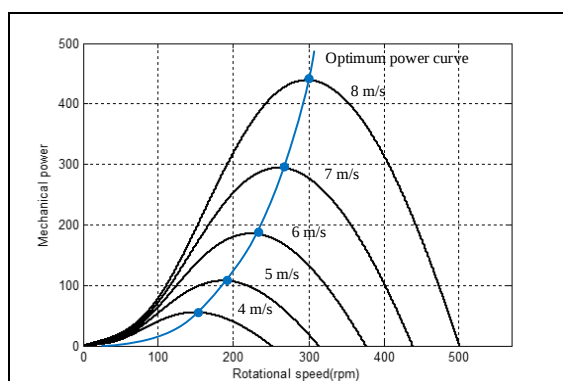
รูปที่ 1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการสกัดพลังงานของกังหันลม



รูปที่ 4 คุณสมบัติแรงบิดเอาต์พุตของกังหันลม
ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ



รูปที่ 3 คุณสมบัติกำลังเอาต์พุตของกังหันลม
ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ

เมื่อ ω คือ ความเร็วในการหมุนของกังหันลม ดังนั้น
แรงบิดของกังหันลม สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (4)

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) / \omega \quad (4)$$

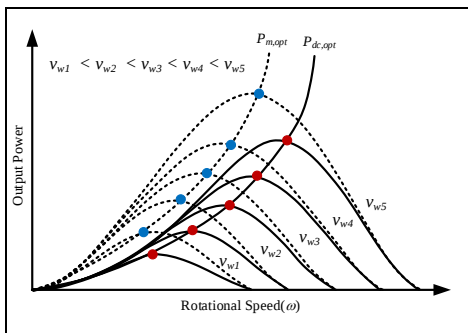
กังหันลมขนาดเล็กโดยทั่วไปจะมีมุมบิด β คงที่ ทำให้ C_p ขึ้นอยู่กับ λ เมื่อกำหนดให้ $\beta = 0$ กราฟ
ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง C_p และ λ แสดงได้ดัง
รูปที่ 2 ที่ $\lambda = 8.1$ จะทำให้ได้ค่า $C_{p,max} = 0.48$ ในรูป
ที่ 3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและ
ความเร็วรอบของกังหันลม ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ

ในรูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของกังหันลม จากกราฟทั้งสองนี้เป็นคุณลักษณะของกังหันลม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแต่ละความเร็วลมจะมีจุดที่ได้กำลังสูงสุดเพียงตำแหน่งเดียว

2.2 ระบบทางไฟฟ้า

การแปลงพลังงานทางกลจากกังหันลมเป็นพลังงานทางไฟฟ้า อาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet synchronous generator: PMSG) ด้วยข้อได้เปรียบที่มีการบำรุงรักษาต่ำ ไม่ต้องใช้กลองเกียร์และไม่จำเป็นต้องมีการกระตุ้นจากภายนอก เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานในระบบแบบอิสระ การปรับเปลี่ยนเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบนี้ใช้ วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ เพราะมีความเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ในที่นี้เลือกใช้วงจรลดทอนระดับแรงดัน เพื่อควบคุมการทำงานของกังหันลม

การสกัดพลังงานสูงสุดของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ การควบคุมแบบทางอ้อมและการควบคุมโดยตรง การควบคุมแบบทางอ้อมเป็นการสกัดพลังงานสูงสุดทางกลของกังหันลม (P_m) ซึ่งไม่ใช่พลังงานเอาต์พุตสูงสุดทางไฟฟ้า (P_{dc}) แต่การควบคุมโดยตรงจะทำให้ได้พลังงานเอาต์พุตทางไฟฟ้าสูงสุด ความสัมพันธ์ของ P_m และ P_{dc} อธิบายได้ตามสมการที่ (5)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์พลังงานเอาต์พุตกับความเร็วรอบของกังหันลมในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ

