

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการ
รบกวนและการสังเกตสำหรับระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROL
USING FUZZY LOGIC CONTROL BASED ON
PERTURBATION AND OBSERVATION METHOD
FOR STAND-ALONE WIND ENERGY SYSTEM**

Koson Chaicharoenaudomrung



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor Philosophy in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวน
และการสังเกตสำหรับระบบกักกันผลผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

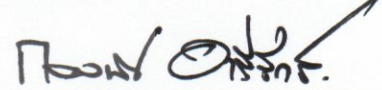
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปรัชญา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ก้องพันธุ์ อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.กิตติ อัครกิจมงคล)

กรรมการ



(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ



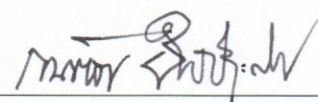
(อ. ดร.ชโยธร ชรรมแท้)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง : การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิง
วิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ (MAXIMUM
POWER POINT TRACKING CONTROL USING FUZZY LOGIC CONTROL BASED
ON PERTURBATION AND OBSERVATION METHOD FOR STAND-ALONE WIND
ENERGY SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์, 218 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิง
วิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ การควบคุมดังกล่าว
สามารถทำให้การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น วิธีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์อยู่บนพื้นฐานวิธีการรบกวนและการสังเกตที่เป็นการควบคุมแบบ
ไม่พึ่งพาคุณลักษณะของกังหันลมและ ไม่ใช้ตัวตรวจวัดทางกล การพัฒนาและปรับปรุง
ประสิทธิภาพของวิธีการรบกวนและการสังเกตใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกเป็นกลไกปรับตั้งขนาดก้าว
ในการค้นหาให้เหมาะสมกับสถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน การจำลองสถานการณ์
บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ระบบทดสอบพิกัดแตกต่างกัน การทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่อง
จำลองกังหันลม รวมถึงการทดสอบภายใต้สถานะความเร็วลมตามธรรมชาติด้วยชุดทดสอบต้นแบบ
ดำเนินการเพื่อยืนยันหลักการควบคุมของวิธีการที่นำเสนอ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการ
ทดสอบ พบว่า วิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและการ
สังเกตแบบดั้งเดิมและสามารถนำไปใช้งานในวงกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังได้นำวิธี
ที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของ
โรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการผลิต
ไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศโดยใช้กังหันลมที่มีการควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์

KOSON CHAICHAROENAUDOMRUNG : MAXIMUM POWER POINT
TRACKING CONTROL USING FUZZY LOGIC CONTROL BASED ON
PERTURBATION AND OBSERVATION METHOD FOR STAND-ALONE
WIND ENERGY SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
KONGPAN AREERAK, Ph.D., 218 PP.

WIND ENERGY SYSTEM/ MAXIMUM POWER POINT
TRACKING CONTROL/ PERTURBATION AND OBSERVATION
METHOD/ FUZZY LOGIC CONTROLLER

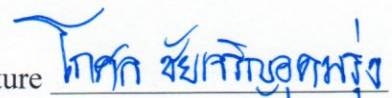
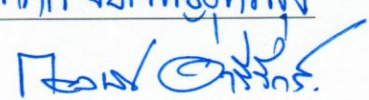
The thesis presents the maximum power point tracking control using fuzzy logic control based on perturbation and observation method for stand-alone wind turbine power generator system. The proposed method improves efficiency of the wind turbine power generation system. It is based on the conventional perturbation and observation method in which the characteristics of system and mechanical sensor are not required. The performance of perturbation and observation method can be improved by adjusting the optimum step size via the fuzzy logic control. The simulation and experimental results confirm that the proposed method can provide a better performance compared with the conventional perturbation and observation method. Finally, the proposed method can be applied to the wind from the evaporative cooling system. All experimental results confirm that the effectiveness of the proposed method can be obtained.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ทองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร. ทองพล อารีรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำ กำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและกำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ภายใต้การดำเนินการของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบคุณ ดร.พิทยา ดีกล้า นายรัช ชูจิต นายบรรณกิจ คิตุก นายเชาวลิต คิตุก และนายวรวิทย์ ศรีมะเรง ร่วมถึงบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอบคุณ น.ส. จูตาภรณ์ ปาละสุข นายอมร ชันสาลี น.ส. ปราจริ ประสมศักดิ์ นายพีรวัจน์ มีสุข นายชวลิต ปัญญาอิสระ และนายภูริชญ์ งามคง ที่เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ครู อาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	6
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 บทนำ	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลม ผลิตไฟฟ้า.....	8
2.3 สรุป.....	23
3 การศึกษาเกี่ยวกับระบบแปลงผันพลังงานลมและทฤษฎีพื้นฐาน	24
3.1 บทนำ	24
3.2 ระบบแปลงผันพลังงานลมสำหรับการผลิตไฟฟ้า.....	24
3.3 หลักการทำงานของกังหันลม	25
3.4 ชนิดของกังหันลม	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1	กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)	28
3.4.2	กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)	28
3.5	ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	29
3.5.1	ระบบการติดตั้งใช้งานแบบอิสระ (Stand alone system)	29
3.5.2	ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมกริด (Grid connected system)	30
3.6	ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	30
3.7	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร	32
3.8	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	35
3.9	วงจรลดทอนระดับแรงดัน	38
3.10	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเบตเตอรี่	39
3.11	สรุป	40
4	เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	41
4.1	บทนำ	41
4.2	โครงสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	41
4.3	การจำลองสถานการณ์เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	44
4.4	โครงสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม.....	48
4.4.1	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	49
4.4.2	วงจรลดทอนระดับแรงดัน	49
4.4.3	วงจรจูนชนวนเกท	51
4.4.4	การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	51
4.4.5	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	53
4.4.6	โหลดเบรก.....	54
4.4.7	ชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า	55
4.4.8	ชุดตรวจจับความเร็วรอบ	56
4.4.9	การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์มเจอร์กับแรงบิด ที่โหลด	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.10 การทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับ กระแสอาร์เมเจอร์.....	62
4.5 ผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	65
4.6 สรุป.....	66
5 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด	67
5.1 บทนำ	67
5.2 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธี PSF	67
5.3 การจำลองสถานการณ์การติดตามกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF	69
5.4 การควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	75
5.5 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธี P&O	76
5.6 การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธี P&O	80
5.7 สรุป.....	84
6 การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต	85
6.1 บทนำ	85
6.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต.....	85
6.2.1 การทำฟัซซี.....	89
6.2.2 กฎของฟัซซี.....	91
6.2.3 การอนุมานฟัซซี	94
6.2.4 การทำดีฟัซซี	95
6.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต สำหรับควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด.....	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4	การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วย วิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต สำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ	105
6.4.1	การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดเปรียบเทียบ ระหว่างวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและ การสังเกตกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม โดยใช้ระบบทดสอบพิกัด 850 W.....	106
6.4.2	การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วย วิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต กับระบบทดสอบพิกัด 500 W และ 300 W	106
6.5	สรุป	114
7	ชุดทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับ ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ	115
7.1	บทนำ	115
7.2	โครงสร้างชุดทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับ สำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ	115
7.2.1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบแม่เหล็กถาวร	117
7.2.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟส	117
7.2.3	การสร้างชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า	118
7.2.4	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	121
7.2.5	วงจรจุดชนวนเกท	125
7.2.6	วงจรลดทอนระดับแรงดัน	125
7.3	การทดสอบระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด	127

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.3.1	ผลการทดสอบคุณลักษณะของกังหันลม.....	128
7.3.2	การทดสอบหาขนาดขึ้นการค้นหาลำสำหรับการควบคุมตามรอย กำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม	130
7.3.3	การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดเปรียบเทียบ ระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุม แบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต	132
7.4	การประยุกต์ใช้งานจริงกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ	134
7.4.1	การทดสอบการสกัดพลังงานจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต แบบดั้งเดิมกับระบบที่ไม่มีการควบคุม	135
7.4.2	การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุม แบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต	137
7.5	สรุป.....	140
8	การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด	141
8.1	บทนำ	141
8.2	การสำรวจความเร็วลม	141
8.3	ชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มี การทำความเย็นแบบระเหยน้ำ	143
8.4	ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรือน ที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ	147
8.5	การประเมินทางเศรษฐศาสตร์	150
8.6	สรุป.....	152
9	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	153
9.1	สรุป.....	153

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

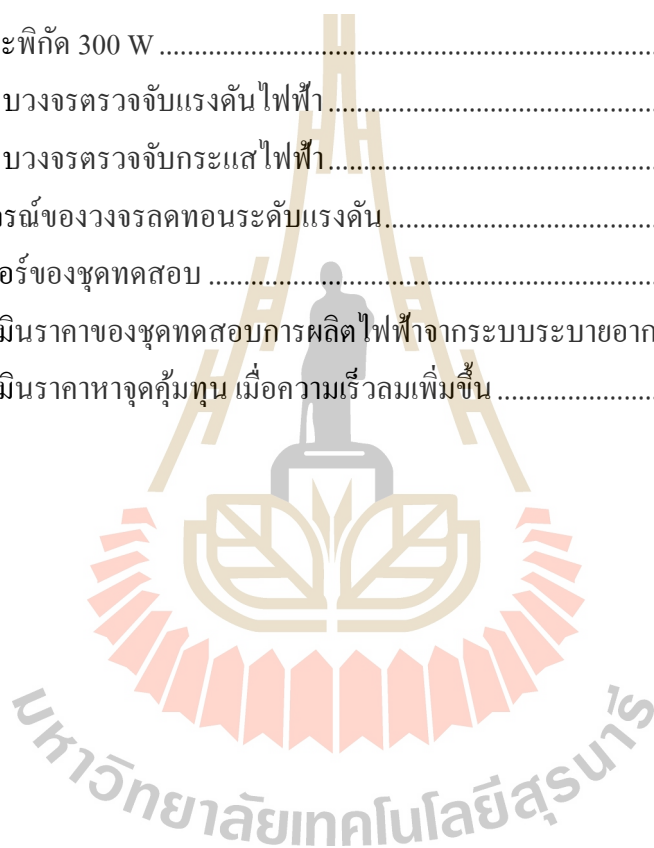
9.2 ข้อเสนอแนะ	155
รายการอ้างอิง.....	156
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การจำลองสถานการณ์และโค้ดโปรแกรม	
เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	162
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	
จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB	167
ภาคผนวก ค. กฎฟัซซีสำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด.....	169
ภาคผนวก ง. การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วย	
วิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต	173
ภาคผนวก จ. โปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต	
แบบดั้งเดิมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR.....	177
ภาคผนวก ฉ. โปรแกรมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิง	
วิธีการรบกวนและการสังเกตบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	182
ภาคผนวก ช. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	208
ประวัติผู้เขียน	218

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกับระบบกักกันลมผลิตไฟฟ้า.....	8
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองกังหันลม.....	9
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยอาศัย คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม	12
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้ คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม	15
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้ คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด.....	18
4.1 ผลการทดสอบชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า	56
4.2 ผลการทดสอบชุดตรวจจับความเร็วรอบ	60
4.3 ผลการทดสอบระหว่างแรงบิดที่โหลดกับกระแสอาร์เมเจอร์	61
4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ในสถานะหมุนตัวเปล่า	63
4.5 ผลการคำนวณกระแสอาร์เมเจอร์ในสถานะไร้โหลดกับความเร็วลม.....	64
5.1 พารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบ.....	69
5.2 ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ	71
5.3 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้า ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O.....	80
6.1 ตัวแปรทางภาษาและค่าทางภาษาสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	90
6.2 กฎพีซีซีสำหรับควบคุมแรงดันวงจรลดทอนระดับแรงดัน	93
6.3 ตัวแปรทางภาษาและค่าทางภาษาสำหรับควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด	102
6.4 กฎพีซีซีสำหรับควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด	103
6.5 กฎพีซีซี	105

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.6 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กักหน้ผลิตไฟฟ้า แบบอิสระพิกัด 500 W	109
6.7 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กักหน้ผลิตไฟฟ้า แบบอิสระพิกัด 300 W	111
7.1 ผลทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	120
7.2 ผลทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า	121
7.3 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดัน	127
8.1 พารามิเตอร์ของชุดทดสอบ	146
8.2 การประเมินราคาของชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียน	150
8.3 การประเมินราคาหาจุดคุ้มทุน เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น	151



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	แผนภาพแนวทางการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด สำหรับระบบแปลงผันพลังงานลม	2
3.1	ระบบแปลงผันพลังงานลม	24
3.2	แบบจำลองกังหันลมบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์	27
3.3	คุณลักษณะเฉพาะของพลังงานกังหันลม	27
3.4	คุณลักษณะเฉพาะของแรงบิดกังหันลม	27
3.5	กังหันลมแบบแนวแกนนอน	28
3.6	กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง	29
3.7	ระบบการติดตั้งแบบอิสระ	29
3.8	ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อกริด	30
3.9	วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น	31
3.10	การจัดเรียงแม่เหล็กถาวรบนฟิวโรเตอร์ของ PMSG (ประกอบด้วย 8 ขั้ว)	32
3.11	การจัดเรียงแม่เหล็กถาวรภายในโรเตอร์ของ PMSG (ประกอบด้วย 4 ขั้ว)	33
3.12	วงจรสมมูลอย่างง่ายของ PMSG	34
3.13	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	36
3.14	สัญญาณการทำงานในกรณีต่าง ๆ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	36
4.1	ระบบกังหันลม	42
4.2	เครื่องจำลองกังหันลม	42
4.3	ระบบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	43
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับความเร็วรอบมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด	44
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสชดเชยกับความเร็วลม	45
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่โหลด	46
4.7	ผลการจำลองสถานการณ์เครื่องจำลองกังหันลมที่สภาวะความเร็วลม 8 m/s	46
4.8	คุณลักษณะพลังงานกังหันลม	47
4.9	คุณลักษณะแรงบิดกังหันลม	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ชุดทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	48
4.11 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสวิตชิง.....	49
4.12 วงจรลดทอนระดับแรงดัน.....	49
4.13 มอสเฟต.....	50
4.14 ไดโอดแบบคอมมอนแคโทด.....	50
4.15 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้งานจริง.....	50
4.16 วงจรจุดชนวนเกทเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	51
4.17 ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 1280.....	53
4.18 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร.....	54
4.19 โหลดเบรกและชุดความควบคุม โหลดเบรก.....	54
4.20 ชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	55
4.21 แผนภาพชุดตรวจจับความเร็วรอบ.....	56
4.22 การติดตั้งจานหมุน.....	57
4.23 เอ็นโคเดอร์.....	58
4.24 การต่อวงจรใช้งานเอ็นโคเดอร์.....	58
4.25 การติดตั้งเอ็นโคเดอร์.....	58
4.26 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน.....	59
4.27 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน.....	59
4.28 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่โหลด ที่ความเร็วรอบตั้งต้น 400 rpm.....	62
4.29 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่โหลด ที่ความเร็วรอบตั้งต้น 500 rpm.....	62
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะไร้โหลด.....	63
4.31 คุณลักษณะกำลังของกังหันลม.....	64
4.32 คุณลักษณะแรงบิดของกังหันลม.....	64
4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสชดเชยกับความเร็วลม.....	65
4.34 คุณลักษณะพลังงานกังหันลม.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 คุณลักษณะแรงบิดกึ่งหั่นลม.....	66
5.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF	68
5.2 ชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าสำหรับจำลองสถานการณ์ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF	70
5.3 คุณลักษณะกำลังของกังหันลม	71
5.4 คุณลักษณะพลังงานของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ	71
5.5 กราฟคุณลักษณะกำลังสูงสุดในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ.....	72
5.6 ความเร็วลมที่มีการเปลี่ยนแปลง.....	73
5.7 ความเร็วในการหมุน.....	73
5.8 พลังงานเอาต์พุตของกังหันลม.....	74
5.9 กำลังไฟฟ้ากระแสตรง.....	74
5.10 คุณลักษณะกำลังและแรงบิดของกังหันลม	75
5.11 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	76
5.12 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	77
5.13 คุณลักษณะพลังงานของกังหันลม	77
5.14 การลู่เข้าจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	78
5.15 แผนภาพไดอะแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O.....	79
5.16 การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้วิธี P&O ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB.....	81
5.17 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	82
5.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง	83
5.19 เส้นทางการตามรอยกำลังสูงสุด	83
6.1 ความแตกต่างของความเป็นสมมาตรระหว่างเซตชัดเจนกับฟัซซีเซต.....	86
6.2 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตชัดเจน	87
6.3 ฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต.....	87
6.4 โครงสร้างฟัซซีลอจิก	88
6.5 โครงสร้างระบบควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 ตัวอย่างผลตอบสนองวงจรถดทอนระดับแรงดันที่มีการควบคุม	89
6.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซี่.....	91
6.8 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรงโทน	94
6.9 ตัวอย่างการทำฟัซซี่ของระบบควบคุมแรงดัน	95
6.10 การอนุมานแบบ Sugeno	96
6.11 การรวมกฎแบบ Sugeno	97
6.12 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ที่อิงการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต	98
6.13 พฤติกรรมการทำงานของระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ	99
6.14 พฤติกรรมการทำงานของระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ	100
6.15 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต	100
6.16 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต.....	101
6.17 ตัวอย่างการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด	103
6.18 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต.....	104
6.19 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต.....	104
6.20 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของกักเก็บผลิตไฟฟ้า ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB	106
6.21 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง.....	107
6.22 เส้นทางการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต	108
6.23 คุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ของระบบทดสอบพิกัด 500 W	109
6.24 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 500 W	110
6.25 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.24.....	110
6.26 คุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ของระบบทดสอบ 300 W	112
6.27 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 300 W	113

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.28 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.27.....	113
7.1 ระบบทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	116
7.2 ชุดทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า แบบอิสระ.....	116
7.3 ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด	117
7.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบแม่เหล็กถาวร	117
7.5 โมดูลวงจรเรียงกระแสสามเฟส	118
7.6 ภาพรวมการต่อวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า.....	119
7.7 วงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า	119
7.8 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและวงจรกันชน.....	120
7.9 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน	120
7.10 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 1280.....	121
7.11 วงจรจุดชนวนเกท	125
7.12 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้งานจริง	127
7.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบ.....	128
7.14 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเทียบความเร็วรอบ	129
7.15 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเทียบแรงดันไฟฟ้า.....	129
7.16 ผลการทดสอบคุณลักษณะของกังหันลม.....	130
7.17 สมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต แบบดั้งเดิม.....	131
7.18 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 5 m/s เป็น 6 m/s	132
7.19 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 6 m/s	133
7.20 กราฟคุณลักษณะความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า.....	133
7.21 ชุดทดสอบต้นแบบและเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ	134
7.22 การติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าจริง.....	135
7.23 ผลการทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าจริง.....	136
7.24 ภาพขยายผลการทดสอบในรูปที่ 7.23	136

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.25	พลังงานที่สามารถสกัดได้จากระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าจริง..... 137
7.26	การติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบ 138
7.27	ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่สามารถสกัดจากระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้า..... 138
7.28	ภาพขยายผลการทดสอบในรูปที่ 7.27 139
7.29	ผลการทดสอบการดึงพลังงานจากกักเก็บ..... 139
8.1	เครื่องวัดความเร็วลมยี่ห้อ BENETECH รุ่น GM8901 142
8.2	การสำรวจความเร็วลมท้ายโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ของบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด มหาชน 142
8.3	ผลการสำรวจความเร็วลมท้ายโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ..... 143
8.4	ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าที่นำมาประยุกต์ใช้ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ลมจาก ระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ 143
8.5	กักเก็บผลิตไฟฟ้า 144
8.6	ชุดชาร์จ Com. Without MPPT 145
8.7	ชุดชาร์จ MPPT 145
8.8	ชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า..... 146
8.9	อุปกรณ์แยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง..... 147
8.10	การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียน..... 147
8.11	การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็น แบบระเหยน้ำด้วยชุดชาร์จ Com. without MPPT..... 148
8.12	การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็น แบบระเหยน้ำด้วยชุดชาร์จ MPPT..... 148
8.13	ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของ โรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ 149
8.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระยะเวลาคุ้มทุน (ปี) 152
ก.1	บล็อกจำลองสถานการณ์เครื่องจำลองกักเก็บด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 162
ก.2	บล็อกจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดัน 162
ข.1	บล็อกจำลองสถานการณ์ขั้นตอนวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O 168

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.1 FIS Editor.....	174
ง.2 การกำหนด FIS Editor สำหรับการควบคุม.....	175
ง.3 กำหนด membership function ของตัวแปรอินพุต.....	175
ง.4 กำหนด membership function ของตัวแปรเอาต์พุต	176
ง.5 Rule Editor	176



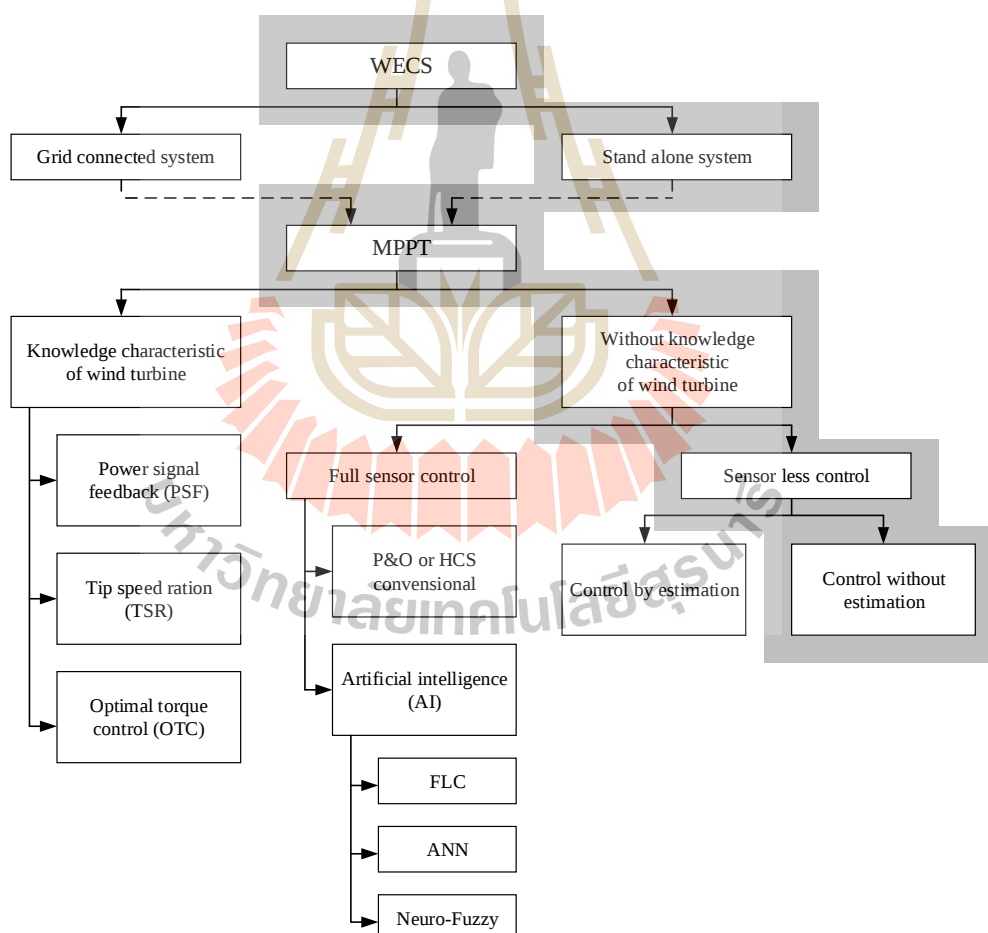
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานถือเป็นสิ่งจำเป็นขั้นพื้นฐานที่ใช้ในชีวิตประจำวัน กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ต้องใช้พลังงานแทบทั้งสิ้น รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันมาก คือ พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า โดยมีแหล่งกำเนิดพลังงานหลัก ๆ ในปัจจุบันเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกิดจากการทับถมของซากพืชและซากสัตว์ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังมีการลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ราคาของเชื้อเพลิงดังกล่าวมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงยังสร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ทำให้แนวคิดเกี่ยวกับการนำพลังงานทดแทนมาใช้เป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น โดยหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจ คือ พลังงานลม ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ มนุษย์เราได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานลมมานานหลายพันปีในการอำนวยความสะดวกสบาย เช่น การแล่นเรือใบขนส่งสินค้า การหมุนกังหันวิดน้ำ ทำให้ในปัจจุบันมีการให้ความสำคัญและนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้น โดยเฉพาะการนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการศึกษาเกี่ยวกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ระบบแปลงผันพลังงานลม (wind energy conversion system: WECS) จะใช้กังหันลมดักจับพลังงานจากลม ซึ่งเป็นพลังงานจลน์และถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกลบนเพลลาของกังหันที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนพลังงานทางกลที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานทางไฟฟ้า ปัจจุบันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet synchronous generator: PMSG) กำลังเป็นที่นิยมด้วยข้อได้เปรียบที่มากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ เช่น มีขนาดเล็ก ความหนาแน่นกำลังสูง การบำรุงรักษาต่ำ ประกอบกับราคาของแม่เหล็กถาวรที่มีแนวโน้มที่ลดลง (Alnasir and Kazerani, 2013) จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงพิจารณาระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร การนำพลังงานที่ได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้ามาใช้งานมี 2 แบบ คือ 1) ระบบแบบอิสระ (Stand alone system) ระบบนี้จะมีแหล่งพลังงานสำรอง นั่นคือ แบตเตอรี่ สำหรับเก็บกักและจ่ายพลังงานในสถานะที่พลังงานจากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมไม่เพียงพอ 2) ระบบแบบเชื่อมต่องาน (Grid connected system) ระบบนี้จะนำพลังงานที่ได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้าจ่ายเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าโดยตรง ดังแผนภาพในรูปที่ 1 สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณา ระบบแบบอิสระ เพื่อการใช้งานตามถิ่นทุรกันดารและเป็นการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอย่าง

ยังขึ้น การนำพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมมาใช้ต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลัง เพื่อปรับเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวให้เหมาะสมแก่การใช้ประโยชน์ รวมถึงควบคุมการทำงานของระบบ พลังงานเอาต์พุตของกังหันลมนั้นไม่คงที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แปรผันตามความเร็วลม การทำงานของกังหันลมมีย่านความเร็วในการหมุนและพลังงานเอาต์พุตที่กว้าง ซึ่งปัญหาที่พบ คือ ตำแหน่งการทำงานของระบบไม่ได้อยู่ตรงจุดที่มีพลังงานเอาต์พุตสูงสุด ทำให้ได้ประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าไม่เต็มที่ ด้วยเหตุนี้การดัดศักยภาพสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด (maximum power point tracking: MPPT) เพื่อควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เหมาะสมและได้พลังงานเอาต์พุตสูงสุดที่สอดคล้องกับความเร็วลมต่างๆ ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่การพัฒนาและปรับปรุงการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ



รูปที่ 1.1 แผนภาพแนวทางการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด
สำหรับระบบแปลงผันพลังงานลม

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าไว้หลากหลายวิธีแตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของการใช้งาน (Kot, Rolak, and Malinowski, 2013) สามารถจำแนกแนวทางหลัก ๆ ของการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดได้เป็น 2 แนวทาง แนวทางแรกเป็นแนวทางที่อาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม (Knowledge characteristic of wind turbine) และแนวทางที่ไม่ต้องพึ่งพาคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม (Without knowledge characteristic of wind turbine) เพื่อใช้ในการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด ดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 1 การตามรอยกำลังสูงสุดแบบที่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลม มีหลัก ๆ อยู่ 3 วิธีด้วยกัน ดังนี้ 1) วิธีการป้อนกลับสัญญาณพลังงาน (Power signal feedback: PSF) (Abdulah, Yatim, Tan, and Saidur, 2012) หรือ วิธีการควบคุมแบบเปิดตาราง (Lookup Table Method) วิธีการนี้ใช้คุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและความเร็วรอบของกังหันลมที่แทนด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และนำไปบันทึกลงในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MPPT Profile) สัญญาณอ้างอิงสามารถคำนวณได้ผ่านข้อมูลดังกล่าว โดยใช้ค่าความเร็วลมหรือความเร็วรอบของกังหันลมเป็นอินพุต 2) วิธีการอัตราส่วนความเร็วปลาย (Tip Speed Ratio: TSR) (Thongam and Ouhrouche, 2011) จุดการทำงานกำลังสูงสุดของกังหันลม สามารถทำได้ด้วยการรักษาค่าอัตราส่วนความเร็วปลายให้เหมาะสม โดยใช้ความเร็วลมเป็นอินพุตสำหรับสร้างสัญญาณความเร็วรอบอ้างอิงตามค่าอัตราส่วนความเร็วปลายที่เหมาะสม 3) การควบคุมแรงบิดที่เหมาะสม (Optimal Torque Control: OTC) (Shirazi, Viki, and Babayi, 2009) เป็นการควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามแรงบิดที่เหมาะสมของกังหันลม สัญญาณแรงบิดอ้างอิงสามารถคำนวณได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่เหมาะสมของกังหันลม การควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดในแนวทางที่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลมเป็นที่ทราบในวงกว้างว่ามีความรวดเร็วในการควบคุม เพราะสามารถนำค่าความเร็วลมหรือความเร็วรอบของกังหันลมที่ตรวจจับได้ไปคำนวณสัญญาณอ้างอิงในทันที อย่างไรก็ตามทั้ง 3 วิธีเป็นเพียงกลยุทธ์ที่ใช้ในการติดตามรอยจุดกำลังสูงสุดเท่านั้น การควบคุมจำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุมต่าง ๆ เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอ ความจำเป็นที่ต้องทราบคุณลักษณะของกังหัน รวมถึงการวัดความเร็วลมหรือความเร็วรอบของกังหันลมถือเป็นข้อเสียเปรียบสำหรับวิธีการควบคุมในแนวทางนี้ ทำให้มีแนวคิดการติดตามกำลังสูงสุดแบบที่ไม่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะของการใช้งานตัวตรวจวัดต่าง ๆ ได้ 2 แบบ คือ การควบคุมแบบใช้ตัวตรวจวัดเต็มรูปแบบ (Full sensor control) กล่าวคือ มีการตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าและปริมาณทางกล ส่วนแบบที่ 2 เป็นการควบคุมแบบลดทอนตัวตรวจวัด (Sensor less control) ซึ่งจะมีการวัดปริมาณทางไฟฟ้าเพียงเท่านั้น

วิธีการตามรอยกำลังสูงสุดแบบการควบคุมที่ใช้ตัวตรวจวัดเต็มรูปแบบ (Full sensor control) มีหลัก ๆ อยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ 1) วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation: P&O)

หรือ วิธีการค้นหาแบบไต่เขา (Hill climb search: HCS) วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้กันในระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์และได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบแปลงพลังงานลม หลักการควบคุมมีความเรียบง่ายอยู่ภายใต้กลไกวนรอบค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสม (Wai, Lin, and Chang, 2007) สัญญาณอ้างอิงจะถูกปรับเปลี่ยนในแต่ละรอบของการค้นหา คุณลักษณะของกังหันลมมีความคล้ายกับรูปประฆังคว่ำหรือรูปภูเขา ตำแหน่งที่มีค่าสูงสุด คือ บริเวณที่มีความชันเป็นศูนย์ ดังนั้น เงื่อนไขในการควบคุมจึงพิจารณาได้จากค่าความชัน ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับขนาดขั้นในการค้นหา (Step size) การเลือกค่าดังกล่าวจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก อัลกอริทึมที่มีความซับซ้อนถูกนำมาใช้เพื่อให้ขนาดขั้นในการค้นหามีการปรับตัว ในกรณีที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วการปรับตั้งสัญญาณอ้างอิงมักเกิดความผิดพลาด 2) วิธีการควบคุมทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence: AI) เช่น วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic control: FLC) (Mohamed, Eskander, and Ghli, 2001) วิธีการเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network: ANN) (Lin and Hong, 2010) หรือ นิวโร-ฟัซซี (Neuro-Fuzzy control) (Meharra, Tioursi, Hatti, and Stambouli, 2011) ข้อดีของวิธีการเหล่านี้ คือ ไม่ต้องพึ่งพาแบบจำลองของระบบและควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี สามารถแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับขนาดขั้นในการค้นหาได้ ทำให้มีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธี P&O แต่มีความซับซ้อนในการออกแบบและฝึกสอนก่อนนำไปใช้งาน สำหรับการควบคุมแบบที่ต้องใช้ตัวตรวจวัดทางกลมีค่าใช้จ่ายและความยุ่งยากในการติดตั้ง ความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณทางกลส่งผลโดยตรงต่อการการควบคุม จึงทำให้มีแนวคิดเกี่ยวกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ไม่ใช้คุณลักษณะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด (Sensor less control) ดังแผนภาพในรูปที่ 1 หลักการการควบคุมยังคงอยู่บนพื้นฐานการวนรอบค้นหาตำแหน่งกำลังสูงสุดของกังหันลมเช่นกัน ต่างกันที่การควบคุมจะพิจารณาเพียงปริมาณทางไฟฟ้าเท่านั้น สามารถกระทำได้ 2 วิธี ดังนี้ 1) วิธีการควบคุมด้วยการประมาณค่า (Control by estimation) วิธีการนี้มีหลักการและรูปแบบการตามรอยกำลังสูงสุดทำนองเดียวกันกับการตามรอยกำลังสูงสุดแบบการควบคุมที่ใช้ตัวตรวจวัดเต็มรูปแบบ (Full sensor control) การได้มาของปริมาณทางกลจะอาศัยการประมาณค่า (Esmaili and Longya, 2006) โดยใช้พารามิเตอร์ที่แท้จริงของระบบในการคำนวณหรือการประมาณค่าด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ นอกจากนี้ยังมีการประมาณค่าด้วยวิธีตัวกรองคาลมาน (Karma filter) อย่างไรก็ตามการประมาณค่าด้วยวิธีตัวกรองคาลมานมีความยุ่งยากในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง (Carranza, Figueres, Garcera, and Gonzalez, 2011) 2) วิธีการควบคุมแบบไม่ใช้การประมาณค่า (Control without estimation) การควบคุมของวิธีการนี้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและสัญญาณควบคุม (Trinh and Lee, 2010) ใช้ทรัพยากรตัวตรวจวัดน้อยและไม่ต้องการการประมาณค่า จึงมีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการอื่น ๆ ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการพัฒนา

ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่สะดวกต่อการนำไปติดตั้งใช้งานและมีความยืดหยุ่นต่อคุณลักษณะของกังหันลม สามารถปฏิบัติงานตามพื้นที่ที่ทุรกันดารได้ตลอด 24 ชม. ทั้งนี้ยังเป็นการก่อให้เกิดแนวทางการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอีกด้วย ส่วนหนึ่งของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับกังหันลมผลิตไฟฟ้าจากระบบบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ เพราะว่าได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ประจำปีงบประมาณ 2558 ในหัวข้อเรื่องการผลิตไฟฟ้าจากระบบบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำที่มีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพและความเชื่อถือของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีนำไปสู่การพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืนด้วยการใช้พลังงานลม
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาระบบวิศวกรรมต้นแบบให้สามารถใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้
- 1.2.5 เพื่อทำการศึกษา วิจัย และสร้างชุดต้นแบบระบบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

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 ควบคุมระบบการถ่ายโอนพลังงานในระบบให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
- 1.5.2 ได้ชุดต้นแบบทดสอบของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ
- 1.5.3 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ
- 1.5.4 ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

รายงานนี้ประกอบด้วย 9 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็น บทนำ ที่กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าและเครื่องจำลองกังหันลม

บทที่ 3 นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับระบบแปลงผันพลังงานลม

บทที่ 4 นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีการจำลองสถานการณ์และการสร้างชุดทดสอบระบบดังกล่าว

บทที่ 5 นำเสนอการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า หลักการควบคุมแบบอาศัยคุณลักษณะของกังหันลมด้วยวิธีป้อนกลับสัญญาณกำลังไฟฟ้าและการควบคุมแบบไม่อาศัยคุณลักษณะของกังหันลมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบลดทอนตัวตรวจวัดทางกล รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมทั้ง 2 แบบ

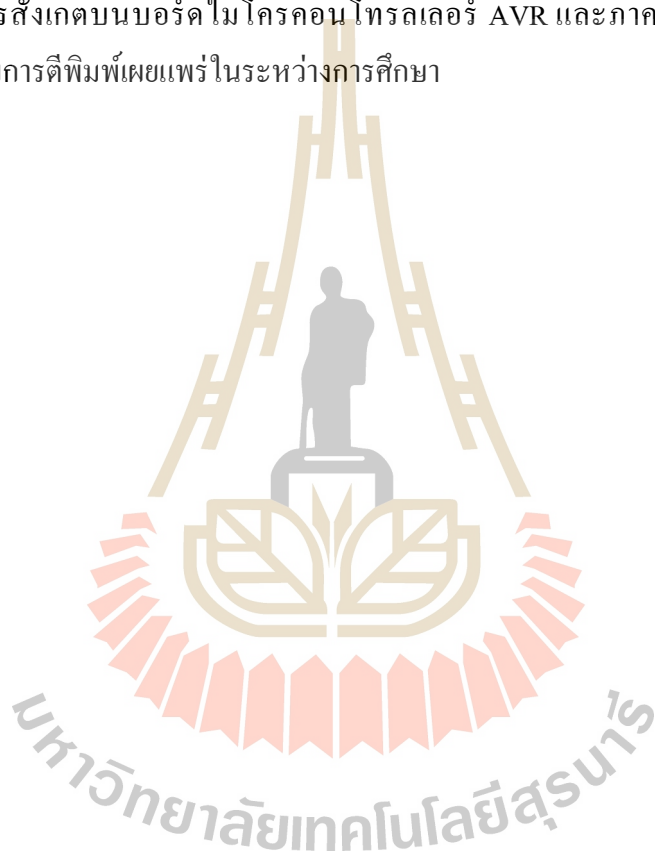
บทที่ 6 นำเสนอการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต การออกแบบตัวควบคุม การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมด้วยการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม รวมถึงการประยุกต์ใช้การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตกับระบบกังหันลมที่มีพิกัดแตกต่างกันด้วยการจำลองสถานการณ์

บทที่ 7 นำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต

บทที่ 8 นำเสนอการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำที่มีการควบคุมตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 7 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. การจำลองสถานการณ์และโค้ดโปรแกรมเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ภาคผนวก ข. โปรแกรมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB ภาคผนวก ค. กฎฟuzzyสำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ภาคผนวก ง. การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟuzzyที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ภาคผนวก จ. โปรแกรมการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ภาคผนวก ฉ. โปรแกรมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟuzzyที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR และภาคผนวก ช. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงผันพลังงานลม โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้น ในบทนี้จึงเป็นการนำเสนอการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกังหันลมและการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า รายละเอียดการสำรวจงานวิจัยประกอบด้วยปีที่ตีพิมพ์ คณะผู้วิจัยและสาระสำคัญของงานวิจัยดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมหรือบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ คือ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองกังหันลม ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยอาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ไม่อาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ไม่อาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด โดยแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจะนำเสนอในรูปแบบตารางเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป ดังตารางที่ 2.1 ถึง ตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2007	Li H. and Chen Z.	นำเสนอภาพรวมความแตกต่างของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและการจำแนกประเภทของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2	2013	Alnasir Z. and Kazerani M.	นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมเชิงวิเคราะห์ของระบบแปลงผันพลังงานลมแบบอิสระจากมุมมองการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า การทบทวนมุ่งเน้นที่กักเก็บแบบความเร็วไม่คงที่ แนวโน้มในอนาคตของระบบแปลงผันพลังงานลม การเปรียบเทียบกักเก็บแบบขับเคลื่อนโดยตรงและทางอ้อม รวมถึงการใช้งานในระยะยาวของ PMSG และสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการใช้เครื่องจักรกลสวิตช์-รีลัคแทนซ์ในระบบกักเก็บขับเคลื่อนโดยตรง

จากตารางที่ 2.1 ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันพลังงานลมและการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบแปลงผันพลังงานลม พบว่า ระบบแปลงผันพลังงานลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบทวีคูณและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย พิจารณาถึงการใช้งานในกรณีระบบแบบอิสระ พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรมีความเหมาะสมมากที่สุดเพราะมีโครงสร้างที่เรียบง่าย มีความน่าเชื่อถือ ไม่ต้องใช้กลองเกียร์และการบำรุงรักษาต่ำ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองกักเก็บ

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2004	Kojabadi H. M., Chang L. and Boutot T.	นำเสนอเครื่องจำลองกักเก็บด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องจำลองนี้ทำงานได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองกังหันลม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2	2007	Ke X., Minqiang H., Yan R.Y. and Du W.	นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรในรูปแบบการควบคุมแบบวงรอบเปิดและการควบคุมแบบวงปิดด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าสามารถจำลองคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมได้
3	2007	LI W., Zhang W. and MA H.	นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ่น 4.2 kW ขับเคลื่อนโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบทวีคูณที่เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบปรับค่าได้ทำหน้าที่ปรับตั้งค่ากระแสอาร์เมเจอร์ให้เป็นไปตามกระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง ซึ่งได้จากแรงบิดอ้างอิงที่คำนวณผ่านแบบจำลองของกังหันลม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องจำลองกังหันลมสามารถเลียนแบบคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมได้
4	2008	Monfared M., Kojabadi H.M. and Rastegar H.	อธิบายเกี่ยวกับเครื่องจำลองกังหันลม โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสครึ่งคลื่นแบบปรับค่าได้ แรงบิดอ้างอิงได้จากแบบจำลองกังหันลม แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้จากการประมาณผ่านค่ากระแสอาร์เมเจอร์ การจำลองสถานการณ์และการทดสอบยืนยันความถูกต้องและประสิทธิภาพของเครื่องจำลองกังหันลมที่นำเสนอ

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองกังหันลม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
5	2010	Guangchen L., Shengtie W. and Jike Z.	นำเสนอหลักการการทำงานของกังหันลมและความเป็นไปได้ของการจำลองคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบปรับค่าได้และตัวควบคุมแบบพีไอทำหน้าที่ปรับตั้งกระแสอาร์เมเจอร์ให้เป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากแบบจำลองกังหันลม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถจำลองคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมได้
6	2014	Martinez F., Carlos Herrero L. and Pablo S.	นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลมแบบวงรอบเปิดซึ่งสามารถเลียนแบบกราฟคุณลักษณะพลังงานของกังหันลมได้โดยไม่ต้องใช้ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด เครื่องจำลองกังหันลมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ่นควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบปรับค่าได้ เนื่องจากกราฟคุณลักษณะพลังงานของมอเตอร์คล้ายกับกราฟคุณลักษณะพลังงานของกังหันลมในกรณีความเร็วลมคงที่ ดังนั้น ในกรณีความเร็วลมที่แตกต่างสามารถจำลองได้ด้วยการปรับตั้งแรงดันอาร์เมเจอร์ เครื่องจำลองแบบวงรอบเปิดนี้ใหม่และเรียบง่ายมีผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบเป็นที่ยืนยัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองกังหันลมได้มีการนำมอเตอร์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ด้วยการควบคุมให้เลียนแบบพฤติกรรมการทำงานของกังหันลม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความซับซ้อนของการควบคุม การออกแบบและการสร้างชุดทดสอบสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว พบว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อได้เปรียบและสามารถทำงานได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำมาใช้จำลองกังหันลมจริงสำหรับการทดสอบตัวควบคุมในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยอาศัย

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2004	Tan K. and Islam S.	นำเสนอการควบคุมระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ PMSG แบบลดทอนตัววัดความเร็วรอบ โดยอาศัยการประมาณค่า ควบคุม MPPT ด้วยวิธีควบคุมแบบเปิดตาราง
2	2010	Raza Kazmi S.M., Goto H., Guo H-J. and Ichinokura O.	นำเสนอการทบทวนวิธีการควบคุม MPPT สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีต่าง ๆ โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงานข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีไว้ด้วย
3	2011	Singh M., Khadkikar V. and Chandra A.	นำเสนอระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกริด ซึ่งมีการควบคุม MPPT ด้วยวิธี PSF โดยพิจารณา ระบบกังหัน ต่อตรงกับ PMSG
4	2012	Abdullah M. A., Yatim A. H. M., Tan C. W. and Saidur R.	นำเสนอการทบทวนอัลกอริทึมต่าง ๆ ของการตามรอยกำลังสูงสุด สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ PMSG และมีผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกัน
5	2012	Mendis N., Muttaqi K.M., Sayeef S. and Perera S.	นำเสนอระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF ที่สามารถจำกัดพลังงานได้โดยนำไปใช้กับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่ใช้ PMSG และ DFIG ประสิทธิภาพของการควบคุมยืนยันด้วยผลการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยอาศัย

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
6	2013	Pablo Sanchis A. U., Martín I. S., López J. and Marroyo L.	นำเสนอแบบจำลองของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ PMSG เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรแปลงผันทระดับแรงดัน การควบคุม MPPT สามารถลดทอนตัวตรวจวัดได้ แต่ยังคงอาศัยคุณลักษณะเฉพาะของระบบ ซึ่งควบคุมด้วยวิธีแบบเปิดตารางบนความสัมพันธ์แรงดันและกระแสไฟฟ้า
7	2013	Kot R., Rolak M. and Malinowski M.	นำเสนอการเปรียบเทียบอัลกอริทึมตามรอยกำลังสูงสุดต่าง ๆ สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ PMSG วงจรเรียงกระแสสามเฟสเชื่อมต่อกับวงจรทระดับแรงดันและโหลดตัวต้านทาน ผลการจำลองสถานการณ์แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุม MPPT ด้วยวิธีต่าง ๆ พร้อมทั้งการอภิปรายสรุปในรูปแบบตาราง
8	2013	Hong C.-M., Chen C.-H. and Tu C.-S.	นำเสนอการควบคุม MPPT แบบไม่ใช้ตัวตรวจวัดทางกลสำหรับระบบกังหันลมที่ใช้ PMSG โดยการใช้การสังเกตแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กลยุทธ์ตามรอยกำลังสูงสุดที่ใช้คือ วิธี TSR
9	2015	Assareh E. and Biglari M.	นำเสนอแนวทางการสกัดพลังงานสูงสุดจากกังหันลมด้วยวิธี TSR โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟuzzy ซึ่งได้รับการออกแบบพารามิเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบ RBF และอัลกอริทึม GSA ยืนยันความถูกต้องด้วยผลการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยอาศัย

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
10	2015	Lalouni S., Rekioua D., Idjdarene K. and Tounzi A.	นำเสนอการประยุกต์ใช้การควบคุม MPPT กับระบบแปลงผันพลังงานลมด้วยวิธีการควบคุมที่อาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมผสมผสานกับวิธีการค้นหาแบบไต่เขา ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าการควบคุมมีประสิทธิภาพดีขึ้น
11	2016	Kumar D. and Chatterjee K.	นำเสนอการอธิบายหลักการอัลกอริทึมตามรอยกำลังสูงสุดแบบดั้งเดิมและแบบขั้นสูงสำหรับระบบพลังงานลมด้วยวิธีการต่าง ๆ พร้อมทั้งแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่าง ความซับซ้อน ความเร็วในการเข้าสู่จุดกำลังสูงสุด การแยกแยะตามความต้องการตรวจวัดและประสิทธิภาพในการควบคุม

จากตารางที่ 2.3 ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด โดยอาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมมีอยู่ 3 วิธีด้วยกัน คือ วิธี PSF วิธี TRS และวิธี OTC ซึ่งพบว่า การควบคุมดังกล่าวมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ทิศทางการควบคุมถูกต้องและมีประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบควบคุมชนิดต่าง ๆ ซึ่งถือเป็นการเพิ่มสมรรถนะของการควบคุมได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ต้องอาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมมีความเฉพาะเจาะจงขึ้นอยู่กับกังหันลมที่พิจารณาเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้าง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแผนพัฒนาการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดแบบที่ไม่ต้องอาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม รายละเอียดของการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการควบคุมดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5 ต่อไป

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2003	Datta R. and Ranganathan V.T.	นำเสนอวิธีการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงพลังงานลมที่มีความเร็วไม่คงที่ด้วยวิธี P&O บนพื้นฐานความสัมพันธ์พลังงานกับความเร็วยกกำลังสามของกังหันลม โดยพิจารณาระบบกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับกริดควบคุมด้วยวงจรแปลงผันแบบหลังชนหลัง ผลการทดสอบแสดงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอเปรียบเทียบกับกริดควบคุมด้วยวิธี OTC แบบดั้งเดิม
2	2004	Abo-Khalil A. G., Lee D-C. and Seok J-K.	นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก โดยพิจารณาระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอาศัยวงจรแปลงผันแบบหลังชนหลัง 2 ระดับ เชื่อมต่อกับกริด การควบคุมวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและความเร็วยกกำลังสามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกและมีเอาต์พุตเป็นสัญญาณความเร็วรอบอ้างอิง ผลการทดสอบยืนยันประสิทธิภาพของการควบคุม
3	2007	Mirecki A., Roboam X. and Richardeau F.	นำเสนอความซับซ้อนทางโครงสร้างประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมขนาดเล็กเปรียบเทียบกันระหว่างการควบคุมแบบใช้และไม่ใช้คุณลักษณะของกังหันลม โดยพิจารณาระบบกังหันลมแบบอิสระที่ใช้ PMSG

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
4	2008	Galdi V., Piccolo A. and Siano P.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบปรับตัวได้ สำหรับการสกัดพลังงานสูงสุดจากลม โดยไม่ต้องอาศัยคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม อินพุตของตัวควบคุมดังกล่าวคือ กำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เอาต์พุต คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิง โดยพิจารณา ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับกริด
5	2011	Lee C-Y., Chen P-H. and Shen Y-X.	นำเสนอระบบตามรอยกำลังสูงสุดของระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่ผสมผสานระหว่างโครงสร้างประสาทเทียมฟังก์ชันรัศมีพื้นฐานร่วมกับการหาค่าเหมาะสมด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค โดยพิจารณา ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ PMSG วงจรเรียงกระแสสามเฟสเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันทระดับแรงดันและมีโหลดตัวต้านทาน การควบคุมดำเนินการวัดกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบเป็นอินพุตและมีเอาต์พุตเป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิง
6	2012	Petrila D., Blaabjerg F., Muntean N. and Lascu C.	นำเสนอตัวควบคุมฟuzzyลอจิกบนพื้นฐานการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลม หลักการควบคุมอาศัยการเปลี่ยนแปลงของพลังงานและความเร็วรอบของกังหันลมและค่าความชัน โดยมีสัญญาณกระแสอ้างอิงเป็นเอาต์พุต สมรรถนะการควบคุมยืนยันด้วยผลการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
7	2013	Eltamaly A. M. and Farh H. M.	นำเสนอการสกัดพลังงานสูงสุดจากระบบพลังงานลมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก หลักการควบคุมใช้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานและความเร็วรอบของกังหันลม สัญญาณควบคุมที่ใช้ คือ ความเร็วรอบอ้างอิง โดยพิจารณาระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าเชื่อมต่อกริดที่ใช้ PMSG ประสิทธิภาพการควบคุมยืนยันด้วยผลการจำลองสถานการณ์
8	2013	Yaakoubi A. E., Asselman A., Djebli A. and Aroudam E. H.	นำเสนอกลยุทธ์ตามรอยกำลังสูงสุดแบบไม่ใช้คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาแบบไต่เขา ระบบกังหันลมที่พิจารณาใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก อัลกอริทึมที่นำเสนอยืนยันด้วยผลการจำลองสถานการณ์

จากตารางที่ 2.4 ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมที่มีความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ วิธี P&O หรือ วิธี HCS เพราะเป็นวิธีที่มีความเรียบง่าย หลักการควบคุมอยู่ภายใต้การวนรอบค้นหาตำแหน่งปฏิบัติงานที่เหมาะสมของระบบ โดยอิงจากความสัมพันธ์พลังงานและความเร็วรอบของกังหันลม นอกจากนี้ยังมีวิธีการควบคุมทางปัญญาประดิษฐ์ แต่ยังคงอยู่ภายใต้การควบคุมด้วยวิธี P&O อย่างไรก็ดีตามการควบคุมใช้ความสัมพันธ์พลังงานและความเร็วรอบของกังหันลม จำเป็นต้องมีตัวตรวจวัดความเร็วรอบ มักก่อให้เกิดความยุ่งยากในการติดตั้งและค่าใช้จ่ายสูง ทางออกของปัญหานี้สามารถทำได้โดยอาศัยการประมาณค่าความเร็วรอบหรือหลีกเลี่ยงโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ที่ไม่ใช้ความเร็วรอบ ซึ่งเป็นแนวทางที่ผู้วิจัยให้ความสนใจในงานวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2009	Hong Y-Y., Lu S-D. and Chiou C-S.	นำเสนอการควบคุม MPPT แบบลดทอนตัวตรวจวัดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ PMSG ด้วยอัลกอริทึมการประมาณแบบลาดเอียง วงจรแปลงผันกำลังใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับวงจรแปลงผันลดและทบระดับแรงดัน ซึ่งมีโหลดเป็นตัวต้านทาน การควบคุมจะวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันโดยตรง
2	2010	Singh M., Chandra A. and Singh B.	นำเสนอระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่ใช้ PMSG และมีแบตเตอรี่ผสมผสาน ควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแบบลดทอนตัวตรวจวัดด้วยวิธีนิว-โร ฟัซซีที่ปรับตัวได้
3	2010	González L.G., Figueres E., Garcerá G. and Carranza. O	นำเสนอการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ลดความเครียดเชิงกลกับระบบแปลงผันพลังงานลม วิธีการที่นำเสนอมีนัยสำคัญต่อการบำรุงรักษาและช่วยลดความผิดพลาดเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ สัญญาณความเร็วรอบอ้างอิงได้จากการคัดแปลงแก้ไขด้วยอัลกอริทึมการรบกวนและการสังเกต ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากการประมาณค่า วิธีการดังกล่าวประยุกต์ใช้กับกังหันลมที่ใช้ PMSG ควบคุมด้วยวงจรแปลงผันแบบหลังชนหลังและเชื่อมต่อกริด

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
4	2010	Trinh Q-N and Lee H-H.	นำเสนอตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกสำหรับตาม รอยกำลังสูงสุดในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ ใช้ PMSG การควบคุมดังกล่าวอิงวิธีการ P&O พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า กำลังไฟฟ้าและค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลง ผันและปรับตั้งวัฏจักรหน้าที่โดยตรง
5	2010	Lin W-M. and Hong C-M.	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบ ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมด้วยวิธีทาง ปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับวิธี HCS กลยุทธ์ที่ใช้อยู่ บนพื้นฐานเส้นโค้งความสัมพันธ์แรงดันและ กำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาระบบกังหันลมที่ใช้ PMSG วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับ อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสและเชื่อมต่อกับกริด
6	2011	Xia Y., Ahmed K. H. and Williams B. W.	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบ แปลงผันพลังงานลมที่ใช้ PMSG ด้วยวิธีการ ค้นหาตำแหน่งความสัมพันธ์ที่เหมาะสมอิงวิธี P&O วิธีการดังกล่าวไม่ต้องใช้ตัววัดทางกลหรือ คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลม แต่ยังคงให้ ผลตอบสนองที่ดีในสภาวะความเร็วลมผันผวน ยิ่งไปกว่านั้นยังมีการอัปเดตพารามิเตอร์ของ ระบบควบคุมแบบทันเวลา ความถูกต้องและ ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ ยืนยันด้วยการจำลอง สถานการณ์และผลการทดสอบ

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
7	2011	Lo K-Y., Chen Y-M. and Chang Y-R.	นำเสนอชุดชาร์ตแบตเตอรี่สำหรับระบบกังหัน ลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่การตามรอยกำลัง สูงสุดแบบไม่ใช้ตัวตรวจวัดทางกล ระบบแปลง ผันกำลังใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับ วงจรแปลงผันลดระดับแรงดัน ระบบแปลงผัน กำลังไฟฟ้าง่ายกว่าด้วยผลการทดสอบกับ กังหันลมจริง
8	2012	Serban I. and Marinescu C.	นำเสนอวิธีการควบคุมแบบลดทอนตัวตรวจวัด สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าซึ่งต่อโดยตรงกับ PMSG และมีวงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับ อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเชื่อมกริด การควบคุม พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและ กำลังไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้า อ้างอิง ผลการจำลองสถานการณ์และผลการ ทดสอบแสดงประสิทธิภาพของการควบคุม
9	2013	Xia Y., Ahmed K. H. and Williams B. W.	นำเสนอการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์พลังงานของ กังหันลมสำหรับวิธีการตามรอยกำลังสูงสุดแบบ ใหม่ โดยพิจารณาระบบกังหันลมที่ใช้ PMSG วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับวงจรแปลงผัน ทบระดับแรงดันและโหลดตัวต้านทาน การ ควบคุม MPPT อิงวิธี P&O แบบลดทอนตัว ตรวจวัดความเร็วรอบ ความถูกต้องและ ประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวได้รับการยืนยัน ด้วยผลการจำลองสถานการณ์และผลการ ทดสอบ

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
10	2013	Dalala Z. M., Zahid Z. U., Yu W., Cho Y. and Lai J-S.	นำเสนออัลกอริทึมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงผันพลังงานลมขนาดเล็ก การควบคุมใช้วิธี P&O การตรวจสอบความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงใช้ความชันของแรงดันไฟฟ้า รวมถึงพิจารณาโหมดการควบคุมในแบบปกติหรือแบบคาดการณ์ล่วงหน้า วิธีการดังกล่าวยืนยันด้วยชุดต้นแบบพิกัด 1.5 kW
11	2015	Yin X-X., Lin Y-G., Li W., Gu Y-J. and Liu H-W.	นำเสนอกลยุทธ์ควบคุมแรงดันแบบโหมดเลื่อนสำหรับสกัดพลังงานสูงสุดจากลมบนพื้นฐานตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ซึ่งออกแบบควบคุมระบุแรงดันด้านดิสชีที่เหมาะสมในสภาวะที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงส่วนการควบคุมแรงดันแบบโหมดเลื่อนจะใช้ติดตามแรงดันด้านดิสชีที่เหมาะสมในสภาวะคงตัว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
12	2015	Daili Y., Gaubert J-P. and Rahmani L.	นำเสนอการดัดแปลงอัลกอริทึมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยได้แก้ไขปัญหาค่าความเร็วในการลู่เข้าการทำงานของอัลกอริทึมมี 2 โหมด คือ โหมดปกติในกรณีที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงช้าและโหมดคาดการณ์ล่วงหน้าเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าใช้เป็นตัววินิจฉัยโหมดการควบคุมโดยมีผลการทดสอบยืนยันได้ว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าการควบคุมด้วยวิธี P&O แบบดั้งเดิม

