

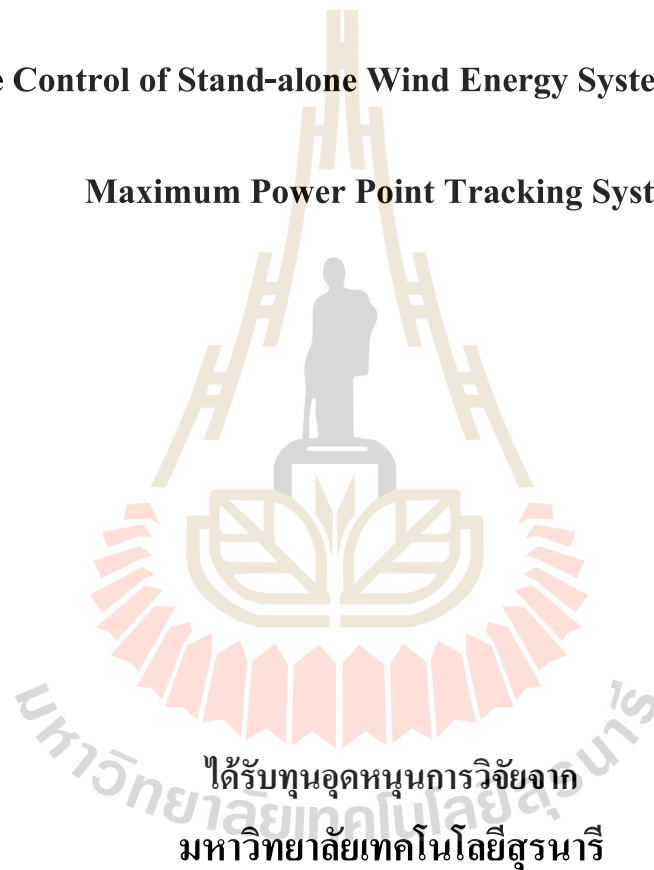


รายงานการวิจัย

การควบคุมระบบพลังงานลมแบบอิสระที่มีระบบตามรอยกำลังสูงสุด

The Control of Stand-alone Wind Energy System Including

Maximum Power Point Tracking System



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การควบคุมระบบพลังงานลมแบบอิสระที่มีระบบตามรอยกำลังสูงสุด

**The Control of Stand-alone Wind Energy System Including
Maximum Power Point Tracking System**

หัวหน้าโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2560

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมระบบแปลงผันพลังงานลมแบบอิสระที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในงานวิจัยนี้เลือกใช้การควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต เพราะเป็นวิธีที่มีความเรียบง่ายและไม่ต้องทราบเกี่ยวกับคุณลักษณะของกังหันลม การควบคุมอาศัยเพียงตัวตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่านั้น โดยจากผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม SIMULINK ใน MATLAB พบว่า การควบคุมดังกล่าวสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบออกมาได้ตามสภาพความเร็วลมต่างๆ นอกจากนี้ในโครงการวิจัยนี้ยังนำเสนอการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยในส่วนของกรควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระออกมาได้สอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

Abstract

This research presents the maximum power point tracking control of stand-alone wind energy conversion systems. The perturbation and observation method is selected as the maximum power point tracking technique for this research. This is because it is simple and no requirement of wind turbine characteristics only voltage and current sensors are used in the control process. The simulation results with SIMULINK program in MATLAB show that the proposed control can extract maximum power following on various wind speeds. In addition, the hardware implementation of the considered system is also presented in the research. The microcontroller is used to implement the control of maximum power point tracking control system. The experimental results show that the maximum power can also be achieved via the proposed algorithm. A good agreement between simulation and experimental results can be obtained.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบ
อิสระ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
แห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนายโกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง
ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ด้วยความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่ง สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความสะดวกในการใช้สถานที่สำหรับการทำวิจัย

กองพัน อารีรักษ์

เมษายน 2560



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย	3
1.6 การจัดรูปแบบรายงานการวิจัย	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด สำหรับกักหน้ลผลิตไฟฟ้า	5
2.3 สรุป	9
3 ทฤษฎีพื้นฐาน	10
3.1 บทนำ.....	10
3.2 ระบบแปลงผันพลังงานลม	10
3.3 หลักการทำงานของกักหน้ล	11
3.4 ระบบควบคุมกักหน้ลผลิตไฟฟ้า	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5	วงจรแปลงผันแบบบัคค์..... 17
3.6	เบตเตอร์รี่ 18
3.7	สรุป 19
4	การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต..... 20
4.1	บทนำ..... 20
4.2	ระบบที่พิจารณา 20
4.3	การจำลองสถานการณ์..... 23
4.4	การสร้างชุดทดสอบตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O..... 26
4.4.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟส..... 28
4.4.2	การสร้างชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า..... 28
4.4.3	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR 31
4.4.4	วงจรจุดชนวนเกท..... 35
4.4.5	วงจรแปลงผันแบบบัคค์..... 35
4.5	การทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี P&O 37
4.6	ผลการทดสอบ P&O 42
4.7	สรุป..... 45
5	สรุปและข้อเสนอแนะ 46
5.1	สรุป 46
5.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต..... 47
	รายการอ้างอิง 48
	ภาคผนวก
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB 50
	ภาคผนวก ข. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR..... 53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกักหน้ลมผลิตไฟฟ้า 6
4.1	พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กักหน้ลมผลิตไฟฟ้า ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O 24
4.2	ผลทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า..... 30
4.3	ผลทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า..... 31
4.4	พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์..... 37
4.5	ผลการทดสอบหาค่า ε 41
4.6	ผลการทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O 44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ระบบแปลงผันพลังงานลม..... 10
3.2	ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม 12
3.3	กราฟคุณลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ $C_p - \lambda$ 15
3.4	กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีระบบตามรอยกำลังสูงสุด 16
3.5	โครงสร้างสำหรับการทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด 17
3.6	วงจรแปลงผันแบบบักก์ 17
4.1	ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O..... 20
4.2	การควบคุมลู่เข้าจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด..... 21
4.3	แผนภาพไดอะแกรมการตามรอยกำลังสูงสุด..... 22
4.4	การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้วิธี P&O ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB 24
4.5	คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า..... 25
4.6	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง..... 26
4.7	เส้นทางการตามรอยกำลังสูงสุด..... 26
4.8	โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O..... 27
4.9	ภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O..... 27
4.10	โมลคูลวงจรเรียงกระแสสามเฟส 28
4.11	ภาพรวมการต่อวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า 29
4.12	วงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า..... 29
4.13	วงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและวงจรกันชน 30
4.14	วงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน 30
4.15	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 1280 31
4.16	วงจรจุดชนวนเกท 35
4.17	วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ใช้งานจริง..... 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ระบบที่ใช้ในการทดสอบร่วมกับเครื่องจำลองกังหันลม.....	38
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่าง ๆ.....	38
4.20 กราฟสัญญาณทดสอบเมื่อกำหนดค่าให้ค่า $\Delta D = 0.001$	39
4.21 กราฟสัญญาณทดสอบเมื่อกำหนดค่าให้ค่า $\Delta D = 0.05$	39
4.22 กราฟสัญญาณทดสอบเมื่อกำหนดค่าให้ค่า $\Delta D = 0.3$	39
4.23 ผลตอบสนองของระบบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 5 m/s	40
4.24 ผลตอบสนองของระบบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 5 m/s เป็น 6 m/s	40
4.25 การทดสอบหาค่าทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	42
4.26 รูปสัญญาณความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 4 m/s.....	43
4.27 รูปสัญญาณความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 5 m/s.....	43
4.28 รูปสัญญาณความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 6 m/s.....	43
4.29 กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลม	44
ก.1 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นขั้นพื้นฐานต่อการดำรงชีวิตในปัจจุบัน กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ต้องใช้พลังงานแทบทั้งสิ้น ซึ่งรูปแบบพลังงานที่ใช้กันมาก คือ พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า สำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานหลัก ๆ ในปัจจุบันเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกิดจากการทับถมของซากพืชและซากสัตว์ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ฯลฯ ซึ่งมีปริมาณจำกัด และเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังสร้างปัญหาที่มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงชั้นบรรยากาศของโลก ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางการแก้ไขทางพลังงาน โดยพยายามหาพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ มาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล หนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจ คือ พลังงานจากลม อันเนื่องมาจากเป็นหนึ่งในพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ทั่วไป เป็นพลังงานหมุนเวียนทั้งกลางวันและกลางคืน ไม่มีวันหมดสิ้น การแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือระบบการแปลงผันพลังงานลม(wind energy conversion system: WECS) อาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจากการที่กระแสลมไหลผ่านใบพัดของกังหันลม ทำให้พลังงานจลน์ในกระแสลมถูกเปลี่ยนเป็นแรงบิดขึ้นบนเพลลาของกังหันลม ซึ่งเชื่อมต่อกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้า จำเป็นต้องมีระบบควบคุมการแปลงผันพลังงานดังกล่าว เพราะให้พลังงานเอาต์พุตไม่เป็นเชิงเส้นแปรผันตาม โหลดและความเร็วลม อีกทั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีจุดการทำงานของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตช่วงกว้าง แต่จุดที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีเพียงจุดเดียว สำหรับปัญหาที่พบคือ จุดการทำงานของโหลดอยู่ห่างจากจุดที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าให้กำลังสูงสุด ซึ่งทำให้ใช้ประโยชน์จากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เต็มที่ ดังนั้น ระบบควบคุมการตามรอยกำลังงานสูงสุด(maximum power point tracking: MPPT) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการแปลงพลังงานทดแทนดังกล่าว ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำหน้าที่สกัดกำลังงานให้ได้มากที่สุดแล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอีกด้วย โดยงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบัน พบว่า วิธีการตามรอยกำลังงานสูงสุดที่ใช้สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีอยู่ 5 แบบด้วยกัน คือ (1) THE LOOKUP TABLE BASED หรือ การป้อนกลับสัญญาณกำลังไฟฟ้า(The power signal feedback : PSF) (Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis,2006) (2) THE STATE SPACE LINEARIZATION AND NONLINEAR STATE SPACE BASED (José Matas et al., 2008) (3) THE NEURAL NETWORK-FUZZY

LOGIC BASED (Hui Li, K. L. Shi, and P. G. McLaren, 2005) (4) THE HILL CLIMBING BASED (HSC) (Kazmi Syed Muhammad Raza et al., 2008) และ (5) THE MODIFIED OR HYBRID HCS/LOOKUP TABLE TECHNIQUES (Quincy Wang and Liuchen Chang, 2004) ซึ่งกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุด โดยหลักการแล้วจะเป็นการจัดการให้กำลังเอาต์พุตของกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ในระดับที่สูงสุด สอดคล้องกับความเร็วลมในขณะนั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอระบบควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ (stand-alone system) ที่สามารถปฏิบัติงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งานในพื้นที่ทุรกันดารหรือพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า รวมถึงแหล่งท่องเที่ยวตามอุทยานต่าง ๆ เป็นต้น และเนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้าแบบอิสระ จึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานสำรอง ซึ่งก็คือแบตเตอรี่ จากการใช้แหล่งพลังงานจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าและแบตเตอรี่อยู่ในระบบเดียวกัน จึงเรียกระบบเช่นนี้ว่า ระบบพลังงานแบบผสมผสาน งานวิจัยจะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด ที่มีความสามารถในการถ่ายโอนกำลังเอาต์พุตจากกังหันลมสู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด โดยจะเลือกวิธีการใดวิธีการหนึ่งจากทั้ง 5 วิธีที่ได้กล่าวในข้างต้น และการวิเคราะห์พฤติกรรมพลังงานของระบบ เพื่อก่อให้เกิดแนวทางการพัฒนาทางการสกัดพลังงานจากลมให้ได้มากที่สุดและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพและความเชื่อถือของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีระบบการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีนำไปสู่การพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืน
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาระบบวิศวกรรมต้นแบบที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน
- 1.2.5 เพื่อทำการศึกษา วิจัย และสร้างระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ระบบที่พิจารณาในโครงการวิจัยเป็นระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ
- 1.3.2 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

1.3.3 ดำเนินการทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดภายในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องจำลองคุณลักษณะของกังหันลม

1.3.4 ชุดทดสอบของตัวควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 โครงการวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

1.4.2 ควบคุมระบบการถ่ายโอนพลังงานในระบบให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่นำฮาร์โมนิกส์ของระบบเข้ามาเกี่ยวข้องในการพิจารณา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1.5.2 ได้ชุดค้นแบบทดสอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

1.5.3 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.5.4 ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้ รวมถึงขอบเขตของโครงการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของกังหันลม หลักการทำงาน และคุณลักษณะของกังหันลม รวมถึงรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรแปลงผันแบบบักก์ และเบตเตอร์

บทที่ 4 เป็นการอธิบายเกี่ยวกับการตามรอยกำลังสูงสุด โดยใช้วิธีการรบกวนและการสังเกต การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ รวมถึงโครงสร้างชุดทดสอบ และการทดสอบพร้อมผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. โปรแกรมตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB และภาคผนวก ข. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โครงการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ด้วยเหตุผลนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ โดยจากการศึกษาดังกล่าวในโครงการวิจัยนี้จะเลือกวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือผสมผสานกันจากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีต

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของกังหันลมให้มีความเหมาะสมตามสภาพความเร็วลมต่างๆ เพื่อดึงศักยภาพสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมออกมา โดยปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้า ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2003	Datta,R. and Ranganathan, V.T.	นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงพลังงานลมที่ความเร็วแตกต่างกัน โดยใช้โหมดการควบคุมความเร็ว วิธีการตามรอยค่ายอดของกำลังที่ไม่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของกังหันลมและความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งมีการอธิบายเงื่อนไขของขั้นตอนวิธีการค้นหาจุดการทำงานที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	Koutroulis, E. and Kalaitzakis, K.	นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบระบบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบแปลงพลังงานลม ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีประสิทธิภาพสูง และไม่โครคอลลทรเลเตอร์ ซึ่งใช้ควบคุมการทำงานของระบบตามรอยกำลังสูงสุด โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเพิ่มขึ้นประมาณ 11% - 50% เมื่อเทียบกับกรณีที่ระบบไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
2007	Wai, R.-J., Lin, C.Y. and Chang, Y.R.	นำเสนอขั้นตอนวิธีการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า รวมถึงพลังงานสูงสุดของการผิดพร่องในการขับของกลไก และการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในความเร็วที่แตกต่างกัน ระบบแปลงพลังงานลมที่ใช้ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแส วงจรกรอง วงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีการควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัล และเชื่อมต่อกับกริด สำหรับในส่วนของกังหันลมที่ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาศัยเครื่องจำลองกังหันลมในการทดสอบ
2007	Weiwei Li, Dianguo Xu, Wei Zhang and Hongfei Ma	นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลม โดยอาศัยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น เพื่อออกแบบและดำเนินการพิจารณาตามความเร็วที่แตกต่างกัน จากการพัฒนาและการทดสอบของระบบการควบคุมพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า เครื่องจำลองกังหันลมสามารถจำลองลักษณะของกังหันลมได้อย่างถูกต้อง ซึ่งได้รายงานหลักการวิเคราะห์ทางทฤษฎี การสร้างแบบจำลองกังหันลมและผลการทดลองของเครื่องจำลองกังหันลม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Li, H. and Chen, Z.	นำเสนอการเปรียบเทียบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการจำแนกกังหันลมตามคุณสมบัติ การควบคุม ชนิดของการขับ ข้อดีและข้อเสีย รวมถึงแนวโน้มการพัฒนาของระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมในอนาคต
2008	Raza Kazmi, S.M., Goto, H., Hai- Jiao Guo, and Ichinokura, O.	นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาลำดับการค้นหาค้นหาแบบไต่เขา ของขั้นตอนวิธีตามรอยกำลังสูงสุดในระบบแปลงผันพลังงานลม ซึ่งมีระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด โดยขั้นตอนวิธีจะมีการปรับตัวอยู่ตลอดเวลาอย่างชาญฉลาดเพื่อรับประกันว่าขั้นตอนวิธีมีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็วในการตามรอยกำลังสูงสุด
2008	Munteanu, I., Bacha, S., Bratcu, A.I., Guiraud, J., and Roye, D.	อธิบายถึงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพความน่าเชื่อถือและพลังงานที่เหมาะสมของระบบแปลงพลังงานลม ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการควบคุมแบบโหมดเลื่อน (Sliding Mode Control) โดยวิธีการที่นำเสนอมีจุดมุ่งหมายที่การออกแบบสัดส่วนพลังงานของการเพิ่มการสกัดพลังงานจากลม
2009	Thongam, J.S., Bouchard, P., Ezzaidi, H. And Ouhrouche, M.	นำเสนอระบบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด โดยใช้วิธีเครือข่ายประสาทเทียม และฝึกสอนด้วยวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ โดยอินพุตของเครือข่าย คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตแบบทันเวลา ค่าความเร็วโรเตอร์ ความเร็วลม และเอาต์พุตของเครือข่าย คือ สัญญาณความเร็วโรเตอร์สำหรับระบบแปลงพลังงานลม ซึ่งเป็นคำสั่งความเร็วที่เหมาะสมในการแปลงพลังงานลมเพื่อให้เกิดกำลังสูงสุด

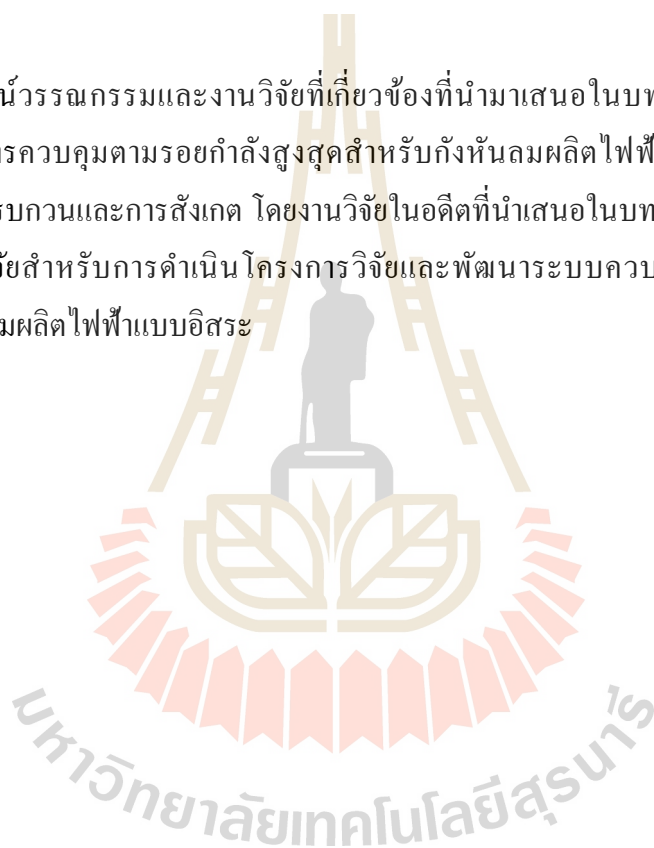
ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2013	Zakariya M. Dalala, Zaka Ullah Zahid, Wensong Yu, Younghoon Cho, Jih-Sheng (Jason) Lai	นำเสนอขั้นตอนวิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงพลังงานลมขนาดเล็ก การเปลี่ยนแปลงความเร็วตรวจสอบแบบทางอ้อมด้วยความชันของแรงดันไฟฟ้า วิธีที่นำเสนอมี 2 โหมดการทำงาน ดำเนินการภายใต้วิธี P&O โหมดที่มีการปรับตัวในสภาวะความเร็วผันผวนและโหมดคาดเดาภายใต้สภาวะความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพและเพิ่มความสามารถในการติดตามอย่างรวดเร็ว และมีการยืนยันด้วยชุดทดสอบต้นแบบ 1.5 kW
2015	Xiu-xing Yin, Yong-gang Lin, Wei Li, Ya-jing Gu, Peng-fei Lei and Hong-wei Liu	นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมโหมดเลื่อนแรงดันไฟฟ้าสำหรับสกัดกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลม ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมแบบพีซีซีและตัวควบคุมโหมดเลื่อนแรงดันไฟฟ้า ตัวควบคุมพีซีซีถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าเหมาะสมและตัวควบคุมโหมดเลื่อนแรงดันไฟฟ้าจะทำหน้าที่จัดการความผิดพลาดในสภาวะคงตัว ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสกัดพลังงานสูงสุดจากลมได้
2015	Yacine Daili, Jean-Paul Gaubert and Lazhar Rahmani	นำเสนอการปรับปรุงการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สำหรับระบบแปลงพลังงานลมขนาดเล็ก โดยดำเนินการควบคุมด้วยโหมดแบบปรกติกับโหมดคาดเดาในสภาวะความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไม่ต้องอาศัยพารามิเตอร์ของระบบและตัวตรวจวัดทางกล ซึ่งผลทดสอบยืนยันว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีของผลตอบสนองแบบไดนามิกเมื่อเทียบกับวิธี P&O แบบดั้งเดิม

จากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระมีหลายวิธีด้วยกันสามารถแบ่งได้โดยอาศัยข้อมูลคุณลักษณะของกังหันลมและวิธีที่ไม่พึ่งพาข้อมูลดังกล่าว และแบบผสมผสานที่ 2 แบบเข้าด้วยกัน โดยในโครงการวิจัยนี้จะนำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต ซึ่งเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยและไม่จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลของกังหันลม มีหลักการควบคุมภายใต้กลไกการค้นหาแบบวนรอบหาตำแหน่งการทำงานที่เหมาะสมของกังหันลม

2.3 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำมาเสนอในบทที่ 2 นี้เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกใช้วิธีการรบกวนและการสังเกต โดยงานวิจัยในอดีตที่นำเสนอในบทนี้ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการดำเนินโครงการวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ



บทที่ 3

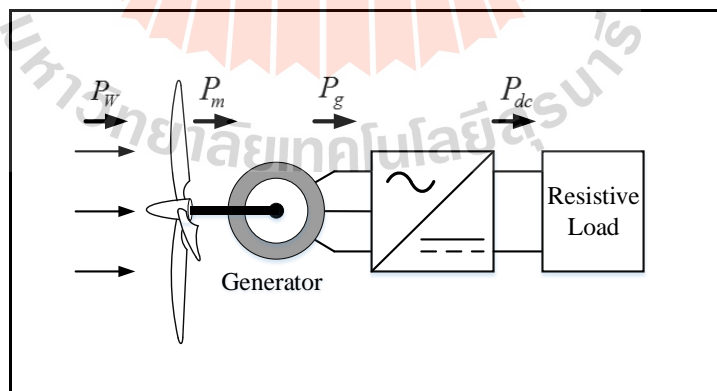
ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 บทนำ

ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอบกำลังสูงสุดประกอบด้วยกังหันลมที่เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าโพลดของระบบ และเนื่องจากเป็นระบบแบบอิสระจึงมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำรอง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงระบบแปลงผันพลังงานลม หลักการทำงานและแบบจำลองของกังหันลมที่อธิบายถึงคุณลักษณะของกังหันลม ระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า วงจรแปลงผันแบบบัลค์ รวมถึงแบตเตอรี่ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานในส่วนต่างๆ ของระบบ

3.2 ระบบแปลงผันพลังงานลม

โครงสร้างระบบแปลงผันพลังงานลมโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยกังหันลมที่ทำหน้าที่ดักจับพลังงานลม (P_w) และเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทางกลที่เพลลาของกังหันลม (P_m) พลังงานทางกลดังกล่าวนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานทางไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_g) ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (P_{dc}) ก่อนนำไปจ่ายให้แก่โพลดของระบบ หรือนำไปประจุลงแบตเตอรี่



รูปที่ 3.1 ระบบแปลงผันพลังงานลม

3.3 หลักการทำงานของกังหันลม

หลักการทำงานของกังหันลม เริ่มจากพลังงานลม พลังงานลม (E_{wind}) เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้น อากาศที่มีมวล m เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v_w) จะทำให้เกิดพลังงานจลน์ดังสมการที่ (3-1)

$$E_{wind} = \frac{1}{2}mv_w^2 \quad (3-1)$$

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ (A) จะสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลาได้ดังนี้

$$m = \rho Av_w \quad (3-2)$$

แทนสมการที่ (3-2) ลงในสมการที่ (3-1) จะได้สมการของพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลา ซึ่งก็คือสมการของกำลังงานลม ดังต่อไปนี้

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho Av_w^3 \quad (3-3)$$

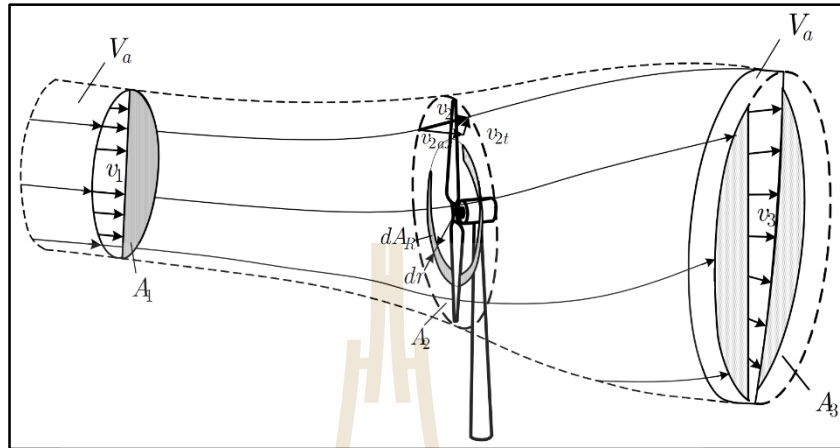
โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

จากรูปที่ 3.2 พลังงานที่สกัดได้จากปริมาตรของอากาศ V_a ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 และมีความเร็วลม v_1 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมทำให้ความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็น v_3 ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่หน้าตัด A_3 ถูกขยายขึ้นเมื่อ V_a เคลื่อนที่ผ่านกังหัน ซึ่งสามารถเขียนสมการพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (3-4)$$

จะได้สมการของพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดต่อหน่วยเวลา ดังนี้

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} = d \frac{V_a \rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (3-5)$$



รูปที่ 3.2 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม ($A_2 = A_{turbine}$)

$$\frac{dV_a}{dt} = A_{turbine} v_2 \quad (3-6)$$

ฉะนั้นจะได้

$$P_w = A_{turbine} \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 \quad (3-7)$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม ($A_{turbine}$) ความเร็วลม และลักษณะของใบของกังหันลม ตามทฤษฎีของเบตซ์ (Betz) กำลังงานสูงสุดที่กังหันลมสามารถสกัดได้คือ

$$P_w^{\max} = \frac{16}{27} A_{turbine} \frac{\rho}{2} v_1^3 \quad (3-8)$$

โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วลม

$$v_2 = \frac{2}{3} v_1 \text{ และ } v_3 = \frac{1}{3} v_1 \quad (3-9)$$

ถ้าเปรียบเทียบกำลังงานกังหันลม(P_w)กับกำลังงานลม(P_{wind}) ที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศอัตราส่วนระหว่างพลังงานลมและพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้จากการแปลงพลังงานลมที่มีอยู่ในอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่เดียวกัน จะเรียกว่า “สัมประสิทธิ์กำลัง C_p ” ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยที่ค่าคุณลักษณะของ C_p เป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่สามารถสกัดได้คือ

$$C_p = \frac{P_w^{\max}}{P_{Wind}} \quad (3-10)$$

$$\text{ดังนั้นค่า } C_p = \frac{16}{27} = 0.593$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p ได้รับการพิสูจน์โดย A. Betz และอาจเรียกว่า ค่าตัวประกอบเบตซ์ หรือ ขีดจำกัดเบตซ์ โดยค่าดังกล่าวนี้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดตามทฤษฎีของเบตซ์ จึงทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดตามทฤษฎีแปลงผันพลังงานลมที่สามารถทำได้คือ 59.3 % ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ C_p ในอุดมคติ สำหรับการแปลงพลังงานลม อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติกังหันลมจริงมักจะมีค่า C_p น้อยกว่า ค่าตัวประกอบเบตซ์อย่างมีนัย แม้แต่กังหันลมที่ทันสมัยแล้วก็ตาม เนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น การสูญเสียที่เกิดตามหลักอากาศพลศาสตร์ ที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบใบพัดและโครงสร้าง (จำนวนของใบพัด น้ำหนัก ความแข็งแรง ฯลฯ) ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่า C_p และประสิทธิภาพของระบบกังหันลมแตกต่างกันไป