$$P_{dc} = P_m n_g n_c \quad (5)$$

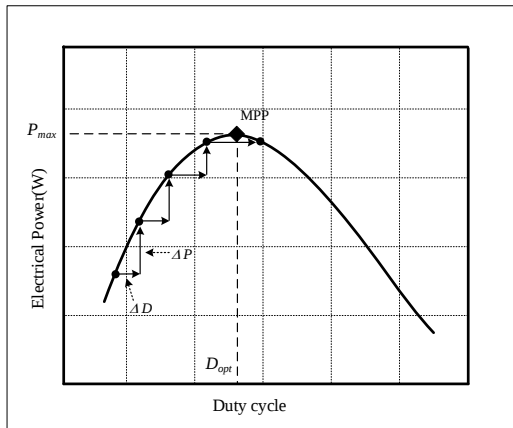
เมื่อ n_g และ n_c คือประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรเรียงกระแสสามเฟส ดังนั้น แม้ว่าจะควบคุมให้ P_m ได้ค่าสูงสุดแล้วก็ไม่ได้รับประกันว่าจะทำให้ได้ P_{dc} สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 5 การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในบทความนี้พิจารณาที่ กำลังไฟฟ้า P_{dc} เป็นสำคัญ โดยรายละเอียดของขั้นตอนวิธีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดจะนำเสนอในส่วนที่ 3

3. การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

กำลังสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่เป็นระบบแบบอิสระ สามารถสกัดได้โดยใช้กลยุทธ์ตามรอยกำลังสูงสุด การควบคุมนี้ทำหน้าที่ปรับตั้งจุดการทำงานของกังหันลมให้เหมาะสมกับสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ เพื่อดักศักยภาพสูงสุดของระบบออกมาอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่และจ่ายให้กับโหลด

3.1 วิธีการรบกวนและการสังเกต

การควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต (P&O method) เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วยการพิจารณาผ่านเงื่อนไขที่กำหนดโดยการเปลี่ยนแปลงคำตอบและตรวจสอบผลลัพธ์ในแต่ละรอบของการคำนวณ การปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle: D) ของวงจรลดทอนระดับแรงดัน ส่งผลให้ความเร็วรอบของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) กับ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) จึงสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) กับ ความเร็วรอบของกังหันลม (ω) [13] ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) กับค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) สำหรับการพิจารณาควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด เพราะข้อได้เปรียบที่ไม่ต้องใช้ตัวตรวจวัดทางกล



รูปที่ 6 การเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ในรูปที่ 6 พิจารณาคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง P_{dc} กับ D พบว่าจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point: MPP) อยู่บริเวณที่ความชันเป็นศูนย์ ($\frac{\Delta P_{dc}}{\Delta D} = 0$) ดังนั้นจึงได้เงื่อนไขสำหรับการควบคุม MPPT คือ ค่าความชัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

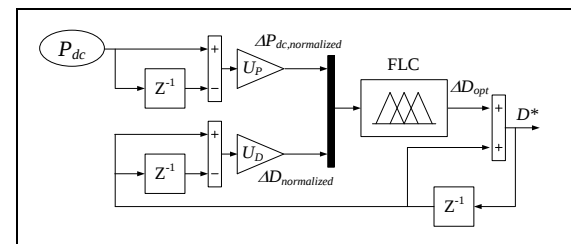
$$\text{Slope} = \frac{\Delta P_{dc}}{\Delta D} \quad (6)$$

หลักการควบคุม คือ หากจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านซ้ายของจุด MPP ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา เพื่อให้เข้าสู่ตำแหน่ง MPP ในทำนองเดียวกัน หากจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านขวาของจุด MPP ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย การควบคุมดำเนินการในลักษณะของการวนรอบ โดยในแต่ละรอบจะทำการปรับเพิ่มและลดสัญญาณควบคุมด้วยขนาดก้าวของการค้นหา (step size) ซึ่งในที่นี้ คือ ΔD ดังรูปที่ 6 แสดงการเข้าสู่จุด MPP จากทางด้านซ้ายของจุด MPP การควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตที่กำหนด ΔD เป็นค่าคงที่ในที่นี้ เรียกว่า Conventional P&O ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ค่าคงที่ ΔD ในกรณีที่ค่าคงที่ ΔD มีขนาดกว้างจะทำให้มี