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้

คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
13	2016	Lee J. and Kim Y-S.	นำเสนอการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแบบลดทอนตัวตรวจวัดกับกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ขนาดเล็กในระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้ PMSG ระบบแปลงผันกำลังใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับวงจรแปลงผันทระดับแรงดันและอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับเชื่อมต่อกริด กลไกตามรอยกำลังสูงสุดใช้ตัวควบคุมแบบพีชชีลอจิกปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันทระดับแรงดันโดยตรง การจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงประสิทธิภาพของการควบคุม
14	2017	Lahfaoui B., Zouggar S., Mohammed B. and Elhafyani - M. L.	นำเสนอการศึกษาแบบทันเวลาเกี่ยวกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ PMSG ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino การควบคุมใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับการปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันให้เหมาะสม ยืนยันด้วยผลการทดสอบกับกังหันลมจริง

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้คุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัดในตารางที่ 2.5 พบว่า สามารถกระทำได้หลายวิธีโดยอาศัยกระบวนการควบคุมบนพื้นฐานวิธี P&O ค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าหรือความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า รวมถึงวิธีใช้การประมาณค่าความเร็วรอบ ทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน สมรรถนะ

ของการควบคุมบนพื้นฐานวิธี P&O ขึ้นอยู่กับการกำหนดขนาดขั้นการค้นหา จึงมีผู้เสนอการแก้ไขปัญหานี้ด้วยการทำให้ขนาดขั้นการค้นหาลดตัวได้ตามสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การตัดแปลงอัลกอริทึมให้มีโหมดการควบคุมแบบปรกติในสถานะที่ความเร็วลมเปลี่ยนช้าและโหมดการควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าในสถานะที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบโหมดเลื่อน รวมถึงตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียม เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพและความซับซ้อนของการควบคุม พบว่า วิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมีความน่าสนใจเพราะทำให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ มีความยืดหยุ่นในการควบคุม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่อิงวิธี P&O เพื่อพัฒนาการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

2.3 สรุป

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้นำมาเสนอในบทนี้เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันพลังงานลมและการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในแนวทางต่าง ๆ โดยทุกผลงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงในบทนี้ถือเป็นประโยชน์และพื้นฐานสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินงานของผู้วิจัยที่ใช้สำหรับการคิดค้น การพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัยด้านการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงผันพลังงานลมให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

บทที่ 3

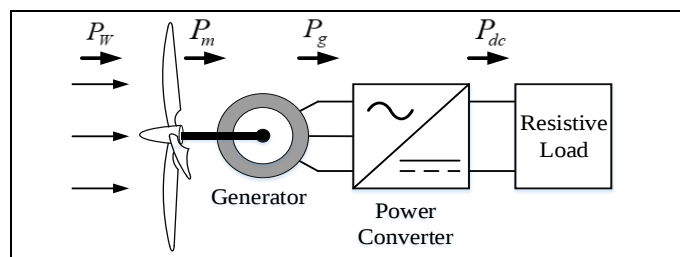
การศึกษาเกี่ยวกับระบบแปลงผันพลังงานลมและทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 บทนำ

ระบบแปลงผันพลังงานลมมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ การใช้กังหันลมทำหน้าที่ดักจับพลังงานจากลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทางกลที่เพลาก่อนนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การหมุนปั้มน้ำหรือการนำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณา ระบบแปลงผันพลังงานลมที่ใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าหรือระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ฉะนั้น การศึกษาเรียนรู้พฤติกรรมการทำงานของกังหันลมจึงเป็นรากฐานที่สำคัญในการปรับปรุงพัฒนาสมรรถนะ การควบคุมระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบแปลงผันพลังงานลมที่ใช้สำหรับผลิตไฟฟ้า หลักการทำงานและแบบจำลองของกังหันลม ชนิดของกังหันลมและรูปแบบการติดตั้ง ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้นำเสนอความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ วงจรลดทอนระดับแรงดัน รวมถึงแบตเตอรี่ไว้อีกด้วย

3.2 ระบบแปลงผันพลังงานลมสำหรับการผลิตไฟฟ้า

โครงสร้างระบบแปลงผันพลังงานลมสำหรับการผลิตไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย กังหันลมที่ทำหน้าที่ดักจับพลังงานลม (P_w) และเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทางกลที่เพลากังหันลม (P_m) พลังงานทางกลดังกล่าวถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานทางไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_g) ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (P_{dc}) ก่อนนำไปจ่ายให้แก่โหลดของระบบ



รูปที่ 3.1 ระบบแปลงผันพลังงานลม

3.3 หลักการทำงานของกังหันลม

หลักการทำงานของกังหันลมเริ่มจากพลังงานลม ซึ่งเป็นพลังงานจลน์ (E_{wind}) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังสมการที่ (3.1) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

$$E_{Wind} = \frac{1}{2}mv_w^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ m คือ มวลอากาศและ v_w คือ ความเร็วลม (m/s) ซึ่งถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดใด ๆ ซึ่งสามารถคำนวณมวลอากาศได้ ดังนี้

$$m = \rho Av_w \quad (3.2)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของกังหันลม เมื่อ นำสมการที่ (3.2) แทนลงในสมการที่ (3.1) จะได้สมการพลังงานลม (P_w) ดังสมการที่ (3.3)

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av_w^3 \quad (3.3)$$

สำหรับพลังงานหรือกำลังของกังหันลม (P_m) สามารถสกัดได้อธิบายได้ตามสมการที่ (3.4)

$$P_m = \frac{1}{2}\rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.4)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของกังหันลม (m) โดย C_p คือ สัมประสิทธิ์พลังงานของกังหันลมที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการสกัดพลังงานของกังหันลมได้ C_p เป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วปลาย (λ) (Tip Speed Ratio: TSR) และมุมเงย (pitch angle: β) ของกังหันลม โดยสัมประสิทธิ์พลังงาน C_p มีค่าสูงสุดประมาณ 0.59 (Bianchi, Battista, and Mantz, 2007) สำหรับ TSR จะเป็นตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความเร็วในการหมุนของกังหันลมและความเร็วลมตามสมการที่ (3.5)

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_w} \quad (3.5)$$

เมื่อ ω_m คือ ความเร็วในการหมุนของกังหันลม (rad/s)

การประมาณค่า C_p สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาค่า C_p ตามสมการ ดังนี้ (Abdulah, Yatim, Tan, and Saidur, 2012)

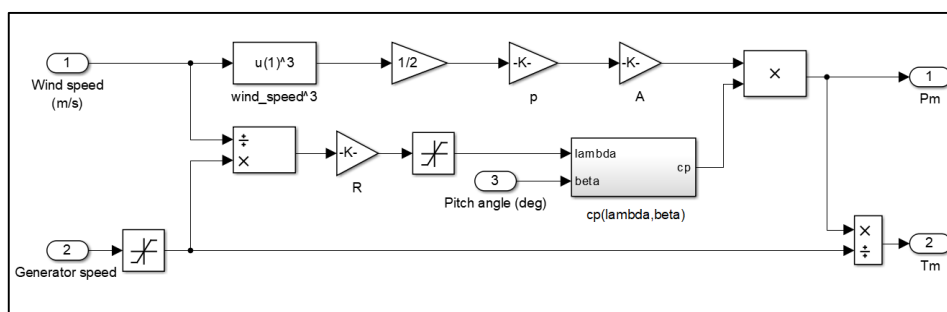
$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.7)$$

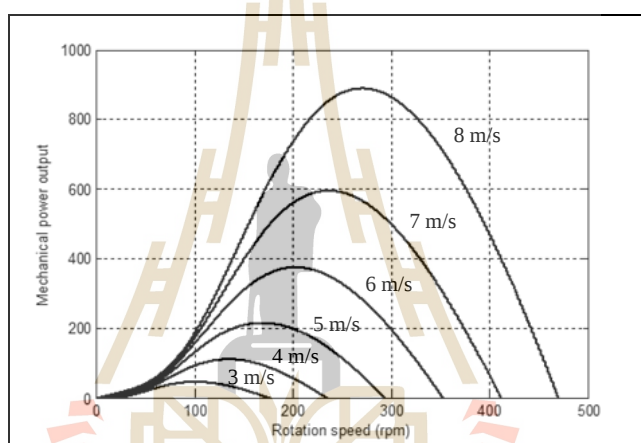
สำหรับค่าแรงบิดของกังหันลม (T_m) สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) / \omega_m \quad (3.8)$$

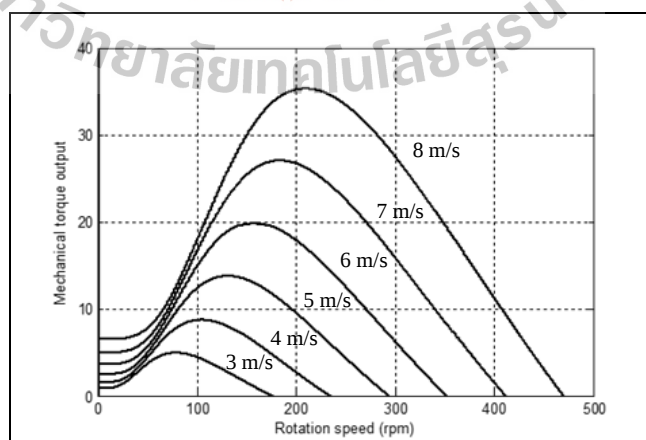
จากการศึกษาในข้างต้นทำให้ทราบถึงแบบจำลองของกังหันลมที่สามารถอธิบายได้ถึงคุณลักษณะของกังหันลมตามสมการที่ (3.4) ถึงสมการที่ (3.8) ดังนั้น จึงได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองของกังหันลมบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยความเร็วลม (v_w) ความเร็วรอบ (ω) และมุมขว้างใบพัด (β) เป็นสัญญาณอินพุต โดยมีสัญญาณเอาต์พุตของแบบจำลองเป็นพลังงาน (P_m) และแรงบิด (T_m) ตัวอย่างพารามิเตอร์ของกังหันลมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ มีดังนี้ รัศมี $R = 1.98$ เมตร ความหนาแน่นของอากาศ $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ และค่ามุมขว้างใบพัด $\beta = 11.6^\circ$ การจำลองสถานการณ์กำหนดให้คงค่าความเร็วลม (v_w) และเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ (ω) ผลการจำลองสถานการณ์พลังงานและแรงบิดของกังหันลมในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว ทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของกังหันลม ซึ่งถือว่ามีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมและการทำงานของกังหันลม รวมถึงการนำมาสร้างเครื่องจำลองกังหันลม โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมการทำงานให้ลอกเลียนแบบพฤติกรรมคุณลักษณะของกังหันลมเพื่อใช้ทดสอบอัลกอริทึมการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในห้องปฏิบัติการ โดยทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.6



รูปที่ 3.2 แบบจำลองกังหันลมบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.3 คุณลักษณะเฉพาะของพลังงานกังหันลม



รูปที่ 3.4 คุณลักษณะเฉพาะของแรงบิดกังหันลม

3.4 ชนิดของกังหันลม

ปัจจุบันเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หลายประเทศทั่วโลกได้ให้ความสนใจ โดยเฉพาะในทวีปยุโรป เช่น ประเทศเดนมาร์ก กังหันลมที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมานั้นมีลักษณะและรูปร่างแตกต่างกันออกไป สามารถจำแนกตามลักษณะแนวแกนหมุนของกังหันได้ 2 แบบ (คู่มือการพัฒนาและการลงทุนกังหันลมผลิตไฟฟ้า, 2554) คือ

3.4.1 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)

กังหันลมแนวแกนนอนเป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบพัดเป็นตัวดึงดูดแรงลมดังแสดงในรูปที่ 3.5 อุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ ตัวอย่าง กังหันลมแบบแกนนอน ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมแบบกังล้อจักรยาน กังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอปเพลเลอร์ (Propeller) โดยในปัจจุบันกังหันลมชนิดนี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก



รูปที่ 3.5 กังหันลมแบบแนวแกนนอน

(<https://powerplant2.wordpress.com>)

3.4.2 กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)

กังหันลมแนวแกนตั้งเป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบดังแสดงในรูปที่ 3.6 ทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง กังหันลมแบบแกนตั้งมีประสิทธิภาพในการแปลงผันพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลม ทำให้การนำกังหันลมชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้งานไม่เป็นที่นิยมมากนัก



รูปที่ 3.6 กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง

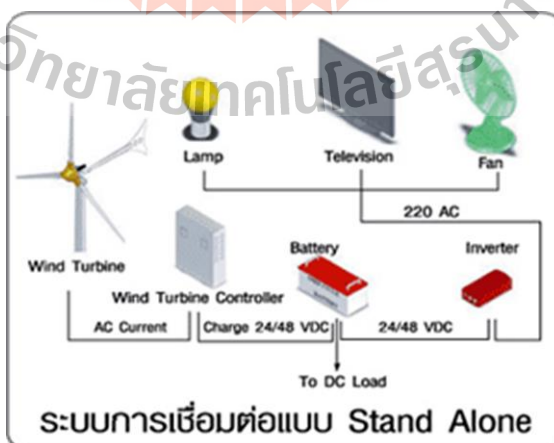
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Darrieus_rotor002.jpg)

3.5 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

3.5.1 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบอิสระ (Stand alone system)

ระบบแบบอิสระเป็นระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าและนำกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าได้โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.7

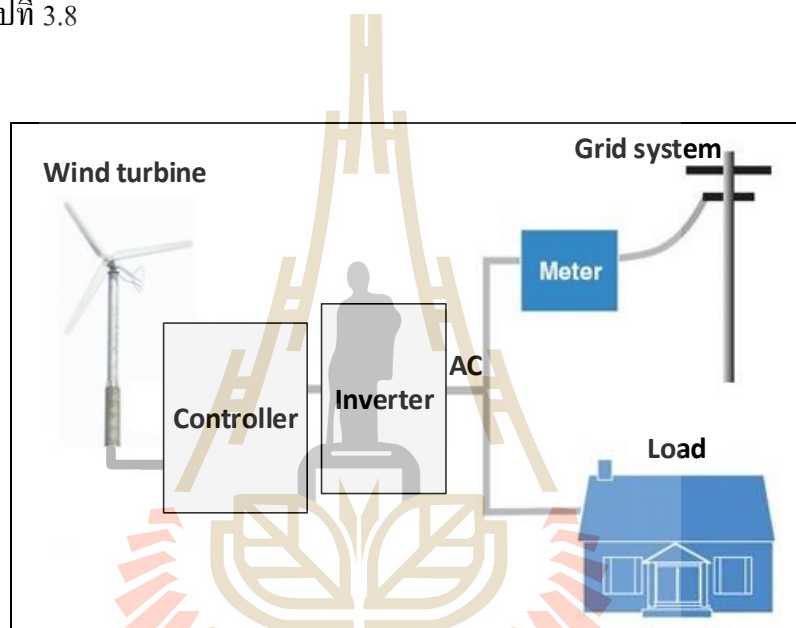


รูปที่ 3.7 ระบบการติดตั้งแบบอิสระ

(<http://www.encos.co.th/articles/details/5>)

3.5.2 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมกริด (Grid connected system)

ระบบแบบเชื่อมกริดเป็นระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า ชุดแปลงไฟฟ้า (Inverter) ของระบบนี้จะแตกต่างจากชุดแปลงไฟฟ้าทั่วไปเนื่องจากมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนและต้องสามารถเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่งได้ (Grid Tie Transfer) ขณะเดียวกันยังต้องมีการทำงานที่สัมพันธ์กับระบบควบคุมการทำงานของกังหันลม (Wind Turbine Controller) เพื่อควบคุมแรงดันหรือความถี่ทางไฟฟ้าให้เหมาะสมและสามารถป้อนกระแสไฟฟ้าขนานไปกับไฟฟ้าจากสายส่งหลักได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมที่ความเร็วลมต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อกริด

3.6 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น (DC motor) แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 ประกอบด้วยวงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ของวงจรสมมูลด้านวงจรอาร์เมเจอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.9)

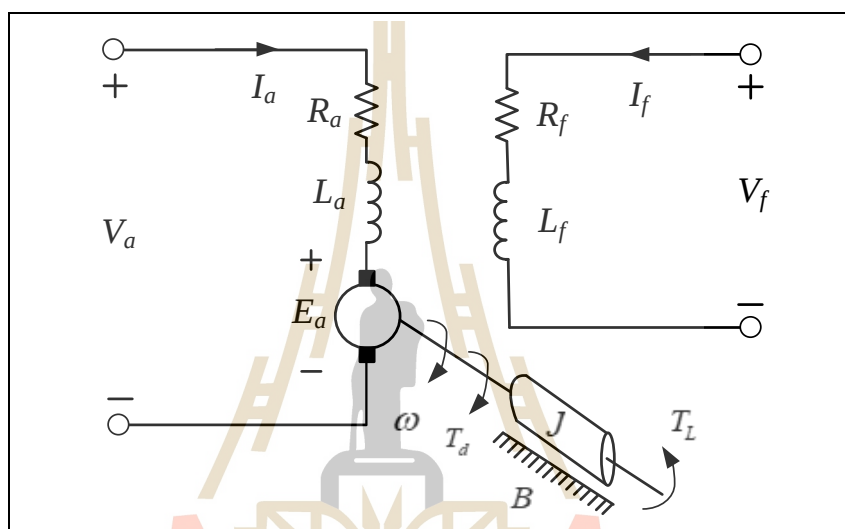
$$V_a = E_a + I_a R_a \quad (3.9)$$

โดยที่ $E_a = K\phi\omega \quad (3.10)$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ประจำตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้า
 ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก

สำหรับแรงบิดที่ถูกเหนี่ยวนำ แสดงได้ดังสมการที่ (3.11)

$$T_{ind} = K\phi I_a \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

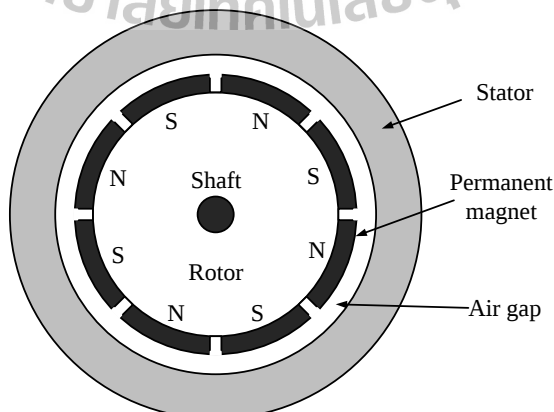
เมื่อ	V_a	คือ	แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์ (V)
	V_f	คือ	แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรสนาม (V)
	i_a	คือ	กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
	i_f	คือ	กระแสสนาม (A)
	L_a	คือ	ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)
	L_f	คือ	ความเหนี่ยวนำทางด้านสนาม (H)
	R_a	คือ	ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)
	R_f	คือ	ความต้านทานสนาม (Ω)
	ω	คือ	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
	J	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ ($kg.m^2$)
	B	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด ($N.m/rad$)

E_a	คือ	แรงดันย้อนกลับ (V)
T_L	คือ	แรงบิดของโหลด (N.m)
T_d	คือ	แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (N.m)

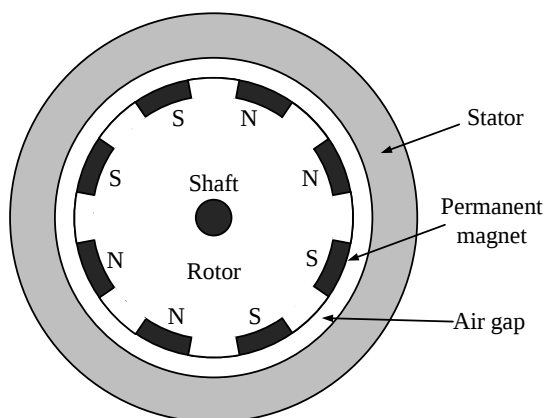
จากสมการที่ (3.11) สังเกตได้ว่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะขึ้นอยู่กับกระแสอาร์เมเจอร์ ดังนั้น เครื่องจำลองกังหันลมสามารถทำได้ด้วยการควบคุมกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์ การสร้างเครื่องจำลองกังหันลม และผลการทดสอบจะได้อธิบายในบทที่ 4 ต่อไป

3.7 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet synchronous generator: PMSG) มีโครงสร้างลักษณะเดียวกันกับมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแตกต่างกันตรงที่ส่วนของโรเตอร์จะใช้เป็นตัวแม่เหล็กถาวรแทนขดลวดเหนี่ยวนำ การจัดเรียงแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์มี 2 รูปแบบ คือ แบบที่แม่เหล็กถาวรติดตั้งบนผิวโรเตอร์ (surface permanent magnet synchronous motor: SPMSM) และแบบที่แม่เหล็กถาวรติดตั้งภายในโรเตอร์ (interior permanent magnet synchronous motor: IPMSM) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 ตามลำดับ ฟลักซ์แม่เหล็กภายในโรเตอร์ของ PMSG สร้างขึ้นด้วยแม่เหล็กถาวร ด้วยเหตุนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จึงไม่มีแปรงถ่าน เพราะไม่มีขดลวดในโรเตอร์ ความหนาแน่นพลังงานสูง สามารถลดขนาดและน้ำหนักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ รวมถึงไม่มีกำลังงานสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ ความร้อนจากความร้อนบนโรเตอร์ลดลง การบำรุงรักษาค่า (Bin Wu et al. 2011)



รูปที่ 3.10 การจัดเรียงแม่เหล็กถาวรบนผิวโรเตอร์ของ PMSG (ประกอบด้วย 8 ขั้ว)



รูปที่ 3.11 การจัดเรียงแม่เหล็กถาวรภายในโรเตอร์ของ PMSG (ประกอบด้วย 4 ขั้ว)

แบบจำลองพลวัตของ PMSG พิจารณาด้วยการแปลงดีคิวบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส โดยแกนคิว (q -axis) นำหน้าและทำมุม 90° กับแกนดี (d -axis) พิจารณามุมหมุนที่โรเตอร์ สมการอนุพันธ์แบบจำลองของ PMSG แสดงได้ดังนี้

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{R_s i_{ds}}{L_d} + \omega_r \frac{L_q}{L_d} i_{qs} - \frac{V_{ds}}{L_d} \quad (3.12)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{R_s i_{qs}}{L_q} - \omega_r \frac{L_d}{L_q} i_{qs} + \omega_r \lambda_{PM} - \frac{V_{qs}}{L_q} \quad (3.13)$$

เมื่อ i_{ds}, i_{qs} คือ กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์บนแกนดีคิว

V_{ds}, V_{qs} คือ แรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์บนแกนดีคิว

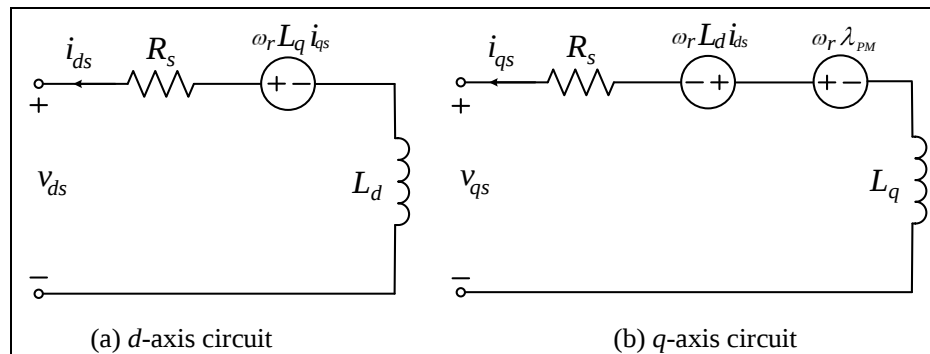
R_s คือ ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

L_d, L_q คือ ตัวเหนี่ยวนำบนแกนดีคิว

ω_r คือ ความเร็วรอบเชิงมุมโรเตอร์

λ_{PM} คือ ฟลักซ์คิ่งคู่ของแม่เหล็กถาวร

จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) สามารถแสดงวงจรมูลอย่างง่ายของแบบจำลอง PMSG ได้ดังรูปที่ 3.12 กระแสสเตเตอร์บนแกนดี i_{ds} และแกนคิว i_{qs} ไหลออกจากสเตเตอร์เพราะว่าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลอย่างง่ายของ PMSG

แรงบิดทางไฟฟ้า (T_e) ที่เกิดขึ้นจาก PMSG สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.14)

$$T_e = \frac{3p}{2} [\lambda_{PM} i_{qs} - (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (3.14)$$

เมื่อ p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก ความเร็วรอบโรเตอร์ที่เกิดขึ้นอธิบายได้จาก

$$\omega_r = \omega_m p \quad (3.15)$$

เมื่อ ω_m คือ ความเร็วรอบเชิงมุมทางกลและ T_m คือ แรงบิดทางกล

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m \quad (3.16)$$

ดังนั้น

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J} (T_e - T_m) \quad (3.17)$$

เมื่อ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย

สำหรับ PMSG ที่ไม่ใช่โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น $L_d = L_q = L$ ดังนั้น จึงสามารถเขียนแบบจำลองของ PMSG ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{R_s i_{ds}}{L} + \omega_r i_{qs} - \frac{V_{ds}}{L} \quad (3.18)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{R_s i_{qs}}{L} - \omega_r i_{ds} + \omega_r \lambda_{PM} - \frac{V_{qs}}{L} \quad (3.19)$$

แรงบิดทางไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับ i_{qs} ดังนี้

$$T_e = \frac{3p}{2} (\lambda_{PM} i_{qs}) \quad (3.20)$$

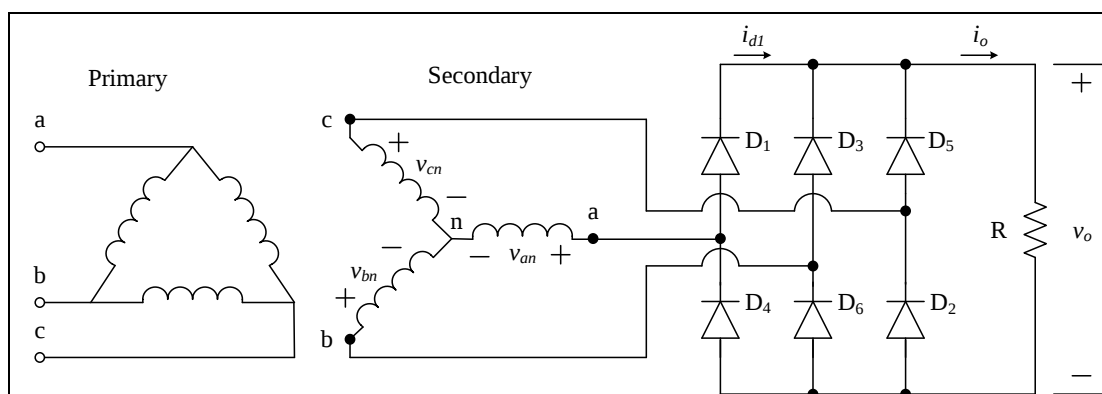
3.8 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เป็นวงจรที่ใช้เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยทั่วไปมักประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง วงจรดังกล่าวประกอบด้วยไดโอด 6 ตัวต่อแบบบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 3.13 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีแรงดันกระเพื่อม 6 พัลส์ การทำงานของไดโอดจะนำกระแสเป็นคู่ ๆ โดยแต่ละตัวจะนำกระแสตัวละ 120° ลำดับการนำกระแสของไดโอดมีดังนี้ $D_1 - D_2, D_3 - D_2, D_3 - D_4, D_5 - D_4, D_5 - D_6$ และ $D_1 - D_6$ คู่ไดโอดจะเชื่อมต่อระหว่างคู่ของแหล่งจ่ายสาย โดยแรงดันสาย (V_{L-L}) มีค่าเท่ากับ $\sqrt{3}V_m$ ของแหล่งจ่ายสามเฟสที่เชื่อมต่อแบบ Y กราฟการนำกระแสของไดโอดแสดงในรูปที่ 3.14 เมื่อ V_m คือ ค่ายอดสูงสุดของแรงดันเฟส แรงดันเฟสชั่วขณะสามารถอธิบายได้ดังนี้

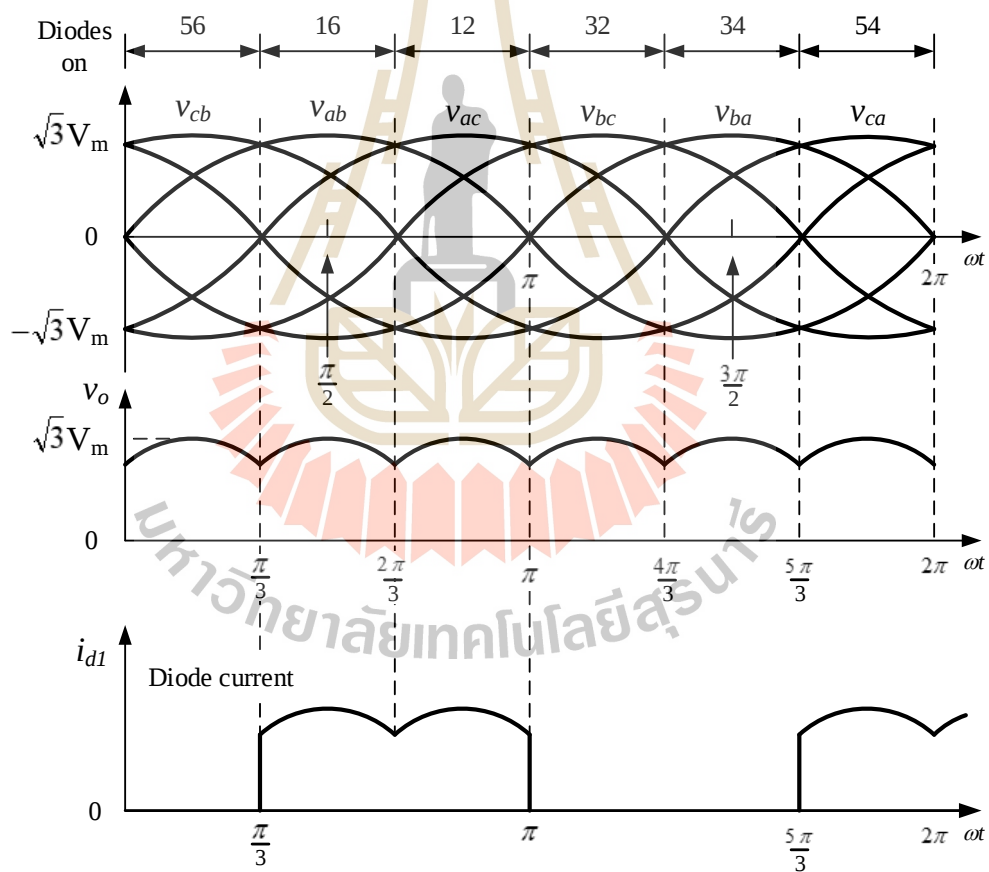
$$v_{an} = V_m \sin(\omega t) \quad (3.21)$$

$$v_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3.22)$$

$$v_{cn} = V_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.13 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์



รูปที่ 3.14 สัญญาณการทำงานในกรณีต่าง ๆ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

เนื่องจาก V_{L-L} นำแรงดันเฟส 30° ดังนั้น แรงดันสายสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$v_{ab} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (3.24)$$

$$v_{bc} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (3.25)$$

$$v_{ca} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t - 210^\circ) \quad (3.26)$$

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเฉลี่ย หาได้จาก

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654V_m \end{aligned} \quad (3.27)$$

เมื่อ V_m คือ ค่ายอดสูงสุดแรงดันเฟส แรงดันอาร์เอ็มเอส คือ

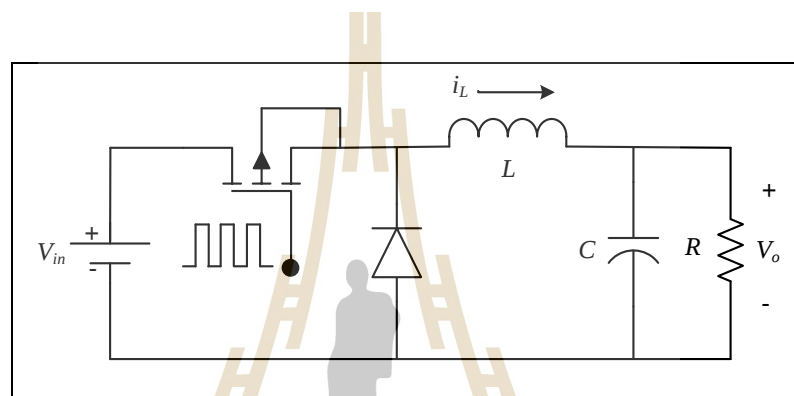
$$\begin{aligned} V_{rms} &= \left[\frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} 3V_m^2 \cos^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} \\ &= \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} \right)^{1/2} V_m = 1.6554V_m \end{aligned} \quad (3.28)$$

ถ้าโหลดเป็นตัวต้านทาน ค่ายอดสูงสุดของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด คือ $I_m = \sqrt{3}V_m/R$ และปริมาณกระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านไดโอด คือ

$$\begin{aligned} I_r &= \left[\frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m^2 \cos^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} \\ &= I_m \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{6} \right) \right]^{1/2} \\ &= 0.5518I_m \end{aligned} \quad (3.29)$$

3.9 วงจรลดทอนระดับแรงดัน

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ วงจรลดทอนระดับแรงดัน (buck converter) เพราะว่าแรงดันไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเมื่อผ่าน วงจรเรียงกระแสจะมีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากกว่าแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ วงจรนี้สามารถ ลดทอนระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้มีค่าต่ำกว่าหรือมีค่าเท่ากับแรงดันทางด้านอินพุต โดย โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ประกอบด้วยสวิตช์ โดยในงานวิจัย วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้มอสเฟต (mosfet) ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.15 วงจรลดทอนระดับแรงดัน

จากวงจรในรูปที่ 3.15 สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตของ วงจรลดทอนระดับแรงดัน V_{out} ได้จากสมการที่ (3.30)

$$V_{out} = dV_{in} \quad (3.30)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตของวงจรลดทอนระดับแรงดัน

d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของวงจรลดทอนระดับแรงดัน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรลดทอนระดับแรงดันควบคุมการทำงานของระบบกังหัน ลมผลิตไฟฟ้า โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อให้จุดทำงานของระบบให้เข้าสู่ค่า หน้าที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดตามสภาพความเร็วลมต่าง ๆ

3.10 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (battery) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงาน และจ่ายพลังงานให้กับโหลดในกรณีที่ไม่มีพลังงานจากกังหันลม แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) ที่ประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบพร้อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) แบตเตอรี่อาจประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์ หรือมากกว่าก็ได้ แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บไฟฟ้าเท่านั้น ไม่ได้ผลิตไฟฟ้าสามารถประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ (recharge) ได้หลายครั้งและประสิทธิภาพจะไม่เต็ม 100% จะอยู่ที่ประมาณ 80% เพราะมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปในรูปความร้อนและปฏิกิริยาเคมีจากการประจุและการจ่ายประจุ แบตเตอรี่จัดเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และเสียหายได้ง่าย หากดูแลรักษาไม่ดีเพียงพอหรือใช้งานผิดวิธี อายุการใช้งานของแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป เนื่องด้วยวิธีการใช้ การบำรุงรักษา การประจุ และอุณหภูมิ เป็นต้น (ปทุมพร วงศ์ใหญ่, 2558)

แบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระมากที่สุดคือ แบตเตอรี่แบบจ่ายประจุสูง (deep discharge battery) เพราะถูกออกแบบให้สามารถจ่ายพลังงานปริมาณมากหรือน้อยได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานๆ โดยไม่เกิดความเสียหาย และสามารถใช้ไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่องถึง 80% โดยแบตเตอรี่ไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งต่างจากแบตเตอรี่รถยนต์ที่ถูกออกแบบให้จ่ายพลังงานสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ถ้าใช้ไฟฟ้ามากกว่า 20-30% ของพลังงานที่เก็บอยู่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงได้

ความจุของแบตเตอรี่ในการประจุพลังงานมีหน่วยเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-Hour หรือ Ah) พลังงานในแบตเตอรี่ 12 V 100 Ah เท่ากับ $12\text{V} \times 100\text{Ah}$ ถ้าแบตเตอรี่ 100 Ah เท่ากับว่า แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายกระแส 1 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 100 ชั่วโมง หรือ แบตเตอรี่จ่ายกระแส 10 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง หรือ ถ้าแบตเตอรี่จ่ายกระแส 5 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งทั้งหมดนี้จ่าย กระแสเท่ากับ 100 Ah เป็นต้น จะเห็นได้ว่า แบตเตอรี่ที่มีความจุเท่ากันอาจมีความเร็วในการจ่ายกระแสต่างกันได้ ดังนั้น การจะทราบความจุของแบตเตอรี่ต้องทราบถึงอัตราการจ่ายกระแส ซึ่งมักจะกำหนดเป็นจำนวนชั่วโมงของการจ่ายกระแสเต็มที่ การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น ขึ้นอยู่กับความจุของแบตเตอรี่ในการจัดเก็บพลังงาน อัตราการจ่ายประจุสูงสุด อัตราการประจุสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดที่จะนำแบตเตอรี่ไปใช้งาน

การออกแบบแบตเตอรี่สามารถคำนวณ ขนาดกระแสต่อชั่วโมง (Ah) ของแบตเตอรี่ได้จากสมการที่ (3.31)

$$Ah = \frac{Demandload}{V_{battery} \times DOD \times Batteryloss} \quad (3.31)$$

โดยที่ *Demandload* คือ ความต้องการในการใช้โหลดต่อชั่วโมง (*Wh*)

DOD คือ deep of discharge หรือ ค่าความลึกของการคายประจุโดยแบตเตอรี่แต่ละยี่ห้อมีค่าไม่เท่ากัน อยู่ระหว่าง 45%-60%

Batteryloss คือ ค่าสูญเสียในแบตเตอรี่ โดยปกติแล้วแบตเตอรี่จะทำงานด้วยเซฟตี้แฟกเตอร์ (safety factor) ที่มีไว้เพื่อป้องกันการชาร์จมากเกินไป (over charge) และการคายประจุมากเกินไป (over discharge)

โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่ ขนาด 12V หากจ่ายโหลดที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 40 W/hr ค่าความลึกของการคายประจุ 60% และค่าสูญเสียในแบตเตอรี่ 85% ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$Ah = \frac{40W}{12V \times 0.6 \times 0.85} = 6.536 \quad (3.32)$$

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

3.11 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับระบบแปลงผันพลังงานลมที่ประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้า ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดของระบบแปลงผันพลังงานลม หลักการทำงานและแบบจำลองของกังหันลม ชนิดของกังหันลม การติดตั้งของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า รวมถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ วงจรลดทอนระดับแรงดัน รวมถึงแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม การทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวถือเป็นสิ่งสำคัญต่อการหาแนวทางการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ในบทต่อไปจะกล่าวถึงเรื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

บทที่ 4

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

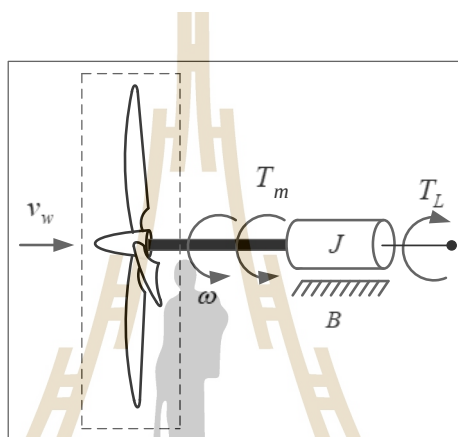
4.1 บทนำ

เครื่องจำลองกังหันลมมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า เนื่องจากการทดสอบกับกังหันลมจริงมีความคล่องตัวน้อย ไม่สามารถกำหนดความเร็วลมที่ต้องการทดสอบได้ เครื่องจำลองกังหันลมไม่สามารถเพียงแต่ลอกเลียนแบบพฤติกรรมและคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมได้ ยังสามารถจำลองคุณลักษณะกังหันลมที่มีความแตกต่างกันได้อีกด้วย จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ทดสอบและพัฒนาาระบบควบคุมของกังหันลมผลิตไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ดังนั้น ในบทนี้จึงเป็นการนำเสนอเครื่องจำลองกังหันลมโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพราะว่ามีโครงสร้างและการควบคุมที่เรียบง่ายกว่าเมื่อเทียบกับการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รายละเอียดของโครงสร้างและระบบควบคุมได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2 การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบระบบควบคุมเครื่องจำลองกังหันลมได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3 โครงสร้างชุดทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.4 และผลการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของเครื่องจำลองกังหันลมได้ถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4.5

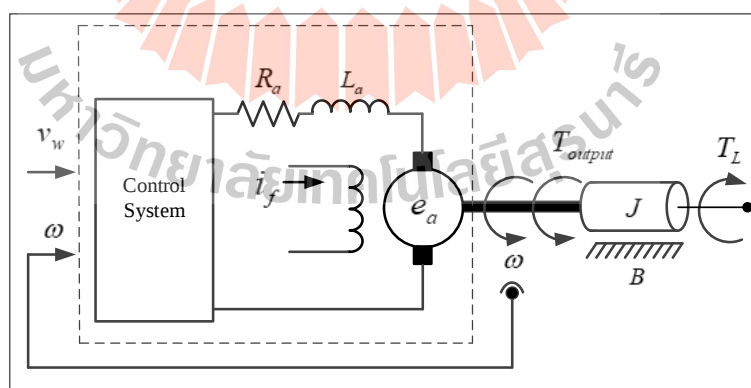
4.2 โครงสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบกังหันลมที่แปลงผันพลังงานลมเป็นพลังงานกล แสดงดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยใบพัดของกังหันลมและเพลาคูที่เชื่อมต่อกับโหลด มีอินพุตของระบบ คือ ความเร็วลม (v_w) โมเมนต์ความเฉื่อย (J) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (B) ในกรณีที่ไม่นิยามค่ากำลังสูญเสียในการหมุนตัวเปล่า จะกล่าวได้ว่า แรงบิดของกังหันลม (T_m) มีค่าเท่ากับแรงบิดที่โหลด (T_L) ระบบดังกล่าวสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองของกังหันลมที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องจำลองกังหันลมแทนระบบกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ระบบควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีพฤติกรรมเหมือนคุณลักษณะกังหันลม โดยมีความเร็วลมที่สามารถกำหนดได้โดยผู้ใช้งานและความเร็วรอบที่วัดได้จากมอเตอร์เป็นอินพุตของระบบควบคุม เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปมักควบคุมให้แรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไปตามคุณลักษณะกังหันลม เมื่อพิจารณาแรงบิดเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์

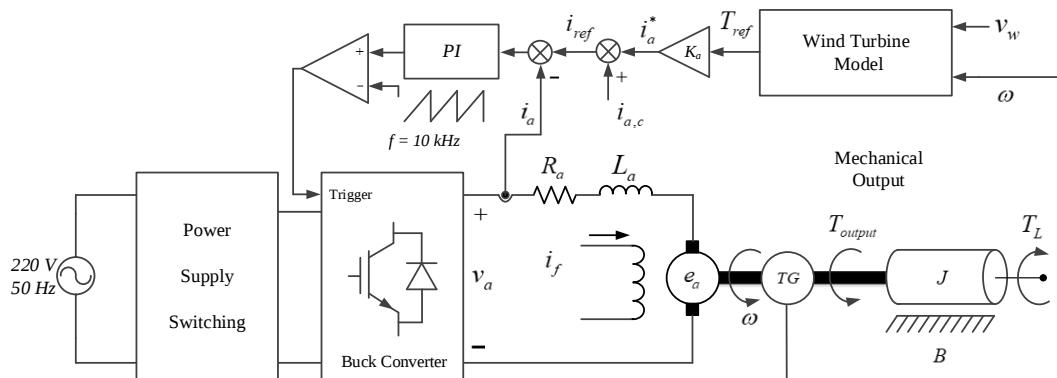
(T_{output}) พบว่ามีค่าต่ำกว่าแรงบิดของกังหันลม (T_m) ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากกำลังสูญเสียในสถานะที่มอเตอร์หมุนตัวเปล่า ทำให้ได้เพียงแค่แนวโน้มของคุณลักษณะกังหันลมเท่านั้น การควบคุมให้แรงบิดเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์ให้มีค่าเท่ากับแรงบิดกังหันลม สามารถทำได้โดยการชดเชยกำลังสูญเสียในสภาวะดังกล่าวผ่านการควบคุมกระแสอาร์เมเจอร์ให้มีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อให้แรงบิดทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้แรงบิดเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์มีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน จึงทำให้แรงบิดเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไปตามคุณลักษณะกังหันลมมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดต่าง ๆ ของเครื่องจำลองกังหันลมในรูปที่ 4.2 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ระบบกังหันลม



รูปที่ 4.2 เครื่องจำลองกังหันลม



รูปที่ 4.3 ระบบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 4.3 แสดงระบบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสวิตชิงที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต วงจรลดทอนระดับแรงดันและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเชื่อมต่อกับโหลดเบรก จากทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในบทที่ 3 แรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะแปรผันตามกระแสอาร์เมเจอร์และมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนค่าคงที่ (K_a) ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีพฤติกรรมเหมือนกับคุณลักษณะของกังหันลมได้ด้วยการปรับตั้งค่ากระแสอาร์เมเจอร์ จากรูปที่ 4.3 สัญญาณแรงบิดอ้างอิง (T_{ref}) ซึ่งในที่นี้หมายถึงค่าแรงบิดของกังหันลม (T_m) สามารถคำนวณผ่านบล็อกแบบจำลองของกังหันลม (Wind Turbine Model) โดยมีค่าความเร็วลม (v_w) และความเร็วรอบของมอเตอร์ (ω) ที่วัดจากตัววัดความเร็วรอบ (Tachogenerator: TG) เป็นอินพุต จากนั้นปรับคูณค่าแรงบิดอ้างอิง (T_{ref}) ด้วยสัมประสิทธิ์ (K_a) จะได้ค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง (i_a^*) และนำค่ากระแสชดเชย ($i_{a,c}$) ซึ่งเป็นกระแสอาร์เมเจอร์ในสถานะที่มอเตอร์หมุนตัวเปล่ามารวมกัน จึงได้เป็นค่ากระแสอ้างอิง (i_{ref}) สำหรับการควบคุม ตัวควบคุมพีไอที่ใช้ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการปรับตั้งค่าให้เหมาะสมโดยใช้การทดสอบจนกระทั่งได้ผลตอบสนองที่ต้องการคือ สามารถควบคุมให้เครื่องจำลองกังหันลมมีการทำงานในสถานะคงตัวที่สอดคล้องกับคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมได้ สำหรับพารามิเตอร์ค่าคงที่ (K_a) และกระแสชดเชย ($i_{a,c}$) เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงจรเปิด ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 ต่อไป

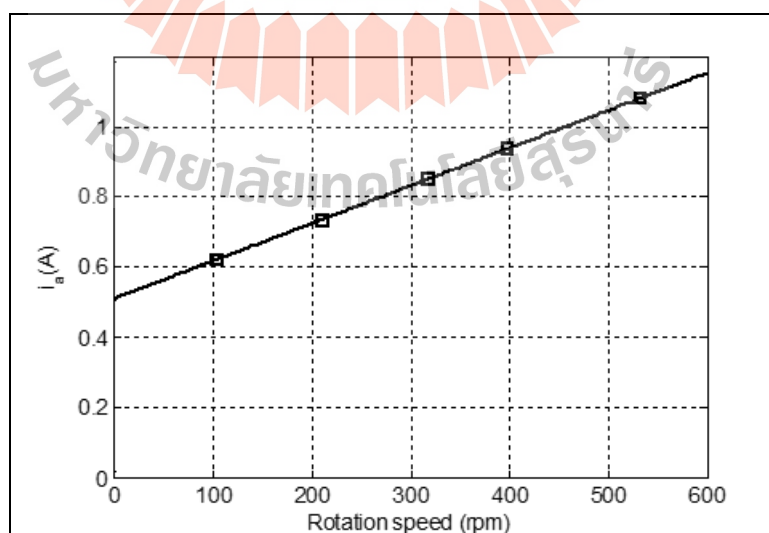
4.3 การจำลองสถานการณ์เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันความถูกต้องของเครื่องจำลองกังหันลมที่นำเสนอในหัวข้อนี้ ดำเนินการโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SIMULINK ใน MATLAB ซึ่งมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีดังนี้ รัศมีกังหันลม $R = 1.98$ เมตร $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ $V_s = 220 \text{ V}$ 50 Hz มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 HP 240 V 1750 rpm $V_f = 300 \text{ V}$ โดยเชื่อมต่อกับกล่องเกียร์อัตราส่วน $3.5:1$ เพื่อให้ความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยังคงอยู่ภายใต้คุณลักษณะของกังหันลม ตัวควบคุมพีไอ $K_p = 1$ และ $K_I = 5$ สำหรับการทดสอบหากระแสชดเชย $i_{a,c}$ และ ค่าคงที่ K_a มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทดสอบหาค่า $i_{a,c}$

กระแสอาร์เมเจอร์ในสถานะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนตัวเปล่าที่นำมาชดเชยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสถานะ ($i_{a,c}$) จะทำให้พลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไปตามคุณลักษณะของกังหันลมมากยิ่งขึ้น การทดสอบหาค่า $i_{a,c}$ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะไร้โหลดหรือหมุนตัวเปล่ากับกระแสอาร์เมเจอร์ในสถานะดังกล่าว โดยในรูปที่ 4.4 แสดงกราฟข้อมูลการทดสอบ 5 จุด ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันของกระแสอาร์เมเจอร์ที่ขึ้นอยู่กับความเร็วนับการที่ (4.1)

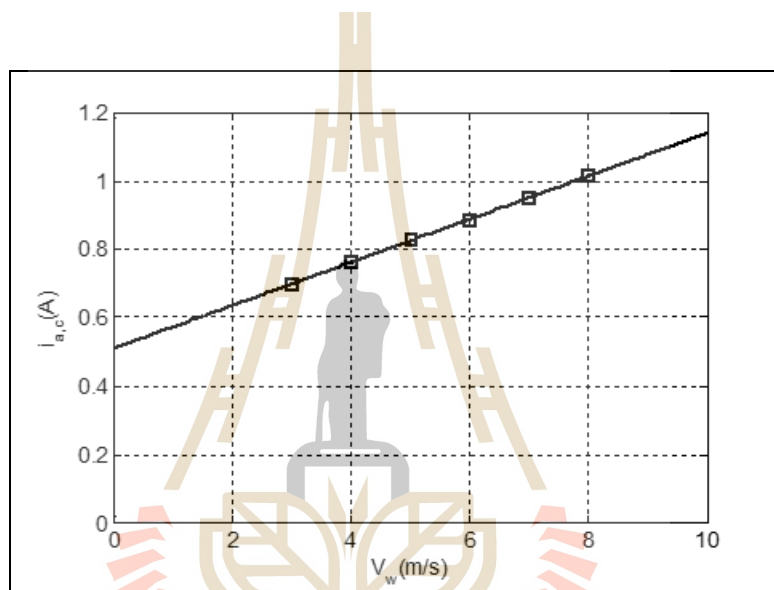
$$i_a = 0.0010709\omega + 0.51017 \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับความเร็วนับการที่ในสถานะไร้โหลด

จากกราฟคุณลักษณะพลังงานของกังหันลมในบทที่ 3 จะพบว่า ความเร็วรอบขณะไร้อโหลดของสภาพความเร็วลมต่าง ๆ มีค่าที่แตกต่างกัน เมื่อนำความเร็วรอบขณะไร้อโหลดของความเร็วลมตั้งแต่ 3 m/s ถึง 8 m/s แทนในสมการที่ (4.1) จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าขณะไร้อโหลดกับความเร็วม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และสามารถแทนได้ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของกระแสชดเชยที่ขึ้นอยู่กับความเร็วลมได้ดังสมการที่ (4.2)

$$i_{a,c} = 0.062909 v_w + 0.51014 \quad (4.2)$$

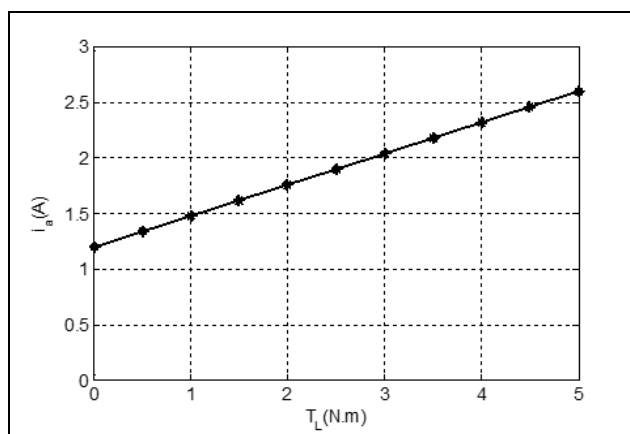


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสชดเชยกับความเร็วลม

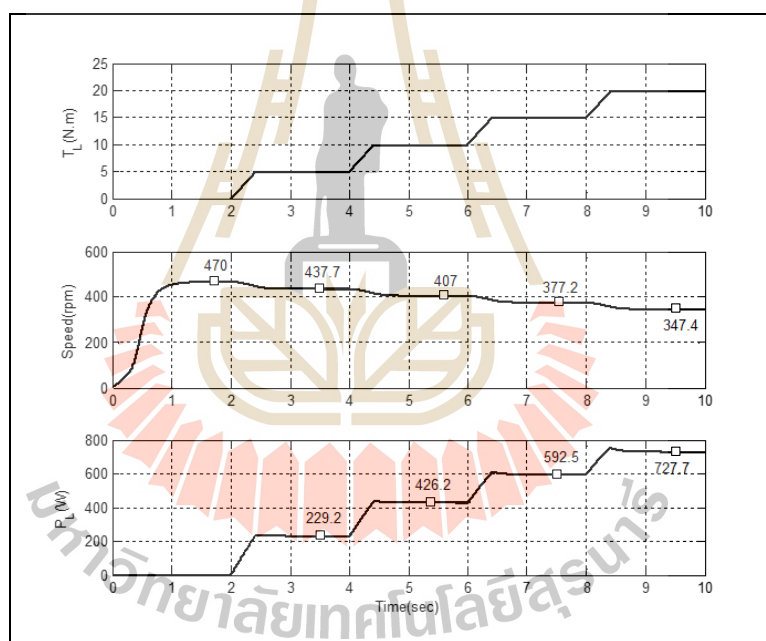
การทดสอบหาค่า K_a

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อหาค่าคงที่ K_a ในที่นี้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลด (T_L) และกระแสอาร์เมเจอร์ (i_a) โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไว้ที่พิกัดของมอเตอร์และปรับโหลดให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 N.m ถึง 5 N.m พร้อมกับบันทึกค่ากระแสอาร์เมเจอร์ เมื่อนำข้อมูลทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถแทนได้ด้วยสมการที่ (4.3) จะได้ค่า $K_a = 0.28036$ (ค่าความชันของสมการเส้นตรง)

$$i_a = 0.28036 T_L + 1.1945 \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่โหลด

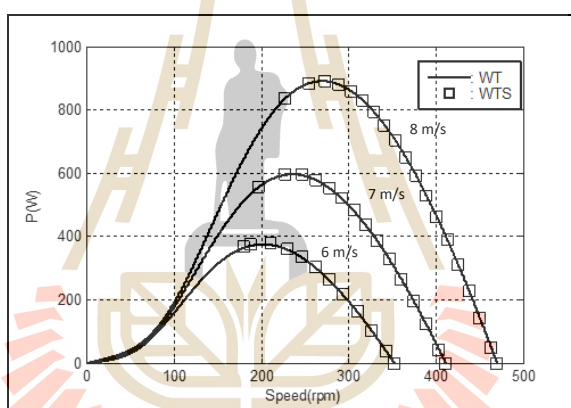


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์เครื่องจำลองกังหันลมที่สภาวะความเร็วลม 8 m/s

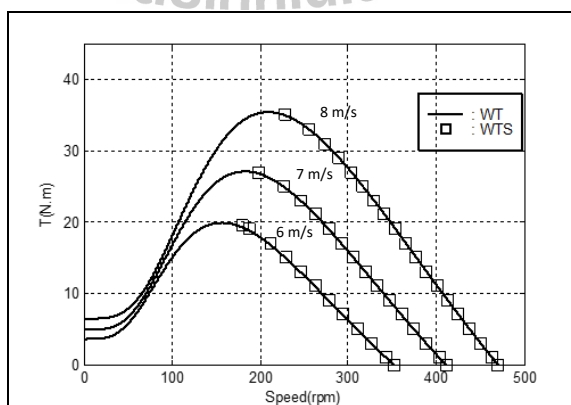
รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองสถานการณ์เครื่องจำลองกังหันลมที่สภาวะความเร็วลม 8 m/s คงที่และกำหนดให้แรงบิดที่โหลดของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ดังนี้ ที่เวลา $t = 0$ วินาที กำหนดให้ $T_L = 0$ N.m $t = 2$ วินาที $T_L = 5$ N.m $t = 4$ วินาที $T_L = 10$ N.m $t = 6$ วินาที $T_L = 15$ N.m และ $t = 9$ วินาที $T_L = 20$ N.m ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว สามารถประมาณค่าพลังงานและความเร็วรอบของมอเตอร์ในสภาวะคงตัวได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อแรงบิดที่โหลดเพิ่มขึ้น

ความเร็วรอบจะลดลงและมีกำลังที่โหลดเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ รายละเอียดการจำลองสถานการณ์เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงกราฟคุณลักษณะกังหันลม (Wind Turbine: WT) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองกังหันลมในสภาวะความเร็วลม 6 m/s 7 m/s และ 8 m/s เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของเครื่องจำลองกังหันลม (Wind Turbine Simulator: WTS) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำงานของเครื่องจำลองกังหันลมมีความสอดคล้องตามคุณลักษณะกังหันลม สาเหตุที่ไม่สามารถแสดงจุดการทำงานด้านหน้ากราฟคุณลักษณะได้ เนื่องจากจุดการทำงานของระบบขึ้นอยู่กับแรงบิดที่โหลด หากแรงบิดโหลดมากกว่าค่าแรงบิดสูงสุดของคุณลักษณะกังหันลมในความเร็วลมต่าง ๆ จะทำให้มอเตอร์มีแรงบิดไม่เพียงพอต่อการขับโหลด ส่งผลให้ความเร็วรอบลดลงอย่างต่อเนื่องและหยุดหมุนในที่สุด พฤติกรรมดังกล่าวนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกังหันลมจริง



รูปที่ 4.8 คุณลักษณะพลังงานกังหันลม

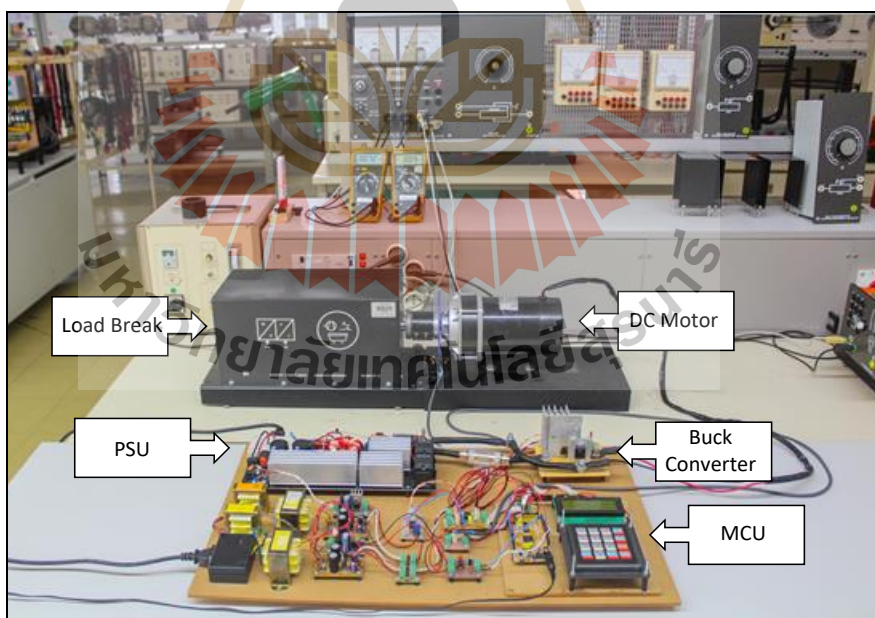


รูปที่ 4.9 คุณลักษณะแรงบิดกังหันลม

สำหรับผลกระทบเนื่องจากการป้อนโหลดเกินจนทำให้มอเตอร์หยุดหมุน จะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสัญญาณควบคุม เพราะขณะที่ความเร็วรอบ $\omega = 0$ rad/s จะทำให้ $T_{ref} = \inf$ ส่งผลให้กระแสอ้างอิง $i_{ref} = \inf$ เช่นกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์สวิตชิงของวงจรลดทอนระดับแรงดันและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้น การใช้งานเครื่องจำลองกักหน้ลมที่ได้นำเสนอ จึงไม่ควรป้อนโหลดมากเกินไปกว่าค่าแรงบิดสูงสุดของคุณลักษณะกักหน้ลมที่สามารถทำได้ ในความเร็วลมต่าง ๆ ฉะนั้น เพื่อความปลอดภัยขณะใช้งานจึงควรดำเนินการทดสอบภายใต้ 80 % ของแรงบิดสูงสุดในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ

4.4 โครงสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบเครื่องจำลองกักหน้ลม

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอ โครงสร้างชุดทดสอบเครื่องจำลองกักหน้ลม โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.10 โครงสร้างของชุดทดสอบประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสวิตชิง (power supply switching unit: PSU) วงจรลดทอนระดับแรงดันไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller unit: MCU) โหลดเบรก (load break) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้ยังมี ชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้าและ ชุดตรวจจับความเร็วรอบ



รูปที่ 4.10 ชุดทดสอบเครื่องจำลองกักหน้ลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.4.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

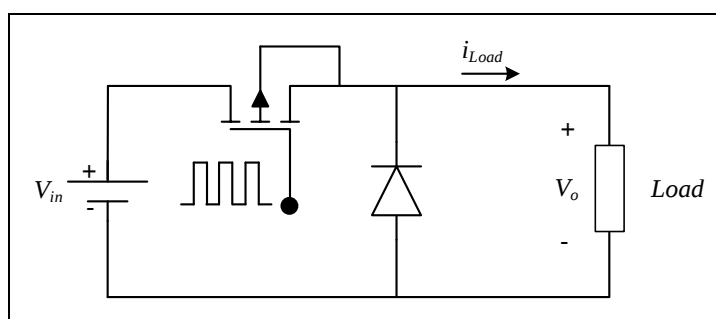
เครื่องจำลองกันหันลมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรขนาดพิกัด 24 V 40 A 900 W มาประยุกต์ใช้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไม่น้อยกว่าพิกัดดังกล่าว ด้วยเหตุนี้ จึงเลือกใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสวิตซิงขนาดพิกัด 24 V 1200 W ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสวิตซิง

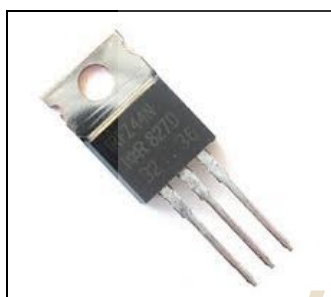
4.4.2 วงจรลดทอนระดับแรงดัน

การสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V 900 W สำหรับใช้เป็นเครื่องจำลองกันหันลม จำเป็นต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจรให้มีความเหมาะสม โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้ประกอบด้วยตัวสวิตช์และไดโอด แสดงดังรูปที่ 4.12

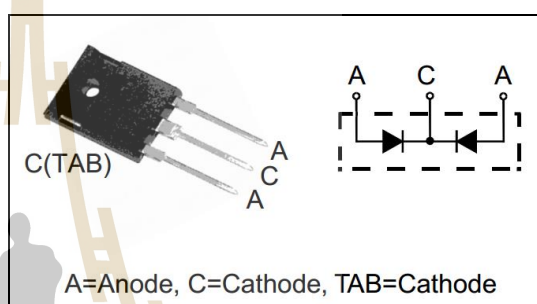


รูปที่ 4.12 วงจรลดทอนระดับแรงดัน

โครงสร้างวงจรแปลงผันลดทอนระดับแรงดันในที่นี้ไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เนื่องจากต้องการลดผลกระทบในสภาวะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันลดทอนแรงดันที่อาจทำให้อุปกรณ์สวิตชิงเสียหายได้ ดังนั้น อุปกรณ์ที่ใช้งานจึงมีเพียงอุปกรณ์สวิตชิงและไดโอด เท่านั้น การออกแบบอุปกรณ์ทั้งสองจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็นสำคัญ โดยพิจารณาจากค่าพิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของโหลด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24 V 40 A ดังนั้น จึงเลือกใช้ อุปกรณ์สวิตชิงมอสเฟตพิกัด 49 A 55 V และไดโอดแบบคอมมอนแคโทด 60 A 50 V ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ วงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้งานจริงแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 มอสเฟต



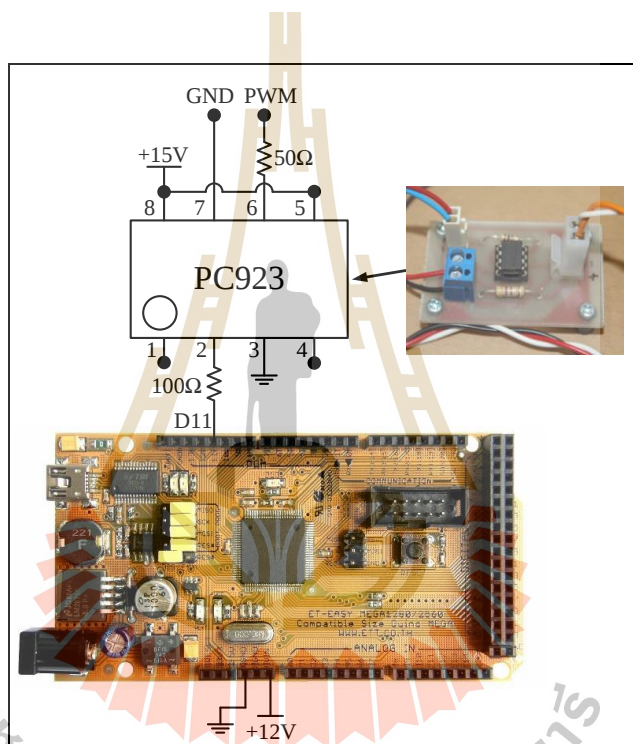
รูปที่ 4.14 ไดโอดแบบคอมมอนแคโทด



รูปที่ 4.15 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้งานจริง

4.4.3 วงจรจุดชนวนเกท

การสร้างวงจรจุดชนวนเกทสำหรับควบคุมการสวิตช์มอสเฟตของวงจรลดทอนระดับแรงดันและแยกกราวด์ในส่วนของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กับส่วนวงจรไฟฟ้ากำลัง ซึ่งหมายถึงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรลดทอนระดับแรงดัน เพื่อไม่ให้กราวด์ไฟฟ้าแรงต่ำและไฟฟ้าแรงสูงเชื่อมถึงกัน ป้องกันอันตรายต่อวงจรไฟฟ้าในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ วงจรจุดชนวนเกทที่ใช้ คือ ไอซีเบอร์ PC923 ของบริษัท SHARP การต่อวงจรร่วมกันระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรจุดชนวนเกทแสดงในรูปที่ 4.16 ดังนี้



รูปที่ 4.16 วงจรจุดชนวนเกทเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4.4 การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

การควบคุมเครื่องจำลองกังหันลมในรูปที่ 4.10 ใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 สำหรับคำนวณประมวลผลและสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ควบคุม โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอโดยทั่วไปจะการทำงานแบบต่อเนื่อง ซึ่งการนำตัวควบคุมพีไอมาใช้งานผ่านชุดไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องเปลี่ยนสมการของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปแบบของการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

AVR จะอาศัยพื้นฐานมาจากการนำตัวควบคุมแบบสัดส่วนและการควบคุมแบบอินทิกรัล ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.4)

$$V_{out} = K_P V_{error} + K_i \int V_{error} dt \quad (4.4)$$

โดยที่	V_{out}	คือ	สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ
	V_{error}	คือ	สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน
	K_P	คือ	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
	K_i	คือ	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

จากสมการที่ (4.4) เป็นสมการตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาต่อเนื่องสามารถนำมาสร้างสมการใหม่ได้ โดยทำให้อยู่ในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง เพื่อใช้สำหรับเขียนโปรแกรมสร้างตัวควบคุมด้วยชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR โดยเริ่มจาก

ขั้นที่ 1 หาสมการอนุพันธ์ของสมการที่ (4.4) เพื่อกำจัดอินทิกรัล สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.5) ดังนี้

$$\frac{dV_{out}}{dt} = K_P \frac{dV_{error}}{dt} + K_i V_{error} \quad (4.5)$$

ขั้นที่ 2 กำหนดให้ $dt = T_i$ เมื่อ T_i คือ เวลาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง (sampling time) และเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบของผลต่างจะได้ดังสมการที่ 4.6 ดังนี้

$$\frac{\Delta V_{out}}{T_i} = K_P \frac{\Delta V_{error}}{T_i} + K_i V_{error} \quad (4.6)$$

ขั้นที่ 3 กำหนดให้ผลต่างของสัญญาณเอาต์พุต (ΔV_{out}) มีค่าเท่ากับ $V_{out(i)} - V_{out(i-1)}$ และผลต่างสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน (ΔV_{error}) มีค่าเท่ากับ $V_{error(i)} - V_{error(i-1)}$ แทนลงในสมการที่ (4.6) จะได้สมการ ดังนี้

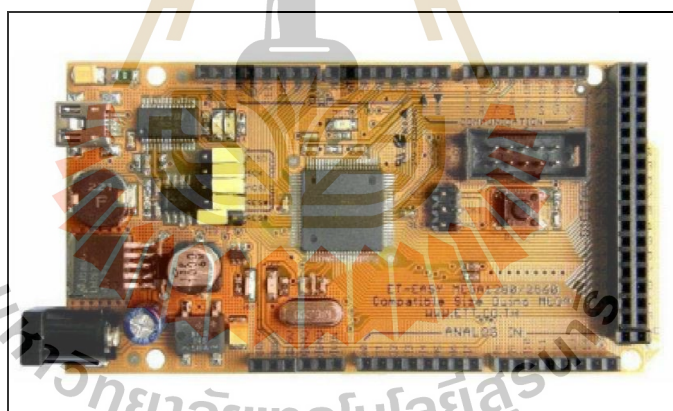
$$\left(\frac{V_{out(i)} - V_{out(i-1)}}{T_i} \right) = K_P \left(\frac{V_{error(i)} - V_{error(i-1)}}{T_i} \right) + K_i V_{error(i)} \quad (4.7)$$

โดยที่ $V_{out(i)}$ คือ สัญญาณเอาต์พุตในรอบปัจจุบัน
 $V_{out(i-1)}$ คือ สัญญาณเอาต์พุตในอดีต
 $V_{error(i)}$ คือ สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนในรอบปัจจุบัน
 $V_{error(i-1)}$ คือ สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนในอดีต

จากนั้น คูณ T_i ทั้งสองข้างของสมการที่ (4.7) จะได้สมการตัวควบคุมพีไอในรูปแบบช่วงเวลาไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ (4.8)

$$V_{out(i)} = V_{out(i-1)} + K_P (V_{error(i)} - V_{error(i-1)}) + K_i T_i V_{error(i)} \quad (4.8)$$

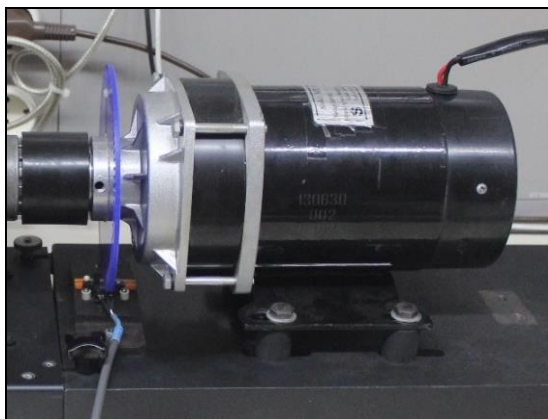
จากสมการที่ (4.8) เป็นสมการที่สามารถนำไปเขียนโปรแกรมด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 1280

4.4.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

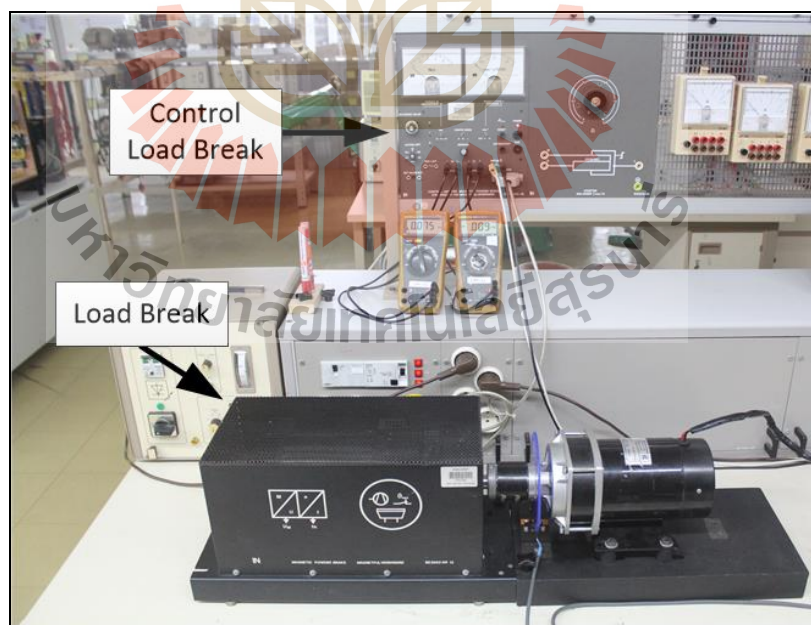
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องจำลองกังหันลมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรมีลักษณะดังรูปที่ 4.18 สำหรับรายละเอียดต่าง ๆ มีดังนี้ แรงดันไฟฟ้า 24 V กระแส 40 A 900 W 3000 rpm และมีอัตราส่วนกล่องเกียร์ 6:1 ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบเอาต์พุต 500 rpm



รูปที่ 4.18 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร

4.4.6 โหลดเบรก

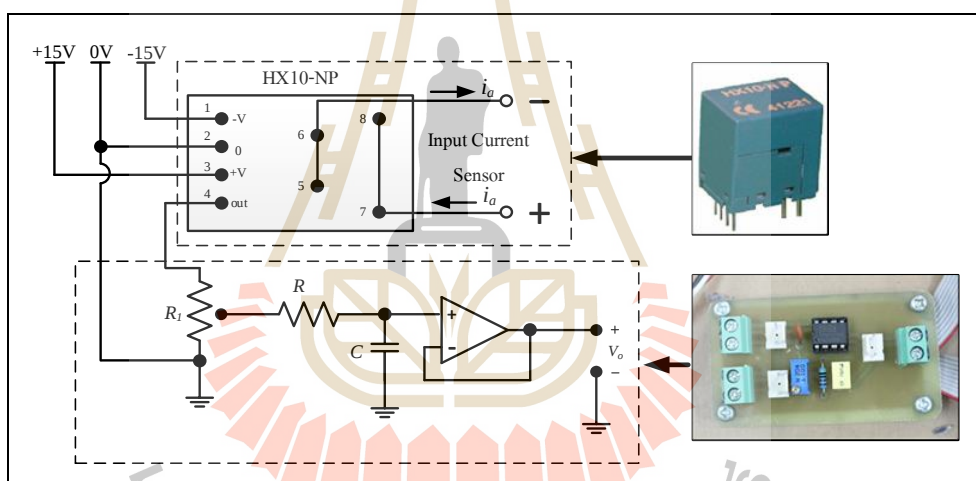
โหลดเบรกทำหน้าที่เป็นโหลดที่ต้านการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องจำลองกั้นหันลม ประกอบด้วยชุดควบคุมโหลดเบรกและตัวโหลดเบรกมีพิคัดสูงสุด 25 N.m ลักษณะโหลดเบรกที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 โหลดเบรกและชุดควบคุมความควบคุมโหลดเบรก

4.4.7 ชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้า

การตรวจจ็กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรอาร์เมเจอร์อาศัยชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ตัวตรวจจ็กระแสไฟฟ้าเบอร์ HX10 – NP พิกัด 60 A วงจรแบ่งแรงดันและวงจรกรองสัญญาณ วงจรแบ่งแรงดันในที่นี้ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ $R_1 = 200k\Omega$ เพื่อปรับระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจ็กระแสไฟฟ้าให้อยู่ในย่านที่ใช้งาน สำหรับวงจรกรองสัญญาณที่ใช้คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ยังมีวงจรกันชนที่ช่วยป้องกันการลทอนของสัญญาณที่เชื่อมเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การออกแบบวงจรกรองสัญญาณดังกล่าวต้องการให้มีค่าความถี่ตัดต่ำสุดต่ำกว่า 50 Hz ดังนั้น พารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณที่เลือกใช้คือ ตัวความต้านทาน $R = 5k\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C = 1\mu F$ จำนวนความถี่ตัดต่ำสุดได้เท่ากับ 31.83 Hz โครงสร้างชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้า

การนำชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้าไปใช้งานจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการที่ใช้แทนความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยเหตุนี้ จึงดำเนินการทดสอบ โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรอาร์เมเจอร์ด้วยการปรับค่าโวลต์ของมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มขึ้นและบันทึกแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดตรวจจ็กระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า

แรงบิดที่โหลด (N.m)	กระแสอาร์เมเจอร์ (A)	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า (V)
0.605	2.98	0.376
1.0	4.08	0.501
1.5	5.32	0.654
2.0	6.58	0.789
2.5	8.01	0.940
3.0	9.29	1.08
3.5	10.6	1.223
4.0	12.07	1.39
4.5	13.55	1.574
5.0	14.74	1.695
5.5	16.22	1.851
6.0	17.62	2.02

4.4.8 ชุดตรวจจับความเร็วรอบ

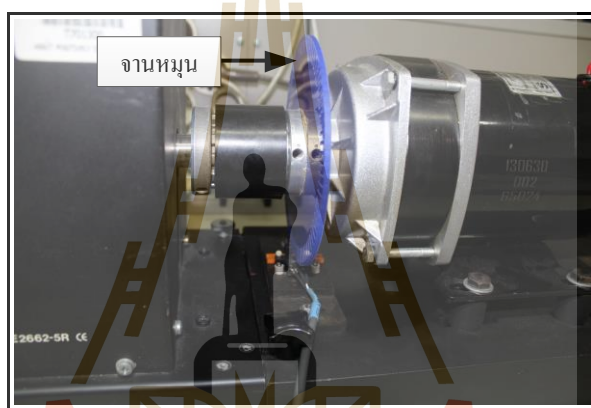
หลักการทำงานของชุดตรวจจับความเร็วรอบของเครื่องจำลองกังหันมีแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4.21 ประกอบด้วย จานหมุน เอ็นโคเดอร์ และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 4.21 แผนภาพชุดตรวจจับความเร็วรอบ

จานหมุน

จานหมุนเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้สำหรับการบ่งบอกความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า จานหมุนติดตั้งอยู่กับเพลลาของมอเตอร์ ฉะนั้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จึงเป็นความเร็วรอบเดียวกันกับความเร็วรอบของจานหมุน ตัวจานหมุนถูกทำให้มีช่องเพื่อให้เอ็น โคดเดอร์ตรวจจับและสร้างสัญญาณพัลส์ออกมา ความถี่ของสัญญาณพัลส์ขึ้นอยู่กับจำนวนช่องที่เจาะและความเร็วรอบของจานหมุน ความกว้างของช่องที่เจาะบนจานหมุนและระยะห่างระหว่างช่องมีค่าเท่ากับ 2 mm เพื่อให้สัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอ็น โคดเดอร์มีช่วงเวลา ON และ OFF ประมาณ 50% ลักษณะจานหมุนที่ติดตั้งอยู่กับเพลลาของมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.22



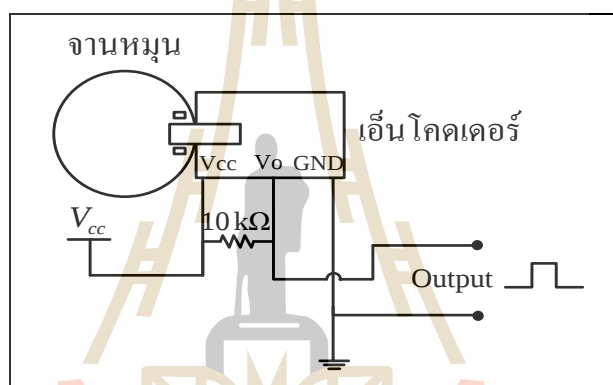
รูปที่ 4.22 การติดตั้งจานหมุน

เอ็น โคดเดอร์

เอ็น โคดเดอร์ที่ใช้ตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบเป็นทั้งตัวรับและตัวส่งสัญญาณในตัวเดียวกัน หลักการทำงานของเอ็น โคดเดอร์ คือ รับสัญญาณจากช่องของจานหมุนและสร้างสัญญาณเอาต์พุตลักษณะพัลส์ที่แปรผันตามความเร็วรอบของจานหมุน เอ็น โคดเดอร์ที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ OMRON เบอร์ EE – SE671 แสดงดังรูปที่ 4.23 ลักษณะการต่อวงจรใช้งานและการติดตั้งเอ็น โคดเดอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 เอ็น โคดเดอร์



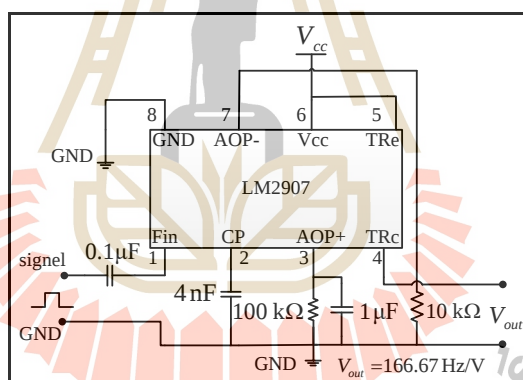
รูปที่ 4.24 การต่อวงจรใช้งานเอ็น โคดเดอร์



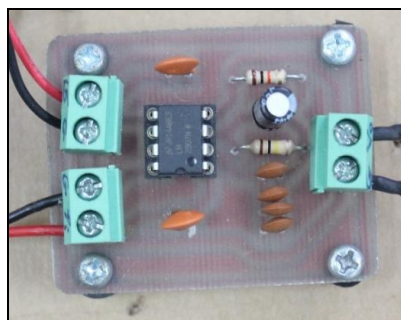
รูปที่ 4.25 การติดตั้งเอ็น โคดเดอร์

วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า

วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณความถี่ที่ได้จากเอ็นโคเดอร์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำไปประมวลผลความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า ไอซีที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ TEXAS INSTRUMENT เบอร์ LM2907 การต่อวงจรเพื่อใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 จากเอกสารข้อมูลการใช้งานของไอซีดังกล่าวได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร โดยพิจารณาให้อัตราส่วนของสัญญาณความถี่ต่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 67 Hz ต่อ 1 V แต่เนื่องจากมอเตอร์มีความเร็วรอบที่พิกัดประมาณ 500 rpm ประกอบกับจำนวนช่องที่เจาะบนจานหมุนมีจำนวน 80 ช่อง ทำให้สัญญาณพัลส์มีความถี่สูง ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 5 V ซึ่งเกินพิกัดการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยเหตุนี้ ทำให้ต้องดำเนินการออกแบบใหม่ กำหนดให้มีอัตราส่วนความถี่กับแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 166.67 Hz ต่อ 1 V จึงได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุตามรูปที่ 4.26 และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน



รูปที่ 4.27 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน

ในทำนองเดียวกันการนำชุดตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าไปใช้งานก็จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดตรวจจับความเร็วรอบ เพื่อหาสมการที่ใช้แทนความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับการใช้งาน ดังนั้น จึงดำเนินการทดสอบ โดยการปรับตั้งค่าความเร็วรอบให้มีค่าเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดตรวจจับความเร็วรอบ ดำเนินการซ้ำ 3 รอบ และคำนวณค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดตรวจจับความเร็วรอบ ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบชุดตรวจจับความเร็วรอบ

ความเร็วรอบ (rpm)	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V)			แรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตเฉลี่ย(V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
200	1.49	1.52	1.47	1.4933
250	1.858	1.831	1.845	1.8447
300	2.235	2.221	2.234	2.23
350	2.58	2.599	2.551	2.5767
400	2.959	2.972	2.945	2.9587
450	3.335	3.358	3.332	3.3417
500	3.762	3.748	3.719	3.743
550	4.2	4.17	4.14	4.17

ลำดับถัดมาจะเป็นการนำเสนอผลการทดสอบต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการควบคุมเครื่องจำลองกังหันลม ประกอบด้วยการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าแบบวงรอบเปิดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลดกับกระแสอาร์เมเจอร์ การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะไร้โหลด

4.4.9 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่โหลด

การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลดกับกระแสอาร์เมเจอร์ จะดำเนินการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงรอบเปิด เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าคงที่ K_d ที่ใช้ในการควบคุมเครื่องจำลองกังหันลม ขั้นตอนทดสอบดำเนินการปรับตั้งค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าไว้ที่ 500 rpm และ 400 rpm จากนั้นทำการปรับค่าแรงบิดที่โหลดเพิ่มขึ้นและบันทึกค่ากระแสอาร์เมเจอร์ ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

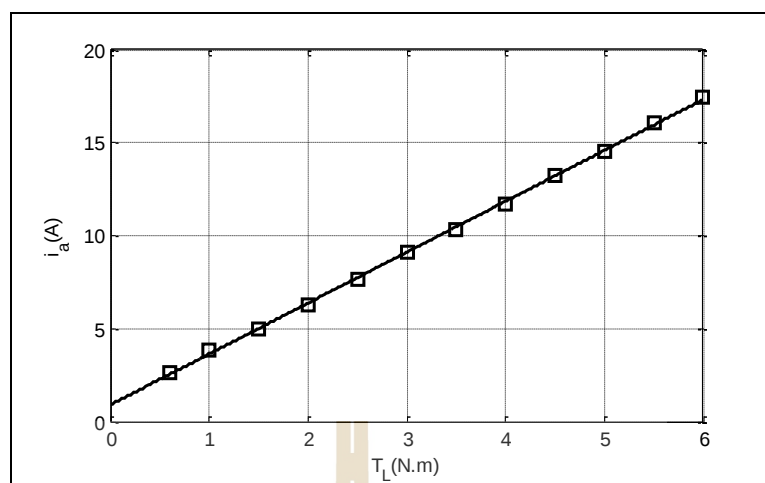
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบระหว่างแรงบิดที่โหลดกับกระแสอาร์เมเจอร์

แรงบิดที่โหลด (N.m)	กระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็ว ตั้งต้น 400 rpm	กระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็ว ตั้งต้น 500 rpm
0.605	2.66	2.98
1.0	3.84	4.08
1.5	4.99	5.32
2.0	6.24	6.58
2.5	7.63	8.01
3.0	9.08	9.29
3.5	10.36	10.6
4.0	11.74	12.07
4.5	13.21	13.55
5.0	14.56	14.74
5.5	16.09	16.22
6.0	17.43	17.62

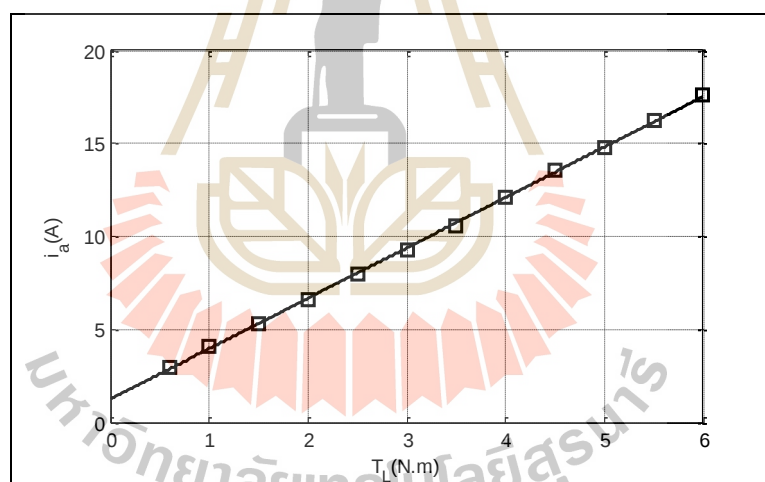
จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.3 สามารถนำมาสร้างกราฟสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลดกับกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบตั้งต้น 400 rpm ได้ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งสามารถแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ด้วยสมการที่ (4.9) ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์กระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วตั้งต้น 500 rpm กับแรงบิดที่โหลด ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการที่ (4.10) จากทั้งสองสมการจะเห็นได้ว่าค่าความชันมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น จึงได้ค่าสัดส่วนคงที่ระหว่างแรงบิดที่โหลดกับกระแสอาร์เมเจอร์ หรือ ค่าคงที่ K_a โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความชันในสมการที่ (4.9) และ (4.10) จะได้ค่าคงที่ $K_a = 2.7242$ สำหรับการควบคุมเครื่องจำลองกังหันลมต่อไป

$$i_{a,400rpm} = 2.7369T_L + 0.90034 \quad (4.9)$$

$$i_{a,500rpm} = 2.7115T_L + 1.2521 \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่โหลด
ที่ความเร็วรอบตั้งต้น 400 rpm



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่โหลด
ที่ความเร็วรอบตั้งต้น 500 rpm

4.4.10 การทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับ กระแสอาร์เมเจอร์

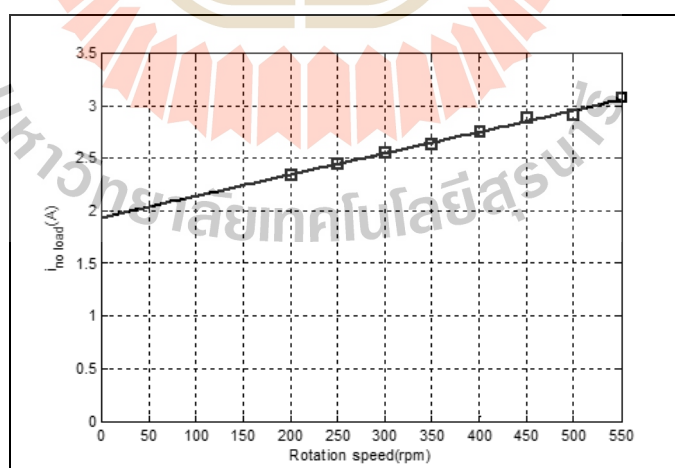
การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับความเร็วรอบในสภาวะหมุนตัวเปล่า ดำเนินการทดสอบด้วยการปรับควบคุมความเร็วรอบให้เพิ่มขึ้นและบันทึกค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ โดยทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ผลการทดสอบแสดง

ได้ดังตารางที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.30 จากผลการทดสอบสามารถแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ด้วยสมการที่ (4.11)

$$i_{a, no load} = 0.0019998\omega + 1.943 \quad (4.11)$$

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะหมุนตัวเปล่า

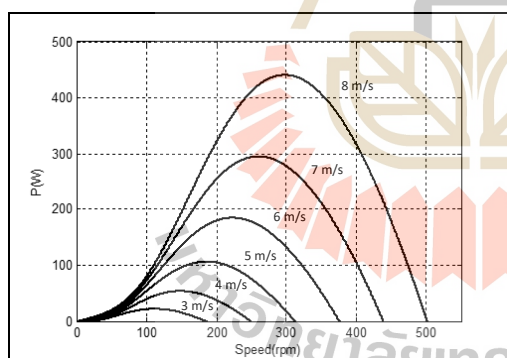
ความเร็วรอบ (rpm)	$i_{no load}$ (A)			$i_{no load, average}$ (A)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
200	2.37	2.34	2.32	2.343
250	2.53	2.4	2.39	2.44
300	2.65	2.53	2.48	2.55
350	2.69	2.64	2.57	2.63
400	2.85	2.75	2.67	2.75
450	2.93	2.89	2.91	2.88
500	2.93	2.89	2.89	2.903
550	3.1	3.08	3.03	3.07



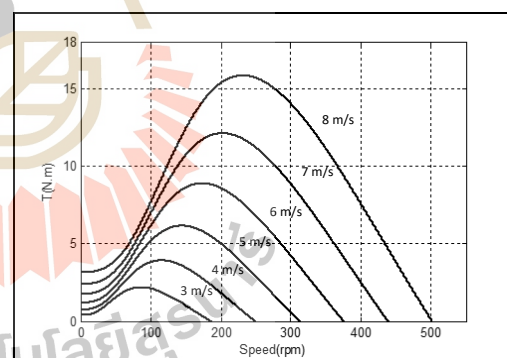
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะไร้โหลด

หลังจากทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะหมุนตัวเปล่าหรือสภาวะไร้โหลดแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะดำเนินการหากระแสชดเชย $i_{a,c}$ ซึ่งในที่นี้พิจารณาให้ $i_{a,c}$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับสภาพความเร็วลม เพราะเครื่องจำลองกังหันลมมีอินพุต คือ ค่าความเร็วลมที่สามารถกำหนดโดยผู้ใช้งาน จากกราฟคุณลักษณะกังหันลมในบทที่ 3 จะพบว่า ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็วลมต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายถึงค่ากระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะดังกล่าวก็จะมีค่าแตกต่างกัน พารามิเตอร์ของเครื่องจำลองกังหันลม มีดังนี้ รัศมี $R = 1.558$ m ค่าความหนาแน่นของอากาศ $\rho = 1.225$ kg/m³ และมุมขี้นใบพัด $\beta = 15^\circ$ จากกราฟคุณลักษณะของกังหันลมที่แสดงในรูปที่ 4.31 และ 4.32 สามารถทราบค่าความเร็วรอบในสภาวะไร้โหลดของความเร็วลมต่าง ๆ และเมื่อนำค่าความเร็วรอบดังกล่าวไปแทนในสมการที่ (4.11) ทำให้ทราบค่ากระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็วลมต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.5 จากข้อมูลนี้สามารถนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะไร้โหลดได้ดังรูปที่ 4.33 และสามารถแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ด้วยสมการที่ (4.12)

$$i_{a,c} = 0.1253v_w + 1.9423 \quad (4.12)$$



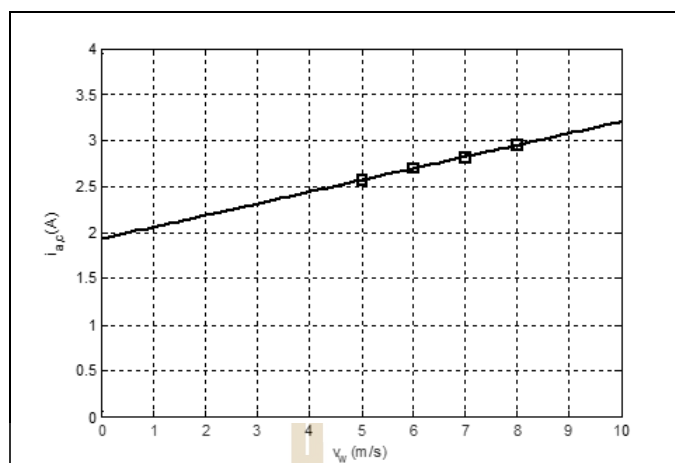
รูปที่ 4.31 คุณลักษณะกำลังของกังหันลม



รูปที่ 4.32 คุณลักษณะแรงบิดของกังหันลม

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณกระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะไร้โหลดกับความเร็วลม

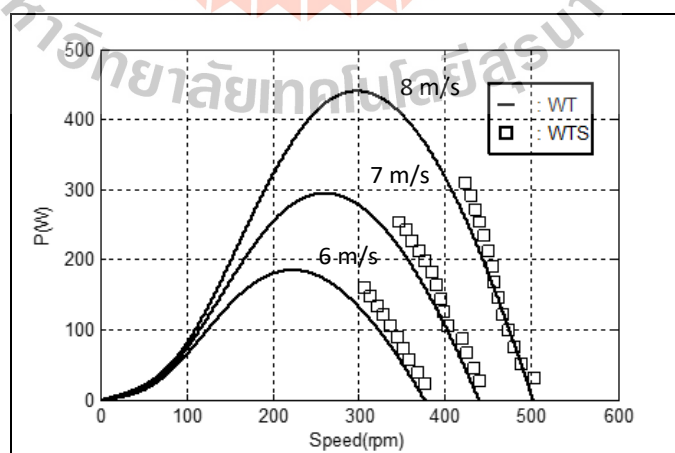
ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบ (rpm)	กระแสชดเชย (A)
5	313.2	2.571
6	375.8	2.6985
7	438.5	2.8258
8	501.1	2.9528



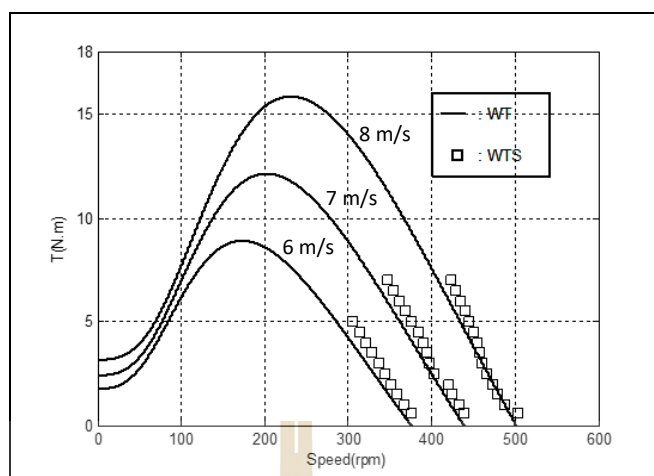
รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสชดเชยกับความเร็วลม

4.5 ผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมแสดงไว้ในภาคผนวก ก. การทดสอบดำเนินการด้วยการป้อนโหลดเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 N.m และบันทึกค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวของเครื่องจำลองกังหันลมที่ความเร็วลม 6 m/s 7 m/s และ 8 m/s เปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะกังหันลม แสดงได้ดังรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 สำหรับกราฟคุณลักษณะพลังงานของเครื่องจำลองกังหันลมคำนวณได้จากผลทดสอบแรงบิดที่โหลดคูณกับความเร็วรอบที่ได้บันทึกไว้



รูปที่ 4.34 คุณลักษณะพลังงานกังหันลม



รูปที่ 4.35 คุณลักษณะแรงบิดกังหันลม

จากผลการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมในรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นได้ว่า เครื่องจำลองกังหันลมมีการทำงานสอดคล้องกับคุณลักษณะของกังหันลม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ ของชุดทดสอบ เช่น ความคลาดเคลื่อนของชุดตรวจจับความเร็วรอบมอเตอร์และชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า รวมถึงแนวเส้นตรงของจุดเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับโหลดเบรก สาเหตุที่ไม่สามารถแสดงจุดการทำงานที่แรงบิดที่โหลดสูงกว่า 7 N.m เนื่องจากข้อจำกัดพิกัดกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.6 สรุป

เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำเสนอในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ทดสอบระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมในห้องปฏิบัติการ หลักการสำคัญของคุณลักษณะกังหันลม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานหรือแรงบิดกับความเร็วรอบในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ คุณลักษณะของกังหันลมขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของกังหันลมที่พิจารณา การดำเนินการขั้นต้นได้อธิบายถึงหลักการควบคุมและขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการควบคุมเครื่องจำลองกังหันลมด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB จากนั้นจึงดำเนินการสร้างชุดทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีรายละเอียดของโครงสร้างชุดทดสอบและการทดสอบในส่วนต่าง ๆ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เครื่องจำลองกังหันลมมีการทำงานที่สอดคล้องและเป็นแนวโน้มเดียวกันกับคุณลักษณะของกังหัน การนำเครื่องจำลองกังหันลมนี้ไปใช้ทดสอบระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมจะได้นำเสนอในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

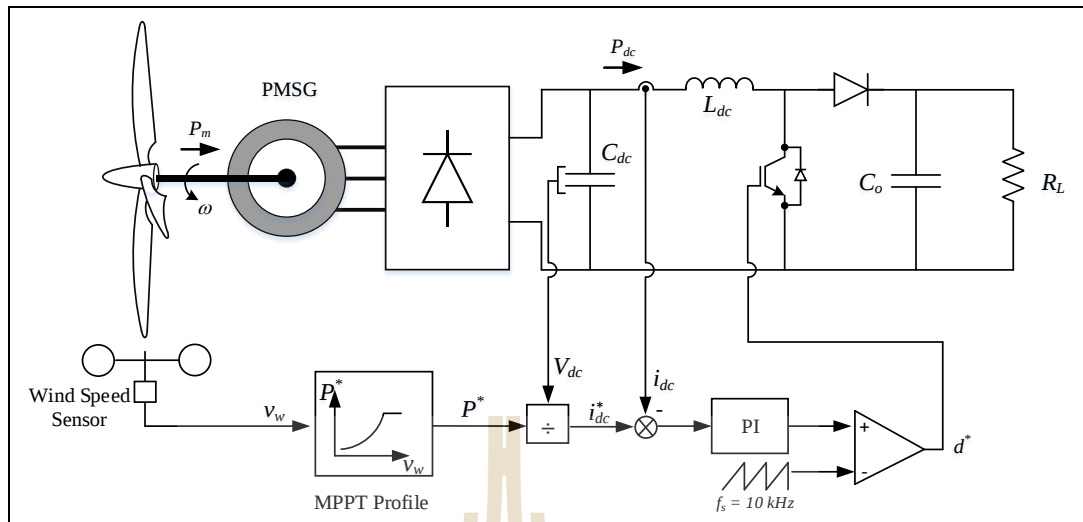
ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด จากทฤษฎีพื้นฐานของกักเก็บพลังงานที่นำเสนอในบทที่ 3 ทำให้ทราบเกี่ยวกับคุณลักษณะการสกัดพลังงานของกักเก็บพลังงาน พลังงานเอาต์พุตของกักเก็บพลังงานขึ้นอยู่กับความเร็วลม คุณลักษณะพลังงานของกักเก็บพลังงานมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ณ ความเร็วลมต่าง ๆ จะมีจุดทำงานเพียงตำแหน่งเดียวที่ทำให้ได้พลังงานเอาต์พุตสูงสุด การดึงพลังงานสูงสุดของกักเก็บพลังงานให้สอดคล้องกับความเร็วลมสามารถทำได้โดยอาศัยการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ในอดีตได้มีการนำเสนอหลากหลายวิธีสามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแบบที่ใช้และไม่ใช้คุณลักษณะของกักเก็บพลังงาน เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการอธิบายหลักการควบคุมและการจำลองสถานการณ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแบบที่ใช้คุณลักษณะของกักเก็บพลังงานด้วยวิธี PSF และการควบคุมแบบไม่ใช้คุณลักษณะของกักเก็บพลังงานด้วยวิธี P&O เพื่อเป็นการศึกษาขั้นพื้นฐานและหาแนวทางพัฒนาสมรรถนะของการควบคุมต่อไป

5.2 ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF

โครงสร้างของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยกักเก็บพลังงานที่เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) และต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น (Three-Phase Rectifier) ร่วมกับวงจรทบทระดับแรงดัน (Boost Converter) ซึ่งมีโหนดเป็นตัวต้านทาน หลักการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่ศึกษาในหัวข้อนี้เป็นวิธีที่รู้จักกันในวงกว้าง คือ วิธีการป้อนกลับสัญญาณกำลัง (Power signal feedback: PSF) หรือ วิธีแบบเปิดตาราง (Lookup table) (Bin Wu et al. 2011) รายละเอียดโครงสร้างและระบบการควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF

กราฟคุณลักษณะกำลังสูงสุดในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ (MPPT Profile) จะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ กราฟดังกล่าวนี้อยู่ในรูปแบบของการประมาณด้วยฟังก์ชันโพลิโนเมียล เพื่อใช้ในการคำนวณและเปรียบเทียบจุดการทำงานที่เหมาะสมของกำลังหรือความเร็วรอบในการหมุนที่ต้องการ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้กำลังไฟฟ้า (P) ซึ่งในที่นี้ คือ P_{dc} เป็นตัวแปรสำหรับการควบคุม วิธีการนี้ถือว่ามีความซับซ้อนน้อยและให้ผลตอบแทนที่รวดเร็ว ตัวอย่างกราฟคุณลักษณะกำลังสูงสุดในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งแทนด้วยฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับ 3 ที่ขึ้นอยู่กับความเร็วลมแสดงได้ดังสมการที่ (5.1) กราฟดังกล่าวสามารถทราบได้จากเอกสารคู่มือของโรงงานผู้ผลิตหรือจากการทดสอบ ซึ่งจะได้รับการอธิบายในหัวข้อการจำลองสถานการณ์ ต่อไป

$$P^* = a_3 v_w^3 + a_2 v_w^2 + a_1 v_w + a_0 \quad (5.1)$$

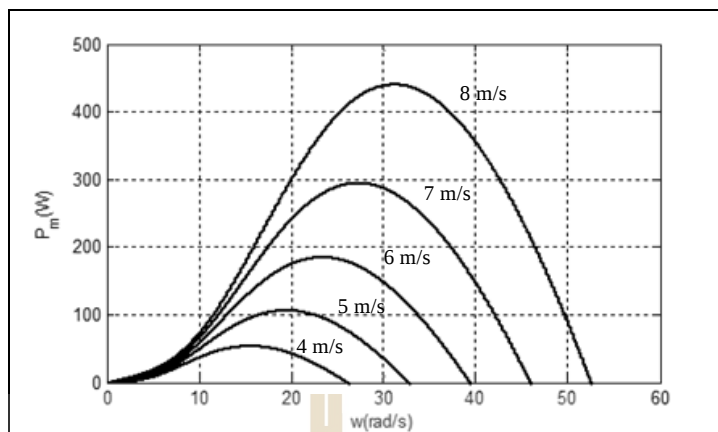
เมื่อ $a_0 - a_3$ คือ สัมประสิทธิ์โพลิโนเมียล และ P^* คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับการควบคุม ขั้นตอนการควบคุมเริ่มจากการวัดความเร็วลม v_w แล้วคำนวณกำลังไฟฟ้าอ้างอิง P^* จากนั้นหารด้วยแรงดัน V_{dc} ทำให้ได้ค่ากระแสอ้างอิง i_{dc}^* ที่จะนำไปเปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งในที่นี้คือ กระแส i_{dc} ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จะนำไปเข้าตัวควบคุมพีไอ เพื่อปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ d^* ที่เหมาะสมให้กับวงจรทบทระดับแรงดัน

5.3 การจำลองสถานการณ์การติดตามกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF

การจำลองสถานการณ์ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF ที่แสดงในรูปที่ 5.1 ดำเนินการโดยอาศัยชุดคำสั่ง PowerSim Blockset ใน SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB แสดงในรูปที่ 5.2 รายละเอียดพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ (José et al.2011) แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

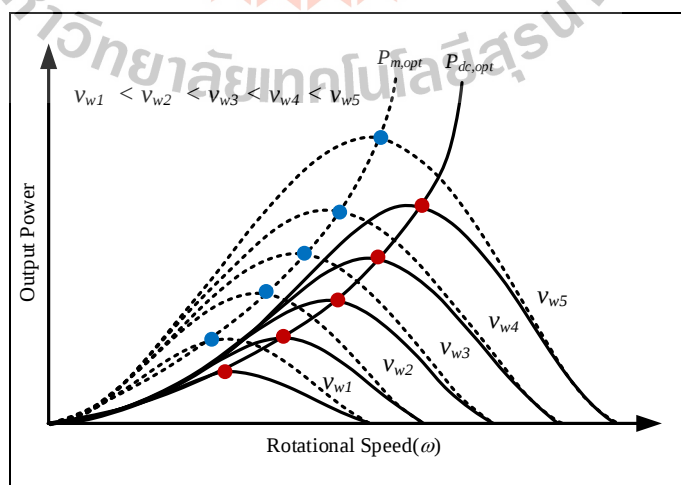
กังหันลม	
พารามิเตอร์	รายละเอียด
R	1.558 m
β	15°
ρ	1.255 kg/m^3
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร	
พารามิเตอร์	รายละเอียด
<i>Power rate</i>	500 W
<i>Rated Speed</i>	450 rpm
<i>number pole pairs</i>	6
R_s	0.1Ω
L_s	1 mH
J	0.006 kg.m^2
วงจรทระดับแรงดัน	
พารามิเตอร์	รายละเอียด
L_{dc}	1.2 mH
C_{dc}	$1000 \mu\text{F}$
C_o	$500 \mu\text{F}$
f_s	10 kHz
R_L	30Ω



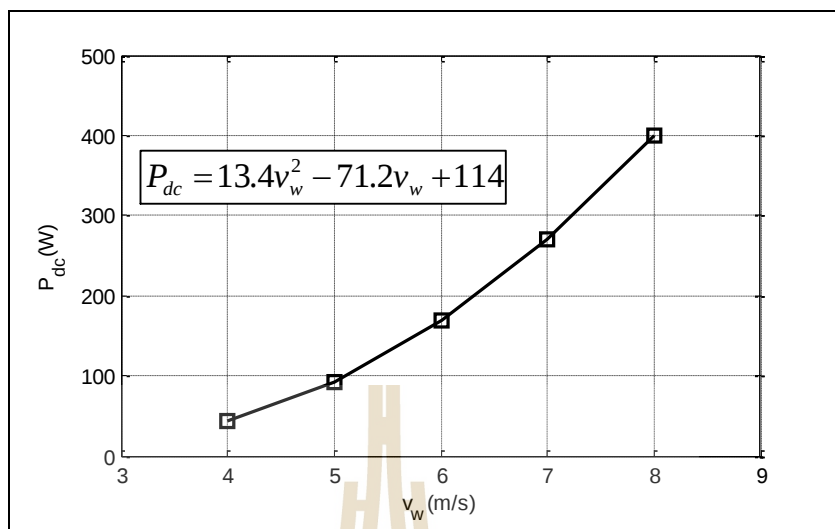
รูปที่ 5.3 คุณลักษณะกำลังของกังหันลม

ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ

ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (W)
4	43
5	93
6	170
7	270
8	400



รูปที่ 5.4 คุณลักษณะพลังงานของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ



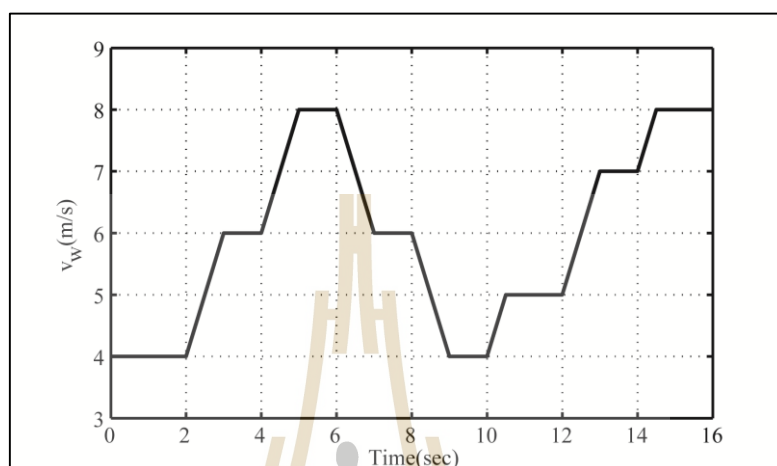
รูปที่ 5.5 กราฟคุณลักษณะกำลังสูงสุดในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ

$$P_{dc} = 13.4v_w^2 - 71.2v_w + 114 \quad (5.2)$$

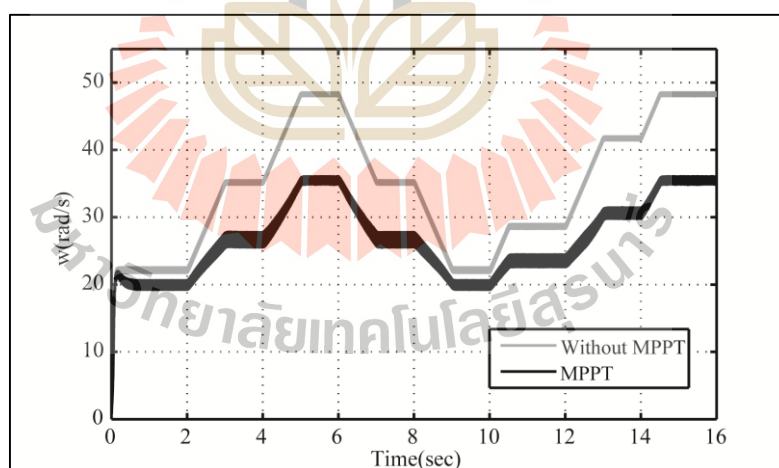
จากผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ ในตารางที่ 5.2 พบว่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดในความเร็วลมต่าง ๆ มีค่าต่ำกว่าพลังงานสูงสุดของกังหันลม เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ตรงกับจุดที่มีพลังงานสูงสุดของกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดเทียบกับความเร็วลมแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งสามารถแทนด้วยฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับสองได้ดังสมการที่ (5.2) จากนั้นนำไปบันทึกเป็นข้อมูลการตามรอยกำลังสูงสุด (MPPT Profile) ที่ใช้สำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF การออกแบบตัวควบคุมพีไอใช้วิธีการทดสอบปรับตั้งค่าให้เหมาะสม โดยพิจารณาการทำงานในสภาวะคงตัวเป็นสำคัญ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ใช้มีค่าดังนี้ $K_p = 3$ และ $K_I = 30$

การจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันหลักการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF กำหนดให้สภาพความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 5.6 ในรูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงกราฟพลังงานเอาต์พุตทางกลและความเร็วในการหมุนของกังหันลมตามลำดับ สำหรับรูปที่ 5.9 แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ โดยจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงการเปรียบเทียบระหว่างระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (MPPT) กับระบบที่ไม่มี การตามรอยกำลังสูงสุด (Without MPPT) ภายใต้สภาวะความเร็วลมเดียวกัน พบว่ากำลังไฟฟ้าของ

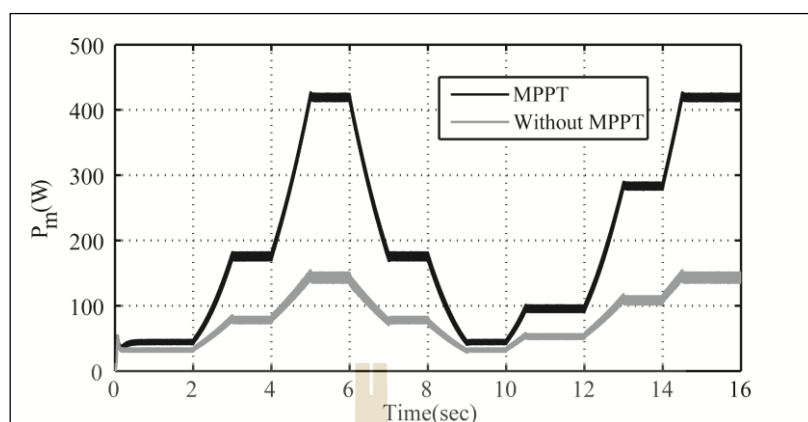
ระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดมากกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ทำให้เห็นถึงประโยชน์ของการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่สามารถดึงพลังงานสูงสุดของระบบออกมาได้สอดคล้องตามความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง



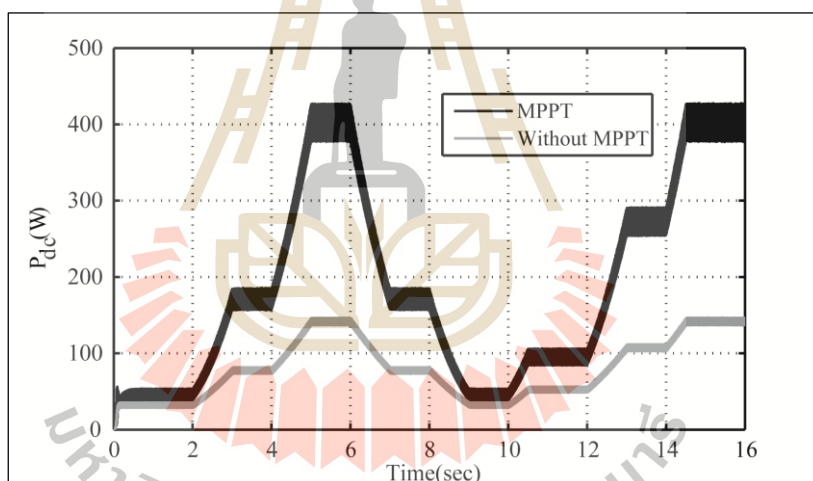
รูปที่ 5.6 ความเร็วลมที่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.7 ความเร็วในการหมุน