ค่าสัมประสิทธิ์ C_p เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม λ (Tip speed ratio : TSR) และมุมขว้างใบพัด β (Pitch angle) สามารถอธิบาย λ ได้ตามสมการที่ (3-11)

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (3-11)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วรอบเชิงมุมโรเตอร์ R คือ รัศมีใบพัดในหน่วยเมตร และ v_w คือ ความเร็วลม ดังนั้น กำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้จริงจะแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์ C_p สมการพลังงานที่กังหันลมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho}{2} A v_w^3 \quad (3-12)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ปีกกวาดกังหันลม
 v_w คือ ความเร็วลม
 $C_p(\lambda, \beta)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ
 P_m คือ กำลังงานที่กังหันลม

สมการทั่วไปที่ใช้เป็นแบบจำลองของ $C_p(\lambda, \beta)$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัด คือ

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3-13)$$

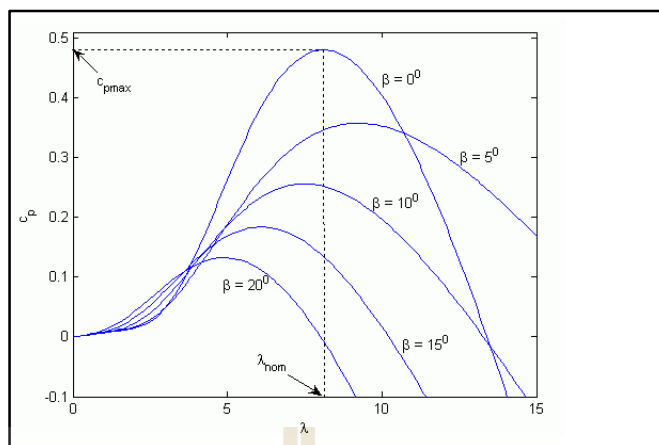
เมื่อ $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$

และ $\lambda \frac{\omega R}{v_w}$

ค่าสัมประสิทธิ์ c_1 ถึง c_6 คือ $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ และ $c_6 = 0.0068$.
 คุณลักษณะ $C_p - \lambda$ ที่แตกต่างกันของมุม β แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ค่าสูงสุดของ C_p ($C_{p,\max} = 0.48$) คือ ความสามารถสูงสุดที่ทำได้สำหรับ $\beta = 0^\circ$ และ $\lambda = 8.1$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสามารถคำนวณแรงบิดได้ ดังนี้

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C(\lambda, \beta) / \omega \quad (3-14)$$



รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ $C_p - \lambda$

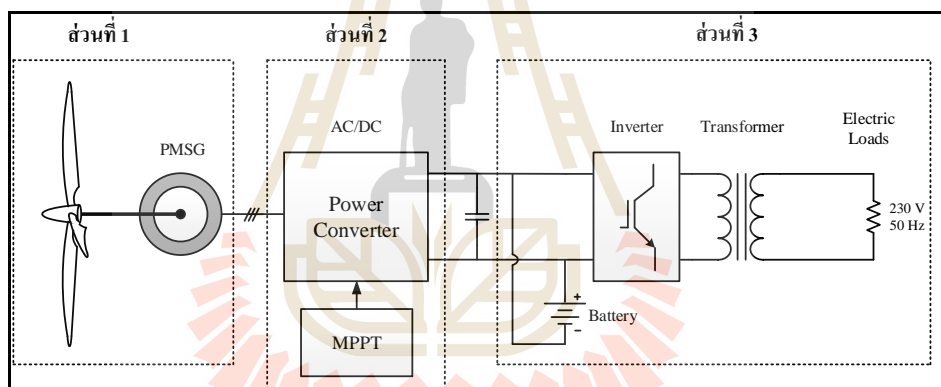
3.4 ระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ระบบควบคุมกังหันลมสามารถแบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ 2 แบบ คือ กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับกริด (Grid connection) ระบบนี้จะนำพลังงานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมจ่ายเข้าสู่กริด ซึ่งระบบแบบนี้จะมีการบำรุงรักษาน้อยแต่ก็มีข้อแม้ว่า ระบบนี้จะใช้ได้เฉพาะพื้นที่ที่ไฟฟ้าเข้าถึงเท่านั้น สำหรับแบบที่ 2 คือ กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ (Stand alone) ระบบนี้จะนำพลังงานที่ได้จากกังหันลมไปประจุแบตเตอรี่ จากนั้นก็นำไปใช้งานผ่านอินเวอร์เตอร์ ระบบในลักษณะนี้เหมาะแก่การนำไปใช้งานในพื้นที่ที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึง ซึ่งเป็นระบบที่จะใช้ในโครงการวิจัยนี้

โดยทั่วไปแล้วระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีขายอยู่ในปัจจุบันจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ต่ออยู่กับวงจรเรียงกระแสสามเฟส เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและต่อกับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid connection) และทำการป้อนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลมเข้าสู่ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นระบบแบบเชื่อมต่อกับกริด ในบางกรณีก็อาจมีการนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสมาทำการชาร์จแบตเตอรี่และอาจจะมีการต่อไปใช้งาน โดยตรงกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงหรืออาจต่อกับอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงผันพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งระบบที่ขายอยู่ส่วนใหญ่ จะยังไม่มีระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาและวิจัยระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ที่มีระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

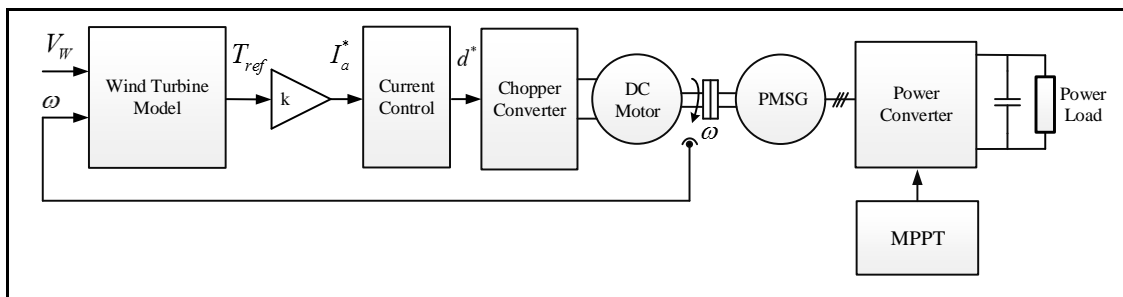
เพื่อสกัดพลังงานจากลมให้ได้มากที่สุดโดยไม่เสียไปแบบสูญเปล่า และเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งส่วนที่ 1 ของรูปคือ กังหันลมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส แบบแม่เหล็กถาวร เนื่องจากข้อได้เปรียบที่มีมากกว่าเครื่องจักรกลชนิดอื่น ๆ เช่น สามารถขับเคลื่อนได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องใช้กล่องเกียร์ ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายภายนอกเพิ่มเติมเพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กหมุนสำหรับการกระตุ้น การบำรุงรักษาต่ำ สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วรอบต่ำ มีประสิทธิภาพสูง และเชื่อมต่ออยู่กับระบบควบคุมกังหันลม (Wind turbine controller) ซึ่งเป็นส่วนที่ 2 คือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด และถ่ายโอนพลังงานสู่ส่วนที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย แบตเตอรี่ สำหรับเป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำรอง วงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส หม้อแปลงไฟฟ้า และโหลดของระบบ



รูปที่ 3.4 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีระบบตามรอยกำลังสูงสุด

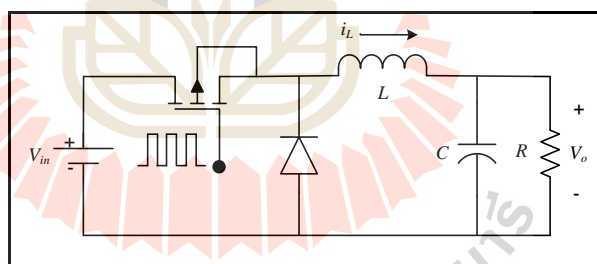
สำหรับการทดสอบและพัฒนาระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระแสดงในรูปที่ 3.4 จะอาศัยเครื่องจำลองกังหันลมแทนกังหันลมจริง เนื่องจากสามารถดำเนินการทดสอบระบบควบคุมได้สะดวก ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย เนื่องจากการทดสอบกับกังหันลมจริงนั้นมีความยุ่งยาก ไม่สามารถกำหนดความเร็วจากธรรมชาติได้ ทำให้ไม่สะดวกต่อการทดสอบ สำหรับแบตเตอรี่ วงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส และ โหลดในส่วนที่ 3 ของรูปที่ 3.4 จะพิจารณาเป็นส่วนเดียวกัน คือ โหลดกำลังไฟฟ้า (Power load) ดังนั้น สามารถแทนระบบที่พิจารณาได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างสำหรับการทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

3.5 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ใช้ใน โครงการวิจัยจะเลือกใช้วงจรแปลงผันแบบบัคค์เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีค่าแรงดันมากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบัคค์สามารถลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้มีค่าต่ำกว่าหรือมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต โดยโครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ประกอบด้วยสวิตช์ ซึ่งในโครงการวิจัยนี้เลือกใช้มอสเฟต (Mofset) ไดโอดตัวหนึ่งขั้วนำและตัวเก็บประจุ วงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

จากวงจรในรูปที่ 3.6 สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ V_{out} ได้จากสมการที่ (3-15)

$$V_{out} = dV_{in} \quad (3-15)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

โครงการวิจัยนี้จะนำวงจรแปลงผันแบบบัคก์ไปควบคุมการทำงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อให้จุดทำงานของกึ่งนำผลผลิตไฟฟ้าให้ผู้ใช้ตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ตามสภาพความเร็วลมต่าง ๆ

3.6 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงาน และจ่ายพลังงานให้กับโหลด ในกรณีที่ไม่มีพลังงานจากกึ่งนำผลผลิต แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) ที่ประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบพร้อม กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) แบตเตอรี่อาจประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์ หรือมากกว่าก็ได้ แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บไฟฟ้าเท่านั้น ไม่ได้ผลิตไฟฟ้าสามารถ ประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ (recharge) ได้หลายครั้งและประสิทธิภาพจะไม่เต็ม 100% จะอยู่ที่ประมาณ 80% เพราะมีการสูญเสียพลังงานบางส่วน ไปในรูปความร้อนและปฏิกิริยาเคมีจากการประจุและการจ่ายประจุ แบตเตอรี่จัดเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และเสียหายได้ง่าย หากดูแลรักษาไม่ดีเพียงพอ หรือใช้งานผิดวิธี อายุการใช้งานของแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป เนื่องด้วยวิธีการใช้ การบำรุงรักษา การประจุ และอุณหภูมิ เป็นต้น

แบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับระบบกึ่งนำผลผลิตไฟฟ้าแบบอิสระมากที่สุดคือ แบตเตอรี่แบบจ่ายประจุสูง (Deep discharge battery) เพราะถูกออกแบบให้สามารถจ่ายพลังงาน ปริมาณมากหรือน้อยได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานๆ โดยไม่เกิดความเสียหาย และสามารถใช้ไฟฟ้า ที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่องถึง 80% โดยแบตเตอรี่ไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งต่างจาก แบตเตอรี่รถยนต์ที่ถูกออกแบบให้จ่ายพลังงานสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ถ้าใช้ไฟฟ้ามากกว่า 20-30% ของพลังงานที่เก็บอยู่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงได้

ความจุของแบตเตอรี่ในการประจุพลังงานมีหน่วยเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-Hour หรือ Ah) พลังงานในแบตเตอรี่ 12 V 100 Ah เท่ากับ 12V x 100Ah ถ้าแบตเตอรี่ 100 Ah เท่ากับว่า แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายกระแส 1 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 100 ชั่วโมง หรือ แบตเตอรี่จ่าย กระแส 10 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง หรือ ถ้าแบตเตอรี่จ่ายกระแส 5 แอมแปร์อย่าง ต่อเนื่องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งทั้งหมดนี้จ่าย กระแสเท่ากับ 100 Ah เป็นต้น จะเห็นได้ว่า แบตเตอรี่ ที่มีความจุเท่ากันอาจมีความเร็วในการจ่ายกระแสต่างกัน ได้ ดังนั้น การจะทราบความจุของ แบตเตอรี่ต้องทราบถึงอัตราการจ่ายกระแส ซึ่งมักจะกำหนดเป็นจำนวนชั่วโมงของการจ่ายกระแส เต็มที่ การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่สำหรับระบบกึ่งนำผลผลิตไฟฟ้านั้น ขึ้นอยู่กับความจุของ

แบตเตอรี่ในการจัดเก็บพลังงาน อัตราการจ่ายประจุสูงสุด อัตราการประจุสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดที่จะนำแบตเตอรี่ไปใช้งาน

การออกแบบแบตเตอรี่สามารถคำนวณ ขนาดกระแสต่อชั่วโมง (Ah) ของแบตเตอรี่ได้จากสมการที่ (3-16)

$$Ah = \frac{Demandload}{V_{battery} \times DOD \times Batteryload} \quad (3-16)$$

โดยที่ *Demandload* คือ ความต้องการในการใช้โหลดต่อชั่วโมง (*Wh*)

DOD คือ Deep of discharge หรือ ค่าความลึกของการคายประจุโดยแบตเตอรี่แต่ละยี่ห้อไม่เท่ากัน อยู่ระหว่าง 45%-60%

Batteryloss คือ ค่าสูญเสียในแบตเตอรี่ โดยปกติแล้วแบตเตอรี่จะทำงานด้วยเซฟตี้แฟกเตอร์ (Safety Factor) ที่มีไว้เพื่อป้องกันการชาร์จมากเกินไป (*over charge*) และการคายประจุมากเกินไป (*over discharge*)