ผลตอบสนองที่รวดเร็ว แต่จะมีการแกว่งไกวมากบริเวณจุด MPP ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าคงที่ ΔD มีขนาดเล็กจะมีการแกว่งไกวบริเวณจุด MPP น้อยแต่ใช้เวลามากในการเข้าสู่จุด MPP ดังนั้นเพื่อให้การตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพจึงทำการปรับปรุงให้ค่าคงที่ ΔD มีการปรับตัวได้ โดยในบทความนี้ได้นำตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (fuzzy logic control: FLC) เข้ามาประยุกต์ใช้ปรับเปลี่ยนค่า ΔD ให้เหมาะสมตามสถานการณ์ ซึ่งรายละเอียดของการควบคุมจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.2

3.2 วิธี FLC-MPPT based on P&O

ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้สำหรับควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในบทความนี้อยู่บนพื้นฐานการควบคุมด้วยวิธี P&O วิธีการควบคุมที่ได้พัฒนาในที่นี้เรียกว่า FLC-MPPT based on P&O โดยมีแผนภาพการควบคุมดังรูปที่ 7 กฎการควบคุมมี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (ΔP_{dc}) และค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เปลี่ยนแปลง (ΔD) ที่ผ่านการนอ้มัลไลซ์เป็นตัวแปรอินพุต ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ ส่วนตัวแปรเอาต์พุต คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม (ΔD_{opt})



รูปที่ 7 แผนภาพการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่อิงวิธี P&O

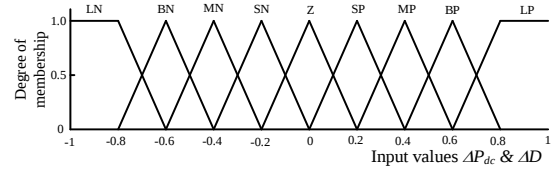
$$\Delta P_{dc,normalized}(k) = U_P (P_{dc}(k) - P_{dc}(k-1)) \quad (7)$$

$$\Delta D_{normalized}(k) = U_D (D(k) - D(k-1)) \quad (8)$$

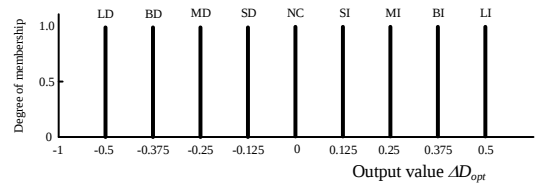
เมื่อ $\Delta P_{dc,normalized}(k)$ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในการสู่มรอบที่ k $\Delta D_{normalized}(k)$ คือ ปริมาณวัฏจักรหน้าที่ที่เปลี่ยนแปลงในการสู่มรอบที่ k $P_{dc}(k)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกสู่มในรอบที่ k $P_{dc}(k-1)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกสู่มในรอบที่ $k-1$ $D(k)$ คือ วัฏจักรหน้าที่ที่ถูกสู่มในรอบที่ k $D(k-1)$ คือ วัฏจักรหน้าที่ที่ถูกสู่มในรอบที่ $k-1$ U_p และ U_D คือ ค่าสเกลเพคเตอร์สำหรับการทำอนัลไลส์

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตในบทความนี้เลือกใช้เป็นรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เพราะง่ายต่อการคำนวณและการโปรแกรมทางดิจิทัล แสดงดังรูปที่ 8 ประกอบด้วย 9 ฟัซซีเซต คือ LN (large negative), BN (big negative), MN (medium negative), SN (small negative), Z (zero), SP (small positive), MP (medium positive), BP (big positive) และ LP (large positive) โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งกำหนดเป็นแบบ Takagi-Sugeno ประกอบด้วย 9 ฟัซซีเซต คือ LD (large decrease), BD (big decrease), MD (medium decrease), SD (small decrease), NC (no change), SI (small increase), MI (medium increase), BI (big increase) และ LI (large increase) จากการวิเคราะห์

พฤติกรรมของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าและอิงการควบคุมด้วยวิธี P&O สามารถกำหนดกฎฟัซซีได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต



รูปที่ 9 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

การทำดีฟัซซีเพื่อหาค่าเอาต์พุต $\Delta D_{opt}(k)$ โดยใช้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เรียกว่า คำนวณน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average: WA) [12] ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้สำหรับตามรอยกำลังสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$D^*(k) = D^*(k-1) + \Delta D_{opt}(k) \quad (9)$$

ตารางที่ 1 กฎฟัซซี

ΔD_{opt}		ΔP_{dc}								
		LN	BN	MN	SN	Z	SP	MP	BP	LP
ΔD	LN	LI	LI	BI	BI	NC	BD	BD	LD	LD
	BN	LI	BI	BI	MI	NC	MD	BD	BD	LD
	MN	BI	BI	MI	SI	NC	SD	MD	BD	BD
	SN	BI	MI	SI	SI	NC	SD	SD	MD	BD
	Z	LI	BI	MI	SI	NC	SD	MD	BD	LD
	SP	BD	MD	SD	SD	NC	SI	SI	MI	BI
	MP	BD	BD	MD	SD	NC	SI	MI	BI	BI
	BP	LD	BD	BD	MD	NC	MI	BI	BI	LI
	LP	LD	LD	BD	BD	NC	BI	BI	LI	LI

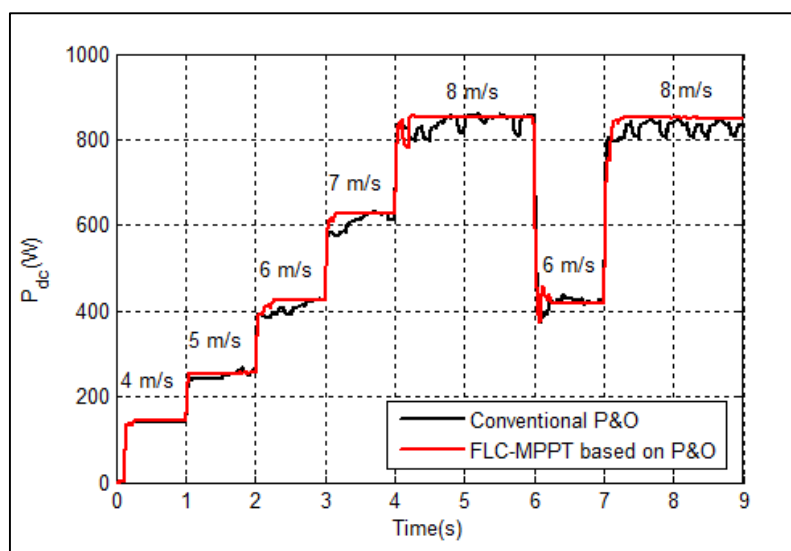
4. การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันและทดสอบสมรรถนะของการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ได้พัฒนาไว้ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB พารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้จำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 2 รูปที่ 10 แสดงผลการจำลองสถานการณ์วิธี FLC-MPPT based on P&O (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ Conventional P&O (เส้นสีดำ) การจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังสูงสุด กำหนดให้สภาพความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 m/s เป็น 4 m/s ในเวลาที่ $t = 1$ วินาที และที่เวลา $t = 2$ วินาที ความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 5 m/s และเพิ่มขึ้นเป็น 6, 7 และ 8 m/s ตามลำดับ และที่เวลา $t = 6$ วินาที ความเร็วลมลดลงจาก 8 m/s เป็น 6 m/s สุดท้ายที่เวลา $t = 7$ วินาที ความเร็วลมเพิ่มจาก 6 m/s เป็น 8 m/s