รูปที่ 5.8 พลังงานเอาต์พุตของกังหันลม



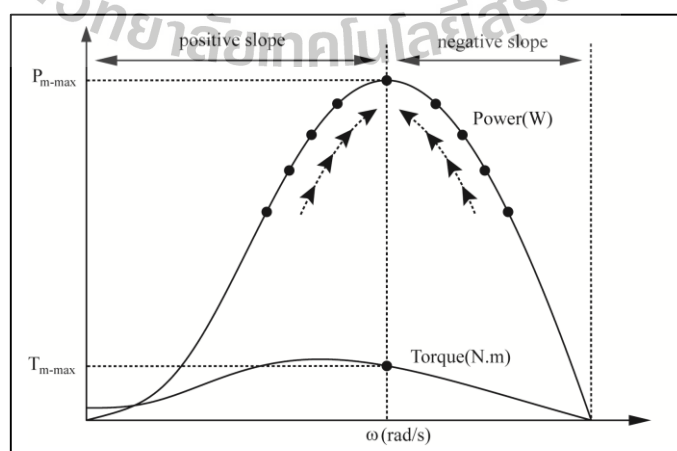
รูปที่ 5.9 กำลังไฟฟ้ากระแสตรง

จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นได้ว่าการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF มีผลตอบสนองที่รวดเร็วในการควบคุมการทำงานของกังหันลมให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดสอดคล้องตามความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นไปตามข้อมูลที่บันทึกใน MPPT Profile อย่างไรก็ตามการควบคุมด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะพลังงานของกังหันลม และตัวตรวจวัดความเร็วลม ก่อให้เกิดความยุ่งยากต่อการใช้งาน ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกแนวทางการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแบบไม่ต้องอาศัยคุณลักษณะของกังหันลม รายละเอียดของการควบคุมด้วยวิธีการดังกล่าวจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

5.4 การควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation method: P&O) หรือ วิธีการค้นหาแบบไต่เขา (Hill-Climb search method: HCS) เป็นวิธีที่เรียบง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง การควบคุมไม่จำเป็นต้องพึ่งพาข้อมูลพารามิเตอร์หรือคุณลักษณะของกังหันลม วิธีการนี้เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่พิจารณาด้วยการวนรอบเปลี่ยนแปลงคำตอบและตรวจสอบผลลัพธ์ในทุกรอบของการคำนวณ การดำเนินการดังกล่าวสามารถทำให้คำตอบมีการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ วิธีการในลักษณะนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากในระบบควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดของระบบแปลงผันพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบแปลงผันพลังงานลมอย่างแพร่หลาย หลักการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดจะอาศัยการพิจารณาผ่านเงื่อนไขที่กำหนดและปรับเปลี่ยนสัญญาณการควบคุม ซึ่งจะมีผลทำให้ความเร็วของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ การดำเนินการในข้างต้นสามารถปรับตั้งจุดปฏิบัติงานของกังหันลมให้เหมาะสมได้ อัลกอริทึมทั่วไปของวิธี P&O มีพื้นฐานการควบคุมภายใต้สมมติฐานสำหรับการดึงกำลังสูงสุด เมื่อ $\frac{\Delta P}{\Delta \omega} = 0$ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 จากสมมติฐานดังกล่าว ทำให้การปรับตั้งสัญญาณควบคุมสามารถพิจารณาได้จากค่าความชัน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

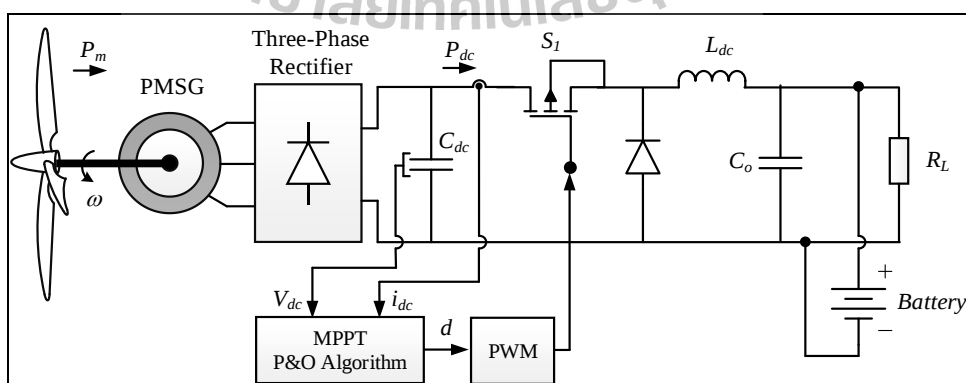
$$\text{Slope} = \frac{\Delta P}{\Delta \omega} \quad (5.3)$$



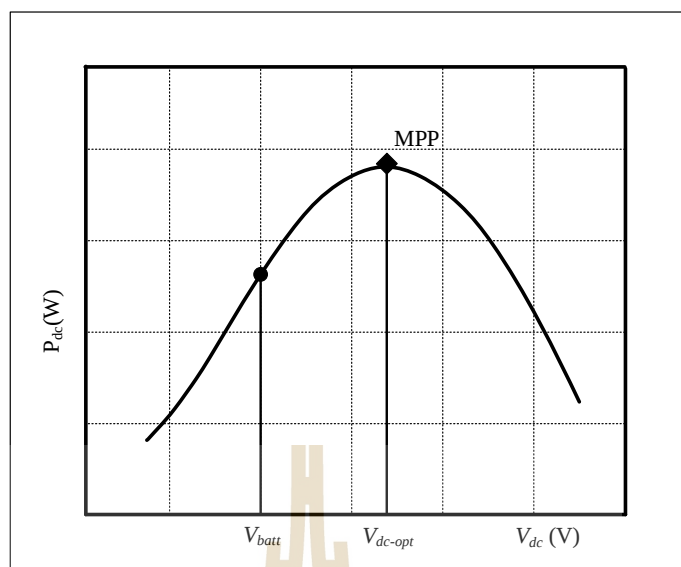
รูปที่ 5.10 คุณลักษณะกำลังและแรงบิดของกังหันลม

5.5 ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

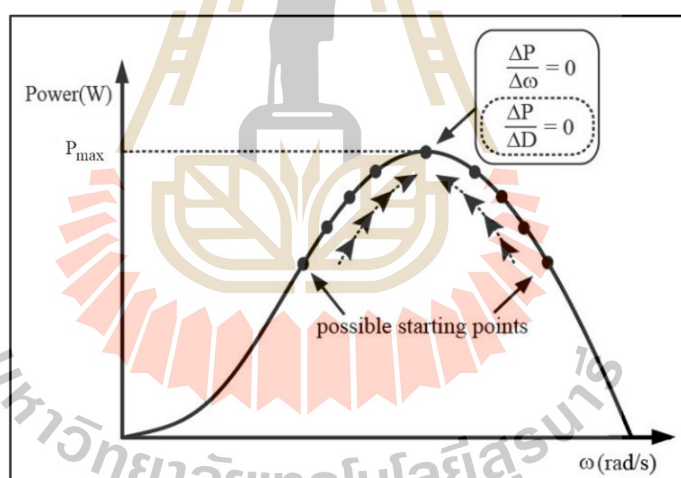
โครงสร้างระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงดังรูปที่ 5.11 ประกอบด้วยกักเก็บลมแนวนอนเชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟสนำมาใช้แปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (dc-link) เนื่องจากระบบที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบแบบอิสระ จึงมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรอง ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะนำแบตเตอรี่เข้ามาพิจารณาด้วย โดยเชื่อมต่อเข้ากับระบบที่ด้านหลังของวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวมีค่าคงที่เท่ากับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ (V_{batt}) โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{dc}) ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ เพื่อให้สามารถอัดประจุได้ แรงดัน V_{dc} แปรผันตามความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า P_{dc} เทียบกับแรงดันไฟฟ้า V_{dc} จึงสอดคล้องกับคุณลักษณะพลังงาน P_m เทียบกับความเร็วรอบ ω การนำแบตเตอรี่ต่อเข้ากับระบบมีผลทำให้จุดการทำงานของระบบเริ่มต้นที่ $V_{dc} = V_{batt}$ หากจุดทำงานของ V_{dc-opt} ที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงกว่า V_{batt} ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ในกรณีนี้วงจรทบระดับแรงดันไม่สามารถควบคุมกำลังงานของกักเก็บลมให้ไปสู่จุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เนื่องจากแบตเตอรี่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวคงที่ การเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรทบระดับแรงดัน จะทำให้ V_{dc} ที่เป็นอินพุตของวงจรมีค่าลดลง กล่าวคือ จุดการทำงานของ V_{dc} จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกับจุด MPP ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงจรลดระดับแรงดัน (buck converter) เพื่อควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรจะนำไปประจุแบตเตอรี่และจ่ายให้แก่โหลดตัวต้านทาน (R_L)



รูปที่ 5.11 ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O



รูปที่ 5.12 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

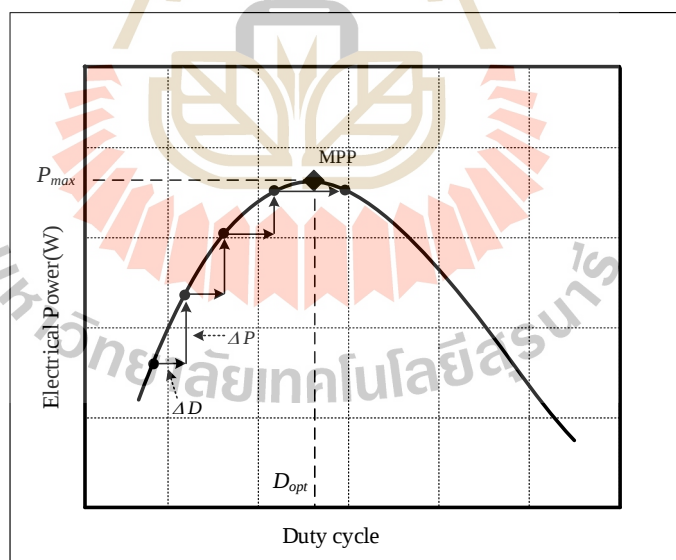


รูปที่ 5.13 คุณลักษณะพลังงานของกังหันลม

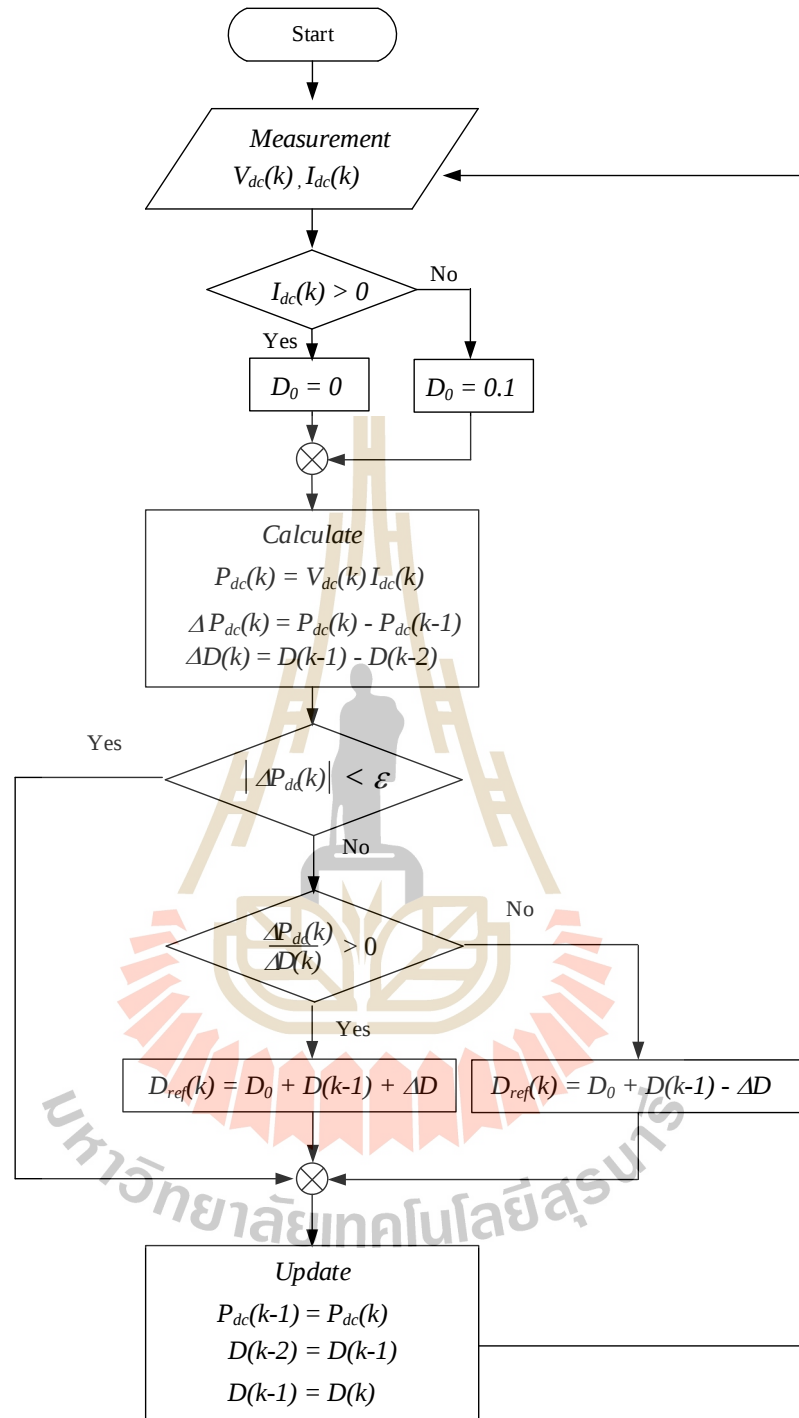
การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระสามารถทำได้ด้วยการปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรระดับแรงดันโดยตรง เพราะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) เทียบกับค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle: D) มีลักษณะเดียวกันกับความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้า (P_{dc}) เทียบกับความเร็วเชิงมุม (ω) ทั้งสองความสัมพันธ์มีตำแหน่งที่ได้กำลังสูงสุดตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.13 การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่อาศัยความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบกับ D มีข้อได้เปรียบที่ไม่ต้องใช้ตัวตรวจวัดทางกล ดังนั้น งานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าว หลักการควบคุมอาศัยเงื่อนไขจุดที่ได้รับกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามสมการที่ (5.4) ในกรณีจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านซ้ายของจุด MPP ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา เพื่อให้เข้าสู่ตำแหน่ง MPP หรือบริเวณที่มีความชันเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกัน หากจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านขวาของจุด MPP ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย การควบคุมดำเนินการในลักษณะของการวนรอบการค้นหา แต่แต่ละรอบจะทำการปรับเพิ่มและลดสัญญาณควบคุมด้วยขนาดขั้นการค้นหา (Step size) ซึ่งในที่นี้คือ ค่าคงที่ ΔD ในรูปที่ 5.14 แสดงการลู่เข้าสู่จุด MPP จากทางด้านซ้ายของจุด MPP สมรรถนะการควบคุมของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขนาดขั้นการค้นหา กรณีที่ ΔD มีขนาดกว้างระบบจะมีผลตอบสนองในการลู่เข้าสู่จุด MPP เร็ว แต่จะมีการแกว่งไกวบริเวณจุด MPP มาก ในกรณี ΔD มีขนาดแคบการแกว่งไกวเล็กน้อยบริเวณจุด MPP แต่จะใช้เวลามากในการลู่เข้าสู่จุด MPP แผนภาพไดอะแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงดังรูปที่ 5.15

$$\text{Slope} = \frac{\Delta P_{dc}}{\Delta D} \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.14 การลู่เข้าสู่จุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 5.15 แผนภาพไดอะแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

แผนภาพไดอะแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงดังรูปที่ 5.15 เริ่มจากการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าแล้วทำการตรวจสอบเงื่อนไข หากไม่พบว่ามีการไหลให้กำหนดค่าวัฏจักรตั้งต้น $D_0 = 0.1$ แต่หากพบว่ามีการไหลให้กำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ตั้งต้น

$D_0 = 0$ ลำดับถัดมาเป็นการคำนวณกำลังไฟฟ้า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) และค่าวัฏจักรหน้าที่ ΔD โดยใช้ค่าเวลาในปัจจุบันลบค่าในอดีต จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไขค่าผิดพลาด พิจารณาค่า ΔP เพราะเมื่อระบบควบคุมบังคับให้กังหันลมทำงานที่จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วค่า ΔP จะมีค่าน้อยมาก 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 อัลกอริทึมจะทำการปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ใหม่เป็น $D_{ref}(k) = D_0 + D(k-1) + \Delta D$ หาก $\frac{\Delta P}{\Delta D} < 0$ อัลกอริทึมจะทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ใหม่เป็น $D_{ref}(k) = D_0 + D(k-1) - \Delta D$ จากนั้นจึงอัปเดตค่า $P_{dc}(k-1)$ $D(k-2)$ และ $D(k-1)$ แล้วจึงกลับไปเริ่มต้นทำงานใหม่อีกครั้ง การกำหนดค่า ε และ ΔD เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ

5.6 การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

ด้วยวิธี P&O

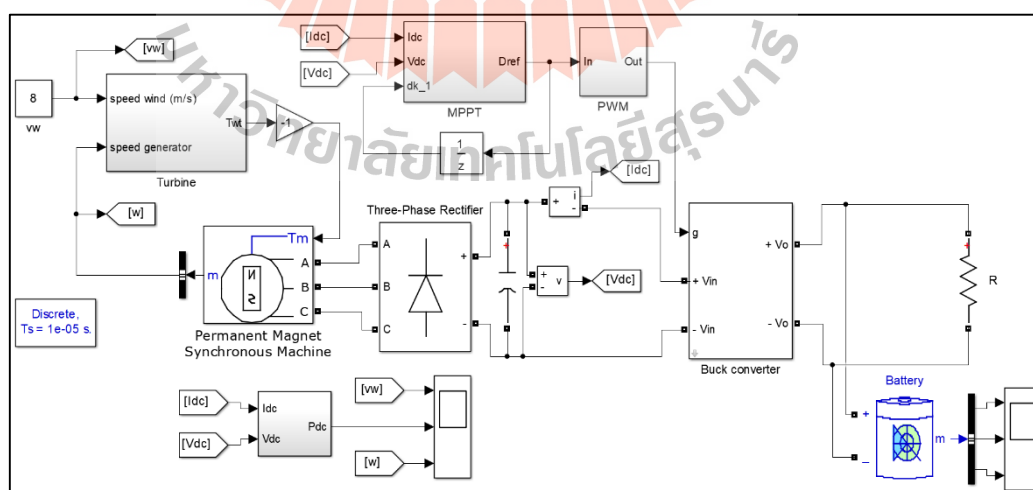
การยืนยันหลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระในเบื้องต้นนี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (PowerSim Blockset) ในโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB พารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 5.3 (Daili, Y. et al. 2015) โดยกำหนดให้ $\varepsilon = 10$ และ $\Delta D = 0.05$ แผนภาพการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 โปรแกรมสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O บนโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้า
ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

กังหันลม	
พารามิเตอร์	รายละเอียด
R	1.74 m
β	0°
ρ	1.255 kg/m ³

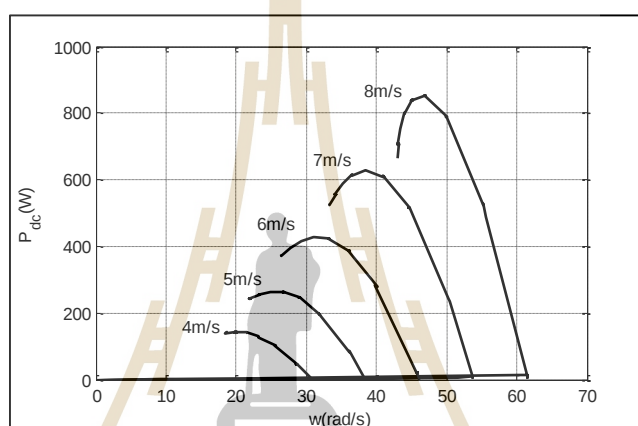
ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์การกักเก็บพลังงานไฟฟ้า
ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O (ต่อ)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบแม่เหล็กถาวร	
พารามิเตอร์	รายละเอียด
Power rate	1000 W
Rated Speed	500 rpm
number pole pairs	6
R_s	0.57Ω
$L_d = L_q$	5.5 mH
J	0.016 kg.m^2
วงจรลดทอนระดับแรงดัน	
พารามิเตอร์	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μF
C_o	500 μF
f_s	10 kHz
R_L	500Ω



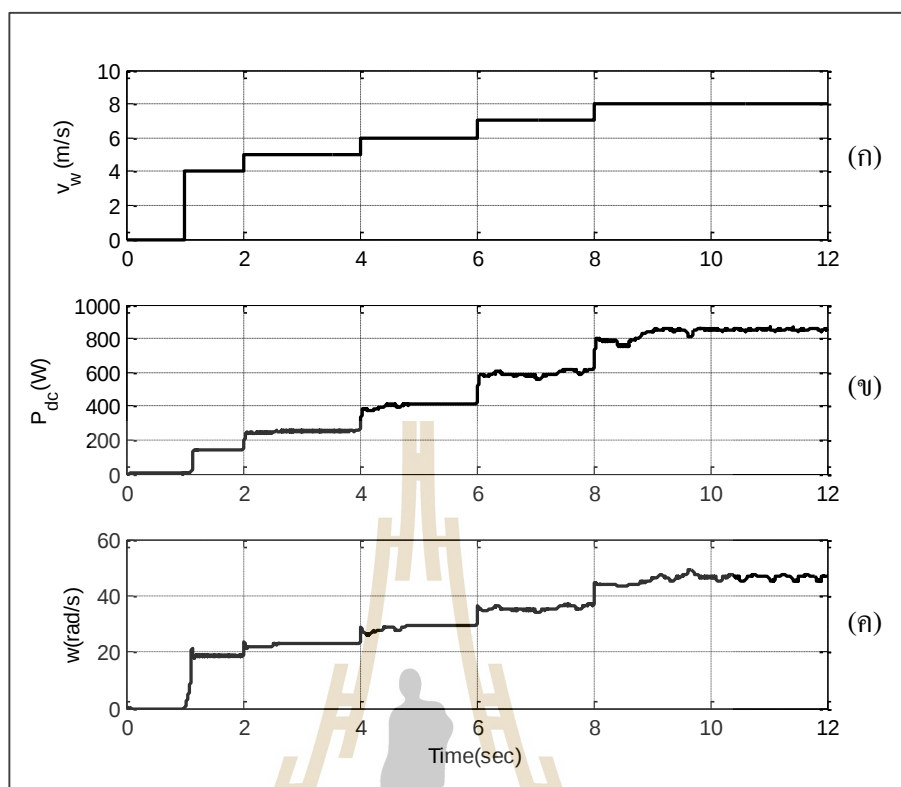
รูปที่ 5.16 การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
โดยใช้วิธี P&O ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB

การจำลองสถานการณ์ทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในรูปที่ 5.16 สามารถกระทำได้โดยการกำหนดให้ความเร็วลมมีค่าคงที่และปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรระดับแรงดันจาก 0% ถึง 100% พร้อมกับตรวจจับค่ากำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นกราฟคุณลักษณะของกังหันลม ผลการทดสอบที่ความเร็วลม 3 m/s ถึง 8 m/s แสดงได้ดังรูปที่ 5.17 จากกราฟดังกล่าวสามารถทราบถึงจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งถือเป็นข้อมูลยืนยันการทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

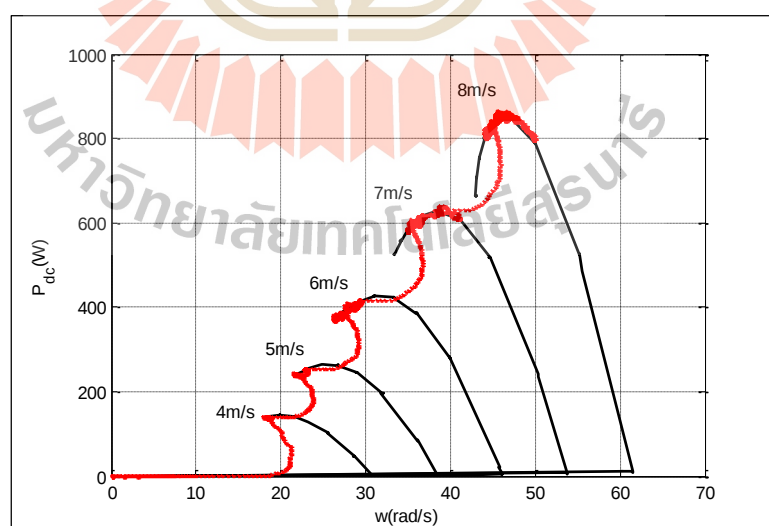


รูปที่ 5.17 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O กำหนดให้สภาพความเร็วลมเริ่มต้นจาก 0 m/s และมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 m/s เป็น 4 m/s ที่เวลา $t = 1$ วินาที ถัดมาที่เวลา $t = 2$ วินาที ความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 5 m/s และเพิ่มขึ้นเป็น 6, 7 และ 8 m/s ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.18(ก) ผลตอบสนองกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบเชิงมุมของกังหันลมผลิตไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 5.18(ข) และ 5.18(ค) ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าของระบบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อยืนยันการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดจึงดำเนินการตรวจจับค่ากำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของกังหันขณะที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นทางการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด รูปที่ 5.19 แสดงเส้นทางการตามรอยกำลังสูงสุดบนกราฟคุณลักษณะของกังหันลม โดยจะพบว่าทางเดินของกำลังไฟฟ้าพยายามเข้าสู่จุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งยืนยันได้ว่าการควบคุมด้วยวิธี P&O สามารถควบคุมการทำงานของระบบให้มีการตามรอยกำลังสูงสุดได้



รูปที่ 5.18 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.19 เส้นทางการตามรอยกำลังสูงสุด

5.7 สรุป

การอธิบายเกี่ยวกับหลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดและการจำลองสถานการณ์ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ได้นำเสนอในบทนี้มี 2 แนวทางการควบคุมด้วยกัน คือ แนวทางการควบคุมแบบอาศัยคุณลักษณะของกังหันลมด้วยวิธี PSF และแนวทางการควบคุมที่ไม่ต้องอาศัยคุณลักษณะของกังหันลมด้วยวิธี P&O โดยผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี PSF แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมสามารถบังคับการทำงานของกังหันลมให้เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบออกมาได้ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ซึ่งพบว่า กำลังไฟฟ้าของระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญและประโยชน์ของการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ส่วนการควบคุมด้วยวิธี P&O ที่มีความได้เปรียบในด้านการนำไปใช้งาน เพราะการควบคุมไม่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลมและยังสามารถควบคุมแบบลดทอนตัวตรวจวัดทางกลได้ ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การควบคุมสามารถบังคับจุดการทำงานของระบบให้เข้าสู่จุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามสภาพความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามสมรรถนะการควบคุมของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าขนาดก้าวของการค้นหาให้มีความเหมาะสม



บทที่ 6

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต

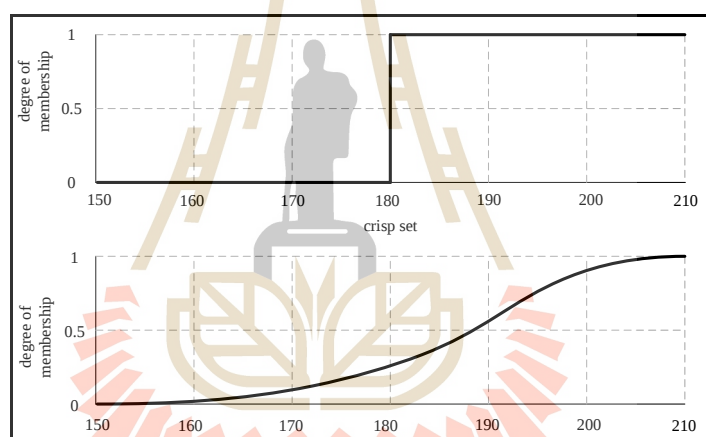
6.1 บทนำ

จากผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตที่นำเสนอในบทที่ 5 พบว่า ใช้เวลามากในการลู่เข้าจุดที่ได้กำลังสูงสุดและยังคงมีการสั่นไหวบริเวณจุดที่มีกำลังสูงสุด ประสิทธิภาพของการควบคุมดังกล่าวขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขนาดก้าวของการค้นหา ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดให้เหมาะสมกับสถานการณ์ ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการพัฒนาวิธีการควบคุมให้สามารถติดตามรอยกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เรียกว่าวิธีการที่นำเสนอชื่อว่า การควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต (FLC-MPPT based on P&O Method) วิธีการนี้เป็นการผสมผสานกันระหว่างการควบคุมแบบฟัซซีและวิธีการรบกวนและการสังเกต การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) หรือการควบคุมแบบฟัซซีที่เกิดจากแนวคิดและทฤษฎีฟัซซีเซตของ Lotfi A. Zadeh (Zadeh L. A., 1965, อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) ในปัจจุบันได้เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางทางด้านการควบคุม การควบคุมแบบฟัซซีเป็นวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการควบคุมนี้อาศัยข้อมูลความรู้และประสบการณ์การทำงานของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการออกแบบการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบที่พิจารณา ทำให้สามารถนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอ การทบทวนทฤษฎีพื้นฐานของการควบคุมแบบฟัซซี การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปราย รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีพิกัดแตกต่างกันอีกด้วย

6.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตเป็นกลุ่มสิ่งของหรือวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงความเป็นสมาชิกในเซตอย่างค่อยเป็นค่อยไป เมื่อ 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกในเซต และ 1 หมายถึง การเป็นสมาชิกในเซตอย่างสมบูรณ์ โดยมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) เพื่อระบุค่าความเป็นสมาชิก (degree of membership) ของสมาชิกใด ๆ ในเซตที่อยู่ในขอบเขตของ

เอกภพสัมพัทธ์ (universe of discourse) ที่พิจารณา ในขณะที่เซตชัดเจน (crisp set) จะพิจารณา สิ่งของหรือวัตถุใด ๆ ว่าเป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกของเซตเท่านั้น ค่าที่ใช้แสดงลักษณะสมบัติ ของสิ่งของดังกล่าวมีเพียง 0 หรือ 1 โดยที่ 0 หมายถึง การไม่เป็นสมาชิกในเซต และ 1 หมายถึง การ เป็นสมาชิกในเซต ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟัซซีเซตมีความแตกต่างไปจากเซตชัดเจนในเรื่องการให้ค่าที่ แสดงลักษณะสมบัติความเป็นสมาชิกและความไม่เป็นสมาชิกในเซต ในรูปที่ 6.1 เป็นเซตของ ช่วงความสูงของมนุษย์จาก 150 เซนติเมตร ถึง 210 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาเซตชัดเจนจะเห็นได้ว่า ช่วงความสูง 180 เซนติเมตร ถึง 210 เซนติเมตร เป็นสมาชิกเซตอย่างสมบูรณ์ ส่วนที่เหลือนอกเหนือ ย่านดังกล่าวไม่เป็นสมาชิกอย่างสิ้นเชิง เมื่อพิจารณาฟัซซีเซต พบว่า ช่วงความสูงจาก 150 เซนติเมตร ถึง 210 เซนติเมตร แสดงความเป็นสมาชิกอย่างค่อยเป็นค่อยไปหรือต่อเนื่อง โดยมีระดับความเป็น สมาชิกอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 (สุภารัตน์ ขวัญอ่อน, 2547)

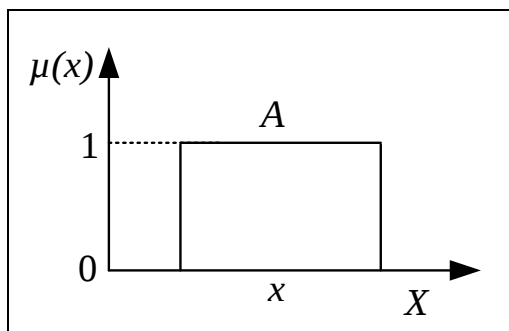


รูปที่ 6.1 ความแตกต่างของความเป็นสมาชิกระหว่างเซตชัดเจนกับฟัซซีเซต

ฟังก์ชันสมาชิกของเซตชัดเจนแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 สามารถอธิบายได้ว่า ค่าความเป็น สมาชิกของเซต A ที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ ($\mu_A(x)$) ในเอกภพสัมพัทธ์ X จะเป็นไปตาม สมการที่ (6.1) ดังนี้

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (6.1)$$

โดยที่ $\mu_A(x) = 1$ เมื่อ x เป็นสมาชิกของ A อย่างสมบูรณ์
 $\mu_A(x) = 0$ เมื่อ x ไม่เป็นสมาชิกของ A

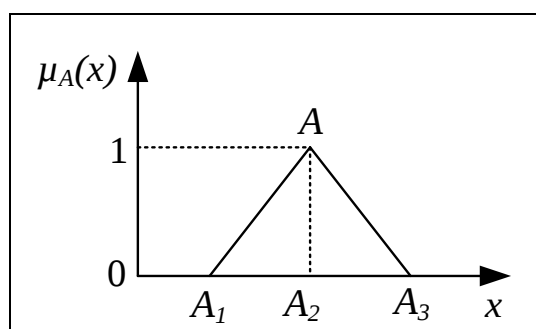


รูปที่ 6.2 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะของเซตชัดเจน

ฟัซซีเซต คือ เซตที่มีความคลุมเครือ ไม่มีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจน ค่าความเป็นสมาชิกสามารถมีมากกว่า 2 ค่า ขึ้นอยู่กับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกที่นิยมใช้มีหลายรูปแบบ เช่น ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมและฟังก์ชันรูปเกาส์เซียน เป็นต้น รายละเอียดฟังก์ชันสมาชิกต่าง ๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก (ทศพร ฌรงค์ฤทธิ์, 2557) ตัวอย่างฟัซซีเซตฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ที่ตำแหน่งตัวแปรสมาชิก x ใด ๆ สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงได้ระหว่าง 0 ถึง 1 ตามสมการที่ (6.2)

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (6.2)$$

โดยที่ $\mu_A(x) = 1$ เมื่อ x เป็นสมาชิกของ A อย่างสมบูรณ์
 $\mu_A(x) = 0$ เมื่อ x ไม่เป็นสมาชิกของ A
 $0 < \mu_A(x) < 1$ เมื่อ x ไม่เป็นสมาชิกของ A เพียงบางส่วน

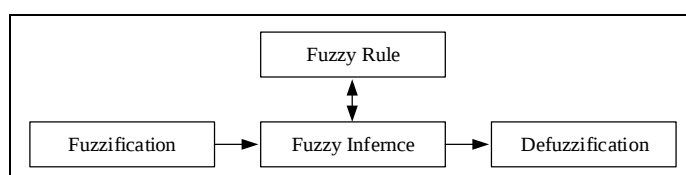


รูปที่ 6.3 ฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต

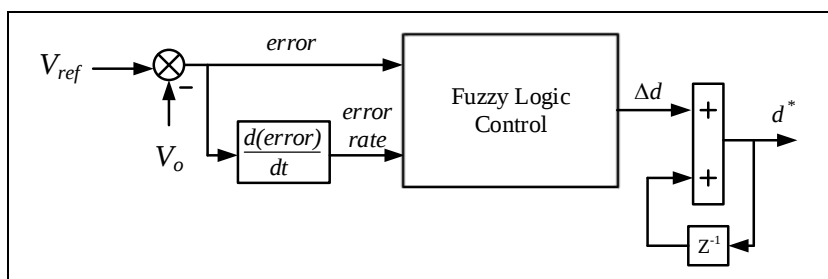
ฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวประกอบด้วย พารามิเตอร์ตำแหน่ง A_1, A_2 และ A_3 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเซต A ที่ตำแหน่ง x ใด ๆ พิจารณาได้ 5 ช่วง ตามสมการที่ (6.3)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq A_1 \\ (x - A_1)/(A_2 - A_1) & ; A_1 < x < A_2 \\ 1 & ; x = A_2 \\ (A_3 - x)/(A_3 - A_2) & ; A_2 < x < A_3 \\ 0 & ; x = A_3 \end{cases} \quad (6.3)$$

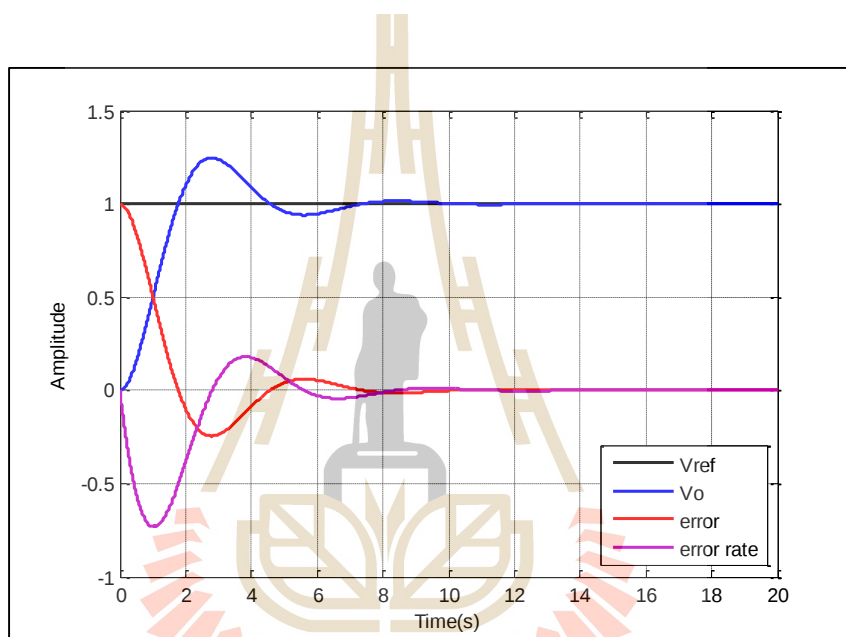
การดำเนินการทางฟัซซีเซต (fuzzy set operation) จะมีความหมายเหมือนกับเซตชัดเจนแต่จะให้ค่าเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน โดยเซตชัดเจนจะให้ผลว่า ตัวแปรสมาชิกอยู่หรือไม่อยู่ในเซต $([0,1])$ แต่สำหรับฟัซซีเซตจะให้ผลว่า ตัวแปรสมาชิกอยู่ในเซตด้วยระดับค่าความเป็นสมาชิกระหว่าง 0 ถึง 1 $([0,1])$ การดำเนินการทางเซตพื้นฐานประกอบด้วย ยูเนียน (union) อินเตอร์เซกชัน (intersection) ส่วนเติมเต็ม (complement) และเซตย่อย (subset) รายละเอียดต่าง ๆ ของตัวปฏิบัติการสามารถศึกษาได้จาก (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) คุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันสมาชิกที่ได้กล่าวในข้างต้น ทำให้ฟัซซีลอจิกเหมาะแก่การใช้งานกับระบบที่มีความคลุมเครือหรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระบวนการทำงานของฟัซซีลอจิกมี 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 6.4 ประกอบด้วย การทำฟัซซี (fuzzification) กฎของฟัซซี (fuzzy rule) การอนุมารฟัซซี (fuzzy inference) และการทำดีฟัซซี (defuzzification) กระบวนการในส่วนต่าง ๆ จะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.2.1 ถึง 6.2.4 ตามลำดับ โดยอธิบายด้วยกรณีศึกษาการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันควบคู่กันไป โครงสร้างการควบคุมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.5 เป็นการควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้ 2 อินพุตและ 1 เอาต์พุต ตัวแปรอินพุต คือ *error* และ *error rate* ตัวแปรเอาต์พุต คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม (Δd) เมื่อนำค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมดังกล่าวรวมกับสัญญาณควบคุมในอดีต จะได้เป็นสัญญาณที่ใช้ควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดัน ผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตที่ถูกควบคุมของวงจรลดทอนระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.4 โครงสร้างฟัซซีลอจิก



รูปที่ 6.5 โครงสร้างระบบควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่



รูปที่ 6.6 ตัวอย่างผลตอบสนองของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีการควบคุม

6.2.1 การทำฟัซซี่

การทำฟัซซี่ คือ การแปลงสัญญาณข้อมูลทางด้านอินพุตแบบธรรมดาเป็นตัวแปรภาษาหรือตัวแปรฟัซซี่ ตัวอย่างการกำหนดค่าเชิงภาษาและตัวแปรภาษาของระบบควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดัน พิจารณาความเป็นไปได้หลัก ๆ จากการวิเคราะห์ตัวอย่างผลตอบสนองของการควบคุมในรูปที่ 6.6

ตัวแปรอินพุต error มีความเป็นไปได้ 3 กรณี คือ

กรณี $V_o > V_{ref}$ error มีค่าเป็นบวก (Positive, P)

กรณี $V_o = V_{ref}$ error มีค่าเป็นศูนย์ (Zero, Z)

กรณี $V_o < V_{ref}$ error มีค่าเป็นลบ (Negative, N)

ตัวแปรอินพุต error rate ซึ่งหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ error มีความเป็นไปได้หลัก 3 กรณี เช่นกัน สามารถพิจารณาได้ดังนี้

เมื่อ error มีค่าลดลง error rate มีค่าเป็นลบ (Negative, N)

เมื่อ error ไม่มีการเปลี่ยนแปลง error rate มีค่าเป็นศูนย์ (Zero, Z)

เมื่อ error มีค่าเพิ่มขึ้น error rate มีค่าเป็นบวก (Positive, P)

ในขณะที่การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ (d) ดังนั้น สัญญาณควบคุม d จะต้องสามารถปรับเพิ่มขึ้นและลดลงได้ ด้วยเหตุนี้ ตัวแปรเอาต์พุตของฟัซซี่ Δd จึงมีความเป็นไปได้ 3 กรณี ดังนี้

เมื่อต้องการปรับให้ d ลดลง (Decrease, D) Δd จะมีค่าเป็นลบ

เมื่อต้องการให้ d ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (No Change, NC) Δd จะมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อต้องการปรับให้ d เพิ่มขึ้น (Increase, I) Δd จะมีค่าเป็นบวก

ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษาของอินพุตและเอาต์พุตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

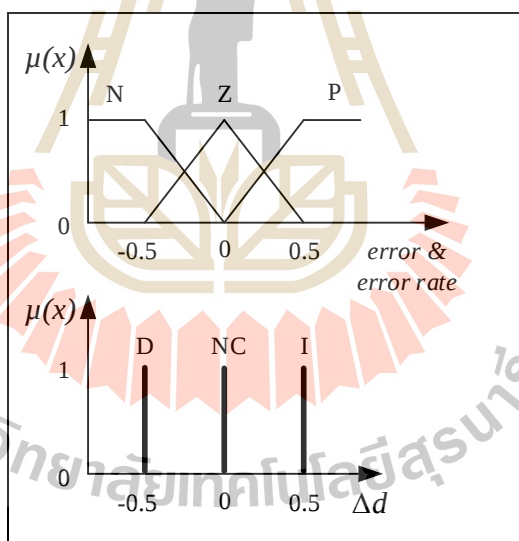
ตารางที่ 6.1 ตัวแปรทางภาษาและค่าทางภาษาสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error	ค่าความผิดพลาด	N	$V_o < V_{ref}$
			Z	$V_o = V_{ref}$
			P	$V_o > V_{ref}$
	error rate	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด	N	error ลดลง
			Z	error คงที่
			P	error เพิ่มขึ้น
เอาต์พุต	Δd	ค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม	D	ลดลง
			NC	ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
			I	เพิ่มขึ้น

ในการควบคุมสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบที่พิจารณา ตัวอย่างการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตเลือกใช้รูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ประกอบด้วย 3 ฟัซซี่เซต คือ N, Z และ P ซึ่งอยู่ในเอกภพ

สัมพัทธ์ช่วง $[-1,1]$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 นอกจากรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกประการ คือ การแบ่งส่วนตัวแปรฟัซซี ซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนฟัซซีเซตจากเดิมประกอบด้วย 3 ฟัซซีเซต เป็น 5 ฟัซซีเซตหรือมากกว่านั้น รวมถึงวิธีการอนุมานที่จะได้รับการอธิบายในหัวข้อที่ 6.2.3 ในกรณีเลือกใช้อุมานด้วยวิธี Sugeno ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตจะเป็นเส้นตรงโทน ดังรูปที่ 6.7

ค่าระดับความเป็นสมาชิกแต่ละฟัซซีเซตบางครั้งอาจรวมชุดวัตถุดิบด้วยทราดสคิวเซอร์ และชุดเปรียบเทียบสัญญาณไว้ในส่วนที่เป็นชุดปฏิบัติการฟัซซีพีเคชันนี้ด้วยเนื่องจากตัวแปรอินพุตที่ได้จากเครื่องมือวัดอาจอยู่นอกขอบเขตเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด ดังนั้นจึงดำเนินการแปลงค่าตัวแปรอินพุตเหล่านี้ให้อยู่ในรูปขอบเขตเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนดด้วยค่าสเกล (scaling) หรือค่าเกน (gain factor) เรียกขั้นตอนนี้ว่า การทำนอร์มัลไลซ์ (normalization) ตัวอย่างเช่น สัญญาณแรงดันที่วัดได้อยู่ในช่วง $[-100, +100]$ โวลต์ ถ้ากำหนดให้เอกภพสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง $[-1, +1]$ ดังนั้นต้องทำการคูณค่าแรงดันที่วัดได้ด้วย $(1/100)$ เป็นต้น



รูปที่ 6.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซี

6.2.2 กฎของฟัซซี

กฎของฟัซซี (fuzzy rule) คือ เงื่อนไขและข้อปฏิบัติที่ใช้ดำเนินการทางฟัซซี กฎฟัซซีกำหนดขึ้นจากความรู้ความเข้าใจของผู้ออกแบบต่อระบบที่พิจารณาควบคุม โดยรูปกฎของฟัซซีจะมีลักษณะเป็นประโยคเงื่อนไข ถ้า...แล้ว... (IF... THEN...) ดังนี้

IF x is A
 THEN y is B

โดยที่ x และ y คือ ตัวแปรภาษา A และ B คือ ค่าเชิงภาษา ปกติแล้วกฎของฟัซซีจะครอบคลุมค่าของตัวแปรที่อยู่ในส่วนเงื่อนไข IF ยกตัวอย่างระบบควบคุมแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีค่าของตัวแปรแรงดันเอาต์พุตที่เป็นไปได้ คือ {'ต่ำ' 'พอดี' 'สูง'} ดังนั้นส่วนเงื่อนไขกฎของฟัซซีจะครอบคลุมค่าดังกล่าวเช่น

Rule 1 : IF V_o is Low THEN output is increase d

Rule 2 : IF V_o is Fit THEN output is constant d

Rule 3 : IF V_o is High THEN output is decrease d

หรือ

กฎ 1 : ถ้า แรงดันเอาต์พุต เท่ากับ ต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง แล้ว เอาต์พุต เป็น เพิ่ม d

กฎ 2 : ถ้า แรงดันเอาต์พุต เท่ากับ พอดีกับแรงดันอ้างอิง แล้ว เอาต์พุต เป็น คงที่ d

กฎ 3 : ถ้า แรงดันเอาต์พุต เท่ากับ สูงกว่าแรงดันอ้างอิง แล้ว เอาต์พุต เป็น ลด d

กฎของฟัซซีประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วน IF และส่วน THEN ตามทฤษฎีแบบดั้งเดิม เมื่อค่าเงื่อนไขในส่วน IF เป็นจริง ส่วน THEN จะถูกประเมิน แต่ในทางทฤษฎีของ ฟัซซี ค่าเงื่อนไขในส่วน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกภาพ ซึ่งจะให้ค่าสัมพันธ์ในระดับนั้น ๆ ด้วยค่าเงื่อนไขในส่วน IF ซึ่งสามารถมีได้หลายค่าเช่นเดียวกับส่วนของ THEN ดังต่อไปนี้ (ปราชรี ประสมศักดิ์, 2554)

IF x is A AND y is B OR z is C
 THEN p is D
 q is E

เงื่อนไขในส่วน IF จะถูกประเมินพร้อมกันและรวมกันด้วยตัวดำเนินการทางฟัซซีเซต เช่น อินเตอร์เซกชัน (AND) และยูเนียน (OR) ถ้าเงื่อนไขทั้งหมดเป็นจริงแล้ว ส่วนของ THEN จะถูกประเมินนำไปเป็นของปฏิบัติสำหรับการควบคุม โดยปกติแล้วจะจำกัดจำนวนเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไป โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้น เพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซีในภายหลัง จำนวนเงื่อนไขดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรภาษาภายในระบบ การออกแบบระบบควบคุมแรงดันในรูปที่ 6.5 ซึ่งมีอินพุต 2 ตัวแปร ได้แก่ $error$ และ $error\ rate$ และ 1 เอาต์พุต คือ Δd ตัวอย่างการออกแบบกฎของฟัซซีระหว่างตัวแปรทั้ง 3 มีดังนี้

Rule 1: IF error = P AND error rate = N THEN $\Delta d = I$

Rule 2: IF error = Z AND error rate = N THEN $\Delta d = D$

Rule 3: IF error = N AND error rate = N THEN $\Delta d = D$

Rule 4: IF error = N AND error rate = N THEN $\Delta d = D$

Rule 5: IF error = N AND error rate = P THEN $\Delta d = D$

Rule 6: IF error = Z AND error rate = P THEN $\Delta d = I$

Rule 7: IF error = P AND error rate = P THEN $\Delta d = I$

Rule 8: IF error = P AND error rate = Z THEN $\Delta d = I$

Rule 9: IF error = Z AND error rate = Z THEN $\Delta d = NC$

คำอธิบายกฎฟัซซีจะขอยกตัวอย่างกฎข้อที่ 1 4 และ 9 ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 ถ้าหาก $V_o < V_{ref}$ และ V_o กำลังเพิ่มขึ้น หมายความว่า *error* เป็นบวกและกำลังลดลง ดังนั้น *error rate* จะมีค่าเป็นลบ ฉะนั้นแล้วต้องปรับสัญญาณควบคุม d ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยการกำหนดให้ Δd มีค่าเป็นบวกหรือเพิ่มขึ้น

เงื่อนไขที่ 4 ถ้าหาก $V_o > V_{ref}$ และ V_o กำลังเพิ่มขึ้น หมายความว่า *error* เป็นลบและกำลังลดลง ด้วยเหตุนี้ *error rate* จึงมีค่าเป็นลบ ฉะนั้นแล้วต้องปรับสัญญาณควบคุม d ให้มีค่าลดลงด้วยการกำหนดให้ Δd มีค่าเป็นลบหรือลดลง

เงื่อนไขที่ 9 ถ้าหาก $V_o = V_{ref}$ และ V_o คงที่ หมายความว่า *error* เป็นศูนย์และคงที่ ด้วยเหตุนี้ *error rate* จึงมีค่าเป็นศูนย์ ฉะนั้นแล้วสัญญาณควบคุม d ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง ด้วยการกำหนดให้ Δd มีค่าเป็นศูนย์หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต *error* จำนวน 3 ค่า และอินพุต *error rate* จำนวน 3 ค่า โดยมี 1 เอาต์พุต คือ Δd จำนวนกฎฟัซซีที่เป็นไปได้สำหรับระบบควบคุมแรงดันจะมีค่าเท่ากับ 9 กฎ ($3 \times 3 = 9$) กฎของฟัซซีทั้ง 9 ข้อ สามารถเขียนในรูปแบบตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 6.2 กฎฟัซซีสำหรับควบคุมแรงดันวงจรลดทอนระดับแรงดัน

Δd		<i>error</i>		
		N	Z	P
<i>error rate</i>	N	D	D	I
	Z	D	NC	I
	P	D	I	I

6.2.3 การอนุมานฟัซซี

การอนุมานฟัซซี (fuzzy inference) คือ การส่งค่า (mapping) จากอินพุตของระบบที่พิจารณาไปเป็นค่าเอาต์พุต โดยใช้ทฤษฎีทางฟัซซี วิธีการอนุมานที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธีการ คือ การอนุมานแบบ Mamdani และการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เพราะเป็นวิธีที่มีความเรียบง่ายในการคำนวณและการโปรแกรม อีกทั้งยังมีความสะดวกในขั้นตอนการรวมกฎอีกด้วย รูปแบบการอนุมานตามวิธี Sugeno มีฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันเส้นตรงโทนแทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบฟัซซีเซต ดังนั้น ส่วนของกฎฟัซซีจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

IF x is A AND y is B

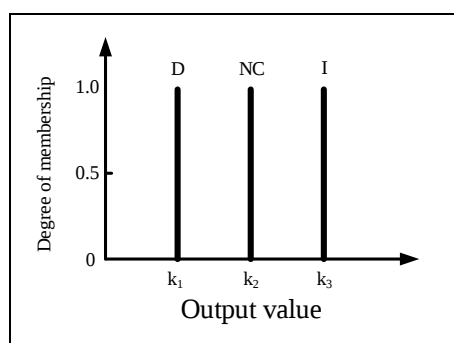
THEN z is $f(x,y)$

โดยที่ x y และ z คือ ตัวแปรภาษา A และ B คือ ค่าเชิงภาษา $f(x,y)$ คือ ฟังก์ชันเส้นตรง ตัวอย่างฟังก์ชัน $f(x,y)$ ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ฟังก์ชันแบบจำลองฟัซซีของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์ (zero order Takagi-Sugeno fuzzy model) ซึ่งมีลักษณะดังนี้

IF x is A AND y is B

THEN z is k

โดยที่ k เป็นค่าคงที่ ตัวอย่างการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno สำหรับระบบควบคุมแรงดันด้วยรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรงค่าคงที่ 3 ค่าเชิงภาษาแสดงได้ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรงโทน

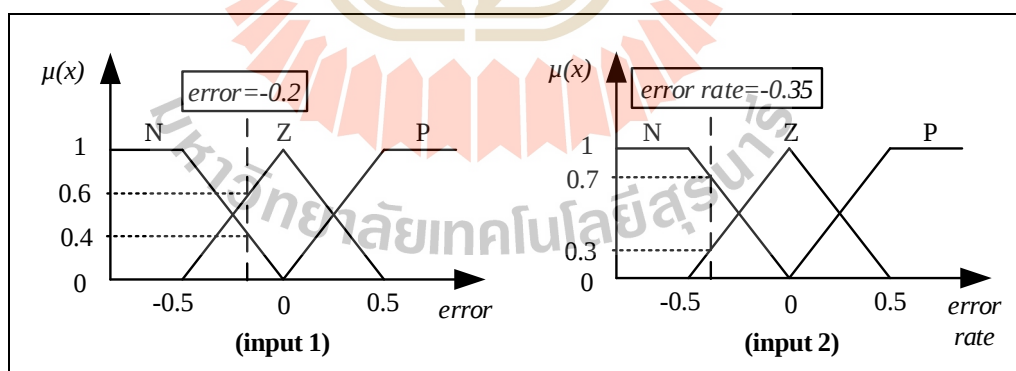
6.2.4 การทำดีฟัซซี่

การทำดีฟัซซี่ฟิเคชันหรือการทำดีฟัซซี่ (defuzzification) คือ กระบวนการสุดท้ายที่ใช้แปลงเอาต์พุตแบบฟัซซี่ไปเป็นเอาต์พุตปกติธรรมดา การทำดีฟัซซี่สำหรับการอนุมานด้วยวิธี Mamdani มีหลายวิธี ได้แก่ การหาจุดศูนย์กลางถ่วง (center of gravity) ไปเซกเตอร์ (bisector of maximum) วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (smallest of maximum) วิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด (largest of maximum) และวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (mean of maximum) เป็นต้น ในขณะที่การทำดีฟัซซี่สำหรับการอนุมานด้วยวิธี Takagi-Sugeno สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.4) ค่าเอาต์พุตที่จากการทำดีฟัซซี่นี้เรียกว่าวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average: WA)

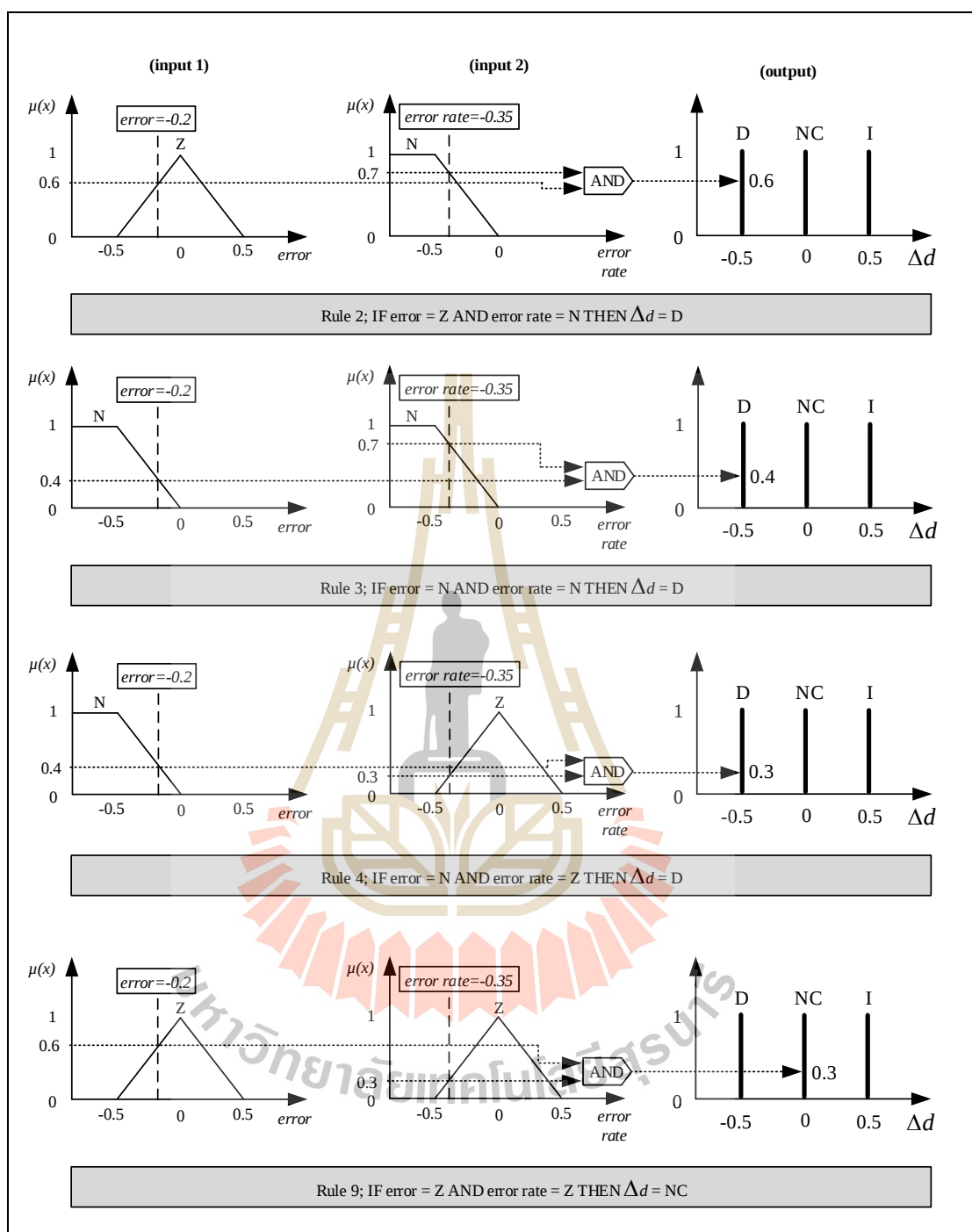
$$WA = \frac{\sum_{m=1}^L \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^L \mu(k_m)} \quad (6.4)$$