โดยในโครงการวิจัยจะเลือกใช้แบตเตอรี่ ขนาด 12V หากจ่ายโหลดที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 40 วัตต์ต่อชั่วโมง ค่าความลึกของการคายประจุ 60% และค่าสูญเสียในแบตเตอรี่ 85% ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$Ah = \frac{40W}{12V \times 0.6 \times 0.85} \quad (3-17)$$

คำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ 6.536 Ah ดังนั้น ควรเลือกแบตเตอรี่ที่มีขนาดมากกว่า 6.536 Ah โดยโครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12V 7Ah

3.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของระบบแปลงผันพลังงานลม การทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวถือเป็นสิ่งสำคัญต่อการหาแนวทางการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ และเนื้อหาภายในบทนี้ยังได้กล่าวถึงรายละเอียดของระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้า วงจรแปลงผันแบบบัสค์ และแบตเตอรี่ที่เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการสร้างระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4

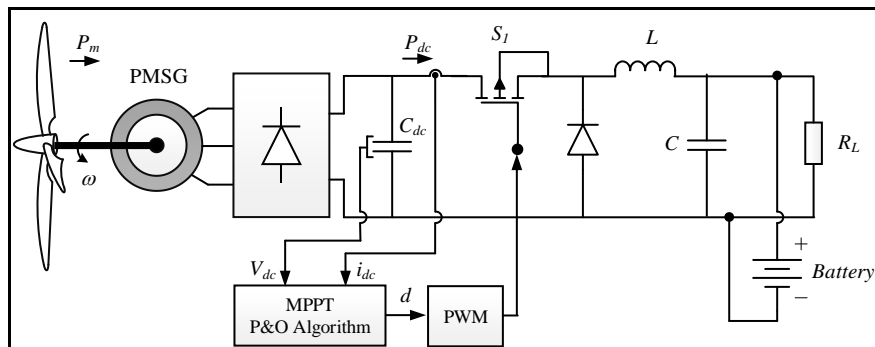
การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต

4.1 บทนำ

ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่นำเสนอในบทนี้ คือ วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation: P&O) โดยใน โครงงานวิจัยนี้เรียกว่า P&O ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมที่จะได้กำลังสูงสุดสอดคล้องตามความเร็วลม เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการการทำงานของวิธี P&O การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์ระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด รวมไปถึงการสร้างชุดทดสอบของวิธี P&O และการเขียนโปรแกรมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR พร้อมผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

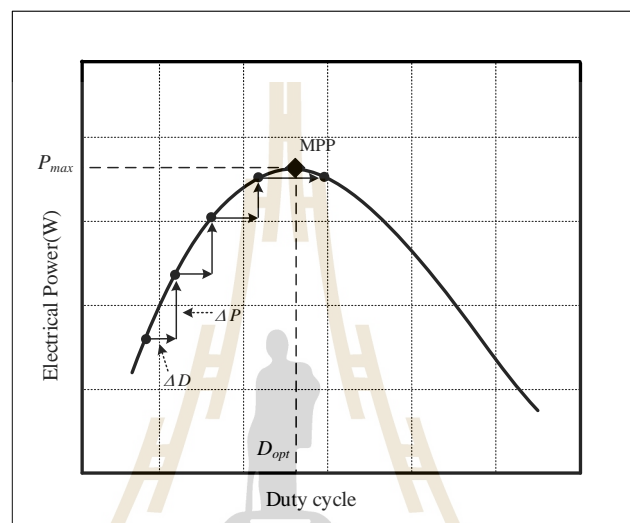
4.2 ระบบที่พิจารณา

รายละเอียดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยกังหันลมแนวนอนเชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรเรียงกระแสสามเฟสนำมาใช้แปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (dc-link) ซึ่งเป็นอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบักที่นำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบเพื่อหาจุดที่ได้กำลังสูงสุดของกังหันลม โดยเอาต์พุตของวงจรจะนำไปประจุแบตเตอรี่และจ่ายให้แก่โหลดของระบบ (R_L) ซึ่งใช้แทนอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับจ่ายโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 4.1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O เป็นวิธีที่เรียบง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง อีกทั้งไม่จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับพารามิเตอร์หรือคุณลักษณะของกังหันลม วิธีการนี้เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าที่เหมาะสมสำหรับฟังก์ชันที่พิจารณาด้วยการวนรอบเปลี่ยนแปลงคำตอบและตรวจสอบผลลัพธ์ในทุกรอบของการคำนวณ การดำเนินการดังกล่าวสามารถทำให้คำตอบมีการลู่เข้าค่าที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่กำหนดได้

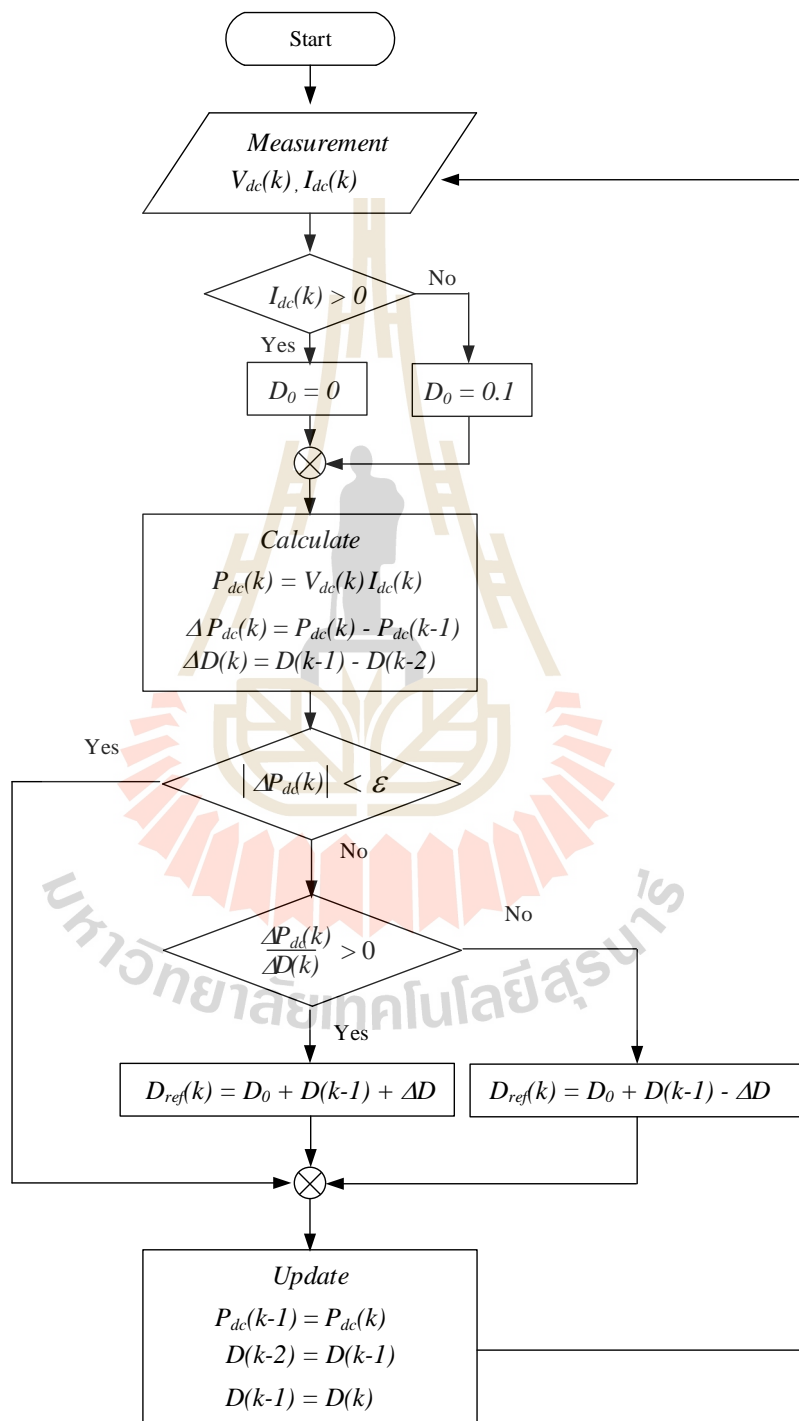


รูปที่ 4.2 การควบคุมลู่เข้าจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

หลักการควบคุมด้วยวิธี P&O สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 สามารถทำได้ โดยการปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัสก์ อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) เทียบกับค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle: D) มีความสอดคล้องกันกับความสัมพันธ์พลังงานเอาต์พุตทางกล (P_m) เทียบกับความเร็วเชิงมุม (ω) ตามคุณลักษณะของกังหันลมดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 การใช้ความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบกับ D มีข้อได้เปรียบที่ไม่ต้องใช้ตัวตรวจวัดความเร็วรอบ ทำให้ลดความยุ่งยากในการติดตั้งและค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ลงได้

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดในโครงการวิจัยนี้อาศัยวิธี P&O ซึ่งเป็นกลยุทธ์ในการค้นหาค่าที่เหมาะสม โดยมีหลักการควบคุม กล่าวคือ หากจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านซ้ายของจุดที่มีกำลังสูงสุด (maximum power point: MPP) ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา เพื่อให้เข้าสู่ตำแหน่งที่มีกำลังสูงสุดหรือบริเวณที่มีความชันเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกัน หากจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านขวาของจุดที่มีกำลังสูงสุด (MPP) ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย การควบคุมดำเนินการในลักษณะของการวนรอบ

การค้นหา ซึ่งแต่ละรอบทำการปรับเพิ่มและลดสัญญาณควบคุมด้วยค่าคงที่ ΔD ดังรูปที่ 4.2 แสดงการลู่เข้าสู่จุด MPP จากทางด้านขวาของจุด MPP ซึ่งมีแผนภาพไคอะแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพไคอะแกรมการตามรอยกำลังสูงสุด

การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงแผนภาพไดอะแกรมดังรูปที่ 4.3 โดยเริ่มจากการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าแล้วทำการตรวจสอบเงื่อนไขหากไม่มีกระแส I_{dc} ไหลให้กำหนดค่าวัฏจักรตั้งต้น ($D_0 = 0.1$) แต่หากพบว่ามีกระแสไหลให้กำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ตั้งต้นเป็นศูนย์ ลำดับถัดมาเป็นการคำนวณกำลังไฟฟ้า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) และค่าวัฏจักรหน้าที่ (ΔD) โดยใช้ค่าเวลาในปัจจุบันลบค่าในอดีต จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไขค่าผิดพลาด ซึ่งพิจารณาด้วยค่า (ΔP) เพราะระบบควบคุมบังคับให้กังหันลมทำงานที่จุดที่ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วค่า (ΔP) จะมีย่าน้อยมาก จึงให้หยุดการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรหน้าที่ตามเงื่อนไข $|\Delta P| < \varepsilon$ และทำการอัปเดตค่า $P_{dc}(k-1)$, $D(k-2)$ และ $D(k-1)$ เพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป ในทางกลับกันหาก $|\Delta P| > \varepsilon$ อัลกอริทึมจะทำการตรวจสอบเงื่อนไข $\frac{\Delta P}{\Delta D} > 0$ หากเป็นจริง อัลกอริทึมจะทำการปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ $D_{ref}(k) = D_0 + D(k-1) + \Delta D$ หาก $\frac{\Delta P}{\Delta D} < 0$ อัลกอริทึมจะทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น $D_{ref}(k) = D_0 + D(k-1) - \Delta D$ จากนั้นจึงอัปเดตค่า $P_{dc}(k-1)$, $D(k-2)$ และ $D(k-1)$ แล้วจึงกลับไปเริ่มต้นทำงานใหม่อีกครั้ง โดยในการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ กำหนดให้ $\varepsilon = 10$ และ $\Delta D = 0.05$ แต่สำหรับชุดทดสอบจริงการกำหนดค่าดังกล่าวจะได้จากการทดสอบชุดทดลองจริง

4.3 การจำลองสถานการณ์

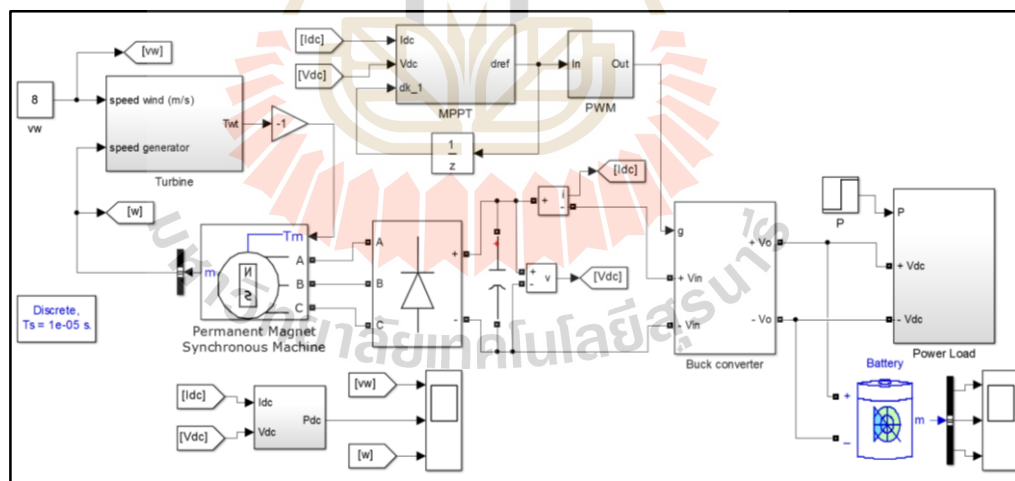
สำหรับการยืนยันหลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่ได้นำเสนอในโครงการวิจัยนี้ว่าสามารถดึงกำลังสูงสุดจากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอ การจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 4.1 โดยมีพารามิเตอร์ในส่วนต่างๆของระบบตามตารางที่ 4.1 การจำลองสถานการณ์อาศัยโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 และโปรแกรมสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB แสดงในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้า
ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