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี FLC-MPPT based on P&O สามารถเข้าสู่จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วและมีการสั่นไหวบริเวณจุดที่มีกำลังสูงสุดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Conventional P&O ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมเดียวกัน

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

กัณฑ์	รายละเอียด
R	1.74 m
ρ	1.255 kg/m ³
β	0
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รายละเอียด
Power rate	850 W
Speed rate	500 rpm
number pole pairs	6
R_s	0.57 Ω
$L_d = L_q$	5.5 mH
J	0.016 kg.m ²
วงจรลดทอนระดับแรงดัน	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
C_o	500 μ F
Battery	24 V



รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังสูงสุดเมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง

5. ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์และผลการทดสอบ

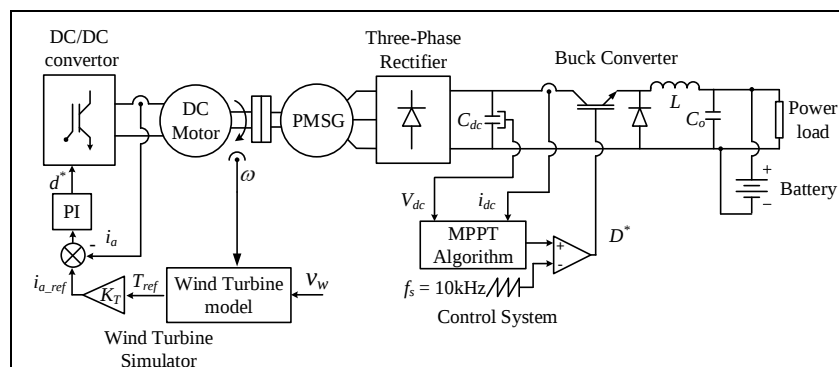
โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่ใช้ทดสอบแสดงในรูปที่ 11 ภาพรวมของชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงในรูปที่ 12 การทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าอาศัยเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมการทำงานให้เลียนแบบคุณลักษณะของกังหันลมโดยควบคุมผ่านกระแสอาร์เมเจอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอ ระบบควบคุมดังกล่าวใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล แรงบิดอ้างอิงคำนวณจากแบบจำลองของกังหันลมในสมการที่ (4) โดยมีความเร็วรอบและความเร็วลมที่กำหนดโดยผู้ใช้งานเป็นอินพุต เครื่องจำลองกังหันลมนี้เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG วงจรเรียงกระแสสามเฟสถูกใช้เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) และป้อนเป็นแรงดันอินพุตให้วงจรลดทอนระดับแรงดัน ด้านเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่และโหลดตัวต้านทาน แรงดัน V_{dc} และกระแส i_{dc} ถูกตรวจจับเป็นอินพุตของระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด การควบคุมนี้ใช้การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสมให้แก่วงจรลดทอนระดับแรงดัน รายละเอียดพารามิเตอร์ของชุดทดสอบในส่วนต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3

การทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ดำเนินการด้วยเครื่องจำลองกังหันลม ซึ่งกำหนดให้ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ในรูปที่ 13 และ 14 แสดงผลการทดสอบการ

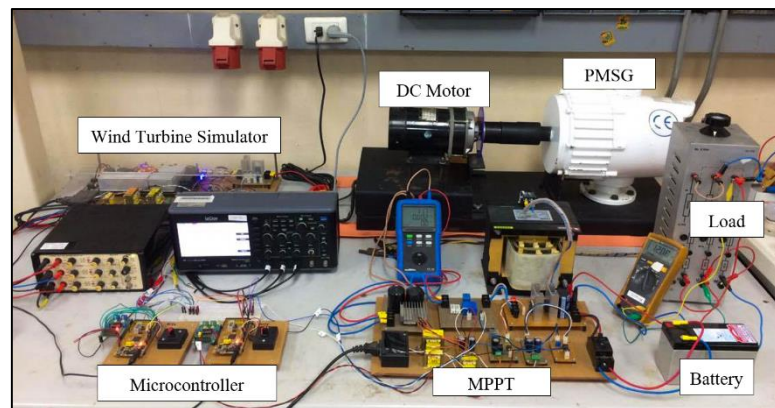
ควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี FLC-MPPT based on P&O เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วยวิธี Conventional P&O ภายใต้สภาพความเร็วเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงความเร็วลม กำลังไฟฟ้า (P_{dc}) และแรงดันไฟฟ้า (V_{dc}) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ชุดทดสอบ