โดยที่ $\mu(k_m)$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของเส้นตรงโทน k_m

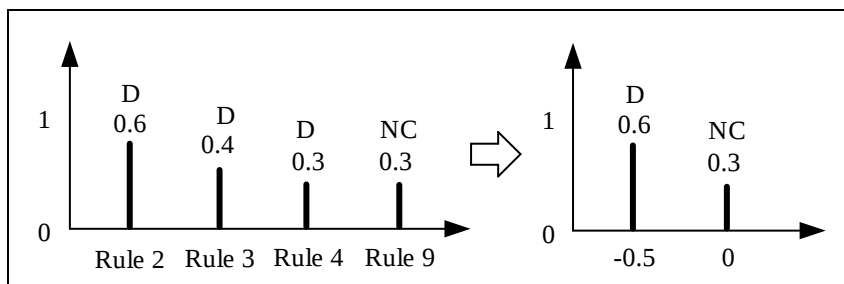
ตัวอย่างการอนุมานฟัซซี่ด้วยวิธี Takagi-Sugeno สมมุติให้ $error = -0.2$ และ $error\ rate = -0.35$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ตัวอย่างการทำฟัซซี่ของระบบควบคุมแรงดัน



รูปที่ 6.10 การอนุมานแบบ Sugeno



รูปที่ 6.11 การรวมกฎแบบ Sugeno

พิจารณาจากฟังก์ชันสมาชิกในรูปที่ 6.7 ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่ $error = -0.2$ จะมีค่าอยู่ในเซต N และ Z ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ซึ่งมีค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซต N = 0.4 และ Z = 0.6 ค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.3) ในทำนองเดียวกัน อัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนที่ $error\ rate = -0.35$ จะมีค่าอยู่ในเซต N และ Z ซึ่งคำนวณค่าระดับความเป็นสมาชิกได้เท่ากับ 0.7 และ 0.3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามกฎฟัซซีที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.2.3 จะเข้าเงื่อนไข 4 ข้อ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 6.9 พิจารณาการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno จะได้ว่า

$$WA = \frac{0.6(-0.5) + 0.3(0)}{0.6 + 0.3} = -0.333$$

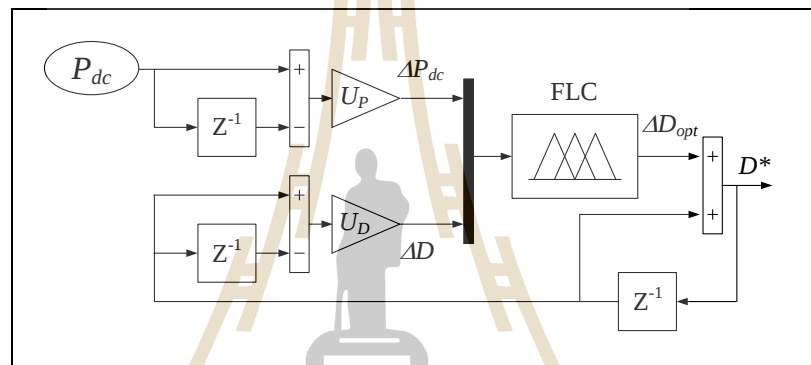
ในกรณีนี้ระบบควบคุมต้องปรับสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ให้ลดลงจากเดิม 0.333% เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันลดลง

6.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับ

ควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตที่นำเสนอในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ขนาดขั้นการค้นหา (step size: ΔD) มีนัยสำคัญต่อสมรรถนะการควบคุม รวมถึงหากระบบมีพิกัดที่แตกต่างกัน การกำหนดให้ ΔD เป็นค่าคงที่อาจไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้คิดค้นและพัฒนาวิธีการควบคุมดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยการทำให้ ΔD มีการปรับตัวได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงกว้างได้ ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่สามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องอาศัย

แบบจำลองของระบบ จึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นกลไกปรับค่า ΔD ที่เหมาะสมกับการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ โครงสร้างระบบควบคุมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.12 ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้มี อินพุต 2 ตัวแปรและ 1 เอาต์พุต ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (ΔP_{dc}) และค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เปลี่ยนแปลง (ΔD) ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นเป็นตัวแปรอินพุต ซึ่งคำนวณได้จากค่าในรอบปัจจุบันเทียบกับค่าในอดีตตามสมการที่ (6.5) และ (6.6) ตามลำดับ ตัวแปรเอาต์พุตคือ ขนาดขั้นการค้นหาที่เหมาะสม ΔD_{opt}



รูปที่ 6.12 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่อิงการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต

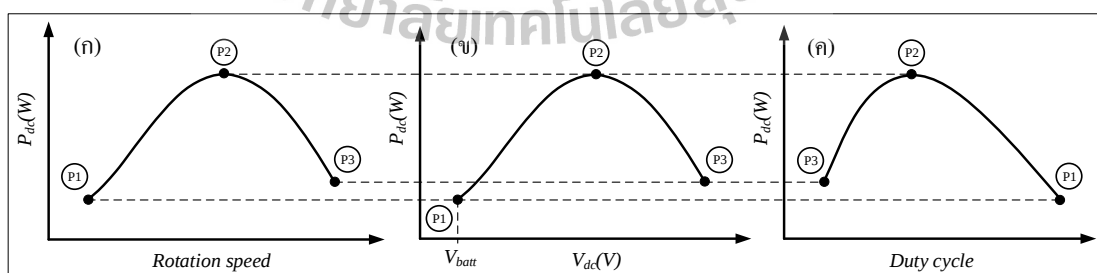
$$\Delta P_{dc}(k) = U_P (P_{dc}(k) - P_{dc}(k-1)) \quad (6.5)$$

$$\Delta D(k) = U_D (D(k) - D(k-1)) \quad (6.6)$$

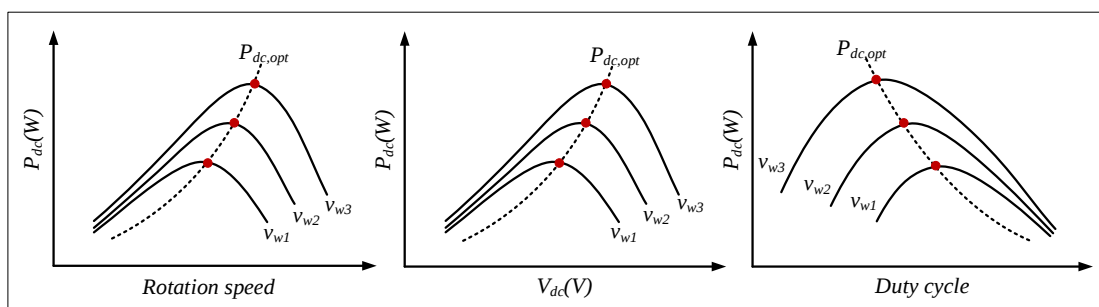
- เมื่อ $\Delta P_{dc}(k)$ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในการสุ่มรอบที่ k
 $\Delta D(k)$ คือ ปริมาณวัฏจักรหน้าที่ที่เปลี่ยนแปลงในการสุ่มรอบที่ k
 $P_{dc}(k)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกสุ่มในรอบที่ k
 $P_{dc}(k-1)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกสุ่มในรอบที่ $k-1$
 $D(k)$ คือ วัฏจักรหน้าที่ที่ถูกสุ่มในรอบที่ k
 $D(k-1)$ คือ วัฏจักรหน้าที่ที่ถูกสุ่มในรอบที่ $k-1$

U_p และ U_D คือ ค่าสเกลเฟลคเตอร์สำหรับการทำอนัลไลซ์ ซึ่ง U_p ขึ้นอยู่กับพิกัดของระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้า

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ อาศัยความรู้ความเข้าใจของผู้ชำนาญเกี่ยวกับระบบที่พิจารณา ด้วยเหตุนี้ในลำดับแรกจึงขออธิบายเกี่ยวกับพฤติกรรมการทำงานของระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ โดยรายละเอียดพฤติกรรมของระบบสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 6.13 คุณลักษณะความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้า P_{dc} เทียบความเร็วรอบ ω แสดงในรูปที่ 6.13(ก) ซึ่งมีการระบุจุดทำงานหลัก ๆ 3 จุดด้วยกัน การทำงานของระบบเริ่มจากความเร็วรอบต่ำที่จุด P1 จุดกำลังสูงสุด P2 และจุดที่มีความเร็วรอบสูง P3 โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วง P1 ถึง P2 จะเรียกว่า หน้าเส้นโค้ง ซึ่งมีความชันเป็นบวกและช่วง P2 ถึง P3 เรียกว่า หลังเส้นโค้ง ซึ่งจะมีค่าความชันเป็นลบ ในรูปที่ 6.13(ข) แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ V_{dc} สังเกตได้ว่ามีลักษณะสอดคล้องกับความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ ω เพราะ V_{dc} แปรผันตาม ω แต่เมื่อวิเคราะห์จุดการทำงานของระบบบนคุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D พบว่า มีความแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.13(ค) เนื่องจากแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อที่ด้านเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดัน ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าคงที่เท่ากับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ (V_{batt}) การปรับเปลี่ยนค่า D จึงทำให้ V_{dc} ที่เป็นอินพุตของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงแทน ในกรณีที่ V_{batt} เริ่มต้นที่ P1 ดังแสดงในรูปที่ 6.13(ข) กำหนดให้ D เริ่มต้นที่ 100% และปรับลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้จุดการทำงานของระบบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.13(ค) โดยจุดปฏิบัติการ P1 จะเริ่มต้นจากด้านหลังเส้นโค้งและจุด P3 ถูกย้ายมาอยู่หน้าเส้นโค้งแทน กล่าวคือ ด้านหน้าและด้านหลังเส้นโค้งสลับกัน เมื่อพิจารณาคุณลักษณะความสัมพันธ์ต่าง ๆ ในสถานะความเร็วรอบที่แตกต่างกันจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.14



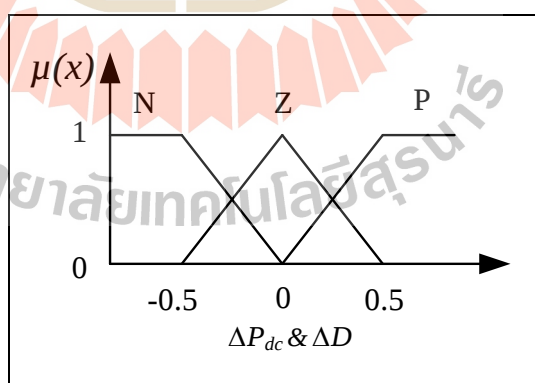
รูปที่ 6.13 พฤติกรรมการทำงานของระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ



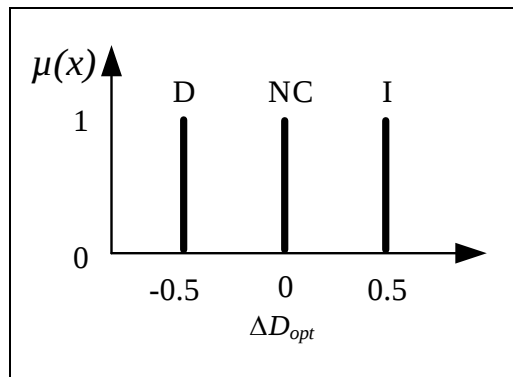
รูปที่ 6.14 พฤติกรรมการทำงานของระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ
ในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบที่ได้กล่าวในข้างต้นสามารถนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ในรูปที่ 6.14 ได้ดังนี้

ฟังก์ชันสมาชิกตัวแปรอินพุตในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เป็นรูปร่างสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมูด้วยข้อดีที่สามารถโปรแกรมง่ายและมีความรวดเร็วในการคำนวณ การออกแบบในเบื้องต้นเลือกใช้ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุต 3 ฟัซซี่เซต โดยกำหนดให้มีความสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 6.15 การอนุมานเลือกใช้แบบ Sugeno ที่มีฟังก์ชันเอาต์พุตเป็นเส้นโทนที่มี 3 ฟัซซี่เซตแสดงได้ดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.15 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต



รูปที่ 6.16 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต

การออกแบบค่าเชิงภาษาและตัวแปรภาษา พิจารณาได้จากกราฟคุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ในรูปที่ 6.13(ค) วิเคราะห์ความเป็นไปได้หลัก ๆ โดยใช้ค่าในปัจจุบันเทียบกับค่าในอดีต ดังนี้

ตัวแปรอินพุต ΔP_{dc} มีความเป็นไปได้ 3 กรณี ได้แก่

กรณี $P_{dc}(k) > P_{dc}(k-1)$ ΔP_{dc} จะมีค่าเป็นบวก (Positive, P)

กรณี $P_{dc}(k) = P_{dc}(k-1)$ ΔP_{dc} จะมีค่าเป็นศูนย์ (Zero, Z)

กรณี $P_{dc}(k) < P_{dc}(k-1)$ ΔP_{dc} จะมีค่าเป็นลบ (Negative, N)

ตัวแปรอินพุต ΔD มีความเป็นไปได้ 3 กรณี ได้แก่

กรณี $D(k) > D(k-1)$ ΔD จะมีค่าเป็นบวก (Positive, P)

กรณี $D(k) = D(k-1)$ ΔD จะมีค่าเป็นศูนย์ (Zero, Z)

กรณี $D(k) < D(k-1)$ ΔD จะมีค่าเป็นลบ (Negative, N)

ในขณะที่การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle: D) ดังนั้น สัญญาณควบคุม D จะต้องสามารถปรับเพิ่มขึ้นและลดลงได้ ด้วยเหตุนี้ ตัวแปรเอาต์พุตของฟัซซี่ ΔD_{opt} จึงมีความเป็นไปได้ 3 กรณี ดังนี้

เมื่อต้องการปรับให้ D ลดลง (Decrease, D) ΔD_{opt} จะมีค่าเป็นลบ

เมื่อต้องการให้ D ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (No Change, NC) ΔD_{opt} จะมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อต้องการปรับให้ D เพิ่มขึ้น (Increase, I) ΔD_{opt} จะมีค่าเป็นบวก

ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษาของอินพุตและเอาต์พุตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.3 ดังนี้

ตารางที่ 6.3 ตัวแปรทางภาษาและค่าทางภาษาสำหรับควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

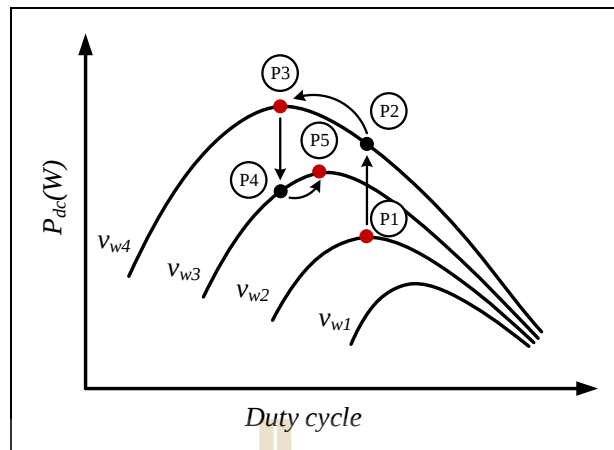
ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	ΔP_{dc}	อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า	N	P_{dc} ลดลง
			Z	P_{dc} คงที่
			P	P_{dc} เพิ่มขึ้น
	ΔD	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่	N	D ลดลง
			Z	D คงที่
			P	D เพิ่มขึ้น
เอาต์พุต	ΔD_{opt}	ค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม	D	ลดลง
			NC	ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
			I	เพิ่มขึ้น

การออกแบบกฎฟัซซีที่ใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต ΔP_{dc} จำนวน 3 ค่าและ ΔD จำนวน 3 ค่า จำนวนกฎฟัซซีที่เป็นไปได้สำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดจะมีเท่ากับ 9 กฎ โดยการออกแบบกฎต่าง ๆ วิเคราะห์ได้จากจุดการทำงานที่เปลี่ยนแปลงของระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ตัวอย่างจุดการทำงานที่เปลี่ยนแปลงบนความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ในรูปที่ 6.17 หากความเร็วลมเพิ่มจาก v_{w2} เป็น v_{w4} จุดการทำงานของระบบจะย้ายจาก P1 ไปที่ P2 ในกรณีนี้ ΔP_{dc} จะมีค่าเป็นบวกและ ΔD จะมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อบังคับให้การทำงานคู่เข้าสู่จุดที่มีกำลังสูงสุดที่จุด P3 จึงควรปรับ D ให้มีค่าลดลงด้วยการกำหนดให้ ΔD_{opt} ลดลงด้วยการกำหนดให้มีค่าเป็นลบ เมื่อการทำงานอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด P3 สถานการณ์นี้ ΔP_{dc} และ ΔD จะมีค่าเป็นศูนย์ ฉะนั้น D ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้ ΔD_{opt} ไม่มีการเปลี่ยนแปลงด้วยการกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ ลำดับถัดมาเมื่อความเร็วลมลดลงจาก v_{w4} เป็น v_{w3} การทำงานของระบบจะย้ายจากจุด P3 ไปที่ P4 ในกรณีนี้ ΔP_{dc} จะมีค่าเป็นลบและ ΔD จะมีค่าเป็นศูนย์ สถานการณ์นี้ D ควรมีการปรับเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ ΔD_{opt} มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการกำหนดให้มีค่าบวก เพื่อบังคับให้การทำงานของระบบย้ายจากจุด P4 ไปสู่จุดกำลังสูงสุดใหม่ที่จุด P5 จากสถานการณ์ตัวอย่างในรูปที่ 6.17 สามารถเขียนกฎฟัซซีได้ดังนี้

IF ΔP_{dc} is “P” AND ΔD is “Z” THEN ΔD_{opt} is “D”

IF ΔP_{dc} is “Z” AND ΔD is “Z” THEN ΔD_{opt} is “NC”

IF ΔP_{dc} is “N” AND ΔD is “Z” THEN ΔD_{opt} is “I”



รูปที่ 6.17 ตัวอย่างการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

จากการวิเคราะห์การทำงานของการทำงานการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยคุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ สามารถเขียนกฎฟัซซี่ทั้งหมดได้ตามตารางที่ 6.4 ดังนี้

ตารางที่ 6.4 กฎฟัซซี่สำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

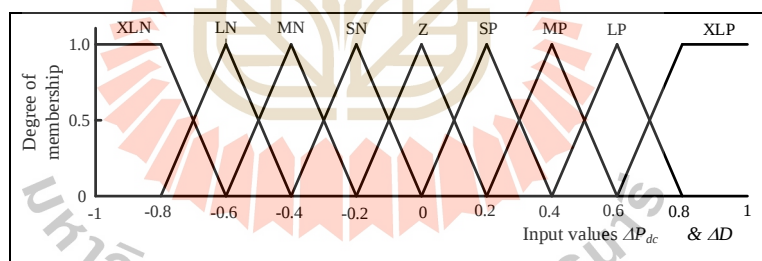
ΔD_{opt}		ΔP_{dc}		
		N	Z	P
ΔD	N	I	NC	D
	Z	I	NC	D
	P	D	NC	I

ค่าเอาต์พุตของฟัซซี่ $\Delta D_{opt}(k)$ คำนวณได้ด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ยตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.4 ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้สำหรับตามรอยกำลังสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.7)

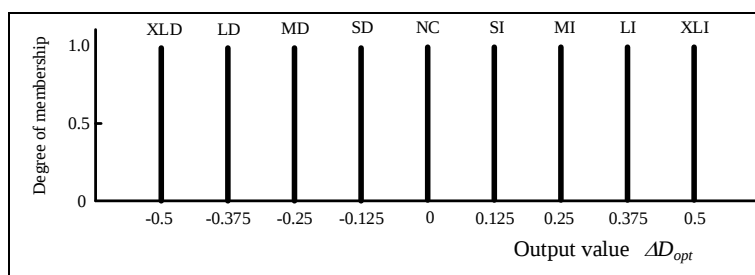
$$D^*(k) = D^*(k-1) + \Delta D_{opt}(k) \quad (6.7)$$

การออกแบบการควบคุมโดยใช้ตัวแปรฟัซซี่ 3 ค่า ดังที่ได้นำเสนอในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานการควบคุมแบบฟัซซี่ หนึ่งในแนวทางการเพิ่มสมรรถนะการควบคุมแบบฟัซซี่ให้ดียิ่งขึ้น สามารถ

ทำได้ด้วยการเพิ่มตัวแปรฟัซซี เพื่อลดความซับซ้อนในการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกที่เหมาะสม ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงพิจารณาเพิ่มจำนวนตัวแปรอินพุตเป็น 9 ฟัซซีเซตแบบสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 6.18 ซึ่งประกอบด้วย XLN (extra largely negative), LN (largely negative), MN (medium negative), SN (small negative), Z (zero), SP (small positive), MP (medium positive), LP (largely positive) และ XLP (extra largely positive) โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 6.19 กำหนดเป็นแบบ Sugeno ประกอบด้วย 9 ฟัซซีเซต คือ XLD (extra largely decrease), LD (largely decrease), MD (medium decrease), SD (small decrease), NC (no change), SI (small increase), MI (medium increase), LI (largely increase) และ XLI (extra largely increase) (วิไลพร เงินบาท, 2551) จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบและพื้นฐานการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต สามารถกำหนดกฎฟัซซีได้ทั้งหมด 81 กฎ ดังตารางที่ 6.5 รายละเอียดกฎฟัซซีทั้งหมด แสดงในภาคผนวก ก. ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวแปรเอาต์พุต คือ ปริมาณการแปลงของวัฏจักรหน้าที่ ดังนั้น จึงกำหนดให้มีค่ามากที่สุดที่เป็นไปได้เท่ากับ 0.5 หรือ 50% ของค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดัน ด้วยเหตุนี้ จึงกำหนดให้ค่าสเกลที่ใช้ทำให้เป็นเชิงเส้น U_D เท่ากับ 2 โดยที่ค่าสเกลที่ใช้ทำให้เป็นเชิงเส้น U_p จะขึ้นอยู่กับค่าพิกัดของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 6.18 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต



รูปที่ 6.19 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

ตารางที่ 6.5 กฎฟิชชี

ΔD_{opt}		ΔP_{dc}								
		XLN	LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP	XLP
ΔD	XLN	XLI	XLI	LI	LI	NC	LD	LD	XLD	XLD
	LN	XLI	LI	LI	MI	NC	MD	LD	LD	XLD
	MN	LI	LI	MI	SI	NC	SD	MD	LD	LD
	SN	LI	MI	SI	SI	NC	SD	SD	MD	LD
	Z	XLI	LI	MI	SI	NC	SD	MD	LD	XLD
	SP	LD	MD	SD	SD	NC	SI	SI	MI	LI
	MP	LD	LD	MD	SD	NC	SI	MI	LI	LI
	LP	LD	LD	LD	MD	NC	MI	LI	LI	XLI
	XLP	XLD	XLD	LD	LD	NC	LI	LI	XLI	XLI

6.4 การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุม

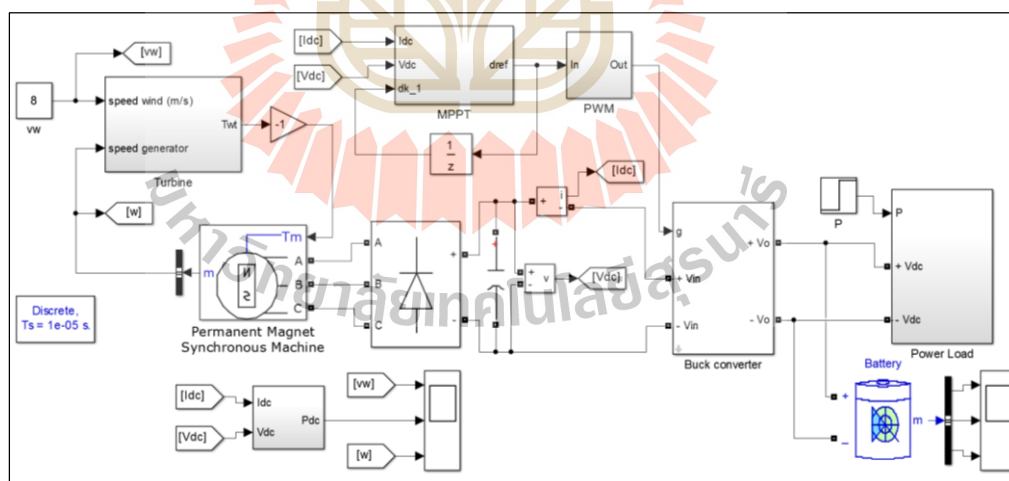
แบบฟิชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับระบบกักเก็บ

ผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่ได้นำเสนอในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหลักการควบคุมและสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟิชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต โดยในหัวข้อที่ 6.4.1 จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งดำเนินการทดสอบกับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 850 W นอกจากนี้ยังได้นำไปประยุกต์ใช้ระบบทดสอบพิกัด 500 W และ 300 W เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้าง โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต รวมถึงกฎฟิชชียังคงเหมือนเดิม อาศัยเพียงการกำหนดค่าสเกลสำหรับการทำให้เป็นเชิงเส้น (U_p) ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดของระบบที่พิจารณาเพียงเท่านั้น โดยจะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 6.4.2 ดังนี้

6.4.1 การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมโดยใช้ระบบทดสอบพิกัด 850 W

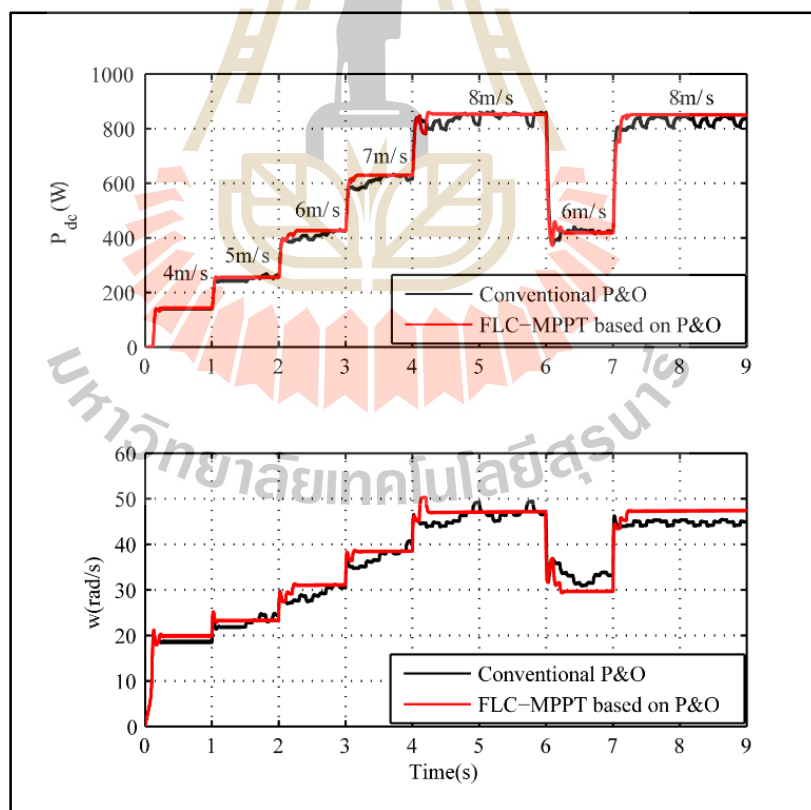
การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ในเบื้องต้นใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม SIMULINK ใน MATLAB ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.20 ประกอบด้วย กังหันลม (Turbine) ที่สร้างขึ้นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรลดทอนระดับแรงดัน ระบบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด แบบเตอร์รีและโหลดกำลังไฟฟ้า พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้จำลองสถานการณ์เหมือนกับที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 ซึ่งมีพิกัด 850 W ที่ความเร็วลม 8 m/s ดังนั้นจึงกำหนดค่าสเกลที่ใช้ทำให้เป็นเชิงเส้น U_p เท่ากับ $1/850$ ส่วนการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมใช้ขนาดขั้นการค้นหาค่า $\Delta D = 0.05$ เหมือนกับการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 5 รายละเอียดโปรแกรมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (MPPT) ด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต แสดงในภาคผนวก ง.



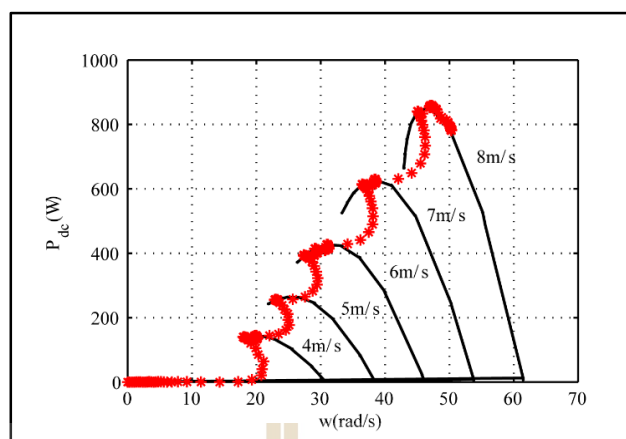
รูปที่ 6.20 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB

การจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังสูงสุด กำหนดให้สภาพความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด โดยเริ่มจากความเร็วลม 0 m/s เป็น 4 m/s ในเวลาที่ $t = 1$ วินาที และที่

เวลา $t = 2$ 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 ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.21 แสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงตามสภาพความเร็วลม การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด พบว่า เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการควบคุมแบบพีชซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต (FLC-MPPT based on P&O) สามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เข้าสู่จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่ได้เร็วกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม (Conventional P&O) รวมถึงเกิดการสั่นไหวที่บริเวณจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อยกว่าอีกด้วย รูปที่ 6.22 แสดงเส้นทางเดินของการตามรอยกำลังสูงสุดเทียบกับกราฟคุณลักษณะของกังหันลม พบว่า ทางเดินของกำลังไฟฟ้าที่พยายามลู่เข้าสู่จุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ ซึ่งยืนยันได้ว่าระบบสามารถตามรอยกำลังสูงสุดได้สอดคล้องตามความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.21 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.22 เส้นทางการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชี
ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต

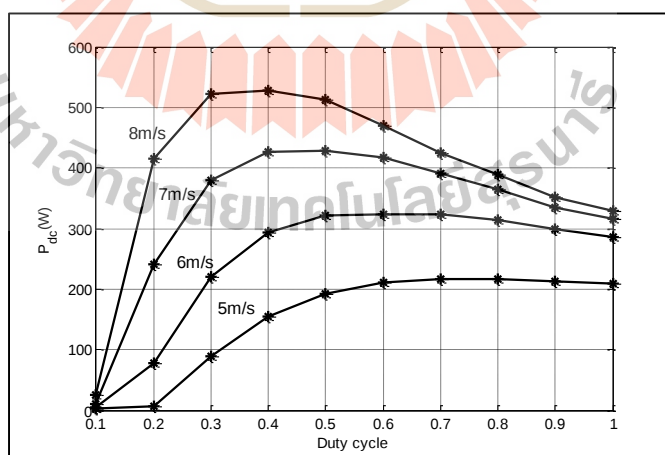
6.4.2 การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุม แบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตกับระบบทดสอบ

พิกัด 500 W และ 300 W

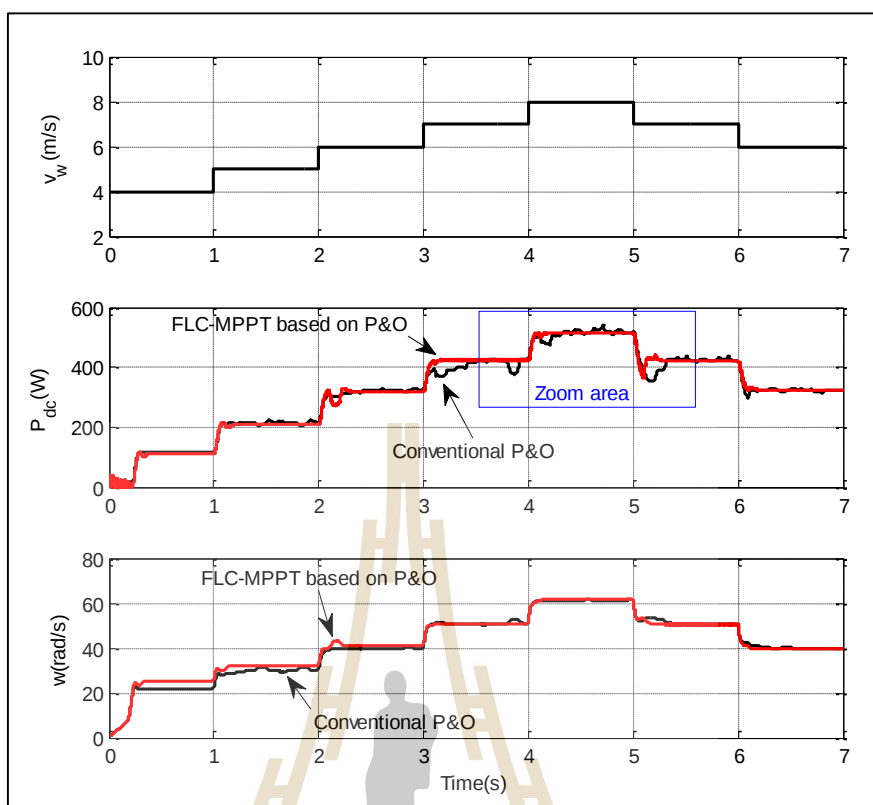
ผลจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดกับระบบ
กักเก็บลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 850 W ในหัวข้อที่ 6.4.1 แสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมที่
นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม เพื่อแสดง
ให้เห็นว่าวิธีการควบคุมที่พัฒนาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในช่วงกว้างหรือในกรณีที่ระบบทดสอบ
มีค่าพิกัดแตกต่างกัน โดยไม่ต้องออกแบบกฎการควบคุมใหม่ อัลกอริทึมการควบคุมใช้ค่าพิกัดของ
ระบบทดสอบเพื่อกำหนดค่า U_p เพียงเท่านั้น ซึ่งต่างจากการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการ
สังเกตแบบดั้งเดิมที่จำเป็นต้องทดสอบหาขนาดขั้นการค้นที่เหมาะสมจึงจะทำให้การควบคุมมี
ประสิทธิภาพ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงเป็นการนำวิธีการควบคุมที่พัฒนามาใช้กับระบบทดสอบพิกัด
500 W และ 300 W โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ระบบกักเก็บลมผลิตไฟฟ้า
แบบอิสระพิกัด 500 W มีพารามิเตอร์ดังตารางที่ 6.6 ระบบทดสอบดังกล่าวมีพิกัด 500 W ฉะนั้น
อัลกอริทึมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการ
สังเกตจึงกำหนดให้ U_p เท่ากับ $1/500$ ส่วนการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม
ใช้ขนาดขั้นการค้นหา $\Delta D = 0.05$ เหมือนกับการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 5 ข้อมูลอ้างอิงสำหรับ
ตรวจสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดพิจารณาจากคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง P_{dc} เทียบ
 D ของระบบทดสอบพิกัด 500 W ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบ
สมรรถนะการควบคุมทั้ง 2 วิธี แสดงดังรูปที่ 6.24

ตารางที่ 6.6 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 500 W

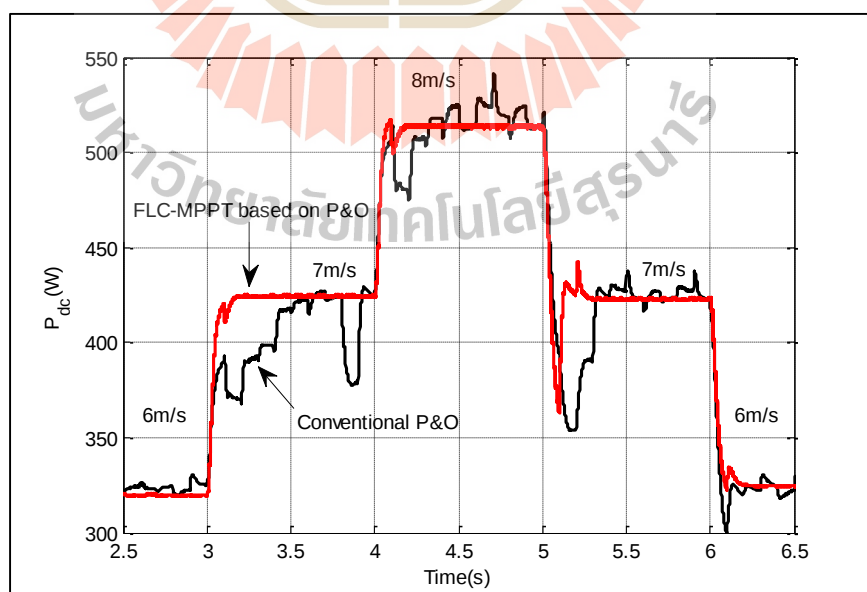
พารามิเตอร์กังหันลม	รายละเอียด
R	1.5 m
ρ	1.255 kg/m ³
พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รายละเอียด
Power rate	500 W
Speed rate	500 rpm
number pole pairs	6
R_s	0.4 Ω
$L_d = L_q$	5 mH
J	0.016 kg.m ²
พารามิเตอร์วงจรระดับแรงดัน	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
C_o	500 μ F
Battery	24 V



รูปที่ 6.23 คุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ของระบบทดสอบพิกัด 500 W



รูปที่ 6.24 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 500 W



รูปที่ 6.25 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.24

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในรูปที่ 6.24 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่สกัดได้จากระบบมีการเปลี่ยนแปลงตาม ในสถานะที่ความเร็วลมคงที่ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดจะควบคุมการทำงานของกังหันลมให้ไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมจะตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้า (ΔP_{dc}) และนำไปวิเคราะห์ เพื่อกำหนดปริมาณการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่ (ΔD_{opt}) สำหรับการปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่เหมาะสมใหม่ ทำให้การทำงานของกังหันลมเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่ที่สอดคล้องกับความเร็วลม จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว พบว่า เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการควบคุมที่พัฒนายังคงสามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เคลื่อนที่ไปยังจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่ได้โดยใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม รวมถึงการสั่นไหวบริเวณจุดกำลังสูงสุดน้อยกว่าอีกด้วย ดังภาพขยายที่แสดงในรูปที่ 6.25 กล่าวได้ว่า ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม

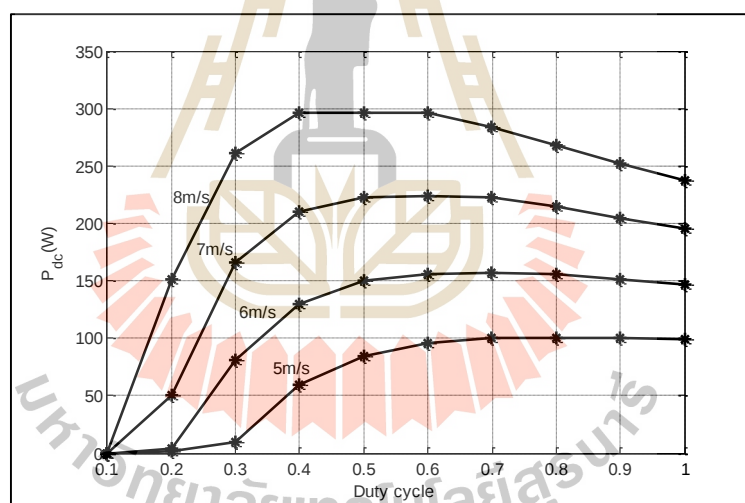
ในลำดับถัดมาเป็นการนำการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตมาประยุกต์ใช้กับระบบทดสอบพิกัด 300 W พารามิเตอร์ของระบบดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6.7 ระบบทดสอบมีพิกัด 300 W ดังนั้น อัลกอริทึมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตจึงกำหนดให้ U_p เท่ากับ $1/300$ ส่วนการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมยังคงใช้ขนาดขั้นการค้นหา $\Delta D = 0.05$ คุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ของระบบทดสอบพิกัด 300 W ที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแสดงในรูปที่ 6.26 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมของทั้ง 2 วิธี ในกรณีที่ระบบทดสอบมีพิกัด 300 W แสดงในรูปที่ 6.27

ตารางที่ 6.7 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 300 W

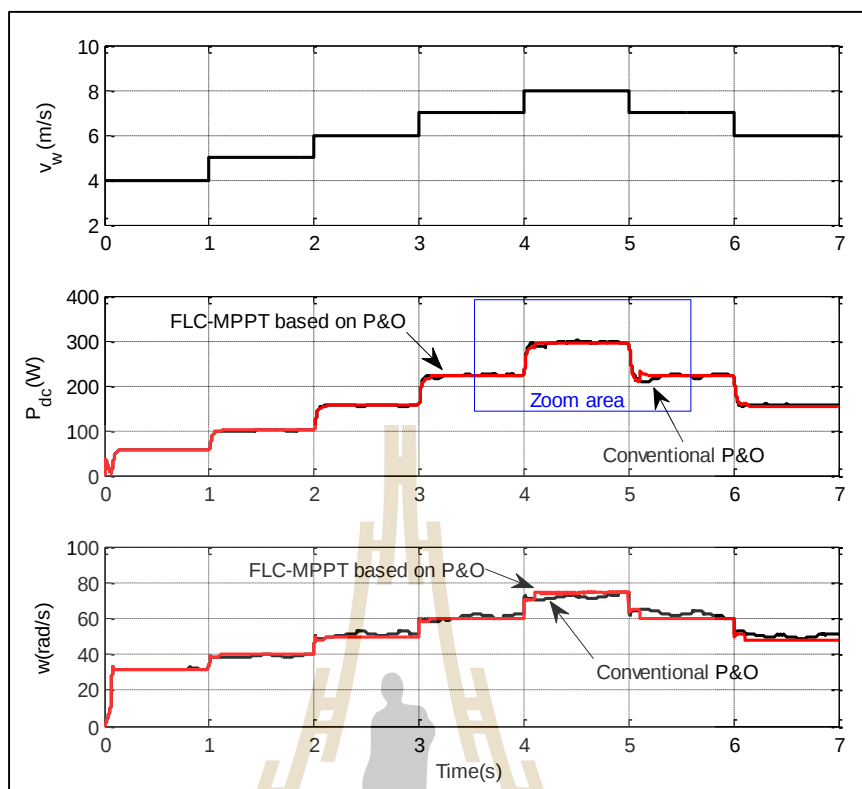
พารามิเตอร์กังหันลม	รายละเอียด
R	1.2 m
ρ	1.255 kg/m ³
พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รายละเอียด
Power rate	300 W

ตารางที่ 6.7 พารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 300 W (ต่อ)

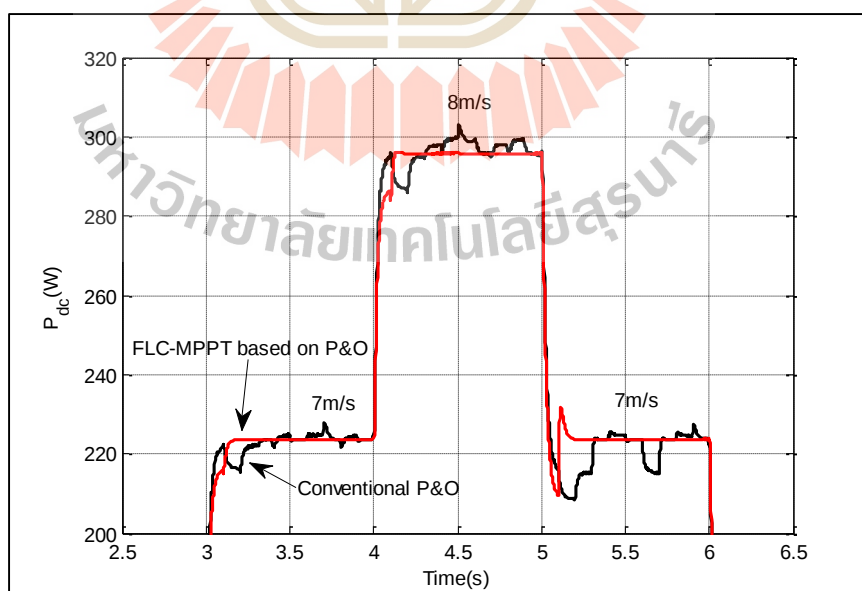
<i>Speed rate</i>	500 rpm
<i>number pole pairs</i>	6
R_s	0.47 Ω
$L_d = L_q$	5 mH
J	0.016 kg.m ²
พารามิเตอร์วงจรลดทอนระดับแรงดัน	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
C_o	500 μ F
<i>Battery</i>	12 V

รูปที่ 6.26 คุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ D ของระบบทดสอบ 300 W

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปแบบที่ 6.27 แสดงสถานะความเร็วลมที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด กำลังไฟฟ้าที่สกัดได้จากระบบและสัญญาณควบคุม จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 300 W ที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมที่พัฒนาสามารถสกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้สอดคล้องกับสถานะความเร็วลมที่มีการเปลี่ยนแปลงและยังคงมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม



รูปที่ 6.27 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 300 W



รูปที่ 6.28 ภาพขยายผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.27

ภาพขยายในรูปที่ 6.28 แสดงการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบระหว่าง 2 วิธีเปรียบเทียบกัน พบว่า วิธีการควบคุมที่พัฒนาสามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมเข้าสู่จุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ภายในเวลาอันสั้นและมีการสั่นไหวบริเวณจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงเล็กน้อย ซึ่งต่างจากการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมที่ใช้เวลามากกว่าในการเข้าสู่จุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและมีการสั่นไหวบริเวณจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าวิธีที่นำเสนอ

6.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการควบคุมแบบฟัซซี่ ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีพื้นฐานทางฟัซซี่ต่าง ๆ ได้แก่ ฟัซซี่เซต ฟังก์ชันสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา กฎฟัซซี่ และการอนุมานฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno ซึ่งได้รับการอธิบายควบคู่กับตัวอย่างการนำไปใช้เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดัน จากตัวอย่างการควบคุมแบบฟัซซี่นำไปสู่การนำมาประยุกต์ใช้ปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ โดยมีวัตถุประสงค์ให้การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้าง วิธีการควบคุมนี้พัฒนามาจากวิธีการรบกวนและการสังเกต โดยนำการควบคุมแบบฟัซซี่มาใช้เป็นกลไกในการปรับตั้งขนาดกำลังของการค้นหาให้กับการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต วิธีการควบคุมที่พัฒนานี้ เรียกว่า วิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต การออกแบบระบบควบคุมดังกล่าวได้รับการอธิบายพร้อมกับการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ รวมถึงการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแบบฟัซซี่ด้วยการเพิ่มจำนวนตัวแปรฟัซซี่ ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดกับระบบทดสอบพิกัด 850 W พบว่า การควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตมีสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ดีกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระพิกัด 500 W และ 300 W โดยผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ยังคงสามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้และมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าวิธีการควบคุมที่พัฒนาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในวงกว้างอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 7

ชุดทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับ ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

7.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอชุดทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ เพื่อใช้ดำเนินการทดสอบในทางปฏิบัติ ยืนยันหลักการควบคุมและผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 การออกแบบและสร้างชุดทดสอบ อุปกรณ์เครื่องมือวงจรไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง รวมถึงพื้นฐานการใช้อินเตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวบรวมและนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.2 การดำเนินการทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการและการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง การทดสอบในห้องปฏิบัติการอาศัยเครื่องจำลองกังหันลม ผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตที่ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระได้นำเสนอในหัวข้อที่ 7.4 ดังต่อไปนี้

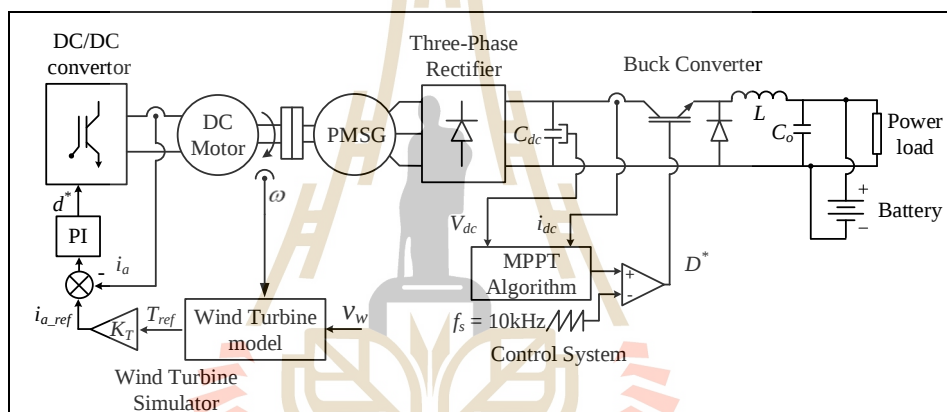
7.2 โครงสร้างชุดทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับ สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

ชุดทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดแสดงดังรูปที่ 7.1 ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญได้แก่ เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) และระบบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (MPPT) ภาพรวมของผลการดำเนินการสร้างชุดทดสอบของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 7.1 แสดงได้ดังรูปที่ 7.2 รายละเอียดการออกแบบและสร้างในส่วนต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

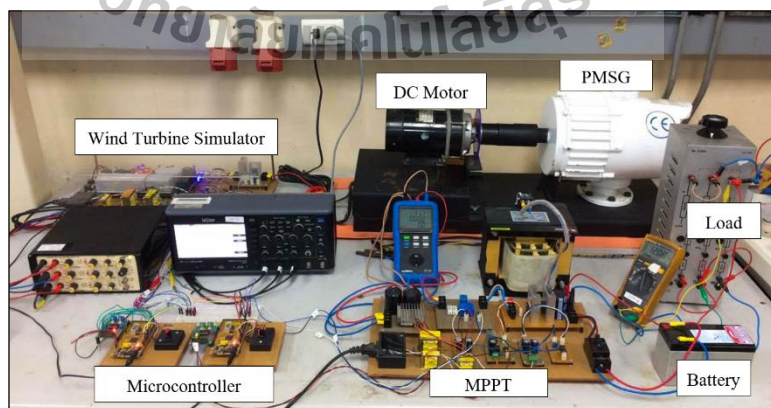
ส่วนที่หนึ่ง คือ เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกนำมาใช้ทดสอบแทนการทดสอบด้วยกังหันลมจริง เพราะสามารถกำหนดความเร็วลมที่ต้องการทดสอบได้โดยผู้ใช้งาน รายละเอียดการสร้างเครื่องจำลองนี้ได้รับการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 4

ส่วนที่สอง คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับใช้ในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ เครื่องกำเนิดไฟฟ้างกล่าวเชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องจำลองกังหันลม

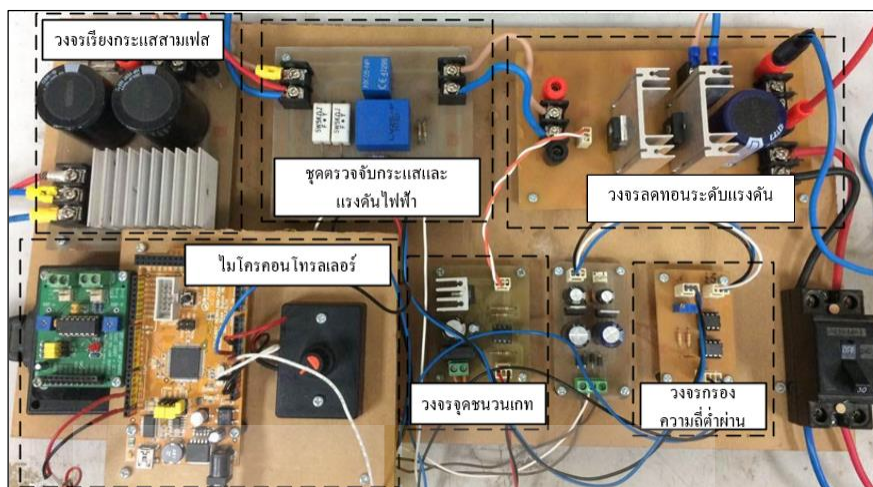
ส่วนที่สาม คือ ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ซึ่งประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับวงจรลดทอนระดับแรงดัน ชุดตรวจจับกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณและควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรจุดชนวนเกทแสดงได้ดังรูปที่ 7.3 โหลดของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบเป็นตัวต้านทานและแบตเตอรี่ องค์ประกอบที่สำคัญทั้ง 3 ส่วนดำเนินการสร้างเป็นชุดทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 7.1 ระบบทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 7.2 ชุดทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ



รูปที่ 7.3 ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

7.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีพิกัด 500 W 21 A 500 rpm ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางกลในการหมุนเป็นพลังงานทางไฟฟ้า รูปร่างลักษณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร

7.2.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวร ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส จึงใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ

เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้สำหรับการควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรของกังหันลมผลิตไฟฟ้าพิกัด 500 W 21 A จึงเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบโมดูลขนาด 600 V 35 A ดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 โมดูลตัวเรียงกระแสสามเฟส

7.2.3 การสร้างชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า

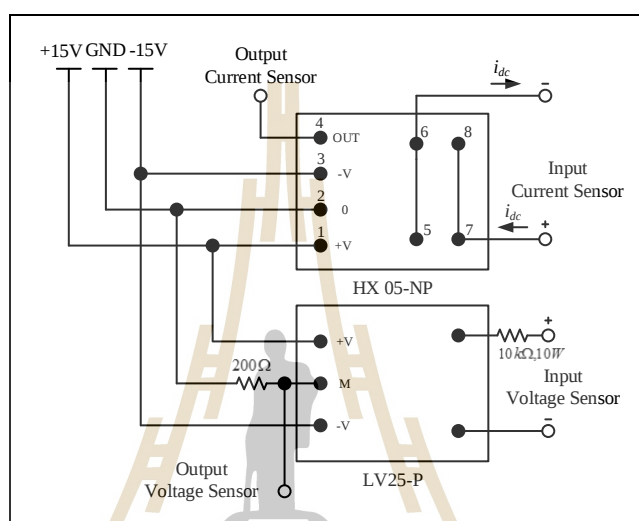
สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จำเป็นต้องใช้ชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด โดยในส่วนของชุดตรวจจับแรงดันผู้วิจัยได้เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25 ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าพิกัดที่ 500 V และกระแส 10 mA วงจรตรวจจับต้องการไฟเลี้ยง +15V, 0V และ -15V และต้องมีการออกแบบค่าความต้านทานต้านแรงสูงเพื่อไม่ให้มีกระแสเกินพิกัดที่กำหนด โดยสามารถคำนวณค่าความต้านทานได้จากสมการที่ (7.1) กำหนดให้แรงดันต้านแรงสูงที่ 100 V จะได้

$$R_{HV} = \frac{V_{HV}}{I_{HV}} = \frac{100}{10 \times 10^{-3}} = 10k\Omega \quad (7.1)$$

ในส่วนค่าความต้านทานแรงต่ำจะใช้ค่าความต้านทานที่ปรับจูนโดยการทดสอบเพื่อไม่ให้แรงดันไฟฟ้าเกิน 5 V ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่บอร์ด AVR สามารถอ่านได้ โดยค่าความต้านทานที่ใช้คือ 200Ω

สำหรับในส่วนของวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัด 30 A ทำหน้าที่ในการวัดกระแสไฟฟ้า โดยใช้ไฟเลี้ยง +15V, 0V และ -15V ร่วมกับตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ภาพรวมการต่อวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 7.6

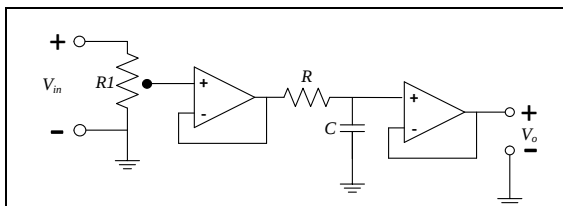
และวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานจริงดังรูปที่ 7.7 โดยเอาต์พุตของวงจรตรวจจับกระแสจะนำไปเข้าวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและวงจรกันชนในรูปที่ 7.8 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณได้เลือกค่าความถี่ตัดข้ามที่ 10 Hz ซึ่งมีความต้านทานปรับค่าได้ $R1 = 5k\Omega$ ทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณเพื่อไม่ให้เกินพิกัดของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ พารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณที่ใช้งานมีค่า $R = 165k\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C = 0.1\mu F$



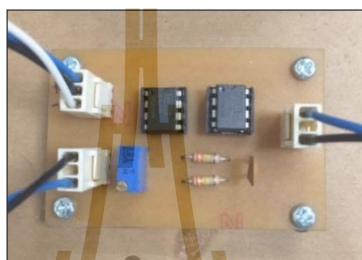
รูปที่ 7.6 ภาพรวมการต่อวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 7.7 วงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 7.8 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและวงจรกันชน



รูปที่ 7.9 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

การทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าดำเนินการโดยการเพิ่มค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสด้วยการปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรให้มีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสทดสอบได้ดังตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.1 ผลทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