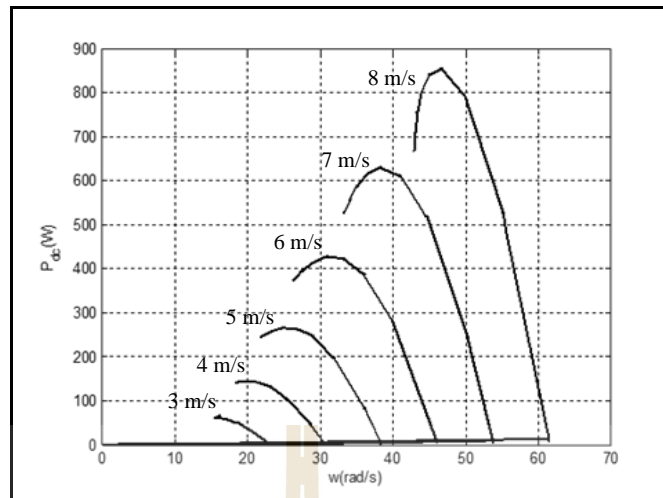
พารามิเตอร์กังหันลม	รายละเอียด
R	1.74 m
ρ	1.255 kg/m ³

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้า
ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O (ต่อ)

พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รายละเอียด
<i>Power rate</i>	1000 W
<i>Speed rate</i>	500 rpm
<i>number pole pairs</i>	6
R_s	0.57 Ω
$L_d = L_q$	5.5 mH
J	0.016 kg.m ²
พารามิเตอร์วงจรแปลงผันแบบบักค์	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
C_o	500 μ F
<i>Battery</i>	24 V



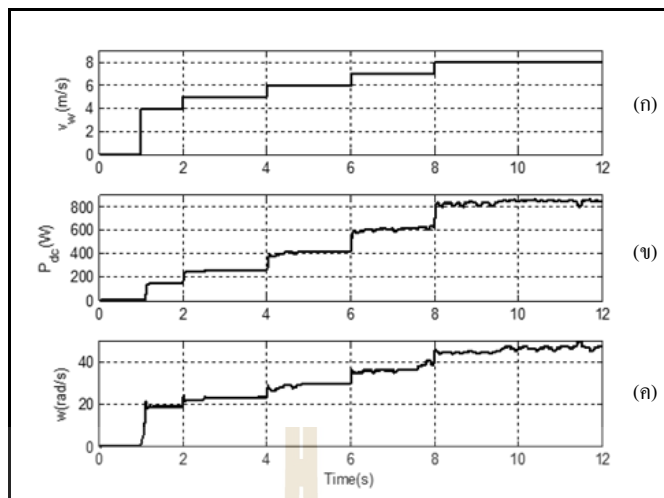
รูปที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
โดยใช้วิธี P&O ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB



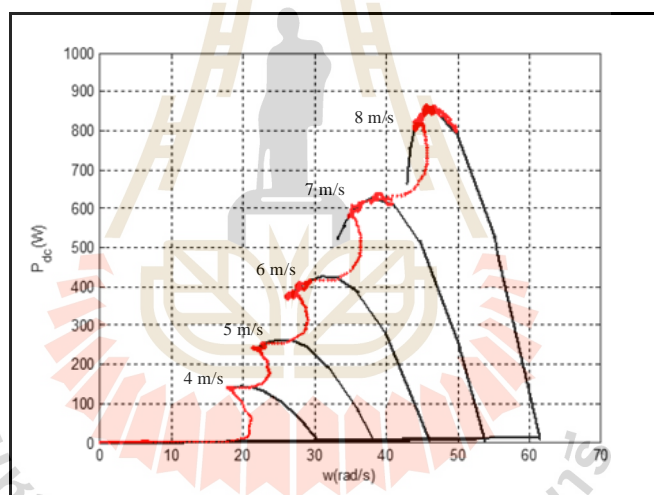
รูปที่ 4.5 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การจำลองสถานการณ์ทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในรูปที่ 4.4 สามารถกระทำได้ โดยการกำหนดให้ความเร็วลมมีค่าคงที่และปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งจาก 0% ถึง 100% แล้วตรวจจับค่ากำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟคุณลักษณะของกังหันลมได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะทำให้ทราบถึงจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลยืนยันได้ในการทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดของกังหันลม

การจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O 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 ดังรูปที่ 4.6(ก) กราฟผลตอบแทนของกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบเชิงมุมของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.6(ข) และ 4.6(ค) ซึ่งพบว่า กำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วลม เพื่อตรวจสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดจึงดำเนินการตรวจจับค่ากำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันขณะที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นทางเดินของการตามรอยกำลังสูงสุดเทียบกับกราฟคุณลักษณะของกังหันลม โดยจะพบว่า ทางเดินของกำลังไฟฟ้าพยายามลู่อเข้าสู่จุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งยืนยันได้ว่าระบบสามารถตามรอยกำลังสูงสุดได้



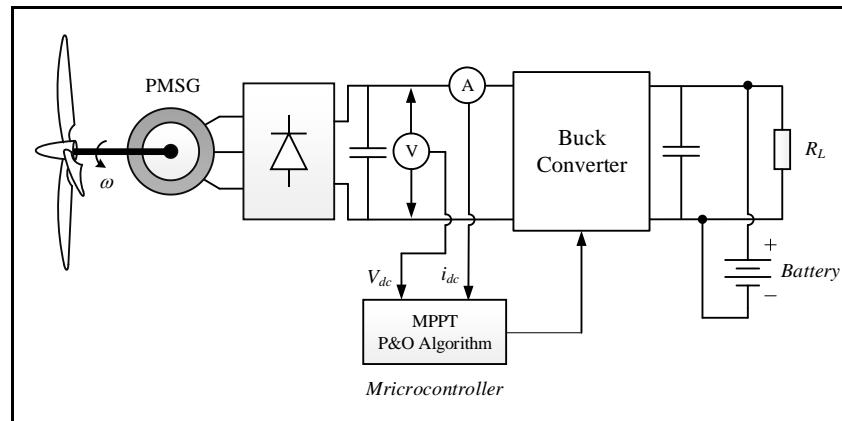
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.7 เส้นทางการตามรอยกำลังสูงสุด

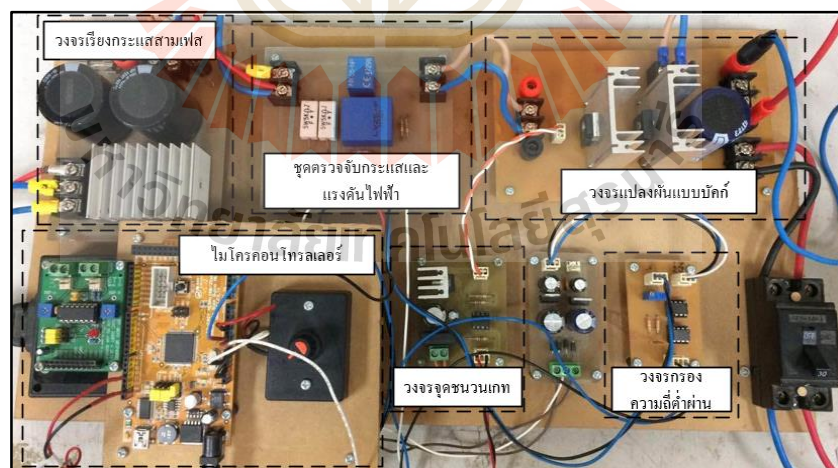
4.4 การสร้างชุดทดสอบตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

จากการจำลองสถานการณ์ตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ได้นำเสนอในโครงการวิจัยสามารถดึงศักยภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมได้สอดคล้องตามสภาพความเร็วลมต่าง ๆ และเพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ว่าวิธีที่ได้นำเสนอในโครงการวิจัยว่าสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติจึงดำเนินการสร้างชุดทดสอบ สำหรับโครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 โดยมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อร่วมกับตัวตรวจับกระแสและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟส ตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่วัดค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสป้อนให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่ใช้สำหรับควบคุมสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ เพื่อควบคุมให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงดังรูป 4.9 สำหรับรายละเอียดการออกแบบและการทดสอบ จะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.9 ภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

4.4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส จึงใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้สำหรับการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรของกังหันลมผลิตไฟฟ้าพิกัด 500 W 21 A จึงเลือกใช้วงจรเรียงกระแสแบบโมดูลขนาด 600 V 35 A ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 โมดูลวงจรเรียงกระแสสามเฟส

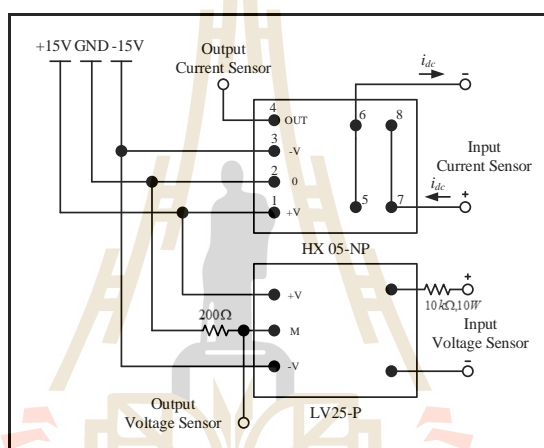
4.4.2 การสร้างชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า

สำหรับในโครงการวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้ชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด โดยในส่วนของชุดตรวจจับแรงดันผู้วิจัยได้เลือกใช้วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25 ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัดที่ 500 V และกระแส 10 mA วงจรตรวจจับต้องการไฟเลี้ยง +15V, 0V และ -15V และต้องมีการออกแบบค่าความต้านทานต้านแรงสูงเพื่อไม่ให้มีกระแสเกินพิกัดที่กำหนด โดยสามารถคำนวณค่าความต้านทานได้จากสมการที่ (4-1) กำหนดให้แรงดันต้านแรงสูงที่ 100 V จะได้

$$R_{HV} = \frac{V_{HV}}{I_{HV}} = \frac{100}{10 \times 10^{-3}} = 10k\Omega \quad (4-1)$$

ในส่วนค่าความต้านทานแรงต่ำจะใช้ค่าความต้านทานที่ปรับจูนโดยการทดสอบเพื่อไม่ให้แรงดันไฟฟ้าเกิน 5 V ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่บอร์ด AVR สามารถอ่านได้ โดยค่าความต้านทานที่ใช้คือ 200Ω

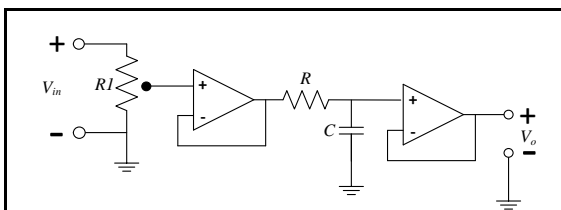
สำหรับในส่วนของวงจรตรวจจ็ับกระแสไฟฟ้าจะใช้วงจรตรวจกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัด 30 แอมป์ ทำหน้าที่ในการวัดกระแสไฟฟ้า โดยใช้ไฟฟ้าเลี้ยง +15V, 0V และ -15V ร่วมกับตัวตรวจจ็ับแรงดันไฟฟ้า ภาพรวมการต่อวงจรตรวจจ็ับแรงดันและกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.11 และวงจรตรวจจ็ับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานจริงดังรูปที่ 4.12 โดยเอาต์พุตของวงจรตรวจจ็ับกระแสจะนำไปเข้าวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและวงจรกันชนในรูปที่ 4.13 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณได้เลือกค่าความถี่ตัดขำที่ 10 Hz ซึ่งมีความต้านทานปรับค่าได้ $R1 = 5k\Omega$ ทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณเพื่อไม่ให้เกินพิกัดของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ พารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณที่ใช้งานมีค่า $R = 165k\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C = 0.1\mu F$



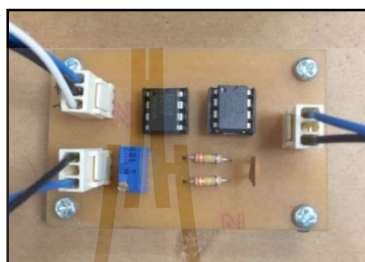
รูปที่ 4.11 ภาพรวมการต่อวงจรตรวจจ็ับแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.12 วงจรตรวจจ็ับแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.13 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและวงจรถักดัน



รูปที่ 4.14 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

การทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 4.12 ดำเนินการโดยการเพิ่มค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสด้วยการปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรให้มีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

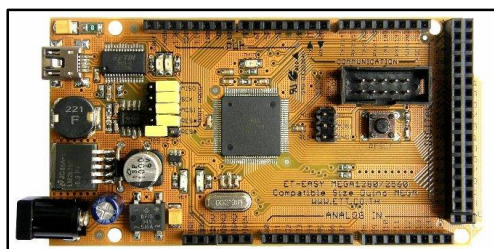
V_{dc} (V)	$V_{sen,dc}$ (V)
0	0
10	0.56
20	0.97
30	1.48
40	1.98
50	2.43
60	2.92
70	3.5
80	4.1

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

I_{dc} (A)	$V_{sen,Idc}$ (V)
0	0
0.5	0.07
1	0.2
1.5	0.3
2	0.463
2.5	0.6
3	0.75
3.5	0.89
4	1

4.4.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท ATMEL โดย AVR จัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลใหม่จาก ATMEL ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูง โดยแบ่งออกเป็นหลายรุ่น เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งานในขณะที่ยังคงความมีประสิทธิภาพที่เท่ากัน สำหรับงานโครงการวิจัยผู้วิจัยเลือกใช้บอร์ด ATMEGA 1280 เนื่องจากเป็นชุดบอร์ด AVR ที่พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ ของ Arduino ของทางบริษัท อีทีที เป็นผู้จัดทำ ซึ่งงานต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งาน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย โดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้กับชิพ AVR ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้มีจำนวนพอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต รวมทั้ง พอร์ตดิจิตอล, พอร์ตแอนาล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM, พอร์ตการสื่อสารอนุกรม ผ่านมอดูและขนาดหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ทางบริษัท อีทีที จึงได้นำ ATMEGA 1280 มาพัฒนาเป็นชุดบอร์ด โดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA 1280 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 1280

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับชุดบอร์ด ET-EASY MEGA 1280

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
- สถาปัตยกรรมแบบ RISC
 - มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลคำสั่ง
 - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
 - ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
- หน่วยความจำ
 - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโปรแกรม 128 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแบบ EEROM ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 100,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแรมชนิดเอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
 - เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปี ที่อุณหภูมิ 85 °C และกว่า 100 ปีที่ 25 °C
- มีระบบโปรแกรมตัวเองอยู่ในชิพ
- สามารถทำการอ่านขณะเขียนได้จริง โดยสามารถล๊อคการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
- มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant)
- คุณสมบัติการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
 - มีตัวตั้งเวลาและนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานได้ 2 โหมด
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับเวลาขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่แยกโหมดการทำงานได้ 3 โหมด
 - คือ prescaler, compare และ capture
 - มีตัวนับเวลาจริง (real time counter) ที่เนกวงจรกำหนดความถี่ได้
 - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
 - มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
 - มีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
 - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
 - เชื่อมประสานแบบอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งแบบมาสเตอร์และสเลฟ
 - มีการเชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น แบบส่งข้อมูลเรียงไป

- มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
- มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนาล็อกในตัว
- มีการรองรับการขัดจังหวะและ เวก-อัฟ (wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขาชิพ
- คุณสมบัติพิเศษ
- มีระบบเริ่มระบบเมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับเกิดบราวน์เอาต์ (brown-out) ที่สามารถกำหนดการทำงานได้
- มีตัวตรวจจับหาความเที่ยงตรงของออสซิลเลเตอร์ในตัว
- มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายในและภายนอก
- อินพุต/เอาต์พุต และตัวถัง
- มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 พิน
- ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
- ช่วยอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40 °C ถึง 85 °C
- การใช้พลังงาน
- โหมดการทำงาน : ที่ 1 MHz ต้องการแรงดัน 1.8 V กระแส 0.5 mA
- โหมดเพาเวอร์ดาวน์ (Power-down) ต้องการกระแส 0.1 μ A ที่แรงดัน 1.8 V

การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลหรือ ADC (analog to digital converter) ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5V ซึ่งหมายถึงเมื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0-1024 โดยมีมอดู ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0-ADC15 ซึ่งจะกำหนดไว้ที่พอร์ต F ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้ใช้ช่องสัญญาณเพียง 2 ช่อง คือช่อง ADC0 และ ช่อง ADC1 โดยผลการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล จำนวนได้จากสมการที่ (4-2)

$$ADC = \frac{V_{IN} 1024}{V_{REF}} \quad (4-2)$$

โดยที่ V_{IN} คือ แรงดันด้านขาอินพุต

V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5V

การสร้างสัญญาณ PWM กับไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 1

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์คไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR จะแบ่งออกเป็น 3 โหมดได้แก่

- Fast PWM mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความถี่สูงด้วยวิธีการแบบสโลปเดียว (single-slope) เหมาะสำหรับนำไปใช้งานด้าน Power regulation, rectification เป็นต้น ข้อเสียคือ ไม่สามารถปรับความถี่ได้ตามต้องการ
- Phase Correct PWM Mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความละเอียดสูงด้วยวิธีการแบบสโคปคู่ (dual-slope) เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานทางด้านควบคุมมอเตอร์ ข้อเสียเช่นเดียวกับ Fast PWM mode
- Phase and Frequency Correct PWM Mode เป็นการสร้างเฟสและความถี่ของสัญญาณ PWM ความละเอียดสูง ซึ่งเป็นโหมดที่นำไปใช้สำหรับโครงการวิจัย โดยความถี่ของสัญญาณสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-3) ดังนี้

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk}}{2 \cdot N \cdot TOP} \quad (4-3)$$

โดยที่ N คือ ค่าปริสเกลเลอร์ (ตัวลดทอนสัญญาณ) ซึ่งมีค่าเป็น 1, 8, 64, 256 และ 1024 โดยสามารถกำหนดได้จากรีจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับการกำหนดแหล่งสัญญาณนาฬิกา (TCR1B) ในที่นี้กำหนดให้ $N=1$

TOP คือ ค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

f_{clk} คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาในที่นี้ใช้ 16 MHz

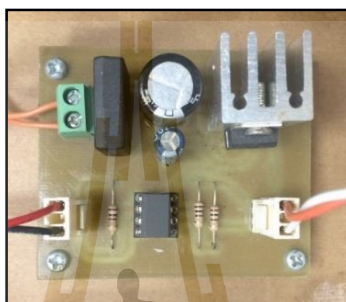
สำหรับโครงการวิจัยนี้ใช้ความถี่การสวิตช์มีค่าเท่ากับ 10 kHz ดังนั้น จากสมการที่ (4-4) จะสามารถหาค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ IRC1 แสดงได้ดังนี้

$$TOP = \frac{16 \times 10^6}{2 \times 1 \times 10 \times 10^3} = 800 \quad (4-4)$$

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่องสัญญาณ PWM 11 เป็นพอร์ตเอาพุตของสัญญาณ PWM ซึ่งการนำสัญญาณดังกล่าวไปขับสวิตช์จะต้องผ่านวงจรแยกโดดสัญญาณ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ ซึ่งจะได้อธิบายในลำดับถัดไป

4.4.4 วงจรจุดชนวนเกท

การสร้างวงจรจุดชนวนเกทเพื่อควบคุมสวิตช์มอสเฟตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และแยกกราวด์ในส่วนของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ในที่นี่คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ กับส่วนของวงจรไฟฟ้ากำลังในที่นี่คือวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อไม่ให้กราวด์ไฟฟ้าแรงต่ำและไฟฟ้าแรงสูงเชื่อมกัน ซึ่งช่วยป้องกันอันตรายต่อวงจรไฟฟ้าในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ สำหรับวงจรจุดชนวนเกทที่ใช้ คือ ไอซีเบอร์ PC923 ของบริษัท SHARP ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 วงจรจุดชนวนเกท

4.4.5 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ โดยในโครงการวิจัยนี้เลือกใช้มอสเฟต ตัวไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ต้องคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแส เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในวงจร

ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองสัญญาณ หรือวงจรกรองแบบ LC เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาพุตให้คงที่ การเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่าแรงดันพลิว (ripple voltage) และค่ากระแสพลิว (ripple current) อยู่ในระดับที่เหมาะสมและยอมรับได้ สามารถออกแบบค่าตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (4-5) และออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (4-6) ดังนี้

$$C = \frac{(1-d)V_{out}}{8Lf_s^2\Delta V_{out}} \quad (4-5)$$

$$L = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{f_s V_{in} \Delta I} \quad (4-6)$$

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคคี่คือค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสและเอาต์พุตคือค่าแรงดันของแบตเตอรี่ (V_{batt}) โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบของวงจรแปลงผันแบบบัคคี่ ดังนี้

$$V_{in} = V_{dc} = 50V$$

$$V_{out} = V_{batt} = 0 - 13.8V$$

$$V_{out,max} = 13.8V$$

$$I_{o,max} = 20A$$

$$\Delta V_{out} < 2mV$$

$$\Delta I_L < 0.07A$$

$$f_s = 10kHz$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวการออกแบบมีรายละเอียดดังนี้ สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุต้องคำนึงถึงแรงดันพิกัดของแรงดันตกคร่อมโหลดและค่ากระแสพิกัดของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยพิจารณาจากสมการที่ 4.5 และ 4.6 ดังนั้นจะสามารถออกแบบได้ดังนี้

$$L = \frac{13.8(50 - 13.8)}{10 \times 10^8 \times 50 \times 0.07} = 14.3mH$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 15.00 mH

จากสมการที่ 3.15 $V_{out} = dV_{in}$ ถ้า $V_{in} = 50V$ และ $V_{out} = V_{out,max} = 13.8V$ จะได้ $d = 0.276$ แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ

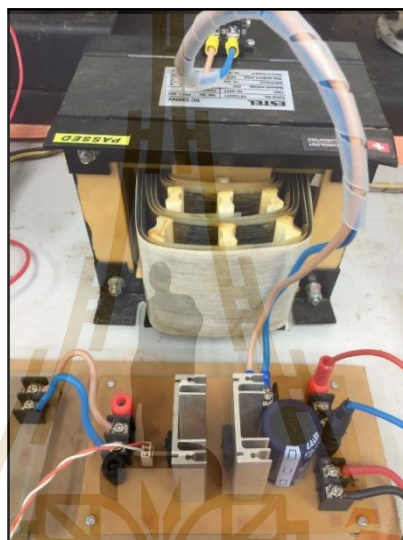
$$C = \frac{(1 - 0.276)13.8}{8 \times 15 \times 10^{-3} \times (10 \times 10^3)^2 \times 2 \times 10^{-3}} = 416\mu F$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 470 μF

พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคคี่ในโครงการวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ในรูปที่ 4.17 แสดงวงจรแปลงผันแบบบัคคี่ที่นำมาสร้างใช้งานจริง

ตารางที่ 4.4 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้ง

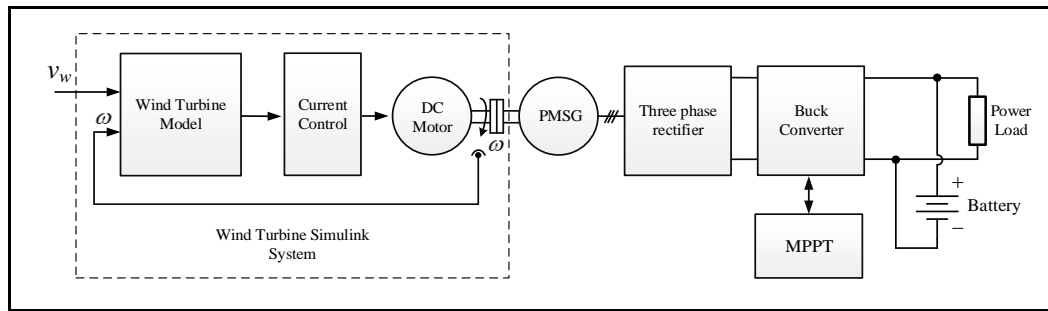
อุปกรณ์	พิกัด	รายละเอียด
1. มอสเฟต (MOSFET)	500V,34A	N-Channel MOSFET เบอร์ IXFQ34N50P3
2. ไดโอด	600V,60A	Diode เบอร์ FFA60UA60DN
3. ตัวเหนี่ยวนำ 15mH	400V,20A	DC Choke
4. ตัวเก็บประจุ 470 μ F	450V	Electrolytic Capacitor



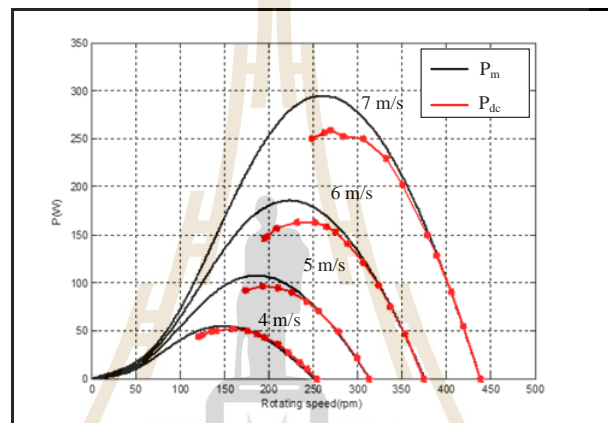
รูปที่ 4.17 วงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่ใช้งานจริง

4.5 การทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี P&O

การทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สำหรับกักเก็บลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ แสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้างัดกล่าวต่ออยู่กับเครื่องจำลองกังหันลม ซึ่งสร้างจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีการควบคุมการทำงานให้จำลองพฤติกรรมของกังหันลม เพื่อยืนยันว่าสามารถควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระให้ตามรอยกำลังสูงสุดได้จริง จึงทำการทดสอบโดยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0% ถึง 100% โหลดของระบบประกอบด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วยรอบในการหมุนของกังหันลม โดยใช้เครื่องจำลองกังหันลมที่ความเร็วลม 4.5 และ 6 m/s ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.19

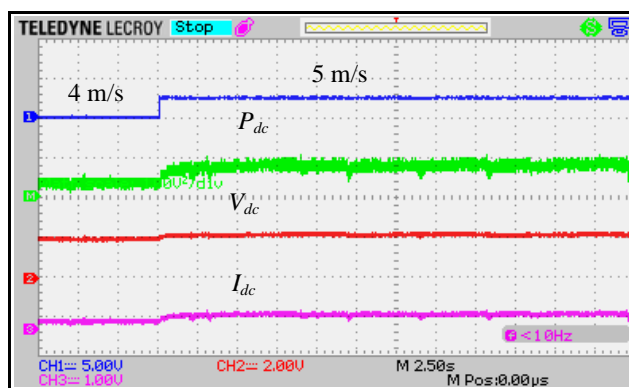


รูปที่ 4.18 ระบบที่ใช้ในการทดสอบร่วมกับเครื่องจำลองกังหันลม

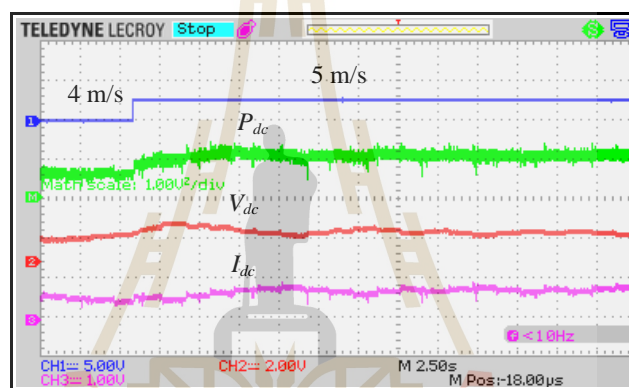


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่าง ๆ

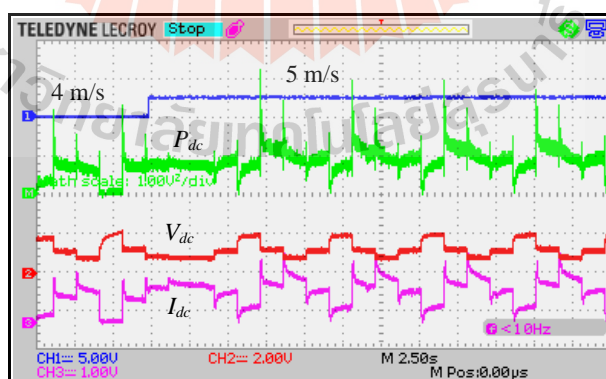
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งถือเป็นกราฟคุณลักษณะของกังหันลมในรูปที่ 4.19 ประกอบด้วยกราฟกำลังเอาต์พุตของกังหันลม (P_m) และกราฟกำลังไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้พิจารณากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส (P_{dc}) ในสถานะคงตัวที่สามารถผลิตได้จากกังหันลม โดยใช้เครื่องจำลองกังหันลมเปรียบเทียบกับกันแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกำลังสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรเรียงกระแสสามเฟส อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.19 สามารถทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในลักษณะความเร็วลมต่าง ๆ ได้



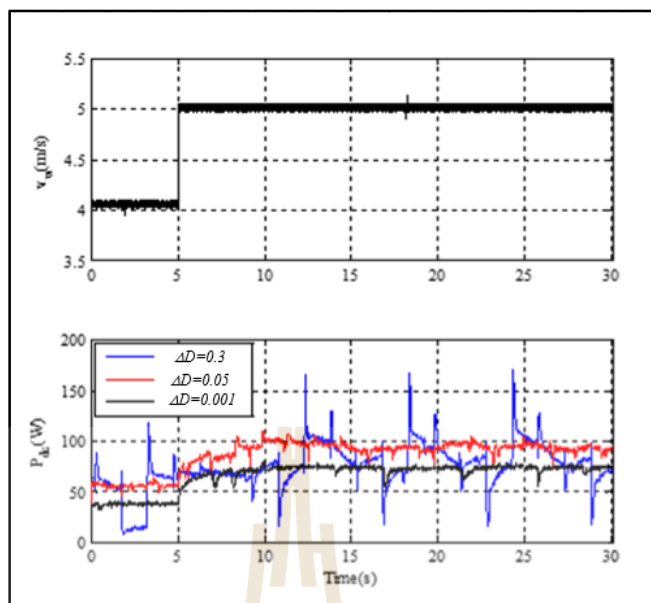
รูปที่ 4.20 กราฟสัญญาณทดสอบเมื่อกำหนดให้ค่า $\Delta D = 0.001$



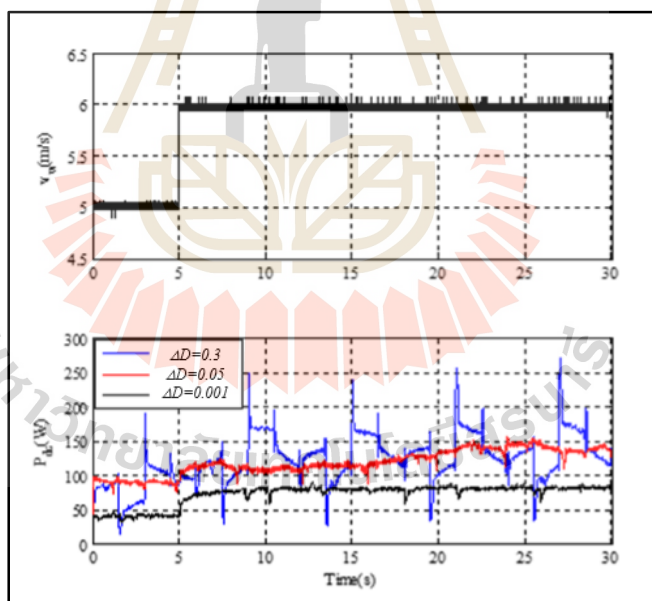
รูปที่ 4.21 กราฟสัญญาณทดสอบเมื่อกำหนดให้ค่า $\Delta D = 0.05$



รูปที่ 4.22 กราฟสัญญาณทดสอบเมื่อกำหนดให้ค่า $\Delta D = 0.3$



รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองของระบบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 5 m/s



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองของระบบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 5 m/s เป็น 6 m/s

ในรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.22 เป็นการทดสอบสำหรับการเลือกใช้ค่า ΔD และ ε ของระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ซึ่งถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้น จึงต้องมีการทดสอบหาค่า ΔD และ ε ที่เหมาะสม เพื่อให้ชุดทดลองมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการทดสอบ

หาค่า ΔD จะพิจารณาจากกราฟสัญญาณกำลังไฟฟ้า เนื่องจากค่า ΔD คือ ค่าที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุมหรือค่าวัฏจักรหน้าที่ มีผลทำให้จุดการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงและคู่เข้าสู่ตำแหน่งที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยกำหนดให้ ΔD มีค่าเท่ากับ 0.001 0.05 และ 0.3 ตามลำดับ การทดสอบกำหนดให้ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 4 m/s เป็น 5 m/s กราฟสัญญาณความเร็วลม กำลังไฟฟ้า แรงดันและกระแสไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 ถึง รูปที่ 4.22

จากกราฟสัญญาณทดสอบในรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 ได้ทำการบันทึกค่าด้วยออสซิลโลสโคป และนำผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วนำมาพล็อตเปรียบเทียบกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 ในทำนองเดียวกัน ในรูปที่ 4.24 แสดงรูปผลตอบสนองกำลังไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 m/s เป็น 6 m/s เมื่อกำหนดให้ ΔD มีค่า 0.001 0.05 และ 0.3 ซึ่งพบว่า ที่ค่า $\Delta D = 0.3$ จะทำให้กำลังไฟฟ้ามีการแกว่งไกวมาก ในบริเวณที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในกรณี $\Delta D = 0.001$ ระบบจะมีการแกว่งไกวเล็กน้อยแต่จะทำให้ระบบเข้าสู่จุดที่ได้กำลังสูงสุดซ้ำหรือไม่สามารถเข้าสู่จุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เนื่องจากการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุมมีค่าน้อยเกินไปจนไม่สามารถรบกวนและทำให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานได้ ดังนั้น จากผลการทดสอบดังกล่าวในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกค่า $\Delta D = 0.05$ เพื่อการใช้งาน ส่วนการทดสอบหาค่าความผิดพลาด ε กำหนดให้มีค่าเริ่มต้น 3 5 8 10 และ 15 ซึ่งมีผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

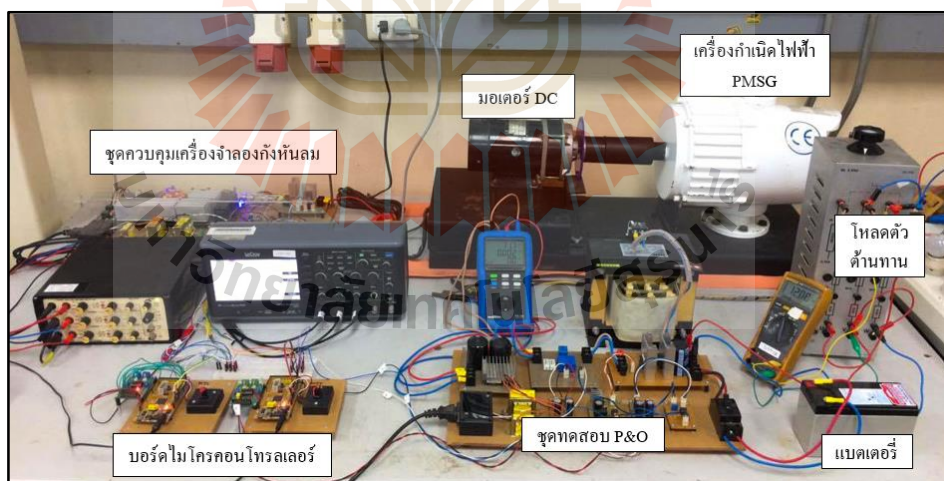
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาค่า ε

ε	$v_w (m/s)$	$P_{dc} (W)$	Speed (rpm)
3	4	49.2	180
	6	158.1	262.2
5	4	48.4	183.1
	6	156.4	271.0
8	4	49.7	176.2
	6	157.1	265.4
10	4	50.7	175.6
	6	159.4	267.1
15	4	40.3	198.7
	6	145.3	275.5

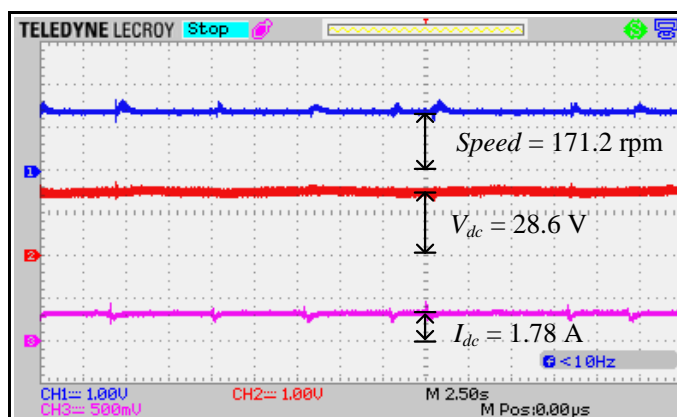
จากผลการทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในตารางที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบกัน จะพบว่า ค่าความผิดพลาดที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบในโครงการวิจัยคือ $\varepsilon = 10$ ซึ่งจะทำให้ P_{dc} มีค่ามากที่สุด ณ ความเร็วลมที่ทำการทดสอบ ซึ่งคือ เมื่อความเร็วลม 4 m/s P_{dc} มีค่าเท่ากับ 50.7 W และที่ความเร็วลม 6 m/s $P_{dc} = 159.4$ W ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ค่า $\varepsilon = 10$ ค่าดังกล่าวนี้จะนำไปป้อนในโปรแกรมของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในภาคผนวก ข.

4.6 ผลการทดสอบ P&O

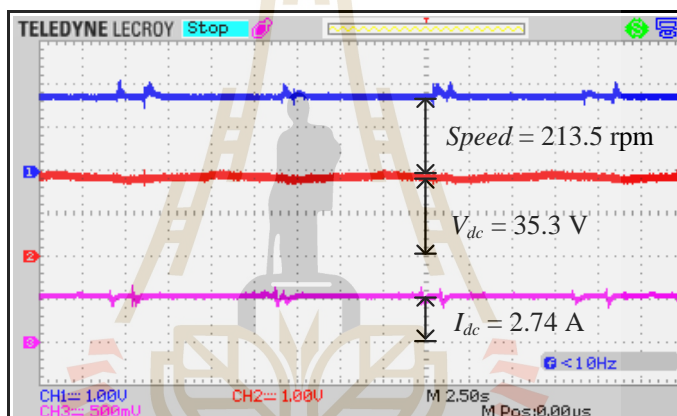
การทดสอบตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดำเนินการโดยอาศัยเครื่องจำลองกังหันลม ที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมได้โดยผู้ใช้งาน เครื่องจำลองกังหันลมจะเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบแม่เหล็กถาวรและชุดควบคุมผลิตไฟฟ้าตามรอยกำลังสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4.25 ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวที่ค่าความเร็วลมต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลม ช่องสัญญาณที่ 2 และ 3 คือ แรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส เมื่อความเร็วลมเป็น 4 m/s 5 m/s และ 6 m/s ตามลำดับ ซึ่งมีผลการทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงได้ดังตารางที่ 4.6



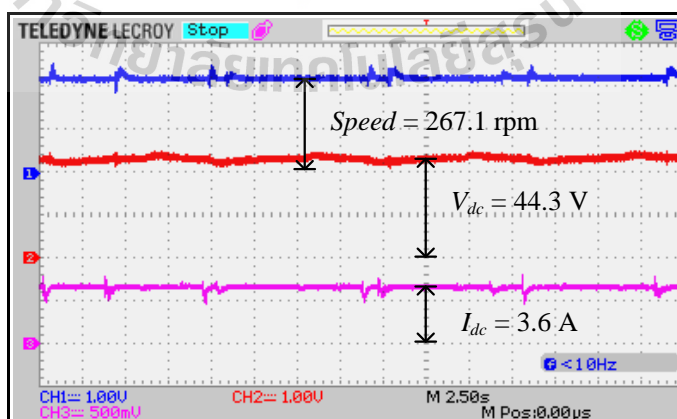
รูปที่ 4.25 การทดสอบชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O



รูปที่ 4.26 รูปสัญญาณความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 4 m/s



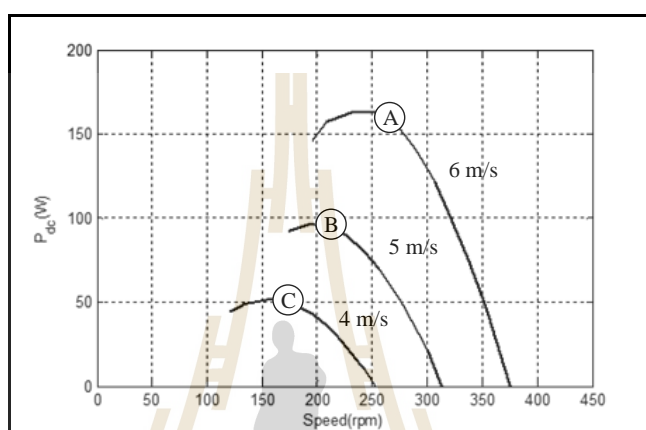
รูปที่ 4.27 รูปสัญญาณความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 5 m/s



รูปที่ 4.28 รูปสัญญาณความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 6 m/s

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

v_w (m/s)	V_{dc} (V)	I_{dc} (A)	P_{dc} (W)	Speed (rpm)
4	28.6	1.78	50.7	171.2
5	35.3	2.74	96.8	213.5
6	44.3	3.6	159.4	267.1



รูปที่ 4.29 กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลม

จากผลการทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในตารางที่ 4.6 เมื่อนำมาพล็อตลงในกราฟความกำลังไฟฟ้ากับความเร็วนั้นที่เป็นคุณลักษณะของกังหันลมแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 โดยผลทดสอบที่ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s แสดงได้ดังจุด A ที่ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s แสดงได้ดังจุด B และที่ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s แสดงได้ดังจุด C ในรูปที่ 4.29 จากผลทดสอบดังกล่าว พบว่าจุดการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้ $\varepsilon = 10$ และ $\Delta D = 0.05$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ ดังนั้น การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้สามารถควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอ การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ซึ่งได้อธิบายหลักการทำงาน แผนภาพไดอะแกรมของการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O โดยการยืนยันหลักการควบคุมในเบื้องต้นได้อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งพบว่า ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมได้ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึง โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำงานร่วมกับตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงการทดสอบหาค่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม (ΔD) และค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ε) ที่เหมาะสม โดยจากการทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดสอดคล้องตามความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ โดยใช้วิธีการรบกวนและการสังเกต เพื่อดึงศักยภาพสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมออกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยในโครงการวิจัยนี้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมาที่อยู่ในบทที่ 2 ของโครงการวิจัย ซึ่งพบว่า การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดมีหลากหลายวิธีด้วยกัน โดยในโครงการวิจัยนี้จะนำเสนอการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O เนื่องจากอัลกอริทึมดังกล่าวมีความเรียบง่ายและหืดหยุ่นสูง อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับพารามิเตอร์หรือคุณลักษณะของกังหันลม นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทำงานของกังหันลม วงจรแปลงผันแบบบัสก์ และเบตเตอร์ ซึ่งการทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวถือเป็นสิ่งสำคัญต่อการหาแนวทางการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ของโครงการวิจัย

การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ของโครงการวิจัย ซึ่งได้อธิบายถึงหลักการทำงานของวิธี P&O และยืนยันการควบคุมเบื้องต้นด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ไม่มี การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึง โครงสร้างชุดทดสอบของวิธี P&O การออกแบบ การเขียน โปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่าชุดทดสอบตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตสามารถสร้างและใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งควบคุมให้การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดสอดคล้องตามความเร็วลมต่าง ๆ ได้ โดยอัลกอริทึมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O อาศัยเพียงการกำหนดค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับการควบคุมเท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- ควรมีการพัฒนาและปรับปรุง การกำหนดค่า ΔD และ ค่า ε ของชุดทดสอบ ให้มีการปรับตัว ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอัลกอริทึมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต เพื่อให้มีความสะดวกต่อการนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

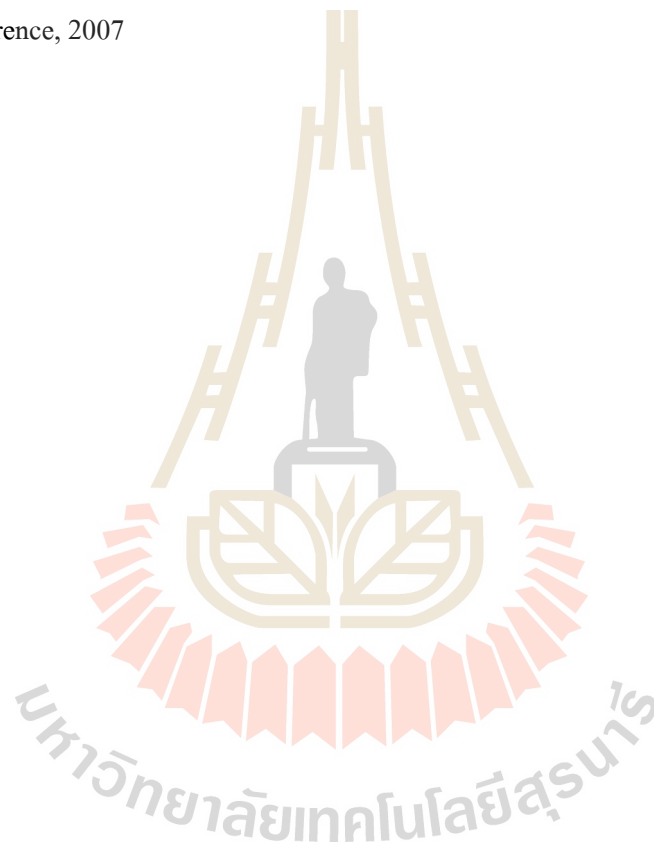
- หากมีการนำไปใช้งานจริงในระบบที่มีพิกัดสูงจำเป็นต้องคำนึงถึงพิกัดอุปกรณ์ของชุดทดสอบรวมถึงการกำหนดค่า ΔD และ ค่า ε ของชุดทดสอบ หรือหาแนวทางการกำหนดค่าดังกล่าวโดยอ้างอิงจากค่าพิกัดของระบบ



รายการอ้างอิง

- E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 53, no. 2, April 2006.
- H. Li, K. L. Shi, and P. G. McLaren, "Neural-network-based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient," **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 41, no. 6, Nov./Dec. 2005.
- H. Li, Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons" *Renewable Power Generation, IET.*, vol. 2, Issue: 2, pp. 123-138
- I. Munteanu, S. Bacha, A. Iuliana Bratcu, J. Guiraud, and D. Roye, "Energy-reliability optimization of wind energy conversion systems by sliding mode control," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 23, no. 3, Sept. 2008.
- J. Matas, M. Castilla, Josep M. Guerrero, Luis García de Vicuña, and Jaume Miret, "Feedback linearization of direct-drive synchronous wind-turbines via a sliding mode approach," **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 23, no. 3, May 2008.
- J. S. Thongam, P. Bouchard, H. Ezzaidi, and M. Ouhrouche, "Artificial neural network-based maximum power point tracking control for variable speed wind energy conversion systems," in **Proc. 18th IEEE International Conference on Control Applications**, July 2009.
- K. Syed Muhammad Raza, Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo, and Osamu Ichinokura, "Maximum power point tracking control and voltage regulation of a DC grid-tied wind energy conversion system based on a novel permanent magnet reluctance generator," in **Proc. ICEMS**, 2007.
- K. Syed Muhammad Raza, H. Goto, Hai-Jiao Guo, and O. Ichinokura, "A novel algorithm for fast and efficient maximum power point tracking of wind energy conversion systems," in **Proc. ICEM**, Sept. 2008.
- Q. Wang and Liuchen Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 19, no. 5, Sept. 2004.

- R. Datta, V. T. Ranganathan, "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2003, Volume: 18, pp. 163 – 168
- R. J. Wai, C.Y. Lin and Y.R. Chang, "Novel maximum-power-extraction algorithm for PMSG wind generation system," **IET Electric Power Applications**, vol. 1, no. 2, March 2007.
- W. Li, Dianguo Xu, Wei Zhang, Hongfei Ma. "Research on Wind Turbine Emulation based on DC Motor". **Industrial Electronics and Applications**, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference, 2007

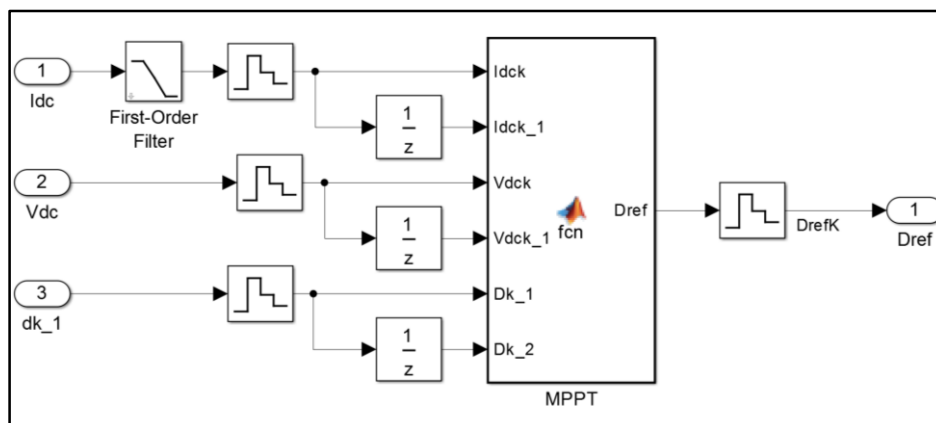




ภาคผนวก ก

โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

โค้ดโปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK
ใน MATLAB โดยใช้บล็อก MATLAB FUNCTION

```
function Dref = fcn(Idck, Idck_1, Vdck, Vdck_1, Dk_1, Dk_2)
```

% อินพุตของบล็อก MATLAB FUNCTION คือ ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในคาบเวลา
ปัจจุบันและอดีต ค่าวัฏจักรหน้าที่ในคาบเวลาอดีต

```
Dmin = 0;
```

```
Dmax = 1;
```

```
K = 0.05; % ค่า Step size  $\Delta D$ 
```

```
es = 10; % กำหนดค่าความผิดพลาด  $\epsilon$ 
```

```
Pk = Vdck*Idck;
```

```
Pk_1 = Vdck_1*Idck_1;
```

```
% เงื่อนไขค่าเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
```

```
if Idck > 0.1
```

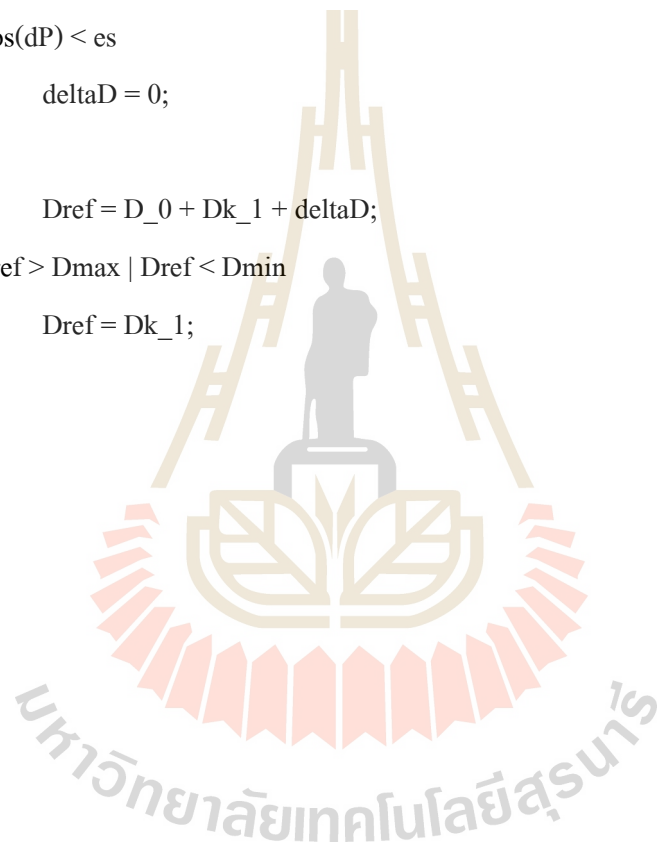
```
    D_0 = 0;
```

```
else
```

```
    D_0 = 0.1;
```

```
end
```

```
dP = Pk - Pk_1;  
dD = Dk_1 - Dk_2;  
    if dP/dD > 0  
        deltaD = K;  
    else  
        deltaD = -K;  
    end  
    if abs(dP) < es  
        deltaD = 0;  
    end  
    Dref = D_0 + Dk_1 + deltaD;  
    if Dref > Dmax | Dref < Dmin  
        Dref = Dk_1;  
    end  
end
```





ภาคผนวก ข

โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
โค้ดโปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
*****

// กำหนดตัวแปร
int EN = 11;

long previousTime = 0;

float Ts = 1.5; //กำหนดค่า Sampling time
float count = 0;
float Read_Voltage_sensor = 0, Read_Current_sensor = 0;
int n = 10, m;
float Sum_Voltage_sensor = 0, Sum_Current_sensor = 0;
float average_Voltage_sensor = 0, average_Current_sensor = 0;
float Voltage = 0, Current = 0;
float Vdc, Idc, Lock;
float Pdc, Pdc_1, dP, dD, Dref, D_0 = 0, D_1 = 0, D_2 = 0, d = 0, deltaD, K, P = 0;
int Action;
// ฟังก์ชันตั้งค่าของบอร์ด arduino
void setup()
{ Serial.begin(9600);
  pinMode(EN, OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
}

```



```

//*****
//ฟังก์ชันวนรอบของบอร์ด arduino สำหรับควบคุมตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
//*****

void loop()
{
  if(millis() - previousTime > Ts*1000)
  {
    previousTime = millis();
    call_Voltage_sensor();
    call_Current_sensor();
    Check_Idc();
    call_MPPT_P_O();
    count = count + Ts;
  }
}

void call_Voltage_sensor()
{
  Sum_Voltage_sensor = 0;
  for(m = 1; m <= n; m++)
  {
    Read_Voltage_sensor = analogRead(A0);
    Sum_Voltage_sensor = Sum_Voltage_sensor + Read_Voltage_sensor;
  }

  average_Voltage_sensor = (Sum_Voltage_sensor/n)*5/1023;
  Voltage = 19.73*average_Voltage_sensor + 1.57;      //คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้า
  Vdc = constrain(Voltage,0,100);
}

```

```

void call_Current_sensor()
{
    Sum_Current_sensor = 0;
    for(m =1; m <= n; m++)
    {
        Read_Current_sensor = analogRead(A1);
        Sum_Current_sensor = Sum_Current_sensor + Read_Current_sensor;
    }
    average_Current_sensor = (Sum_Current_sensor/n)*5/1023;
    Current = 3.7966*average_Current_sensor + 0.19747 ; //คำนวณค่ากระแสไฟฟ้า
    Idc = constrain(Current,0,20);
}
//*****
// เงื่อนไขค่าเริ่มต้น โปรแกรมตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
//*****

void Check_Idc()
{
    if (Idc > 0)
    {
        D_0 = 0;
    }
    else
    {
        D_0 = 0.1*800;
    }
}
}

```

```

//*****
// โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
//*****

void call_MPPT_P_O()
{
    Pdc = Vdc*Idc;
    dP = Pdc - Pdc_1;
    dD = D_1 - D_2;
    K = 0.05*800; // กำหนดค่า  $\Delta D = 0.05$ 
    Lock = 10; // กำหนดค่า  $\epsilon$ 
    if (dP/dD > 0)
    {
        deltaD = K;
    }
    else
    {
        deltaD = -K;
    }
    if (abs(dP) < Lock)
    {
        deltaD = 0;
    }
    Dref = D_0 + D_1 + deltaD;
    Dref = constrain(Dref,0,800);
    OCR1A = Dref; // ค่าวัฏจักรหน้าที่
    D_2 = D_1; // อัปเดตค่าวัฏจักรหน้าที่รอบที่ 2
    D_1 = Dref; // อัปเดตค่าวัฏจักรหน้าที่รอบที่ 1
    Pdc_1 = Pdc; // อัปเดตค่ากำลังไฟฟ้า
}

```