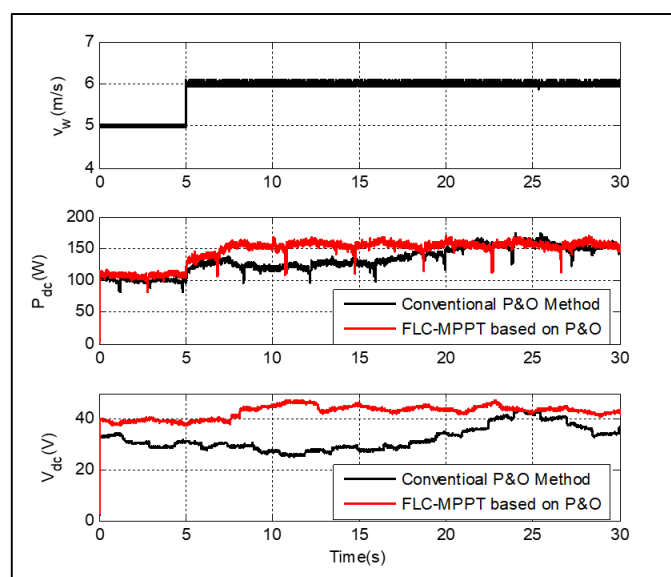
กังหันลม	รายละเอียด
R	1.558 m
ρ	1.255 kg/m ³
β	15
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	รายละเอียด
Power rate	900 W
Speed rate	500 rpm
Current rate	40 A
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รายละเอียด
Power rate	500 W
Speed rate	450 rpm
Current rate	21 A
วงจรลดทอนระดับแรงดัน	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
C_o	500 μ F
R_L	100 Ω
Battery	12 V