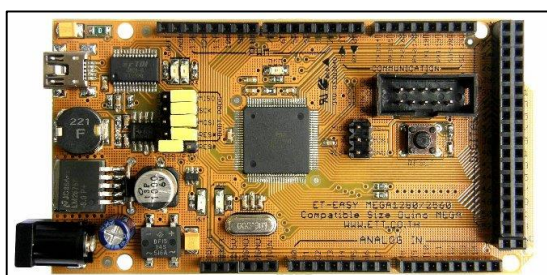
$V_{dc}(V)$	$V_{sen,dc}(V)$
0	0
10	0.56
20	0.97
30	1.48
40	1.98
50	2.43
60	2.92
70	3.5
80	4.1

ตารางที่ 7.2 ผลทดสอบวงจรตรวจจ่ายกระแสไฟฟ้า

$I_{dc}(A)$	$V_{sen,Idc}(V)$
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

7.7.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท ATMEL โดย AVR จัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลใหม่จาก ATMEL ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูง เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งานในขณะที่ยังคงความมีประสิทธิภาพที่เท่ากัน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เบอร์ ATMEGA 1280 เพราะง่ายต่อการโปรแกรมและสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย โดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้กับชิพ AVR ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้มีจำนวนพอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต รวมทั้ง พอร์ตดิจิตอล, พอร์ตแอนะล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM, พอร์ตการสื่อสารอนุกรม ผ่านมอดูและขนาดหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ทางบริษัท อีทีที จึงได้นำ ATMEGA 1280 มาพัฒนาเป็นชุดบอร์ด โดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA 1280 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 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) ที่เนกเกอร์กำหนดความถี่ได้
 - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
 - มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
 - มีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
 - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
 - เชื่อมประสานแบบอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งแบบมาสเตอร์และสเลฟ
 - มีการเชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น แบบส่งข้อมูลเรียงไปป์
 - มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ

- มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนาล็อกอยู่ในตัว
- มีการรองรับการขัดจังหวะและ เวก-อัพ (wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขาชีพ
- คุณสมบัติพิเศษ
 - มีระบบเริ่มระบบเมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับเกิดบราวน์เอาต์ (brown-out) ที่สามารถกำหนดการทำงานได้
 - มีตัวตรวจจับหาความเที่ยงตรงของออสซิลเลเตอร์อยู่ในตัว
 - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายในและภายนอก
 - อินพุต/เอาต์พุต และตัวถัง
 - มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 พิน
 - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
 - ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -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

การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (analog to digital converter) ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5V ซึ่งหมายถึงเมื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0-1024 โดยมีมอดู ADC จำนวน 16 ช่อง อินพุตสัญญาณ คือ ADC0-ADC15 ซึ่งจะกำหนดไว้ที่พอร์ต F ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ช่องสัญญาณเพียง 2 ช่อง คือช่อง ADC0 และ ช่องADC1 โดยผลการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล คำนวณได้จากสมการที่ (7.2)

$$ADC = \frac{V_{IN} 1024}{V_{REF}} \quad (7.2)$$

โดยที่ V_{IN} คือ แรงดันด้านขาอินพุต

V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5V

การสร้างสัญญาณ PWM กับไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 1

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 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 (7.3) ดังนี้

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk}}{2 \cdot N \cdot TOP} \quad (7.3)$$

โดยที่ N คือ ค่าปริสเกลเลอร์ (ตัวลดทอนสัญญาณ) ซึ่งมีค่าเป็น 1, 8, 64, 256 และ 1024 โดยสามารถกำหนดได้จากกรีจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับการกำหนดแหล่งสัญญาณนาฬิกา (TCCR1B) ในที่นี้กำหนดให้ $N=1$

TOP คือ ค่าที่กำหนดให้กับกรีจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

f_{clk} คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาในที่นี้ใช้ 16 MHz

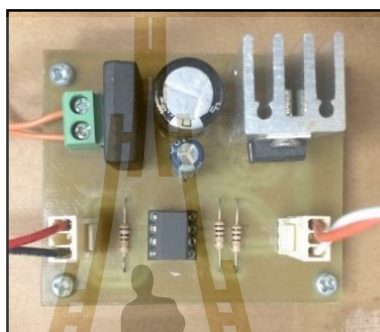
สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความถี่การสวิตช์มีค่าเท่ากับ 10 kHz ดังนั้น จากสมการที่ (7.4) จะสามารถหาค่าที่กำหนดให้กับกรีจิสเตอร์ IRC1 แสดงได้ดังนี้

$$TOP = \frac{16 \times 10^6}{2 \times 1 \times 10 \times 10^3} = 800 \quad (7.4)$$

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่องสัญญาณ PWM 11 เป็นพอร์ตเอาพุตของสัญญาณ PWM ซึ่งการนำสัญญาณดังกล่าวไปขับสวิตช์จะต้องผ่านวงจรแยกโคดสัญญาณ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ ซึ่งจะได้อธิบายในลำดับถัดไป

7.2.5 วงจรจุดชนวนเกท

การสร้างวงจรจุดชนวนเกทเพื่อควบคุมสวิตช์มอสเฟตของวงจรลดทอนระดับแรงดัน และแยกกราวด์ในส่วนของวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ในที่นี้คือบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ กับส่วนของวงจรไฟฟ้ากำลังในที่นี้คือวงจรลดทอนระดับแรงดัน เพื่อไม่ให้กราวด์ไฟฟ้าแรงต่ำและไฟฟ้าแรงสูงเชื่อมกัน ซึ่งช่วยป้องกันอันตรายต่อวงจรไฟฟ้าในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ สำหรับวงจรจุดชนวนเกทที่ใช้ คือ ไอซีเบอร์ PC923 ของบริษัท SHARP ดังรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 วงจรจุดชนวนเกท

7.2.6 วงจรลดทอนระดับแรงดัน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดัน ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้มอสเฟต ตัวไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ต้องคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแส เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในวงจร ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในวงจรลดทอนระดับแรงดันทำหน้าที่เป็นวงจรกรองสัญญาณ หรือวงจรกรองแบบ LC เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาพุตให้คงที่ การเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่าแรงดันพลัว (ripple voltage) และค่ากระแสพลัว (ripple current) อยู่ในระดับที่เหมาะสมและยอมรับได้ สามารถออกแบบค่าตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (7.5) และออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (7.6) ดังนี้

$$C = \frac{(1-d)V_{out}}{8Lf_s^2\Delta V_{out}} \quad (7.5)$$

$$L = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{f_s V_{in} \Delta I} \quad (7.6)$$

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันคือค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสและเอาต์พุตคือค่าแรงดันของแบตเตอรี่ (V_{batt}) โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบของวงจรลดทอนระดับแรงดัน 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 สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุต้องคำนึงถึงแรงดันพลีของแรงดันตกคร่อมโหลดและค่ากระแสพลีของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยพิจารณาจากสมการที่ (7.5) และ (7.6) ดังนั้นจึงสามารถออกแบบได้ดังนี้

$$L = \frac{13.8(50 - 13.8)}{10 \times 10^3 \times 50 \times 0.07} = 14.3 \text{ mH}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 15 mH

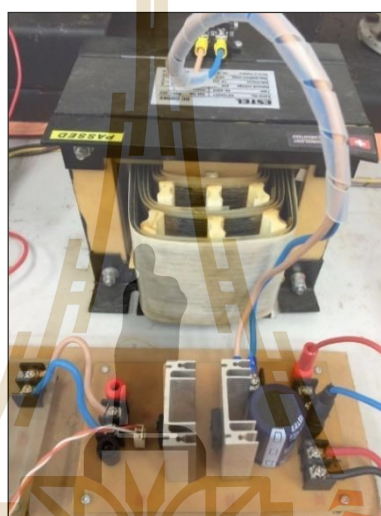
จากสมการที่ (3.15) $V_{out} = dV_{in}$ ถ้า $V_{in} = 50 \text{ V}$ และ $V_{out} = V_{out,max} = 13.8 \text{ V}$ จะได้ $d = 0.276$ แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ

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

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 470 μF พิกัดอุปกรณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ดังตารางที่ 7.3 ในรูปที่ 4.17 แสดงวงจรลดทอนระดับแรงดันที่นำมาสร้างใช้งานจริง

ตารางที่ 7.3 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดัน

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



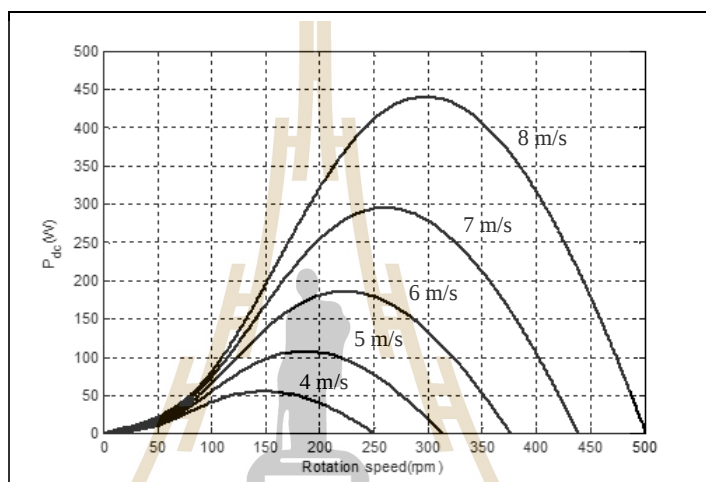
รูปที่ 7.12 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้งานจริง

7.3 การทดสอบระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

การทดสอบในภาคปฏิบัติของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ได้ดำเนินการสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ลำดับแรกเป็นการทดสอบคุณลักษณะของกักเก็บพลังงานสำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุม ซึ่งได้นำเสนอในหัวข้อที่ 7.3.1 การทดสอบหาขนาดขั้นการค้นหาค้นหาสำหรับการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมจะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.3.2 การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุมแบบฟuzzyที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 7.3.3 ดังต่อไปนี้

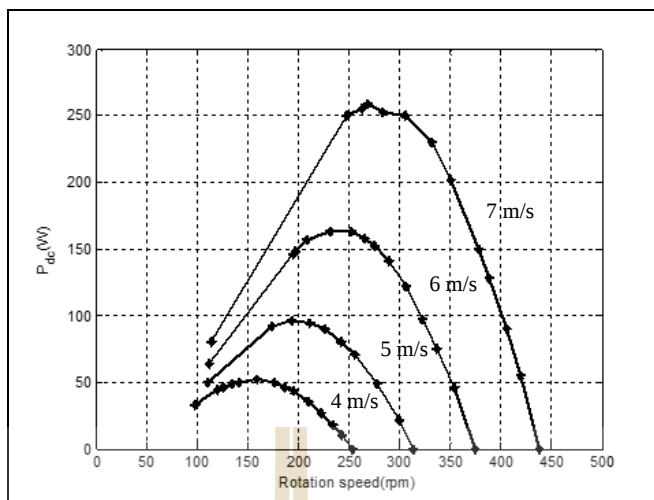
7.3.1 ผลการทดสอบคุณลักษณะของกังหันลม

การดำเนินการทดสอบเพื่อประมาณค่าเส้นโค้งคุณลักษณะของกังหันลม โดยใช้เครื่องจำลองกังหันลม โดยให้กำหนดพารามิเตอร์ของกังหันลม ดังนี้ $R=1.558m$ $\rho=1.255kg/m^3$ และ $\beta=15^\circ$ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณเส้นโค้งคุณลักษณะด้วยแบบจำลองกังหันลมแสดงได้ดังรูปที่ 7.13 การทดสอบใช้โหลดด้านเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันเป็นตัวต้านทาน $100\ \Omega$ และแบตเตอรี่ขนาด $12\ V$

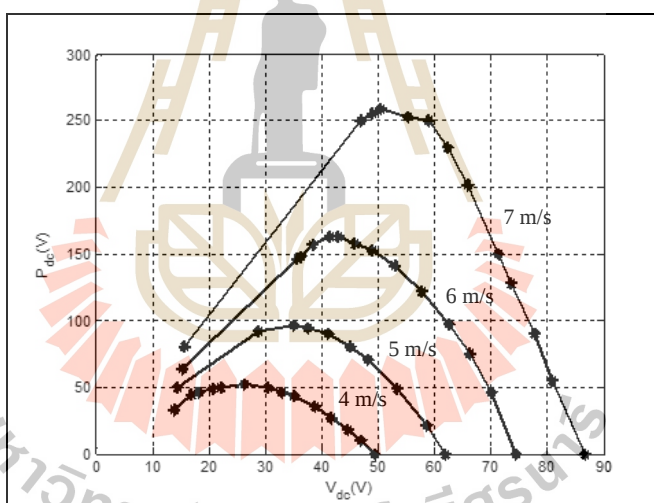


รูปที่ 7.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบ

การดำเนินการทดสอบกำหนดความเร็วลมป้อนเครื่องจำลองกังหันลมให้มีค่าคงที่ จากนั้นปรับเปลี่ยนค่าจลน์กรณ์หน้าทีของวงจรลดทอนระดับแรงดันจาก 100% ลดลงจนถึง 0% พร้อมทั้งบันทึกค่าในสถานะคงตัวของความเร็วรอบในการหมุน กำลังไฟฟ้า (P_{dc}) และแรงดันไฟฟ้า (V_{dc}) จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสร้างกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกังหันลมที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบตำแหน่งการทำงานของระบบที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ผลการทดสอบในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 7.14 และ 7.15 ดังนี้



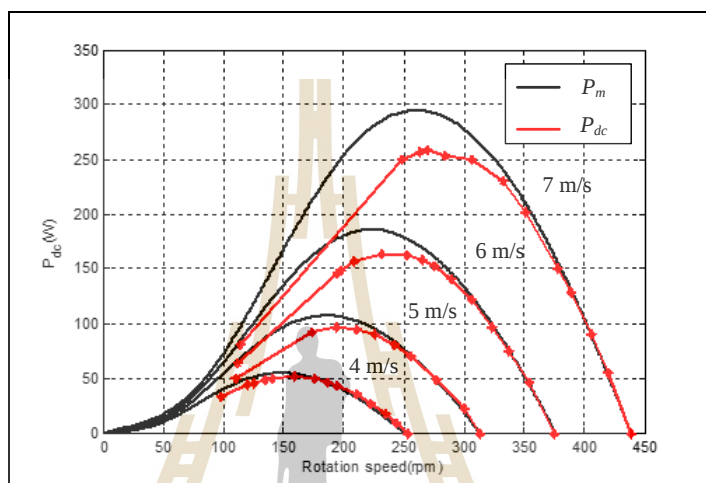
รูปที่ 7.14 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเทียบกับความเร็วรอบ



รูปที่ 7.15 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดสอบคุณลักษณะของกังหันลมในรูปที่ 7.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานเอาต์พุตทางกลของกังหันลม (P_m) กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส (P_{dc}) พบว่า ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความสอดคล้องกับพลังงานทางกลของกังหันลม ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรและวงจรเรียงกระแสสามเฟส อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบดังกล่าว ทำให้ทราบถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถสกัดได้จากชุดทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่สภาพความเร็วลมทดสอบ 4 5 6 และ 7 m/s เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่อง

จำลองกังหันลมที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 4 ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถทำการทดสอบที่ความเร็วลม 8 m/s แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนาแบบแม่เหล็กถาวรแปรผันตามความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ผลการทดสอบคุณลักษณะความสัมพันธ์ P_{dc} เทียบ V_{dc} ที่แสดงในรูป 7.15 มีลักษณะเดียวกับคุณลักษณะความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้า เทียบความเร็วรอบ

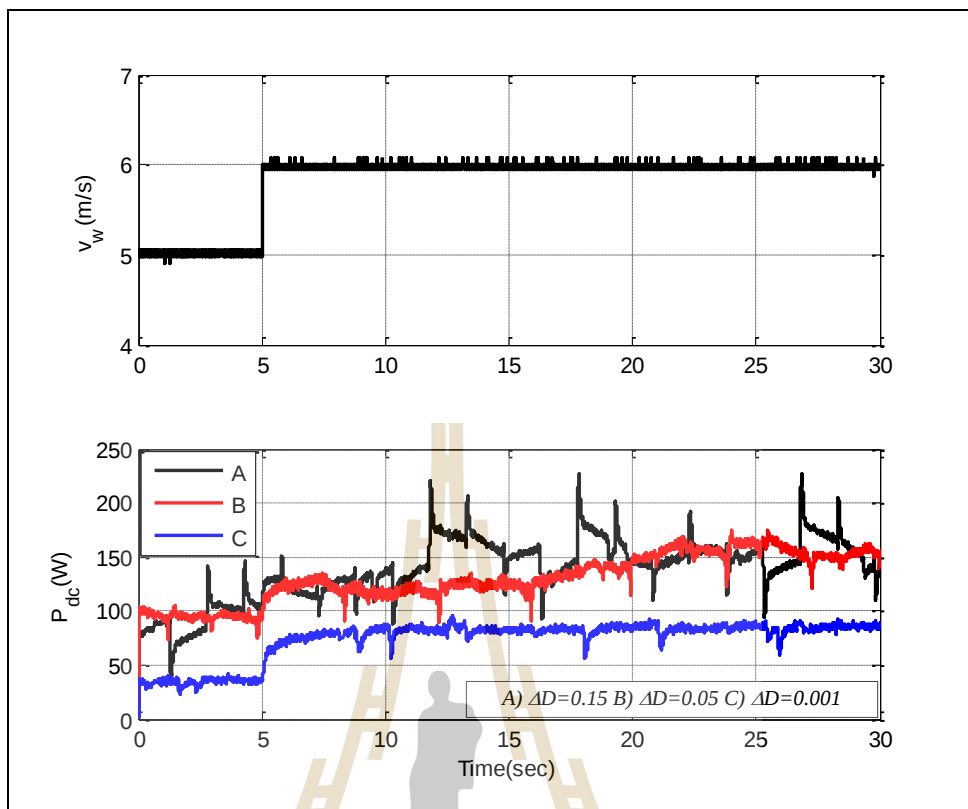


รูปที่ 7.16 ผลการทดสอบคุณลักษณะของกังหันลม

7.3.2 การทดสอบหาขนาดขั้นการค้นหาลำสำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วย

วิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมที่นำมาประยุกต์ใช้กับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการทดสอบขนาดขั้นการค้นหา (ΔD) เนื่องจาก ΔD มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของระบบด้วยการนำไปใช้ปรับตั้งวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดัน เพื่อควบคุมให้การทำงานของระบบเข้าสู่เข้าสู่จุดที่มีกำลังสูงสุดไฟฟ้าสูงสุด รายละเอียดโปรแกรมดังกล่าวแสดงในภาคผนวก จ. การทดสอบสมรรถนะการควบคุมพิจารณาจากความสามารถในการสกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ และการสั้นไหวบริเวณจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด การทดสอบดังกล่าวกำหนดให้ ΔD มีค่า ดังนี้ 0.001 0.05 และ 0.15 โดยกำหนดให้ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 5 m/s เป็น 6 m/s ดังนี้



รูปที่ 7.17 สมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม

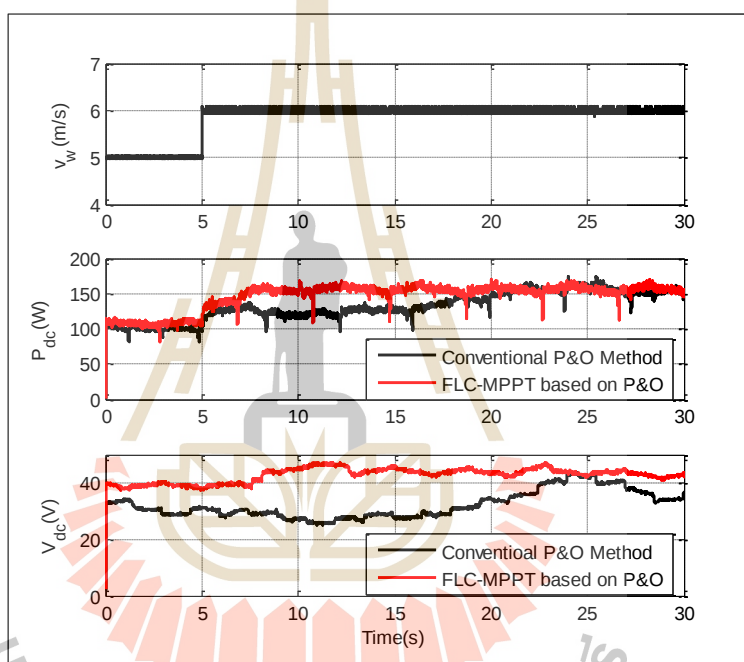
ผลการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 5 m/s เป็น 6 m/s แสดงในรูปที่ 7.17 พบว่า ในกรณี $\Delta D=0.001$ สัญญาณกำลังไฟที่สกัดได้มีการสั่นไหวเล็กน้อย แต่ไม่สามารถดึงกำลังไฟสูงสุดจากระบบได้เมื่อเทียบกับกรณี $\Delta D=0.05$ และ $\Delta D=0.15$ เนื่องจาก ΔD มีขนาดเล็กเกินไป ไม่สามารถรบกวนจุดปฏิบัติการของระบบได้ ทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานของกังหันให้ไปยังจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ กรณี $\Delta D=0.15$ ระบบมีการเข้าสู่จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว แต่เกิดการสั่นไหวมากบริเวณจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณี $\Delta D=0.05$ ที่สามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เข้าสู่จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เช่นกัน ดังนั้นจึงเลือก $\Delta D=0.05$ ให้กับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมสำหรับการทดสอบต่อไป

7.3.3 การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดเปรียบเทียบระหว่าง

วิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุมแบบฟัซซี

ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต

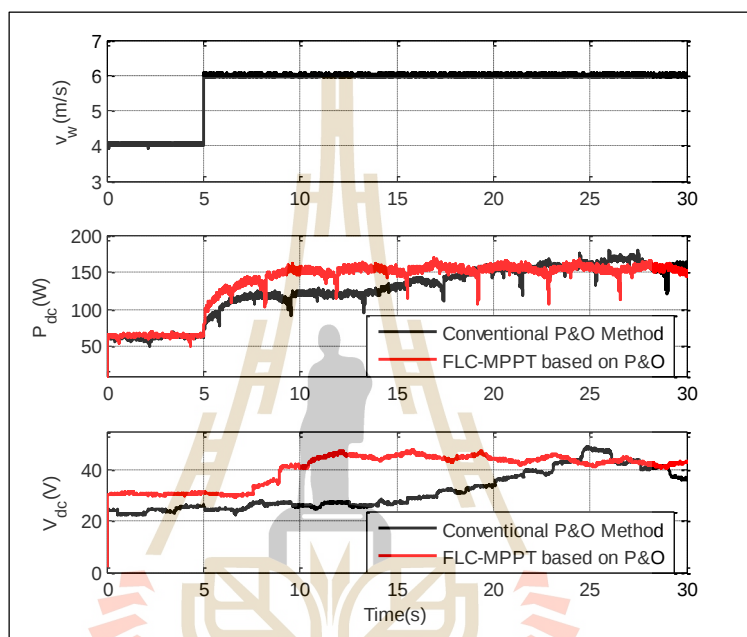
การทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระในรูปที่ 7.2 ดำเนินการกำหนดความเร็วลมให้กับเครื่องจำลองกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 m/s เป็น 6 m/s และ 4 m/s เป็น 6 m/s ผลการทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 7.18 และ 7.19 ตามลำดับ



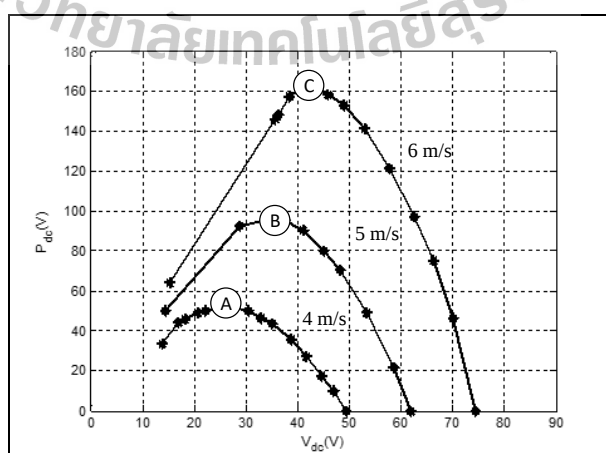
รูปที่ 7.18 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 5 m/s เป็น 6 m/s

ผลการทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต (FLC-MPPT based on P&O) เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม (Conventional P&O) ในรูปที่ 7.18 แสดงการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบ เมื่อความเร็วลม (v_w) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 m/s เป็น 6 m/s พบว่า ความเร็วลมเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่สกัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้อัลกอริทึมตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าและปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันให้เหมาะสม ทำให้แรงดันไฟฟ้า (V_{dc}) มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่จุดปฏิบัติการใหม่ที่เหมาะสมและได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจุดใหม่ที่สอดคล้องกับความเร็วลม ในทำนองเดียวกันรูปที่ 7.19 แสดงผลการทดสอบการควบคุม

ตามรอยกำลังสูงสุดในสภาวะความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 4 m/s เป็น 6 m/s การเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยกำลังสูงสุด พบว่า การควบคุมด้วยการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตสามารถควบคุมการทำงานของระบบให้เข้าสู่จุดที่มีกำลังสูงสุดได้เร็วและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม รายละเอียดการควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตแสดงในภาคผนวก จ.



รูปที่ 7.19 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 6 m/s

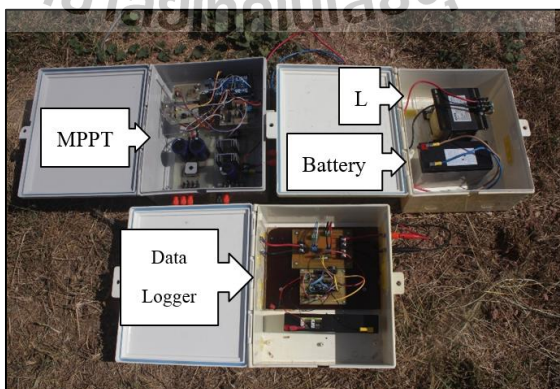


รูปที่ 7.20 กราฟคุณลักษณะความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในรูปที่ 7.18 และ รูปที่ 7.19 เมื่อนำจุดการทำงานในสภาวะคงตัวมาแสดงบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเทียบแรงดันไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.20 ผลทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบในสภาวะความเร็วลม 4 m/s 5 m/s และ 6 m/s แสดงได้ดังจุด A B และ C ตามลำดับ ซึ่งพบว่า การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่บริเวณจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

7.4 การประยุกต์ใช้งานจริงกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

จากผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมและวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต โดยทั้ง 2 วิธีนี้สามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้มีการตามรอยกำลังสูงสุดได้ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงได้นำอัลกอริทึมการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดมาประยุกต์ใช้งานจริงกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ทดสอบภายใต้สภาวะความเร็วลมจริงตามธรรมชาติ การทดสอบดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ กรณีแรกเป็นการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีการควบคุมกับระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม ส่วนกรณีที่สองเป็นการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต การดำเนินการทดสอบทั้ง 2 กรณีใช้ชุดทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นใหม่ให้เหมาะกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่ใช้ทดสอบ ซึ่งมีพิกัด 300 W ชุดทดสอบต้นแบบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 7.21 การเก็บข้อมูลการทดสอบอาศัยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger)



รูปที่ 7.21 ชุดทดสอบต้นแบบและเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

7.4.1 การทดสอบการสกัดพลังงานจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับระบบที่ไม่มีการควบคุม

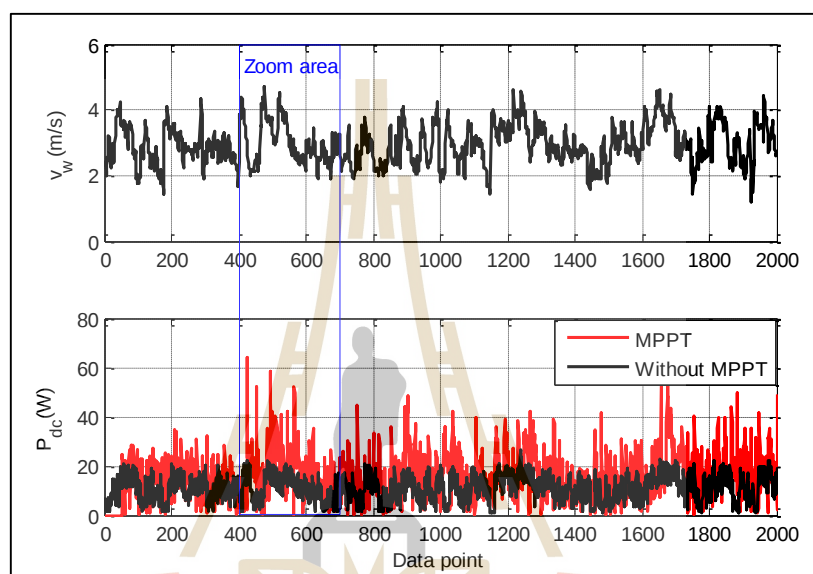
การทดสอบในภาคปฏิบัติการกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าจริงนี้ ดำเนินการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการสกัดพลังงานจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระทั่วไปที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด การติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบกับกังหันลมจริงแสดงได้ดังรูปที่ 7.22 การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมใช้ขนาดขั้นการค้นหา $\Delta D = 0.05$ เพราะว่าระบบกังหันลมจริงที่ทดสอบนี้มีค่าพิคัดใกล้เคียงกับชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบการสกัดพลังงานจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระแสดงได้ดังรูปที่ 7.23



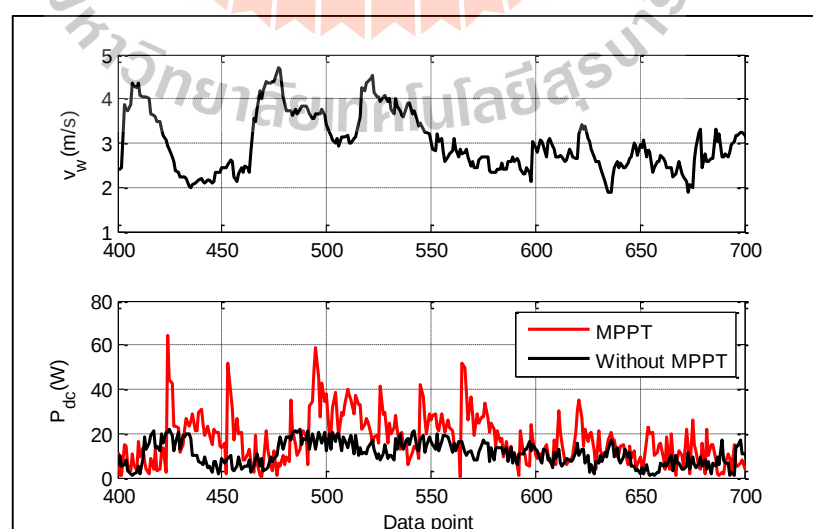
รูปที่ 7.22 การติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าจริง

ผลการทดสอบจากเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ซึ่งกำหนดให้เก็บข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที แสดงในรูปที่ 7.23 และภาพขยายผลการทดสอบในรูปที่ 7.24 ระหว่างจุดข้อมูล 400 – 700 แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมจริงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและยังมีความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นอีกด้วย ความเร็วลมที่บันทึกได้มีค่าตั้งแต่ 0 m/s ถึง 4.5 m/s ผลการทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระเปรียบเทียบกับระหว่างระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม (MPPT) กับระบบที่ไม่มีการ

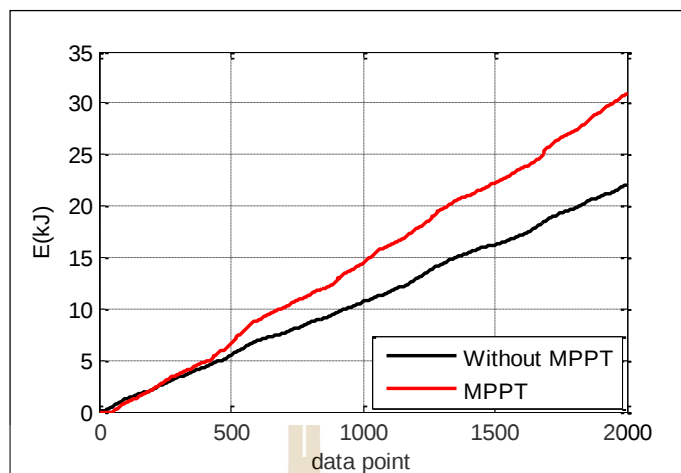
ควบคุม (Without MPPT) พบว่า ในสภาวะที่ความเร็วลมต่ำประมาณ 2 – 3.5 m/s กำลังไฟฟ้าที่สกัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระทั่วไปถูกออกแบบให้สามารถอัดประจุลงแบตเตอรี่ได้ตั้งแต่ความเร็วลมต่ำ แต่เมื่อความเร็วลมมากกว่า 3.5 m/s จะเห็นความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่สกัดได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบโดยรวมแล้ว พบว่า ระบบที่มีการควบคุมสามารถสกัดกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุม



รูปที่ 7.23 ผลการทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าจริง



รูปที่ 7.24 ภาพขยายผลการทดสอบในรูปที่ 7.23



รูปที่ 7.25 พลังงานที่สามารถสกัดได้จากระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าจริง

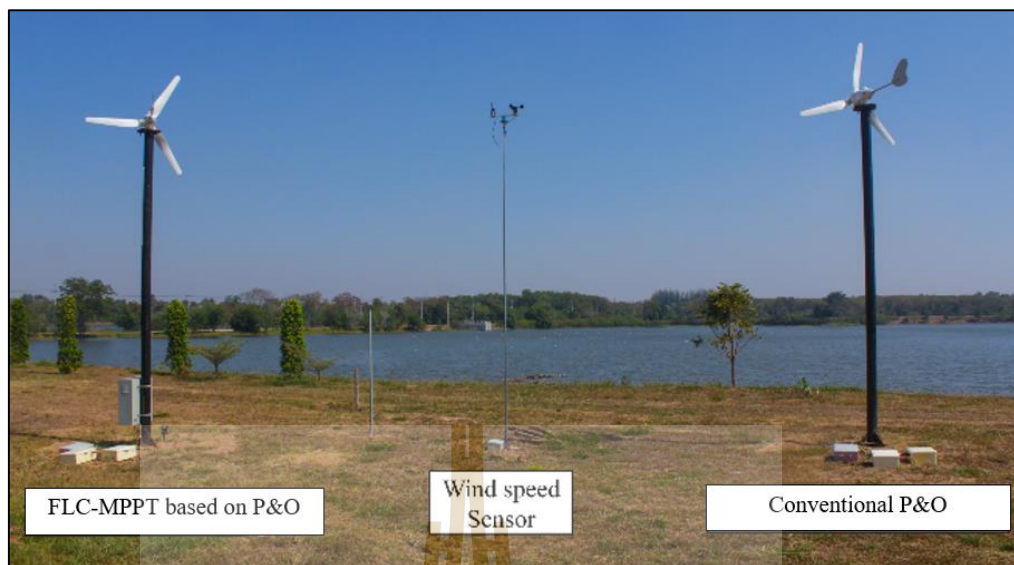
นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบพลังงานที่สามารถดึงจากระบบ โดยใช้การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 7.25 จากการทดสอบ พบว่า ระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสามารถสกัดพลังงานได้ 22.1 kJ ส่วนระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสกัดพลังงานได้เท่ากับ 30.9 kJ มากกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด 39.82% ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมสำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดพลังงานจากลมได้

7.4.2 การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

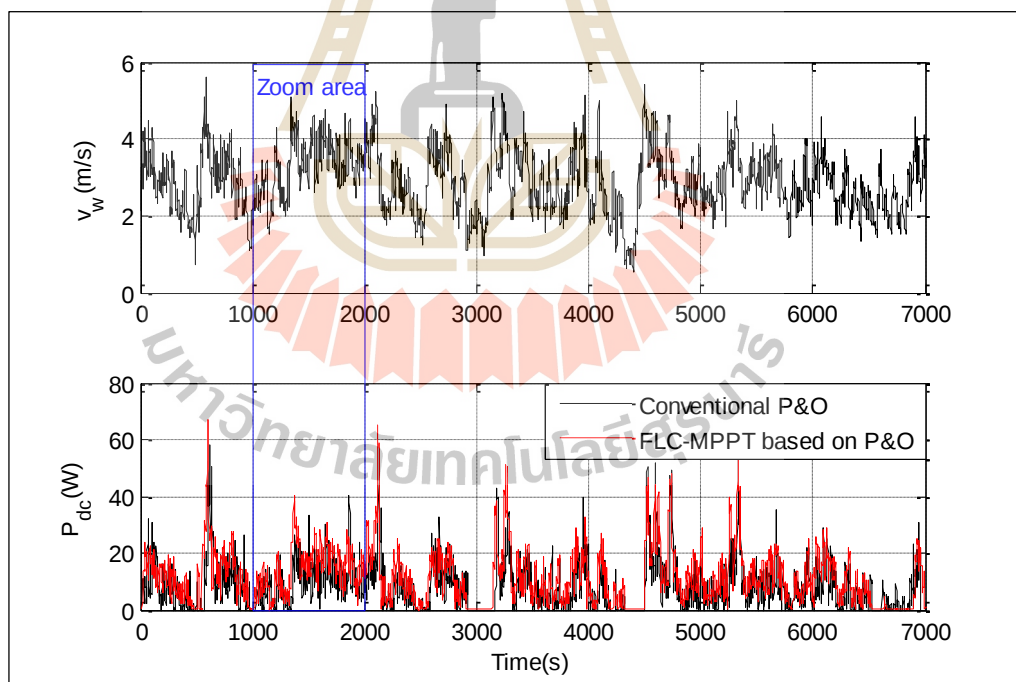
ระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุม

แบบพีซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต

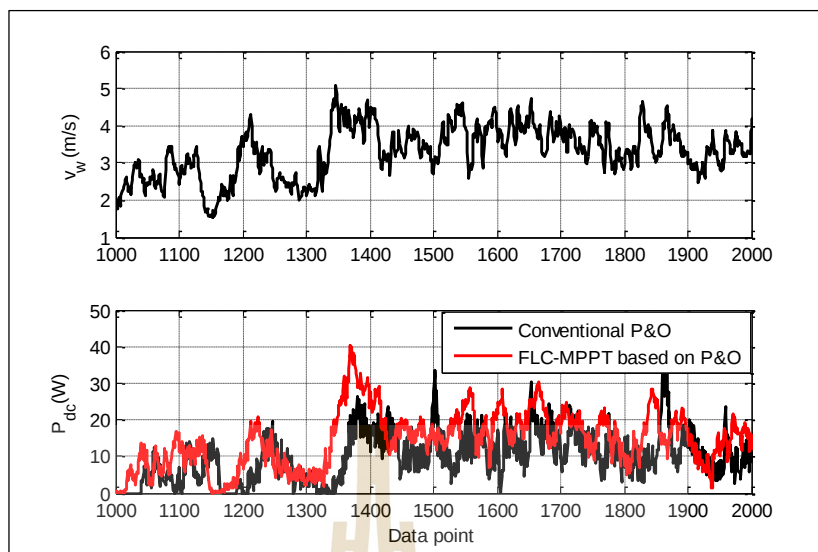
ในหัวข้อนี้นำเสนอการทดสอบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระภายใต้สภาวะความเร็วลมจริงตามธรรมชาติ การติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบกักเก็บระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าจริงแสดงดังรูปที่ 7.26 การทดสอบดังกล่าวเก็บข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ซึ่งกำหนดให้มีการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที ระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระจริงที่ทดสอบมีพิกัด 300 W ดังนั้น อัลกอริทึมการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต จึงกำหนดให้ค่าสเกลที่ใช้ทำเป็นเชิงเส้น $U_p = 1/300$ ส่วนอัลกอริทึมการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมยังคงใช้ขนาดขั้นการค้นหาค่าตามหัวข้อที่ 7.4.1 ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 7.27



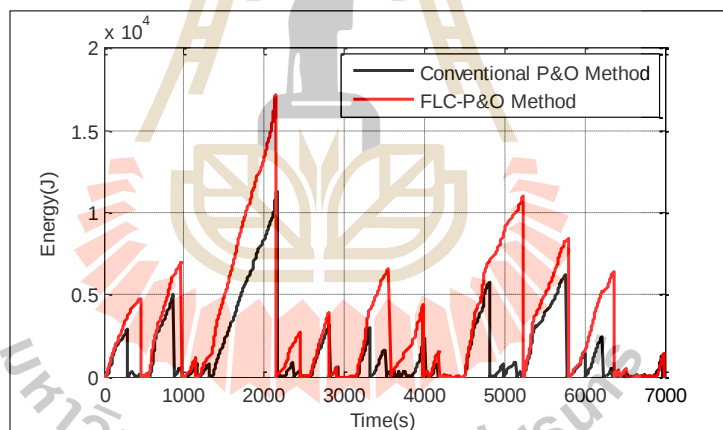
รูปที่ 7.26 การติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบ



รูปที่ 7.27 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่สามารถสกัดจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 7.28 ภาพขยายผลการทดสอบในรูปที่ 7.27



รูปที่ 7.29 ผลการทดสอบการดึงพลังงานจากกังหันลม

ผลการทดสอบในรูปที่ 7.27 และภาพขยายในรูปที่ 7.28 แสดง ความเร็วลมตามธรรมชาติที่มีความไม่เนื่องและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ผลการทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระเปรียบเทียบกับสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ซึ่งพบว่า กำลังไฟฟ้าที่สกัดได้จากระบบของทั้ง 2 วิธีมีความไม่ต่อเนื่องและการมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับความเร็วลมตามธรรมชาติ ผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นว่า บางช่วงเวลาการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมสามารถ

สัปดาห์ไฟฟ้าได้มากกว่าวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต เนื่องจากการเริ่มและหยุดหมุนของกังหันลมมีความแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบโดยรวมแล้ว พบว่า การควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ยังคงมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมสอดคล้องตามผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบภายใต้สภาวะความเร็วลมจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ ทำให้ไม่สามารถดำเนินการทดสอบหาคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระได้ ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมจึงอาศัยการเปรียบเทียบพลังงานที่สกัดได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟกำลังไฟฟ้าพลังงานที่สกัดได้แสดงในรูปที่ 7.29 พบว่า วิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมสกัดพลังงานได้ 57.78 kJ ส่วนวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตสามารถสกัดพลังงานได้ 78.76 kJ ซึ่งมากกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม 36.31% แสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมที่นำเสนอสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดพลังงานจากลมได้

7.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ การสร้างและการดำเนินการทดสอบดังกล่าวมี 2 ส่วนด้วยกัน คือ การทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยเครื่องจำลองกังหันลมและการทดสอบด้วยการนำไปประยุกต์ใช้จริงกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระภายใต้สภาวะความเร็วลมตามธรรมชาติ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม การนำไปใช้งานจริงกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ กรณีแรกเป็นการทดสอบระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด กรณีที่สองเป็นการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ผลการทดสอบในกรณีแรก พบว่า ระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมสามารถสกัดกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการควบคุม ส่วนผลการทดสอบในกรณีที่ 2 แสดงให้เห็นได้ว่า การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ยังคงมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม

บทที่ 8

การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

8.1 บทนำ

โรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ (evaporative cooling system) หรือโรงเรือนแบบปิดเป็นเทคโนโลยีที่นำเข้ามาใช้สำหรับการปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์อย่างแพร่หลายในประเทศไทย เทคโนโลยีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในเหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ โรงเรือนที่มีเทคโนโลยีทำความเย็นแบบระเหยน้ำนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบสูง โดยใน 1 โรงเรือนมีการใช้พัดลมระบายอากาศขนาดใหญ่บริเวณด้านท้ายโรงเรือนจำนวน 5-8 ตัว เมื่อระบบควบคุมทำงานจะมีพัดลมระบายอากาศประมาณ 2-3 ตัว ทำงานตลอดเวลา หากอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงขึ้นพัดลมระบายอากาศที่เหลือจะทำงานแบบอัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้จึงมีพลังงานลมที่เกิดจากระบบระบายอากาศตลอด 24 ชั่วโมง การนำพลังงานลมดังกล่าวกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วยการผลิตกระแสไฟฟ้าอาศัยระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ โดยในลำดับแรกเป็นการสำรวจความเร็วลมท้ายโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ เพื่อประเมินศักยภาพพลังงานลมและนำไปสู่การสร้างชุดทดสอบต้นแบบ กลไกการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการบกวนและการสังเกตที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 ถูกลำนำประยุกต์ใช้กับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ เพื่อให้สามารถสกัดพลังงานลมที่เกิดจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

8.2 การสำรวจความเร็วลม

การสำรวจความเร็วลมบริเวณท้ายโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำเป็นขั้นตอนเบื้องต้นในการออกแบบชุดทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด การวัดความเร็วลมใช้เครื่องวัดความเร็วลมยี่ห้อ BENETECH รุ่น GM8901 แสดงในรูปที่ 8.1 การวัดความเร็วลมเก็บข้อมูลในลักษณะพื้นที่หน้าตัด ซึ่งมีขนาด 1.4×1.6 m พิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของพัดลมระบายอากาศที่มีใบพัดขนาด 1.27 m จากสำรวจ พบว่า บริเวณจุดศูนย์กลางของพัดลมระบายอากาศมีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ ขณะที่บริเวณขอบใบพัดจะมีความเร็วลมสูงกว่า ดังนั้นตำแหน่งที่ทำการวัด จึงเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างพัดลมระบายอากาศ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อ

การระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ จึงดำเนินการวัดที่ระยะห่างจากพัดลม 1.2 m ทำการวัดทุก ๆ ระยะ 0.1 m ในรูปที่ 8.2 แสดงการสำรวจความเร็วลมท้ายโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ของบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด มหาชน ฟาร์มปักษ์ธงชัย

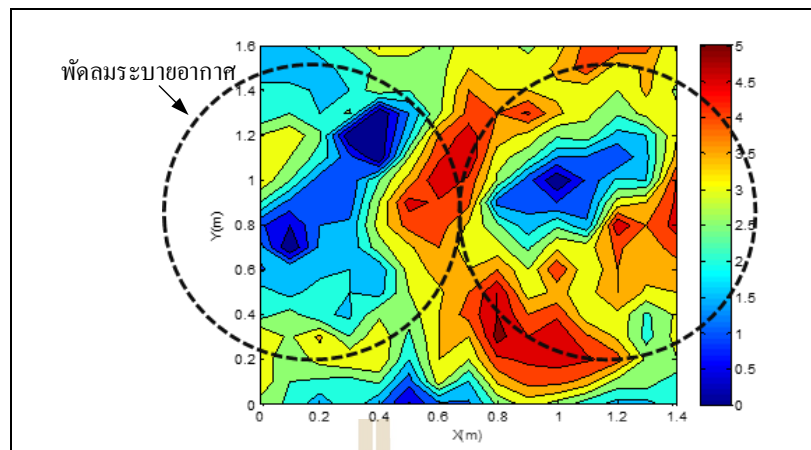


รูปที่ 8.1 เครื่องวัดความเร็วลมมือถือ BENETECH รุ่น GM8901



รูปที่ 8.2 การสำรวจความเร็วลมท้ายโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ
ของบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด มหาชน

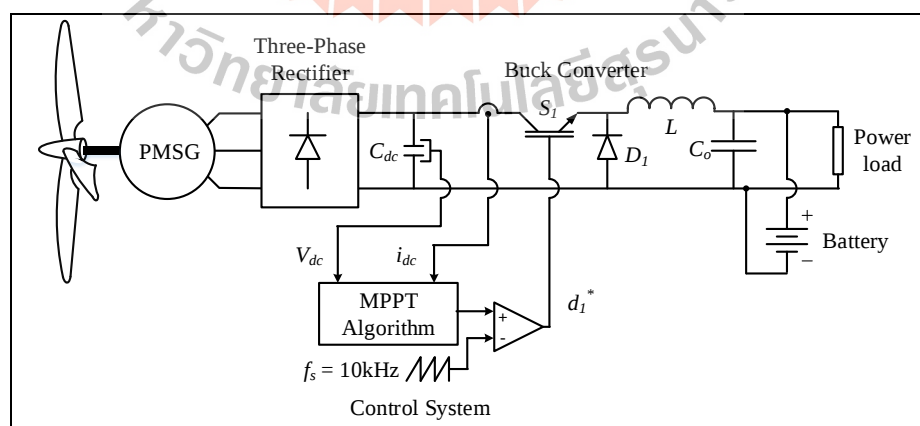
ผลการสำรวจความเร็วลมแสดงในรูปที่ 8.3 พบว่า ความเร็วลมไม่สม่ำเสมอมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 5 m/s บริเวณจุดศูนย์กลางของพัดลมระบายอากาศจะมีความเร็วลมต่ำ สำหรับตำแหน่งที่มีความเร็วลมสูงอยู่บริเวณรอยต่อของพัดลมระบายอากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ 3 ถึง 5 m/s เพียงพอต่อการเริ่มหมุนกังหันลม เพราะกังหันลมขนาดเล็กโดยทั่วไปมีความเร็วเริ่มหมุนประมาณ 2 m/s ดังนั้น จึงเลือกตำแหน่งดังกล่าวเป็นจุดติดตั้งชุดทดสอบ ผลการสำรวจความเร็วลมที่วัดได้มีค่า 0 ถึง 5 m/s การออกแบบและสร้างชุดทดสอบต้นแบบ จึงเลือกค่าความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s โดยรายละเอียดในส่วนต่าง ๆ จะอธิบายในหัวข้อที่ 8.3 ต่อไป



รูปที่ 8.3 ผลการสำรวจความเร็วลมท้ายโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ

8.3 ชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ

ชุดต้นแบบสำหรับทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรือน ประกอบด้วย ชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เลือกใช้เป็นกังหันลมแบบแนวแกนนอนเพราะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานลมที่ดีกว่ากังหันลมแบบแนวแกนตั้ง ชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าหรือชุดชาร์จที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสเชื่อมต่อกับวงจรลดทอนระดับแรงดัน โหลด กำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 8.4 โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้



รูปที่ 8.4 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่นำมาประยุกต์ใช้ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ

การเลือกใช้ชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของพัดลมระบายอากาศที่มีขนาด 1.27 m ดังนั้น จึงเลือกใช้กังหันลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 m งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่ระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ฉะนั้น ชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าจึงเป็นแบบที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีพิกัด 400 W 5 ใบพัดที่เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่บนฐานที่เคลื่อนย้ายได้ เพื่อให้สามารถนำไปติดตั้งและทดสอบท้ายโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำได้สะดวก แสดงในรูปที่ 8.5



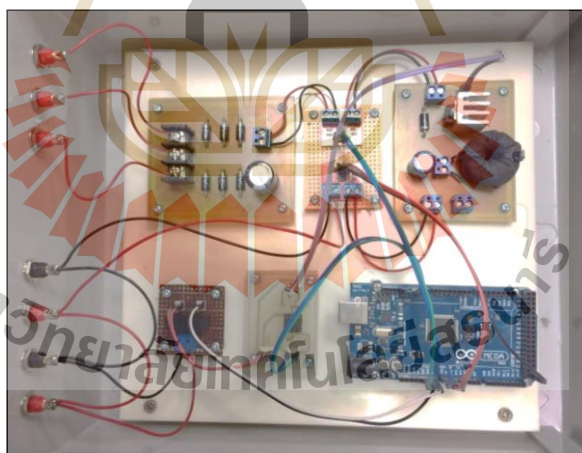
รูปที่ 8.5 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

การทดสอบชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าในเบื้องต้นใช้ลมจากพัดลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว หรือ ประมาณ 0.6 m มีความเร็วลม 2.5 – 3 m/s ที่ระยะห่าง 1 m การทดสอบดังกล่าว พบว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสในสถานะไร้โหลดมีค่าสูงกว่า 12 V เล็กน้อย พิจารณาได้ว่าเมื่อนำไปทดสอบกับพัดลมระบายอากาศขนาด 50 นิ้ว ของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำที่มีความเร็วสูงสุด 5 m/s ชุดชาร์จที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาด (commercial charge without MPPT: Com. without MPPT) ดังแสดงในรูปที่ 8.9 สามารถอัดประจุลงแบตเตอรี่ขนาด 12 V ได้ ส่วนในกรณีชุดชาร์จ MPPT หากเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V วงจรที่ใช้ควบคุมการทำงานของกังหันลมต้องเปลี่ยนเป็นวงจรทบระดับแรงดัน ซึ่งไม่สามารถนำ

วิธีการควบคุมที่พัฒนามาประยุกต์ใช้งานได้ ดังนั้น ชุดชาร์จ MPPT ที่สร้างขึ้น จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 6 V เพื่อให้ยังคงสามารถใช้งานจรดทอนระดับแรงดันและกฎการควบคุมเดิมของวิธีการที่พัฒนาสำหรับควบคุมการสกัดพลังงานของกังหันลมได้



รูปที่ 8.6 ชุดชาร์จ Com. Without MPPT



รูปที่ 8.7 ชุดชาร์จ MPPT

ชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าต้นแบบที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่พัฒนาหรือชุดชาร์จ MPPT แสดงในรูปที่ 8.7 ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟส ชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า วงจรลดทอนระดับแรงดัน วงจรจุดชนวน บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรไฟเลี้ยง การออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ พิจารณาจากพลังงานที่กังหันลมสกัดได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองของกังหันลมที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ในกรณีที่ไมพิจารณากำลังสูญเสียของระบบ

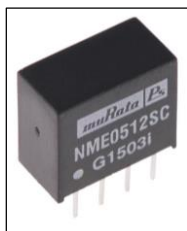
พลังงานทางกลสูงสุดที่กังหันลมสามารถสกัดได้ที่สภาวะความเร็วลม 4 m/s รัศมีกังหันลม 0.5 m ค่า $C_{p,max} = 0.593$ จะได้ $P_{m,max} = (1/2)(1.225)(\pi)(0.5)^2(4)^3(0.593) = 18.25 \text{ W}$ สำหรับในกรณีที่ใช้แรงดันแบตเตอรี่ 6 V สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าในระบบได้ $18.25/6 = 3.04 \text{ A}$ ดังนั้น การออกแบบสร้างชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าในรูปที่ 8.4 จึงกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดเท่ากับ 75 W แรงดันไฟฟ้าพิกัด 25 V และกระแสพิกัด 3 A ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 8.1 สำหรับตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบนี้ ใช้แบบโมดูลที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ 3 – 25 V และวัดกระแสไฟฟ้าได้ 0 – 3 A ดังแสดงในรูปที่ 8.8 ส่วนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรจุดชนวนได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 7 วงจรไฟเลี้ยงในที่นี้ใช้เป็นตัวแยกกราวนด์ดีซีเป็นดีซี (Isolated DC-DC Converter) เบอร์ NME0512SC ดังรูปที่ 8.9

ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์ของชุดทดสอบ

อุปกรณ์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
1. มอสเฟต (MOSFET)	S_I	500V, 8A
2. ไดโอด	D_I	100V, 5A
3. ตัวเหนี่ยวนำ	L	15mH , 5A
4. ตัวเก็บประจุ	C_{dc}, C_o	1000 μF , 25V



รูปที่ 8.8 ชุดตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า



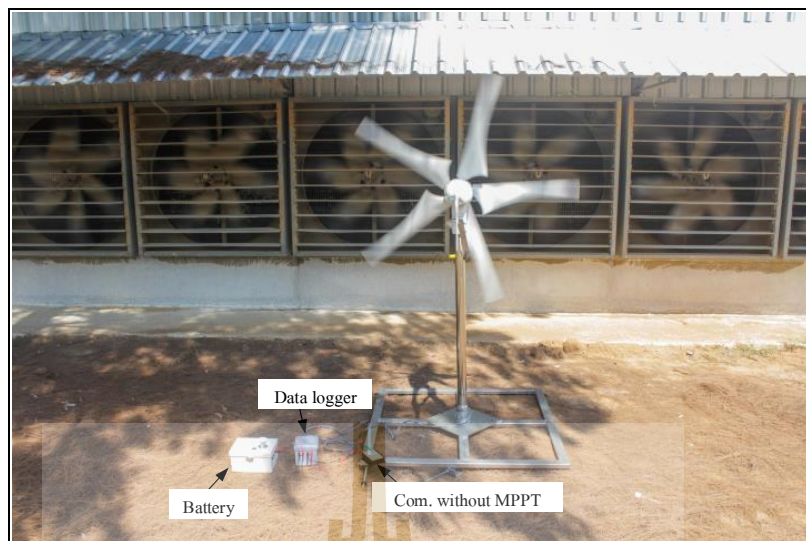
รูปที่ 8.9 อุปกรณ์แยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

8.4 ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการ ทำความสะอาดแบบระเหยน้ำ

การดำเนินการทดสอบชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความสะอาดแบบระเหยน้ำด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด เพื่อทดสอบสมรรถนะของชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่สร้างขึ้นหรือชุดชาร์จ MPPT ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง โดยในรูปที่ 8.10 แสดงชุดทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ออกแบบให้สูง 1 m ติดตั้งห่างจากพัดลมระบายอากาศ 1.2 m เพื่อไม่ให้กระทบต่อระบบระบายอากาศของโรงเรียน การทดสอบดังกล่าวเก็บข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ ซึ่งกำหนดให้บันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที โดยทำการบันทึกข้อมูลพลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดชาร์จก่อนประจุลงแบตเตอรี่ การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การทดสอบด้วยชุดชาร์จที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (Com. Without MPPT) แสดงดังรูปที่ 8.11 และการทดสอบด้วยชุดชาร์จที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด (MPPT) แสดงดังรูปที่ 8.12 การทดสอบทั้ง 2 กรณีดำเนินการเก็บข้อมูลกรณีละ 30 นาที ผลการทดสอบสัปดาห์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกันทั้ง 2 กรณี แสดงได้ดังรูปที่ 8.13