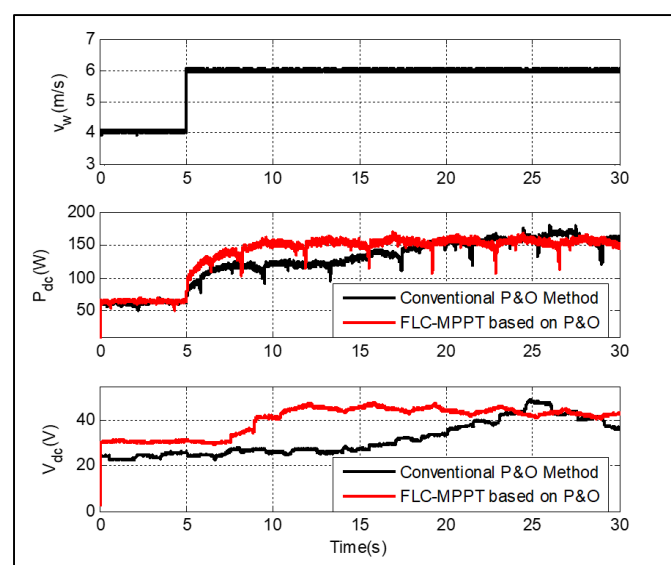
รูปที่ 11 โครงสร้างชุดฮาร์ดแวร์ทดสอบ



รูปที่ 12 ชุดฮาร์ดแวร์ทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ



รูปที่ 13 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 5 m/s เป็น 6 m/s



รูปที่ 14 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 6 m/s

ในรูปที่ 13 แสดงการดึงกำลังไฟฟ้า ขณะที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 m/s เป็น 6 m/s เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ขั้นตอนวิธีการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าและปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่เหมาะสมใหม่ เนื่องจากด้านเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เท่ากับแรงดันที่ชาร์จแบตเตอรี่ การปรับตั้งค่าดังกล่าว จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า (V_{dc}) มีการเปลี่ยนแปลงแทน ซึ่งทำให้จุดปฏิบัติการของกังหันลมเข้าสู่จุดที่ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่ที่สอดคล้องกับความเร็วลม ในทำนองเดียวกันรูปที่ 14 แสดงผลการทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในสภาวะความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 4 m/s เป็น 6 m/s จากการเปรียบเทียบ พบว่า การควบคุมด้วยวิธี FLC-MPPT based on P&O สามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เข้าสู่จุดที่มีกำลังสูงสุดได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธี Conventional P&O

6. ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียน

การดำเนินการทดสอบชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด เพื่อทดสอบสมรรถนะของชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่สร้างขึ้นหรือชุดชาร์จ MPPT ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง โดยในรูปที่ 15 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบ ซึ่งประกอบด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้า ชุดชาร์จ MPPT และแบตเตอรี่ การเก็บข้อมูลอาศัยชุดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ข้อมูลที่ทำการเก็บบันทึก คือ แรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดชาร์จก่อนอัดประจุลงแบตเตอรี่ เพื่อนำมาคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สามารถสกัดได้

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การทดสอบด้วยชุดชาร์จทั่วไปแบบไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (Without MPPT) และการทดสอบด้วยชุดชาร์จที่มี

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (MPPT) ด้วยวิธีที่ได้พัฒนา แสดงในรูปที่ 15 การทดสอบทั้ง 2 กรณี เก็บข้อมูลกรณีละ 30 นาที ผลการทดสอบเปรียบเทียบกันทั้ง 2 กรณี แสดงได้ดังรูปที่ 16

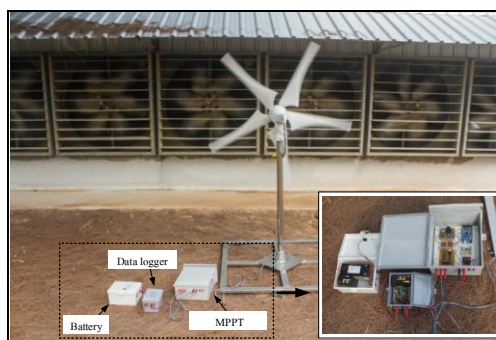
ผลการทดสอบในรูปที่ 16 (ก) แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบเทียบกับจุดข้อมูล โดยเก็บข้อมูลเป็นเวลา 30 นาที บันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที ผลการทดสอบพบว่า การสกัดพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ชุดชาร์จ MPPT สามารถสกัดกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมได้โดยเฉลี่ยประมาณ 7 W ซึ่งมากกว่าชุดชาร์จ Without MPPT ที่สามารถสกัดกำลังไฟฟ้าได้โดยเฉลี่ยประมาณ 2.5 W หรือมากกว่า 180 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต คำนวณได้จากสมการที่ (10) เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูล

$$P_{o,av} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (10)$$

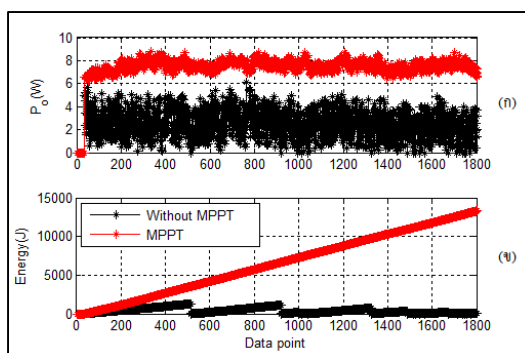
ผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 16 สามารถวิเคราะห์พลังงานที่กังหันลมสกัดได้เทียบกับเวลาด้วยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 16(ก) ตามสมการที่ (11) และสมการที่ (12) แสดงในรูป 16(ข) จะเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากชุดชาร์จ Without MPPT มีการอัดประจุลงแบตเตอรี่ไม่ต่อเนื่อง สาเหตุมาจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดชาร์จ หากมีค่าน้อยกว่าแรงดันแบตเตอรี่ก็จะไม่สามารถประจุลงแบตเตอรี่ได้แตกต่างจากกำลังไฟฟ้าที่ได้จากชุดชาร์จ MPPT สามารถประจุลงแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่องและได้พลังงานสะสมมากกว่าชุดชาร์จ Without MPPT

$$E_i = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \quad (11)$$

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i \quad (12)$$



รูปที่ 15 การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำด้วยชุดชาร์จ MPPT



รูปที่ 16 ผลการทดสอบ

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ แบบจำลองของกังหันลมที่อธิบายถึงคุณลักษณะของกังหันลมได้ถูกนำเสนอเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า รวมถึงหลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบลดทอนตัวตรวจวัดทางกลและการนำตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะการควบคุม ผลจากการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมทั้ง 2 วิธีสามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้สอดคล้องกับความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่า วิธีการควบคุมที่ได้พัฒนามีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธี Conventional P&O รวมถึงผลทดสอบการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศโดยใช้ชุดชาร์จต้นแบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่

พัฒนา พบว่า สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าชุดชาร์จทั่วไปที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดได้ถึง 180 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมนี้ทำให้กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีการทำงานที่เหมาะสมและทำให้การนำพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และความร่วมมือจากบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด มหาชน

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Urtasun, P. Sanchis and L. Marroyo, "Small Wind Turbine Sensorless MPPT: Robustness Analysis and Lossless Approach," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, Issue. 6, pp. 4113 – 4121, Nov 2014.

- [2] S. Lalouni, D. Rekioua, K. Idjdarene and A. Tounzi, “Maximum Power Point Tracking Based Hybrid Hill-climb Search Method Applied to Wind Energy Conversion System,” *Electric Power Components and Systems*, Vol. 43, Issue. 8, pp. 1028-1038, Nov 2015.
- [3] E. Koutroulis and K. Kalitzakis, “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, Issue. 2, pp. 486-494, April 2006.
- [4] R. Kot, M. Rolak and M. Malinowski, “Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine,” *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 91, pp. 29-40, May 2013.
- [5] K-H. Kim, T. Van, D-C. Lee, S-H. Song and E. Kim, “Maximum Output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine Systems Considering Rotor Inertial Power,” *IEEE Transactions on industrial Electronics*, Vol. 60, Issue. 8, pp. 3207-3217, Aug 2013.
- [6] O. Carranza, E. Figueresb, G. Garceráb and L. G. Gonzalezc, “Comparative study of speed estimators with highly noisy measurement signals for Wind Energy Generation Systems,” *Applied Energy*, Vol. 88, Issue. 3, pp. 805-813, March 2011.
- [7] S. Muhammad, R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo and O. Ichinokura, “A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed-Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, Issue. 1, pp. 29 – 36, Jan 2011.
- [8] L.G. González, E. Figueresb, G. Garceráb and O. Carranzac, “Maximum-power-point tracking with reduced mechanical stress applied to wind-energy-conversion-systems,” *Applied Energy*, Vol. 87, Issue. 7, pp. 2304-2312, July 2010.
- [9] Y. Xia, K. H. Ahmed and B. W. Williams, “Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, Issue. 3, pp. 1122-1132, March 2013.
- [10] Z. M. Dalala, Z. U. Zahid, W. Yu, Y. Cho and J.-S. (Jason). Lai, “Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, Issue. 3, pp. 756-767, Sept 2013.
- [11] Y. Dailia, J.-P. Gaubertb and L. Rahmania, “Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 97, pp. 298-306, June 2015.
- [12] Q.-N. Trinh and H.-H. Lee, “Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Tracking in PMSG-Based Wind Power Systems,” *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*, Springer, pp. 543-553, 2010.
- [13] J. Lee and Y.-S. Kim, “Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode rectifier,” *IET Renewable Power Generation*, 10, Issue 2, pp. 194 –202, Feb 2016.