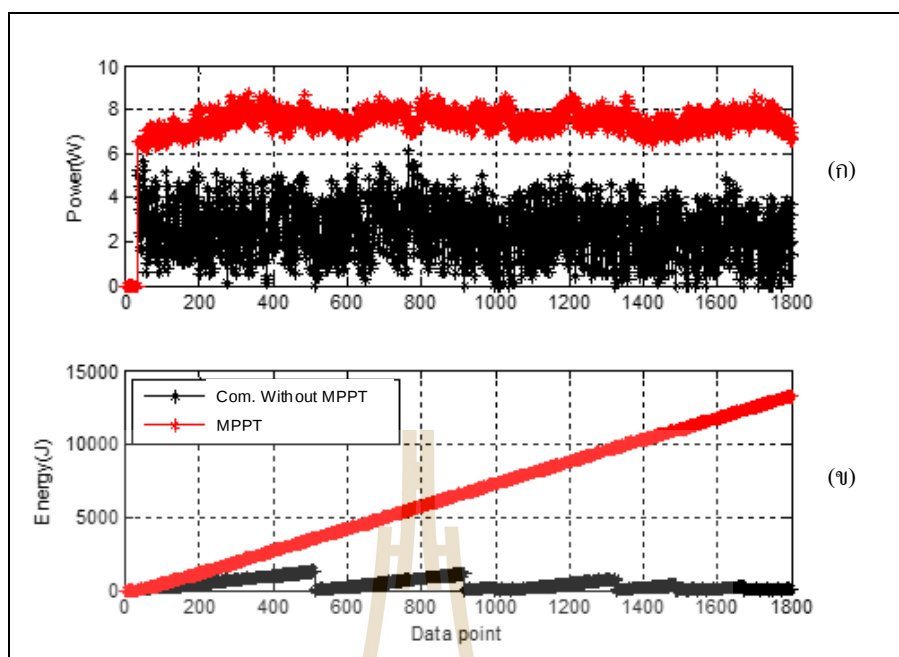
รูปที่ 8.10 การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียน



รูปที่ 8.11 การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็น
แบบระเหยน้ำด้วยชุดชาร์จ Com. without MPPT



รูปที่ 8.12 การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็น
แบบระเหยน้ำด้วยชุดชาร์จ MPPT



รูปที่ 8.13 ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของ
โรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ

ผลการทดสอบในรูปที่ 8.13 (ก) แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบเทียบกับจุดข้อมูล ซึ่งเก็บข้อมูลเป็นเวลา 30 นาที บันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที จึงมีจำนวนข้อมูล 1800 จุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การสกัดพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าใช้ชุดชาร์จ MPPT มีสมรรถนะการควบคุมที่ดี สามารถสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบได้โดยเฉลี่ยประมาณ 7 W ซึ่งมากกว่าชุดชาร์จ Com. without MPPT ที่สามารถสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบได้โดยเฉลี่ยประมาณ 2.5 W หรือมากกว่า 180 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าจากระบบ ในรูปที่ 8.13 (ก) สามารถวิเคราะห์พลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้เทียบกับเวลาด้วยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ แสดงได้ดังรูปที่ 8.13 (ข) ซึ่งพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากชุดชาร์จ MPPT สามารถอัดประจุลงแบตเตอรี่ได้มากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากชุดชาร์จ Com. without MPPT หากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดชาร์จมีค่าน้อยกว่าแรงดันแบตเตอรี่จะไม่สามารถประจุลงแบตเตอรี่ได้ จึงทำให้มีการอัดประจุลงแบตเตอรี่ไม่ต่อเนื่อง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะและประโยชน์ของชุดชาร์จ MPPT ที่ได้นำเสนอ

8.5 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการประเมินราคาชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศ เพื่อหาจุดคุ้มทุน ชุดทดสอบต้นแบบที่พิจารณา ประกอบด้วย ชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าพิกัด 400 W ชุดชาร์จและแบตเตอรี่ พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างชุดชาร์จที่ไม่มีการควบคุม Com. without MPPT พิกัด 300 W ราคา 910 บาท ที่ใช้งานกับแบตเตอรี่ 12 V 7 AH ราคา 500 บาท กับชุดชาร์จ MPPT ที่สร้างขึ้นพิกัด 75 W ราคา 1500 บาท ใช้งานกับแบตเตอรี่ 6 V 5 AH ราคา 250 บาท จากผลทดสอบ พบว่าชุดชาร์จ MPPT สามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 7 W หากระบบทำงานตลอด 24 ชั่วโมง จะได้ $7 \times 24 = 168 \text{ Whr/day}$ ในทำนองเดียวกันชุดชาร์จ Com. without MPPT สามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้โดยเฉลี่ย 2.5 W ซึ่งจะได้ $2.5 \times 24 = 60 \text{ Whr/day}$ เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ได้ภายใน 1 วัน พบว่า ชุดชาร์จ MPPT มีค่ามากกว่าชุดชาร์จ Com. without MPPT 108 Whr/day คิดเป็น 180 เปอร์เซ็นต์ของชุดชาร์จ Com. without MPPT สำหรับราคาต้นทุน (บาท/วัน) พิจารณาจาก 1 unit หรือ 1 kWhr เท่ากับ 3.936 บาท (อ้างอิงจากอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย) เช่น ชุดชาร์จ Com. without MPPT ดึงกำลังไฟฟ้าได้ 60 Whr/day คิดเป็น $(60/1000) \times 3.936 = 0.24$ บาท/วัน ผลการประเมินราคาของชุดต้นแบบที่นำเสนอแสดงได้ดังตารางที่ 8.2 ดังนี้

ตารางที่ 8.2 การประเมินราคาของชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียน

ชุดชาร์จ	ชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้า (บาท)	ราคาชุดชาร์จ (บาท)	ราคาแบตเตอรี่	ราคารวม	จำนวน Whr/day	ราคาต้นทุน (บาท/วัน)	ระยะเวลาคุ้มทุน	
							วัน	ปี
Com. without MPPT	15,000	910	500	16,410	60	0.24	68,375	186ปี10เดือน
MPPT	15,000	1,500	250	16,750	168	0.66	25,378	69ปี3เดือน

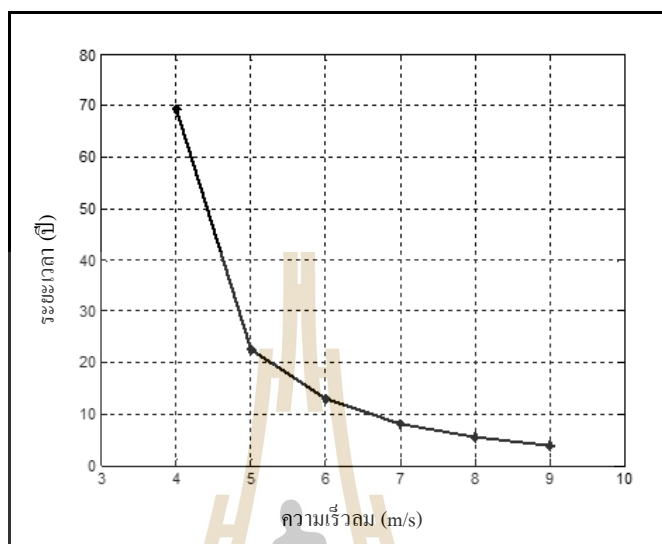
จากผลการประเมินราคาของชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าของระบบระบายอากาศในตารางที่ 8.2 พบว่า หากติดตั้งชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าร่วมกับชุดชาร์จ Com. without MPPT จะมีระยะเวลาคู้มนทุนที่ 186 ปี 10 เดือน แต่ถ้าใช้ชุดชาร์จ MPPT จะคู้มนทุนที่ระยะเวลา 69 ปี 3 เดือน ซึ่งจะเห็นได้ว่าชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดที่สร้างขึ้นสามารถคู้มนทุนได้เร็วกว่าชุดชาร์จ Com. without MPPT อย่างไรก็ตามการทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยังคงใช้ระยะเวลาคู้มนทุนที่นาน เนื่องจากความเร็วลมที่ทดสอบมีค่าค่อนข้างต่ำ หากมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น สร้างอุโมงค์ลม เพื่อรีดกระแสลมให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้น หากพิจารณาความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นจะสามารถคู้มนทุนได้เร็วขึ้น ในกรณีความเร็วลมที่ทดสอบมีค่าประมาณ 4 m/s ซึ่งดูได้จากผลการสำรวจความเร็วลมในรูปที่ 8.3 จากการคำนวณพลังงานทางกลสูงสุดที่กังหันลมสามารถสกัดได้จะเท่ากับ 18.25 W เมื่อพลังงานดังกล่าวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดชาร์จ MPPT สามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้ 7 W ซึ่งคิดเป็น 61.6 เปอร์เซ็นต์ของพลังทางกล จะได้กำลังไฟฟ้าต่อ 1 วัน เท่ากับ 168 Whr/day ในกรณีความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 6 m/s จะได้ $P_{m,max} = 61.3$ W พิจารณาประสิทธิภาพการดึงกำลังไฟฟ้าของชุดชาร์จ MPPT ที่ 61.6 เปอร์เซ็นต์ จะได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 37.4 W คิดเป็น $37.4 \times 24 = 897.6 \text{ Whr/day}$ การประเมินจุดคู้มนทุนในกรณีความเร็วลมเพิ่มขึ้นแสดงได้ดังตารางที่ 8.3 ดังนี้

ตารางที่ 8.3 การประเมินราคาหาจุดคู้มนทุน เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น

ความเร็วลม (m/s)	ราคา	Whr/day	บาท/วัน	คู้มนทุน	
				วัน	ปี
4	16,750	168	0.66	25,378	69ปี3เดือน
5	16,750	519.36	2.04	8,210	22ปี5เดือน
6	16,750	897.6	3.53	4,745	12ปี11เดือน
7	16,750	1425.6	5.61	2,985	8ปี2เดือน
8	16,750	2127.36	8.37	2,001	5ปี5เดือน
9	16,750	3029.04	11.92	1,405	3ปี10เดือน

จากการประเมินราคาของชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด ในกรณีความเร็วลมเพิ่มขึ้นในตารางที่ 8.3 พบว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาคู้มนทุนน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญและไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 8.14 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระยะเวลาคู้มนทุน (ปี) ดังนั้น ถ้านำชุดต้นแบบที่นำเสนอไปใช้

งานจริงในสถานะที่มีความเร็วลมสูง จะทำให้ระยะเวลาในการคุ้มทุนเร็วขึ้นและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระยะเวลาคู์ทุน (ปี)

8.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการนำระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระมาประยุกต์ใช้สกัดพลังงานลมที่เกิดจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ผลการสำรวจความเร็วลมท้ายโรงเรียนดังกล่าว พบว่า ความเร็วมีค่าตั้งแต่ 0-5 m/s ซึ่งเพียงพอต่อการเริ่มหมุนของกังหันลม จึงได้ดำเนินการออกแบบและสร้างชุดทดสอบต้นแบบ ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศด้วยกังหันลมที่ใช้ชุดซาร์จันแบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต พบว่า ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าชุดซาร์จันทั่วไปที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดได้ถึง 180 % แสดงให้เห็นว่า การควบคุมนี้ทำให้กังหันลมสกัดพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งพบว่า ระบบที่ใช้ชุดซาร์จันแบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดมีจุดคุ้มทุนน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ในกรณีที่ความเร็วลมเพิ่มขึ้นระยะเวลาคู์ทุนยิ่งเร็วขึ้น

บทที่ 9

สรุปและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วน ได้แก่ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ผลงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องจำลองกังหันลม ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยอาศัยคุณลักษณะของกังหันลม ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่อาศัยคุณลักษณะของกังหันลม และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยไม่ใช้คุณลักษณะของกังหันลมแบบลดทอนตัวตรวจวัด ผลการสำรวจงานวิจัยดังกล่าวได้ถูกรวบรวมและนำเสนอไว้ในบทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินการศึกษาเพื่อเป็นรากฐานสำหรับการพัฒนาและปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดได้ถูกนำเสนอในบทที่ 3 รายละเอียดต่าง ๆ ประกอบด้วย ระบบแปลงผันพลังงานที่ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้า หลักการทำงานและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม ชนิดและการติดตั้งระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีแบบแม่เหล็กถาวร วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า รวมถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาใช้สำหรับสร้างเครื่องจำลองกังหันลมเพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ถูกนำเสนอในบทที่ 4 คุณลักษณะของกังหันลมขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของกังหันลมที่พิจารณา การควบคุมเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำเสนอได้มีการปรับปรุงให้เสมือนพลังงานทางกลของกังหันลมมากยิ่งขึ้น จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบยืนยันได้ว่าคุณลักษณะของเครื่องจำลองกังหันลมมีความสอดคล้องกับคุณลักษณะของกังหันลม

หลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระสามารถจำแนกได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบอาศัยคุณลักษณะของกังหันลมด้วยวิธี PSF และแบบไม่อาศัยคุณลักษณะของกังหันลมด้วยวิธี P&O ได้ถูกนำเสนอในบทที่ 5 จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการควบคุมของทั้ง 2 วิธี และประโยชน์ของการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

รวมถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมด้วยวิธี P&O และแนวทางการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

บทที่ 6 นำเสนอการควบคุมแบบฟัซซีที่สามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา ทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ของฟัซซี ได้แก่ ฟัซซีเซต ฟังก์ชันสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา กฎฟัซซีและการอนุมาน ฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno รวมถึงการนำมาประยุกต์ใช้ปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดให้ดีขึ้นและสามารถใช้งานได้ในช่วงกว้าง วิธีการควบคุมที่พัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เรียกว่า วิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต ผลการจำลองสถานการณ์ระบบทดสอบพิกัด 850 W พบว่า การควบคุมด้วยวิธีการที่พัฒนามีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบทดสอบพิกัด 500 W และ 300 W พบว่า การควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอยังคงมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า วิธีการควบคุมที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 7 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบต้นแบบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด การทดสอบในห้องปฏิบัติการอาศัยเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผลการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมกับวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตพบว่า วิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ทดสอบจริงกับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบภายใต้สภาวะความเร็วจริงตามธรรมชาติ การทดสอบดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ กรณีแรกเป็นการทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการควบคุม กรณีที่ 2 เป็นการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตเปรียบเทียบกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม ผลการทดสอบในกรณีแรก พบว่า ระบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมสามารถสกัดกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ส่วนผลการทดสอบกรณีที่ 2 พบว่า วิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีและยืดหยุ่นกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม

การนำระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมที่พัฒนามาประยุกต์ใช้สกัดพลังงานลมที่เกิดจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ผลการสำรวจความเร็วลมและรายละเอียดการสร้างชุดทดสอบต้นแบบ รวมถึงผลการทดสอบการสกัดกำลังไฟฟ้าได้นำเสนอไว้ในบทที่ 8 โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ระบบกักเก็บลมที่ใช้ชุดชาร์จที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสามารถสกัดกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าการใช้ชุดชาร์จทั่วไปที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดได้ถึง 108 Whr/day หรือ 180 เปอร์เซ็นต์ ถือเป็นการนำพลังงานลมที่ถูกปล่อยทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้นและใช้ระยะเวลาคุ้มทุนที่สั้นกว่าระบบที่ใช้ชุดชาร์จทั่วไปที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

9.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสที่นำมาใช้เป็นเครื่องจำลองกักเก็บลมและปรับปรุงระบบควบคุมให้มีผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น
2. ควรมีการพัฒนาแบบกักเก็บผลิตไฟฟ้าให้เป็นแบบเชื่อมต่อกริด
3. ควรมีการออกแบบใบพัดของกังหันลมรวมถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรให้มีความเหมาะสมกับการสกัดพลังงานลมที่เกิดจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า



รายการอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเชื่อมต่อกริด, 2554)

คู่มือการพัฒนาและลงทุนผลิตพลังงานทดแทนจากลม, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, บริษัท เอเบิล คอนซัลแตนท์ จำกัด, 2554

ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (2557). การออกแบบตัวควบคุมพีชชีแบบปรับตัวสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ปทุมพร วงศ์ใหญ่ (2558). ระบบควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ปราจรี ประสมศักดิ์ (2554). การประยุกต์พีชชีลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิไลพร เงินบาท (2551). การชดเชยการเสียคานและสภาพไม่เป็นเชิงเส้นในฮาร์ดดิस्कไดรฟ์ขนาดเล็กด้วยพีชชีลอจิก. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุดารัตน์ ขวัญอ่อน (2547). โครงสร้างการควบคุมแบบนิวโร-ตาบู-พีชชี. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อาทิตย์ ศรีแก้ว (2551). 1. ปัญญาเชิงคำนวณ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Abdullah, M. A., Yatim, A. H. M., Tan, C. W. and Saidur, R. (2012). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 16(5):3220-3227.

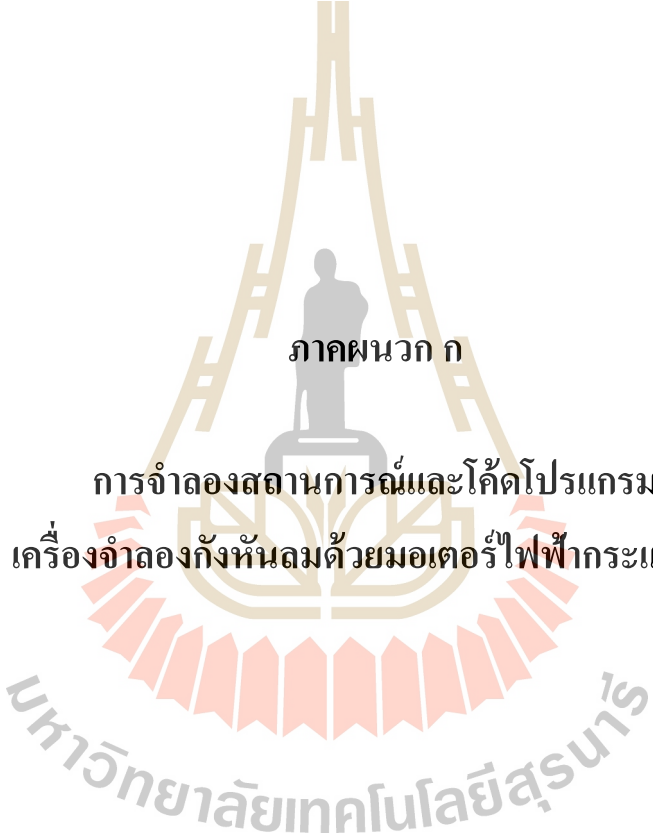
Abo-Khalil, A.G., Lee, D-C. and Seok, J-K. (2004). Variable speed wind power generation system based on fuzzy logic control for maximum output power tracking. **IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference**. 3:2039-2043.

- Alnasir, Z. and Kazerani, M. (2013). An analytical literature review of stand-alone wind energy conversion systems from generator viewpoint. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 28:597-615.
- Assareh, E., and Biglari, M. (2015). A novel approach to capture the maximum power from variable speed wind turbines using PI controller, RBF neural network and GSA evolutionary algorithm. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 51:1023-1037.
- Calderaro, V., Galdi, V., Piccolo, A., and Siano, P. (2008). A fuzzy controller for maximum energy extraction from variable speed wind power generation systems. **Electric Power Systems Research**. 78(6):1109-1118.
- Daili, Y., Gaubert, J-P., and Rahmani, L. (2015). Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors. **Energy Conversion and Management**. 97:298-306.
- Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y., and Lai, J-S. (Jason). (2013). Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 28(3):756-767.
- Datta, R., and Ranganathan, V.T. (2003). A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 18(1):163-168.
- Eltamaly, A. M., and Farh, H. M. (2013). Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control. **Electric Power Systems Research**. 97:144-150.
- González, L. G., Figueres, E., Garcera, G., and Carranza, O. (2010). Maximum-power-point tracking with reduced mechanical stress applied to wind-energy-conversion-systems. **Applied Energy**. 87(7):2304-2312.
- Gu, Y-j., Yin, X-x, Liu, H-w., Li, W., and Lin, Y-g. (2015). Fuzzy terminal sliding mode control for extracting maximum marine current energy. **Energy**. 90:258-265.
- Hong, C.-M., Chen, C-H., and, Tu, C-S. (2013). Maximum power point tracking-based control algorithm for PMSG wind generation system without mechanical sensors. **Energy Conversion and Management**. 69:58-67.
- Hong, Y-Y., Lu, S-D., and Chiou, C-S. (2009). MPPT for PM wind generator using gradient approximation. **Energy Conversion and Management**. 50(1):82-89.

- José, C. U., Peña Moacyr A. G., de Brito Guilherme, de A. e Melo, and Carlos A. Canesin. (2011). A comparative study of MPPT strategies and a novel singlephase integrated buck-boost inverter for small wind energy conversion systems. **XI Brazilian Power Electronics Conference**. :458-465.
- Ke, X., Minqiang, H., Rong, Y., and Du, W. (2007). Wind turbine simulator using PMSM. **International Universities Power Engineering Conference**. :732-737.
- Kojabadi, H.M., Chang, L., and Boutot, T. (2004). Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 19(3):547-552.
- Kot, R., Rolak, M., and Malinowski, M. (2013). Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine. **Mathematics and Computers in Simulation**. 91:29-40.
- Kumar, D., and Chatterjee K. (2016). A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 55:957-970.
- Lahfaoui, B., Zouggar, S., Mohammed, B., and Elhafyani, M. L. (2017). Real Time Study of P&O MPPT Control for Small Wind PMSG Turbine Systems Using Arduino Microcontroller. **Energy Procedia**. 111:1000-1009.
- Lalouni, S., Rekioua, D., Idjdarene, K., and Tounzi, A. (2015). Maximum Power Point Tracking Based Hybrid Hill-climb Search Method Applied to Wind Energy Conversion System. **Electric Power Components and Systems**. 43(8-10):1028-1038.
- Lee, C-Y., Chen, P-H., and Shen, Y-X. (2011). Maximum power point tracking (MPPT) system of small wind power generator using RBFNN approach. **Expert Systems with Applications**. 38(10):12058-12065.
- Lee, J., and Kim, Y-S. (2016). 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(2):194-202.
- Li, W., Xu, D., Zhang, W., and Ma, H. (2007). Research on Wind Turbine Emulation based on DC Motor. **IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**. :2589-2593.
- Li, H., and Chen, Z. (2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons. **IET Renewable Power Generation**. 2(2):123-138.

- Lin, W-M., and Hong, C-M. (2010). Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system. **Energy**. 35(6):2440-2447.
- Liu, G., Wang, S., and Zhang, J. (2010). Design and Realization of DC Motor and Drives Based Simulator for Small Wind Turbine. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**. :1-4.
- Lo, K-Y., Chen, Y-M., and Chang, Y-R. (2011). MPPT Battery Charger for Stand-Alone Wind Power System. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 26(6):1631-1638.
- Martinez F., Carlos Herrero L. and Pablo S. (2014). Open loop wind turbine emulator. **Renewable Energy**. 63:212-221.
- Mendis, N., Muttaqi, K. M., Sayeef, S., and Perera, S. (2012). Standalone Operation of Wind Turbine-Based Variable Speed Generators With Maximum Power Extraction Capability. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 27(4):822-834.
- Mirecki, A., Roboam, X., and Richardeau, F. (2007). Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 54(1):660-670.
- Monfared, M., Kojabadi, M. H., and Rastegar, H. (2008). Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor. **Renewable Energy**. 33(5):906-913.
- Petrila, D., Blaabjerg, F., Muntean, N., and Lascu, C. (2012). Fuzzy logic based MPPT controller for a small wind turbine system. 13th International Conference on Optimization of **Electrical and Electronic Equipment**. :993-999.
- Raza Kazmi, S. M., Goto, H., Guo, H.-J., and Ichinokura, O. (2010). Review and critical analysis of the research papers published till date on maximum power point tracking in wind energy conversion system. **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. :4075-4082.
- Serban, I., and Marinescu, C. (2012). A sensorless control method for variable-speed small wind turbines. **Renewable Energy**. 43:256-266.
- Singh, M., Chandra, A., and Singh, B. (2010). Sensorless Power Maximization of PMSG Based Isolated Wind-Battery Hybrid System Using Adaptive Neuro-Fuzzy Controller. **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. :1-6.
- Singh, M., Khadkikar, V., and Chandra, A. (2011). Grid synchronisation with harmonics and reactive power compensation capability of a permanent magnet synchronous generator-

- based variable speed wind energy conversion system. *IET Power Electronics*. 4(1):122-130.
- Tan, K., and Islam, S. (2004). Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. 19(2):392-399.
- Trinh, QN., and Lee, HH. (2010). Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Tracking in PMSG-Based Wind Power Systems. **Advanced Intelligent Computing Theories and Applications With Aspects of Artificial Intelligence**. 6216:543-553.
- Urtasun, A., Sanchis, P., Martín, I. S., López, J., and Marroyo, L. (2013). Modeling of small wind turbines based on PMSG with diode bridge for sensorless maximum power tracking. **Renewable Energy**. 55:138-149.
- Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., and Kouro, S. (2011). **Power Conversion and Control of Wind Energy Systems**. Wiley-IEEE Press: John Wiley & Sons Inc.
- Xia, Y., Ahmed, K. H., and Williams, B. W. (2011). A New Maximum Power Point Tracking Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 26(12):3609-3620.
- Xia, Y., Ahmed, K. H., and Williams, B. W. (2013). Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 60(3):1122-1132.
- Yaakoubi, A. E., Asselman, A., Djebli, A., and Aroudam, E. H. (2016). A MPPT Strategy Based on Fuzzy Control for a Wind Energy Conversion System. **Procedia Technology**. 22:697-704.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. **Information and Control**. 8: 338-353.



ภาคผนวก ก

การจำลองสถานการณ์และโค้ดโปรแกรม
เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

```

*****

โค้ดโปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

*****

int EN = 11;
int CS = 43;
int SCK = 52;
int SDI = 53;
int LDAC = 51;
int SHDN = 50;

long previousTime = 0;
float Ts = 0.02; // s
float count = 0;
float ref; // Reference
float Kp;
float Ki;
float Up,Ui;
float Upi = 0, Ui_1 = 0,err_1 = 0;// initial value
float err = 0;
float y; // Output
float Read_speed_sensor = 0, Read_current_sensor = 0;
int n=10,m;
float Sum_speed_sensor = 0, Sum_current_sensor = 0;
float average_speed_sensor = 0, average_current_sensor = 0;
float rpm = 0, ia = 0;
float Speed = 0, Current = 0;
float Vw, Read_Vw;
float V1, vw1,vw1_1 = 0, outVw;
float Pm;
float Tref;
float Iac;
float Ia_ref;
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;

pinMode(CS, OUTPUT);
pinMode(SCK, OUTPUT);
pinMode(SDI, OUTPUT);
pinMode(LDAC, OUTPUT);
pinMode(SHDN, OUTPUT);

digitalWrite(CS, HIGH);          //Standby CS Signal
digitalWrite(SCK, LOW);
digitalWrite(SDI, LOW);
digitalWrite(LDAC, HIGH);        //Standby LDAC Signal
digitalWrite(SHDN, HIGH);        //Standby SHDN Signal
}

void loop()
{
  if(millis() - previousTime > Ts*1000) // *1000 make for seconds
  {
    previousTime = millis();
    call_speed_sensor();
    call_current_sensor();
    call_cal_Wind_Turbine();
    call_PI();
    // call_display();
    count = count + Ts;
  }
}

void call_speed_sensor()
{
  Sum_speed_sensor = 0;
  for(m=1; m <= n; m++)
  {
    Read_speed_sensor = analogRead(A0);
    Sum_speed_sensor = Sum_speed_sensor + Read_speed_sensor;
  }
  average_speed_sensor = (Sum_speed_sensor/n)*5/1023;
  Speed = 125.65*average_speed_sensor + 0.5; // Eq. cal rpm
  rpm = constrain(Speed,0.001,550);
  // Serial.print("\ntrpm = ");
  // Serial.println(rpm,2);
}

void call_current_sensor()
{
  Sum_current_sensor = 0;
  for(m=1; m <= n; m++)
  {
    Read_current_sensor = analogRead(A1);

```

```

}
average_current_sensor = (Sum_current_sensor/n)*5/1023;
Current = 8.1*average_current_sensor - 0.569 ; // Eq. cal ia
ia = constrain(Current,0,40);
// Serial.print("\tia = ");
// Serial.println(ia,2);
}

void call_cal_Wind_Turbine()
{
////////// Parameter Wind Turbine //////////

Read_Vw = analogRead(A3);
V1 = map(Read_Vw,0,1023,0,100);

// Wind Change Step
vw1 =4000;
if (V1 > 40){
    vw1 = 5000;
}
if (V1 > 80){
    vw1 = 6000;
}

outVw = map(vw1,4000,6000,0,4095);
call_Write_MCP4922(0,outVw);
vw1_1 = vw1;
Vw = vw1/1000;

float R = 1.558;
float B = 15;
float p = 1.225;
const float pi = 3.14;

float w = rpm*pi/30;
float L1 = R*w/Vw;
float L2 = 1/(1/(L1+0.08*B)-0.035/(pow(B,3)+1));
float Cp = 0.5176*(116/L2-0.4*B-5)*exp(-21/L2)+0.0068*L1;
float Pw = pow(R,2)*pow(Vw,3)*pi*0.5*p;
    Pm = Pw*Cp;
    Tref = Pm/w;

    Iac = 0.125*Vw + 1.94; // Eq. cal Iac VS Vw
    Ia_ref = 2.72*Tref + Iac; // Eq. cal Ia VS TL Use only K
    Ia_ref = constrain(Ia_ref,0,40);
}

```

```

void call_Write_MCP4922(unsigned char DAC_Channel,unsigned int DAC_Data) // Write DAC
Output
{
    digitalWrite(CS, LOW);          // Enable MCP4922

    switch (DAC_Channel)            // Select DAC Channel(0=A,1=B)
    {
        case 0x00: DAC_Data |= 0x3000;    // Write DAC-A
            break;
        case 0x01: DAC_Data |= 0xB000;    // Write DAC-B
            break;
    }
    shiftOut(SDI, SCK, MSBFIRST,(DAC_Data >> 8)& 0xFF);    //MSB Data(High Byte)
    shiftOut(SDI, SCK, MSBFIRST,DAC_Data & 0xFF);    //LSB Data(Low Byte)

    digitalWrite(CS, HIGH);          // Disable MCP4922

    digitalWrite(LDAC, LOW);          // Enable Pulse Latch
    digitalWrite(LDAC, HIGH);
}

void call_PI()
{
    ref = Ia_ref;
    Kp = 5, Ki = 10;
    y = ia;
    err = ref - y;
    Up = Kp*err;
    Ui = Ki*Ts*err + Ui_1;
    Upi = Up + Ui;
    Upi = constrain(Upi,0,800);
    OCR1A = Upi;
    Ui_1 = Ui;
}

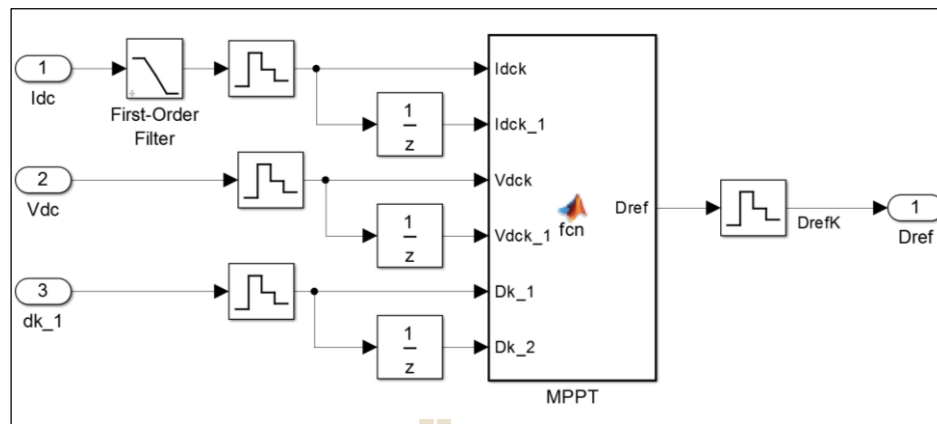
void call_display()
{
    Serial.print("\tTime = ");
    Serial.print(count);
    Serial.print("\tSpeed = ");
    Serial.print(rpm);
    Serial.print("\tCurrent = ");
    Serial.print(ia);
    Serial.print("\tP = ");
    Serial.print(Pm);
    Serial.print("\tTref = ");
    Serial.print(Tref);
    Serial.println();
}

```



ภาคผนวก ข

โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB



รูปที่ ข.1 บล็อกจำลองสถานการณ์ขั้นตอนวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี 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 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในคาบเวลาปัจจุบัน
และอดีต ค่าวัฏจักรหน้าที่ในคาบเวลาอดีต

```
Dmin = 0;
```

```
Dmax = 1;
```

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

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

```
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
```



ภาคผนวก ค

กฎพีชชีสำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

กฎพีชชีสำหรับการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบพีชชีที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตที่นำเสนอในหัวข้อที่ 6.3 ตารางที่ 6.5 ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต ΔP ที่ประกอบด้วย 9 พีชชีเซตและอินพุต ΔD จำนวน 9 พีชชีเซต ดังนั้น จำนวนกฎพีชชีสำหรับการควบคุมจึงมี 81 กฎ ($9 \times 9 = 81$) การออกแบบกฎพีชชีอยู่บนพื้นฐานการควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต โดยรายละเอียดกฎพีชชี 81 กฎ แสดงได้ดังนี้

กฎข้อที่ 1 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = XLI$

กฎข้อที่ 2 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = XLI$

กฎข้อที่ 3 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

กฎข้อที่ 4 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

กฎข้อที่ 5 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = XLI$

กฎข้อที่ 6 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$

กฎข้อที่ 7 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$

กฎข้อที่ 8 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$

กฎข้อที่ 9 IF $\Delta P = XLN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$

กฎข้อที่ 10 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = XLI$

กฎข้อที่ 11 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

กฎข้อที่ 12 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

กฎข้อที่ 13 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = MI$

กฎข้อที่ 14 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

กฎข้อที่ 15 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = MD$

กฎข้อที่ 16 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$

กฎข้อที่ 17 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$

กฎข้อที่ 18 IF $\Delta P = LN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$

กฎข้อที่ 19 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

กฎข้อที่ 20 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

กฎข้อที่ 21 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = MI$

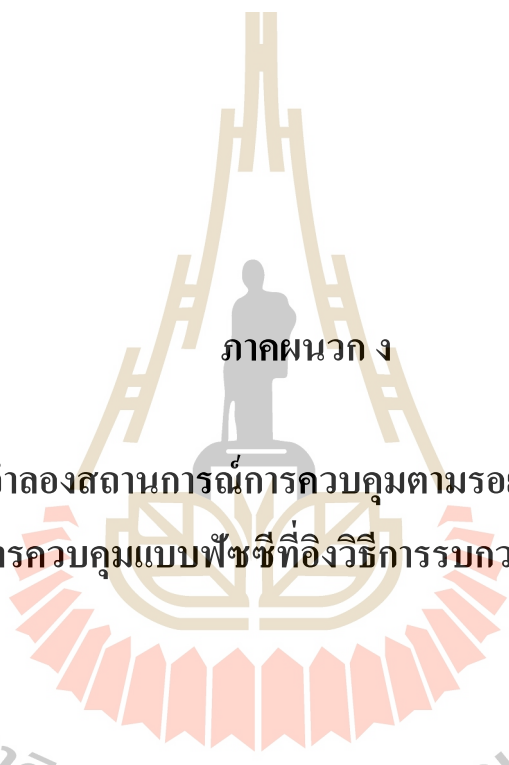
กฎข้อที่ 22 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = SI$

กฎข้อที่ 23 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = MI$

กฎข้อที่ 24 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = SD$

- กฎข้อที่ 25 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = MD$
- กฎข้อที่ 26 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 27 IF $\Delta P = MN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 28 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$
- กฎข้อที่ 29 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = MI$
- กฎข้อที่ 30 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = SI$
- กฎข้อที่ 31 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = SI$
- กฎข้อที่ 32 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = SI$
- กฎข้อที่ 33 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = SD$
- กฎข้อที่ 34 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = SD$
- กฎข้อที่ 35 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = MD$
- กฎข้อที่ 36 IF $\Delta P = SN$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 37 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 38 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 39 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 40 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 41 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 42 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 43 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 44 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 45 IF $\Delta P = Z$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = Z$
- กฎข้อที่ 46 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 47 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = MD$
- กฎข้อที่ 48 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = SD$
- กฎข้อที่ 49 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = SD$
- กฎข้อที่ 50 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = SD$
- กฎข้อที่ 51 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = SI$
- กฎข้อที่ 52 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = SI$
- กฎข้อที่ 53 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = MI$
- กฎข้อที่ 54 IF $\Delta P = SP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$

- กฎข้อที่ 55 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 56 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 57 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = MD$
- กฎข้อที่ 58 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = SD$
- กฎข้อที่ 59 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = MD$
- กฎข้อที่ 60 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = SI$
- กฎข้อที่ 61 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = MI$
- กฎข้อที่ 62 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$
- กฎข้อที่ 63 IF $\Delta P = MP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$
- กฎข้อที่ 64 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 65 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 66 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 67 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = MD$
- กฎข้อที่ 68 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 69 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = MI$
- กฎข้อที่ 70 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$
- กฎข้อที่ 71 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$
- กฎข้อที่ 72 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = XLI$
- กฎข้อที่ 73 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = XLN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 74 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = LN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 75 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = MN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 76 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = SN$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 77 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = Z$ THEN $\Delta D_{opt} = LD$
- กฎข้อที่ 78 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = SP$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$
- กฎข้อที่ 79 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = MP$ THEN $\Delta D_{opt} = LI$
- กฎข้อที่ 80 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = XLI$
- กฎข้อที่ 81 IF $\Delta P = LP$ AND $\Delta D = LP$ THEN $\Delta D_{opt} = XLI$



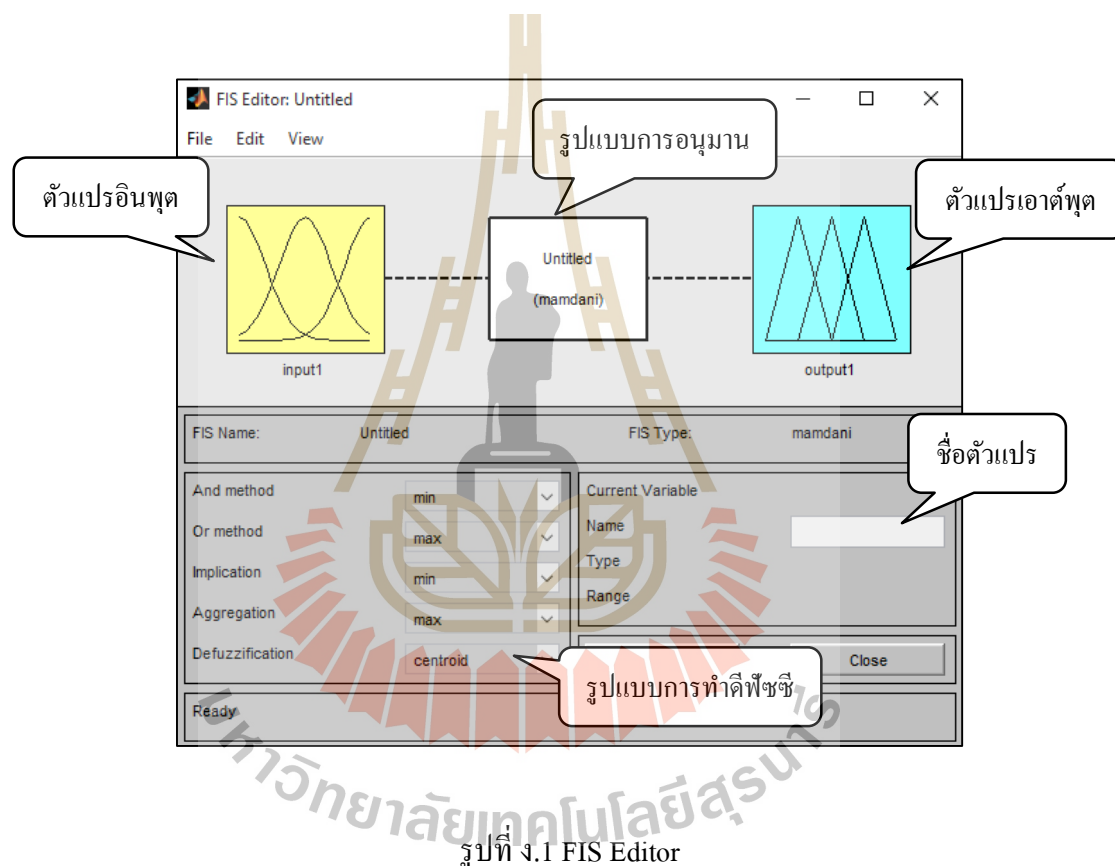
ภาคผนวก ง

การจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด
ด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมควบคุมตามรอยก่าลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวน และการสังเกตจากโปรแกรม SIMULINK ใน MATLAB โดยใช้ Fuzzy Logic Toolbox

การใช้งาน โปรแกรม Fuzzy Logic Toolbox ร่วมกับ SIMULINK ใน MATLAB เพื่อควบคุมตามรอยก่าลังสูงสุดจะดำเนินการผ่าน GUI โดยการพิมพ์คำสั่ง fuzzy บนหน้าต่าง MATLAB จะปรากฏ FIS Editor ดังรูปที่ ง.1 ซึ่งในการออกแบบควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สะดวกในการใช้งาน

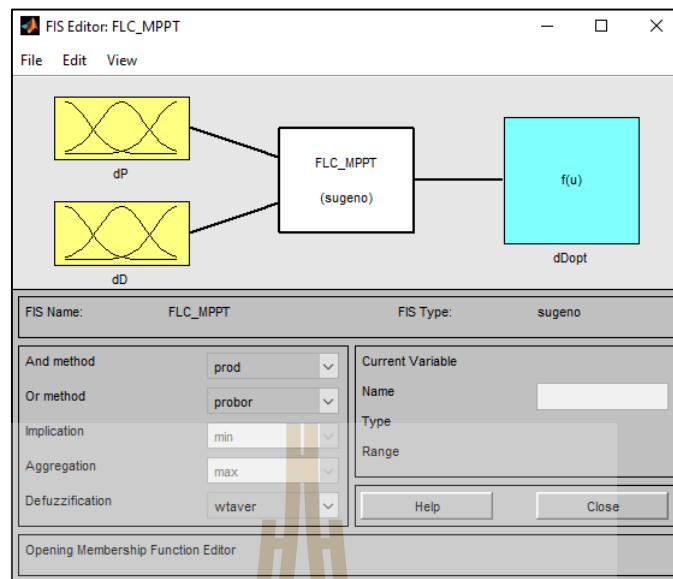


รูปที่ ง.1 FIS Editor

จาก FIS Editor สามารถดำเนินการต่าง ๆ ได้ดังนี้

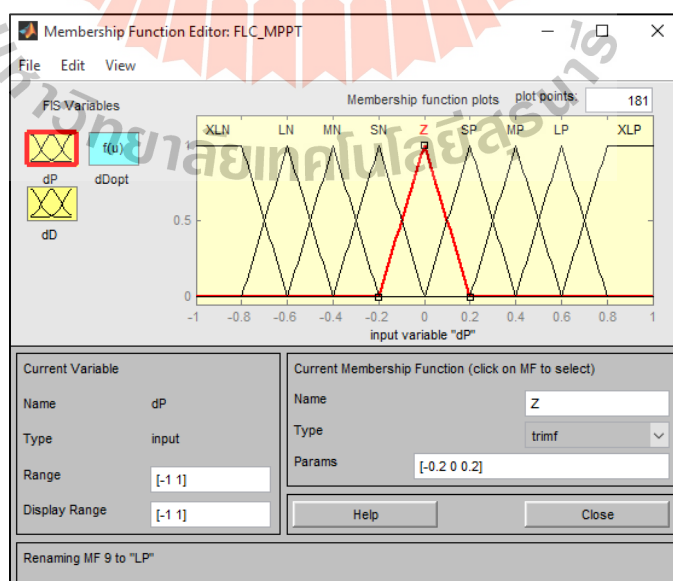
- กำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตได้จากเมนู Edit > Add Variable > Input หรือ Output
- กำหนดชื่อตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต
- กำหนดรูปแบบการอนุมาน (Sugeno)
- กำหนดรูปแบบการทำให้ฟัซซี่

ผลการกำหนด FIS Editor ที่ใช้ในการควบคุมตามรอยก่าลังสูงสุดแสดงดังรูปที่ ง.2

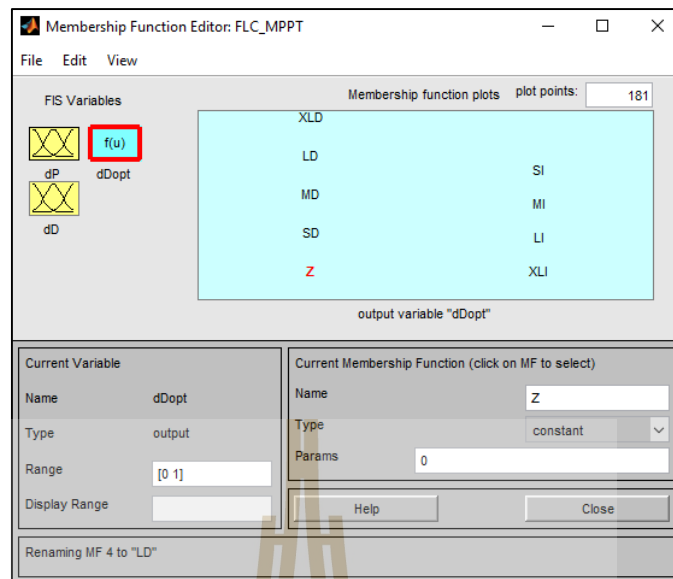


รูปที่ ง.2 การกำหนด FIS Editor สำหรับการควบคุม

กำหนดกราฟฟังก์ชันสมาชิกภาพให้กับตัวแปร โดยไปที่เมนู Edit > Membership Function และกำหนดตัวแปรทั้งสองมีพีชเชตจำนวน 9 เซตด้วยกัน กำหนดให้ตัวแปร dP (ΔP) และ dD (ΔD) ให้มีขอบเขตอยู่ในช่วง $[-1,1]$ และตัวแปร dD_{ref} (ΔD_{opt}) ให้มีขอบเขตอยู่ในช่วง $[-0.5,0.5]$ ดังแสดงในรูปที่ ง.3 และ ง.4 ตามลำดับ

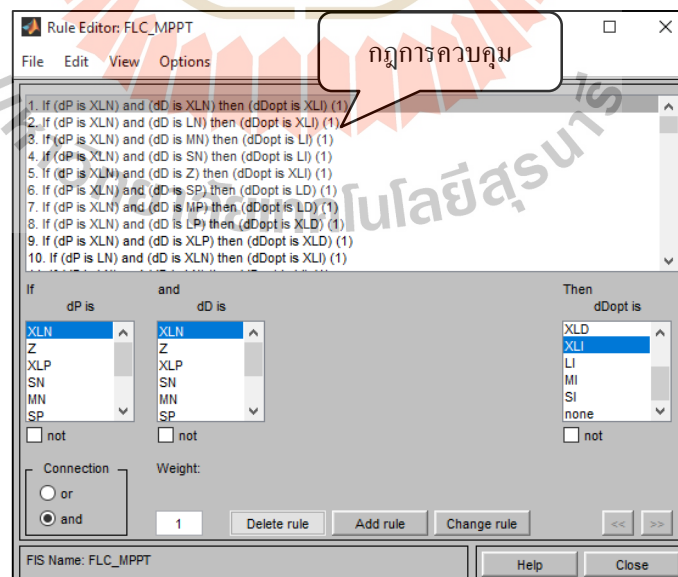


รูปที่ ง.3 กำหนด membership function ของตัวแปรอินพุต



รูปที่ ๓.4 กำหนด membership function ของตัวแปรเอาต์พุต

กำหนดกฎการควบคุมโดยไปที่เมนู Editor > Rules ซึ่งมีทั้งหมด 81 กฎตามจำนวนพีชชีเซต
 ดังนี้ เมื่อทำการกำหนดกฎบน Rule Editor แสดงดังรูปที่ ๓.5 จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลลงใน
 Workspace โดยไปที่เมนู File > Export > To Workspace



รูปที่ ๓.5 Rule Editor



ภาคผนวก จ

โปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม
จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โค้ดโปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม

// 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 สำหรับควบคุมตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวน
และการสังเกตแบบคั้งเดิม
//*****

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

/*****
/ เงื่อนไขค่าเริ่มต้นโปรแกรมตามรอยจุดกำลังสูงสุด
/*****/

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

```

```

/*****/
/ โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม
/*****/

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 = 0;              // กำหนดค่า  $\varepsilon$ 
    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
}

```



ภาคผนวก จ

โปรแกรมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุม
แบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกต
บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โค้ดโปรแกรมควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและการสังเกตบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

```

*****

โค้ดโปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซี่ที่อิงวิธีการรบกวนและ
การสังเกต

*****

// MPPT Fuzzy control

int EN = 11;
long previousTime = 0;
float Ts = 1.5; // s
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 = 0, Idc = 0;
float Pdc = 0, Pdc_1 = 0, dP = 0, dD = 0, Dref = 0, D_0 = 0, D = 0, D_1 = 0, D_2 = 0, d = 0, deltaD
= 0, K = 0;
int Action;
// 9 MF
float LN[] = {-0.8, -0.6}; // N[0] = -0.8
float BN[] = {-0.8, -0.6, -0.4};
float MN[] = {-0.6, -0.4, -0.2};
float sN[] = {-0.4, -0.2, 0}; // SN
float Z[] = {-0.2, 0, 0.2};
float sP[] = {0, 0.2, 0.4}; // SP
float MP[] = {0.2, 0.4, 0.6};
float BP[] = {0.4, 0.6, 0.8};
float LP[] = {0.6, 0.8};
// Output => dDref
float Output[] = {-0.5, -0.375, -0.25, -0.125, 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5};
float LDec = Output[0];
float BDec = Output[1];
float MDec = Output[2];
float SDec = Output[3];
float Contant = Output[4];
float SInc = Output[5];
float MInc = Output[6];
float BInc = Output[7];
float LInc = Output[8];
float num = 0, den = 0, dDref = 0;

```

```

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;
}

void loop()
{
  if(millis() - previousTime > Ts*1000) /*1000 make for seconds
  {
    previousTime = millis();
    call_Voltage_sensor();
    call_Current_sensor();
    Check_Vdc();
    call_MPPT();
    // call_display();
    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; // Eq. cal Vdc
  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 ; // Eq. cal Idc
  Idc = constrain(Current,0,20);
}

void Check_Vdc()
{
  if (Vdc > 16)
  {
    D_0 = 0.15*800;
    Action = 1;
  }
}

```

```

    }
    else
    {
        D_0 = 0;
        Action = 0;
    }
    if (Idc > 0.3)
    {
        D_0 = 0;
    }
}
void call_MPPT()
{

float uLN1 = 0, uBN1 = 0, uMN1 = 0, usN1 = 0, uZ1 = 0, usP1 = 0, uMP1 = 0, uBP1 = 0, uLP1 = 0;
float uLN2 = 0, uBN2 = 0, uMN2 = 0, usN2 = 0, uZ2 = 0, usP2 = 0, uMP2 = 0, uBP2 = 0, uLP2 = 0;
float V1 = 0, V2 = 0, V3 = 0, V4 = 0, V5 = 0, V6 = 0, V7 = 0, V8 = 0, V9 = 0;
float V10 = 0, V11 = 0, V12 = 0, V13 = 0, V14 = 0, V15 = 0, V16 = 0, V17 = 0, V18 = 0;
float V19 = 0, V20 = 0, V21 = 0, V22 = 0, V23 = 0, V24 = 0, V25 = 0, V26 = 0, V27 = 0;
float V28 = 0, V29 = 0, V30 = 0, V31 = 0, V32 = 0, V33 = 0, V34 = 0, V35 = 0, V36 = 0;
float V37 = 0, V38 = 0, V39 = 0, V40 = 0, V41 = 0, V42 = 0, V43 = 0, V44 = 0, V45 = 0;
float V46 = 0, V47 = 0, V48 = 0, V49 = 0, V50 = 0, V51 = 0, V52 = 0, V53 = 0, V54 = 0;
float V55 = 0, V56 = 0, V57 = 0, V58 = 0, V59 = 0, V60 = 0, V61 = 0, V62 = 0, V63 = 0;
float V64 = 0, V65 = 0, V66 = 0, V67 = 0, V68 = 0, V69 = 0, V70 = 0, V71 = 0, V72 = 0;
float V73 = 0, V74 = 0, V75 = 0, V76 = 0, V77 = 0, V78 = 0, V79 = 0, V80 = 0, V81 = 0;
float u1 = 0, u2 = 0, u3 = 0, u4 = 0, u5 = 0, u6 = 0, u7 = 0, u8 = 0, u9 = 0;
float u10 = 0, u11 = 0, u12 = 0, u13 = 0, u14 = 0, u15 = 0, u16 = 0, u17 = 0, u18 = 0;
float u19 = 0, u20 = 0, u21 = 0, u22 = 0, u23 = 0, u24 = 0, u25 = 0, u26 = 0, u27 = 0;
float u28 = 0, u29 = 0, u30 = 0, u31 = 0, u32 = 0, u33 = 0, u34 = 0, u35 = 0, u36 = 0;
float u37 = 0, u38 = 0, u39 = 0, u40 = 0, u41 = 0, u42 = 0, u43 = 0, u44 = 0, u45 = 0;
float u46 = 0, u47 = 0, u48 = 0, u49 = 0, u50 = 0, u51 = 0, u52 = 0, u53 = 0, u54 = 0;
float u55 = 0, u56 = 0, u57 = 0, u58 = 0, u59 = 0, u60 = 0, u61 = 0, u62 = 0, u63 = 0;
float u64 = 0, u65 = 0, u66 = 0, u67 = 0, u68 = 0, u69 = 0, u70 = 0, u71 = 0, u72 = 0;
float u73 = 0, u74 = 0, u75 = 0, u76 = 0, u77 = 0, u78 = 0, u79 = 0, u80 = 0, u81 = 0;
float num1 = 0, num2 = 0, num3 = 0, den1 = 0, den2 = 0, den3 = 0;

    Pdc = Vdc*Idc;
    dP = (Pdc - Pdc_1)/400;          // Up = 1/400
    dD = (D_1 - D_2)*2/800;          // Ud = 2
    dP = constrain(dP,-1,1);
    dD = constrain(dD,-1,1);

    // Serial.print("\tdP = ");
    // Serial.print(dP,4);
    // Serial.print("\tdD = ");
    // Serial.print(dD,4);

```

```
//===== Check Input 1 (dP) =====
//===== Cal. uLN1 =====
if (dP < LN[1]) {
    if (dP <= LN[0]){
        uLN1 = 1;
    }
    else if (dP >= LN[0] && dP <= LN[1]){
        uLN1 = (dP - LN[1])/(LN[0] - LN[1]);
    }
}
else{
    uLN1 = 0;
}
```

```
//===== Cal. uBN1 =====
if (dP < BN[2] && dP > BN[0]){
    if (dP >= BN[1] && dP <= BN[2]){
        uBN1 = (dP - BN[2])/(BN[1] - BN[2]);
    }
    else if (dP >= BN[0] && dP <= BN[1]){
        uBN1 = (dP - BN[0])/(BN[1] - BN[0]);
    }
    else{
        uBN1 = 0;
    }
}
```

```
//===== Cal. uMN1 =====
if (dP < MN[2] && dP > MN[0]){
    if (dP >= MN[1] && dP <= MN[2]){
        uMN1 = (dP - MN[2])/(MN[1] - MN[2]);
    }
    else if (dP >= MN[0] && dP <= MN[1]){
        uMN1 = (dP - MN[0])/(MN[1] - MN[0]);
    }
    else{
        uMN1 = 0;
    }
}
```

```
//===== Cal. usN1 =====
if (dP < sN[2] && dP > sN[0]){
    if (dP >= sN[1] && dP <= sN[2]){
        usN1 = (dP - sN[2])/(sN[1] - sN[2]);
    }
    else if (dP >= sN[0] && dP <= sN[1]){
        usN1 = (dP - sN[0])/(sN[1] - sN[0]);
    }
    else{
        usN1 = 0;
    }
}
```

```

//===== Cal. uZ1 =====
if (dP < Z[2] && dP > Z[0]){
  if (dP >= Z[1] && dP <= Z[2]){
    uZ1 = (dP - Z[2])/(Z[1] - Z[2]);
  }
  else if (dP >= Z[0] && dP <= Z[1]){
    uZ1 = (dP - Z[0])/(Z[1] - Z[0]);
  }
  else{
    uZ1 = 0;
  }
}

//===== Cal. usP1 =====
if (dP < sP[2] && dP > sP[0]){
  if (dP >= sP[1] && dP <= sP[2]){
    usP1 = (dP - sP[2])/(sP[1] - sP[2]);
  }
  else if (dP >= sP[0] && dP <= sP[1]){
    usP1 = (dP - sP[0])/(sP[1] - sP[0]);
  }
  else{
    usP1 = 0;
  }
}

//===== Cal. uMP1 =====
if (dP < MP[2] && dP > MP[0]){
  if (dP >= MP[1] && dP <= MP[2]){
    uMP1 = (dP - MP[2])/(MP[1] - MP[2]);
  }
  else if (dP >= MP[0] && dP <= MP[1]){
    uMP1 = (dP - MP[0])/(MP[1] - MP[0]);
  }
  else{
    uMP1 = 0;
  }
}

//===== Cal. uBP1 =====
if (dP < BP[2] && dP > BP[0]){
  if (dP >= BP[1] && dP <= BP[2]){
    uBP1 = (dP - BP[2])/(BP[1] - BP[2]);
  }
  else if (dP >= BP[0] && dP <= BP[1]){
    uBP1 = (dP - BP[0])/(BP[1] - BP[0]);
  }
  else{
    uBP1 = 0;
  }
}

//===== Cal. uLP1 =====
if (dP > LP[0]){
  if (dP >= LP[1]){
    uLP1 = 1;
  }
}

```

```

}
else if (dP >= LP[0] && dP <= LP[1]){
uLP1 = (dP - LP[0])/(LP[1] - LP[0]);
}
else{
uLP1 = 0;
}
}

//===== Check Input 2 (dD) =====
//===== Cal. uLN2 =====
if (dD < LN[1]) {
if (dD <= LN[0]){
uLN2 = 1;
}
else if (dD >= LN[0] && dD <= LN[1]){
uLN2 = (dD - LN[1])/(LN[0] - LN[1]);
}
}
else{
uLN2 = 0;
}

//===== Cal. uBN2 =====
if (dD < BN[2] && dD > BN[0]){
if (dD >= BN[1] && dD <= BN[2]){
uBN2 = (dD - BN[2])/(BN[1] - BN[2]);
}
else if (dD >= BN[0] && dD <= BN[1]){
uBN2 = (dD - BN[0])/(BN[1] - BN[0]);
}
else{
uBN2 = 0;
}
}

//===== Cal. uMN2 =====
if (dD < MN[2] && dD > MN[0]){
if (dD >= MN[1] && dD <= MN[2]){
uMN2 = (dD - MN[2])/(MN[1] - MN[2]);
}
else if (dD >= MN[0] && dD <= MN[1]){
uMN2 = (dD - MN[0])/(MN[1] - MN[0]);
}
else{
uMN2 = 0;
}
}

//===== Cal. usN2 =====
if (dD < sN[2] && dD > sN[0]){
if (dD >= sN[1] && dD <= sN[2]){
usN2 = (dD - sN[2])/(sN[1] - sN[2]);
}
else if (dD >= sN[0] && dD <= sN[1]){
usN2 = (dD - sN[0])/(sN[1] - sN[0]);
}
}

```

```

}
else{
    usN2 = 0;
}
}

//===== Cal. uZ2 =====
if (dD < Z[2] && dD > Z[0]){
    if (dD >= Z[1] && dD <= Z[2]){
        uZ2 = (dD - Z[2])/(Z[1] - Z[2]);
    }
    else if (dD >= Z[0] && dD <= Z[1]){
        uZ2 = (dD - Z[0])/(Z[1] - Z[0]);
    }
    else{
        uZ2 = 0;
    }
}

//===== Cal. usP2 =====
if (dD < sP[2] && dD > sP[0]){
    if (dD >= sP[1] && dD <= sP[2]){
        usP2 = (dD - sP[2])/(sP[1] - sP[2]);
    }
    else if (dD >= sP[0] && dD <= sP[1]){
        usP2 = (dD - sP[0])/(sP[1] - sP[0]);
    }
    else{
        usP2 = 0;
    }
}

//===== Cal. uMP2 =====
if (dD < MP[2] && dD > MP[0]){
    if (dD >= MP[1] && dD <= MP[2]){
        uMP2 = (dD - MP[2])/(MP[1] - MP[2]);
    }
    else if (dD >= MP[0] && dD <= MP[1]){
        uMP2 = (dD - MP[0])/(MP[1] - MP[0]);
    }
    else{
        uMP2 = 0;
    }
}

//===== Cal. uBP2 =====
if (dD < BP[2] && dD > BP[0]){
    if (dD >= BP[1] && dD <= BP[2]){
        uBP2 = (dD - BP[2])/(BP[1] - BP[2]);
    }
    else if (dD >= BP[0] && dD <= BP[1]){
        uBP2 = (dD - BP[0])/(BP[1] - BP[0]);
    }
    else{
        uBP2 = 0;
    }
}

```

```

}

//===== Cal. uLP2 =====
if (dD > LP[0]){
  if (dD >= LP[1]){
    uLP2 = 1;
  }
  else if (dD >= LP[0] && dD <= LP[1]){
    uLP2 = (dD - LP[0])/(LP[1] - LP[0]);
  }
  else{
    uLP2 = 0;
  }
}

```

```

//===== Fuzzy Rule =====

```

```

//===== Rule(1) =====

```

```

if (uLN1 > 0 && uLN2 > 0){
  V1 = min(uLN1,uLN2)*LInc;
  u1 = min(uLN1,uLN2);
}
else{
  V1 = 0;
  u1 = 0;
}

```

```

////===== Rule(2) =====

```

```

if (uLN1 > 0 && uBN2 > 0){
  V2 = min(uLN1,uBN2)*LInc;
  u2 = min(uLN1,uBN2);
}
else{
  V2 = 0;
  u2 = 0;
}

```

```

//===== Rule(3) =====

```

```

if (uLN1 > 0 && uMN2 > 0){

  V3 = min(uLN1,uMN2)*BInc;
  u3 = min(uLN1,uMN2);
}
else{
  V3 = 0;
  u3 = 0;
}

```

```

//===== Rule(4) =====

```

```

if (uLN1 > 0 && usN2 > 0){

  V4 = min(uLN1,usN2)*BInc;

```

```

u4 = min(uLN1,usN2);
}
else{
    V4 = 0;
    u4 = 0;
}

//==== Rule(5) =====
if (uLN1 > 0 && uZ2 > 0){

    V5 = min(uLN1,uZ2)*LInc;
    u5= min(uLN1,uZ2);
}
else{
    V5 = 0;
    u5 = 0;
}

//==== Rule(6) =====
if (uLN1 > 0 && usP2 > 0){

    V6 = min(uLN1,usP2)*BDec;
    u6 = min(uLN1,usP2);
}
else{
    V6 = 0;
    u6 = 0;
}

//==== Rule(7) =====
if (uLN1 > 0 && uMP2 > 0){

    V7 = min(uLN1,uMP2)*BDec;
    u7 = min(uLN1,uMP2);
}
else{
    V7 = 0;
    u7 = 0;
}

//==== Rule(8) =====
if (uLN1 > 0 && uBP2 > 0){

    V8 = min(uLN1,uBP2)*LDec;
    u8 = min(uLN1,uBP2);
}
else{
    V8 = 0;
    u8 = 0;
}

//==== Rule(9) =====
if (uLN1 > 0 && uLP2 > 0){

    V9 = min(uLN1,uLP2)*LDec;

```

```

    u9 = min(uLN1,uLP2);
}
else{
    V9 = 0;
    u9 = 0;
}

//==== Rule(10) =====
if (uBN1 > 0 && uLN2 > 0){
    V10 = min(uBN1,uLN2)*LInc;
    u10 = min(uBN1,uLN2);
}
else{
    V10 = 0;
    u10 = 0;
}

//==== Rule(11) =====
if (uBN1 > 0 && uBN2 > 0){
    V11 = min(uBN1,uBN2)*BInc;
    u11 = min(uBN1,uBN2);
}
else{
    V11 = 0;
    u11 = 0;
}

//==== Rule(12) =====
if (uBN1 > 0 && uMN2 > 0){
    V12 = min(uBN1,uMN2)*BInc;
    u12 = min(uBN1,uMN2);
}
else{
    V12 = 0;
    u12 = 0;
}

//==== Rule(13) =====
if (uBN1 > 0 && usN2 > 0){
    V13 = min(uBN1,usN2)*MInc;
    u13 = min(uBN1,usN2);
}
else{
    V13 = 0;
    u13 = 0;
}

//==== Rule(14) =====
if (uBN1 > 0 && uZ2 > 0){
    V14 = min(uBN1,uZ2)*BInc;
    u14 = min(uBN1,uZ2);
}

```

```

}
else{
    V14 = 0;
    u14 = 0;
}

//==== Rule(15) =====
if (uBN1 > 0 && usP2 > 0){

    V15 = min(uBN1,usP2)*MDec;
    u15 = min(uBN1,usP2);
}
else{
    V15 = 0;
    u15 = 0;
}

//==== Rule(16) =====
if (uBN1 > 0 && uMP2 > 0){

    V16 = min(uBN1,uMP2)*BDec;
    u16 = min(uBN1,uMP2);
}
else{
    V16 = 0;
    u16 = 0;
}

//==== Rule(17) =====
if (uBN1 > 0 && uBP2 > 0){

    V17 = min(uBN1,uBP2)*BDec;
    u17 = min(uBN1,uBP2);
}
else{
    V17 = 0;
    u17 = 0;
}

//==== Rule(18) =====
if (uBN1 > 0 && uLP2 > 0){

    V18 = min(uBN1,uLP2)*LDec;
    u18 = min(uBN1,uLP2);
}
else{
    V18 = 0;
    u18 = 0;
}

//==== Rule(19) =====
if (uMN1 > 0 && uLN2 > 0){
    V19 = min(uMN1,uLN2)*BInc;
    u19 = min(uMN1,uLN2);
}

```

```

}
else{
    V19 = 0;
    u19 = 0;
}

//==== Rule(20) =====
if (uMN1 > 0 && uBN2 > 0){
    V20 = min(uMN1,uBN2)*BInc;
    u20 = min(uMN1,uBN2);
}
else{
    V20 = 0;
    u20 = 0;
}

//==== Rule(21) =====
if (uMN1 > 0 && uMN2 > 0){
    V21 = min(uMN1,uMN2)*MInc;
    u21 = min(uMN1,uMN2);
}
else{
    V21 = 0;
    u21 = 0;
}

//==== Rule(22) =====
if (uMN1 > 0 && usN2 > 0){
    V22 = min(uMN1,usN2)*SInc;
    u22 = min(uMN1,usN2);
}
else{
    V22 = 0;
    u22 = 0;
}

//==== Rule(23) =====
if (uMN1 > 0 && uZ2 > 0){
    V23 = min(uMN1,uZ2)*MInc;
    u23 = min(uMN1,uZ2);
}
else{
    V23 = 0;
    u23 = 0;
}

//==== Rule(24) =====
if (uMN1 > 0 && usP2 > 0){
    V24 = min(uMN1,usP2)*SDec;
    u24 = min(uMN1,usP2);
}

```

```

else{
    V24 = 0;
    u24 = 0;
}

//==== Rule(25) =====
if (uMN1 > 0 && uMP2 > 0){

    V25 = min(uMN1,uMP2)*MDec;
    u25 = min(uMN1,uMP2);
}
else{
    V25 = 0;
    u25 = 0;
}

//==== Rule(26) =====
if (uMN1 > 0 && uBP2 > 0){

    V26 = min(uMN1,uBP2)*BDec;
    u26 = min(uMN1,uBP2);
}
else{
    V26 = 0;
    u26 = 0;
}

//==== Rule(27) =====
if (uMN1 > 0 && uLP2 > 0){

    V27 = min(uMN1,uLP2)*BDec;
    u27 = min(uMN1,uLP2);
}
else{
    V27 = 0;
    u27 = 0;
}

//==== Rule(28) =====
if (usN1 > 0 && uLN2 > 0){
    V28 = min(usN1,uLN2)*BInc;
    u28 = min(usN1,uLN2);
}
else{
    V28 = 0;
    u28 = 0;
}

//==== Rule(29) =====
if (usN1 > 0 && uBN2 > 0){
    V29 = min(usN1,uBN2)*MInc;
    u29 = min(usN1,uBN2);
}
else{
    V29 = 0;

```

```

    u29 = 0;
}

//==== Rule(30) =====
if (usN1 > 0 && uMN2 > 0){

    V30 = min(usN1,uMN2)*SInc;
    u30 = min(usN1,uMN2);
}
else{
    V30 = 0;
    u30 = 0;
}

//==== Rule(31) =====
if (usN1 > 0 && usN2 > 0){

    V31 = min(usN1,usN2)*SInc;
    u31 = min(usN1,usN2);
}
else{
    V31 = 0;
    u31 = 0;
}

//==== Rule(32) =====
if (usN1 > 0 && uZ2 > 0){

    V32 = min(usN1,uZ2)*SInc;
    u32 = min(usN1,uZ2);
}
else{
    V32 = 0;
    u32 = 0;
}

//==== Rule(33) =====
if (usN1 > 0 && usP2 > 0){

    V33 = min(usN1,usP2)*SDec;
    u33 = min(usN1,usP2);
}
else{
    V33 = 0;
    u33 = 0;
}

//==== Rule(34) =====
if (usN1 > 0 && uMP2 > 0){

    V34 = min(usN1,uMP2)*SDec;
    u34 = min(usN1,uMP2);
}
else{
    V34 = 0;

```

```

    u34 = 0;
}

//==== Rule(35) =====
if (usN1 > 0 && uBP2 > 0){

    V35 = min(usN1,uBP2)*MDec;
    u35 = min(usN1,uBP2);
}
else{
    V35 = 0;
    u35 = 0;
}

//==== Rule(36) =====
if (usN1 > 0 && uLP2 > 0){

    V36 = min(usN1,uLP2)*BDec;
    u36 = min(usN1,uLP2);
}
else{
    V36 = 0;
    u36 = 0;
}

//==== Rule(37) =====
if (uZ1 > 0 && uLN2 > 0){
    V37 = min(uZ1,uLN2)*Contant;
    u37 = min(uZ1,uLN2);
}
else{
    V37 = 0;
    u37 = 0;
}

//==== Rule(38) =====
if (uZ1 > 0 && uBN2 > 0){
    V38 = min(uZ1,uBN2)*Contant;
    u38 = min(uZ1,uBN2);
}
else{
    V38 = 0;
    u38 = 0;
}

//==== Rule(39) =====
if (uZ1 > 0 && uMN2 > 0){

    V39 = min(uZ1,uMN2)*Contant;
    u39 = min(uZ1,uMN2);
}
else{
    V39 = 0;
    u39 = 0;
}

```

```
//==== Rule(40) =====
if (uZ1 > 0 && usN2 > 0){

    V40 = min(uZ1,usN2)*Contant;
    u40 = min(uZ1,usN2);
}
else{
    V40 = 0;
    u40 = 0;
}
```

```
//==== Rule(41) =====
if (uZ1 > 0 && uZ2 > 0){

    V41 = min(uZ1,uZ2)*Contant;
    u41= min(uZ1,uZ2);
}
else{
    V41 = 0;
    u41 = 0;
}
```

```
//==== Rule(42) =====
if (uZ1 > 0 && usP2 > 0){

    V42 = min(uZ1,usP2)*Contant;
    u42 = min(uZ1,usP2);
}
else{
    V42 = 0;
    u42 = 0;
}
```

```
//==== Rule(43) =====
if (uZ1 > 0 && uMP2 > 0){

    V43 = min(uZ1,uMP2)*Contant;
    u43 = min(uZ1,uMP2);
}
else{
    V43 = 0;
    u43 = 0;
}
```

```
//==== Rule(44) =====
if (uZ1 > 0 && uBP2 > 0){

    V44 = min(uZ1,uBP2)*Contant;
    u44 = min(uZ1,uBP2);
}
else{
    V44 = 0;
    u44 = 0;
}
```

```
//==== Rule(45) =====
if (uZ1 > 0 && uLP2 > 0){

    V45 = min(uZ1,uLP2)*Contant;
    u45 = min(uZ1,uLP2);
}
else{
    V45 = 0;
    u45 = 0;
}
```

```
//==== Rule(46) =====
if (usP1 > 0 && uLN2 > 0){
    V46 = min(usP1,uLN2)*BDec;
    u46 = min(usP1,uLN2);
}
else{
    V46 = 0;
    u46 = 0;
}
```

```
//==== Rule(47) =====
if (usP1 > 0 && uBN2 > 0){
    V47 = min(usP1,uBN2)*MDec;
    u47 = min(usP1,uBN2);
}
else{
    V47 = 0;
    u47 = 0;
}
```

```
//==== Rule(48) =====
if (usP1 > 0 && uMN2 > 0){

    V48 = min(usP1,uMN2)*SDec;
    u48 = min(usP1,uMN2);
}
else{
    V48 = 0;
    u48 = 0;
}
```

```
//==== Rule(49) =====
if (usP1 > 0 && usN2 > 0){

    V49 = min(usP1,usN2)*SDec;
    u49 = min(usP1,usN2);
}
else{
    V49 = 0;
    u49 = 0;
}
```

```
//==== Rule(50) =====
if (usP1 > 0 && uZ2 > 0){
```

```

V50 = min(usP1,uZ2)*SDec;
u50 = min(usP1,uZ2);
}
else{
V50 = 0;
u50 = 0;
}

//==== Rule(51) =====
if (usP1 > 0 && usP2 > 0){

V51 = min(usP1,usP2)*SInc;
u51 = min(usP1,usP2);
}
else{
V51 = 0;
u51 = 0;
}

//==== Rule(52) =====
if (usP1 > 0 && uMP2 > 0){

V52 = min(usP1,uMP2)*SInc;
u52 = min(usP1,uMP2);
}
else{
V52 = 0;
u52 = 0;
}

//==== Rule(53) =====
if (usP1 > 0 && uBP2 > 0){

V53 = min(usP1,uBP2)*MInc;
u53 = min(usP1,uBP2);
}
else{
V53 = 0;
u53 = 0;
}

//==== Rule(54) =====
if (usP1 > 0 && uLP2 > 0){

V54 = min(usP1,uLP2)*BInc;
u54 = min(usP1,uLP2);
}
else{
V54 = 0;
u54 = 0;
}

//==== Rule(55) =====
if (uMP1 > 0 && uLN2 > 0){
V55 = min(uMP1,uLN2)*BDec;

```

```

    u55 = min(uMP1,uLN2);
}
else{
    V55 = 0;
    u55 = 0;
}

//==== Rule(56) =====
if (uMP1 > 0 && uBN2 > 0){
    V56 = min(uMP1,uBN2)*BDec;
    u56 = min(uMP1,uBN2);
}
else{
    V56 = 0;
    u56 = 0;
}

//==== Rule(57) =====
if (uMP1 > 0 && uMN2 > 0){

    V57 = min(uMP1,uMN2)*MDec;
    u57 = min(uMP1,uMN2);
}
else{
    V57 = 0;
    u57 = 0;
}

//==== Rule(58) =====
if (uMP1 > 0 && usN2 > 0){

    V58 = min(uMP1,usN2)*SDec;
    u58 = min(uMP1,usN2);
}
else{
    V58 = 0;
    u58 = 0;
}

//==== Rule(59) =====
if (uMP1 > 0 && uZ2 > 0){

    V59 = min(uMP1,uZ2)*MDec;
    u59 = min(uMP1,uZ2);
}
else{
    V59 = 0;
    u59 = 0;
}

//==== Rule(60) =====
if (uMP1 > 0 && usP2 > 0){

    V60 = min(uMP1,usP2)*SInc;
    u60 = min(uMP1,usP2);
}

```

```

}
else{
    V60 = 0;
    u60 = 0;
}

//==== Rule(61) =====
if (uMP1 > 0 && uMP2 > 0){

    V61 = min(uMP1,uMP2)*MInc;
    u61 = min(uMP1,uMP2);
}
else{
    V61 = 0;
    u61 = 0;
}

//==== Rule(62) =====
if (uMP1 > 0 && uBP2 > 0){

    V62 = min(uMP1,uBP2)*BInc;
    u62 = min(uMP1,uBP2);
}
else{
    V62 = 0;
    u62 = 0;
}

//==== Rule(63) =====
if (uMP1 > 0 && uLP2 > 0){

    V63 = min(uMP1,uLP2)*BInc;
    u63 = min(uMP1,uLP2);
}
else{
    V63 = 0;
    u63 = 0;
}

//==== Rule(64) =====
if (uBP1 > 0 && uLN2 > 0){

    V64 = min(uBP1,uLN2)*LDec;
    u64 = min(uBP1,uLN2);
}
else{
    V64 = 0;
    u64 = 0;
}

//==== Rule(65) =====
if (uBP1 > 0 && uBN2 > 0){

    V65 = min(uBP1,uBN2)*BDec;

```

```

u65 = min(uBP1,uBN2);
}
else{
    V65 = 0;
    u65 = 0;
}

//==== Rule(66) =====
if (uBP1 > 0 && uMN2 > 0){

    V66 = min(uBP1,uMN2)*BDec;
    u66 = min(uBP1,uMN2);
}
else{
    V66 = 0;
    u66 = 0;
}

//==== Rule(67) =====
if (uBP1 > 0 && usN2 > 0){

    V67 = min(uBP1,usN2)*MDec;
    u67 = min(uBP1,usN2);
}
else{
    V67 = 0;
    u67 = 0;
}

//==== Rule(68) =====
if (uBP1 > 0 && uZ2 > 0){

    V68 = min(uBP1,uZ2)*BDec;
    u68 = min(uBP1,uZ2);
}
else{
    V68 = 0;
    u68 = 0;
}

//==== Rule(69) =====
if (uBP1 > 0 && usP2 > 0){

    V69 = min(uBP1,usP2)*MInc;
    u69 = min(uBP1,usP2);
}
else{
    V69 = 0;
    u69 = 0;
}

//==== Rule(70) =====
if (uBP1 > 0 && uMP2 > 0){

    V70 = min(uBP1,uMP2)*BInc;

```

```

    u70 = min(uBP1,uMP2);
}
else{
    V70 = 0;
    u70 = 0;
}

//==== Rule(71) =====
if (uBP1 > 0 && uBP2 > 0){

    V71 = min(uBP1,uBP2)*BInc;
    u71 = min(uBP1,uBP2);
}
else{
    V71 = 0;
    u71 = 0;
}

//==== Rule(72) =====
if (uBP1 > 0 && uLP2 > 0){

    V72 = min(uBP1,uLP2)*LInc;
    u72 = min(uBP1,uLP2);
}
else{
    V72 = 0;
    u72 = 0;
}

//==== Rule(73) =====
if (uLP1 > 0 && uLN2 > 0){

    V73 = min(uLP1,uLN2)*LDec;
    u73 = min(uLP1,uLN2);
}
else{
    V73 = 0;
    u73 = 0;
}

//==== Rule(74) =====
if (uLP1 > 0 && uBN2 > 0){

    V74 = min(uLP1,uBN2)*LDec;
    u74 = min(uLP1,uBN2);
}
else{
    V74 = 0;
    u74 = 0;
}

//==== Rule(75) =====
if (uLP1 > 0 && uMN2 > 0){

```

```

    V75 = min(uLP1,uMN2)*BDec;
    u75 = min(uLP1,uMN2);
}
else{
    V75 = 0;
    u75 = 0;
}

```

```

//==== Rule(76) =====
if (uLP1 > 0 && usN2 > 0){

```

```

    V76 = min(uLP1,usN2)*BDec;
    u76 = min(uLP1,usN2);
}
else{
    V76 = 0;
    u76 = 0;
}

```

```

//==== Rule(77) =====
if (uLP1 > 0 && uZ2 > 0){

```

```

    V77 = min(uLP1,uZ2)*LDec;
    u77 = min(uLP1,uZ2);
}
else{
    V77 = 0;
    u77 = 0;
}

```

```

//==== Rule(78) =====
if (uLP1 > 0 && usP2 > 0){

```

```

    V78 = min(uLP1,usP2)*BInc;
    u78 = min(uLP1,usP2);
}
else{
    V78 = 0;
    u78 = 0;
}

```

```

//==== Rule(79) =====
if (uLP1 > 0 && uMP2 > 0){

```

```

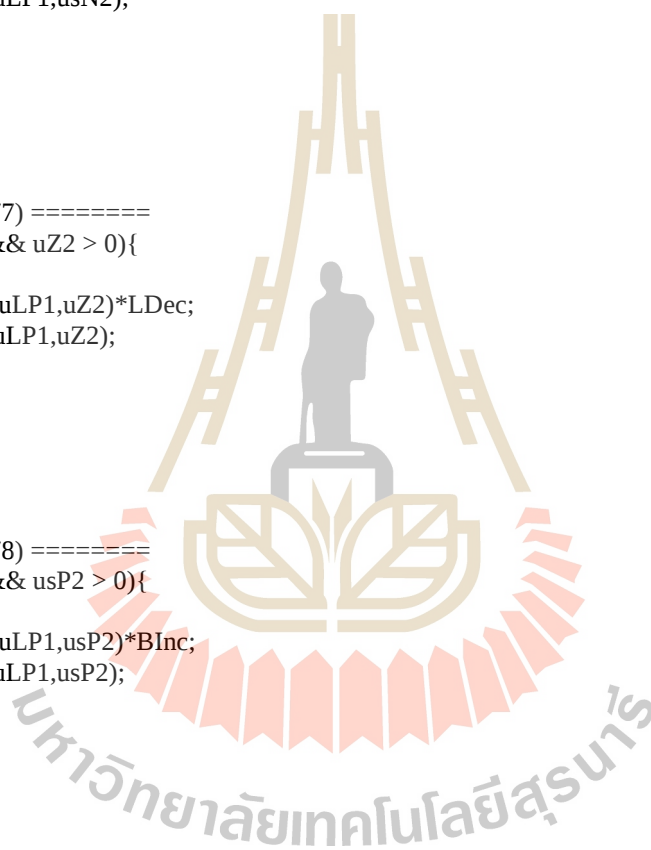
    V79 = min(uLP1,uMP2)*BInc;
    u79 = min(uLP1,uMP2);
}
else{
    V79 = 0;
    u79 = 0;
}

```

```

//==== Rule(80) =====
if (uLP1 > 0 && uBP2 > 0){

```



```

V80 = min(uLP1,uBP2)*LInc;
u80 = min(uLP1,uBP2);
}
else{
V80 = 0;
u80 = 0;
}

//==== Rule(81) =====
if (uLP1 > 0 && uLP2 > 0){

V81 = min(uLP1,uLP2)*LInc;
u81 = min(uLP1,uLP2);
}
else{
V81 = 0;
u81 = 0;
}

//===== DeFuzzification (WA) =====

num1 = (V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7 + V8 + V9 + V10 + V11 + V12 + V13 + V14 +
V15 + V16 + V17 + V18 + V19 + V20 + V21 + V22 + V23 + V24 + V25 + V26 + V27 + V28 +
V29 + V30);
num2 = (V31 + V32 + V33 + V34 + V35 + V36 + V37 + V38 + V39 + V40 + V41 + V42 + V43
+ V44 + V45 + V46 + V47 + V48 + V49 + V50 + V51 + V52 + V53 + V54 + V55 + V56 + V57 +
V58 + V59 + V60);
num3 = (V61 + V62 + V63 + V64 + V65 + V66 + V67 + V68 + V69 + V70 + V71 + V72 + V73
+ V74 + V75 + V76 + V77 + V78 + V79 + V80 + V81);
num = num1 + num2 + num3;

den1 = (u1 + u2 + u3 + u4 + u5 + u6 + u7 + u8 + u9 + u10 + u11 + u12 + u13 + u14 + u15 + u16
+ u17 + u18 + u19 + u20 + u21 + u22 + u23 + u24 + u25 + u26 + u27 + u28 + u29 + u30);
den2 = (u31 + u32 + u33 + u34 + u35 + u36 + u37 + u38 + u39 + u40 + u41 + u42 + u43 + u44 +
u45 + u46 + u47 + u48 + u49 + u50 + u51 + u52 + u53 + u54 + u55 + u56 + u57 + u58 + u59 +
u60);
den3 = (u61 + u62 + u63 + u64 + u65 + u66 + u67 + u68 + u69 + u70 + u71 + u72 + u73 + u74 +
u75 + u76 + u77 + u78 + u79 + u80 + u81);

den = den1 + den2 + den3;

if (den == 0){
den = 0.000000000001;
}

dDref = num/den;
// Serial.print("\tnum= ");
// Serial.print(num,4);
// Serial.print("\tden = ");
// Serial.print(den,4);
// if (D_1 > 0.9*800)
{

```

```

    deltaD = -0.1*800;
}

deltaD = dDref;

// Serial.print("\tdeltaD = ");
// Serial.println(deltaD,4);

Dref = (D_1 + deltaD*800 + D_0)*Action;
Dref = constrain(Dref,0,800);

OCR1A = Dref; // Duty cycle
// call_display();
D_2 = D_1;
D_1 = Dref;
Pdc_1 = Pdc;
}

void call_display()
{
    Serial.print("Time = ");
    Serial.print(count);
    Serial.print("\tPdc = ");
    Serial.print(Pdc);
    Serial.print("\tdP = ");
    Serial.print(dP,4);
    Serial.print("\tdD = ");
    Serial.print(dD,4);
    Serial.print("\tdeltaD = ");
    Serial.print(deltaD,4);
    Serial.print("\t\tDref = ");
    Serial.println(Dref,4);
    // Serial.print("\tD_1 = ");
    // Serial.print(D_1);
    // Serial.print("\tD_2 = ");
    // Serial.print(D_2);
    // Serial.println();
}

```

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, กิตติวงศ์ สุธรรมโน, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์, (2557). เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37 (EECON37) ประจำปี 2557, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, หน้า 401 – 404.
- โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์, (2558). การติดตามกำลังสูงสุดสำหรับระบบแปลงพลังงานลมขนาดเล็กแบบอิสระ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38 (EECON38) ประจำปี 2558, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า 229 – 232.
- โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์, ชีษณุ เสรีจรจารุ และวรัญญู ศรีมะเร็ง (2561). การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม 2561, หน้า 18 – 30.
- Chaicharoenaudomrung, K., Areerak, K-N., Areerak, K-L., and Thumthae, C. (2018). **Maximum Power Point Tracking Control Using P&O Method for Stand-Alone Real Wind Turbine System**. International Review of Electrical Engineering. Volume 13, issue 1, pp. 37-44.
- Chaicharoenaudomrung, K., Areerak, K-N., Areerak, K-L., Bozhko S. and Hill., C. Maximum Power Point Tracking of Stand-Alone Wind Energy Conversion System Using Fuzzy logic control based on P&O Method. “อยู่ในระหว่างรอตอบรับการตีพิมพ์”

Maximum Power Point Tracking Control Using P&O Method for Stand-Alone Real Wind Turbine System

K. Chaicharoenaudomrung¹, K-N. Areerak¹, K-L. Areerak¹, C. Thumthae²

Abstract – This paper presents the maximum power point tracking (MPPT) for stand-alone wind energy conversion system. The proposed method does not require the characteristics of wind turbine and mechanical sensor. The MPPT by perturb and observe (P&O) method is proposed. The process of control is used to perturb operating point of system by changing duty cycle of buck converter and to observe the change of dc-side power. The proposed method detects the maximum power and the change of wind through the relationship between dc-side power and duty cycle of buck converter. The simulation and experimental results from laboratory show that the proposed method can extract the maximum power from the wind power in accordance with the wind speed. Finally, the experimental results from real wind turbine 300W present the effectiveness of the proposed MPPT method. Copyright © 2018 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: Wind Power, Stand-Alone Wind Energy Conversion System, Maximum Power Point Tracking

Nomenclature

C_{dc}	DC-link capacitor
C_o	Capacitance of buck converter
C_p	Turbine power coefficient
D	Duty cycle of buck converter
D_{opt}	Optimal duty cycle
D_{ref}	Duty cycle control of buck converter
E	Energy power
I_{dc}	Output current of diode rectifier
J	Rotor inertia
K	Step size of P&O algorithm
K_T	Factor of torque control
L	Inductance of buck converter
L_d, L_q	Inductances on d and q axis
P_{dc}	dc-side power
P_m	Mechanical power
$P_{dc,max}$	Maximum electricity output
$P_{m,max}$	Maximum mechanical energy
R	Radius of the wind turbine
R_s	Stator resistance of generator
R_L	Resistive load
S_I	Switching device of buck converter
T_m	Mechanical torque
T_{ref}	Torque reference
V_{dc}	Voltage crossing DC-link capacitor
V_o	Output voltage of buck converter
d^*	Duty cycle control of wind turbine simulator
f_s	Switching frequency
i_a	Armature current
$i_{a,ref}$	Armature current reference
η_g	Efficiency of the generator
η_c	Efficiency of three-phase rectifier

v_w	Wind speed
ρ	Air density
β	Pitch angle of turbine wind
λ	Tip speed ratio
Δd	Step size of duty cycle
ω_m	Rotation speed

1. Introduction

Many years, the wind energy conversion system (WECS) for generating electricity has been developed and increasingly interesting because it's clean energy acquired from nature. Currently, the variable speed wind turbine generator system (VSWTG) is popularly used in the wind power conversion system for electricity generation. The generated power depends on wind speed and sizes of wind turbines [1]-[24]. The large size wind turbine can generate power at megawatt level and distribute to grid connected system [1], [2]. However, the small size wind turbine is the alternative choice for off-grid or stand-alone system that is extensively installed in remote areas [3]. The performance of stand-alone system generator is not stable because of the wind speed variation by nature. Therefore, reserving energy resources have to be available. In general, battery is prevalently used.

The generator for stand-alone WECS system which is the most popularly used is permanent magnet synchronous generator (PMSG) [4] because it's small size, high power density, low maintenance and without gearbox.

The operation of WECS is controlled by the power converter control system [21]-[24]. This can extract the

maximum power of system by using maximum power point tracking (MPPT) control. The power conversion system based on three-phase rectifier cascaded with DC to DC converter is mostly used for WECS system because it is simple, and reliable with low cost [5].

Among the proposed MPPT strategies of various methods, perturbation and observation method (P&O method) [6]-[11], or hill-climb search (HCS method) is the popular method because it does not require the knowledge of wind turbine characteristics. Moreover, its control is simple and flexible. Control process consists the perturbation of the operational point by changing control variables, and the observation of the successive change results in system performance to adjust the operational points of system. In general, P&O method measures the speed rotation and adjusts the electricity power.

There are also other P&O-based strategies, such as the application of Fuzzy logic control [12]-[14] or Neural network. However the mentioned methods are complicated to control [15], [16]. The WECS control system which can be installed in remote areas, the simplicity and reliability are accepted as the very important issues. However, most of the aforementioned control method are complexity. Therefore, this paper proposes the MPPT via P&O method without mechanical sensor. The proposed technique is also simple and easy to practical application.

The paper is organized as follows: stand-alone WECS with maximum power point tracking using P&O method is described in Section 2. In Section 3, the simulation and the experiment in the laboratory by the wind turbine simulators are demonstrated, Section 4 indicates the experimental results of real wind turbine application.

Finally, Section 5 concludes the results of the proposed method.

II. Stand-Alone Wind Energy Conversion System with a Maximum Power Point Tracking Control

The structure of stand-alone wind energy conversion system as shown in Fig. 1 consists of a horizontal wind turbines as the energy source for the considered system.

This turbine is functioned as the kinetic energy interceptor from the wind making the turbines rotate (ω_m) originating the mechanical energy at the shaft of the wind turbine (P_m). The shaft is directly connected to the PMSG to convert mechanical energy to electricity power.

The alternating current from the generator is converted to direct current by three-phase rectifier. The buck converter is used to control the system operating point to achieve the maximum power point through switch S_1 .

The output electricity power of the system would be charged in to the battery and supplied to the resistor load R_L .

The mechanical energy of a wind turbine extracted from wind energy can be explained by (1) [3] where R is

the radius of the wind turbine (m), ρ is the air density (kg/m^3) which generally equal to 1.225 kg/m^3 , and v_w is the wind speed (m/s):

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

It can be seen in (1), that C_p is the turbine power coefficient. This is a nonlinear function depending on λ tip speed ratio (TSR) and the pitch angle of turbine wind (β).

The TSR is the variable varying to the ratio of wind turbine speed rotation and the wind speed as given in (2):

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

The estimation of C_p value in this paper is based on (3) and (4) [6]:

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

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

The torque of the wind turbine can be also explained in (5):

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) / \omega_m \quad (5)$$

The mechanical energy conversion of wind turbines to electrical energy through generators and three-phase rectifier can be written as given in (6):

$$P_{dc} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p n_g n_c \quad (6)$$

where n_g and n_c are the efficiency of the generator and the three-phase rectifier, respectively [17]. The effect of the power loss on the generator and the three-phase rectifier results in $n_g \neq 1$ and $n_c \neq 1$. Therefore, at the same wind speed, the maximum electricity output power ($P_{dc,max}$) is lower than the maximum mechanical energy ($P_{m,max}$) as shown in Fig. 2.

It is the characteristics of output power of wind power conversion system in various wind speed conditions. For maximum power tracking control in this paper, the path tracking maximum electricity power of $P_{dc,max}$ is considered.

K. Chaicharoenaudomrung, K.-N. Areerak, K.-L. Areerak, C. Thumthae

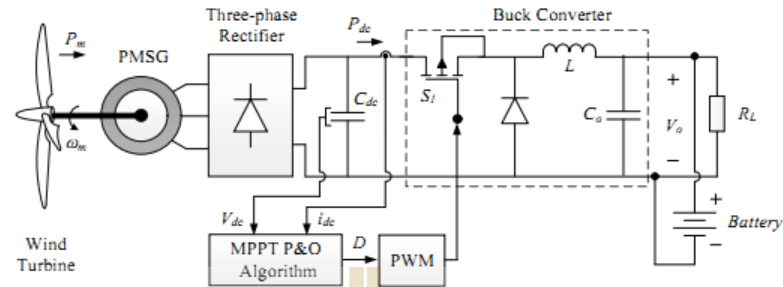


Fig. 1. Stand-alone wind energy conversion system with maximum power tracking control

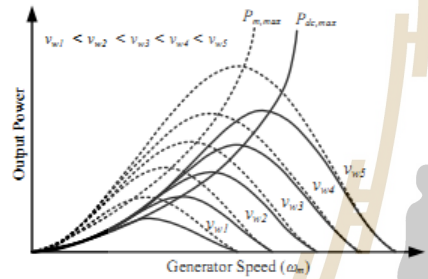


Fig. 2. Characteristics of wind Turbines generating electricity

From Fig. 2, the maximum power of various wind speed conditions can be achieved under the conditions in (7) using the control method of P&O algorithm. The rotation speed of the wind turbine will be adjusted via the duty cycle (D) until the maximum power is achieved.

Therefore, the MPPT control using P&O algorithm can be applied by setting D based on the relationship between P_{dc} and D under the conditions in (8). Only measurements of the electricity through voltage and current sensors are used [2], [18]. There are no requirement of wind speed sensor and generator speed.

This way can reduce the tough installation and costs:

$$\frac{\Delta P_{dc}}{\Delta \omega_m} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\Delta P_{dc}}{\Delta D} = 0 \quad (8)$$

The principle of maximum power tracking using P&O algorithm is based on searching the optimal operating point. The control process would be considered if the operating point of the system is on the left of the maximum power point (MPP). The control system will force the operating point to move to the right in order to reach the position with maximum power. On the other hand, if the operating point is on the right of the MPP.

The control system will force the operating point to move to the left. Each control cycle would adjust, increase, and decrease the duty cycle with a step size K as shown in Fig. 3. This figure shows the convergence to the MPP point from the left of the MPP.

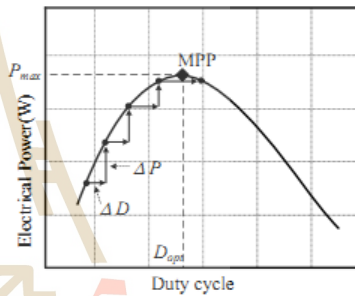


Fig. 3. Convergence to MPP Point

The algorithm diagram of maximum power tracking control using the P&O can be shown in Fig. 4 in which it is started from the voltage V_{dc} , current i_{dc} and D .

Subsequently, the DC power P_{dc} is calculated. The different value is calculated using the value at the current cycle (k) compared with the previous one ($k-1$). The slope is then calculated by (8). If the control signal D_{ref} is required to increase or decrease, the P_{dc} will move to the new operating point to achieve the expected D_{ref} . This updated D_{ref} will be used inside the algorithm. According to Fig. 3 in the case of $Slope > 0$, the D should be increased by $\Delta d = K$. On the other hand if $Slope < 0$, the D should be decreased by $\Delta d = -K$. The effectiveness of this algorithm depends on the configuration of step size K [19]. After running the algorithm, the direction Δd will be determined from the slope value. The Δd is then applied to calculate D_{ref} for the next cycle. The algorithm will adjust the D_{ref} continuously until D_{ref} approach the D_{opt} . This situation will provide the maximum power of the system.

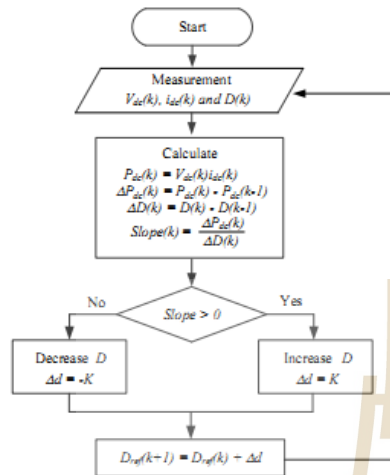


Fig. 4. Diagram of maximum power tracking algorithm

III. Simulation Results

The simulation of stand-alone wind turbine with maximum power point tracking by using P&O method is operated on MATLAB/Simulink. The system parameters of Fig. 1 are as follows; wind turbine $R = 1.74$ m, $\rho = 1.255$ kg/m³, generator $P_{rate} = 1$ kW, pole pairs 6, $R_s = 0.57$ Ω , $L_d = L_q = 5.5$ mH, $J = 0.016$ kg m², buck converter $L = 15$ mH, $C_{dc} = 1000$ μ F, $C_o = 500$ μ F, $R_L = 100$ Ω , battery 24 V and $K = 0.05$.

The simulation results for the sudden change of wind speed can be found in Fig. 5.

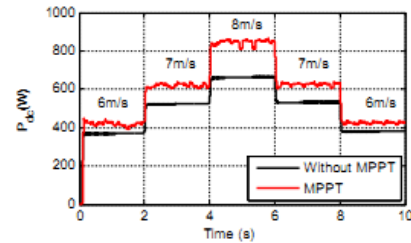


Fig. 5. Electricity power output

In Fig. 5 shows the simulation results of DC power for stand-alone wind turbine with MPPT compared with the system without MPPT at the same wind speed condition.

It can be found that the system with maximum power point tracking can provide more electricity power than that without MPPT. Fig. 6 shows the MPPT proposed method operation to confirm that the MPP can be achieved for each wind speed.

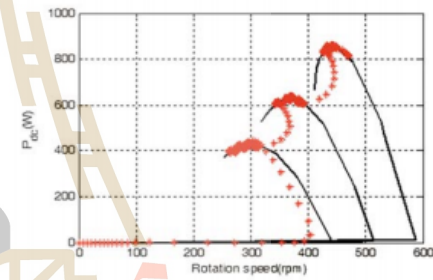


Fig. 6. Tracking path of proposed MPPT

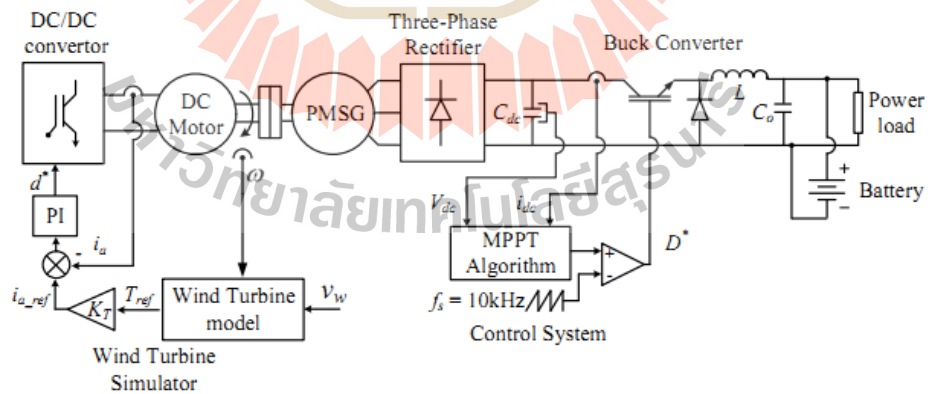


Fig. 7. The schematic diagram stand-alone WECS with MPPT

IV. Experimental Results

The schematic diagram for the stand-alone wind power conversion system with maximum power point tracking control in laboratory is shown in Fig. 7. The overview of the hardware is shown in Fig. 8. The test uses the wind turbine simulator with a direct current motor via torque control to imitate the operation of wind turbines [20].

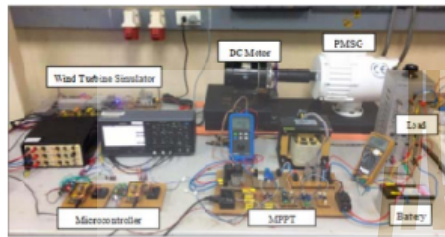


Fig. 8. The experiment set in the laboratory

The torque signal control can be calculated from the wind turbine model in (5). The wind turbine simulator is directly connected to the PMSG. The three-phase rectifier is used to convert the AC to DC voltage and connected to buck converter with maximum power tracking control.

The voltage and current output of the rectifier is the input of the MPPT control system. The step size of P&O algorithm is used $K = 0.05$. The detailed parameters are shown in Table I. In the case of the system without MPPT, the wind turbine simulator is not tested due to the voltage V_{dc} equal to battery voltage.

TABLE I
THE PARAMETERS OF THE SYSTEM IN FIG. 7

Wind turbine	Value
R	1.558 m
ρ	1.255 kg/m ³
β	15
DC motor	Value
Power rate	900 W
Speed rate	500 rpm
Current rate	40 A
Generator	Value
Power rate	500 W
Speed rate	500 rpm
Current rate	21 A
Buck converter	Value
L	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
R_L	100
Battery	12 V

This results in a low rotation speed. If the test is carried out for a long time, the DC motor control current would be high, resulting in the damage of the wind turbine simulator control system. However, the comparative tests between without MPPT and MPPT systems can be tested using real wind turbines as shown later.

The MPPT test results under instantaneous wind speed changes from the experiment of laboratory are shown in Fig. 9 and Fig. 10.

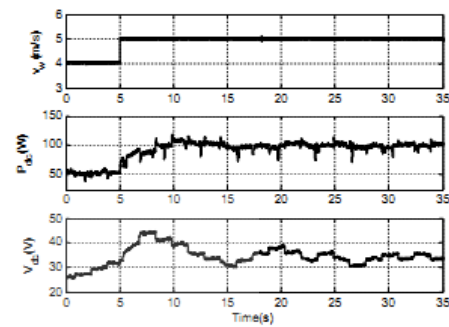


Fig. 9. Results of MPPT control when the wind speed changed from 4 m/s to 5 m/s

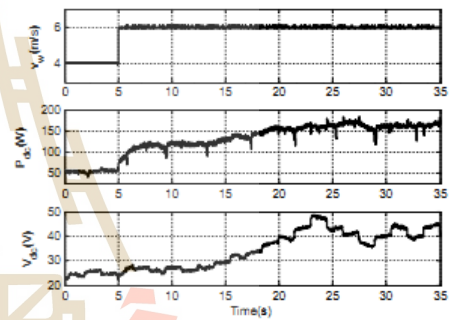


Fig. 10. Results of MPPT control when wind speed changed from 4 m/s to 6 m/s

Fig. 9 shows the P_{dc} power extraction from the proposed algorithm under the wind speed changing from 4 m/s to 5 m/s.

It can be seen that when v_w increased, P_{dc} correspondingly increased. The changing rate of P_{dc} can be detected to adjust the D_{ref} . This results in the V_{dc} change making the operating point of system sequentially access to MPP.

Likewise, Fig. 10 shows the maximum power extraction under the rapid change of wind speed from 4 m/s to 6 m/s. The P_{dc} is increased in accordance with the increasing wind speed.

As the new MPP point is far from the original MPP, the convergence of MPP requires a longer time compared with the case of Fig. 8. However, the experimental results confirm that the MPPT control using P&O method can force the steady-state operation system into the MPP.

In Fig. 11 shows the characteristic of the wind turbine used in the experiment.

K. Chaicharoenaudomrung, K-N. Areerak, K-L. Areerak, C. Thumthae

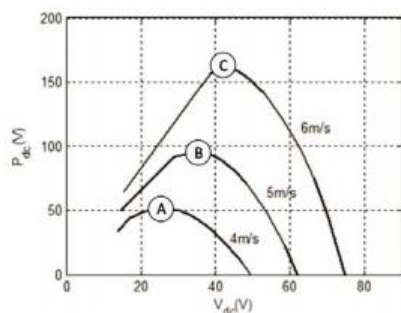


Fig. 11 Characteristics graphs of the relationship between P_{dc} and V_{dc}

According to the result of Fig. 8, when the wind speed is changed from 4m/s to 5m/s, the achieved steady-state power is around 100 W.

This maximum power is equal to the power at point B of Fig. 10. Similarly, for the wind speed of 6m/s in Fig. 9, the MPP is around 160W as equal to point C of Fig. 11. It can be concluded that the proposed algorithm can provide the MPP of various wind speed.

The simulation and experimental results from the laboratory and real wind confirm that the proposed MPPT method can provide the maximum power following on various wind speeds.

The real wind turbines power rated 300W under natural wind conditions is shown in Fig. 12. The experiment was conducted at Suranaree University of Technology, Thailand on November 19, 2016.

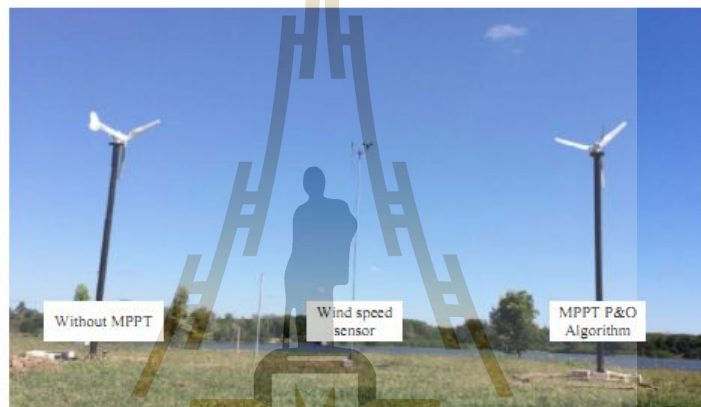


Fig. 12. Experiments on real wind turbines

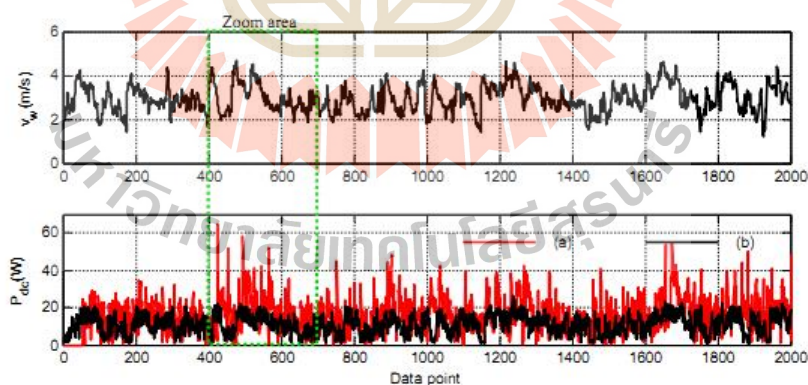


Fig. 13. Experimental results from the real wind turbines a) MPPT and b) without MPPT

K. Chaicharoenaudomrung, K-N. Areerak, K-L. Areerak, C. Thumthae

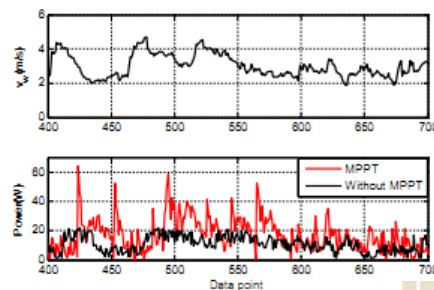


Fig. 14. Zoom in Fig. 13 during data point at 400 to 700

This test was conducted using data logger recording the test results every 1 second. The experimental results were compared between the system with MPPT and without MPPT as shown in Fig. 13 in which the red line is used to represent the extracted power of the system with MPPT, while the black line is for the system without MPPT.

In Fig. 14 is a zoomed version of Fig. 13.

According to Fig. 13, it is shown that the system with the proposed MPPT method can extract energy more than those without MPPT under the same fluctuate wind conditions. The extracted energy value is also depicted in Fig. 15. This is calculated from the area below the power curve in Fig. 13. It shows that the system with MPPT can extract more energy power compared with the system without MPPT.

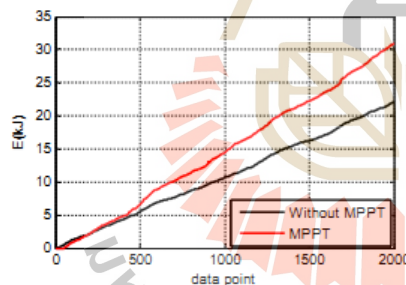


Fig. 15. Results captured energy

V. Conclusion

This paper presents the stand-alone PMSG wind power system with maximum power tracking control by using P&O method. The proposed method does not require anemometer and generator speed measurements.

The power converter system used the three-phase rectifier connected to the buck converter. The MPPT control can directly adjust the duty cycle of buck converter.

The operational principle of proposed method is to use

the duty cycle of buck converter as the perturb variable and dc-side power is used as the observer variable. The details of the control method are presented.

The simulation and experimental results from laboratory are used to confirm the benefit of the MPPT control. Moreover, experimental results from the real wind power for under natural wind speed conditions are used to show the effectiveness of the proposed control strategy.

Acknowledgements

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT), THAILAND and Thailand Research Fund through the Researchers for Industries-RRI Ph.D. Program for supporting this research.

References

- [1] Yingjie Tan, Kashem M. Muttaqi, Phil Ciufo and Lasantha Meegapola, Enhanced Frequency Response Strategy for a PMSG-Based Wind Energy Conversion System Using Ultracapacitor in Remote Area Power Supply Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, 2017, pp. 549 - 558.
- [2] Nishad Mendis, Kashem M. Muttaqi and Sarath Perera, Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, 2014, pp. 944 - 953.
- [3] Dalala Z. M., Zahid Z. U., Yu W., Cho Y. 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, 2013, pp. 756 - 767.
- [4] Li H. and Z. Chen., Overview of different wind generator systems and their comparisons, *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, 2008, pp. 123 - 138.
- [5] Kuo-Yuan Lo, Yaow-Ming Chen and Yung-Ruei Chang, MPPT Battery Charger for Stand-Alone Wind Power System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, 2011, pp. 1631 - 1638.
- [6] Abdullahi M. A., Yatima A. H. M., Tana C. W. and Saidurb R., A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, June 2012, pp. 3220-3227.
- [7] Kot R., Rolak M. and Malinowski M., Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine, in *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 91, May 2013, pp. 29-40.
- [8] Zhu Shushu, Liu Chuang, Ning Yinhang and Zhang Lei, MPPT for stand-alone wind power generation system based on hybrid excitation synchronous generator, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, pp. 1 - 6.
- [9] Fatma Selim, Emad M. Ahmed, Mahmoud A. Sayed and Mohamed Orabi, Stand-alone Small Wind Energy Conversion System with Reduced Sensors Control, *35th International Telecommunications Energy Conference, SMART POWER AND EFFICIENCY*, 2013, pp. 1 - 6.
- [10] Ahmed R., Naaman A., N. K. M' Sirdi, Abdelsalam A. K. and Dessouky Y. G., "Sensorless MPPT technique for PMSG micro wind turbines based on state-flow," *International Conference on Renewable Energies for Developing Countries*, 2014, pp. 161 - 166.
- [11] Dipesh Kumar and Kalyan Chatterjee, A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, May 2016, pp. 957-970.
- [12] Jhansi Lakshmi M., Srinivasa Kishore Babu Y. and Babu P. M., PMSG Based Wind Energy Conversion System for Maximum

K. Chaicharoenadumrung, K-N. Areerak, K-L. Areerak, C. Thumthae

Power Extraction, 2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), 2016, pp. 366 - 371.

- [13] Huynh Quang Minh, Nollet Frederic, Najib Essounbouli and Hamzaoui Abdelaziz, A new MPPT method for stand-alone wind energy conversion system, 2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications, 2012, pp. 335 - 340.
- [14] Qingrong Zeng, Liuchen Chang and Riming Shao, Fuzzy-logic-based maximum power point tracking strategy for PMSG variable-speed wind turbine generation systems, 2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2008, pp. 405-410.
- [15] Thongam J. S., Bouchard P., Beguenane R. and Fofana I., Neural network based wind speed sensorless MPPT controller for variable speed wind energy conversion systems, 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2010, pp. 1-6.
- [16] Chun Wei, Zhe Zhang, Wei Qiao and Liyan Qu, An Adaptive Network-Based Reinforcement Learning Method for MPPT Control of PMSG Wind Energy Conversion Systems, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, 2016, pp. 7837 - 7848.
- [17] Mukhtiar Singh and Ambrish Chandra, Control of PMSG based variable speed wind-battery hybrid system in an isolated network, 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1-6.
- [18] Jiawei Chen, Ting Lin, Changyun Wen and Yongduan Song, Design of a Unified Power Controller for Variable-Speed Fixed-Pitch Wind Energy Conversion System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, pp. 4899 - 4908.
- [19] Dailia Y., Gaubert J.-P. and Rahman L., Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors, Energy Conversion and Management, June 2015, pp. 298-306.
- [20] Bing Gong and Dewei Xu, Real time wind turbine simulator for wind energy conversion system, 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008, pp. 1110 - 1114.
- [21] Reddak, M., Berdai, A., Gourma, A., Boukheroua, J., Belfiqih, A., Enhanced Sliding Mode MPPT and Power Control for Wind Turbine Systems Driven DFIG (Doubly-Fed Induction Generator), (2016) International Review of Automatic Control (IREACO), 9 (4), pp. 207-215.
- [22] Sabiri, Z., Machkour, N., Rahbani, N., Nahid, M., Kheddioui, E., Command of a Doubly-Fed Induction Generator with a Backstepping Controller for a Wind Turbine Application, (2017) International Review of Automatic Control (IREACO), 10 (1), pp. 56-62.
- [23] Mohanty, K., Fuzzy Control of Wind Cage Induction Generator System, (2017) International Journal on Energy Conversion (IRECON), 5 (4), pp. 122-129.
- [24] El Azzazou, M., Mahmoudi, H., Boudarria, K., Sensorless Fuzzy MPPT Technique of Solar PV and DFIG Based Wind Hybrid System, (2017) International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 10 (3), pp. 152-159.

Authors' information

¹School of Electrical Engineering Institute of Engineering Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.
Tel: +66-44224520, Fax: +66-44224601
E-mail: kongpan@sut.ac.th

²School of Mechanical Engineering Institute of Engineering Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.



K. Chaicharoenadumrung was born in Suphan Buri, Thailand, in 1986. He received the B.Eng. and M.Eng. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2008 and 2011, respectively. His main research interests include stability analysis, modeling of power electronic system, wind energy conversion system, power electronic and control system, and AI application.



K-N. Areerak received the B.Eng. M.Eng. degrees from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2000 and 2001, respectively and the Ph.D. degree from the University of Nottingham, Nottingham, UK., in 2009, all in electrical engineering. In 2002, he was a lecturer in the Electrical and Electronic Department, Rangsit University, Thailand. Since 2003, he has been a Lecturer in the School of Electrical Engineering, SUT. He has received the Associate Professor in Electrical Engineering in 2015. His main research interests include system identifications, artificial intelligence applications, stability analysis of power systems with constant power loads, modeling and control of power electronic based systems, and control theory.



K-L. Areerak received the B.Eng. M.Eng. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Thailand, in 2000, 2003, and 2007, respectively. Since 2007, he has been a lecturer and Head of Power Quality Research Unit (PQRU) in the School of Electrical Engineering, SUT. He received the Associate Professor in Electrical Engineering in 2015. His main research interests include active power filter, harmonic elimination, AI application, motor drive, and intelligence control systems.



C. Thumthae is currently a lecturer at the department of mechanical engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. He published more than 50 articles. He has the multidisciplinary research experience in wind turbine aerodynamics, energy technology, computational fluid dynamics, and autonomous vehicle.

ประวัติผู้เขียน

นายโกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และ ปี พ.ศ. 2554 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2555 ได้เข้าศึกษาต่อระดับ ปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ขณะศึกษา ผู้วิจัยได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 2 รายวิชา ได้แก่ CONTROL SYSTEMS LABORATORY และ ELECTRICAL MACHINE LABORATORY 2 นอกจากนี้ ผู้วิจัยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังที่ปรากฏในภาคผนวก ข โดยมีความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี