

ระบบควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด
ด้วยวิธีรบกวนและสังเกต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**SOLAR ENERGY CONTROL SYSTEM WITH MAXIMUM
POWER POINT TRACKING USING PERTURBATION AND
OBSERVATION METHOD**



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

ระบบควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด
ด้วยวิธีรบกวนและสังเกต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปทุมพร วงศ์ใหญ่ : ระบบควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี
รบกวนและสังเกต (SOLAR ENERGY CONTROL SYSTEM WITH MAXIMUM
POWER POINT TRACKING USING PERTURBATION AND OBSERVATION
METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 165 หน้า.

การอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทนมีความสำคัญมาก พลังงานแสงอาทิตย์เป็น
พลังงานทดแทนหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะขณะใช้งาน มี
ความยั่งยืนและไม่มีที่สิ้นสุด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการศึกษาระบบควบคุมการตามรอยจุด
กำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เพื่อให้สามารถดึงกำลังงานสูงสุดที่แผงเซลล์
แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ สภาวะความเข้มแสงขณะนั้นมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด
งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอวิธีการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์สองวิธี
ได้แก่ วิธีแรก คือ วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร ซึ่งการสร้างชุดทดสอบวิธีการดังกล่าวเป็น
การพึ่งพาอัตราส่วนคงที่ซึ่งได้จากการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งาน ทำให้เกิดความ
ยุ่งยากในการนำไปใช้งานจริง นำไปสู่วิธีการตามรอยกำลังงานสูงสุดวิธีที่สอง คือ วิธีรบกวนและ
สังเกต ซึ่งการสร้างชุดทดสอบวิธีการดังกล่าวอาศัยเพียงแค่การกำหนดค่าความผิดพลาดและค่าวัฏ
จักรหน้าที่ อีกทั้งชุดทดสอบวิธีรบกวนและสังเกตยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับแผงเซลล์
แสงอาทิตย์ได้ทุกแผงโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนค่าใด ๆ ผลการศึกษา พบว่า ชุดทดสอบวิธีรบกวน
และสังเกต สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้มากกว่า และคุ้มทุนเร็วกว่า ชุดทดสอบวิธีเทียบ
สัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร และชุดซาร์จที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PATUMPORN WONGYAI : SOLAR ENERGY CONTROL SYSTEM WITH
MAXIMUM POWER POINT TRACKING USING PERTURBATION AND
OBSERVATION METHOD. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
KONGPAN AREERAK, Ph.D., 165 PP.

SOLAR ENERGY/ POWER ELECTRONICS/ AUTOMATIC CONTROL

Energy conservation and renewable energy is very important. Solar energy is interesting because this energy is sustainable and endless. This thesis focuses on the control system with maximum power point tracking for stand-alone solar cell to achieve the maximum power for each irradiance. The thesis presents two maximum power point tracking techniques. The first technique is an open circuit voltage method in which the prototype of this technique is called MPPT VOC charger. However, this charger depends on the constant ratio that can be determined by testing the solar panels, As a result, the use of MPPT VOC is not useful for engineering. Hence, the thesis also presents the second technique is perturb and observe method in which the prototype of this technique is called MPPT P&O charger. This charger depends on two values that are the error and duty cycle. Therefore, MPPT P&O charger is more general than MPPT VOC charger. The results show that the MPPT P&O charger can provide power from solar cell for charging the battery in which the high efficiency in terms of energy and economic can be achieved via the proposed charger.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ปทุมพร วงศ์ใหญ่

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุด สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	5
2.3 สรุป	8
3 ทฤษฎีพื้นฐาน	9
3.1 บทนำ.....	9
3.2 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์	9
3.3 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
3.3.1 กราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 ผลกระทบของปริมาณความเข้มแสง	13
3.3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ	13
3.4 วงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	14
3.5 แบตเตอรี่	15
3.6 สรุป	17
4 การตามรอยกำลังงานสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร	18
4.1 บทนำ.....	18
4.2 ระบบที่พิจารณา	18
4.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์	20
4.4 การสร้างชุดทดสอบตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC	26
4.4.1 วงจรตั้งเวลา	28
4.4.2 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	32
4.4.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ	36
4.4.4 วงจรคูณสัญญาณ	40
4.4.5 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	46
4.4.6 วงจรแยกโคคสัญญาณ	52
4.4.7 วงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	54
4.5 การทดสอบค่าอัตราส่วนคงที่.....	56
4.6 ผลการทดสอบชุดทดสอบ VOC	59
4.7 สรุป.....	66
5 การตามรอยกำลังงานสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต	67
5.1 บทนำ.....	67
5.2 ระบบที่พิจารณา	67
5.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์	71
5.4 การสร้างชุดทดสอบตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต	76
5.4.1 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	78
5.4.2 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.3 การเขียนโปรแกรมการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR.....	88
5.5 การทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่	92
5.6 ผลการทดสอบชุดทดสอบ P&O.....	93
5.7 สรุป.....	100
6 การเปรียบเทียบผลการตามรอยกำลังสูงสุดของวิธีต่าง ๆ	101
6.1 บทนำ.....	101
6.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์.....	101
6.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบ.....	106
6.3.1 ผลการทดสอบชุดทดสอบ	106
6.3.1 การจ่ายโหลดของชุดทดสอบ.....	113
6.3.2 การตามรอยกำลังของแสงอาทิตย์จริงด้วยชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ.....	119
6.4 เศรษฐศาสตร์.....	123
6.4.1 การประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ และจุดคุ้มทุนของแต่ละชุดชาร์จ.....	124
6.4.2 การประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จ MPPT P&O	126
6.6 สรุป.....	129
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	131
7.1 สรุป.....	131
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	132
รายการอ้างอิง.....	133
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	135
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB.....	149
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR	152

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง1. คู่มือการใช้งาน ชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร	156
ภาคผนวก ง2. คู่มือการใช้งาน ชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธีรบกวนและสังเกต	160
ภาคผนวก จ. ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	163
ประวัติผู้เขียน	165



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์..... 5
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์ ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี VOC..... 21
4.2	ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจร 34
4.3	ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันเบตเตอร์..... 35
4.4	พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง..... 55
4.5	ผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า k 58
4.6	ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC..... 63
4.7	แผนภาพผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC 64
5.1	ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์ ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี P&O..... 71
5.2	ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดัน 79
5.3	ผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแส 86
5.4	ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่ 92
5.5	ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O 97
5.6	แผนภาพผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O..... 98
6.1	ค่าพารามิเตอร์ของการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์..... 102
6.2	ผลการทดสอบชุดทดสอบ MPPT VOC..... 107
6.3	ผลการทดสอบชุดทดสอบ MPPT P&O..... 108
6.4	ผลการทดสอบชุดชาร์จ Com. without MPPT..... 108
6.5	ผลการทดสอบชุดชาร์จทั่ว MPPT Com..... 108
6.6	การเปรียบเทียบผลการทดสอบของวิธีต่าง ๆ 109
6.7	แผนภาพการดึงกำลังงานของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ..... 110
6.8	ผลการทดสอบการจ่ายโหลดของชุดทดสอบวิธี MPPT P&O..... 116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.9 แผนภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้า และแบตเตอรี่	117
6.10 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน	120
6.11 การประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ และจุดคุ้มทุนของแต่ละชุดชาร์จ	125
6.12 การประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จ MPPT P&O.....	127
6.13 การประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จ เมื่อพีคค์ของชุดชาร์จ MPPT P&O มีค่าเพิ่มขึ้น	128



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์..... 10
3.2	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์..... 10
3.3	กราฟคุณลักษณะของกระแส แรงดันและกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์..... 12
3.4	กราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อระดับความเข้มแสงเปลี่ยนขณะอุณหภูมิคงที่..... 13
3.5	กราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนขณะที่ความเข้มแสงคงที่..... 14
3.6	วงจรแปลงผันแบบบักก์..... 14
4.1	ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธี VOC..... 18
4.2	การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธี VOC ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB..... 22
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC..... 24
4.4	กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และจุดกำลัง ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 และ 1000 W/m^2 25
4.5	โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC..... 26
4.6	ภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ที่ใช้งานจริง..... 27
4.7	ไอซีเบอร์ 555..... 28
4.8	วงจรอะสเตเบิล..... 29
4.9	วงจรตั้งเวลาที่ใช้งานจริง..... 30
4.10	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลา..... 30
4.11	การนำวงจรตั้งเวลาไปใช้งานร่วมกับวงจรอื่น ๆ..... 31
4.12	วงจรตั้งเวลาไปประยุกต์ใช้งานจริงร่วมกับวงจรอื่น ๆ..... 32
4.13	โครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดัน..... 32
4.14	วงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจร..... 33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 วงจรตรวจจับแรงดันแบตเตอรี่	33
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้ จากวงจรตรวจจับแรงดัน ไฟฟ้า และแรงดันเปิดวงจร	35
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้ จากวงจรตรวจจับแรงดัน ไฟฟ้า และแรงดันแบตเตอรี่	36
4.18 โครงสร้างและการทำงานของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ	37
4.19 ไอซีเบอร์ LF398	37
4.20 การทำงานของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	38
4.21 วงจรมุมและคงค่าสัญญาณ	39
4.22 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ	39
4.23 โครงสร้างของไอซี AD633	40
4.24 โครงสร้างวงจรมุมสัญญาณ โดยใช้ไอซี AD633 และไอซี UA741	41
4.25 วงจรมุมสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ	44
4.26 วงจรมุมและการสัญญาณที่ใช้งานจริง	44
4.27 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมุมสัญญาณเมื่อ $V_{batt} = 1.254V$ และ $V_{oc} = 2.08V$	45
4.28 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมุมสัญญาณเมื่อ $V_{batt} = 1.214V$ และ $V_{oc} = 2.038V$	45
4.29 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย	46
4.30 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ใช้งานจริง	47
4.31 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย	48
4.32 ไอซีเบอร์ LF351	48
4.33 โครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	49
4.34 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	50
4.35 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริง	50
4.36 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ กรณีที่ 1	51
4.37 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ กรณีที่ 2	51
4.38 โครงสร้างของไอซี PC923	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 การต่อวงจรไอซี PC 923 เพื่อนำไปใช้งานจริง	52
4.40 ผลการทดสอบวงจรแยกโคคัลสัญญาณกรณีที่ 1 ความกว้างพัลส์ 30 %.....	53
4.41 ผลการทดสอบวงจรแยกโคคัลสัญญาณกรณีที่ 1 ความกว้างพัลส์ 80 %.....	53
4.42 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้งานจริง.....	56
4.43 การทดสอบหากราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	56
4.44 แสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ	57
4.45 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์	57
4.46 เครื่องมือวัดความเข้มแสง	60
4.47 การทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC.....	60
4.48 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 200 W/m ² อุณหภูมิ 36.5 °C	61
4.49 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 400 W/m ² อุณหภูมิ 36.7 °C	61
4.50 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 600 W/m ² อุณหภูมิ 38 °C.....	62
4.51 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 800 W/m ² อุณหภูมิ 38.5 °C	62
4.52 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m ² อุณหภูมิ 39.5 °C	63
4.53 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์	65
5.1 ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธี P&O.....	67
5.2 ไคโอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	69
5.3 ผังไคโอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	70
5.4 การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธี P&O ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB	72
5.5 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธี P&O	74
5.6 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และจุดกำลัง ที่ความเข้มแสง 500 W/m ² และ 1000 W/m ²	75
5.7 โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	76
5.8 ภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่ใช้งานจริง.....	77
5.9 โครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดัน	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10	วงจรถรวจจับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... 78
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้ จากวงจรถรวจจับแรงดัน ไฟฟ้า และแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... 80
5.12	โครงสร้างของตัวตรวจจับกระแส..... 81
5.13	วงจรถปรับแต่งสัญญาณแบบวงจรรวมปรับแต่งสัญญาณ 81
5.14	การปรับความชันและตำแหน่งศูนย์ 82
5.15	วงจรถปรับแต่งสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ 85
5.16	วงจรถปรับแต่งสัญญาณที่ใช้งานจริง 85
5.17	วงจรถรวจจับกระแสไฟฟ้า 86
5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้ จากวงจรถรวจจับแรงดัน ไฟฟ้า และกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... 87
5.19	ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA 2560..... 89
5.20	การทดสอบหาค่าการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O..... 94
5.21	รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 200 W/m ² อุณหภูมิ 36.5 °C 95
5.22	รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 400 W/m ² อุณหภูมิ 36.7 °C 95
5.23	รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 600 W/m ² อุณหภูมิ 38 °C..... 96
5.24	รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 800 W/m ² อุณหภูมิ 38.7 °C 96
5.25	รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m ² อุณหภูมิ 40 °C 97
5.26	กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ 99
6.1	ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีต่าง ๆ..... 103
6.2	กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และจุดกำลัง ที่ความเข้มแสง 500 W/m ² และ 1000 W/m ² 104
6.3	ชุดชาร์จ Com. without MPPT 106
6.4	ชุดชาร์จ MPPT Com..... 107
6.5	กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ 112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 2 เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2	114
6.7 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 2 เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m^2	114
6.8 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 3 เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2	115
6.9 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 3 เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m^2	115
6.10 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 4 เมื่อความเข้มแสง 0 W/m^2	116
6.11 คาดฟ้าศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3	120
6.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน	122
6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ ของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน	122
6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดคุ้มทุน (ปี) ของชุดชาร์จแต่ละชุดชาร์จ	125
6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของชุดชาร์จ และจุดคุ้มทุน (ปี)	127
6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัด ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ และจุดคุ้มทุน (ปี)	129
ข.1 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O	150
ง.1 กล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีตามรอยกำลังงานสูงสุด ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร	157
ง.2 การเชื่อมต่อสายไฟของระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับ MPPT VOC Charger	159
ง.3 กล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีตามรอยกำลังงานสูงสุดด้วยวิธี P&O	160
ง.4 การเชื่อมต่อสายไฟของระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับ MPPT P&O Charger	162
จ.1 ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ dc/dc isolate	164

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทนมีความสำคัญมาก พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะขณะใช้งาน มีความยั่งยืนและไม่มีที่สิ้นสุด การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) แต่เซลล์แสงอาทิตย์มีข้อเสีย คือ ใช้ต้นทุนการผลิตและติดตั้งสูง ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ และระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์นั้น โดยทั่วไปจะให้ค่ากำลังเอาต์พุตตามที่โหลดต้องการเท่านั้น จึงทำให้ไม่สามารถดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) มาใช้งานได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point tracking: MPPT) เพื่อให้ได้พลังงานสูงสุดในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ โดยจากงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบัน พบว่า วิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายวิธี ดังเช่น วิธีเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร (Short-Circuit Current: ISC) วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage: VOC) วิธีรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation Method: P&O) และวิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance: IncCond) เป็นต้น ซึ่งกลไกการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเป็นการจัดการให้กำลังเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในระดับที่สูงที่สุด สอดคล้องกับสภาวะความเข้มแสง ณ ขณะนั้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (stand-alone system) เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งานในพื้นที่ถิ่นทุรกันดารหรือห่างไกลจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นต้น และเนื่องจากเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานสำรองซึ่งก็คือแบตเตอรี่ เพื่อใช้จ่ายพลังงานให้กับโหลดในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด ที่มีความสามารถในการถ่ายโอนกำลังเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด โดยนำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร และวิธีรบกวนและสังเกต เหตุผลที่เลือกใช้วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถสร้างใช้งานจริงได้ด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก

และเหตุผลที่เลือกใช้วิธีรับกวนและสังเกตุ เนื่องจากอัลกอริทึมในการตามรอยกำลังงานสูงสุดด้วยวิธีการดังกล่าว ง่าย ไม่มีความซับซ้อน ใช้แค่การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่านั้น นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ยังได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการตามรอยกำลังสูงสุดที่ได้นำเสนอด้วยชุดทดสอบจริงเปรียบเทียบกับชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาด (Commercial Charger) โดยระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดชาร์จทั่วไปจะสามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.2 เพื่อทำการศึกษา วิจัย และสร้างต้นแบบชุดควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถนำไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ในอนาคตได้

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Sim Power System Block, PSB) ของโปรแกรม MATLAB ในคอมพิวเตอร์

1.3.2 ระบบที่ใช้เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ มีแหล่งจ่ายคือเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอินพุตของวงจร โหลดคือโหลดทางไฟฟ้าและแบตเตอรี่ขนาด 12 V

1.3.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีขนาด 40 W ที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000 W/m^2 และ อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

1.3.4 การสร้างชุดควบคุมด้วยวิธี VOC จะใช้อุปกรณ์แอนะล็อก เนื่องจากการสร้างชุดทดสอบจริงด้วยอุปกรณ์แอนะล็อกมีความเหมาะสมกับวิธี VOC

1.3.5 การสร้างชุดควบคุมด้วยวิธี P&O จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เนื่องจากการใช้บอร์ดดิจิทัลมีความเหมาะสมกับวิธีการนี้มากกว่าการสร้างด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วิธี VOC จำเป็นจะต้องมีแบตเตอรี่เป็นเอาต์พุตของระบบ

1.4.2 แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ เนื่องจากวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงใช้วงจรแปลงผันแบบบัคค์ จึงจะสามารถทำให้อัลกอริทึมการตามรอยกำลังสูงสุดทำงานได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการดึงพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังสูงสุด

1.5.2 ได้ต้นแบบชุดควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่นำไปสู่การยื่นขอจดสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

1.5.3 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ/ นานาชาติ

1.5.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการเขียน โปรแกรม และการใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR พร้อมทั้งการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดต่าง ๆ ทางไฟฟ้า

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รายงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น และขอบเขตของงานวิจัย รวมทั้งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงาน และลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และแบตเตอรี่

บทที่ 4 อธิบายถึงการตามรอยกำลังสูงสุด โดยใช้วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ รวมถึงการอธิบายถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ การออกแบบ และการทดสอบวงจรต่างๆ พร้อมผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

บทที่ 5 อธิบายถึงการตามรอยกำลังสูงสุด โดยใช้วิธีรบกวนและสังเกต และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ รวมถึงการอธิบายถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ และการทดสอบวงจรต่างๆ พร้อมผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

บทที่ 6 นำเสนอการเปรียบเทียบผลการตามรอยกำลังสูงสุดของวิธีต่าง ๆ ทั้งผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาด รวมถึงเศรษฐศาสตร์ของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ ภาคผนวก ข. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB ภาคผนวก ค. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ภาคผนวก ง1. แสดงคู่มือการใช้งานกล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ภาคผนวก ง2. แสดงคู่มือการใช้งานกล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O และภาคผนวก จ. แสดงรายละเอียดตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ด้วยเหตุผลนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ สำหรับการศึกษการตามรอยกำลังงานสูงสุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือผสมผสานกันจากวิธีที่ได้จากการปริทัศน์วรรณกรรม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Trishan Esham and Patrick L. Chapma	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธีรับกวนและสังเกต โดยทำงานเป็นคาบเวลา ใช้การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเป็นบวก ระบบจะปรับแรงดันไปในทิศทางเดิม แต่ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเป็นลบ ระบบก็จะปรับแรงดันไปในทิศตรงข้าม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	J. Ahmad	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ค่าต่างๆ ทำงานเป็นคาบเวลาโดยตัดโหลดออกชั่วขณะหนึ่ง เพื่อทำการวัดแรงดันขณะเปิดวงจร ใช้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ในการสุ่มค่าแรงดันมาคงค่าไว้ในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อนำไปหาแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด
2010	N. W. Vanden Eynde	นำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ที่สร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ในการใช้งานการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้
2011	Mei Shan Ngan and Chee Wei Tan	นำเสนอวิธีการตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการต่างๆ รวมไปถึงนำเสนอข้อดี ข้อเสียการตามรอยกำลังสูงสุดแต่ละวิธี และการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตร่วมกับการประยุกต์ใช้ fuzzy logic
2011	Ahmed K., Abdelsalam and Ahmed M. Massoud	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธีรบกวนและสังเกตที่มีการปรับตัว ทำงาน โดยเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า แล้วนำคำนวณในอัลกอริทึมเพื่อให้จุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด วิธีการนี้ยังมีการปรับตัวของวัฏจักรหน้าที่ ถ้ากำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมาก ค่าวัฏจักรหน้าที่จะเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงน้อย ค่าวัฏจักรหน้าที่จะเปลี่ยนแปลงน้อย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	S. Sreekanth and I.J. Raglend	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความนำในเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า ถ้าค่าความนำมีค่ามากกว่าศูนย์ระบบก็จะปรับเพิ่มแรงดัน ถ้าค่าความนำมีค่าน้อยกว่าศูนย์ระบบก็จะปรับลดแรงดัน และถ้าค่าความนำมีเท่ากับศูนย์ระบบก็จะคงค่าแรงดัน
2012	S.M.Ferdous	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร โดยใช้หลักการแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันขณะเปิดวงจร ทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบับคัท โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบการตามรอยกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพมากกว่า 95%
2013	S.K. Kollimalla and M.K. Mishra	นำเสนอการตามรอยกำลังสูงสุด โดยประยุกต์ใช้วิธีการกวาดและสังเกตร่วมกับวิธีเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร โดยใช้การสุ่มค่าแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการคำนวณหาค่ากำลัง จากนั้นเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า แล้วปรับเปลี่ยนค่ากระแสแทนการปรับเปลี่ยนแรงดัน เพื่อให้กระแสมีค่าเท่ากับกระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด

จากปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระมีหลายวิธี ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสองวิธี

การตามรอยจุดกำลังสูงสุดวิธีแรก ได้แก่ วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร โดยมีการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์แอนะล็อกทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน สามารถสร้างจริงได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย โดยจากงานวิจัย (Ahmad, 2010) และ (S.M.Ferdous, 2012) ผู้วิจัยได้นำหลักการของการเทียบสัดส่วนของแรงดันเพื่อหาจุดกำลังสูงสุด และหลักการทำงานเป็นคาบเวลาโดยตัดโพลไดออกไซด์เพื่อทำการวัดแรงดันขณะเปิดวงจร รวมไปถึงการประยุกต์ใช้วงจรสุ่มและคงค่า

สัญญาณ ในการสุ่มค่าแรงดันมาคงค่าไว้ในช่วงเวลาที่กำหนด ผู้วิจัยได้นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในอดีตมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เพื่อตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร

การตามรอยจุดกำลังสูงสุดวิธีที่สอง ได้แก่ วิธีรบกวนและสังเกต ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย อัลกอริทึมสำหรับการตามรอยกำลังสูงสุดไม่มีความซับซ้อน แค่ใช้การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า และวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูง โดยจากงานวิจัย (Trishan Esham et al., 2007) และ (Ahmed et al., 2011) ผู้วิจัยได้นำหลักการของการรบกวนและสังเกต และหลักการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยในอดีต รวมไปถึงการปรับตัวของวัฏจักรหน้าที่ เพื่อให้สามารถหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วขึ้น ผู้วิจัยได้นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในอดีตมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เพื่อตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต

2.3 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกใช้วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร และวิธีรบกวนและสังเกต โดยงานวิจัยต่าง ๆ ในอดีตที่นำเสนอในบทนี้ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ และการนำเอาความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เข้าใจ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

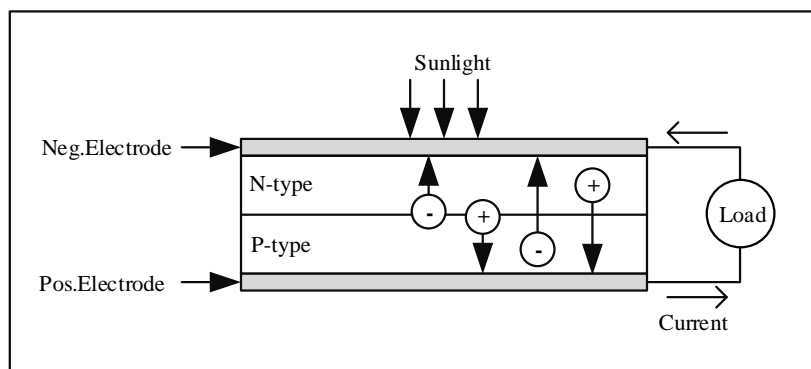
ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 บทนำ

ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดทั่วไป ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง และมีเอาต์พุตของระบบคือ โหลด ในกรณีที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานสำรองซึ่งทั่วไปใช้ แบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ในบทนี้จะนำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับ หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึง รายละเอียดเกี่ยวกับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และแบตเตอรี่

3.2 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

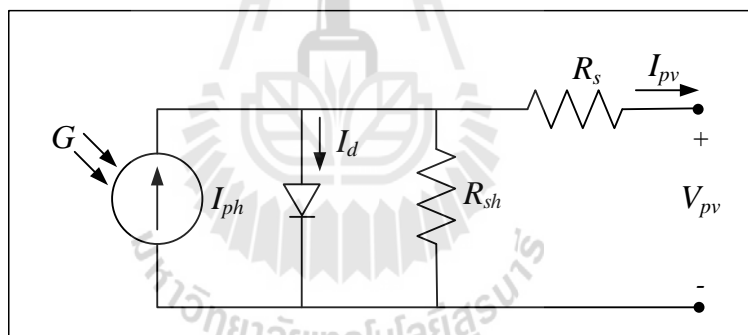
เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ จะประกอบด้วย สารกึ่งตัวนำชนิดพี สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชั้นระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็น (P-N Junction) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง และไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและประจุบวกขึ้น ซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอน และ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบ และทำให้พาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไหลไปที่ขั้วบวก เมื่อนำโหลดมาต่อก็จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

3.3 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ จะเริ่มต้นจากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ (Photo current : I_{ph}) เกิดจากแสงอาทิตย์หรือแสงสว่าง ไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่ เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อพีเอ็น มีไดโอดต่อขนานแหล่งจ่ายกระแสแบบคงที่ และค่าความต้านทานอนุกรมเกิดจากความต้านทานของซิลิกอนที่เรียงเป็นชั้น (R_{sh}) และความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังที่เป็นผลมาจากการต่อขั้วต่อภายนอก (R_s) ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{pv}) แสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้ จากสมการแสดงถึงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (exponential equation)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{n C V_t} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{R_{sh}} \quad (3-1)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_I (T - T_{ref})] G \quad (3-2)$$

$$I_s = I_o \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{n C V_t} \right] \quad (3-3)$$

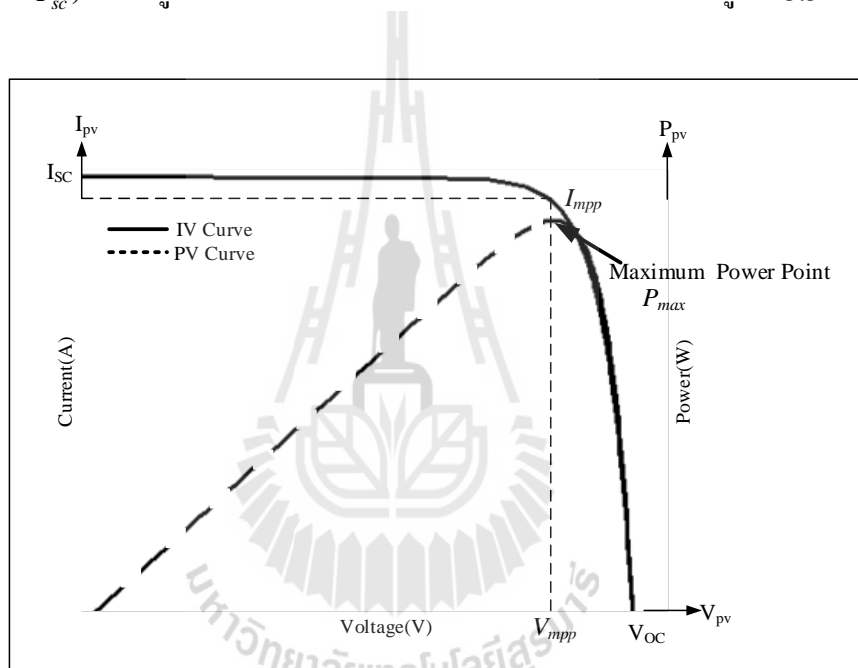
$$I_o = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{n C V_t} \right) - 1} \quad (3-4)$$

จากสมการที่ (3-1) (3-2) (3-3) และ (3-4) ความหมายของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นดังนี้

- I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (A)
- I_s คือ กระแสไบอัสลิมิตย้อนกลับของไดโอด (A)
- I_o คือ กระแสไบอัสลิมิตย้อนกลับที่สภาวะมาตรฐาน (A)
- I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25°C (A)
- V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์ที่ 25°C (V)
- G คือ ความเข้มแสง (kW/m^2)
- T คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Kevin)
- T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน (Kevin)
- K_I คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร มีค่าเท่ากับ 2.2×10^{-3} ($\text{A}/^\circ\text{C}$)
- q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} (C)
- n คือ Ideal factor (เซลล์แบบซิลิกอน $n = 1.3$)
- k คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ (J/Kevin)
- C คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมใน 1 มอดูล
- R_s คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ (Ω)
- R_{sh} คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ (Ω)
- E_g คือ พลังงานระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ 1.12eV
- V_t คือ Thermal voltage = $\frac{kT}{q}$

3.3.1 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถแสดงได้โดยใช้กราฟคุณลักษณะกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve) และกราฟคุณลักษณะกำลัง - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V Curve) ถ้าอุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถสร้างกราฟลักษณะเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เริ่มจากวัดแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการต่อโหลด (Open circuit voltage หรือ V_{oc}) จากนั้นให้เซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสจนถึงค่ากระแสสูงสุดในสภาวะลัดวงจร (Short circuit current หรือ I_{sc}) นำข้อมูลจากการทดสอบมาสร้างเป็นกราฟได้ดังกราฟในรูปที่ 3.3

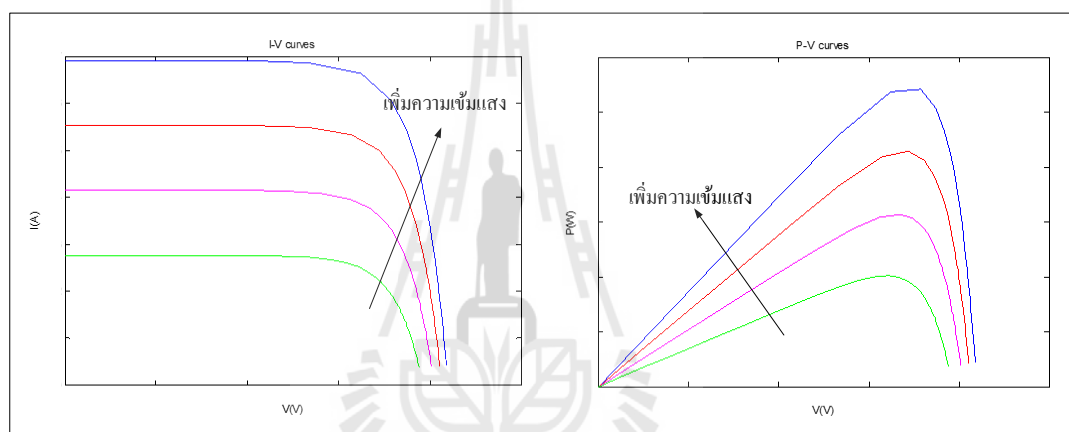


รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะของกระแส แรงดันและกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.3 กราฟลักษณะเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์มีความไม่เป็นเชิงเส้น โดยปกติค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับโหลดจึงไม่สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ แต่ถ้าสามารถเลือกจุดทำงานให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) ก็จะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) มาใช้งานได้ โดยตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ 2 ตัวแปร คือ ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

3.3.2 ผลกระทบของปริมาณความเข้มแสง

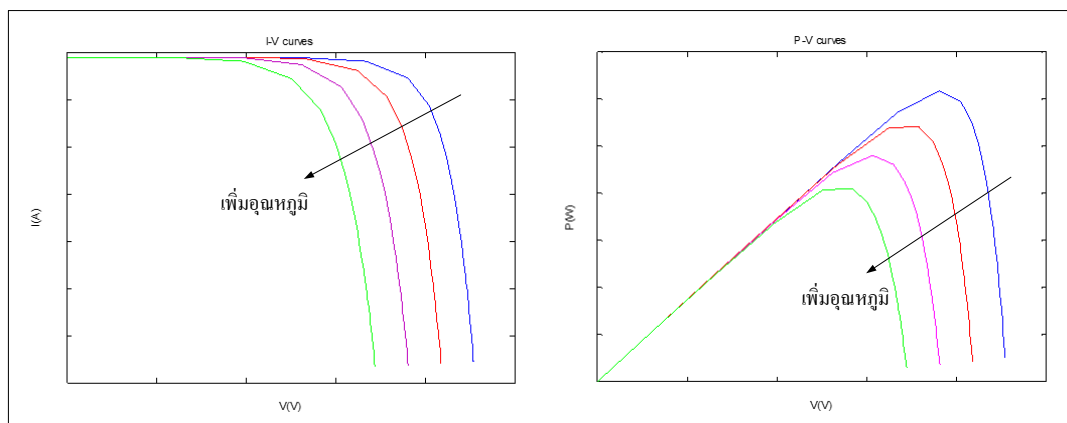
ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง หรือ I_{ph} เป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง และอุณหภูมิ ดังสมการที่ (3-2) ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบจะส่งผลต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกราฟลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันและกำลัง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 จากรูปจะเห็นว่า เมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้กระแส และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 3.4 กราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อระดับความเข้มแสงเปลี่ยนขณะอุณหภูมิคงที่

3.3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ

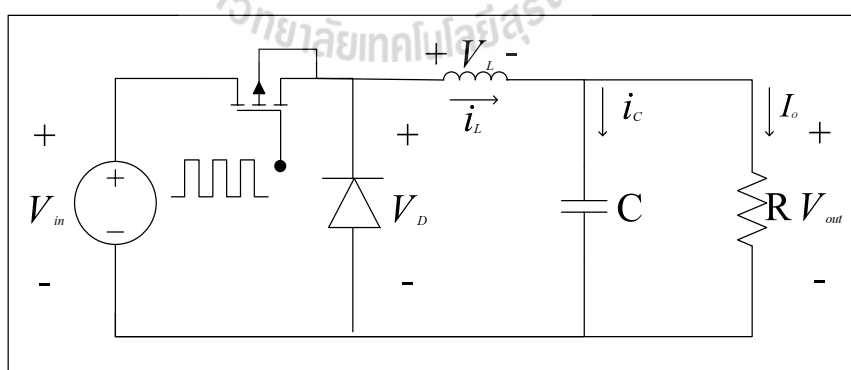
ถ้ากำหนดให้ความเข้มแสงในสมการที่ (3-2) มีค่าคงที่ ค่าอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงอาทิตย์ และจากสมการที่ (3-3) อุณหภูมิยังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (Reverse saturation current of diodes หรือ I_s) โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อแรงดันที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงกราฟลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันและกำลัง ได้ดังรูปที่ 3.5 จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง



รูปที่ 3.5 กราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนขณะที่ความเข้มแสงคงที่

3.4 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้วงจรแปลงผันแบบบัคค์ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้มีค่าแรงดันมากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีหน้าที่ลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้มีความต่ำกว่าหรือมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต โดยโครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะประกอบด้วย สวิตช์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้มอสเฟต (Mofset) ไคโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดยวงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

จากวงจรในรูปที่ 3.6 พบว่าสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ V_{out} (Muhammad H. Rashid) ได้จากสมการ (3-5)

$$V_{out} = dV_{in} \quad (3-5)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำวงจรแปลงผันแบบบัคค์ไปควบคุมการทำงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อให้จุดทำงานของแรงดันอินพุตเข้าใกล้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.5 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงาน และจ่ายพลังงานให้กับโหลดในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือในเวลากลางคืน แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) ที่ประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบ พร้อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) แบตเตอรี่อาจประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์ หรือมากกว่าก็ได้ แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บไฟฟ้าเท่านั้น ไม่ได้ผลิตไฟฟ้าสามารถประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ (recharge) ได้หลายครั้งและประสิทธิภาพจะไม่เต็ม 100% จะอยู่ที่ประมาณ 80% เพราะมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปในรูปความร้อนและปฏิกิริยาเคมีจากการประจุและการจ่ายประจุ แบตเตอรี่จัดเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และเสียหายได้ง่าย หากดูแลรักษาไม่ดีเพียงพอ หรือใช้งานผิดวิธี รวมถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป เนื่องด้วยวิธีการใช้ การบำรุงรักษา การประจุ และอุณหภูมิ เป็นต้น

แบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุดคือ แบตเตอรี่แบบจ่ายประจุสูง (Deep discharge battery) เพราะถูกออกแบบให้สามารถจ่ายพลังงานปริมาณมากหรือน้อยได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานๆ โดยไม่เกิดความเสียหาย และสามารถใช้ไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่นี้ได้อย่างต่อเนื่องถึง 80% โดยแบตเตอรี่ไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งต่างจากแบตเตอรี่รถยนต์ที่ถูกออกแบบให้จ่ายพลังงานสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ถ้าใช้ไฟฟ้ามากกว่า 20-30% ของพลังงานที่เก็บอยู่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงได้

ความจุของแบตเตอรี่ในการประจุพลังงานมีหน่วยเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-Hour หรือ Ah) พลังงานในแบตเตอรี่ 12 V 100 Ah เท่ากับ 12V x 100Ah ถ้าแบตเตอรี่ 100 Ah เท่ากับว่า แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายกระแส 1 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 100 ชั่วโมง หรือ แบตเตอรี่จ่ายกระแส 10 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง หรือ ถ้าแบตเตอรี่จ่ายกระแส 5 แอมแปร์อย่าง

ต่อเนื่องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งทั้งหมดนี้จ่าย กระแสเท่ากับ 100 Ah เป็นต้น จะเห็นได้ว่า แบตเตอรี่ที่มีความจุเท่ากันอาจมีความเร็วในการจ่ายกระแสต่างกัน ได้ ดังนั้น การจะทราบความจุของแบตเตอรี่ต้องทราบถึงอัตราการจ่ายกระแสด้วย มักกำหนดเป็นจำนวนชั่วโมงของการจ่ายกระแสเต็มที่กำหนดขนาดของแบตเตอรี่สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ขึ้นอยู่กับความจุของแบตเตอรี่ในการจัดเก็บพลังงาน อัตราการจ่ายประจุสูงสุด อัตราการประจุสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดที่จะนำแบตเตอรี่ไปใช้งาน

การออกแบบแบตเตอรี่สามารถคำนวณ ขนาดกระแสต่อชั่วโมง (Ah) ของแบตเตอรี่ได้จากสมการที่ (3-6)

$$Ah = \frac{Demandload}{V_{battery} \times DOD \times Batteryloss} \quad (3-6)$$

โดยที่	<i>Demandload</i>	คือ ความต้องการในการใช้โหลดต่อชั่วโมง (Wh)
	<i>DOD</i>	คือ Deep of discharge หรือ ค่าความลึกของการคายประจุโดยแบตเตอรี่แต่ละยี่ห้อไม่เท่ากัน อยู่ระหว่าง 45%-60%
	<i>Batteryloss</i>	คือ ค่าสูญเสียในแบตเตอรี่ โดยปกติแล้วแบตเตอรี่จะทำงานด้วยเซฟตี้แฟกเตอร์ (Safety Factor) ที่มีไว้เพื่อป้องกันการชาร์จมากเกินไป (over charge) และการคายประจุมากเกินไป (over discharge)

โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้แบตเตอรี่ ขนาด 12V และจ่ายโหลดที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 40 วัตต์ต่อชั่วโมง ค่าความลึกของการคายประจุ 60% และค่าสูญเสียในแบตเตอรี่ 85% ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$Ah = \frac{40Wh}{12V \times 0.6 \times 0.85} = 6.536$$

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

3.6 สรุป

การอธิบายเนื้อหาในบทนี้ เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ และลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวมีความสำคัญมาก สำหรับการหาแนวทางในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ และเนื้อหาในบทนี้ยังได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และเบตเตอร์ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่สำคัญเพื่อนำไปสู่การศึกษาและสร้างระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร และวิธีรบกวนและสังเกต ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 4 และบทที่ 5



บทที่ 4

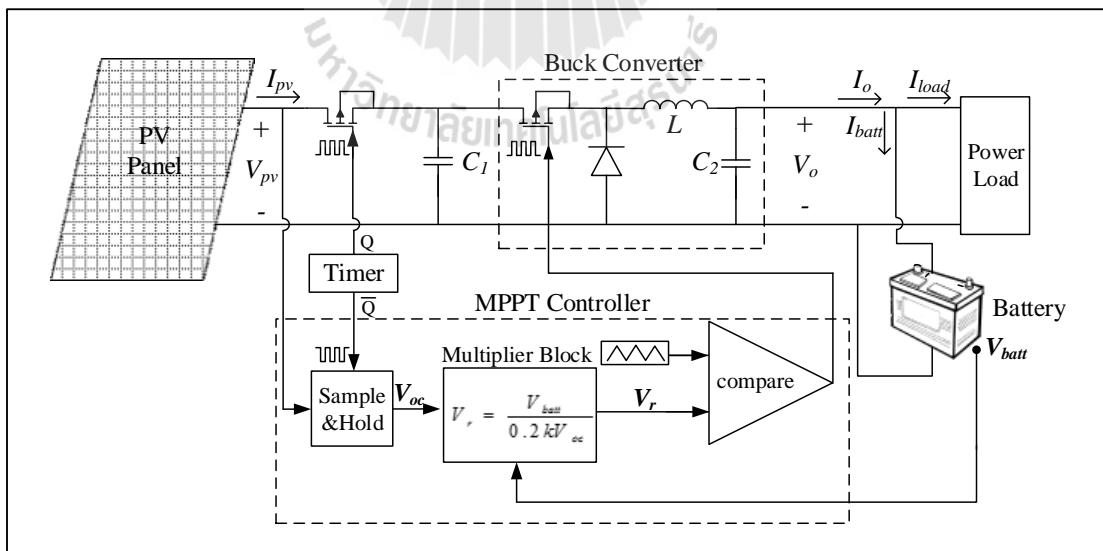
การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร

4.1 บทนำ

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่จะนำเสนอในบทนี้ คือวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเรียกวิธีนี้ว่า VOC ในบทนี้จะนำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบักก์เพื่อหาจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานของวิธี VOC อย่างละเอียด รวมไปถึงการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการตามรอยจุดกำลัง เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง ซึ่งในบทนี้ยังได้มีการอธิบายถึงโครงสร้างชุดทดสอบของวิธี VOC การออกแบบและการทดสอบวงจรต่าง ๆ พร้อมผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

4.2 ระบบที่พิจารณา

ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยวิธี VOC แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธี VOC

จากรูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่พิจารณา ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เชื่อมต่อกับระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร นำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์เพื่อหาจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และเนื่องจากเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานสำรอง ซึ่งในที่นี้ก็คือแบตเตอรี่

หลักการการทำงานของวิธี VOC จะใช้หลักการที่ว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันขณะเปิดวงจร โดยกำหนดให้แรงดันที่จุดกำลังสูงสุดเท่ากับ k เท่าของแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ดังสมการที่ (4-1) ซึ่งจากรูปที่ 4.1 ตัวควบคุมจะทำงานเป็นคาบเวลาโดยอาศัยวงจรตั้งเวลา (Timer) กำหนดช่วงเวลาทำงาน โหลดจะถูกตัดออกชั่วขณะหนึ่ง เพื่อทำการวัดแรงดันขณะเปิดวงจร และใช้วงจรสุ่มค่าและคงค่าสัญญาณ (Sample and Hold) ในการสุ่มค่าแรงดันมาคงค่าไว้ในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อนำไปหาแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด

$$V_{mpp} = kV_{oc} \quad (4-1)$$

เมื่อ V_{mpp} คือ แรงดันที่จุดกำลังสูงสุด (V)
 V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจร (V)
 k คือ ค่าอัตราส่วนคงที่ โดยทั่วไปถ้าใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000 W/m^2 และ อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่า k ในสมการที่ (4-1) จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.71 - 0.78 (Esrasm et al., 2007)

จากรูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันแบบบัคค์จะถูกควบคุมการทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่าวัฏจักรหน้าที่ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณฟันเลื่อยแอมพลิจูด 5 โวลต์ และแรงดันอ้างอิง (reference voltage : V_r) ดังนั้นค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle: d) ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ หาได้จากสมการที่ (4-2)

$$d = 0.2V_r \quad (4-2)$$

โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จากสมการที่ (3-5) $V_o = dV_{in}$ เนื่องจากแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์คือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้น $V_o = dV_{pv}$ ทำการแทนค่า d จากสมการที่ (4-2) จะได้

$$V_o = 0.2V_r V_{pv} \quad (4-3)$$

เมื่อต้องการให้แรงดันอินพุตของระบบมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด ($V_{pv} = V_{mpp} = kV_{OC}$) และเอาต์พุตของระบบคือแบตเตอรี่ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต $V_o = V_{batt}$ จากสมการที่ (4-3) จะได้

$$V_{batt} = 0.2V_r kV_{OC} \quad (4-4)$$

จากสมการที่ (4-4) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$V_r = \frac{V_{batt}}{0.2kV_{OC}} \quad (4-5)$$

สมการที่ (4-5) จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าแรงดันอ้างอิง V_r เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยความถี่ $10kHz$ จะได้ค่าวัฏจักรหน้าที่ d สัญญาณที่ได้นำไปขับสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักคิง ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ค่า V_{mpp} ทำให้สามารถดึงกำลังสูงสุดออกมาได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องมีการอ่านค่า V_{OC} เป็นระยะ ๆ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าระบบสามารถดึงกำลังได้สูงสุด สำหรับทุก ๆ ความเข้มแสง เนื่องจากในแต่ละความเข้มแสงค่า V_{OC} จะมีค่าไม่เท่ากัน นอกจากนี้งานวิจัยในอดีต (Ahmad, 2010) การคำนวณหาค่า V_r จะกำหนดให้ค่า V_{batt} มีค่าคงที่ ทำให้เมื่อค่า V_{batt} เปลี่ยนแปลง ค่า V_r ที่คำนวณได้ไม่มีความเหมาะสมในช่วงเวลานั้น ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จึงได้ทำการวัดค่า V_{batt} ผ่านตัวตรวจจับแรงดัน เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า V_r ให้มีความเหมาะสมมากที่สุดและปรับตามจุดการทำงานที่ค่าต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และงานวิจัยในอดีตยังใช้ค่า k เป็นค่าคงที่ตามสภาวะมาตรฐาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่า k ที่สภาวะมาตรฐาน จะใช้เฉพาะการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.80 แต่สำหรับชุดทดสอบจริงในทางปฏิบัติค่า k จะได้จากทดสอบ ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ต่อไป

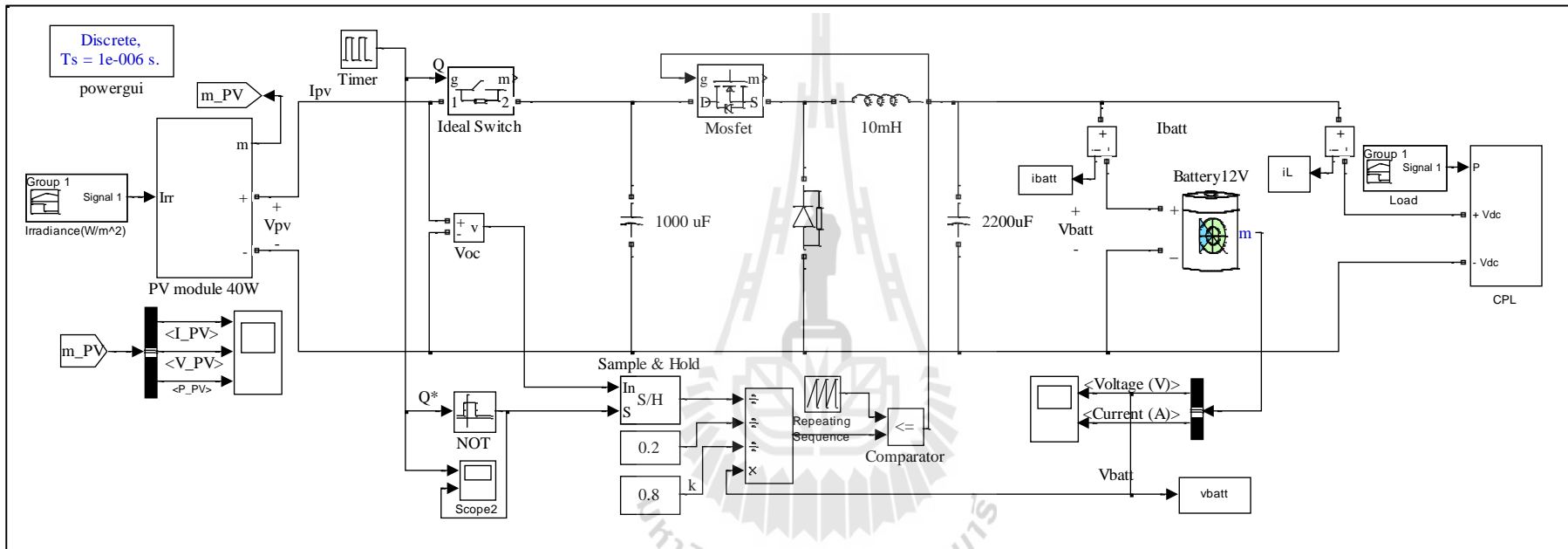
4.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

เพื่อยืนยันว่าวิธี VOC ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถดึงกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.1 โดย

อาศัยพารามิเตอร์ของระบบแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และการจำลองสถานการณ์ของระบบจะอาศัยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี VOC

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Panel)	
พิจารณาที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000W/m^2 และ อุณหภูมิ 25°C	
V_{OC}	43.125 V
I_{SC}	1.1 A
I_{mpp}	1.033 A
V_{mpp}	38.73 V
P_{max}	40 W
วงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง (Buck Converter)	
f_{sw}	10 kHz
V_{pv}	38.73 V
V_{batt}	12 V
C_1	1000 μF
C_2	2200 μF
L	10 mH



รูปที่ 4.2 การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธี VOC ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB

การจำลองสถานการณ์ของระบบดังรูปที่ 4.2 ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบักก์ และเอาต์พุตคือแบตเตอรี่ ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นจากสมการของเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (3-1) จากนั้นทำการป้อนค่าความเข้มแสงในหน่วย W/m^2 และอุณหภูมิในหน่วย Kelvin โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ $25^{\circ}C$ หรือ 298.15 Kelvin มีค่าคงที่ทุกความเข้มแสง สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ค่าวัฏจักรหน้าที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยแอมพลิจูด 5 V ความถี่ 10kHz เปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง V_r ดังสมการที่ (4-5) ซึ่งจากสมการดังกล่าวจะต้องทำการวัดค่า V_{oc} และค่า V_{batt} เพื่อป้อนให้กับ V_r โดยการวัดค่า V_{oc} จะต้องอาศัยการทำงานของสวิตช์เพื่อใช้ในการเปิดวงจร สวิตช์เปิดวงจรจะทำงานตรงข้ามกับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยใช้ NOT GATE ในการกลับสัญญาณ เมื่อสวิตช์เปิดวงจรทำงาน โหลดจะถูกตัดออกเป็นเวลา 99ms และจะเปิดวงจรเป็นเวลา 1ms เพื่อทำการวัดและสุ่มค่า V_{oc} ในขณะนั้น ซึ่งวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะทำการสุ่มค่า V_{oc} และจะคงค่า V_{oc} ไว้เป็นเวลา 100ms ทำในลักษณะนี้ซ้ำ ๆ เพื่อนำไปคำนวณหาแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดในสถานะความเข้มแสงต่าง ๆ สำหรับเอาต์พุตของระบบซึ่งก็คือแบตเตอรี่ ในการจำลองสถานการณ์จะกำหนดให้ค่าสถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC) มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยการจำลองสถานการณ์จะทำการวัดค่า V_{pv} , P_{pv} , V_{batt} , I_{batt} และ I_{load} ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 5 ช่วงดังนี้

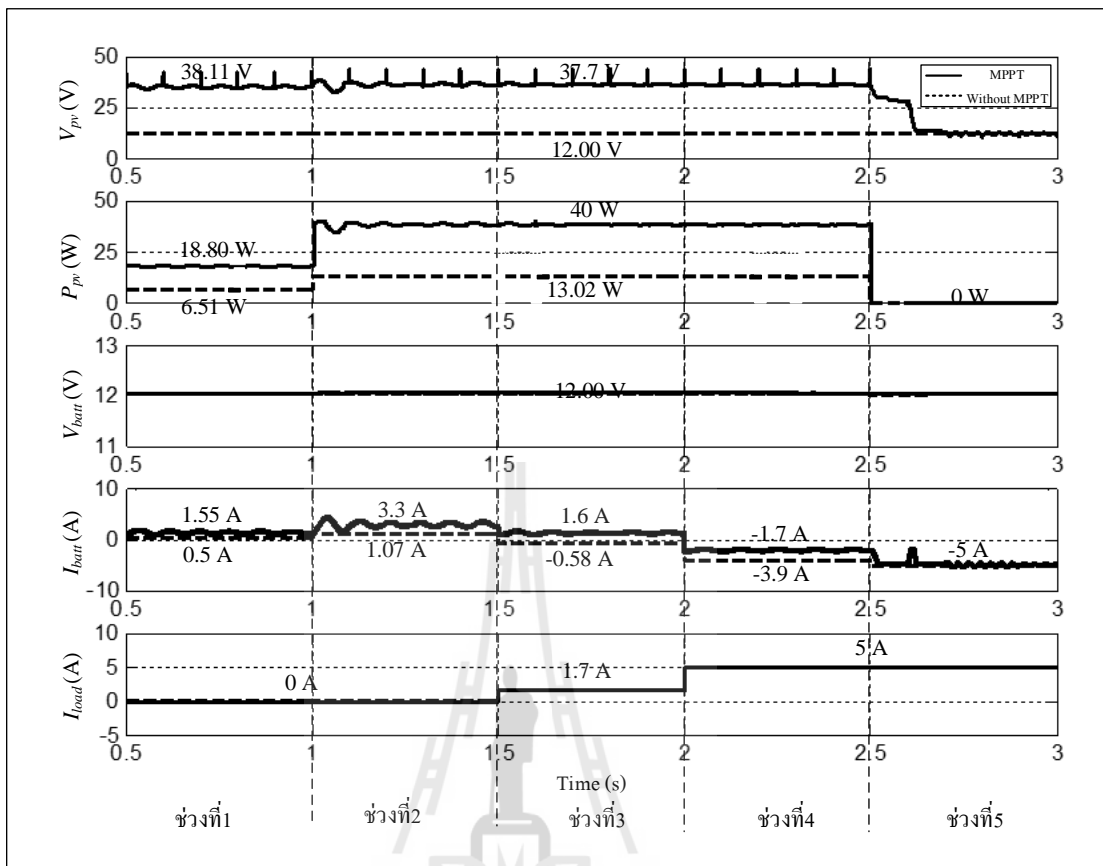
ช่วงที่ 1 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $500 W/m^2$ และไม่มีภาระจ่ายโหลด

ช่วงที่ 2 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $1000 W/m^2$ และไม่มีภาระจ่ายโหลด

ช่วงที่ 3 : ภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 20 W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ $1000 W/m^2$

ช่วงที่ 4 : ภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 60 W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ $1000 W/m^2$

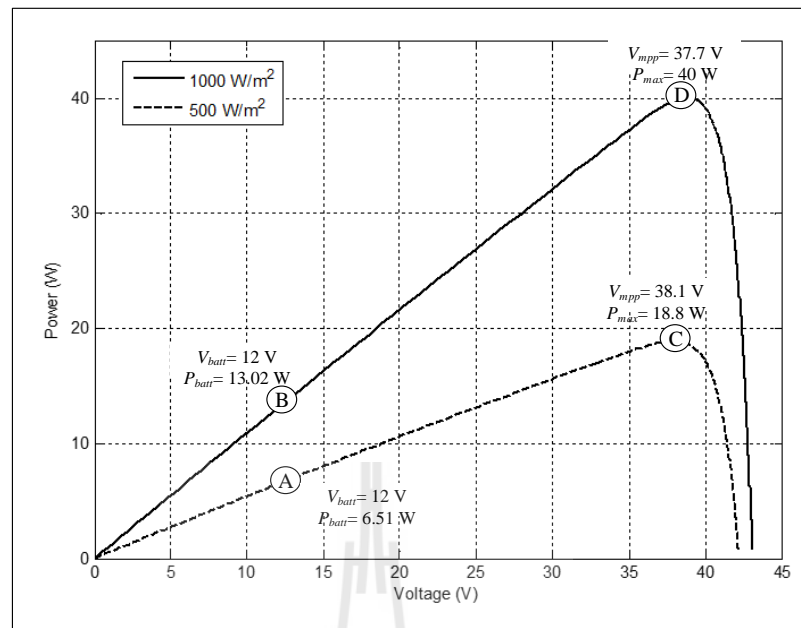
ช่วงที่ 5 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $0 W/m^2$ (ไม่มีแสงอาทิตย์) และจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 60W



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC

ช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2

จากรูปที่ 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดแสดงด้วยกราฟเส้นประ (without MPPT) แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับแรงดันของเอาต์พุตซึ่งก็คือแบตเตอรี่ 12V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 กำลังไฟฟ้า ($P_{pv} = I_{pv} V_{pv}$) $P_{pv} = 6.51 \text{ W}$ แสดงได้จุด A ในรูปที่ 4.4 และจากรูปที่ 4.3 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $P_{pv} = 13.02 \text{ W}$ แสดงได้จุด B ในรูปที่ 4.4 และจากรูปที่ 4.3 ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลัง สูงสุด (MPPT) แสดงด้วยกราฟเส้นทึบ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 $V_{pv} = 38.1 \text{ V}$ และ $P_{pv} = 18.8 \text{ W}$ แสดงได้จุด C ในรูปที่ 4.4 และจากรูปที่ 4.3 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $V_{pv} = 37.7 \text{ V}$ และ $P_{pv} = 40 \text{ W}$ แสดงได้จุด D ในรูปที่ 4.4 อีกทั้งในรูปที่ 4.4 ยังแสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 และ 1000 W/m^2 ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังด้วยวิธี VOC สามารถดึงกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้



รูปที่ 4.4 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และจุดกำลังที่ความเข้มแสง $500 W/m^2$ และ $1000 W/m^2$

ช่วงที่ 3

จากรูปที่ 4.3 เมื่อทำการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 20 W จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่าลดลง เนื่องจากกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะแบ่งกระแสจ่ายให้โหลด

ช่วงที่ 4

จากรูปที่ 4.3 เมื่อทำการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 60 W เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายจุดกำลังสูงสุดได้เพียง 40 W จึงไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จึงมีค่าติดลบซึ่งหมายถึงแบตเตอรี่ช่วยจ่ายกระแสให้โหลด

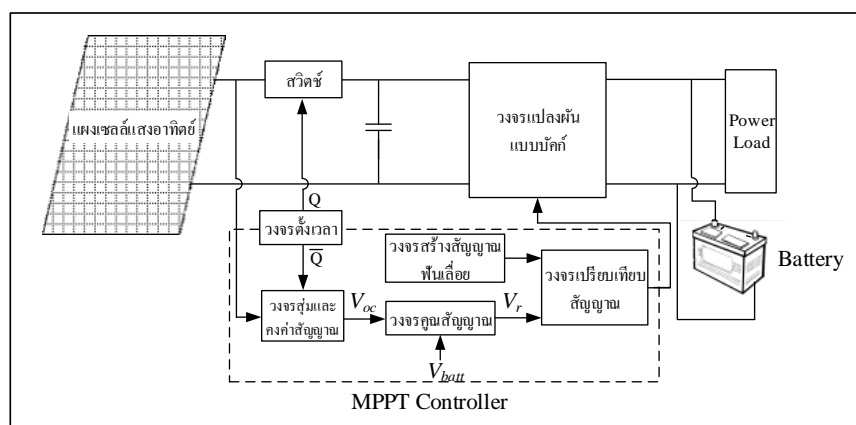
ช่วงที่ 5

จากรูปที่ 4.3 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $0 W/m^2$ หรือไม่มีแสงอาทิตย์ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่ คือ 12V และเนื่องจากโหลดต้องการกำลังไฟฟ้า 60 W กระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่าติดลบมากกว่าช่วงที่ 4 เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีเพียงแค่แบตเตอรี่จ่ายกระแสให้โหลด

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปแบบที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลัง (เส้นทึบ) สามารถดึงกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ถ้าความเข้มแสงมีค่ามาก กำลังที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่ามาก ถ้าในสภาวะดังกล่าวไม่มีโหลดพลังงานทั้งหมดจะทำการเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ โดยกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ จะมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง (เส้นประ) ซึ่งหมายถึง ระบบสามารถอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้เร็วขึ้น สำหรับกรณีที่มีการจ่ายโหลด ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปแบบที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่โหลดต้องการ พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แต่ถ้าพลังงานที่โหลดต้องการมีค่ามากกว่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดทันที หรือแม้กระทั่งกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดแทนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีแต่พลังงานสำรองของระบบมาใช้จ่ายโหลดทั้งหมด จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังมีประโยชน์และมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

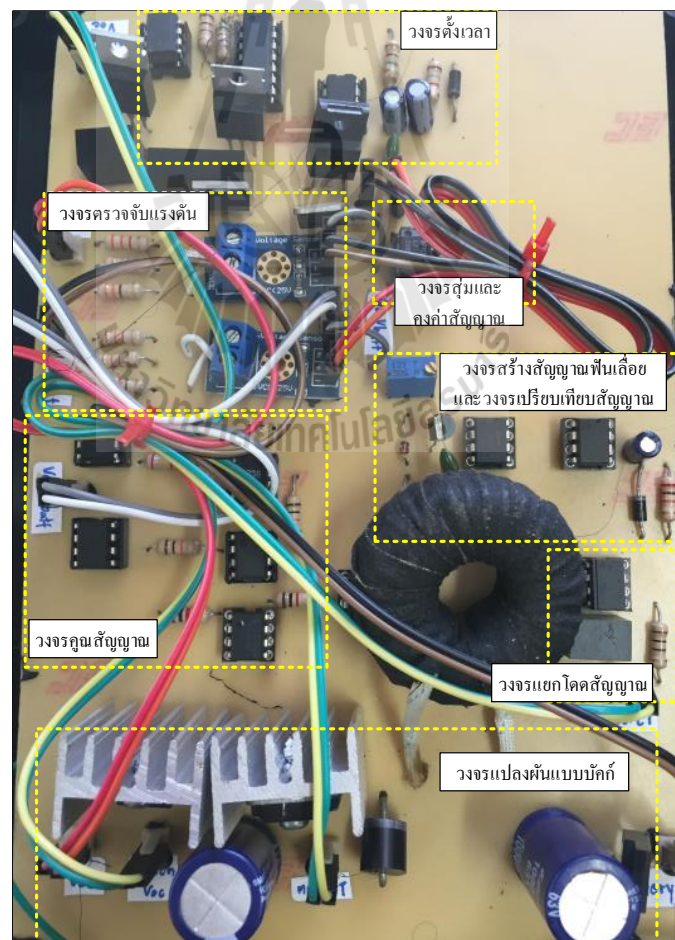
4.4 การสร้างชุดทดสอบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC

การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง ระบบมีความสามารถในการถ่ายโอนกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และแสดงให้เห็นว่าวิธีที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงมีความจำเป็นในการสร้างชุดทดสอบ โดยโครงสร้างของชุดทดสอบวิธี VOC แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยจะใช้อุปกรณ์แอนะล็อกในการสร้างชุดทดสอบ



รูปที่ 4.5 โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC

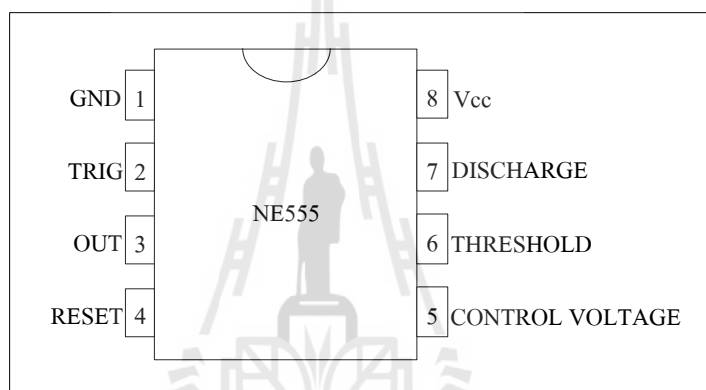
โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ประกอบด้วย วงจรตั้งเวลา กำหนดช่วงการทำงาน โหลดจะถูกตัดออกชั่วขณะหนึ่ง เพื่อทำการวัดแรงดันขณะเปิดวงจรและใช้ วงจรสุ่มค่าและคงค่าสัญญาณ ในการสุ่มค่าแรงดัน V_{OC} มาคงค่าไว้ในเวลาที่กำหนด ทำการวัด แรงดัน V_{OC} และ V_{batt} ผ่านตัวตรวจจับแรงดัน จากนั้นป้อนให้กับวงจรคูณสัญญาณจะได้ค่า V_r นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยโดยใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จะได้สัญญาณพัลส์ผ่าน วงจรแยกโคตสัญญาณเพื่อแยกกราวด์ นำสัญญาณพัลส์ไปขับสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ค่า V_{mpp} ทำให้สามารถดึงกำลังสูงสุดออกมาใช้งานได้ โดย ภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ที่ใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ อธิบายการทำงาน การออกแบบและการทดสอบวงจรต่าง ๆ ในชุดทดสอบไว้ในหัวข้อถัดไป สำหรับแหล่งจ่ายของวงจรภายในชุดทดสอบมาจากแบตเตอรี่ผ่านตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (isolate dc/dc) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ



รูปที่ 4.6 ภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ที่ใช้งานจริง

4.4.1 วงจรตั้งเวลา

ไอซีเบอร์ 555 เป็นไอซีที่นิยมใช้ในการนำไปสร้างสัญญาณรูปคลื่นแบบต่างๆ เช่น สัญญาณสี่เหลี่ยม สัญญาณพัลส์ สัญญาณลาดเอียง และวงจรตั้งเวลา ไอซีเบอร์ 555 เป็นอุปกรณ์วงจรรวมที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ อยู่ภายใน และมีส่วนที่ต้องต่อกับวงจรภายนอกเพื่อควบคุมการทำงาน และใช้งานเป็นลักษณะต่าง ๆ ไอซีเบอร์ 555 มีความสะดวกต่อการออกแบบและง่ายต่อการสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ต่าง ๆ อีกทั้งสามารถเข้าใจการทำงานได้ง่าย ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ไอซีเบอร์ 555 ในการสร้างวงจรตั้งเวลา ไอซีเบอร์ 555 แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ไอซีเบอร์ 555

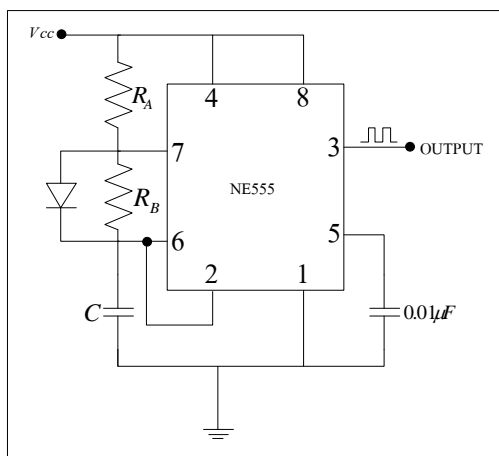
ไอซีเบอร์ 555 มีโหมดการทำงานทั้งหมด 3 โหมด ดังนี้

โหมดที่ 1 โมโนสเตเบิล (Monostable) การทำงานจะเป็นแบบที่สร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมา 1 ลูก หลังจากมีการทริก (กระตุ้น) ให้วงจรเกิดสัญญาณ มีความกว้างที่สามารถกำหนดได้ด้วยค่า RC

โหมดที่ 2 อะสเตเบิล (Astable) การทำงานจะเป็นแบบที่สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ที่สามารถกำหนดได้ตามความต้องการ ด้วยค่าคาปาซิเตอร์ C และค่าความต้านทาน R_A และ R_B

โหมดที่ 3 ไบสเตเบิล (Bistable) การทำงานจะเป็นแบบที่จะเปลี่ยนสถานะจาก High ไปเป็นสถานะ Low ได้ และจะยังคงอยู่ที่สถานะนั้นตลอดจนกว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่เข้ามาทริก ที่เรียกว่า ฟลิปฟล็อป (Flip-Flop)

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ไอซีเบอร์ 555 ในโหมดอะสเตเบิลมาสร้างเป็นวงจรตั้งเวลา ซึ่งแสดงการต่อวงจรใช้งานในโหมดอะสเตเบิลได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรอะอสเตเบิลิต

การออกแบบวงจรวงจระอสเตเบิลิตสามารถออกแบบได้ดังสมการ ดังนี้

$$T_{on} = 0.693(R_A + R_B)C \quad (4-6)$$

$$T_{off} = 0.693R_B C \quad (4-7)$$

$$f = \frac{1}{0.693(R_A + 2R_B)C} \quad (4-8)$$

โดยที่ T_{on} คือ ระยะเวลา ON (S;วินาที)

T_{off} คือ ระยะเวลา OFF (S;วินาที)

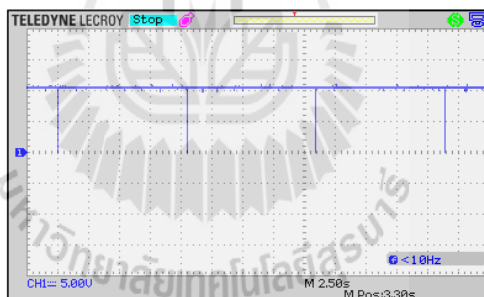
f คือ ความถี่ของสัญญาณ (Hz)

การออกแบบวงจรตั้งเวลาที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้มีค่า $T_{on} = 11s$ และ $T_{off} = 18ms$ ดังนั้นการคำนวณหาค่าตัวต้านทานจะพิจารณาจากสมการที่ (4-6) และ (4-7) โดยการออกแบบจะกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุในวงจรมีค่าเท่ากับ $C = 14.7\mu F$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรตามที่ได้กำหนดไว้ในเบื้องต้นลงในสมการดังกล่าว จะได้ค่าตัวต้านทาน $R_A = 96.4k\Omega$ และ $R_B = 1.77k\Omega$ โดยในการสร้างวงจรใช้งานจริงผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ ดังนี้ $C = 14.7\mu F$ $R_A = 1M\Omega$ และ $R_B = 1.8k\Omega$ ซึ่งสามารถแสดงวงจรตั้งเวลาที่นำมาใช้งานจริงดังรูปที่ 4.9

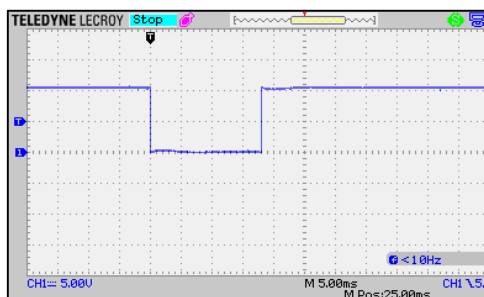


รูปที่ 4.9 วงจรตั้งเวลาที่ใช้งานจริง

การทดสอบวงจรตั้งเวลาในรูปที่ 4.9 ดำเนินการทดสอบโดยทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลา ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลาได้ดังรูปที่ 4.10 ดังนี้



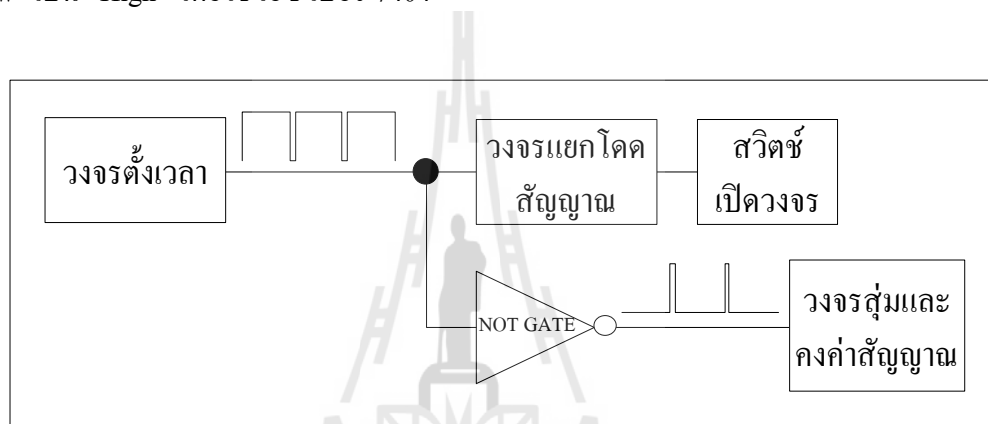
(ก)



(ข)

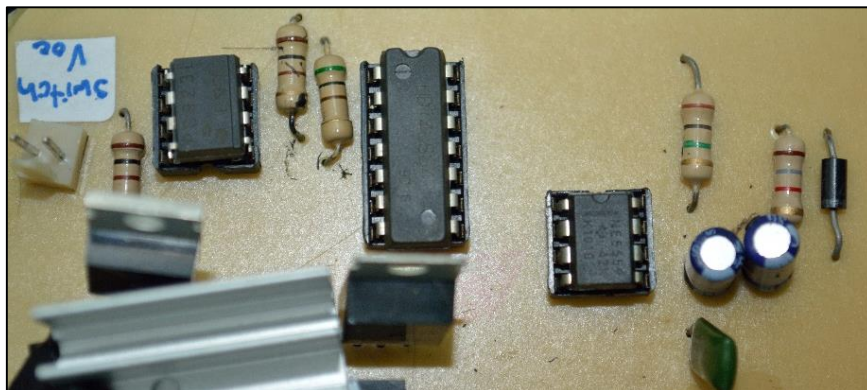
รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลา

ผลการทดสอบวงจรตั้งเวลาในรูปที่ 4.10 (ก) พบว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลามีขนาด $T_{on} = 11s$ ซึ่ง T_{off} ในรูปที่ 4.10 (ก) ไม่ชัดเจนจึงทำการขยายรูปสัญญาณจะได้ดังรูปที่ 4.10 (ข) จะเห็นว่า $T_{off} = 18ms$ ซึ่งเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลาจะนำไปป้อนให้กับสวิตช์สำหรับเปิดวงจร และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ดังรูปที่ 4.11 การนำสัญญาณไปป้อนให้กับสวิตช์นั้นจะต้องผ่านวงจรแยกโคคสัญญาณ ก่อนนำไปขับสวิตช์ (อธิบายการทำงานในหัวข้อที่ 4.4.6) ส่วนสัญญาณที่ป้อนให้กับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะต้องผ่าน NOT GATE เพื่อกลับสัญญาณจาก ลอจิก “High” เป็น “Low” และลอจิก “Low” เป็น “High” โดยใช้ไอซี เบอร์ 7404



รูปที่ 4.11 การนำวงจรตั้งเวลาไปใช้งานร่วมกับวงจรอื่น ๆ

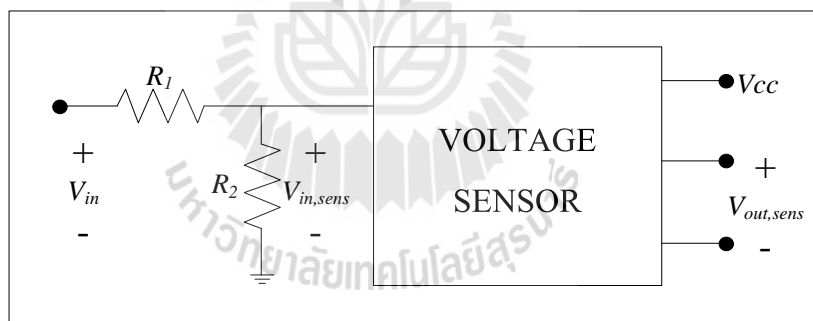
จากรูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลาจะนำไปป้อนให้กับสวิตช์เปิดวงจรและวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยสวิตช์เปิดวงจรจะทำงานตรงข้ามกับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยใช้ NOT GATE ในการกลับสัญญาณ ถ้าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลาเป็นลอจิก “Low” ทำให้สวิตช์เปิดวงจรทำงาน โหลดจะถูกตัดออกเป็นเวลา 18ms เพื่อทำการวัดค่า V_{oc} ในขณะที่นั้นวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะทำการสุ่มค่า V_{oc} และถ้าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตั้งเวลาเป็นลอจิก “High” วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะทำการคงค่า V_{oc} เป็นเวลา 11s ซึ่งวงจรนี้จะทำงานในลักษณะนี้ซ้ำ ๆ จากวงจรในรูปที่ 4.11 นำวงจรตั้งเวลาไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอื่น ๆ มาสร้างใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรตั้งเวลาไปประยุกต์ใช้งานจริงร่วมกับวงจรอื่น ๆ

4.4.2 วงจรตรวจจับแรงดัน

วงจรตรวจจับแรงดันในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะเลือกใช้ Arduino Standard Voltage Sensor Module พิกัด 0 - 24 V ทำหน้าที่วัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะเปิดวงจร (V_{oc}) และแรงดันแบตเตอรี่ (V_{batt}) ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดันดังรูปที่ 4.13



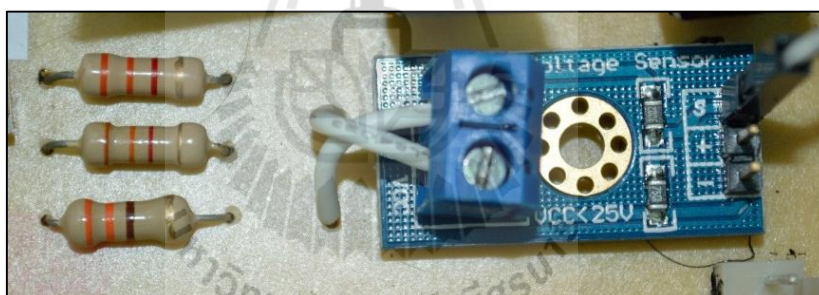
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดัน

จากโครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดันในรูปที่ 4.13 เนื่องจากตัวตรวจจับแรงดันที่เลือกใช้มีค่าพิกัด คือ 0 - 24 V แต่ค่าแรงดันสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าเท่ากับ 43 โวลต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับวงจรตรวจจับแรงดัน ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแรงดันของวงจรแบ่งแรงดันได้ตามสมการที่ (4-9)

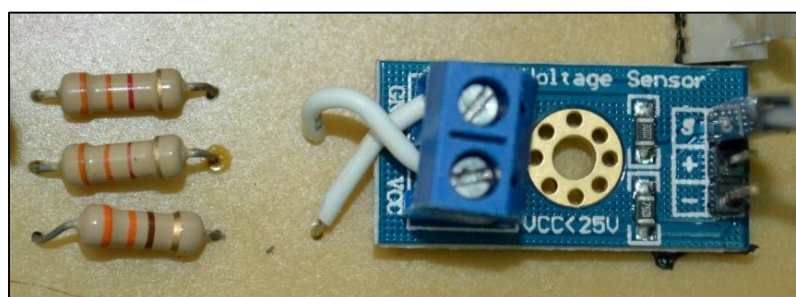
$$V_{in,sens} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (4-9)$$

เมื่อ $V_{in,sens}$ คือ แรงดันอินพุตของตัวตรวจจับแรงดัน (V)
 V_{in} คือ แรงดันที่ต้องการวัด (V)

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า $R_1 = 3.3k\Omega$ $R_2 = 3.6k\Omega$ และใช้ตัวตรวจจับแรงดันจำนวน 2 ตัว ได้แก่ ตัวตรวจจับแรงดันเปิดวงจร และตัวตรวจจับแรงดันแบบเตอรี และได้ดำเนินการทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนของตัวตรวจจับแรงดันเปิดวงจรและตัวตรวจจับแรงดันแบบเตอรี โดยการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจรมันั้น ด้านอินพุตของตัวตรวจจับแรงดันจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ และทำการปรับค่าแรงดันค่าต่าง ๆ จากนั้นวัดค่าแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจรตรวจจับแรงดัน สำหรับการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันแบบเตอรี จะดำเนินการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจร โดยวงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และวงจรตรวจจับแรงดันแบบเตอรีแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจรแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันแบบเตอรีแสดงได้ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.14 วงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจร



รูปที่ 4.15 วงจรตรวจจับแรงดันแบบเตอรี

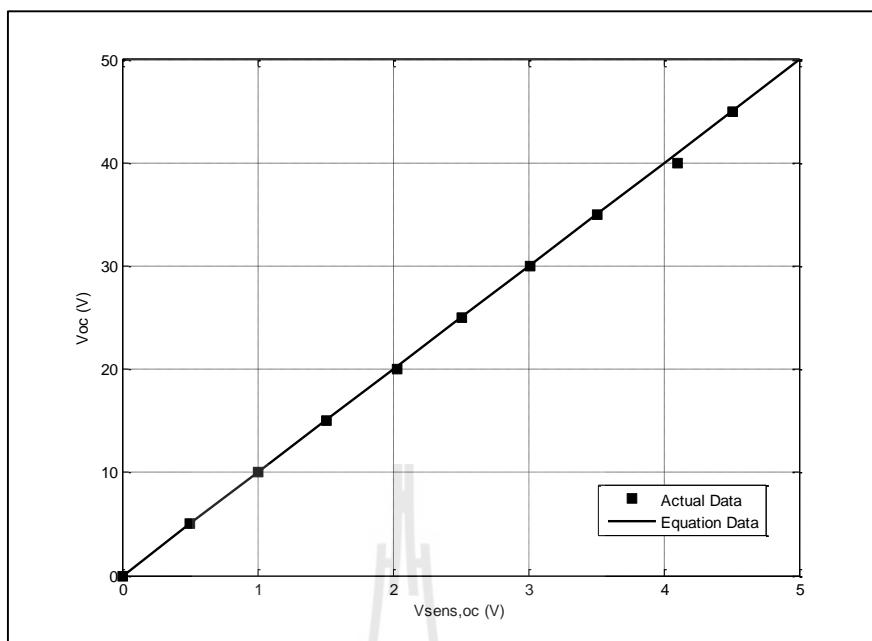
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจร

V_{oc} (V)	$V_{sens,oc}$ (V)
0.00	0.001
5.00	0.502
10.00	1.001
15.00	1.510
20.00	2.030
25.00	2.510
30.00	3.010
35.00	3.510
40.00	4.100
45.00	4.511
50.00	5.000

เมื่อ V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจร (V)

$V_{sens,oc}$ คือ แรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (V)

จากตารางที่ 4.2 นำผลการทดสอบวงจรมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะเปิดวงจร ได้ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ากราฟมีความเป็นเชิงเส้น และอัตราส่วนของแรงดันอินพุต (แรงดันเปิดวงจร) ต่อแรงดันเอาต์พุต (แรงดันของตัวตรวจจับแรงดัน) คือ 10:1



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และแรงดันเปิดวงจร

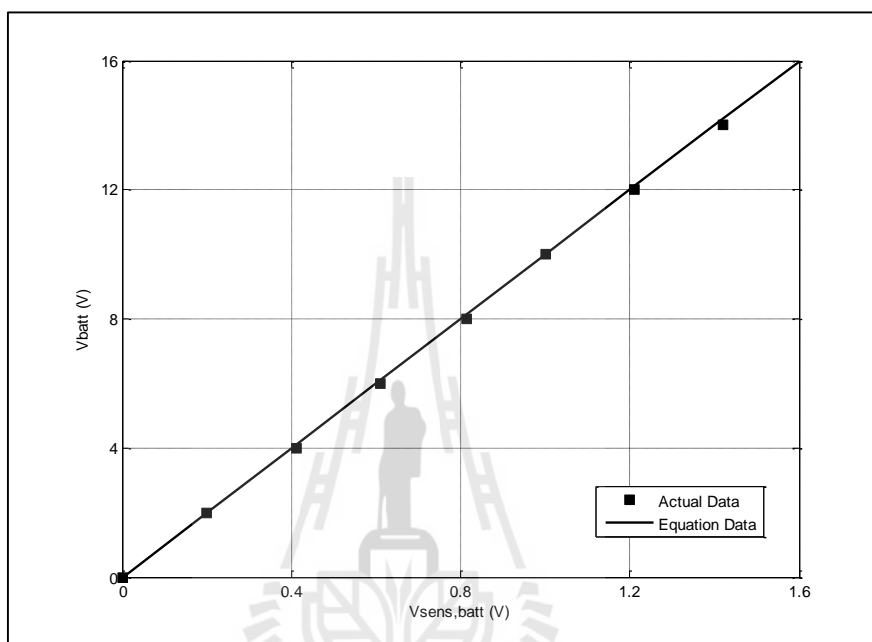
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันแบตเตอรี่

V_{batt} (V)	$V_{sens,batt}$ (V)
0.00	0.001
2.00	0.199
4.00	0.412
6.00	0.610
8.00	0.813
10.00	1.00
12.00	1.21
14.00	1.42
16.00	1.61

เมื่อ V_{batt} คือ แรงดันแบตเตอรี่ (V)

$V_{sens,batt}$ คือ แรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (V)

จากตารางที่ 4.3 นำผลการทดสอบวงจรมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และแรงดันของแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 4.17 จะเห็นว่ากราฟมีความเป็นเชิงเส้น และอัตราส่วนของแรงดันอินพุต (แรงดันแบตเตอรี่) ต่อแรงดันเอาต์พุต (แรงดันของตัวตรวจจับแรงดัน) คือ 10:1



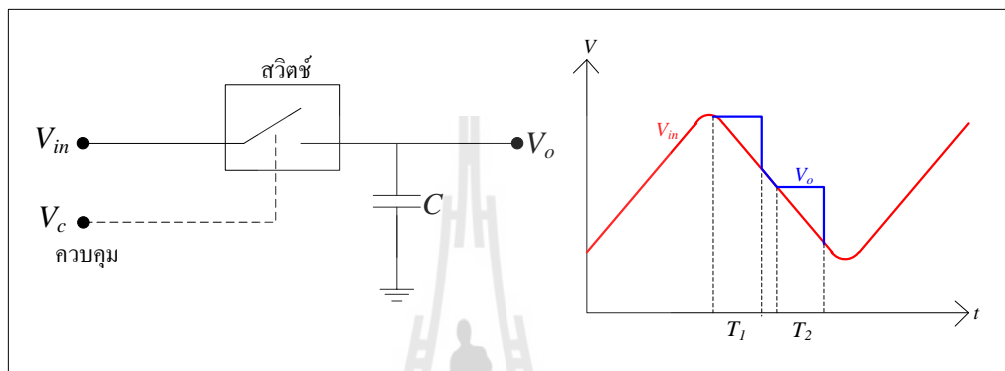
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และแรงดันแบตเตอรี่

จากการทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอนของวงจรตรวจจับแรงดัน จะเห็นได้ว่าเป็นค่าอัตราส่วนที่เท่ากัน เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงต่อไป โดยค่าแรงดันเปิดวงจรที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันจะนำค่าแรงดันเปิดวงจรไปป้อนให้กับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ และค่าแรงดันแบตเตอรี่ที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันจะนำค่าแรงดันแบตเตอรี่ไปป้อนให้วงจรคูณสัญญาณ

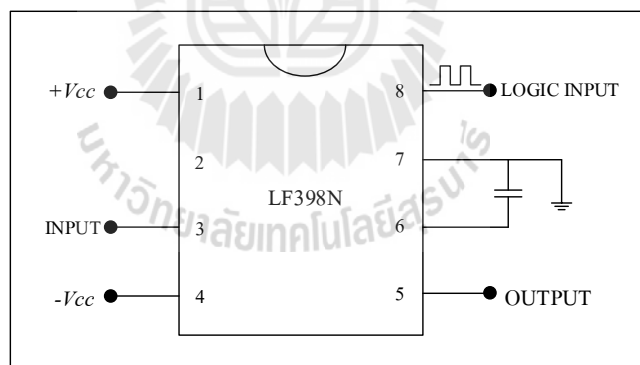
4.4.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ทำหน้าที่สุ่มสัญญาณอินพุตและนำสัญญาณที่สุ่มได้นั้นมาเก็บไว้ในช่วงเวลาหนึ่ง หรือเรียกว่าการคงค่าสัญญาณ โดยใช้การเก็บประจุแรงดันนั้นไว้ในตัวเก็บประจุ วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะทำการสุ่มสัญญาณเป็นระยะ ๆ คงที่โดยอาศัยการ

กำหนดเวลาในการสุ่มและการคงค่าด้วยการป้อนสัญญาณพัลส์ที่ตัวควบคุม (V_c) ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งสัญญาณพัลส์จะไปทรiggerสวิทช์ เมื่อสวิทช์ปิดวงจรจะทำหน้าที่สุ่มสัญญาณ ณ เวลานั้น และเมื่อสวิทช์เปิดวงจรจะทำหน้าที่คงค่าสัญญาณไว้โดยเก็บประจุแรงดันไว้ในตัวเก็บประจุ วงจรจะทำการสุ่มและคงค่าสัญญาณเป็นระยะ ๆ ตามสัญญาณพัลส์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้ไอซีเบอร์ LF398 ดังรูปที่ 4.19 ในการสุ่มและคงค่าสัญญาณ



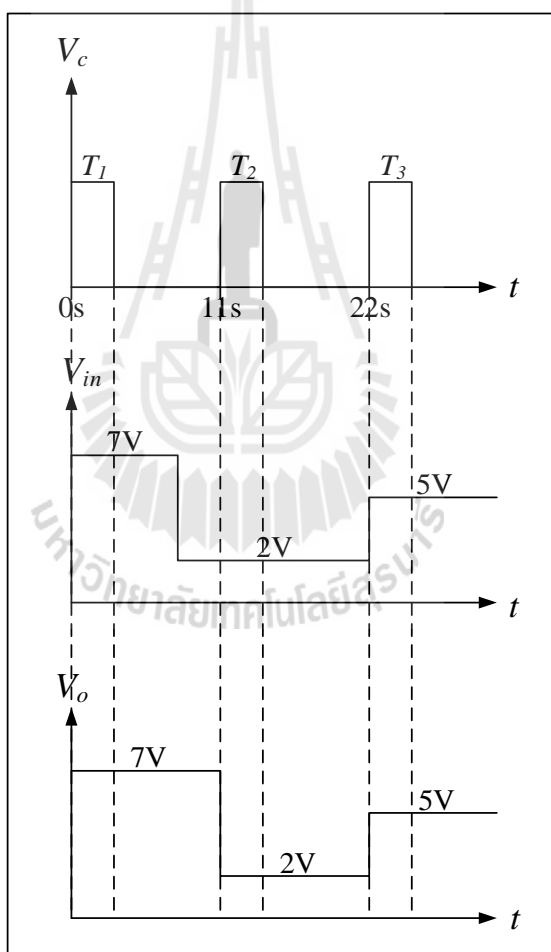
รูปที่ 4.18 โครงสร้างและการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ



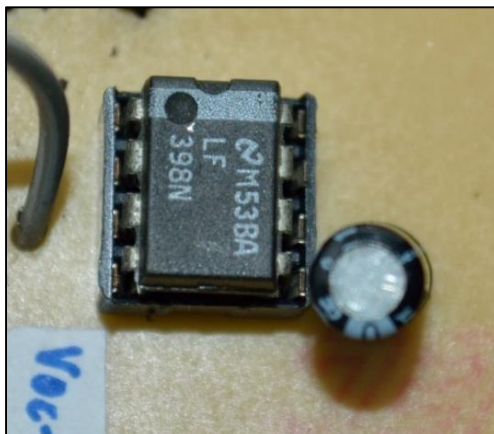
รูปที่ 4.19 ไอซีเบอร์ LF398

การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะอาศัยวงจรตั้งเวลาในการกำหนดช่วงเวลาทำงาน ซึ่งจะป้อนสัญญาณพัลส์จากวงจรตั้งเวลาให้กับขา 8 ของไอซีดังรูปที่ 4.19 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดังรูปที่ 4.20 จากรูปพบว่าเมื่อสัญญาณพัลส์ที่ตัวควบคุม V_c ที่เวลา T_1 เป็นลอจิก "High" วงจรจะทำการสุ่มค่า ซึ่งค่าแรงดันอินพุต V_{in} ของไอซีที่เวลา T_1 มีค่าเท่ากับ 7 V ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุต V_o ของ

ไอซีจะมีค่าเท่ากับ 7 V และมีการคงค่าแรงดันไว้เป็นเวลา 11 วินาทีโดยใช้การเก็บประจุแรงดันไว้ในตัวเก็บประจุ และเมื่อ V_c ที่เวลา T_2 เป็นลอจิก “High” อีกครั้งวงจรก็จะทำการสุ่มค่าแรงดันใหม่ ซึ่ง V_{in} ที่เวลา T_2 มีค่าเท่ากับ 2 V ดังนั้น V_o จะมีค่าเท่ากับ 2 V และมีการคงค่าแรงดันไว้จนถึง 22 วินาที จากนั้น V_c ที่เวลา T_3 เป็นลอจิก “High” วงจรก็จะทำการสุ่มค่า ซึ่ง V_{in} ที่เวลา T_3 มีค่าเท่ากับ 5 V ดังนั้น V_o จะมีค่าเท่ากับ 5 V โดยการสุ่มและคงค่าแรงดันนั้นจะขึ้นอยู่กับสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้กับไอซี การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะทำงานตรงข้ามกับสวิตช์เปิดวงจร เนื่องจากในขณะที่สวิตช์ทำการเปิดวงจร วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะทำการวัดแรงดันขณะเปิดวงจรไว้ ซึ่งสามารถแสดงวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณที่นำมาใช้งานจริงดังรูปที่ 4.21

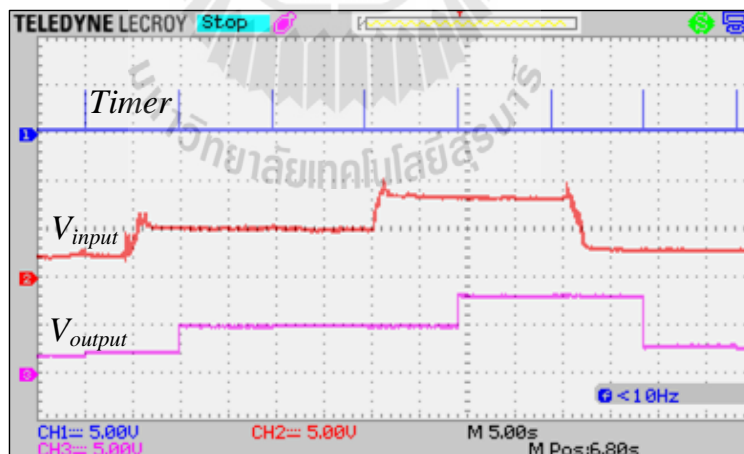


รูปที่ 4.20 การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์



รูปที่ 4.21 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

การทดสอบวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณในรูปที่ 4.21 ดำเนินการทดสอบโดยการปรับระดับของแรงดันอินพุต และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณจากวงจรตั้งเวลา ช่องสัญญาณที่ 2 คือ แรงดันอินพุต และช่องสัญญาณที่ 3 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังรูปที่ 4.22 ดังนี้



รูปที่ 4.22 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

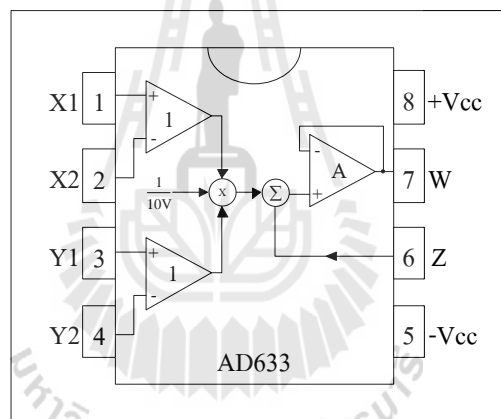
วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีอินพุตและเอาต์พุตของวงจรคือค่าแรงดันเปิดวงจร จากผลการทดสอบสุ่มและคงค่าสัญญาณในรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อสัญญาณพัลส์เป็นลอจิก “High” วงจรจะทำการสุ่มค่าแรงดันอินพุต เพื่อป้อนให้กับไอซี LF398 และ ไอซี

จะคงค่าแรงดันไว้เป็นเวลา 11 วินาที ซึ่งเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น โดยเอาต์พุตของวงจร จะถูกนำไปป้อนให้กับวงจรตรวจจับแรงดันเปิดวงจร เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง V_r ตามสมการที่ (4-5)

4.4.4 วงจรคูณสัญญาณ

จากสมการที่ (4-5) คือ $V_r = \frac{V_{batt}}{0.2kV_{oc}}$ ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณหา

ค่าแรงดันอ้างอิง V_r จากสมการจะเห็นได้ว่าการคูณและหารค่า k , V_{oc} และ V_{batt} ดังนั้นการ สร้างชุดทดสอบจึงจำเป็นต้องใช้วงจรคูณสัญญาณและหารสัญญาณ (ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะ เรียกว่าวงจรคูณสัญญาณ) โดยจะประยุกต์ใช้ไอซีเบอร์ AD633 มาสร้างวงจรคูณสัญญาณ ซึ่ง โครงสร้างของไอซีเบอร์ AD633 แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 ดังนี้



รูปที่ 4.23 โครงสร้างของไอซี AD633

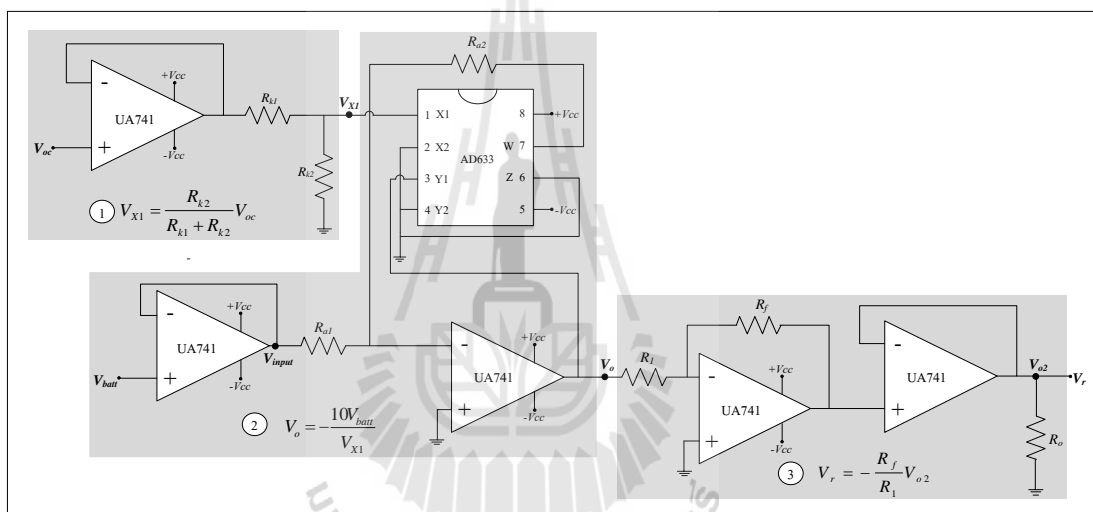
การใช้งานไอซี AD633 มีการคำนวณตามสมการที่ (4-10) ซึ่งสามารถใช้ในการ คำนวณ บวก ลบ คูณ และหาร ค่าสัญญาณต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + Z \quad (4-10)$$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ไม่ใช้การบวก และลบสัญญาณ จึงกำหนดให้ขา X_2 , Y_2 และ Z ของไอซี AD633 มีค่าแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 V โดยการต่อเข้ากับกราวด์ ดังนั้นแทนค่า $X_2 = Y_2 = Z = 0$ ลงในสมการที่ (4-10) จะได้ดังสมการที่ (4-11)

$$W = \frac{X_1 Y_1}{10} \tag{4-11}$$

จากสมการที่ (4-5) พบว่ามีการหารสัญญาณระหว่าง ค่า V_{batt} และ kV_{oc} ดังนั้นจากสมการที่ (4-11) เมื่อเปรียบเทียบกับค่า V_r ในสมการที่ (4-5) จะได้ $X_1 = kV_{oc}$, $W = V_{batt}$ และ $Y_1 = V_r$ จากการพิจารณาดังกล่าวจะได้ลักษณะของวงจร โครงสร้างวงจรคุณสมบัติสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 โดยประยุกต์ใช้ไอซี AD633 ไอซี UA741 และวงจรบัฟเฟอร์หรือวงจรกันชนซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 1 มาต่อใช้งานร่วมกัน โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรต่าง ๆ ออกเป็น 3 ส่วนแสดงดังหมายเลขในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 โครงสร้างวงจรคุณสมบัติสัญญาณ โดยใช้ ไอซี AD633 และ ไอซี UA741

จากรูปที่ 4.24 พิจารณาส่วนหมายเลข 2 ค่ากระแสที่ไหลผ่านไอซี AD633 โดยอาศัยคุณสมบัติการป้อนเข้าทางอินพุตของออปแอมป์ จะได้ค่ากระแสดังสมการที่ (4-12)

$$I_{R_{a1}} = I_{R_{a2}} \tag{4-12}$$

สามารถคำนวณหาค่าของกระแสได้ดังสมการที่ (4-13) ดังนี้

$$I_{R_{a1}} = I_{R_{a2}} \cong \frac{V_{input}}{R_{a1}} \tag{4-13}$$

โดยวงจรคูณสัญญาณ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะกำหนดให้ $R_{a1} = R_{a2} = 10k\Omega$ ดังนั้นจะทำให้ค่าแรงดันทางคานเอาต์พุตที่ขา W ของไอซี AD633 มีค่าแรงดันเอาต์พุต (V_w) ดังสมการที่ (4-14)

$$V_w = -V_{input} \quad (4-14)$$

จากสมการที่ (4-11) แทนค่าลงในสมการที่ (4-14) จะได้

$$V_w = -V_{input} = \frac{V_{x1}V_{y1}}{10} \quad (4-15)$$

จากวงจรในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่า $V_{y1} = V_o$ แทนค่าลงในสมการที่ (4-15) และทำการจัดรูปสมการให้เป็นสมการของวงจรรหารสัญญาณจะได้ดังสมการที่ (4-16) ดังนี้

$$\begin{aligned} -V_{input} &= \frac{(V_{x1})(V_o)}{10} \\ V_o &= -\frac{10V_{input}}{V_{x1}} \end{aligned} \quad (4-16)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4-16) จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรหารสัญญาณ ซึ่งจากรูปที่ 4.23 ในส่วนหมายเลข 1 จะเห็นได้ว่า

$$V_{x1} = \frac{R_{k2}}{R_{k1} + R_{k2}} V_{oc} \quad (4-17)$$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะกำหนดค่า k หรือค่าอัตราส่วนคงที่ในสมการที่ (4-1) สามารถหาได้ดังสมการที่ (4-18)

$$k = \frac{R_{k2}}{R_{k1} + R_{k2}} \quad (4-18)$$

ดังนั้นแทนค่า k ลงในสมการที่ (4-17) จะได้

$$V_{x1} = kV_{oc} \quad (4-19)$$

แทนค่า V_{x1} จากสมการที่ (4-19) และกำหนดให้ $V_{input} = V_{batt}$ แทนค่าลงในสมการที่ (4-16) จะได้

$$V_o = -\frac{10V_{batt}}{kV_{oc}} \quad (4-20)$$

จากรูปที่ 4.23 ในส่วนหมายเลข 3 จะเห็นได้ว่าใช้วงจรออปแอมป์แบบอินเวอร์ตติ้ง ซึ่งแรงดันเอาต์พุตมีค่าดังสมการที่ (4-21)

$$V_{O2} = -\frac{R_f}{R_1} V_o \quad (4-21)$$

โดยวงจรวงจรรออปแอมป์แบบอินเวอร์ตติ้ง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะกำหนดให้ $R_f = 1k\Omega$ และ $R_1 = 2k\Omega$ ดังนั้นจะทำให้ค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$V_{O2} = -\frac{1k\Omega}{2k\Omega} V_o = -0.5V_o \quad (4-22)$$

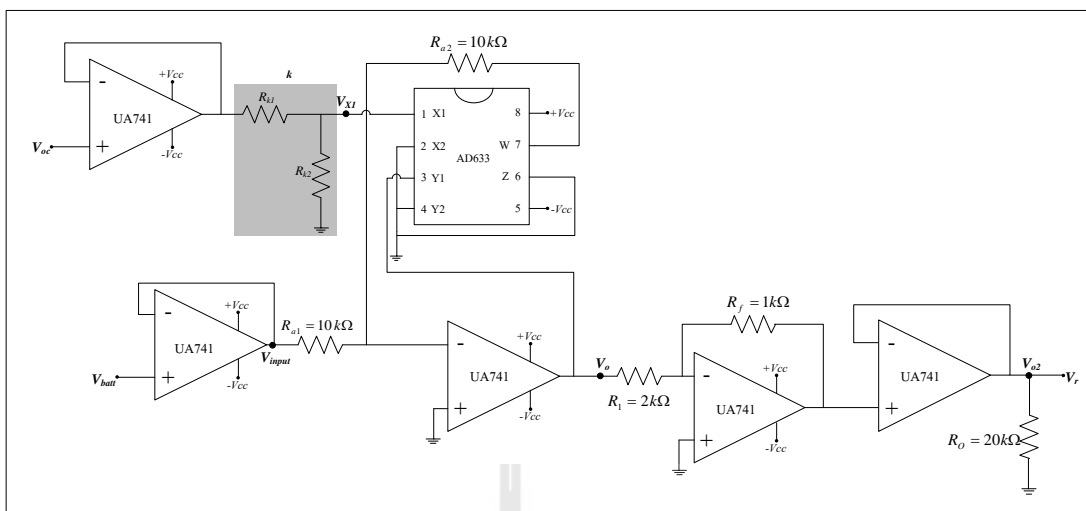
จากนั้นแทนค่า V_o จากสมการที่ (4-20) ลงในสมการที่ (4-22) จะได้

$$V_r = V_{O2} = -0.5 \times -\frac{10V_{batt}}{kV_{oc}} \quad (4-23)$$

ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรคุณสัญญาณ (V_r) ดังสมการที่ (4-24) ดังนี้

$$V_r = \frac{V_{batt}}{0.2kV_{oc}} \quad (4-24)$$

ซึ่งสามารถแสดงวงจรคุณสัญญาณที่ได้จากการออกแบบพร้อมระบุค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 4.25 และวงจรคุณสัญญาณที่สร้างใช้งานจริงดังรูปที่ 4.26

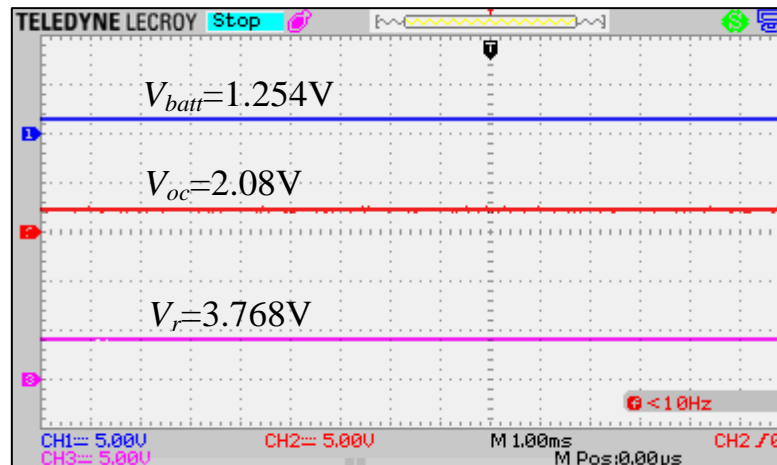


รูปที่ 4.25 วงจรคุณสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ

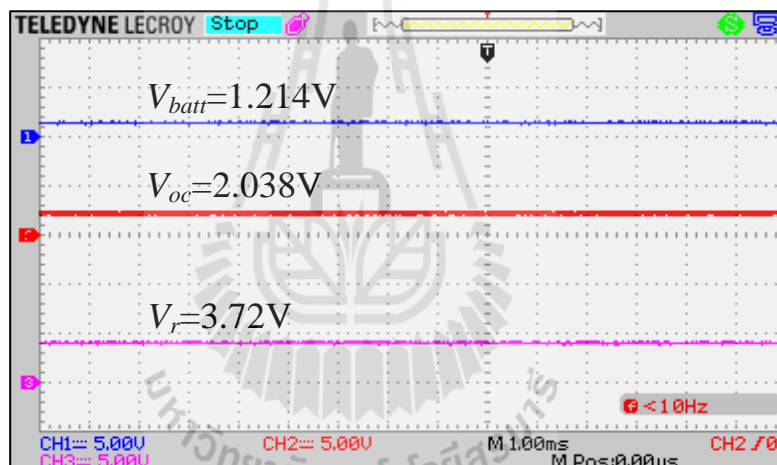


รูปที่ 4.26 วงจรคุณและการสัญญาณที่ใช้งานจริง

การทดสอบวงจรคุณสัญญาณในรูปที่ 4.26 ได้ดำเนินการทดสอบโดยเลือกใช้ค่าตัวต้านทานตามที่ออกแบบไว้ข้างต้น และกำหนดให้ค่า $k = 0.80$ จากนั้นทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรคุณสัญญาณ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุต โดยรูปที่ 4.27 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรคุณสัญญาณเมื่อ $V_{batt} = 1.254V$ และ $V_{oc} = 2.08V$ และรูปที่ 4.28 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรคุณสัญญาณเมื่อ $V_{batt} = 1.214V$ และ $V_{oc} = 2.038V$



รูปที่ 4.27 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรคูณสัญญาณเมื่อ $V_{batt} = 1.254V$ และ $V_{oc} = 2.08V$



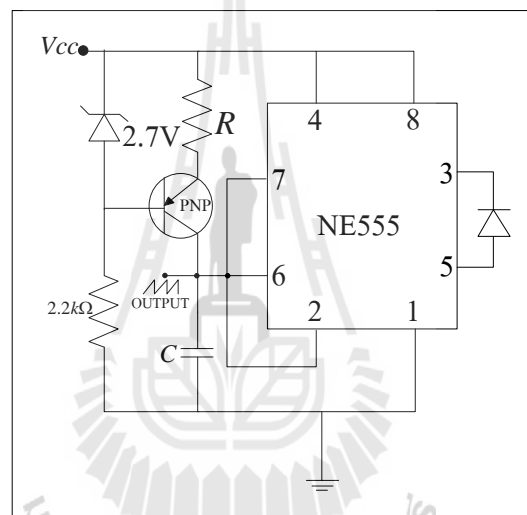
รูปที่ 4.28 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรคูณสัญญาณเมื่อ $V_{batt} = 1.214V$ และ $V_{oc} = 2.038V$

จากรูปที่ 4.27 เมื่อ $k = 0.8$, $V_{batt} = 1.254V$ และ $V_{oc} = 2.08V$ พบว่าสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรคูณสัญญาณ $V_r = 3.768V$ โดยค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นั้นเป็นไปตามสมการที่ (4.24) คือ $V_r = \frac{V_{batt}}{0.2kV_{oc}} = \frac{1.254}{0.2 \times 0.8 \times 2.08} = 3.768$ และรูปที่ 4.28 เมื่อ $k = 0.8$, $V_{batt} = 1.214V$ และ $V_{oc} = 2.038V$ จะได้ $V_r = 3.72V$ ซึ่งถ้าคำนวณตามสมการที่ (4.24) จะได้ค่า $V_r = 3.723$ จากผลการทดสอบวงจรคูณสัญญาณจะเห็นว่าค่าสัญญาณเอาต์พุตเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น

4.4.5 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณในหัวข้อนี้จะประกอบไปด้วยการสร้างวงจรสัญญาณฟันเลื่อยและการสร้างวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำค่าแรงดันอ้างอิง V_r (หัวข้อ 4.4.4) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยโดยใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จะได้สัญญาณพัลส์ผ่านวงจรแยกโคตสัญญาณเพื่อนำไปขับสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (sawtooth) เป็นสัญญาณที่นำมาเพื่อเป็นสัญญาณที่ใช้ในการเปรียบเทียบ โดยสามารถสร้างได้จากไอซีเบอร์ NE555 ซึ่งจะมีโครงสร้างของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

จากวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในรูปที่ 4.29 ใช้ไอซีเบอร์ 555 นำมาสร้างเป็นวงจรในโหมดสแตเบิล ดังที่อธิบายไปในหัวข้อที่ 4.4.1 ประยุกต์ใช้งานไอซี 555 กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ซีเนอร์ไดโอด และตัวต้านทาน การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในรูปที่ 4.29 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4.25)

$$f = \frac{(V_{cc} - 2.7)}{R \times C \times V_{pp}} \quad (4-25)$$

เมื่อ V_{cc} คือ แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร (V)

V_{pp} คือ ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต (V)

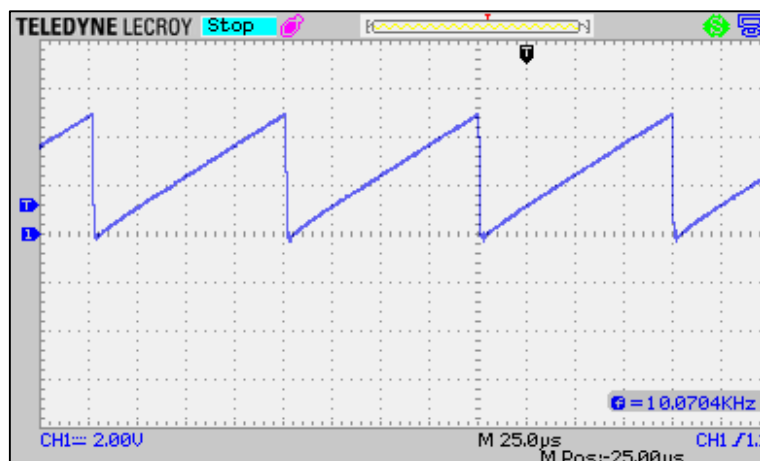
- f คือ ค่าความถี่ในการออกแบบ (Hz)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (F)
 R คือ ตัวต้านทาน (Ω)

การออกแบบสัญญาณพื่นเลื่อยที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้มีค่าความถี่ของสัญญาณเท่ากับ $10kHz$ ไฟเลี้ยงของวงจร (V_{cc}) เท่ากับ $8V$ ดังนั้น ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเลื่อย (V_{pp}) มีค่าเท่ากับ $5V$ และการออกแบบจะกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุในวงจรมีค่าเท่ากับ $0.01 \mu F$ ดังนั้น การคำนวณหาค่าตัวต้านทานจะพิจารณาจากสมการที่ (4.24) ดังนั้นเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรตามที่ได้กำหนดไว้ในเบื้องต้นลงในสมการดังกล่าว จะได้ค่าตัวต้านทาน $R = 9.9k\Omega$ โดยในวงจรใช้งานจริงจะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งสามารถแสดงวงจรสร้างสัญญาณพื่นเลื่อยที่นำมาใช้งานจริงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 วงจรสร้างสัญญาณพื่นเลื่อยที่ใช้งานจริง

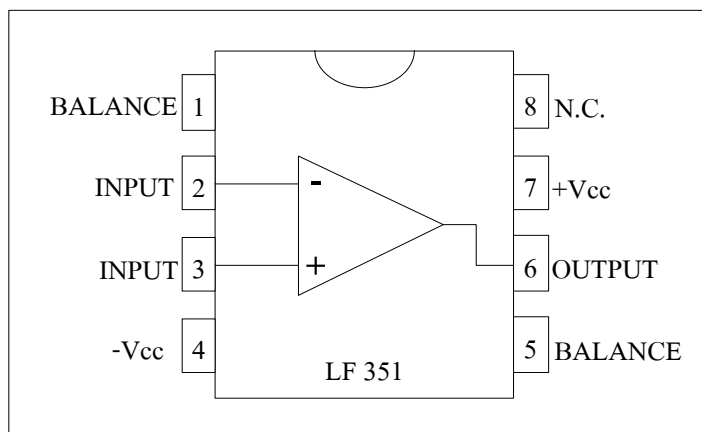
การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณพื่นเลื่อยในรูปที่ 4.30 ได้ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ $8V$ ตามที่ออกแบบไว้ และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเลื่อย ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณพื่นเลื่อยได้ดังรูปที่ 4.31 ดังนี้



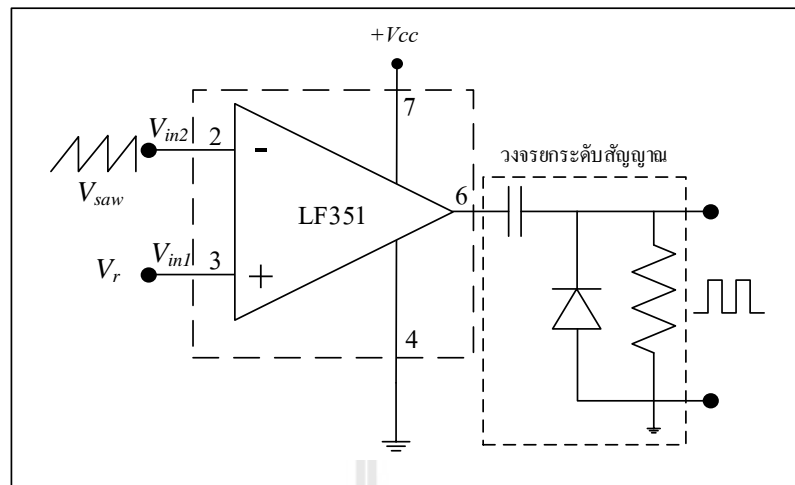
รูปที่ 4.31 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

จากผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในรูปที่ 4.31 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีขนาดของแอมพลิจูดเท่ากับ 5 V และมีค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 10kHz ซึ่งเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบสัญญาณแรงดันของอินพุตหนึ่งเทียบกับสัญญาณแรงดันของอีกอินพุตหนึ่ง โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะตามความแตกต่างของสัญญาณอินพุต ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ไอซีเบอร์ LF351 ดังรูปที่ 4.32 เป็นอุปกรณ์ในการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยมีโครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 ไอซีเบอร์ LF351



รูปที่ 4.33 โครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

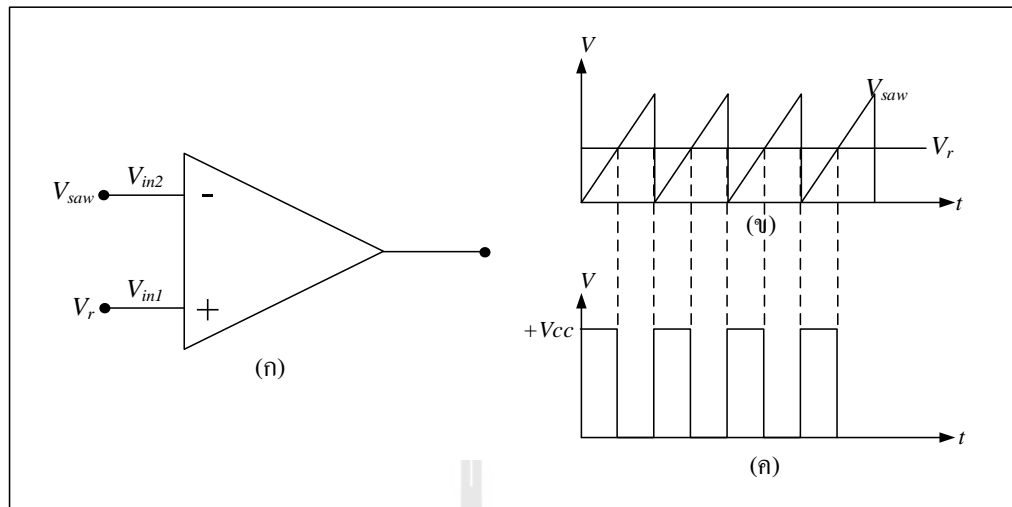
จากรูปที่ 4.33 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (4-26)

$$V_{out} = (V_{in1} - V_{in2}) \quad (4-26)$$

โดยที่ V_{in1} คือ แรงดันอินพุตที่ 1
 V_{in2} คือ แรงดันอินพุตที่ 2
 V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (4-26) พบว่า ถ้า V_{in1} มีค่ามากกว่า V_{in2} ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นบวก และถ้า V_{in1} มีค่าน้อยกว่า V_{in2} ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นศูนย์ โดยทางปฏิบัติแล้วค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะถูกจำกัดด้วยไฟเลี้ยงของออปแอมป์ (V_{cc}) ซึ่งจะพบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณมีสภาวะการทำงาน 2 สภาวะ คือ สภาวะที่ 1 $V_{out} = +V_{cc}$ เมื่อ $V_{in1} > V_{in2}$ และ สภาวะที่ 2 $V_{out} = 0$ เมื่อ $V_{in1} < V_{in2}$

จากการทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณตามที่ได้กล่าวมาเบื้องต้น กำหนดให้ V_r เป็นสัญญาณที่ใช้ในการอ้างอิง (reference signal) ในส่วนของสัญญาณสามเหลี่ยม V_{saw} เป็นสัญญาณพาหะ (carrier signal) โดยให้แรงดันอ้างอิงจ่ายเข้าที่ขาอินอินเวอร์ต (+) และสัญญาณพาหะจ่ายเข้าที่ขาอินเวอร์ต (-) ของออปแอมป์ ซึ่งมีลักษณะของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังรูปที่ 4.34 (ก) และมีลักษณะการเปรียบเทียบกันของสัญญาณดังรูปที่ 4.34 (ข) ซึ่งทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังรูปที่ 4.34 (ค) ดังนี้



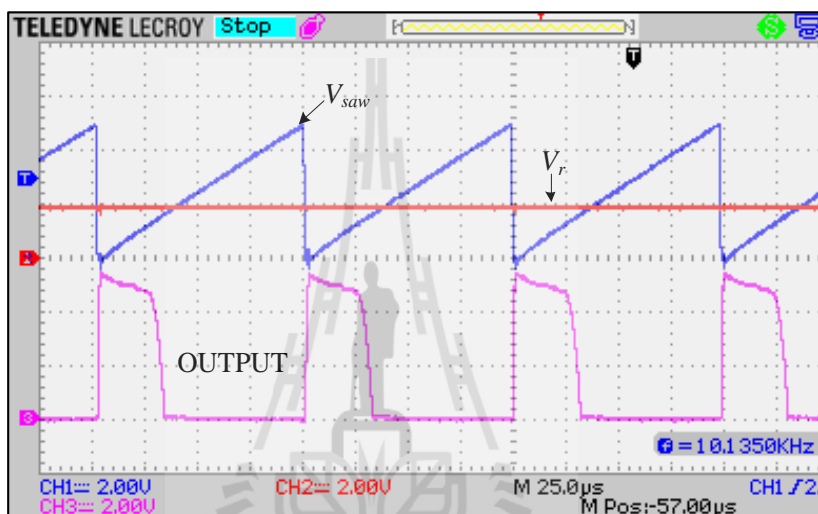
รูปที่ 4.34 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากรูปที่ 4.34 (ข) จะเห็นได้ว่าถ้า V_r มีค่ามากกว่า V_{saw} ส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณในรูปที่ 4.34 (ค) จะมีค่าเป็นบวกหรือ $V_{out} = +V_{cc}$ และรูปที่ 4.34 (ข) ถ้า V_r มีค่าน้อยกว่า V_{saw} ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณในรูปที่ 4.34 (ค) จะมีค่าเป็นศูนย์หรือ $V_{out} = 0$ โดยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่นำมาสร้างใช้งานจริงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.35

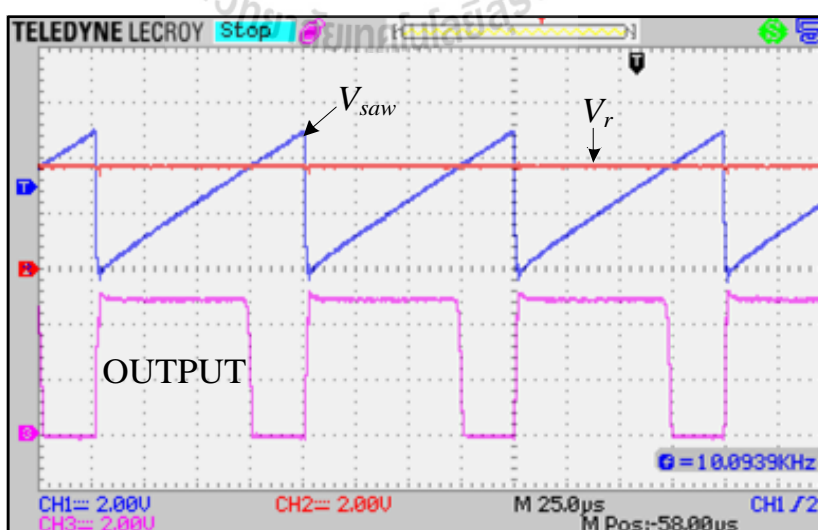


รูปที่ 4.35 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริง

การทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะใช้วงจรตามรูปที่ 4.35 ทำการทดสอบโดยการจ่ายแรงดันอ้างอิง (V_r) และสัญญาณฟันเลื่อย (V_{saw}) ดำเนินการทดสอบโดยการปรับระดับของแรงดันอ้างอิง และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณฟันเลื่อย ช่องสัญญาณที่ 2 คือ แรงดันอ้างอิง และช่องสัญญาณที่ 3 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอ้างอิง ได้ดังรูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.37 ดังนี้



รูปที่ 4.36 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ กรณีที่ 1

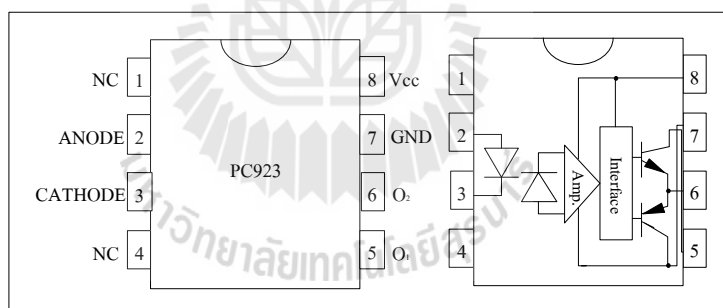


รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ กรณีที่ 2

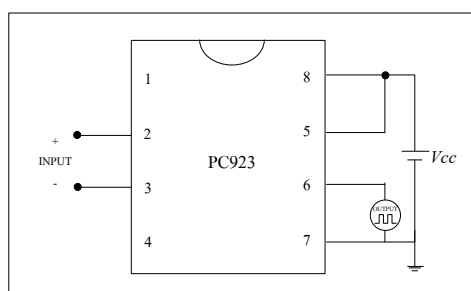
จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณในรูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.37 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอ้างอิง พบว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้เป็นไปตามที่ได้มีการอธิบายการทำงานไว้ในเบื้องต้น ซึ่งเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะนำไปขับสวิทช์ของวงจรบัคค์โดยก่อนนำไปขับสวิทช์จะต้องผ่านวงจรแยกโคคสัญญาณ ดังอธิบายในหัวข้อต่อไป

4.4.6 วงจรแยกโคคสัญญาณ

วงจรแยกโคคสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้สำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณใด ๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ โดยวงจรแยกโคคสัญญาณจะใช้ในการแยกกราวด์ระหว่างวงจรแปลงผันแบบบัคค์และวงจรจุดชนวนเกทเพื่อป้องกันการลัดวงจรจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์เข้าสู่วงจรจุดชนวนเกท ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงหรือที่เรียกว่า ออปโตคัปปลิง (opto-coupling) ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานคือ ไอซี PC923 ยี่ห้อ SHARP และมีโครงสร้างของวงจรที่ใช้งานดังรูปที่ 4.38 และการต่อวงจรไอซี PC923 เพื่อนำไปใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.39

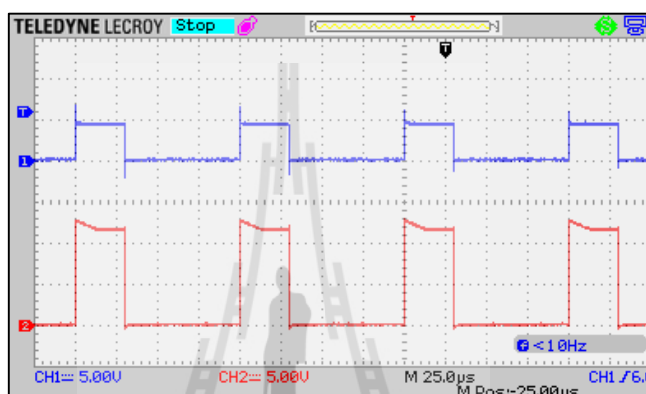


รูปที่ 4.38 โครงสร้างของไอซี PC923

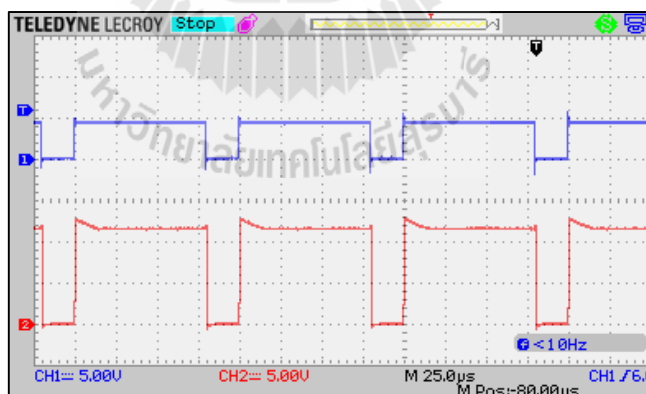


รูปที่ 4.39 การต่อวงจรไอซี PC 923 เพื่อนำไปใช้งานจริง

การทดสอบวงจรแยกโคคสัญญาณ ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ 12 V ซึ่งจะทดสอบการจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณพัลส์ และวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจร ทำการทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 สัญญาณอินพุตรูปพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 30 % และกรณีที่ 2 สัญญาณอินพุตรูปพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 80 % สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41 ตามลำดับ โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตของวงจรแยกโคคสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกโคคสัญญาณ



รูปที่ 4.40 ผลการทดสอบวงจรแยกโคคสัญญาณกรณีที่ 1 ความกว้างพัลส์ 30 %



รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบวงจรแยกโคคสัญญาณกรณีที่ 2 ความกว้างพัลส์ 80 %

จากผลการทดสอบวงจรแยกโคคสัญญาณ ในรูปที่ 4.40 และ 4.41 จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตของวงจรมีสัญญาณพัลส์ที่เหมือนกับค่าสัญญาณอินพุต ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ในการแยกกราวด์ระหว่างวงจรแปลงผันแบบบัคค์และวงจรจุดชนวนเกทเพื่อป้องกันการลัดวงจรจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์เข้าสู่วงจรจุดชนวนเกท

4.4.7 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ (อธิบายวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในหัวข้อ 3.4) โดยวงจรดังกล่าวจะประกอบด้วย สวิตช์ในงานวิจัย จะใช้ MOSFET ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดยการออกแบบอุปกรณ์แต่ละตัวในวงจร จะต้องคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแส เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในวงจร

ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หรือวงจรกรองแบบ LC เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ การเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่าแรงดันพลิว (ripple voltage) และค่ากระแสพลิว (ripple current) อยู่ในระดับที่เหมาะสมและยอมรับได้ สามารถออกแบบค่าตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (4-27) และออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (4-28) (Muhammad H. Rashid) ดังนี้

$$C = \frac{(1-d)V_{out}}{8Lf_s^2 \Delta V_{out}} \quad (4-27)$$

$$L = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{f_s V_{in} \Delta I_L} \quad (4-28)$$

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์คือค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{pv}) และเอาต์พุตคือค่าแรงดันของแบตเตอรี่ (V_{batt}) โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ดังนี้

$$V_{in} = V_{pv, \max} = 43V$$

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

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

$$I_{o, \max} = 5A$$

$$\Delta V_{out} < 1mV$$

$$\Delta I_L < 0.07A$$

$$f_s = 10kHz$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวการออกแบบมีรายละเอียดดังนี้ สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ ต้องคำนึงถึงแรงดันพลีวของแรงดันตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลีวของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยพิจารณาจากสมการที่ (4-27) และ (4-28) ดังนั้นจะสามารถออกแบบได้ดังนี้

$$L = \frac{13.8(43-13.8)}{10 \times 10^3 \times 43 \times 0.07} = 13.89 \text{ mH}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 15.00 mH

จากสมการที่ (3-4) $V_{out} = dV_{in}$ ถ้า $V_{in} = 43 \text{ V}$ และ $V_{out} = V_{out, \max} = 13.8 \text{ V}$ จะได้ $d = 0.32$ แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ

$$C = \frac{(1-0.32)13.8}{8 \times 15 \times 10^{-3} \times (10 \times 10^3)^2 \times 1 \times 10^{-3}} = 782 \mu\text{F}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $1000 \mu\text{F}$

ดังนั้น พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และแสดงวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่นำมาสร้างใช้งานจริงได้ดังรูปที่ 4.42

ตารางที่ 4.4 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

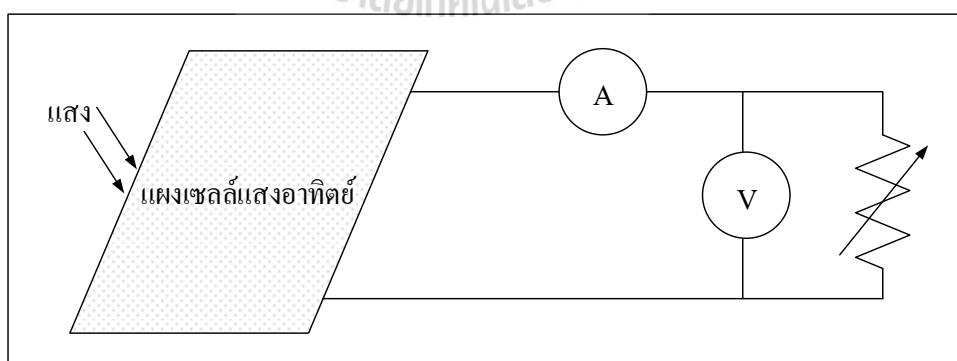
อุปกรณ์	พิกัด	รายละเอียด
1. มอสเฟต (MOSFET)	60 V, 50 A	N-Channel MOSFET เบอร์ F50N06
2. ไดโอด	6 A	Diode เบอร์ 6A6
3. ตัวเหนี่ยวนำ 15 mH	60 V, 5 A	DC Choke
4. ตัวเก็บประจุ $1000 \mu\text{F}$	60 V	Electrolytic Capacitor
5. ไดโอด	60 V, 5 A	Feedback Diode



รูปที่ 4.42 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้งานจริง

4.5 การทดสอบค่าอัตราส่วนคงที่

จากที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคงที่หรือค่า k ในสมการที่ (4-1) โดยทั่วไป ถ้าใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000 W/m^2 และ อุณหภูมิ 25°C ค่า k จะมีค่าอยู่ในช่วง $0.71 - 0.78$ ซึ่งถ้านำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ จะพบว่า ความเข้มแสงและอุณหภูมิ ไม่ใช่ค่าในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นเพื่อให้การตามรอยจุดกำลังสูงสุด ด้วยวิธี VOC มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นจึงจำเป็นต้องหาค่า k เฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จึงดำเนินการทดสอบหากราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดง ได้ดังรูปที่ 4.43 โดยใช้แสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 4.44

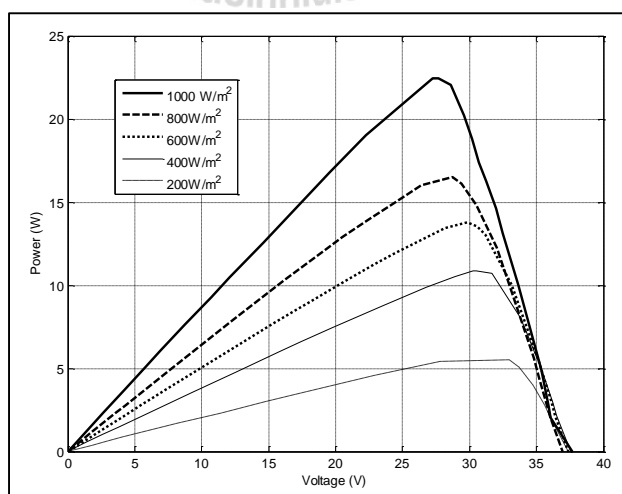


รูปที่ 4.43 การทดสอบหากราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.44 แสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 4.43 ดำเนินการทดสอบ โดยให้ความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เริ่มจากวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ไม่มีการต่อโหลด จากนั้นให้เซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสโดยการปรับค่าความต้านทานค่ามากจนถึงค่าน้อย จนเกิดค่ากระแสสูงสุดในสภาวะลัดวงจร นำข้อมูลจากการทดสอบมาสร้างเป็นกราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 4.45 สำหรับการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำได้ด้วยการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีผลต่อความเข้มแสงของหลอดไฟหรือมีผลต่อความเข้มแสงของแสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.45 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์

จากกราฟรูปที่ 4.45 เป็นกราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ (ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังตารางที่ 4.1) จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ $39.5 \text{ }^\circ\text{C}$ กำลังสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.46 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากำลังสูงสุดจะต้องมีค่าเท่ากับ 40 วัตต์ (ที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000 W/m^2 และ อุณหภูมิ 25°C) แต่เนื่องจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแสงอาทิตย์เทียม ผู้วิจัยจะสนใจเฉพาะความเข้มแสงเท่านั้น และไม่สนใจอุณหภูมิและความร้อนที่เกิดจากหลอดไฟ ดังนั้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิของแผงมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในสภาวะมาตรฐาน ทำให้การทดสอบด้วยแสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการไม่ได้อยู่ภายใต้สภาวะมาตรฐาน ส่งผลให้กราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 40 วัตต์เป็นไปดังกราฟในรูปที่ 4.45 โดยการหาค่า k เฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ผลการทดสอบในรูปที่ 4.45 ซึ่งผู้วิจัยจะหาค่า k ที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวที่ครอบคลุมทุก ๆ สภาวะความเข้มแสง ซึ่งจะดำเนินการทดสอบชุดทดสอบวิธี VOC ในรูปที่ 4.6 โดยการเปลี่ยนแปลงค่า k ตั้งแต่ 0.70 – 0.85 ซึ่งค่า k ในชุดทดสอบจริงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเปลี่ยนค่า R_{k1} และ R_{k2} ของวงจรคุณลักษณะดังสมการที่ (4-18) จากนั้นดูผลการทดสอบและค่า P_{pv} จากการเปลี่ยนค่า k ผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า k แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า k

k	ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)
0.70	200	22.9	0.199	4.557
	600	22.88	0.492	11.25
	1000	19.54	0.861	16.82
0.75	200	27.78	0.195	5.417
	600	24.5	0.487	11.93
	1000	22.29	0.853	19.01
0.80	200	27.64	0.253	6.993
	600	27.81	0.548	15.240
	1000	28.32	0.756	21.409
0.85	200	33.2	0.162	5.378
	600	33.12	0.303	10.03
	1000	30.23	0.621	18.77

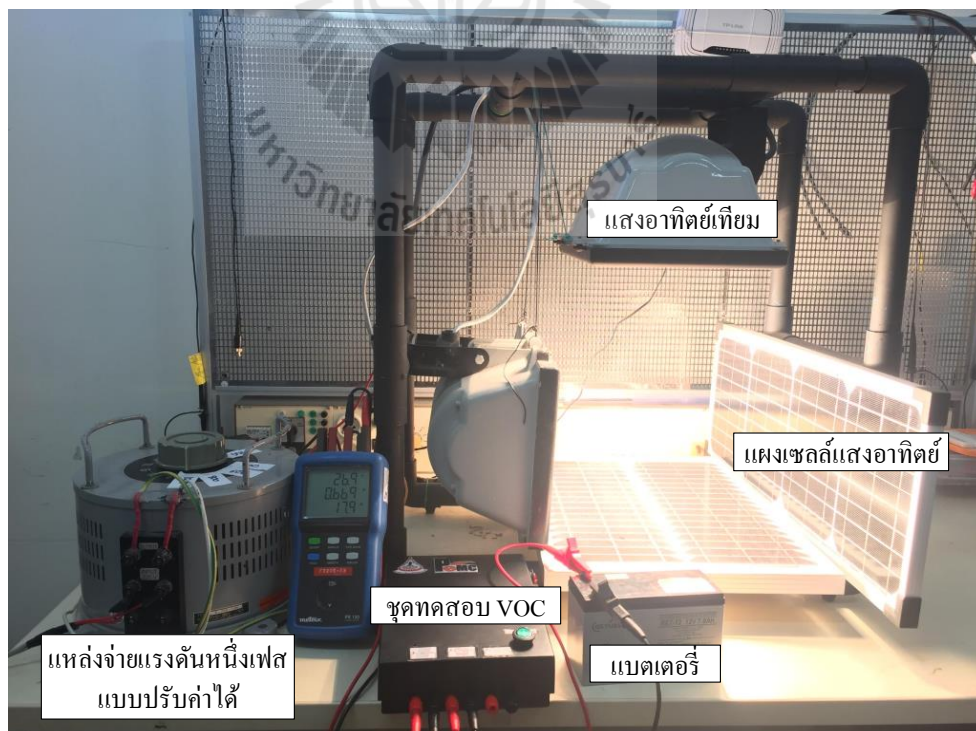
จากตารางที่ 4.5 ผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า k จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบพบว่าที่ค่า $k = 0.8$ จะทำให้ค่า P_{pv} มีค่ามากที่สุดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ที่ทำการทดสอบ โดยเมื่อความเข้มแสง 200 W/m^2 P_{pv} มีค่าเท่ากับ 6.993 W เมื่อความเข้มแสง 600 W/m^2 P_{pv} มีค่าเท่ากับ 15.240 W และเมื่อความเข้มแสง 1000 W/m^2 P_{pv} มีค่าเท่ากับ 21.409 W ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้ค่า $k = 0.8$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว ที่ครอบคลุมในทุก ๆ สภาวะความเข้มแสง

4.6 ผลการทดสอบชุดทดสอบ VOC

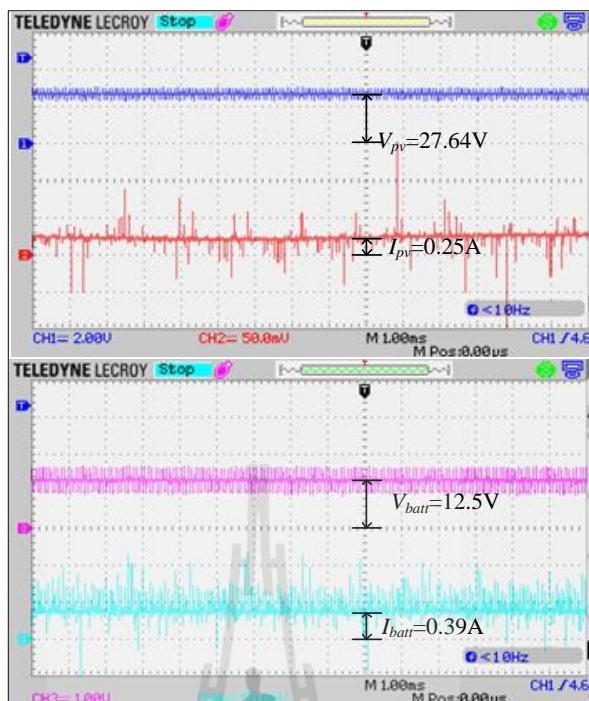
การทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ดำเนินการทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์เทียมที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.46 โดยทำการปรับความเข้มแสง สามารถทำได้ด้วยการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีผลต่อความเข้มแสงของหลอดไฟหรือมีผลต่อความเข้มแสงของแสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ จากนั้นส่องแสงอาทิตย์เทียมให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และใช้เครื่องมือวัดความเข้มแสง (lux meter) ดังรูปที่ 4.46 โดยสามารถวัดค่าความเข้มแสงได้ในหน่วยของ lux ซึ่ง 100 lux มีค่าเท่ากับ 1 W/m^2 เช่น ถ้าวัดค่าความเข้มแสงได้ $100,000 \text{ lux}$ ดังนั้นความเข้มแสงในหน่วย W/m^2 มีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 เป็นต้น การทดสอบชุดทดสอบอินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนเอาต์พุตของชุดทดสอบคือแบตเตอรี่ โดยการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC แสดงได้ดังรูปที่ 4.47 (คู่มือการใช้งานชุดซาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจรแสดงในภาคผนวก ง1.) และผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.52 โดยช่องสัญญาณที่ 1, 2 คือ สัญญาณแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามลำดับ และช่องสัญญาณที่ 3, 4 คือ สัญญาณแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.52 เป็นรูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 200 W/m^2 400 W/m^2 600 W/m^2 800 W/m^2 และ 1000 W/m^2 ตามลำดับ และผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC แสดงได้ดังตารางที่ 4.6



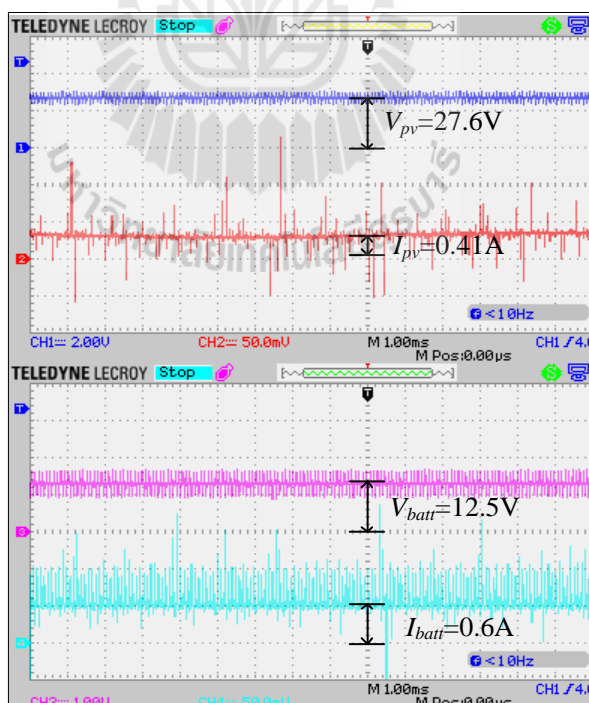
รูปที่ 4.46 เครื่องมือวัดความเข้มแสง หรือ lux meter



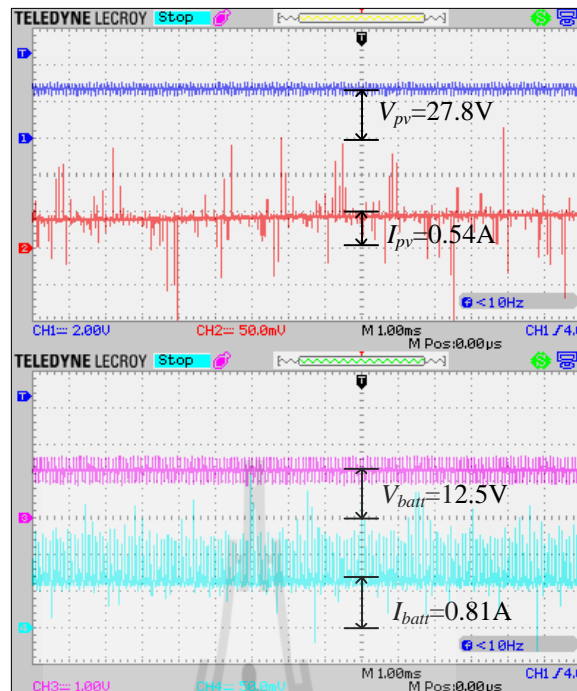
รูปที่ 4.47 การทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC



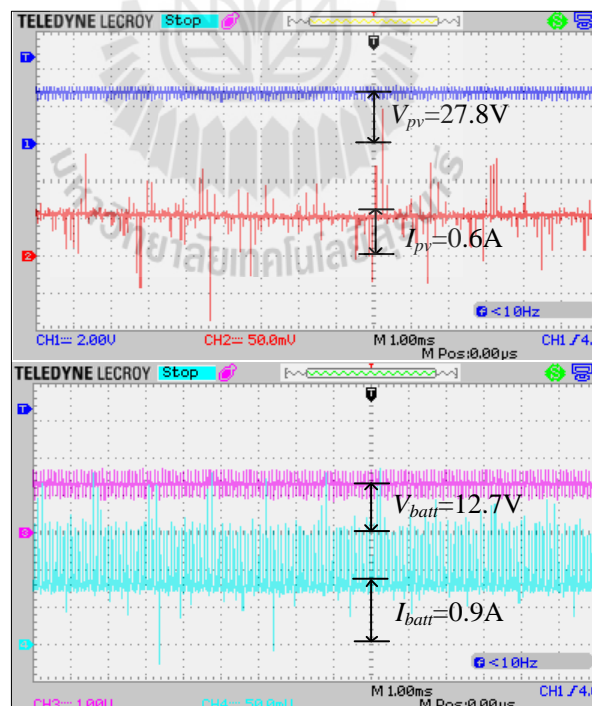
รูปที่ 4.48 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 200 W/m^2 อุณหภูมิ 36.5°C



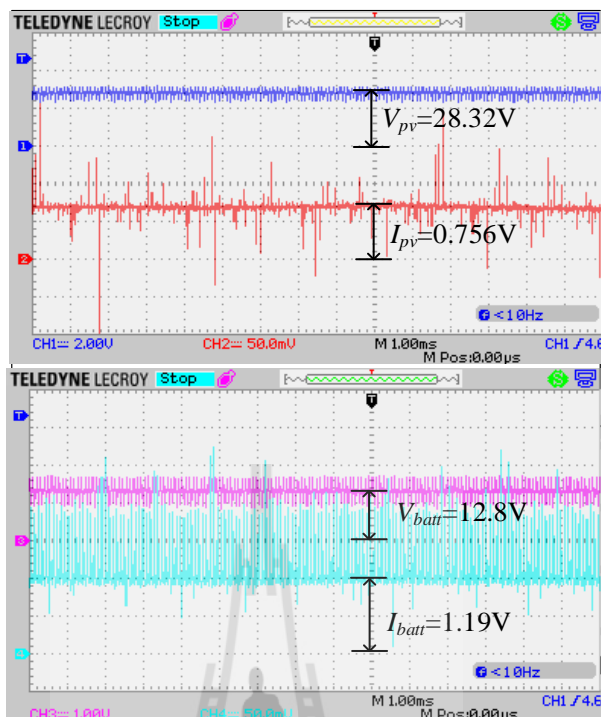
รูปที่ 4.49 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2 อุณหภูมิ 36.7°C



รูปที่ 4.50 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 600 W/m^2 อุณหภูมิ 38°C



รูปที่ 4.51 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 800 W/m^2 อุณหภูมิ 38.5°C



รูปที่ 4.52 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 39.5°C

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC

ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	27.64	0.253	6.993	12.5	0.39	4.845
400	27.65	0.414	11.447	12.54	0.639	8.013
600	27.81	0.548	15.240	12.55	0.818	10.266
800	27.83	0.664	18.479	12.7	0.915	11.621
1000	28.32	0.756	21.409	12.85	1.195	15.356

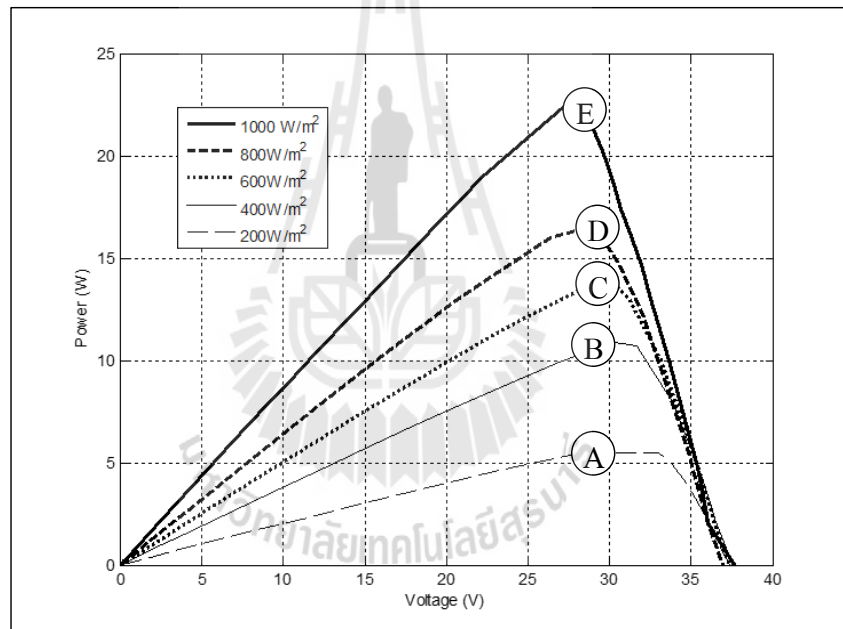
จากผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ในตารางที่ 4.6 และรูปสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.52 นำมาสร้างเป็นแผนภาพการดึงกำลังสูงสุดที่สภาวะความเข้มแสงต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.7 ดังนี้

ตารางที่ 4.7 แผนภาพผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC

ความเข้มแสง (W/m^2)	แผนภาพ
200	<p> $V_{pv}=27.64V$ $I_{pv}=0.253A$ $P_{pv}=6.993W$ </p> <p>MPPT VOC</p> <p> $V_{batt}=12.5V$ $I_{batt}=0.39A$ $P_{batt}=4.875W$ </p> <p>Battery</p>
400	<p> $V_{pv}=27.65V$ $I_{pv}=0.414A$ $P_{pv}=11.447W$ </p> <p>MPPT VOC</p> <p> $V_{batt}=12.54V$ $I_{batt}=0.639A$ $P_{batt}=8.013W$ </p> <p>Battery</p>
600	<p> $V_{pv}=27.81V$ $I_{pv}=0.548A$ $P_{pv}=15.24W$ </p> <p>MPPT VOC</p> <p> $V_{batt}=12.55V$ $I_{batt}=0.818A$ $P_{batt}=10.266W$ </p> <p>Battery</p>
800	<p> $V_{pv}=27.83V$ $I_{pv}=0.664A$ $P_{pv}=18.479W$ </p> <p>MPPT VOC</p> <p> $V_{batt}=12.70V$ $I_{batt}=0.915A$ $P_{batt}=11.621W$ </p> <p>Battery</p>
1000	<p> $V_{pv}=28.32V$ $I_{pv}=0.756A$ $P_{pv}=21.409W$ </p> <p>MPPT VOC</p> <p> $V_{batt}=12.85V$ $I_{batt}=1.195A$ $P_{batt}=15.356W$ </p> <p>Battery</p>

จากผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC หรือ MPPT VOC ในตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ด้านอินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งค่า V_{pv} มีค่าใกล้เคียงแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด และค่า P_{pv} มีค่าใกล้เคียงกำลังที่จุดกำลังสูงสุด โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $200 W/m^2$ $V_{pv} = 27.64V$, $P_{pv} = 6.993W$ แสดงได้จุด A ในรูปที่ 4.53 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $400 W/m^2$ $V_{pv} = 27.65V$, $P_{pv} = 11.447W$ แสดงได้จุด B ในรูปที่ 4.53 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $600 W/m^2$ $V_{pv} = 27.81V$, $P_{pv} = 15.24W$ แสดงได้จุด C ในรูปที่

4.53 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 800 W/m^2 $V_{pv} = 27.83 \text{ V}$, $P_{pv} = 18.479 \text{ W}$ แสดงได้จุด D ในรูปที่ 4.53 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $V_{pv} = 28.32 \text{ V}$, $P_{pv} = 21.40 \text{ W}$ แสดงได้จุด E ในรูปที่ 4.53 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าแรงดันและกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงจุดกำลังสูงสุด เนื่องจากค่าอัตราส่วนคงที่ k จากที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5 ซึ่งค่า $k = 0.8$ ทำให้ชุดทดสอบไม่สามารถถึงกำลังที่จุดกำลังสูงสุด ที่ครอบคลุมในทุกสภาวะความเข้มแสงได้ ส่วนด้านเอาต์พุตของชุดทดสอบคือแบตเตอรี่ ซึ่งค่า V_{batt} จะมีค่าใกล้เคียงแรงดันแบตเตอรี่เท่ากับ 12 V และเมื่อค่ากระแสที่ประจุแบตเตอรี่มีค่าสูงจะทำให้แรงดันแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $200, 400, 600, 800$ และ 1000 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่ P_{batt} จะมีค่าเท่ากับ $4.873, 8.013, 10.266, 11.621$ และ 15.356 W ตามลำดับ



รูปที่ 4.53 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์

จากแผนภาพการดึงกำลังสูงสุดที่สภาวะความเข้มแสงต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ที่สร้างขึ้นสามารถดึงกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ซึ่งถ้าความเข้มแสงมีค่ามาก กำลังที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่ามาก ดังนั้นชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC โดยได้อธิบายหลักการทำงานที่ว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันขณะเปิดวงจร จากนั้นได้ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB พบว่าระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสามารถดึงจุดกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง ซึ่งในบทนี้ยังได้อธิบายถึงโครงสร้างชุดทดสอบของวิธี VOC โดยสร้างขึ้นจากอุปกรณ์แอนะล็อก นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นอีกด้วย โดยชุดทดสอบจะต้องอาศัยค่า k ที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว และจะต้องมีการทดสอบหาค่าเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งาน ซึ่งการทดสอบดังกล่าวทำให้เกิดความยุ่งยากในการนำไปใช้งานจริง นำไปสู่การตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต เพื่อทำให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 5



บทที่ 5

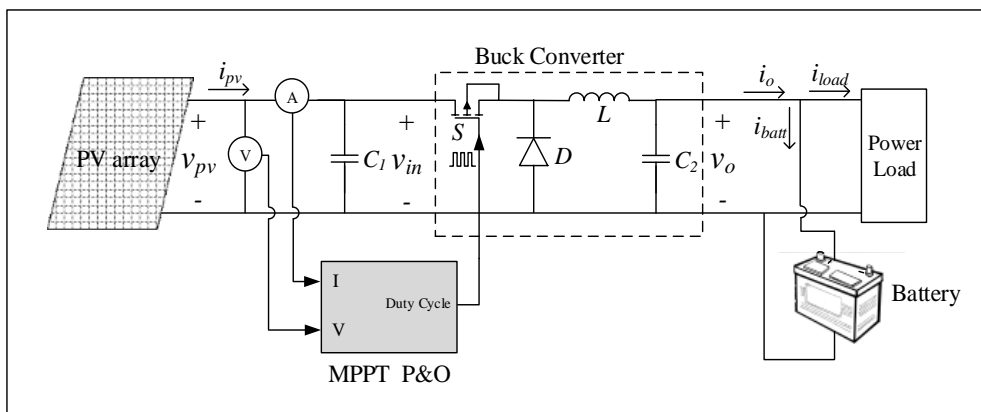
การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต

5.1 บทนำ

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ในบทที่ 4 เป็นการพึ่งพาการกำหนดค่า k ที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว ทำให้ระบบตามรอยจุดกำลังด้วยวิธี VOC ไม่ครอบคลุมในทุกสภาวะความเข้มแสง ดังนั้นจึงต้องทำการพัฒนาและปรับปรุง เพื่อให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่จะนำเสนอในบทนี้ คือวิธีรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเรียกวิธีนี้ว่า P&O ในบทนี้จะนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์เพื่อหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการการทำงานของวิธี P&O อย่างละเอียด รวมไปถึงการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการตามรอยจุดกำลัง เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง ซึ่งในบทนี้ยังได้มีการอธิบายถึงโครงสร้างชุดทดสอบของวิธี P&O การออกแบบวงจรต่าง ๆ และการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR พร้อมผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

5.2 ระบบที่พิจารณา

ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยวิธี P&O แสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธี P&O

จากรูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่พิจารณา ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เชื่อมต่อกับระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีเทียบรบกวนและสั่งเกตโดยสัญญาณเอาต์พุตจะนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์เพื่อหาจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และเนื่องจากเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานสำรอง ซึ่งในที่นี้ก็คือแบตเตอรี่

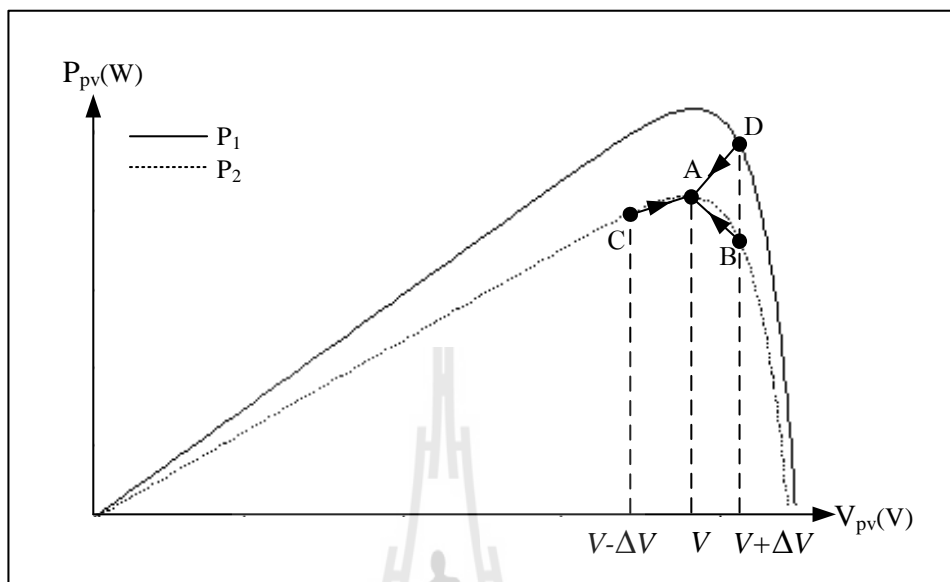
หลักการของวิธี P&O จะทำงานเป็นคาบเวลาโดยทำการปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ขั้นตอนของการรบกวน หลังจากนั้นจะทำการวัดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการรบกวนโดยใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้า แล้วทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลา ก่อน เพื่อนำมาวินิจฉัยเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle : d) ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อให้จุดทำงานเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุด ณ ความเข้มแสงขณะนั้นมากที่สุด วิธี P&O เป็นวิธีที่มีอัลกอริทึมง่าย และมีประสิทธิภาพสูง ในการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งงานวิจัยในอดีต (Ahmed et al., 2011) วิธี P&O มีปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดในสภาวะคงตัวและไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงปรับปรุงและพัฒนาวิธี P&O เพื่อลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อค่าความผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า มีค่าเข้าใกล้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ϵ_s) จะทำการกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันมีค่าคงที่ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าคงที่ ณ ความเข้มแสงขณะนั้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์เป็นดังสมการที่ (5-1)

$$V_o = dV_{in} \quad (5-1)$$

เมื่อต้องการให้แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด $V_{in} = V_{mpp} = V_{pv}$ และเอาต์พุตของระบบคือแบตเตอรี่ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต $V_o = V_{batt}$ จากสมการที่ (5-1) จะได้

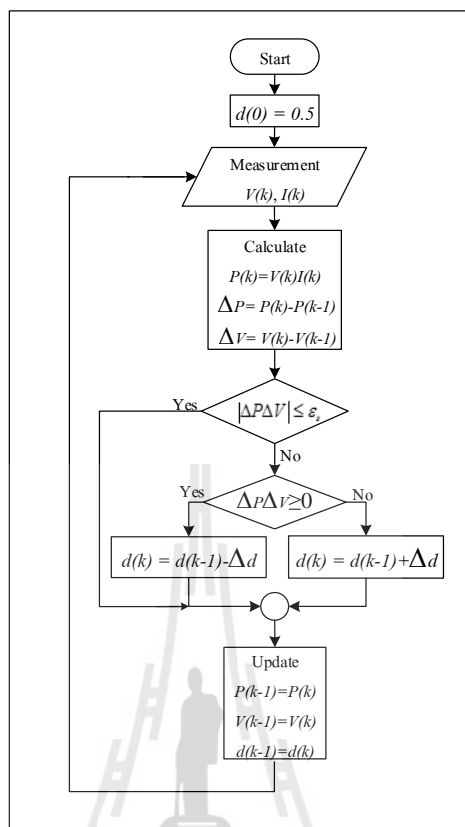
$$d = \frac{V_{batt}}{V_{in}} \quad (5-2)$$

ไดอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

จากรูปที่ 5.2 เป็นกราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V Curve) เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจะได้ P-V Curve ของ P_1 และ P_2 โดยความเข้มแสงของ P_1 มีค่ามากกว่า P_2 ทำให้กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ P_1 มากกว่า P_2 พิจารณาจุดการทำงานเมื่อเปลี่ยนจากจุด B ไปยังจุด A จะทำให้ค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อน (ΔP) มีค่าเพิ่มขึ้น $+\Delta P$ และค่าผลต่างของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อน (ΔV) จะมีค่าลดลง $-\Delta V$ ดังนั้น $\Delta P \Delta V < 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องทำการปรับลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จากสมการที่ (5.2) ถ้าแรงดันแบดเตอร์มีค่าคงที่ และต้องการจะลดค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ จะต้องปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ (d) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น $d + \Delta d$ และเมื่อพิจารณาเปลี่ยนจุดการทำงานจากจุด C ไปยังจุด A จะได้ $+\Delta P$ และ $+\Delta V$ ดังนั้น $\Delta P \Delta V \geq 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องทำการปรับเพิ่มแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจะต้องปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีค่าลดลง จะได้ $d - \Delta d$ และเมื่อพิจารณาเปลี่ยนจุดการทำงานจากจุด D ไปยังจุด A จะได้ $-\Delta P$ และ $-\Delta V$ ดังนั้น $\Delta P \Delta V \geq 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องทำการปรับลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจะต้องปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีค่าเพิ่มขึ้น จะได้ $d + \Delta d$ จากการพิจารณาข้างต้นในกรณีอื่น ๆ จะได้แผนภาพไดอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ฟังไดอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดังรูปที่ 5.3 เริ่มจากการกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่เริ่มต้น $d(0)$ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะกำหนดให้ $d(0) = 0.5$ หรือ $d(0) = 50\%$ เนื่องจากค่าแรงดันที่มากที่สุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 43.125 V ถ้าเลือกใช้ $d(0) = 50\%$ จะทำให้ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 21.56 V ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดับแบตเตอรี่ 12V ทำให้วงจรแปลงผันแบบบักส์สามารถทำงานได้ อีกทั้งกำหนด $P(0) = 0W$ และ $V(0) = 0V$ จากนั้นเข้าสู่อัลกอริทึมทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า $V(k)$ และกระแสไฟฟ้า $I(k)$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันแล้วนำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ $P(k) = V(k) \times I(k)$ จากนั้นนำค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า $\Delta P \times \Delta V$ มาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ϵ_r ถ้า $|\Delta P \Delta V| \leq \epsilon_r$ อัลกอริทึมจะทำการอัปเดตค่ากำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและค่าวัฏจักรหน้าที่ในคาบเวลาก่อนหน้า $P(k-1)$ $V(k-1)$ และ $d(k-1)$ ตามลำดับ เพื่อนำไปใช้คำนวณในรอบต่อไป และเริ่มต้นการทำงานอัลกอริทึมใหม่อีกครั้ง แต่ถ้า $|\Delta P \Delta V| > \epsilon_r$ อัลกอริทึมจะทำการเปรียบเทียบค่า $\Delta P \times \Delta V$ ว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์หรือไม่ ซึ่งถ้า $\Delta P \Delta V \geq 0$ อัลกอริทึมจะทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ $d = d - \Delta d$

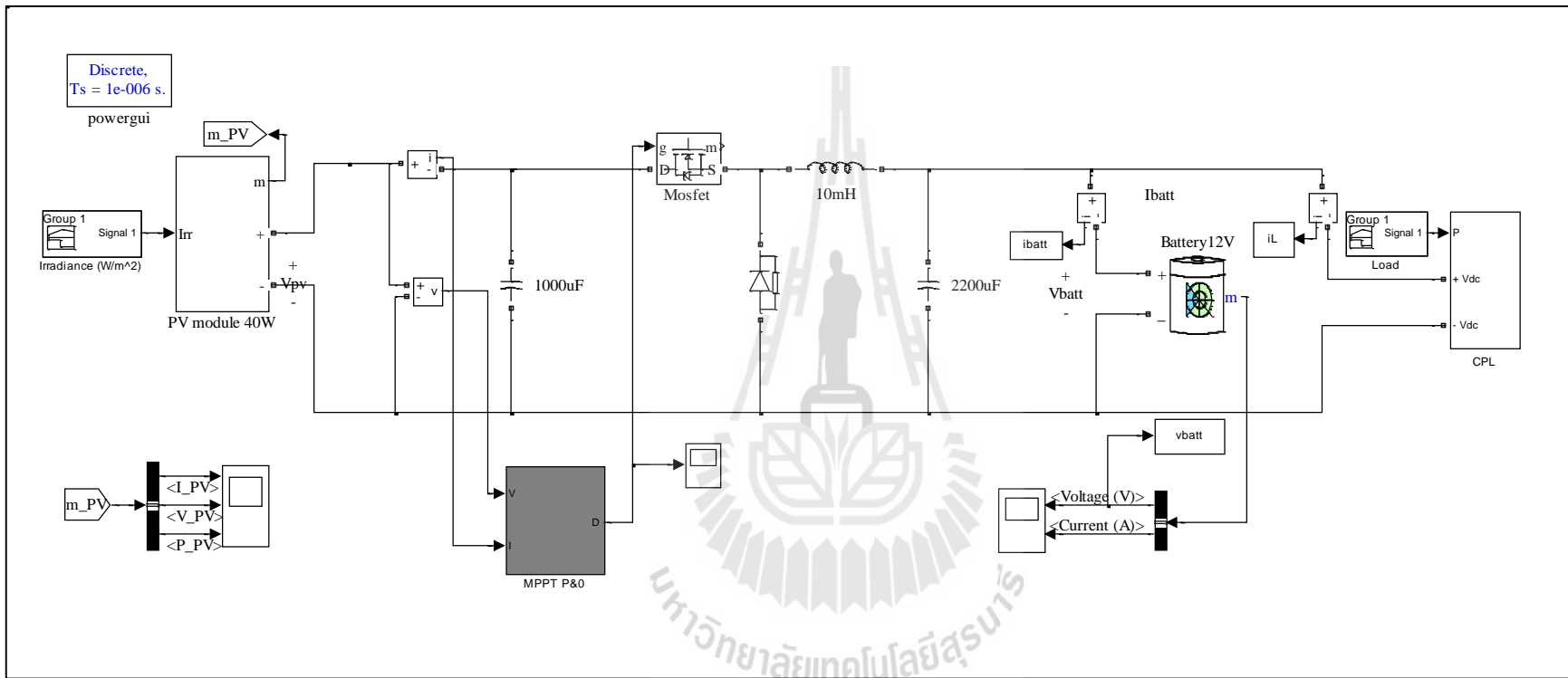
ดั่งการพิจารณาในรูปที่ 5.2 และถ้า $\Delta P \Delta V < 0$ อัลกอริทึมจะทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ $d = d + \Delta d$ จากนั้น อัลกอริทึมจะทำการอัปเดตค่า $P(k-1)$ $V(k-1)$ และ $d(k-1)$ และเริ่มต้นการทำงานอัลกอริทึมใหม่ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะกำหนดให้ $\varepsilon_s = 0.005$ และ $\Delta d = 0.001$ และสำหรับชุดทดสอบจริงการกำหนดค่า ε_s และ Δd จะได้จากการทดสอบชุดทดสอบจริงดังหัวข้อที่ 5.5

5.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

เพื่อยืนยันว่าวิธี P&O ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถดึงกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 5.1 โดยอาศัยพารามิเตอร์ของระบบแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และการจำลองสถานการณ์ของระบบจะอาศัยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และโปรแกรมสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB แสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี P&O

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Panel)	
พิจารณาที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000W/m^2 และ อุณหภูมิ 25°C	
V_{oc}	43.125 V
I_{sc}	1.1 A
I_{mpp}	1.033 A
V_{mpp}	38.73 V
P_{max}	40 W
วงจรแปลงผันแบบบัคคิก (Buck Converter)	
f_{sw}	10 kHz
V_{pv}	38.73 V
V_{batt}	12 V
C_1	1000 μF
C_2	2200 μF
L	10 mH



รูปที่ 5.4 การจำลองสถานการณ์ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธี P&O ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB

การจำลองสถานการณ์ของระบบดังรูปที่ 5.4 ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบักก์ และเอาต์พุตคือแบตเตอรี่ ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นจากสมการของเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (3-1) จากนั้นทำการป้อนค่าความเข้มแสงในหน่วย W/m^2 และอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ $25^{\circ}C$ หรือ 298.15 Kelvin มีค่าคงที่ทุกความเข้มแสง ในส่วนของระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ตัวตรวจจับแรงดันและวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวตรวจจับกระแส อัลกอริทึม จะทำการวินิจฉัยค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ เพื่อให้จุดทำงานเข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ความเข้มแสงขณะนั้นมากที่สุด สำหรับเอาต์พุตของระบบซึ่งก็คือแบตเตอรี่ในการจำลองสถานการณ์จะกำหนดให้ค่าสถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC) มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยการจำลองสถานการณ์จะทำการวัดค่า V_{pv} , P_{pv} , V_{batt} , I_{batt} และ I_{load} ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 โดยการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 5 ช่วง ดังนี้

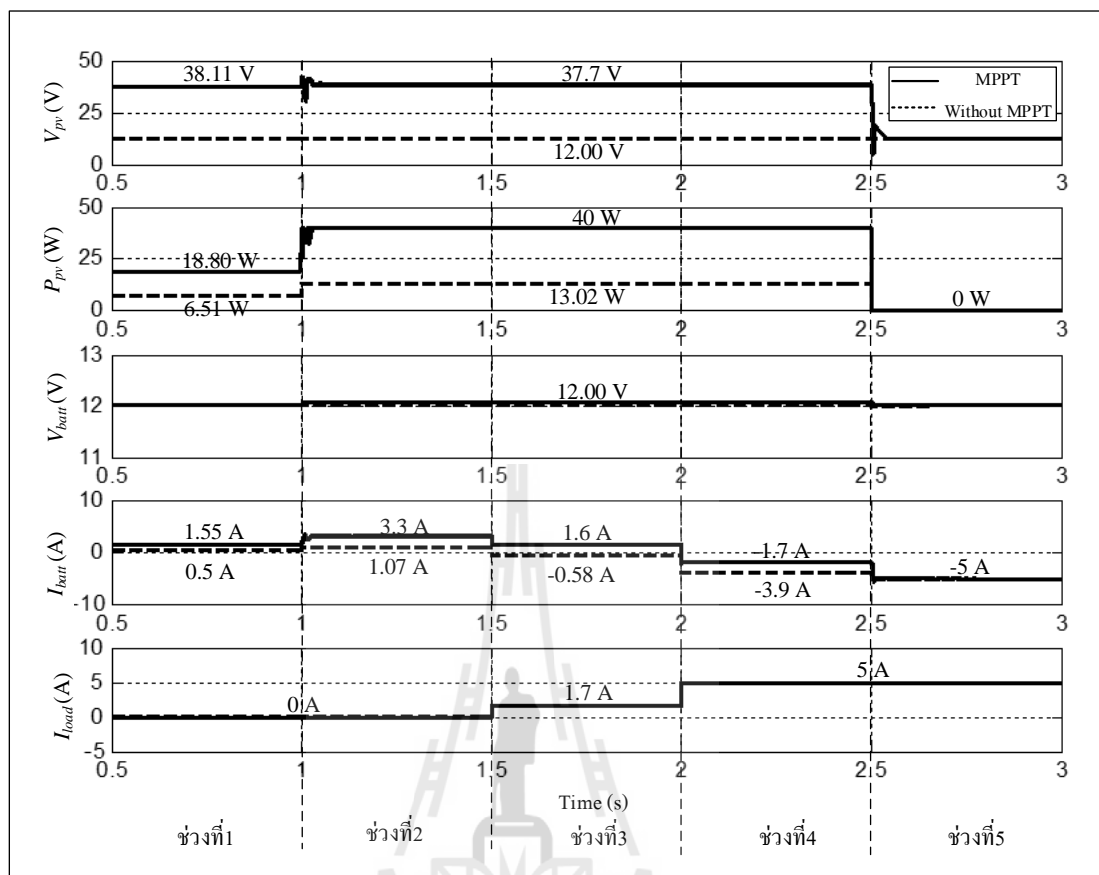
ช่วงที่ 1 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $500 W/m^2$ และไม่มีภาระจ่ายโหลด

ช่วงที่ 2 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $1000 W/m^2$ และไม่มีภาระจ่ายโหลด

ช่วงที่ 3 : ภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) $20W$ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ $1000 W/m^2$

ช่วงที่ 4 : ภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) $60W$ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ $1000 W/m^2$

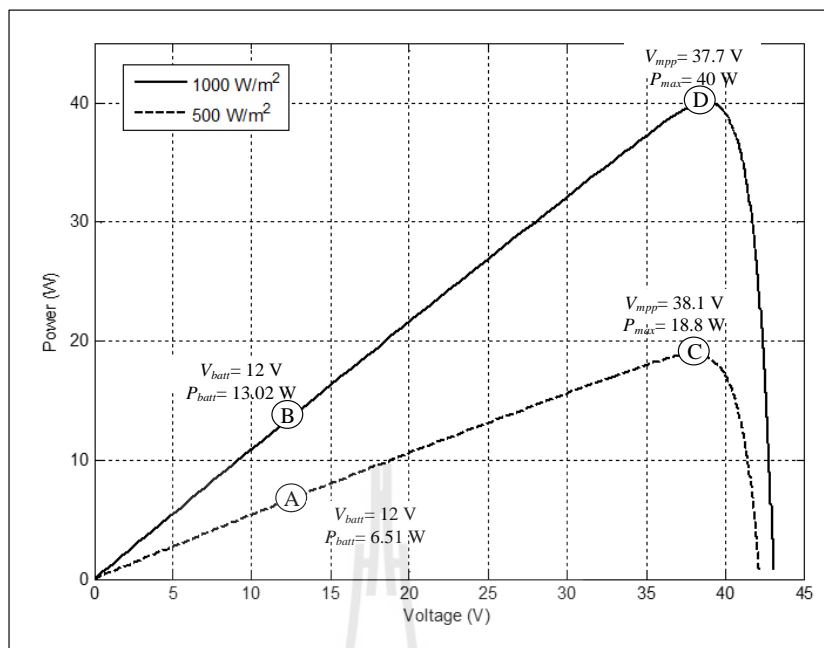
ช่วงที่ 5 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $0 W/m^2$ (ไม่มีแสงอาทิตย์) และภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) $60 W$



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธี P&O

ช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2

จากรูปที่ 5.5 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดแสดงด้วยกราฟเส้นประ (without MPPT) แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับแรงดันของเอาต์พุตซึ่งก็คือแบตเตอรี่ 12V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 กำลังไฟฟ้า ($P_{pv} = I_{pv} V_{pv}$) $P_{pv} = 6.51 \text{ W}$ แสดงได้จุด A ในรูปที่ 5.6 และจากรูปที่ 5.5 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $P_{pv} = 13.02 \text{ W}$ แสดงได้จุด B ในรูปที่ 5.6 และจากรูปที่ 5.5 ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (MPPT) แสดงด้วยกราฟเส้นทึบ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 $V_{pv} = 38.11 \text{ V}$ และ $P_{pv} = 18.80 \text{ W}$ แสดงได้จุด C ในรูปที่ 5.6 และจากรูปที่ 5.5 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $V_{pv} = 37.7 \text{ V}$ และ $P_{pv} = 40 \text{ W}$ แสดงได้จุด D ในรูปที่ 5.6 อีกทั้งในรูปที่ 5.6 ยังแสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 และ 1000 W/m^2 ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังด้วยวิธี P&O สามารถดึงกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้



รูปที่ 5.6 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลังที่ความเข้มแสง $500 W/m^2$ และ $1000 W/m^2$

ช่วงที่ 3

จากรูปที่ 5.5 เมื่อทำการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 20 W จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่า 1.6 A ซึ่งมีค่าลดลง เนื่องจากกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสได้ 3.3 A จะแบ่งกระแสจ่ายให้โหลด 1.7 A

ช่วงที่ 4

จากรูปที่ 5.5 เมื่อทำการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 60 W ซึ่งโหลดต้องการกระแส 5 A แต่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เพียง 40 W หรือ 3.3 A ไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จึงมีค่าติดลบเท่ากับ -1.7 A ซึ่งหมายถึงแบตเตอรี่ช่วยจ่ายกระแสให้โหลด

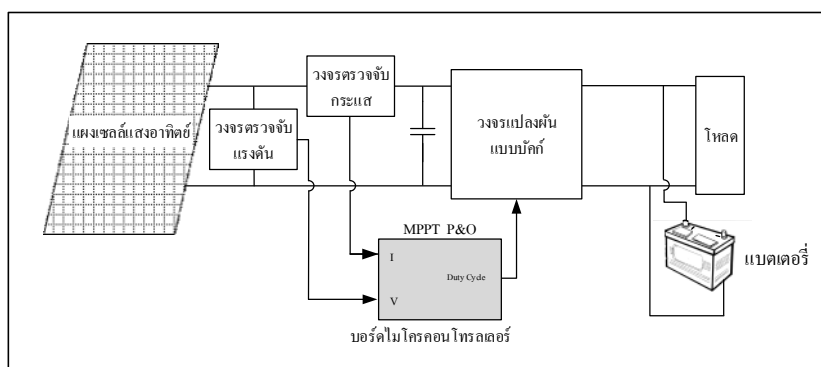
ช่วงที่ 5

จากรูปที่ 5.5 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $0 W/m^2$ หรือไม่มีแสงอาทิตย์ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่ คือ 12V แต่โหลดต้องการกำลังไฟฟ้า 60W ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่าติดลบมากกว่าช่วงที่ 4 เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ หรือกระแสมีค่า 0 A ดังนั้นจึงมีเพียงแบตเตอรี่จ่ายกระแสให้โหลด -5 A

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยกำลัง (เส้นทึบ) สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ถ้าความเข้มแสงมีค่ามาก กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่ามาก ถ้าในสภาวะดังกล่าวไม่มีโหลด พลังงานทั้งหมดจะทำการเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ โดยกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ จะมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยกำลัง (เส้นประ) ซึ่งหมายถึง ระบบสามารถอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้เร็วขึ้น สำหรับกรณีที่มีการจ่ายโหลด ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่โหลดต้องการ พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แต่ถ้าพลังงานที่โหลดต้องการมีค่ามากกว่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดทันที หรือแม้กระทั่งกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดแทนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีแต่พลังงานสำรองของระบบมาใช้จ่ายโหลดทั้งหมด จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยกำลังมีประโยชน์และมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

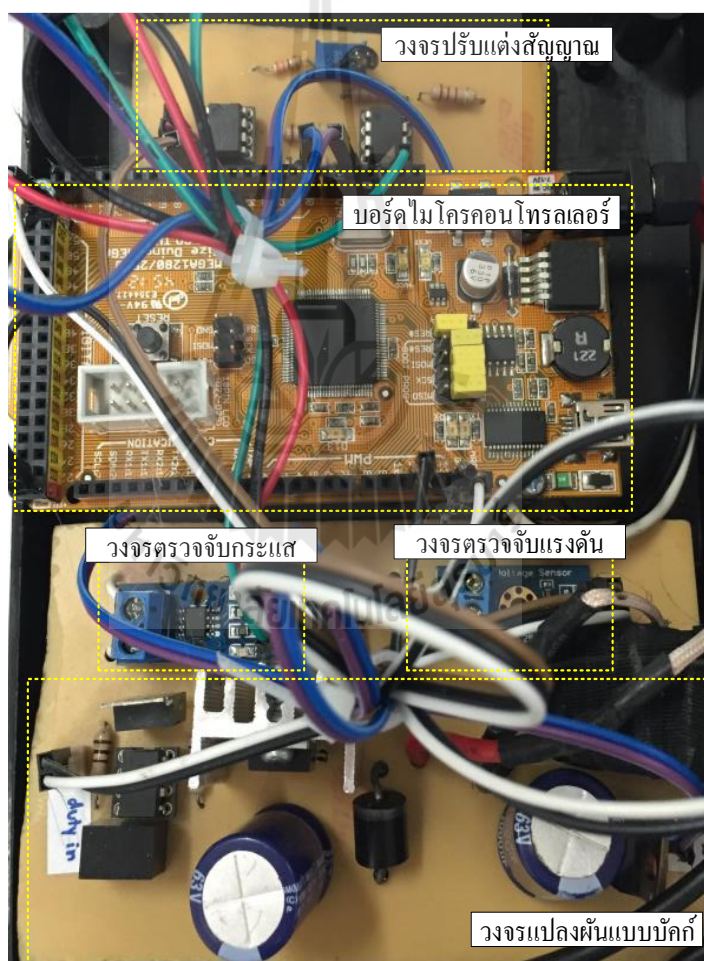
5.4 การสร้างชุดทดสอบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังระบบมีความสามารถในการถ่ายโอนกำลังเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่อุปกรณ์และโหลดได้สูงสุด เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และแสดงให้เห็นว่าวิธีที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติจึงมีความจำเป็นสำหรับการสร้างชุดทดสอบโดยการทดสอบจริงด้วยวิธี P&O นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 โดยจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานร่วมกับตัวตรวจจับกระแส และตัวตรวจจับแรงดัน



รูปที่ 5.7 โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

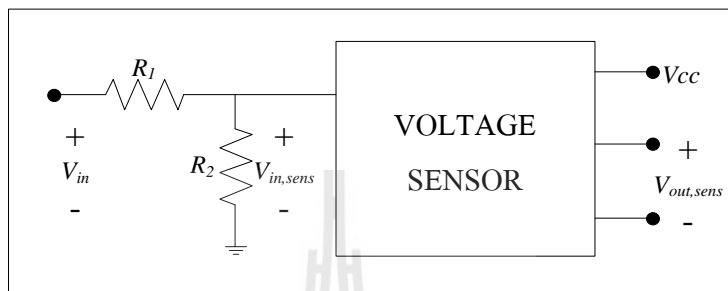
โครงสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ประกอบด้วยวงจรตรวจจับแรงดันและวงจรตรวจจับกระแส เพื่อทำการวัดค่าแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ป้อนค่าให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เพื่อใช้คำนวณหาค่าวัฏจักรหน้าที่นำไปขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์เพื่อให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ค่า V_{mpp} ทำให้สามารถดึงกำลังสูงสุดออกมาใช้งานได้ โดยภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่ใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และจะอธิบายการทำงาน การออกแบบและการทดสอบวงจรต่าง ๆ ในชุดทดสอบไว้ในหัวข้อถัดไป สำหรับแหล่งจ่ายของวงจรภายในชุดทดสอบมาจากแบตเตอรี่ผ่านตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ



รูปที่ 5.8 ภาพรวมชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่ใช้งานจริง

5.4.1 วงจรตรวจจับแรงดัน

วงจรตรวจจับแรงดัน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะเลือกใช้ Arduino Standard Voltage Sensor Module พิกัด 0 - 24 V ทำหน้าที่วัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{pv}) ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดันดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 โครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดัน

จากโครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดันในรูปที่ 5.9 เนื่องจากตัวตรวจจับแรงดันที่เลือกใช้มีค่าพิกัด คือ 0 - 24 V แต่ค่าแรงดันสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าเท่ากับ 43 โวลต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (ดังอธิบายในหัวข้อที่ 4.4.2 ของบทที่ 4) มาประยุกต์ใช้กับวงจรตรวจจับแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยเลือกใช้ค่า $R_1 = 3.3k\Omega$ $R_2 = 3.6k\Omega$ ดังนั้นเพื่อหาอัตราส่วนลดทอนจึงจำเป็นต้องดำเนินการทดสอบวงจร โดยการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้านอินพุตจะทำการปรับค่าแรงดันของแหล่งจ่ายปรับค่าได้จากนั้นวัดค่าแรงดัน ส่วนด้านเอาต์พุตจะวัดแรงดันของวงจรตรวจจับแรงดัน การทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.2



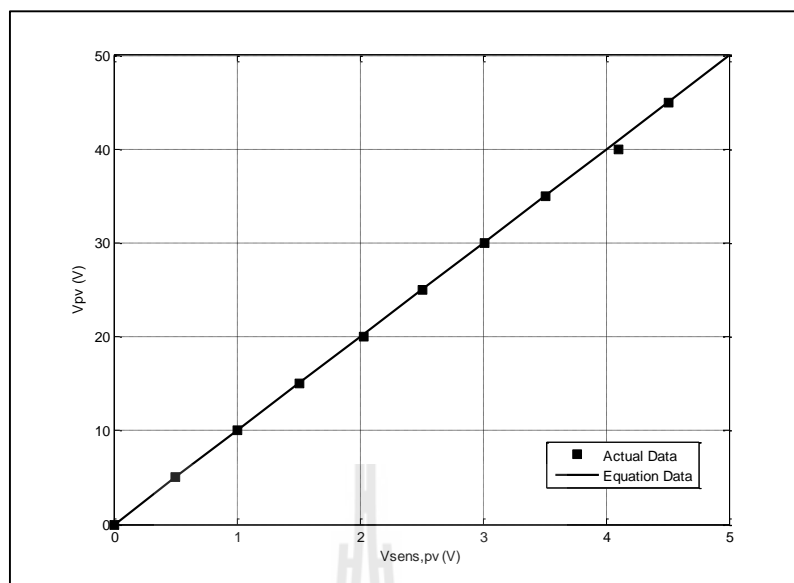
รูปที่ 5.10 วงจรตรวจจับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อ V_{pv} คือ แรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
 $V_{sens,pv}$ คือ แรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า (V)

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดัน

V_{pv} (V)	$V_{sens,pv}$ (V)
0.00	0.001
5.00	0.510
10.00	1.013
15.00	1.507
20.00	2.015
25.00	2.508
30.00	3.004
35.00	3.511
40.00	4.021
45.00	4.502
50.00	5.003

จากตารางที่ 5.2 นำผลการทดสอบวงจรมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์

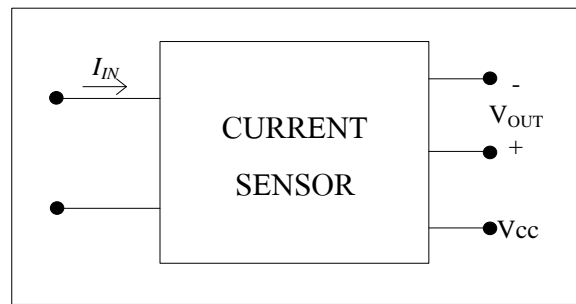
จากกราฟรูปที่ 5.11 จะเห็นว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันของกราฟโดยใช้คำสั่ง polyfit ในโปรแกรม MATLAB จะได้ดังสมการที่ (5-3) ดังนี้

$$V_{actual} = 10.65V_{sensor} \quad (5-3)$$

สมการที่ (5-3) เป็นสมการที่ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้คำนวณเพื่อแปลงแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าให้เป็นแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

5.4.2 วงจรตรวจจับกระแส

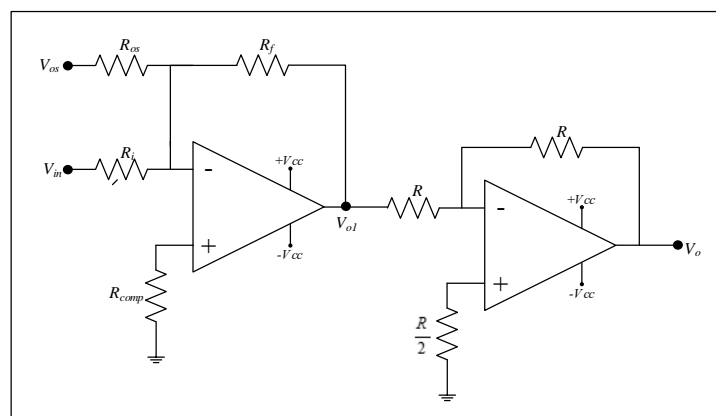
วงจรตรวจจับกระแสในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะเลือกใช้ Arduino Current Sensor Module พิกัด 5A ทำหน้าที่วัดกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{pv}) ซึ่งจะมีโครงสร้างของตัวตรวจจับกระแสดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 โครงสร้างของตัวตรวจจับกระแส

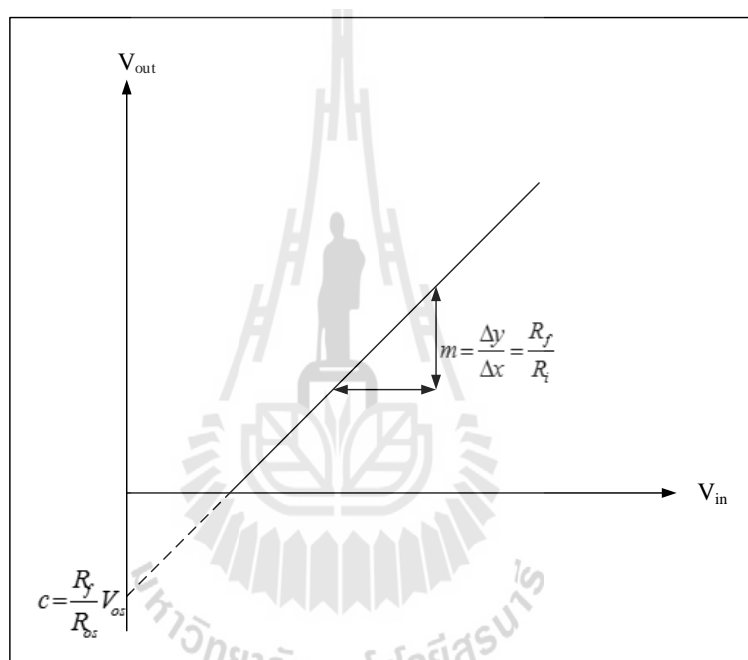
จากโครงสร้างของวงจรตรวจจับกระแสในรูปที่ 5.12 โมดูลวัดกระแส Arduino Current เป็นอุปกรณ์ใช้ต่อพ่วงกับบอร์ด Arduino ในช่อง Analog เพื่ออ่านค่ากระแสที่ไหลผ่าน โดยอาศัยไอซี ACS712-05 Current Sensor ที่วัดกระแสโดยใช้หลักการของ Hall Effect สามารถวัดกระแสได้ในย่าน -5 ถึง $+5$ A (วัดได้ทั้งกระแส AC และ DC) โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 5 V จ่ายให้กับโมดูลวัดกระแส เนื่องจากตัวตรวจจับกระแสสามารถวัดกระแสได้ในย่าน -5 ถึง $+5$ A แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วัดกระแส 0 ถึง 5 A ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องอาศัยวงจรปรับแต่งสัญญาณเพื่อปรับขนาดของกระแสที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสให้มีความเหมาะสมเพื่อส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประมวลผลต่อไป โดยวงจรปรับแต่งสัญญาณสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 โดยมีหลักการทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณ การออกแบบและการสร้างวงจรปรับแต่งสัญญาณ และการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า ดังจะอธิบายได้ในหัวข้อต่อไปนี้

1) หลักการทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณ



รูปที่ 5.13 วงจรปรับแต่งสัญญาณสัญญาณ

หลักการทํางานของวงจรปรับแต่งสัญญาณสัญญาณในรูปที่ 5.13 วงจรปรับแต่งสัญญาณเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการปรับความชัน (Slope) และปรับตำแหน่งศูนย์ (Zero) โดยจะปรับแต่งสัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตให้มีความสัมพันธ์เป็นไปตามที่ระบบต้องการ การปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ ประกอบด้วยวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Summer, A_1) และวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier, A_2) โดยมีอัตราขยายเป็น -1 ดังนั้นอัตราขยายของแรงดันมีค่าเท่ากับ A_1 จากโครงสร้างของวงจรปรับแต่งสัญญาณในรูปที่ 5.13 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} กับแรงดันอินพุต V_{in} ได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 การปรับความชันและตำแหน่งศูนย์

สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากกราฟของวงจรปรับแต่งสัญญาณในรูปที่ 5.14 แสดงได้ดังสมการที่ (5-4)

$$V_{o1} = -\frac{R_f}{R_i} V_{in} - \frac{R_f}{R_{os}} V_{os} \quad (5-4)$$

จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก A_1 จะถูกป้อนให้ป็นสัญญาณอินพุตของ A_2 ซึ่งเป็นวงจรที่มีอัตราขยายเท่ากับ -1 จะได้แรงดันเอาต์พุต A_2 แสดงได้ดังสมการที่ (5-5)

$$V_o = (-1)V_{o1} = \frac{R_f}{R_i} V_{in} + \frac{R_f}{R_{os}} V_{os} \quad (5-5)$$

จากสมการที่ (5-5) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} กับ V_{in} ของวงจรในรูปของสมการเส้นตรงซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบทั่วไปของสมการเส้นตรงจะได้

$$y = mx + c \quad (5-6)$$

โดยที่ $m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{R_f}{R_i}$ คือ ค่าความชันของกราฟหรืออัตราขยายของวงจร

$c = \frac{R_f}{R_{os}} V_{os}$ คือ จุดตัดแกน y ของกราฟหรือตำแหน่งศูนย์

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (5-5) และ (5-6) จะพบว่าการปรับค่าความชันสามารถทำได้โดยการปรับ R_f หรือ R_i ของวงจร และการปรับตำแหน่งศูนย์ทำได้โดยการปรับค่า R_{os} หรือ V_{os}

2) การออกแบบและการสร้างวงจรปรับแต่งสัญญาณ

การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณสัญญาณเพื่อปรับแต่งสัญญาณของกระแสที่รับมาจากตัวตรวจจับกระแส เมื่อกระแสมีค่า 0 A ค่าแรงดันเอาต์พุตต่ำสุดของตัวตรวจจับกระแสมีค่าเท่ากับ 2.471 V และเมื่อกระแสมีค่า 5 A ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของตัวตรวจจับกระแสมีค่าเท่ากับ 4.349 V ซึ่งตัวตรวจจับกระแสสามารถวัดกระแสได้ในย่าน -5 ถึง +5 A และในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้วัดกระแส 0 ถึง 5 A ดังนั้นจึงต้องอาศัยการปรับแต่งสัญญาณให้มีความเหมาะสมเพื่อส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประมวลผล โดยเมื่อกระแสมีค่า 0 A จะให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณให้มีค่าเท่ากับ 0 V และเมื่อกระแสมีค่า 5 A จะให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณให้มีค่าเท่ากับ 5 V โดยขั้นตอนการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณสามารถออกแบบได้ดังนี้

1. กำหนดหาค่าความชัน การหาค่าความชันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-7) ดังนี้

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{R_f}{R_i} \quad (5-7)$$

ดังนั้น จะสามารถคำนวณความชัน ได้ดังนี้

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{V_{o,\max} - V_{o,\min}}{V_{in,\max} - V_{in,\min}} = \frac{5 - 0}{4.349 - 2.471} = 2.659$$

เมื่อ $m = 2.659$ สามารถคำนวณหาค่า R_i ได้จาก สมการที่ (5-6) เมื่อเลือกใช้ค่า $R_f = 550\Omega$ ดังนั้นจะได้ค่า $R_i = 200\Omega$

2. คำนวณหาค่าจุดตัดแกน การหาค่าจุดตัดแกนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-8) ดังนี้

$$V_{o,\min} = mV_{in,\min} + c \quad (5-8)$$

เมื่อ $V_{o,\min} = 0$ และ $V_{in,\min} = 2.471$ แทนค่าลงสมการที่ (5-8) จะได้

$$0 = 2.659 \times 2.471 + c$$

$$c = -6.57$$

จากสมการที่ (5-5) สามารถคำนวณหาค่า R_{os} โดยเมื่อกำหนดให้ $V_{os} = -12V$ ได้ดังสมการที่ (5-9) ดังนี้

$$R_{os} = \frac{R_f}{c} V_{os} \quad (5-9)$$

$$R_{os} = \frac{550}{-6.57} \times -12 = 1k\Omega$$

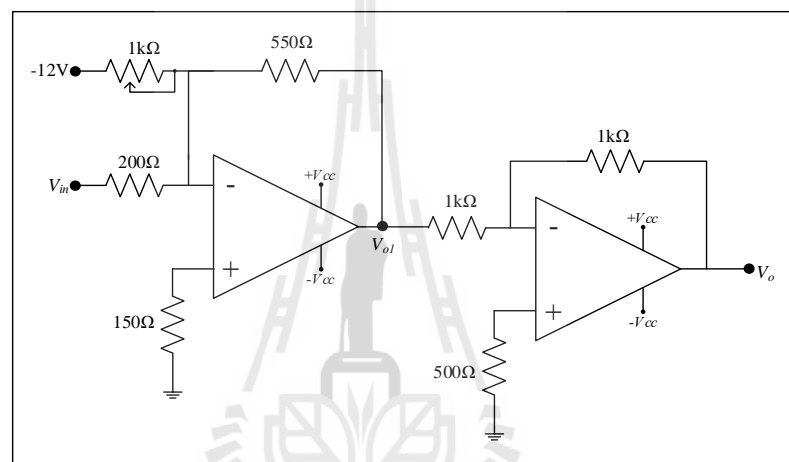
ดังนั้น $R_{os} = 1k\Omega$ โดยจะเลือกใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เท่ากับ $5k\Omega$

3. คำนวณหาค่า R_{comp} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-10) ดังนี้

$$R_{comp} = R_f // R_i // R_{os} \quad (5-10)$$

ดังนั้น $R_{comp} = 550\Omega // 200\Omega // 1k\Omega = 128\Omega$ จึงเลือกใช้ $R_{comp} = 150\Omega$

จากการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เมื่อนำไปสร้างวงจรใช้งานจริงผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ ดังนี้ $R_f = 550\Omega$, $R_i = 200\Omega$, $R_{os} = 1k\Omega$ และ $R_{comp} = 150\Omega$ จากนั้นได้กำหนดค่าความต้านทาน R ในวงจรออปแอมป์ตัวที่สอง (A_2) เท่ากับ $1k\Omega$ ซึ่งสามารถแสดงวงจรปรับแต่งสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 5.15 และวงจรปรับแต่งสัญญาณที่นำมาใช้งานจริงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 วงจรปรับแต่งสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 5.16 วงจรปรับแต่งสัญญาณที่ใช้งานจริง

3) การทดสอบวงจรตรวจับกระแสไฟฟ้า

วงจรตรวจับกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.17 ประกอบไปด้วยตัวตรวจับกระแสไฟฟ้า และวงจรปรับแต่งสัญญาณ โดยตัวตรวจับกระแสไฟฟ้าจะทำหน้าที่วัดกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และส่งค่าแรงดันให้กับวงจรปรับแต่งสัญญาณ เพื่อปรับขนาดสัญญาณให้มีความเหมาะสมเพื่อส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องดำเนินการทดสอบวงจรตรวจับกระแสไฟฟ้าเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจับแรงดันไฟฟ้า และกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลต่อไป โดยผลการทดสอบวงจรตรวจับกระแสแสดงได้ดัง ตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.17 วงจรตรวจับกระแสไฟฟ้า

เมื่อ I_{pv} คือ กระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

$V_{sens,pv}$ คือ แรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจับแรงดันไฟฟ้า (V)

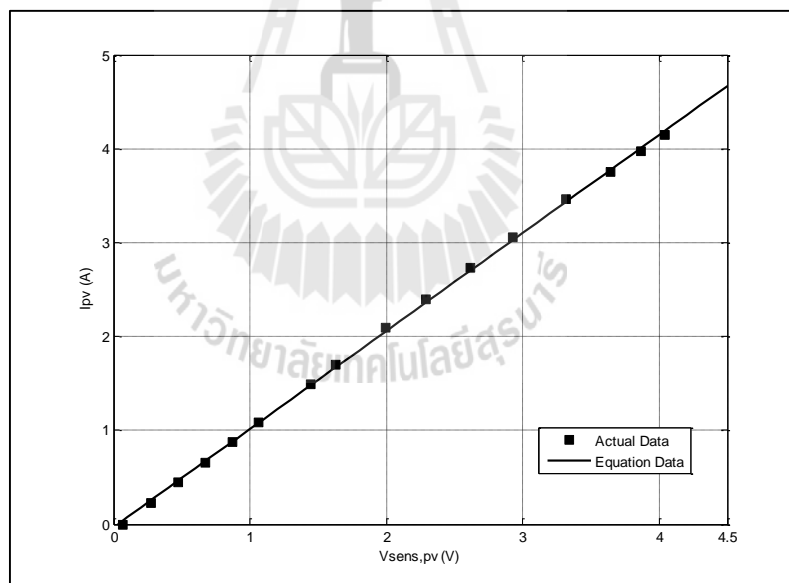
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจับกระแส

I_{pv} (A)	$V_{sens,pv}$ (V)
0.000	0.064
0.227	0.272
0.442	0.470
0.661	0.674
0.873	0.873
1.081	1.061
1.491	1.442
1.697	1.631
2.099	1.994

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจ็ับกระแส (ต่อ)

I_{pv} (A)	$V_{sens,pv}$ (V)
2.398	2.291
2.732	2.619
3.057	2.925
3.461	3.315
3.752	3.644
3.971	3.87
4.142	4.04

จากตารางที่ 5.3 นำผลการทดสอบวงจรมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจ็ับแรงดันไฟฟ้า และกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจ็ับแรงดันไฟฟ้า และกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากกราฟในรูปที่ 5.18 จะเห็นว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันของกราฟโดยใช้คำสั่ง polyfit ในโปรแกรม MATLAB จะได้ดังสมการที่ (5-11) ดังนี้

$$I_{pv} = 1.04575V_{sens,pv} - 0.033 \quad (5-11)$$

สมการที่ (5-11) เป็นสมการที่ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้คำนวณเพื่อแปลงแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าให้เป็นกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

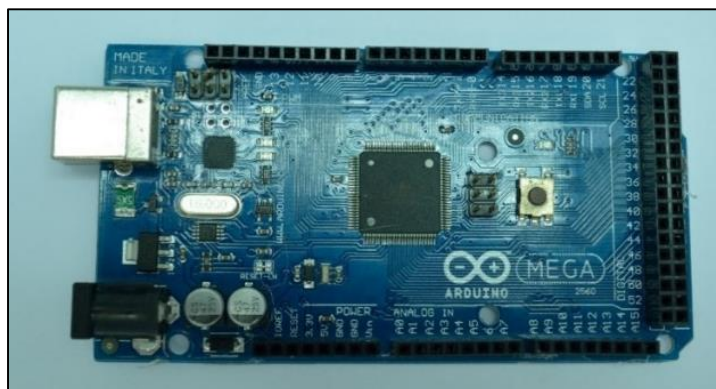
5.4.3 การเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

จากรูปที่ 5.7 โครงสร้างในการสร้างชุดทดสอบ คำว่าผู้จรรยาหน้าที่เพื่อใช้ควบคุมสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบักกั้นนั้นจะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ MEGA 2560 ซึ่งการประยุกต์ใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 2560 เพื่อสร้างเป็นชุดทดสอบ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่

- ประยุกต์ใช้งานมอดูลการสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-Width Modulation : PWM) ด้วยไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 เพื่อควบคุมสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบักกั้น
- ประยุกต์ใช้งานพอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพื่อนำมาคำนวณภายในอัลกอริทึม

1) ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 2560 ของบริษัทที่ที ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA 2560 ที่เป็นชิพตระกูล AVR ของบริษัท Atmel รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งาน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาให้ Arduino สามารถรองรับการใช้งานขนาดใหญ่ขึ้นโดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้ชิพ AVR รุ่นใหญ่ขึ้น เพื่อให้จำนวน พอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต, พอร์ตดิจิตอล, พอร์ตอนาล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM และพอร์ตสื่อสารอนุกรม และขนาดความจำ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA 2560

คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ด ET-EASY MEGA 1280

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
- สถาปัตยกรรมแบบ RISC
 - ชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกา ในการประมวลผลคำสั่ง
 - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
 - ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
- หน่วยความจำ
 - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโปรแกรม 128 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแบบ ERROM ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแรมชนิดเอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
 - เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปี ที่อุณหภูมิ 85°C และกว่า 100 ปีที่ 25°C
- มีระบบโปรแกรมตัวเองอยู่ในชิพ
- สามารถทำการอ่านขณะเขียนได้จริง โดยสามารถถือการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
- มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant)
- คุณสมบัติการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
 - มีตัวตั้งเวลา และตัวนับเวลาขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมด การทำงานได้ 2 โหมด

- มีตัวตั้งเวลา และตัวนับเวลาขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่สามารถแยกโหมด การทำงานได้ 3 โหมด คือ prescaler, compare และ capture
- มีตัวนับเวลาจริง (real time counter) ที่แยกวงจรกำหนดความถี่ได้
- มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
- มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
- มีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
- มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
- เชื่อมประสานแบบอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งแบบมาสเตอร์และสเลฟ
- มีการเชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น แบบส่งข้อมูลเรียงไปต์
- มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
- มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนาลอกอยู่ในตัว
- มีการรองรับการขัดจังหวะและ เวก-อัพ (wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขาของชิพ
- คุณสมบัติพิเศษ
 - มีระบบเริ่มระบบเมื่อมีการรีเซ็ต และมีระบบตรวจจับเกิดบราน์เอาต์ (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 1.8V กระแส 0.5mA
 - โหมดเพาเวอร์ดาวน์ (Power-down) ต้องการกระแส 0.1 μ A ที่แรงดัน 1.8V

2) การใช้งานพอร์ตสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ต้องมีการรับค่าจากชุดทดสอบโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะมีพอร์ตแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (analog to digital converter) ความ

ละเอียด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5V ซึ่งหมายถึง เมื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีมอดูล ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0 – ADC15 สำหรับการใช้งานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจะใช้ 2 ช่องสัญญาณคือ ADC0 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ได้จากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และ ADC7 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ผลการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล คำนวณได้จากสมการที่ (5-12)

$$ADC = \frac{V_{IN} \times 1024}{V_{REF}} \quad (5-12)$$

เมื่อ V_{IN} คือ แรงดันทางด้านอินพุตหรือแรงดันจากวงจรตรวจจับ
 V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิงซึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

3) การสร้างสัญญาณ PWM กับไทมเมอร์ เคานเตอร์/1

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จะใช้โหมดการทำงาน ได้แก่ Phase and Frequency Correct PWM การสร้างสัญญาณ Phase and Frequency Correct Pulse Width Modulation เป็นการสร้างเฟสและความถี่ของสัญญาณ PWM ความละเอียดสูง โดยความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-13)

$$f_{pwm} = \frac{f_{clk}}{2 \times N \times TOP} \quad (5-13)$$

เมื่อ N คือ ค่าปริสเกลเลอร์ (ตัวลดทอนสัญญาณ) โคร่งงานนี้กำหนดให้ N=1
 TOP คือ ค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต
 f_{clk} คือ ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ (16 MHz)

สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญการสวิทช์มีค่าเท่ากับ 10 kHz ดังนั้นจากสมการที่ (5-13) จะสามารถหาค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ ICR1 แสดงได้ดังนี้

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

ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้ช่องสัญญาณ PWM 11 เป็นพอร์ตเอาต์พุตของสัญญาณ PWM ซึ่งการนำสัญญาณพัลส์ไปขับสวิตช์จะต้องผ่านวงจรแยกโคดสัญญาณ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้ไอซี PC923 ในการแยกโคดสัญญาณ (อธิบายการทำงานของวงจรแยกโคดสัญญาณไว้ในหัวข้อที่ 4.4.6)

5.5 การทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่

จากรูปที่ 5.3 ฟังก์ชันการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O การกำหนดค่าความผิดพลาด ε_s และค่าวัฏจักรหน้าที่ Δd ในชุดทดสอบมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นจะต้องมีการทดสอบหาค่า ε_s และ Δd ที่เหมาะสมเพื่อให้ชุดทดสอบจริงมีประสิทธิภาพมากที่สุด การทดสอบจะเริ่มต้นจากการกำหนดค่า $\varepsilon_s = 0.001$ และเปลี่ยนแปลงค่า $\Delta d = 0.01, 0.05, 0.1$ ตามลำดับ จากนั้นเปลี่ยนค่า $\varepsilon_s = 0.001, 0.05, 0.1$ ตามลำดับโดยใช้ค่า Δd ค่าเดิม ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่แสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่

Δd	ความเข้มแสง(W/m ²)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)
$\varepsilon_s = 0.001$				
0.01	400	27.55	0.381	10.49
	1000	30.20	0.678	20.47
0.05	400	27.51	0.376	10.34
	1000	30.18	0.675	20.37
0.1	400	27.02	0.354	9.565
	1000	30.36	0.666	20.21
$\varepsilon_s = 0.05$				
0.01	400	29.803	0.409	12.19
	1000	29.80	0.732	21.81
0.05	400	29.61	0.390	11.54
	1000	29.71	0.712	21.15
0.1	400	29.77	0.392	11.67
	1000	29.92	0.705	21.09

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่ (ต่อ)

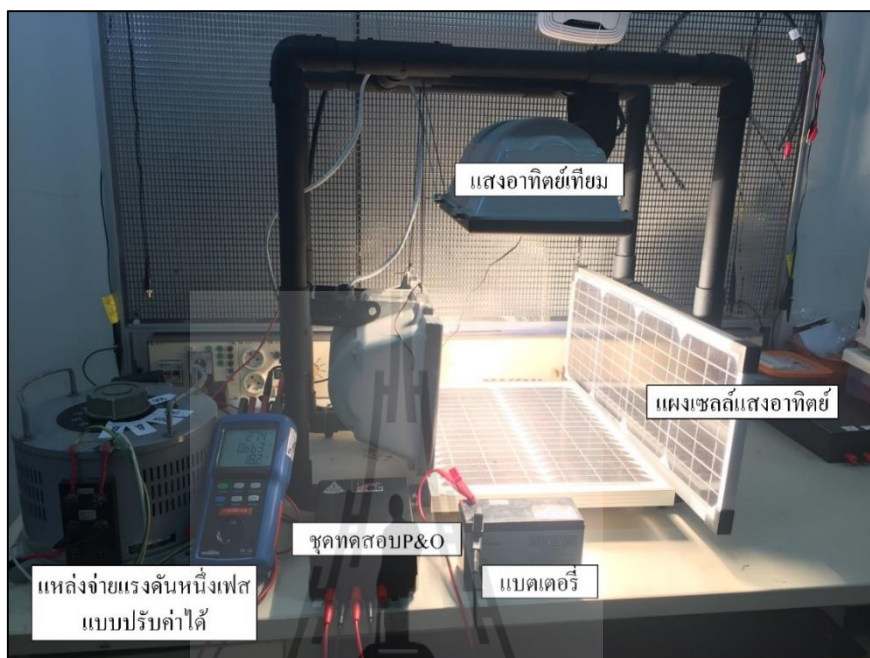
Δd	ความเข้มแสง(W/m ²)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)
$\varepsilon_s = 0.1$				
0.01	400	28.45	0.365	10.38
	1000	30.12	0.681	20.51
0.05	400	28.69	0.354	10.156
	1000	30.02	0.655	19.66
0.1	400	28.32	0.321	9.09
	1000	29.88	0.668	19.96

จากตารางที่ 5.4 ผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบพบว่า ค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ $\varepsilon_s = 0.05$ และ $\Delta d = 0.01$ ซึ่งจะทำให้ค่า P_{pv} มีค่ามากที่สุดที่ความเข้มแสงที่ทำการทดสอบ เมื่อความเข้มแสง 400 W/m² P_{pv} มีค่าเท่ากับ 12.19 W และเมื่อความเข้มแสง 1000 W/m² P_{pv} มีค่าเท่ากับ 21.81 W ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้ค่า $\varepsilon_s = 0.05$ และ $\Delta d = 0.01$ โดยค่านี้นำไปป้อนในโปรแกรมของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA 2560 และแสดงโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในภาคผนวก ก.

5.6 ผลการทดสอบชุดทดสอบ P&O

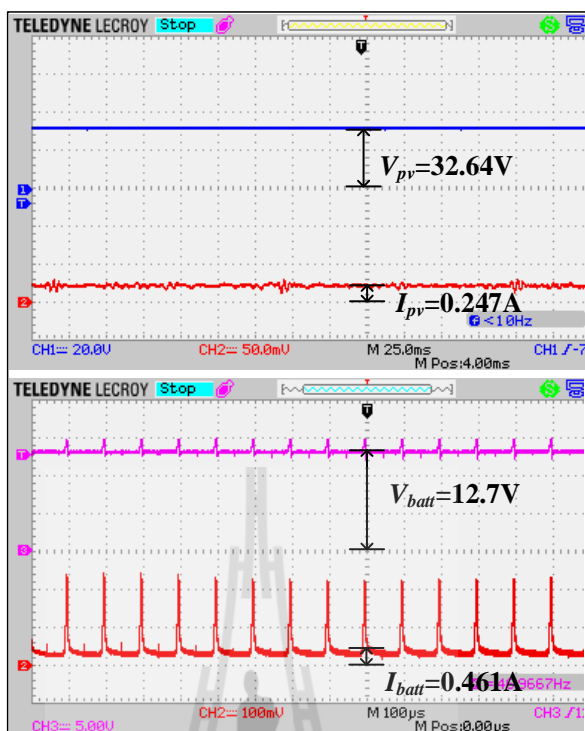
การทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดำเนินการทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์เทียมที่สร้างขึ้น และทำการปรับความเข้มแสง (ดังอธิบายดังผลการทดสอบชุดทดสอบด้วยวิธี VOC ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.5) สำหรับการทดสอบชุดทดสอบวิธี P&O อินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนเอาต์พุตของชุดทดสอบคือแบตเตอรี่ โดยการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 (คู่มือการใช้งานชุดซาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต แสดงในภาคผนวก ง2.) และผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.25 โดยช่องสัญญาณที่ 1, 2 คือ สัญญาณแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามลำดับ และช่องสัญญาณที่ 3, 4 คือ สัญญาณแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ ตามลำดับ โดยรูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.25 เป็นรูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง

200 W/m² 400 W/m² 600 W/m² 800 W/m² และ 1000 W/m² ตามลำดับ และผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O แสดงได้ดังตารางที่ 5.5

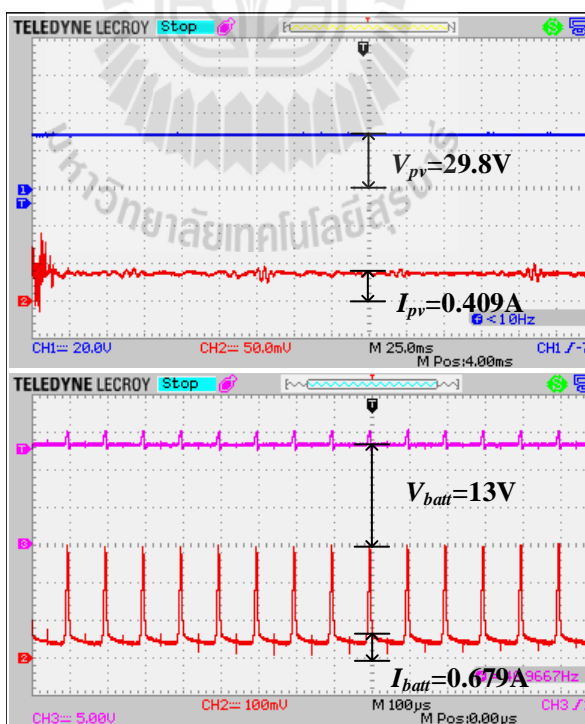


รูปที่ 5.20 การทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

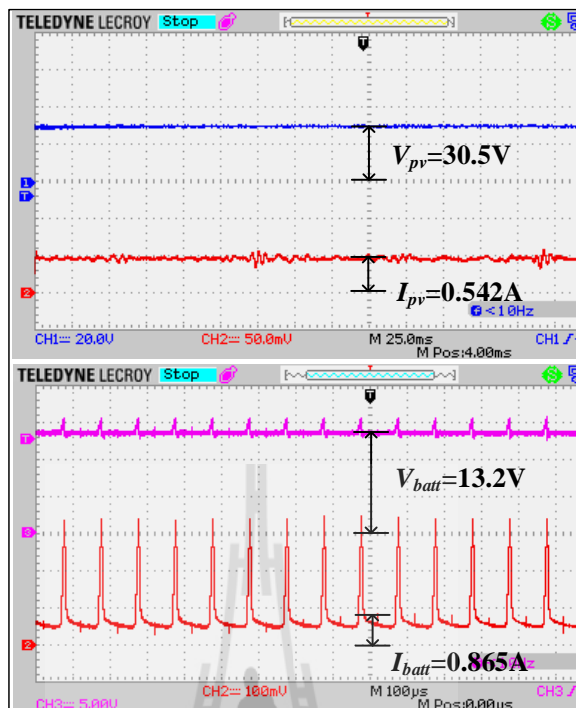




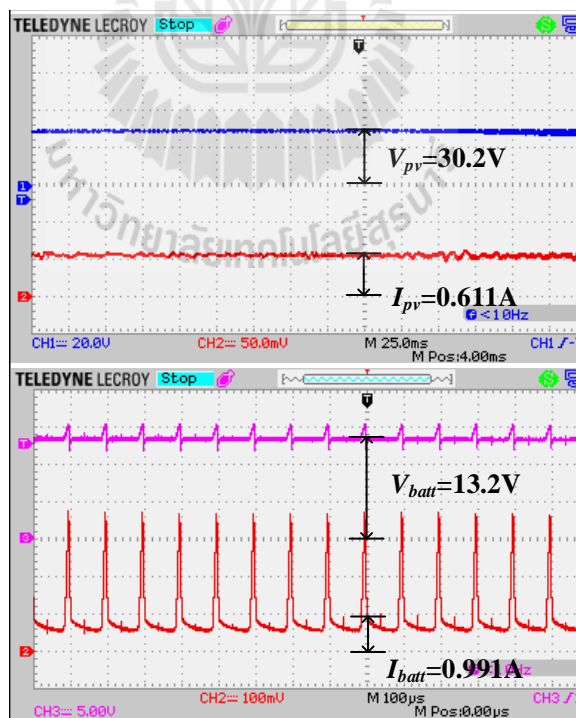
รูปที่ 5.21 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 200 W/m^2 อุณหภูมิ 36.5°C



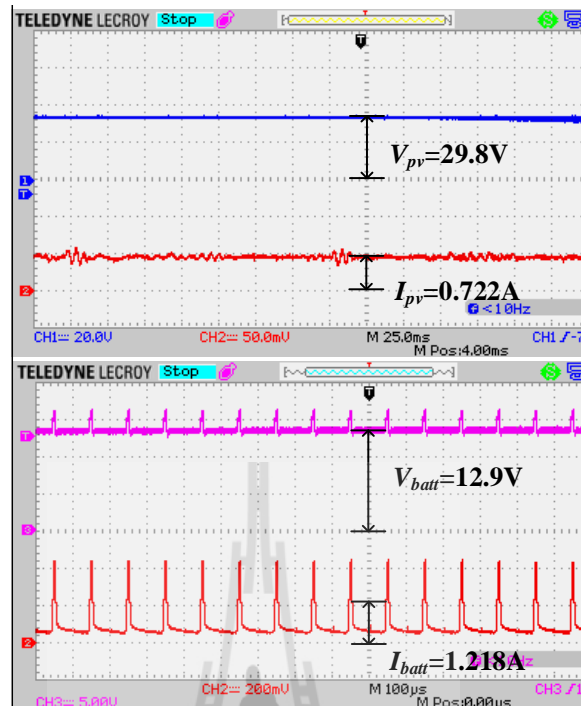
รูปที่ 5.22 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2 อุณหภูมิ 36.7°C



รูปที่ 5.23 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 600 W/m^2 อุณหภูมิ $38.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.24 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 800 W/m^2 อุณหภูมิ $38.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.25 รูปสัญญาณแรงดันและกระแส เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 40°C

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{pv}	I_{pv}	P_{pv}	V_{batt}	I_{batt}	P_{batt}
200	32.6	0.247	8.05	12.7	0.461	5.85
400	29.8	0.409	12.19	13	0.679	8.83
600	30.5	0.542	16.53	13.2	0.865	11.42
800	30.2	0.611	18.45	13.2	0.991	13.08
1000	29.8	0.732	21.81	12.9	1.218	15.71

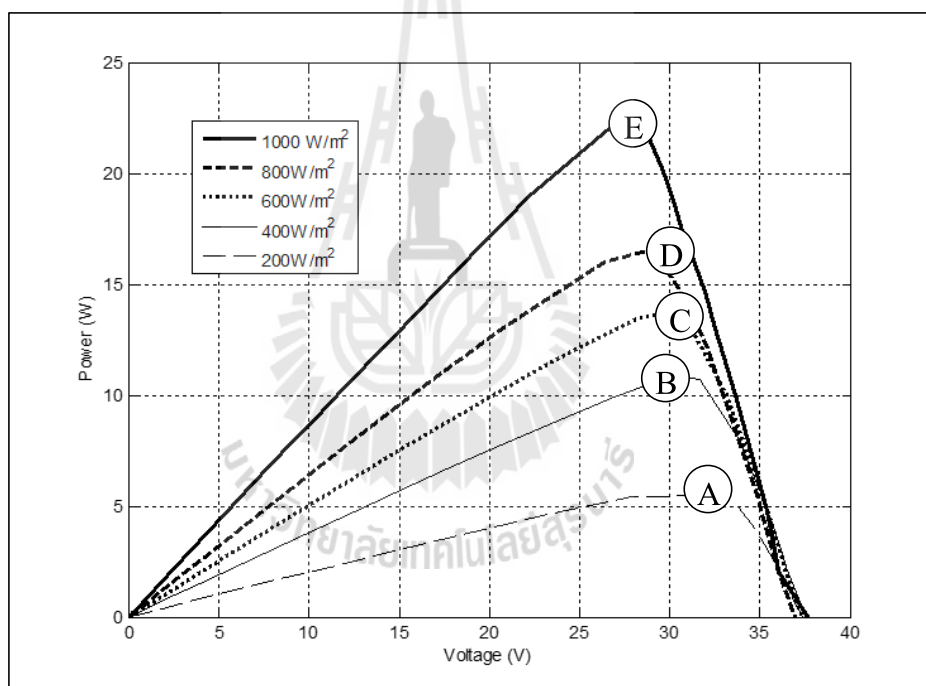
จากผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในตารางที่ 5.5 และรูปสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 5.21 ถึงรูปที่ 5.25 นำมาสร้างเป็นแผนภาพการตั้งกำลังสูงสุดที่สภาวะความเข้มแสงต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.6 ดังนี้

ตารางที่ 5.6 แผนภาพผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

ความเข้มแสง (W/m ²)	แผนภาพ
200	<p> $V_{pv}=32.6V$ $I_{pv}=0.247A$ $P_{pv}=8.05W$ </p> <p>MPPT P&O</p> <p> $V_{bat}=12.7V$ $I_{bat}=0.461A$ $P_{bat}=5.85W$ </p> <p>Battery</p>
400	<p> $V_{pv}=29.8V$ $I_{pv}=0.409A$ $P_{pv}=12.19W$ </p> <p>MPPT P&O</p> <p> $V_{bat}=13V$ $I_{bat}=0.679A$ $P_{bat}=8.83W$ </p> <p>Battery</p>
600	<p> $V_{pv}=30.5V$ $I_{pv}=0.542A$ $P_{pv}=16.53W$ </p> <p>MPPT P&O</p> <p> $V_{bat}=13.2V$ $I_{bat}=0.865A$ $P_{bat}=11.42W$ </p> <p>Battery</p>
800	<p> $V_{pv}=30.2V$ $I_{pv}=0.611A$ $P_{pv}=18.45W$ </p> <p>MPPT P&O</p> <p> $V_{bat}=13.2V$ $I_{bat}=0.991A$ $P_{bat}=13.08W$ </p> <p>Battery</p>
1000	<p> $V_{pv}=29.8V$ $I_{pv}=0.732A$ $P_{pv}=21.81W$ </p> <p>MPPT P&O</p> <p> $V_{bat}=12.9V$ $I_{bat}=1.218A$ $P_{bat}=15.71W$ </p> <p>Battery</p>

จากผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O หรือ MPPT P&O ในตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า ด้านอินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งค่า V_{pv} มีค่าใกล้เคียงแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด และค่า P_{pv} มีค่าใกล้เคียงกำลังที่จุดกำลังสูงสุด โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200 W/m² $V_{pv} = 32.6V$, $P_{pv} = 8.05W$ แสดงได้ดังจุด A ในรูปที่ 5.26 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 400 W/m² $V_{pv} = 29.8V$, $P_{pv} = 12.19W$ แสดงได้ดังจุด B ในรูปที่ 5.26 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m² $V_{pv} = 30.5V$, $P_{pv} = 16.53W$ แสดงได้ดังจุด C ในรูปที่

5.26 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 800 W/m^2 $V_{pv} = 30.2 \text{ V}$, $P_{pv} = 18.45 \text{ W}$ แสดงได้ดังจุด D ในรูปที่ 5.26 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $V_{pv} = 29.8 \text{ V}$, $P_{pv} = 21.81 \text{ W}$ แสดงได้ดังจุด E ในรูปที่ 5.26 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าคุณค่าแรงดันและกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงจุดกำลังสูงสุด เนื่องจากค่า $\varepsilon_s = 0.05$ และ $\Delta d = 0.01$ ที่เลือกใช้ทำให้ชุดทดสอบสามารถดึงกำลังที่ใกล้เคียงจุดกำลังสูงสุดในทุกสภาวะความเข้มแสงได้ ส่วนด้านเอาต์พุตของชุดทดสอบคือแบตเตอรี่ ซึ่งค่า V_{batt} จะมีค่าใกล้เคียงแรงดันแบตเตอรี่เท่ากับ 12 V และเมื่อค่ากระแสที่ประจุลงแบตเตอรี่มีค่าสูงจะทำให้แรงดันแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $200, 400, 600, 800$ และ 1000 W/m^2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ P_{batt} จะมีค่าเท่ากับ $5.85, 8.83, 11.42, 13.08$ และ 15.71 W ตามลำดับ



รูปที่ 5.26 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์

จากแผนภาพการดึงกำลังสูงสุดที่สภาวะความเข้มแสงต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่สร้างขึ้นสามารถดึงจุดกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ซึ่งถ้าความเข้มแสงมีค่ามาก กำลังที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่ามาก ดังนั้นชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

5.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O โดยได้อธิบายหลักการทำงาน ไดอะแกรม และแผนผังการทำงานการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากนั้นได้ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB พบว่าระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสามารถดึงจุดกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง ซึ่งในบทนี้ยังได้อธิบายถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวิธี P&O โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานร่วมกับตัวตรวจจับกระแส และตัวตรวจจับแรงดัน และนำเสนอการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รวมทั้งการทดสอบหาค่าความผิดพลาด และค่าวัฏจักรหน้าที่ และแสดงผลการทดสอบชุดทดสอบ ซึ่งพบว่าชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O สามารถดึงกำลังสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ สภาวะความเข้มแสงขณะนั้นมาประจุลงแบตเตอรี่ได้ ซึ่งจะนำเสนอการเปรียบเทียบผลการตามรอยกำลังสูงสุดของวิธี VOC และวิธี P&O รวมทั้งการเปรียบเทียบกับชุดชาร์จที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดไว้ในบทที่ 6

บทที่ 6

การเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของวิธีต่าง ๆ

6.1 บทนำ

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC และวิธี P&O ที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 และบทที่ 5 ตามลำดับ พบว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถดึงกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ระหว่างวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ในบทนี้จะเรียกว่า MPPT VOC และวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในบทนี้จะเรียกว่า MPPT P&O เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด โดยในบทนี้จะเรียกว่า Without MPPT อีกทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นของวิธี MPPT VOC และ วิธี MPPT P&O เปรียบเทียบกับชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดที่ไม่มีวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (Commercial charger without MPPT) โดยจะเรียกว่า Com. without MPPT และชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (MPPT Commercial charger) จะเรียกว่า MPPT Com. นอกจากนี้บทนี้ยังได้วิเคราะห์ถึงเศรษฐศาสตร์ของชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่สร้างขึ้น

6.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB ของวิธี MPPT VOC ดังรูปที่ 4.1 ในบทที่ 4 และวิธี MPPT P&O ดังรูปที่ 5.4 ในบทที่ 5 เปรียบเทียบกับระบบ Without MPPT ซึ่งการจำลองสถานการณ์จะอาศัยค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และวงจรแปลงผันแบบบuckดังตารางที่ 6.1 ซึ่งจะใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ค่าเดียวกันในทุก ๆ วิธี

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Panel)	
พิจารณาที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000W/m^2 และ อุณหภูมิ 25°C	
V_{oc}	43.125 V
I_{sc}	1.1 A
I_{mpp}	1.033 A
V_{mpp}	38.73 V
P_{max}	40 W
วงจรแปลงผันแบบบัก (Buck Converter)	
f_{sw}	10 kHz
V_{pv}	38.73 V
C_1	1000 μF
C_2	2200 μF
L	10 mH
แบตเตอรี่	
V_{batt}	12 V
ค่าสถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC)	100 เปอร์เซ็นต์

การจำลองสถานการณ์จะทำการวัดค่า V_{pv} , I_{pv} , P_{pv} , V_{batt} , I_{batt} และ I_{load} ของวิธีต่าง ๆ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 และการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 5 ช่วง ดังนี้

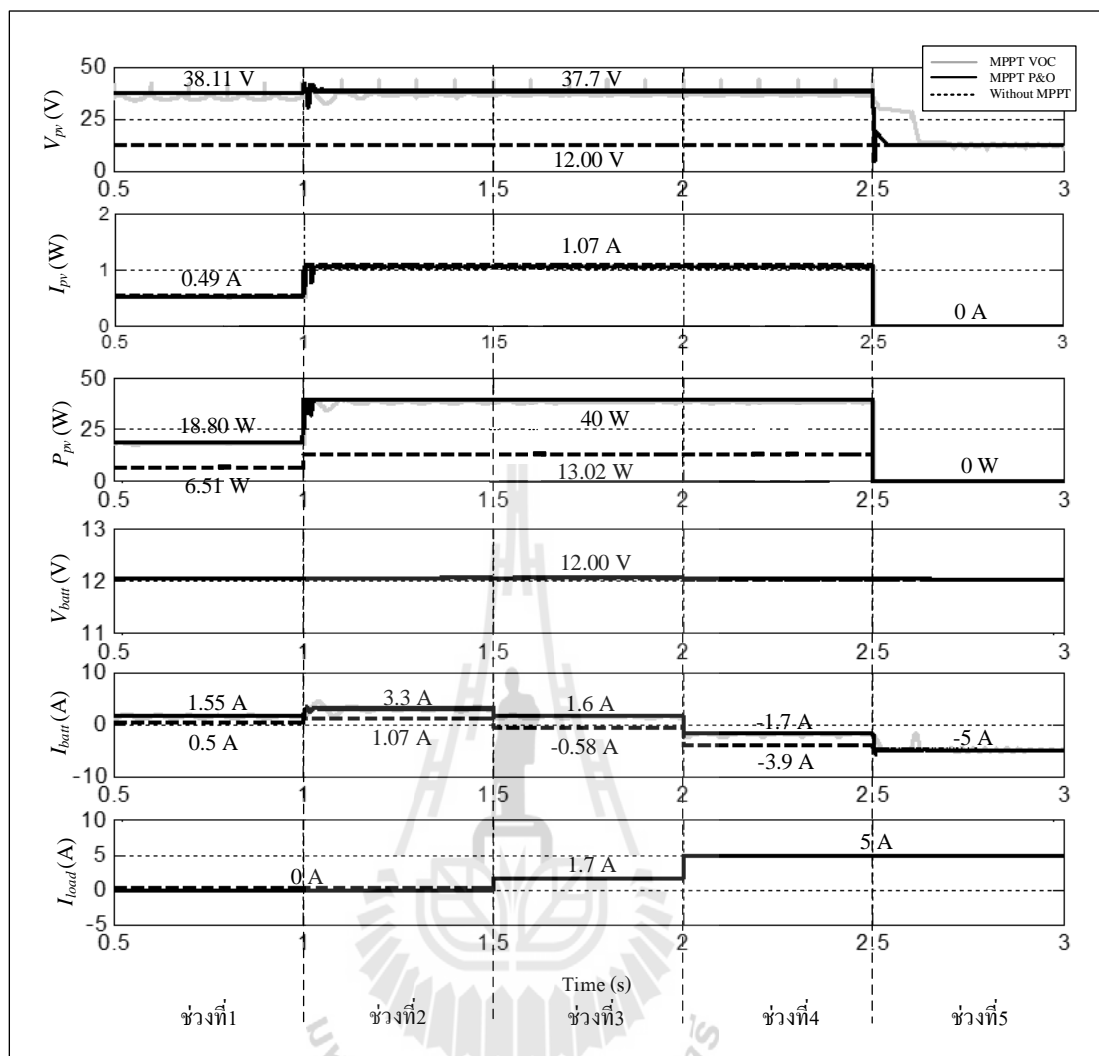
ช่วงที่ 1 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500W/m^2 และไม่มีภาระจ่ายโหลด

ช่วงที่ 2 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000W/m^2 และไม่มีภาระจ่ายโหลด

ช่วงที่ 3 : ภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 20W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000W/m^2

ช่วงที่ 4 : ภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 60W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000W/m^2

ช่วงที่ 5 : เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 0W/m^2 (ไม่มีแสงอาทิตย์) และภาระจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 60 W

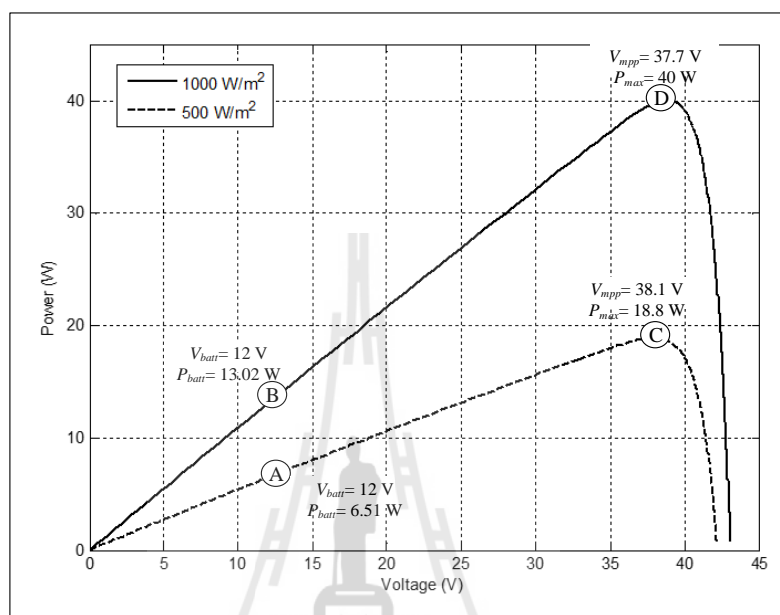


รูปที่ 6.1 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีต่าง ๆ

ช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2

จากรูปที่ 6.1 การจำลองสถานการณ์ของระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT VOC แสดงด้วยกราฟเส้นทึบสีเทา และระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT P&O แสดงด้วยกราฟเส้นทึบสีดำ และระบบ Without MPPT แสดงด้วยกราฟเส้นประสีดำ ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่า ระบบ Without MPPT แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับแรงดันของเอาต์พุตซึ่งก็คือแบตเตอรี่ 12V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $P_{pv} = 6.51 \text{ W}$ แสดงได้จุด A ในรูปที่ 6.2 และจากรูปที่ 6.1 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $P_{pv} = 13.02 \text{ W}$ แสดงได้จุด B ในรูปที่ 6.2 และผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.1 ระบบ MPPT VOC และ MPPT P&O แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าใกล้เคียง

แรงดันที่ จุดกำลังสูงสุด โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 $V_{pv} = 38.1\text{V}$ และ $P_{pv} = 18.8\text{W}$ แสดงได้จุด C ในรูปที่ 6.2 และจากรูปที่ 6.1 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 $V_{pv} = 37.7\text{V}$ และ $P_{pv} = 40\text{W}$ แสดงได้จุด D ในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และจุดกำลังที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 และ 1000 W/m^2

จากรูปที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m^2 และ 1000 W/m^2 ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดทั้งวิธี MPPT VOC และวิธี MPPT P&O สามารถดึงกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

ช่วงที่ 3

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด โหลดต้องการกำลังไฟฟ้า 20 W หรือกระแส 1.7 A แต่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียง 13.02 W หรือ 1.07 A ซึ่งไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จึงมีค่าติดลบเท่ากับ -0.58 A ซึ่งหมายถึงแบตเตอรี่ช่วยจ่ายกระแสให้โหลด แต่ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 3.3 A ซึ่งมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด และโหลดต้องการกำลังไฟฟ้า 20 W หรือกระแส 1.7 A ดังนั้นกระแสประจุลงแบตเตอรี่จะมีค่า 1.6 A

ช่วงที่ 4

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด โหลดต้องการกำลังไฟฟ้า 60 W หรือกระแส 5 A แต่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียง 13.02 W หรือ 1.07 A ซึ่งไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่า -3.9 A และมีค่าติดลบมากกว่าในช่วงที่ 3 แต่ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เพียง 40 W หรือ 3.3 A ไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จึงมีค่าติดลบเท่ากับ -1.7 A ซึ่งหมายถึงแบตเตอรี่ช่วยจ่ายกระแสให้โหลดเช่นกัน

ช่วงที่ 5

จากรูปที่ 6.1 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ $0\text{W}/\text{m}^2$ หรือไม่มีแสงอาทิตย์ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ของวิธีต่าง ๆ มีค่าเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่ คือ 12V แต่โหลดต้องการกำลังไฟฟ้า 60W ทำให้กระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่าติดลบมากกว่าช่วงที่ 4 เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ หรือหมายถึงกระแสที่ออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 0 A ดังนั้นจึงมีเพียงแค่แบตเตอรี่จ่ายกระแสให้โหลด -5 A

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสามารถดึงจุดกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ มาประจุลงแบตเตอรี่ได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด โดยวิธี MPPT P&O จะสามารถดึงกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีกว่าวิธี MPPT VOC เนื่องจากวิธี MPPT VOC มีการแกว่งของสัญญาณซึ่งระบบพยายามตามรอยจุดกำลังสูงสุดและวิธีดังกล่าวจะต้องพึ่งพาการกำหนดค่า k ที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว ทำให้ดึงกำลังจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้น้อยกว่าวิธี MPPT P&O โดยผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.1 กรณีที่ไม่มีโหลด พลังงานทั้งหมดจะทำการเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ โดยกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ จะมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังซึ่งหมายถึง ระบบสามารถอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้เร็วขึ้น สำหรับกรณีที่มีการจ่ายโหลด ในกรณีที่พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่โหลดต้องการ พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ดังในช่วงที่ 3 ของการจำลองสถานการณ์ แต่ถ้าพลังงานที่โหลดต้องการมีค่ามากกว่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดทันที ดังในช่วงที่ 4 ของการจำลองสถานการณ์ และในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดแทนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีแต่พลังงานสำรองของระบบมาใช้จ่ายโหลดทั้งหมด ดังในช่วงที่ 5 ของการจำลองสถานการณ์ ดังนั้นจากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังมีประโยชน์และมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบ

6.3.1 ผลการทดสอบชุดทดสอบ

การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT VOC และวิธี MPPT P&O ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง ระบบมีความสามารถในการถ่ายโอนกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และแสดงให้เห็นว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติจึงมีความจำเป็นในการสร้างชุดทดสอบ ซึ่งชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT VOC แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ในบทที่ 4 และชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT P&O แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ในบทที่ 5 ซึ่งในหัวข้อนี้แนะนำการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของวิธี MPPT VOC และวิธี MPPT P&O เปรียบเทียบกับ Com. without MPPT แสดงได้ดังรูปที่ 6.3 และ MPPT Com. แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งการดำเนินการทดสอบจะใช้แสงอาทิตย์เทียม และทำการปรับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ โดยอินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนเอาต์พุตของชุดทดสอบคือแบตเตอรี่



รูปที่ 6.3 ชุดชาร์จ Com. without MPPT



รูปที่ 6.4 ชุดชาร์จ MPPT Com.

ผลการทดสอบชุดทดสอบ MPPT VOC แสดงได้ดังตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบชุดทดสอบ MPPT P&O แสดงได้ดังตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบชุดชาร์จ Com. without MPPT แสดงได้ดังตารางที่ 6.4 และผลการทดสอบชุดชาร์จ MPPT Com. แสดงได้ดังตารางที่ 6.5 และแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบของวิธีต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบของวิธีต่าง ๆ ในตารางที่ 6.6 สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพการดิ่งกำลังงานของวิธีต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบชุดทดสอบ MPPT VOC

ความเข้มแสง(W/m ²)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	27.64	0.253	6.993	12.5	0.39	4.845
400	27.65	0.414	11.447	12.54	0.639	8.013
600	27.81	0.548	15.240	12.55	0.818	10.266
800	27.83	0.664	18.479	12.7	0.915	11.621
1000	28.32	0.756	21.409	12.85	1.195	15.356

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบชุดทดสอบ MPPT P&O

ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	32.6	0.247	8.05	12.7	0.461	5.85
400	29.8	0.409	12.19	13	0.679	8.83
600	30.5	0.542	16.53	13.2	0.865	11.42
800	30.2	0.611	18.45	13.2	0.991	13.08
1000	29.8	0.732	21.81	12.9	1.218	15.71

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบชุดชาร์จ Com. without MPPT

ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	12.87	0.096	1.24	12.35	0.096	1.19
400	13.55	0.261	3.54	12.44	0.261	3.25
600	14.47	0.521	7.54	12.52	0.521	6.52
800	17.54	0.751	13.17	12.6	0.751	9.46
1000	18.49	0.875	16.18	12.66	0.875	11.08

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบชุดชาร์จทั่ว MPPT Com.

ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	13.10	0.34	4.44	12.10	0.29	3.50
400	13.40	0.55	7.38	12.10	0.52	6.23
600	13.20	0.77	10.12	12.10	0.73	8.83
800	12.90	0.95	12.19	12.10	0.90	10.85
1000	12.80	1.01	12.93	12.10	0.95	11.54

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบของวิธีต่าง ๆ

ความเข้มแสง(W/m ²)	MPPT VOC						MPPT P&O						Com. without MPPT						MPPT Com.					
	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	27.64	0.25	6.99	12.5	0.39	4.84	32.6	0.24	8.05	12.7	0.461	5.85	12.87	0.096	1.24	12.35	0.096	1.19	13.10	0.34	4.44	12.10	0.29	3.50
400	27.65	0.41	11.44	12.54	0.63	8.01	29.8	0.40	12.19	13	0.679	8.83	13.55	0.261	3.54	12.44	0.261	3.25	13.40	0.55	7.38	12.10	0.52	6.23
600	27.81	0.54	15.24	12.55	0.81	10.26	30.5	0.54	16.53	13.2	0.865	11.42	14.47	0.521	7.54	12.52	0.521	6.52	13.20	0.77	10.12	12.10	0.73	8.83
800	27.83	0.66	18.47	12.7	0.91	11.62	30.2	0.61	18.45	13.2	0.991	13.08	17.54	0.751	13.17	12.6	0.751	9.46	12.90	0.95	12.19	12.10	0.90	10.85
1000	28.32	0.75	21.40	12.85	1.19	15.35	29.8	0.73	21.81	12.9	1.218	15.71	18.49	0.875	16.18	12.66	0.875	11.08	12.80	1.01	12.93	12.10	0.95	11.54

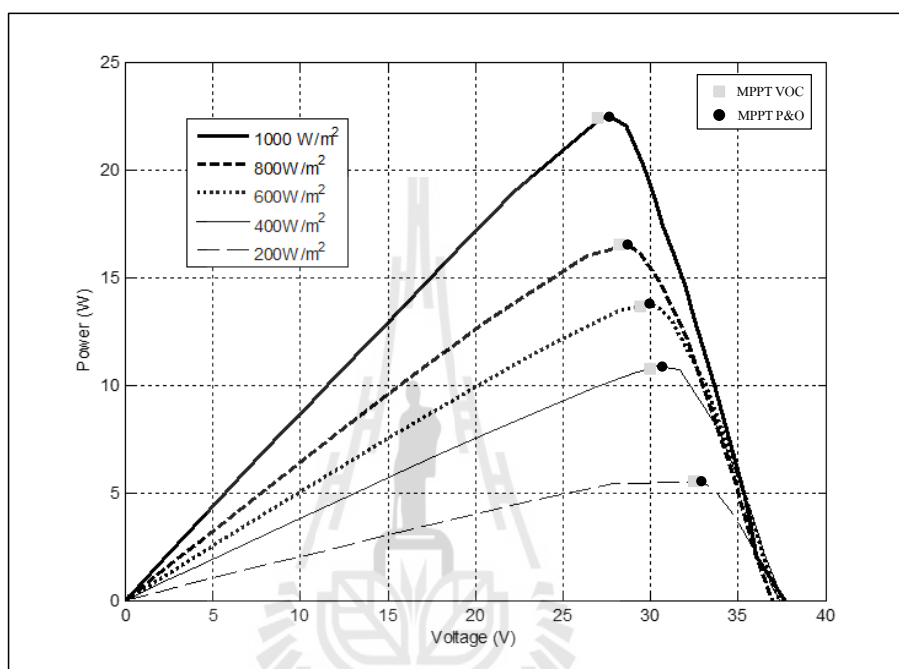


ตารางที่ 6.7 แผนภาพการติดตั้งกำลังงานของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ

ความเข้มแสง (W/m ²)	MPPT VOC	MPPT P&O	Com. without MPPT	MPPT Com.
200				
400				
600				
800				
1000				

จากผลการทดสอบชุดทดสอบของวิธีต่าง ๆ ในตารางที่ 6.7 จะเห็นได้ว่า ด้านอินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเอาต์พุตของชุดทดสอบคือแบตเตอรี่ ซึ่งผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT VOC เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² ด้านอินพุตของชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 27.64, 27.65, 27.81, 27.83 และ 28.54 V ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ P_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 6.993, 11.447, 15.24, 18.479 และ 21.40 W ตามลำดับ ส่วนด้านเอาต์พุตของชุดทดสอบ แรงดันจะมีค่าใกล้เคียงแรงดันของแบตเตอรี่ 12 V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² กำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ P_{batt} จะมีค่าเท่ากับ 4.873, 8.013, 10.266, 11.621 และ 15.356 W ตามลำดับ และผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT P&O เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² ด้านอินพุตของชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 32.6, 29.8, 30.5, 30.2 และ 29.8 V ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ P_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 8.05, 12.19, 16.53, 18.45 และ 21.81 W ตามลำดับ ส่วนด้านเอาต์พุตของชุดทดสอบ แรงดันจะมีค่าใกล้เคียงแรงดันของแบตเตอรี่ 12 V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² กำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ P_{batt} จะมีค่าเท่ากับ 5.85, 8.83, 11.42, 13.08 และ 15.71 W ตามลำดับ และผลการทดสอบชุดทดสอบชุดชาร์จ Com. without MPPT เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² ด้านอินพุตของชุดชาร์จแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 12.87, 13.55, 14.47, 17.54 และ 18.49 V ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ P_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 1.24, 3.54, 7.54, 13.17 และ 16.18 W ตามลำดับ ส่วนด้านเอาต์พุตของชุดชาร์จ แรงดันจะมีค่าใกล้เคียงแรงดันของแบตเตอรี่คือ 12 V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² กำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ P_{batt} จะมีค่าเท่ากับ 1.19, 3.25, 6.52, 9.46 และ 11.08 W ตามลำดับ และผลการทดสอบชุดทดสอบชุดชาร์จ MPPT Com. เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² ด้านอินพุตของชุดชาร์จแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 13.10, 13.40, 13.20, 12.90 และ 12.80 V ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ P_{pv} จะมีค่าเท่ากับ 4.44, 7.38, 10.12, 12.19 และ 12.93 W ตามลำดับ ส่วนด้านเอาต์พุตของชุดชาร์จ แรงดันจะมีค่าเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่คือ 12.10 V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² กำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ P_{batt} จะมีค่าเท่ากับ 3.50, 6.23, 8.83, 10.85 และ 11.54 W ตามลำดับ

จากผลการทดสอบชุดทดสอบของวิธีต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} และกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ P_{pv} ของชุดทดสอบวิธี MPPT VOC และ ชุดทดสอบวิธี MPPT P&O มีค่าใกล้เคียงจุดกำลังสูงสุดของกราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ ดังในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลัง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์

จากผลการทดสอบสามารถเรียงลำดับชุดทดสอบที่สามารถดึงค่ากำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากมากไปน้อยได้แก่ MPPT P&O, MPPT VOC, MPPT Com. และ Com. without MPPT ตามลำดับ และสามารถเรียงลำดับชุดทดสอบที่ค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่จากมากไปน้อยได้แก่ MPPT P&O, MPPT VOC, MPPT Com. และ Com. without MPPT ตามลำดับ ดังนั้นชุดทดสอบวิธี MPPT P&O สามารถดึงค่ากำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ มีค่ามากกว่าชุดทดสอบอื่น ๆ อีกทั้งค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากชุดทดสอบยังมีค่าน้อยอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT P&O ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าชุดชาร์จ Com. without MPPT และชุดชาร์จ MPPT Com. รวมทั้งดีกว่าชุดทดสอบ MPPT VOC เช่นกัน เนื่องจากชุดทดสอบ MPPT VOC เป็นฟังก์ชันการกำหนดค่า k ที่จะต้องดำเนินการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงและเลือกค่าที่เหมาะสมเพียงค่าเดียวสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ทำให้ระบบตามรอยจุดกำลังด้วยวิธี VOC ไม่

สามารถดึงกำลังสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ในทุก ๆ สภาพความเข้มแสงมาใช้งานได้ และถ้าเปลี่ยนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะต้องดำเนินการทดสอบหาค่า k แต่สำหรับชุดทดสอบ MPPT P&O ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาค่าใด ๆ เพียงแค่กำหนดค่าความผิดพลาดและการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ อีกทั้งชุดทดสอบ MPPT P&O ยังสามารถนำไปใช้งานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทุกแผง

6.3.2 การจ่ายโหลดของชุดทดสอบ

การจ่ายโหลดของชุดทดสอบ จะดำเนินการทดสอบเฉพาะชุดทดสอบวิธี MPPT P&O แบ่งการการจำลองการจ่ายโหลดของชุดทดสอบออกเป็น 4 กรณี ได้แก่

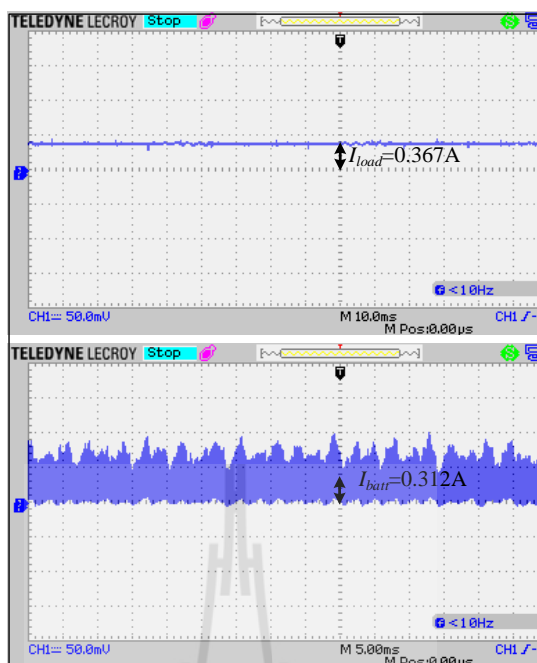
กรณีที่ 1 กรณีที่ไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า

กรณีที่ 2 กรณีที่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า เมื่อพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่โหลดต้องการ

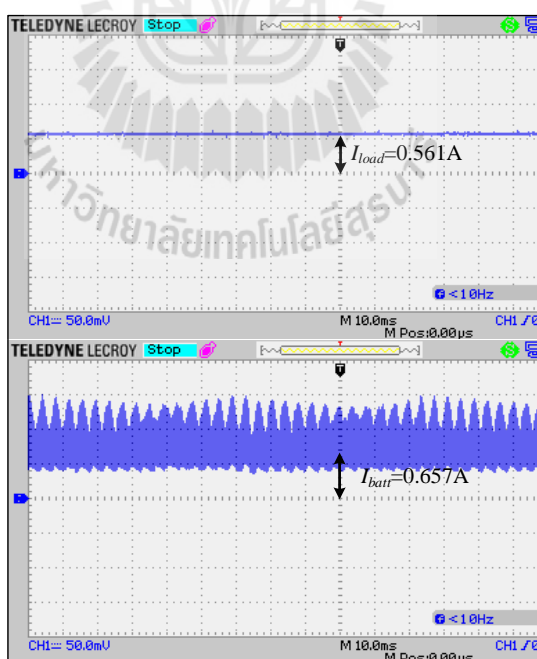
กรณีที่ 3 กรณีที่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า เมื่อพลังงานที่โหลดต้องการมีค่ามากกว่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้

กรณีที่ 4 กรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้

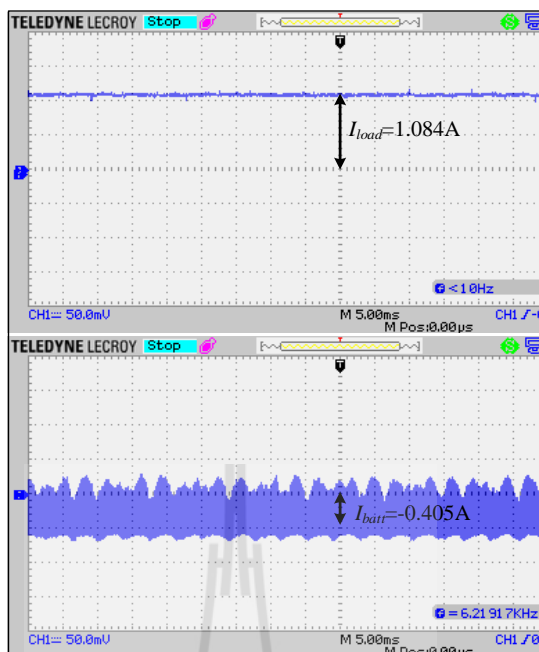
อินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนเอาต์พุตของชุดทดสอบคือ โหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบ จะเขียนแทนด้วย V_{out} , I_{out} และ P_{out} ตามลำดับ ผลการทดสอบการจ่ายโหลดของชุดทดสอบวิธี MPPT P&O แสดงได้ดังรูปที่ 6.6 ถึงรูปที่ 6.10 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้า และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณกระแสของแบตเตอรี่ ซึ่งรูปที่ 6.6 และ รูปที่ 6.7 แสดงสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 2 เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2 และ 1000 W/m^2 ตามลำดับ และรูปที่ 6.8 และ รูปที่ 6.9 แสดงสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 3 เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2 และ 1000 W/m^2 ตามลำดับ และรูปที่ 6.10 แสดงสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 4 เมื่อความเข้มแสง 0 W/m^2 และ ผลการทดสอบการจ่ายโหลดของชุดทดสอบวิธี MPPT P&O แสดงได้ดังตารางที่ 6.8



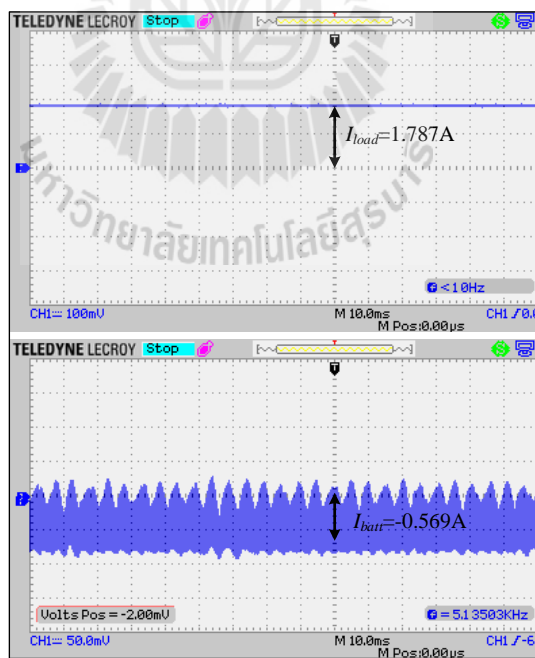
รูปที่ 6.6 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 2
เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2



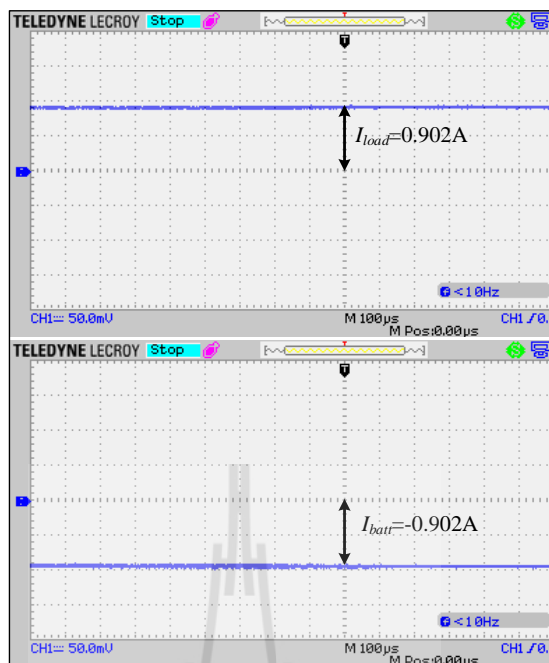
รูปที่ 6.7 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 2
เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m^2



รูปที่ 6.8 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 3
เมื่อความเข้มแสง 400 W/m^2



รูปที่ 6.9 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 3
เมื่อความเข้มแสง 1000 W/m^2



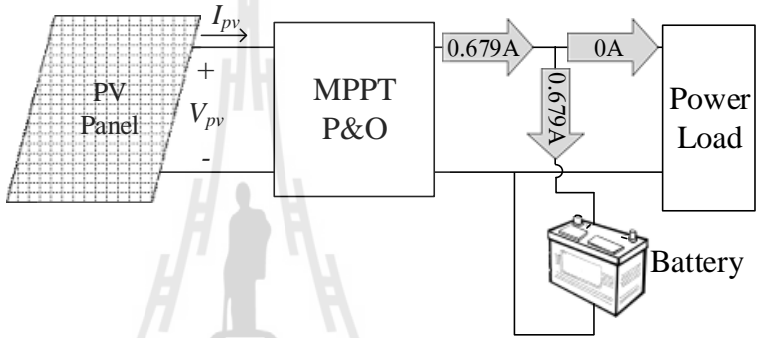
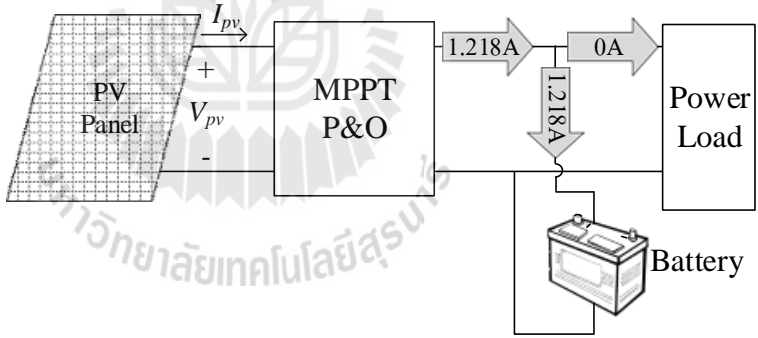
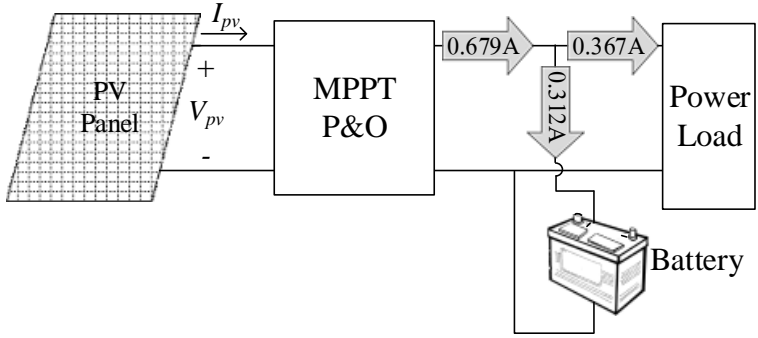
รูปที่ 6.10 รูปสัญญาณกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ในกรณีที่ 4
เมื่อความเข้มแสง 0 W/m^2

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบการจ่ายโหลดของชุดทดสอบวิธี MPPT P&O

ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P_{load} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
กรณีที่ 1									
400	13.0	0.679	8.83	0	0	0	13.0	0.679	8.83
1000	12.9	1.218	15.71	0	0	0	12.9	1.218	15.71
กรณีที่ 2									
400	13.0	0.679	8.83	13.0	0.367	4.771	13.0	0.312	4.056
1000	12.9	1.218	15.71	12.9	0.561	7.237	12.9	0.657	8.475
กรณีที่ 3									
400	13.0	0.679	8.83	13.0	1.084	14.09	13.0	-0.405	-5.265
1000	12.9	1.218	15.71	12.9	1.787	23.05	12.9	-0.569	-7.34
กรณีที่ 4									
0	12.9	0	0	12.9	0.902	11.63	12.9	-0.902	-11.63

จากผลการทดสอบการจ่ายโหลดของชุดทดสอบวิธี MPPT P&O ในรูปที่ 6.6 ถึงรูปที่ 6.10 และตารางที่ 6.8 นำมาสร้างเป็นแผนภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้า และแบตเตอรี่ในกรณีต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 6.9 ดังนี้

ตารางที่ 6.9 แผนภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้า และแบตเตอรี่

ความเข้มแสง (W/m^2)	แผนภาพ
กรณีที่ 1	
400	
1000	
กรณีที่ 2	
400	

ตารางที่ 6.9 แผนภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้า และแบตเตอรี่ (ต่อ)

ความเข้มแสง (W/m^2)	แผนภาพ
1000	
กรณีที่ 3	
400	
1000	
กรณีที่ 4	
0	

จากผลการจำลองการจ่ายโหลดของชุดทดสอบในตารางที่ 6.9 พบว่าถ้าในสภาวะที่ไม่มีการจ่ายโหลด พลังงานทั้งหมดจะทำการเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ โดยกระแสที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะถูกประจุลงแบตเตอรี่ทั้งหมด สำหรับกรณีที่มีการจ่ายโหลด ถ้าพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่โหลดต้องการพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แต่ถ้าพลังงานที่โหลดต้องการมีค่ามากกว่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดทันที สำหรับกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้หรือไม่มีแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายกระแสให้กับโหลดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีแต่พลังงานสำรองของระบบมาใช้จ่ายโหลดทั้งหมด

6.3.3 การตามรอยกำลังของแสงอาทิตย์จริงด้วยชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงการเปรียบเทียบการตามรอยกำลังของแสงอาทิตย์จริงด้วยชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบโดยการวัดค่าจากแสงอาทิตย์จริงในช่วงเวลา 6.00 นาฬิกา จนถึงเวลา 19.00 นาฬิกา โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มแสง ดังรูปที่ 4.46 ในบทที่ 4 ซึ่งค่าความเข้มแสงที่วัดได้จะมีค่าในหน่วยของ lux (100 lux มีค่าเท่ากับ 1 W/m^2) จากนั้นนำความเข้มแสงที่วัดได้จากแสงอาทิตย์จริงมาทดสอบหาการตามรอยกำลังของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน โดยทำการปรับความเข้มแสงของแสงอาทิตย์เทียมให้มีค่าความเข้มแสงเท่ากับค่าที่วัดได้จากแสงอาทิตย์จริงซึ่งสามารถทำได้ด้วยการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ การทดสอบดังกล่าวอินพุตของชุดทดสอบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ ส่วนเอาต์พุตของชุดทดสอบคือแบตเตอรี่ โดยสถานที่ทำการวัดค่าจากแสงอาทิตย์จริงคือ คาดฟ้าศูนย์เครื่องมีวิทยาสาสตร์และเทคโนโลยี 3 แสดงได้ดังรูปที่ 6.11 และผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 6.10



รูปที่ 6.11 คาดฟ้าศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3

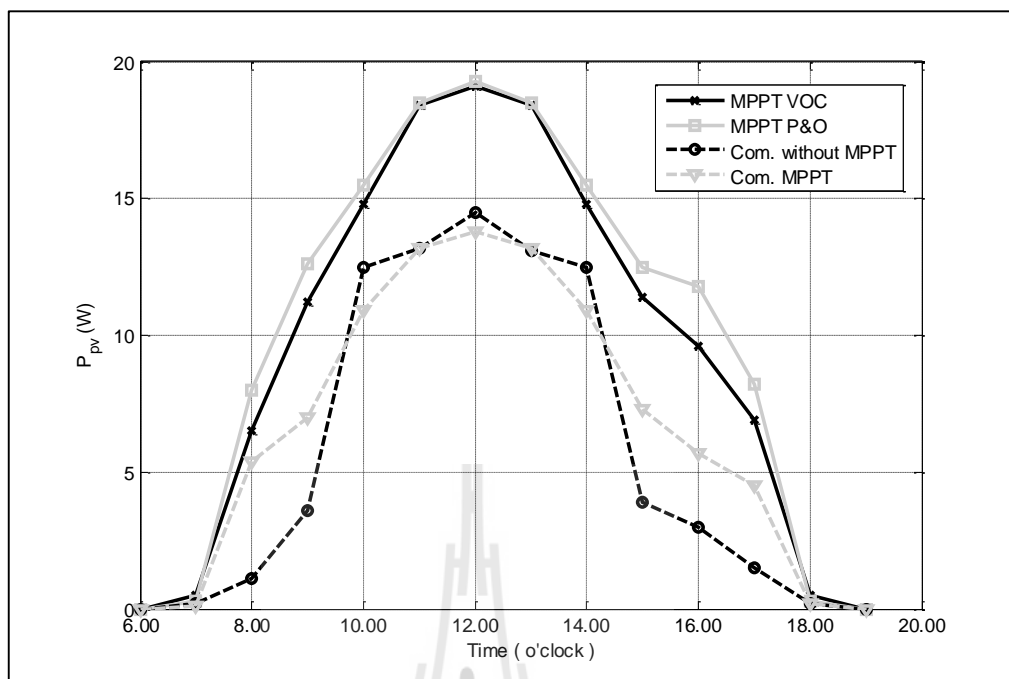
ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน

เวลา (นาฬิกา)	ความเข้มแสง		กำลังไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์(วัตต์)				กำลังไฟฟ้าที่ลงประจุแบตเตอรี่ (วัตต์)			
	lux	W/m ²	VOC	P&O	com. without MPPT	MPPT com.	VOC	P&O	com. without MPPT	MPPT com.
6:00 AM	25	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00 AM	4826	48.26	0.5	0.3	0.2	0.1	0	0	0.1	0
8:00 AM	16920	169.2	6.5	8	1.1	5.4	3.2	5.8	1	4.5
9:00 AM	42680	426.8	11.2	12.6	3.6	7	7.8	9.3	3.4	6
10:00 AM	67000	670	14.8	15.5	12.5	10.9	9.8	11	8.4	10
11:00 AM	79000	790	18.4	18.5	13.2	13.2	11.6	13.1	9.2	12.1
12:00 PM	86500	865	19.1	19.3	14.5	13.8	12.5	14	9.8	12.7

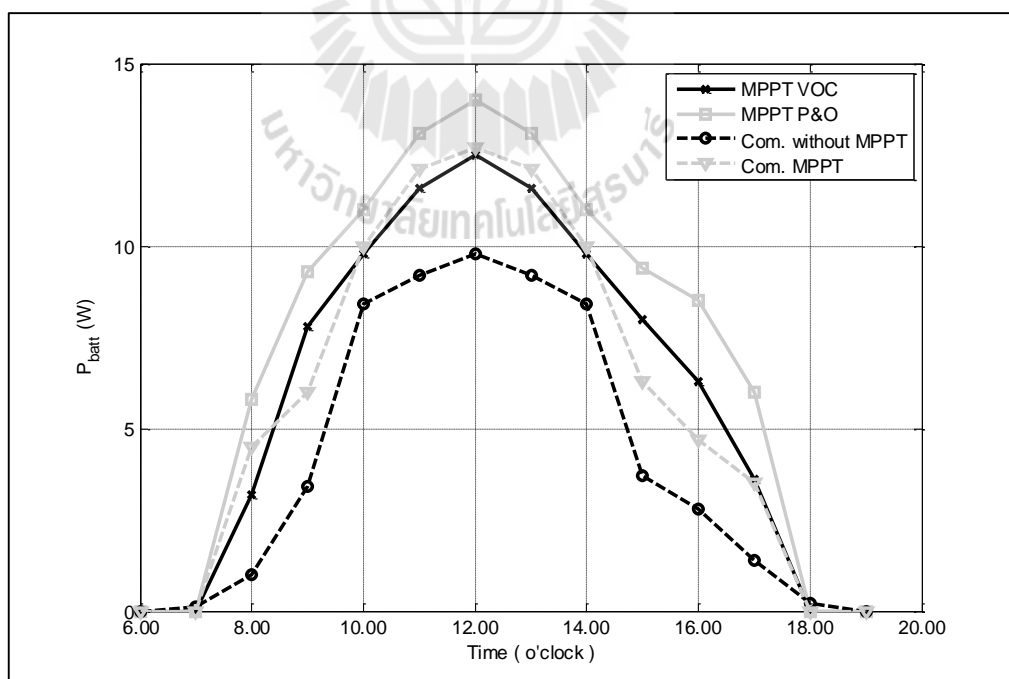
ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน (ต่อ)

เวลา (นาฬิกา)	ความเข้มแสง		กำลังไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์(วัตต์)				กำลังไฟฟ้าที่ลงประจุแบตเตอรี่ (วัตต์)			
	lux	W/m ²	VOC	P&O	com.without MPPT	MPPT com.	VOC	P&O	com.without MPPT	MPPT com.
1:00 PM	78600	786	18.4	18.5	13.1	13.2	11.6	13.1	9.2	12.1
2:00 PM	66100	661	14.8	15.5	12.5	10.9	9.8	11	8.4	10
3:00 PM	46320	463.2	11.4	12.5	3.9	7.3	8	9.4	3.7	6.3
4:00 PM	30440	304.4	9.6	11.8	3	5.7	6.3	8.5	2.8	4.7
5:00 PM	22000	220	6.9	8.2	1.5	4.5	3.6	6	1.4	3.5
6:00 PM	5430	54.3	0.5	0.3	0.2	0.2	0	0	0.2	0
7:00 PM	1070	10.7	0	0	0	0	0	0	0	0

จากผลการทดสอบในตารางที่ 6.10 นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วันแสดงได้ดังรูปที่ 6.12 และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วันแสดงได้ดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน



รูปที่ 6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่
ของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน

จากรูปที่ 6.11 นำมาวิเคราะห์หาค่าพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพลังงานได้จากพื้นที่ใต้กราฟแบบประมาณ พบว่าชุดทดสอบ MPPT VOC $E_{pv} = 132.1Whr/day$ ชุดทดสอบ MPPT P&O $E_{pv} = 141Whr/day$ ชุดทดสอบ Com. without MPPT $E_{pv} = 78.3Whr/day$ และชุดทดสอบ MPPT Com. $E_{pv} = 91.9Whr/day$ และจากรูปที่ 6.12 นำมาวิเคราะห์หาพลังงานที่ประจุลงแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพลังงานได้จากพื้นที่ใต้กราฟแบบประมาณ พบว่าชุดทดสอบ MPPT VOC $E_{batt} = 84.4Whr/day$ ชุดทดสอบ MPPT P&O $E_{batt} = 101.4Whr/day$ ชุดทดสอบ Com. without MPPT $E_{batt} = 55.9Whr/day$ และชุดทดสอบ MPPT Com. $E_{batt} = 81.9Whr/day$ โดยเมื่อพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ในเวลา 1 วันจะสามารถเรียงลำดับชุดทดสอบที่ค่าพลังงานที่ประจุลงแบตเตอรี่จากมากไปน้อยได้แก่ MPPT P&O, MPPT VOC, MPPT Com. และ Com. without MPPT ตามลำดับ ดังนั้นชุดทดสอบ MPPT P&O สามารถดึงพลังงานได้มากกว่าชุดทดสอบอื่น ๆ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ประจุลงแบตเตอรี่ใน 1 วันระหว่างชุดทดสอบ MPPT P&O มีค่ามากกว่าชุดทดสอบ MPPT VOC เท่ากับ $17Whr/day$ หรือ 20.14 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบระหว่างชุดทดสอบ MPPT P&O มีค่ามากกว่าชุดทดสอบ Com. MPPT เท่ากับ $45.5Whr/day$ หรือ 81.395 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบระหว่างชุดทดสอบ MPPT P&O มีค่ามากกว่าชุดทดสอบ MPPT Com. เท่ากับ $19.5Whr/day$ หรือ 23.81 เปอร์เซ็นต์

6.4 เศรษฐศาสตร์

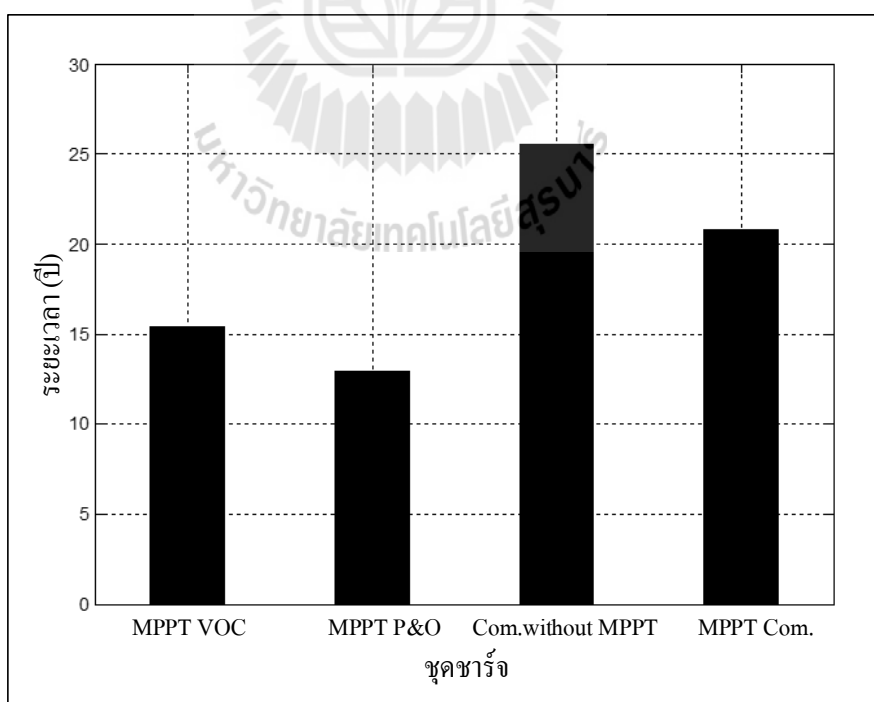
การประเมินราคาชุดทดสอบมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อใช้หาจุดคุ้มทุนของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งชุดทดสอบ MPPT VOC พิกัด 250 วัตต์ ที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ราคาชุดต้นแบบ 1400 บาท และชุดทดสอบ MPPT P&O พิกัด 250 วัตต์ ที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ราคาชุดต้นแบบ 1500 บาท ส่วนชุดชาร์จ Com. without MPPT พิกัด 96 วัตต์ ราคา 1000 บาท และ MPPT Com. พิกัด 120 วัตต์ ราคา 3000 บาท ซึ่งเมื่อใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ และทำการพิจารณาชุดทดสอบ MPPT P&O เปรียบเทียบกับ Com. without MPPT พบว่าชุดทดสอบ MPPT P&O สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้ $101.4Whr/day$ และชุดทดสอบ Com. without MPPT สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้ $55.9Whr/day$ ถ้าติดตั้งชุดทดสอบ MPPT P&O จะสามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้มากกว่าชุดชาร์จ Com. without MPPT เท่ากับ $45.5Whr$ หรือ 81.395 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 1 วัน

6.4.1 การประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและจุดคุ้มทุน ของแต่ละชุดชาร์จ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ซึ่งในระบบดังกล่าวจะประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดชาร์จ และแบตเตอรี่ การเปรียบเทียบระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจะเปรียบเทียบชุดชาร์จจำนวน 4 ชุดชาร์จ ได้แก่ ชุดชาร์จ MPPT VOC ชุดชาร์จ MPPT P&O ชุดชาร์จ Com. without MPPT และชุดชาร์จ MPPT Com. ดำเนินการประเมินราคาเพื่อหาจุดคุ้มทุนของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ การประเมินราคานี้จะพิจารณาให้ฟิสิกส์ของชุดชาร์จมีค่าเท่ากับ 250 วัตต์ และขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 250 วัตต์ โดยราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 วัตต์ เท่ากับ 30 บาท และแบตเตอรี่เลือกใช้ขนาด 40 Ah (คำนวณตามสมการที่ (3-6) โดยกำหนดให้ความต้องการในการใช้โหลดต่อชั่วโมงเท่ากับฟิสิกส์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ คือ 250 วัตต์) โดยราคาของแบตเตอรี่ 1 Ah เท่ากับ 70 บาท จากนั้นหาราคารวม ได้แก่ ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ราคาชุดชาร์จและราคาแบตเตอรี่ นำมาเปรียบเทียบค่าพลังงานใน 1 วัน โดยเปรียบเทียบกับค่าจากแผงแสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ เช่นถ้าใช้แผงแสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ใน 1 วัน ชุดชาร์จ MPPT VOC สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้ $84.4Whr/day$ แต่ ถ้าใช้แผงแสงอาทิตย์ขนาด 250 วัตต์ใน 1 วัน ชุดชาร์จ MPPT VOC สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้ $527.5Whr/day$ เป็นต้น และราคาคู่ทุน (บาท/day) คิดจาก 1 unit หรือ $1kWhr$ เท่ากับ 3.9361 บาท (อ้างอิงจากอัตราค่าไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย) ซึ่งการประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จแต่ละชุด แสดงได้ดังตารางที่ 6.11 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดคุ้มทุน (ปี) ของชุดชาร์จแต่ละชุดแสดงได้ดังรูปที่ 6.14

ตารางที่ 6.11 การประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและจุดคุ้มทุน
ของแต่ละชุดชาร์จ

ชุดชาร์จ	ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท)	ราคาชุดชาร์จ (บาท)	ราคาแบตเตอรี่ (บาท)	ราคารวม	จำนวน Whr/day	ราคาคุ้มทุน (บาท/day)	จุดคุ้มทุน	
							วัน	ปี
MPPT VOC	7500	1400	2800	11700	527.5	2.08	5635.04	15ปี5เดือน
MPPT P&O	7500	1500	2800	11800	633.75	2.49	4730.40	12ปี11เดือน
Com. without MPPT	7500	2500	2800	12800	349.375	1.38	9307.91	25ปี6เดือน
MPPT Com.	7500	5000	2800	15300	511.875	2.01	7593.84	20ปี9เดือน



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดคุ้มทุน (ปี) ของชุดชาร์จแต่ละชุดชาร์จ

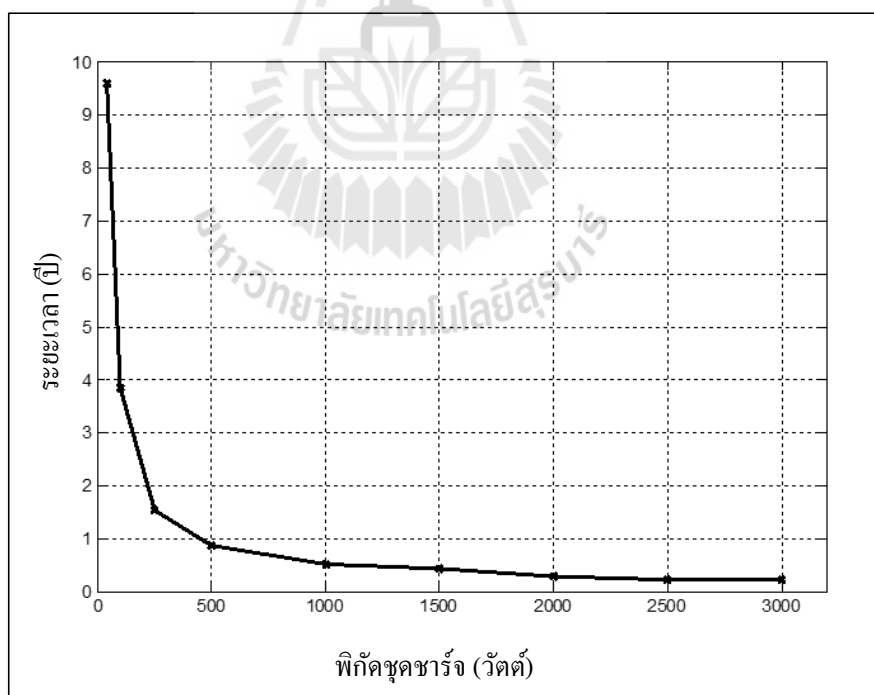
จากการประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและจุดคุ้มทุนของแต่ละชุดชาร์จในตารางที่ 6.11 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดคุ้มทุน (ปี) ของชุดชาร์จแต่ละชุดในรูปที่ 6.13 ถ้าทำการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดชาร์จพิกัดเท่ากับ 250 วัตต์ และแบตเตอรี่ พบว่า ถ้าใช้ชุดชาร์จ MPPT VOC คุ้มทุนที่ระยะเวลา 15 ปี 5 เดือน ถ้าใช้ชุดชาร์จ MPPT P&O คุ้มทุนที่ระยะเวลา 12 ปี 11 เดือน ถ้าใช้ชุดชาร์จ Com. without MPPT คุ้มทุนที่ระยะเวลา 25 ปี 6 เดือน และถ้าใช้ชุดชาร์จ MPPT Com. คุ้มทุนที่ระยะเวลา 20 ปี 9 เดือน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชุดทดสอบการตามรอยกำลังสูงสุดที่สร้างขึ้นด้วยวิธี VOC และวิธี P&O ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถคุ้มทุนเร็วกว่าชุดชาร์จที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด และสามารถเรียงลำดับจุดคุ้มทุนเป็นปีของชุดชาร์จจากน้อยไปมากได้แก่ MPPT P&O, MPPT VOC, MPPT Com. และ Com. without MPPT ตามลำดับ ซึ่งถ้าพิจารณาชุดชาร์จ MPPT P&O จะเห็นได้ว่าสามารถคุ้มทุนเร็วกว่าชุดชาร์จอื่น ๆ ดังนั้นถ้าพิกัดชุดชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นจะสามารถคุ้มทุนได้เร็วขึ้น ซึ่งจะประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนเมื่อพิกัดของชุดชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นได้ดังหัวข้อถัดไป

6.4.2 การประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จ MPPT P&O

จากการประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและจุดคุ้มทุนของแต่ละชุดชาร์จที่พิกัด 250 วัตต์ในหัวข้อที่ 6.4.1 จะเห็นได้ว่าชุดชาร์จ MPPT P&O คุ้มทุนเร็วกว่าชุดชาร์จ อื่น ๆ และถ้าเพิ่มพิกัดของชุดชาร์จ MPPT P&O จะประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบการตามรอยกำลังของแสงอาทิตย์จริงด้วยชุดทดสอบวิธี MPPT P&O ในหัวข้อ 6.3.2 เมื่อพิกัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์และพิกัดชุดชาร์จ MPPT P&O เท่ากับ 40 W พบว่าชุดทดสอบ MPPT P&O สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้ 101.4Whr/day เมื่อเปลี่ยนพิกัดของชุดชาร์จจะสามารถคำนวณหาพลังงานได้จากการเปรียบเทียบกับพิกัดชุดชาร์จ 40 W เช่นถ้าใช้ชุดชาร์จ MPPT P&O ขนาด 40 วัตต์ใน 1 วัน สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้ 101.4Whr/day แต่ถ้าใช้ชุดชาร์จ MPPT P&O ขนาด 250 วัตต์ใน 1 วัน สามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้ 633.75Whr/day เป็นต้น ซึ่งราคาคุ้มทุน (บาท/day) คิดจาก 1 unit หรือ 1kWhr เท่ากับ 3.9361 บาท การประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จ MPPT P&O แสดงได้ดังตารางที่ 6.12 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของชุดชาร์จ(วัตต์) และจุดคุ้มทุน (ปี) แสดงได้ดังรูปที่ 6.15

ตารางที่ 6.12 การประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จ MPPT P&O

พิกัดชุดชาร์จ (W)	ราคา	Whr/day	บาท/day	คุ้มทุน	
				วัน	ปี
40	1500	101.4	0.428	3505.43	9ปี7เดือน
250	1500	633.75	2.674	560.87	1ปี6เดือน
500	1700	1267.5	5.349	317.83	1ปี6เดือน
1000	2000	2535	10.698	186.96	10เดือน
1500	2300	3802.5	16.047	143.33	4เดือน
2000	2500	5070	21.395	116.84	3เดือน
2500	2600	7605	32.093	81.01	2เดือน
3000	3500	10140	42.791	81.79	2เดือน

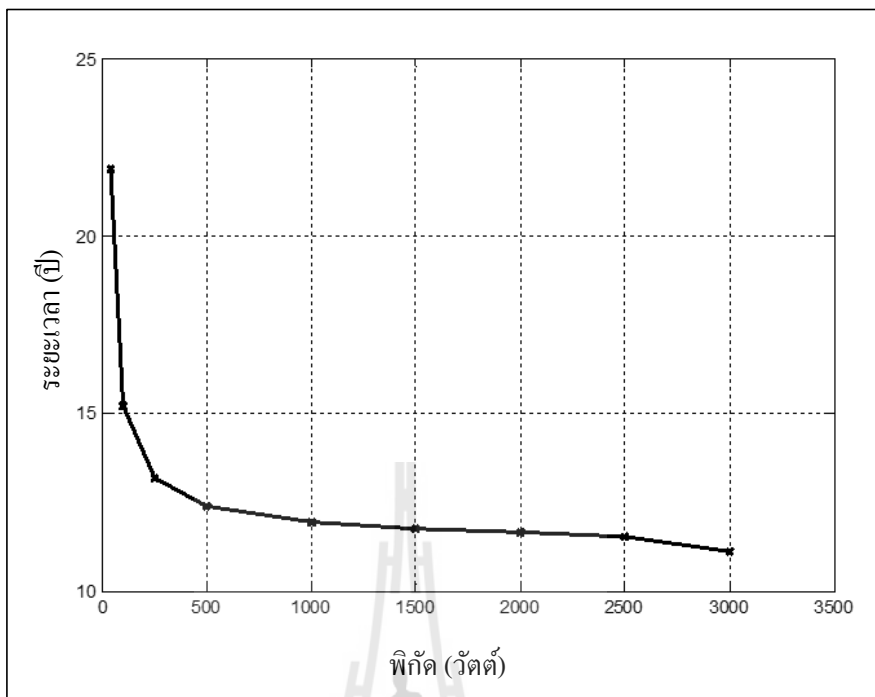


รูปที่ 6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของชุดชาร์จ และจุดคุ้มทุน (ปี)

การประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จ MPPT P&O ในตารางที่ 6.12 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของชุดชาร์จ และจุดคุ้มทุน (ปี) ในรูปที่ 6.14 พบว่ากราฟในรูปที่ 6.14 จะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยเมื่อพิกัดของชุดชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการคุ้มทุนก็จะเร็วขึ้น จากนั้นถ้าพิจารณาติดตั้งชุดชาร์จ MPPT P&O ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระซึ่งประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดชาร์จ MPPT P&O และแบตเตอรี่ เมื่อพิกัดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น และหาจุดคุ้มทุนเมื่อใช้ชุดชาร์จ MPPT P&O แสดงได้ดังตารางที่ 6.13 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดชุดชาร์จ และจุดคุ้มทุน (ปี) แสดงได้ดังรูปที่ 6.16

ตารางที่ 6.13 การประเมินราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและจุดคุ้มทุนของชุดชาร์จเมื่อพิกัดของชุดชาร์จ MPPT P&O มีค่าเพิ่มขึ้น

พิกัดชุดชาร์จ (W)	ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท)	ราคาชุดชาร์จ (บาท)	ราคาแบตเตอรี่ (บาท)	ราคารวม	จำนวน Whr/day	ราคาคุ้มทุน (บาท/day)	จุดคุ้มทุน	
							วัน	ปี
40	1200	1500	490	3190	101.4	0.40	7992.57	21ปี10เดือน
100	3000	1500	1050	5550	253.5	1.00	5562.23	15ปี2เดือน
250	7500	1500	2800	11800	633.75	2.49	4810.58	12ปี11เดือน
500	15000	1700	5600	22300	1267.5	4.99	4529.96	12ปี3เดือน
1000	30000	2000	11200	43200	2535	9.98	4359.59	11ปี10เดือน
1500	45000	2300	16800	64100	3802.5	14.97	4296.11	11ปี8เดือน
2000	60000	2500	22400	84900	5070	19.96	4259.36	11ปี7เดือน
2500	75000	2600	28000	104200	6337.5	24.95	4213.26	11ปี5เดือน
3000	90000	3500	34300	125000	7605	29.93	4058.92	11ปี4เดือน



รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ และจุดคุ้มทุน (ปี)

จากการประเมินราคาเมื่อเมื่อพิกัดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น และหาจุดคุ้มทุนเมื่อใช้ชุดชาร์จ MPPT P&O จากรูปที่ 6.15 พบว่าเมื่อพิกัดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น ระยะเวลาคุ้มทุนจะเร็วขึ้น ดังนั้นถ้านำชุดชาร์จ MPPT P&O ไปใช้งานจริงกับโหลดที่พิกัดสูง ๆ จะมีความคุ้มทุนที่เร็วขึ้น

6.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีต่าง ๆ ซึ่งพบว่าระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC และวิธี P&O เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังมีความสามารถในการดึงพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นของวิธี VOC และวิธี P&O เปรียบเทียบกับชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด และชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด จากผลการทดสอบพบว่าชุดทดสอบวิธี P&O สามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ มีค่ามากกว่าชุดทดสอบอื่น ๆ อีกทั้งในบทนี้ยังได้แสดงการทดสอบการตามรอย

กำลังของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ ในเวลา 1 วัน สำหรับการใช้งานชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ กับแสงอาทิตย์จริง จากการเปรียบเทียบการตามรอยกำลังของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่าถ้าติดตั้งชุดทดสอบในเวลา 1 วัน ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังงานสูงสุดด้วยวิธี P&O จะสามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้มากกว่าชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดเท่ากับ 45.5Whr หรือ 81.395 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้แสดงการประเมินราคาหาจุดคุ้มทุนของแต่ละชุดชาร์จ พบว่าชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่สร้างขึ้นด้วยวิธี P&O สามารถคุ้มทุนเร็วกว่าชุดชาร์จที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด รวมถึงชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่สร้างขึ้นด้วยวิธี VOC เช่นกัน



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดตามรอยจุดกำลังสูงสุดของ เซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจรและวิธีรบกวนและสังเกตุ เพื่อดึง พลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ประจุลงแบตเตอรี่ให้ได้มากที่สุด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ ผ่านมา ในบทที่ 2 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุด สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระมีหลายวิธี โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการตามรอย จุดกำลังสูงสุดสองวิธี ได้แก่ วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร และ วิธีรบกวนและสังเกตุ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะเฉพาะของเซลล์ แสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ และแบตเตอรี่ ซึ่งการทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวมีความ สำคัญมากสำหรับการหาแนวทางในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ อิสระ ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร หรือ วิธี VOC ได้ นำเสนอในบทที่ 4 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้อธิบายถึงหลักการทำงานของวิธี VOC รวมไปถึง การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB พบว่า ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร สามารถดึงกำลังจากเซลล์ แสงอาทิตย์ได้มากกว่าระบบที่ไม่มี การตามรอยจุดกำลังสูงสุด อีกทั้งในบทนี้ยังได้อธิบายโครงสร้าง ชุดทดสอบของวิธี VOC การออกแบบ การทดสอบวงจร และผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ชุดทดสอบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิด วงจร สามารถสร้างใช้งานได้จริง และสามารถดึงพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้ม แสงค่าต่าง ๆ ประจุลงแบตเตอรี่ได้ แต่การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC ต้องพึงพาการ กำหนดค่า k ที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว จึงนำไปสู่การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและ สังเกตุ

การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตุ หรือ วิธี P&O ได้นำเสนอในบทที่ 5 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้อธิบายถึงหลักการทำงานของวิธี P&O รวมไปถึงการจำลอง

สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB พบว่า ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต สามารถดึงกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด อีกทั้งในบทนี้ยังได้อธิบายโครงสร้างชุดทดสอบของวิธี P&O การออกแบบ การทดสอบวงจร การเขียน โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR และผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ชุดทดสอบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต สามารถสร้างใช้งานได้จริง และสามารถดึงพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ประจุลงแบตเตอรี่ได้มากที่สุด ส่งผลให้ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี MPPT P&O อาศัยแค่การกำหนดค่าความผิดพลาดและค่าวัฏจักรหน้าที่เท่านั้น

นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีการต่าง ๆ ซึ่งพบว่าระบบที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี VOC และวิธี P&O เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลัง มีความสามารถในการดึงพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด อีกทั้งทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นของวิธี VOC และวิธี P&O เปรียบเทียบกับชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด และชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด จากผลการทดสอบพบว่าชุดทดสอบวิธี P&O สามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุลงแบตเตอรี่ ได้มากกว่าชุดทดสอบอื่น ๆ และนอกจากนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบการตามรอยกำลังของชุดทดสอบวิธีต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มแสงจากแสงอาทิตย์จริง ในเวลา 1 วัน พบว่าถ้าติดตั้งชุดทดสอบในเวลา 1 วัน ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จะสามารถดึงพลังงานประจุลงแบตเตอรี่ได้มากกว่าชุดชาร์จทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดถึง 45.5Whr/day หรือ 81.395 เปอร์เซ็นต์

7.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรปรับปรุงและพัฒนา การเลือกใช้อัตราส่วนคงที่ หรือ ค่า k ของชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร เพื่อให้ระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีดังกล่าว มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

- ควรพัฒนาการคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ และค่าวัฏจักรหน้าที่ สำหรับอัลกอริทึมของชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ชุดทดสอบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

- Ahmed K. Abdelsalam, and Ahmed M. Massoud. High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 26, no. 4, April 2011.
- Huiying Zheng, Shuhui Li, Ke Bao, and Dong Zhang. **Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Control Strategies for Solar PV Systems**. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, FL, May 2012, pp.1-8.
- J. Ahmad, A Fractional Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays. **IEEE 2nd International Conference on Software Tech. and Engineering (ICSTE)**, Oct 2010, vol.1, pp.247-250.
- K. Kobayashi, H. Matsuo, and Y. Sekine. A novel optimum operating point tracker of the solar cell power supply system. **35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, 2004, pp. 2147-2151.
- L. Piegari and R. Rizzo. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. **IET on Renewable Power Generation**, vol. 4, no. 4, pp.317-328, July 2010.
- Mei Shan Ngan, and Chee Wei Tan. A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems. **IEEE Applied Power Electronics Colloquium Conference (IAPEC)**, Johor Bahru, Malaysia, April 2011, pp.22-27.
- N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System**, vol. 43, no. 3, pp. 934-950, Jul 2007.
- N. W. Vanden Eynde, S.Chowdhury, and S.P.Chowdhury. Modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic plant with MPPT feature and dedicated battery storage. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, July 2010, Minneapolis, MN, pp.1-8.

- R. Faranda, S. Leva, V. Maugeri. MPPT techniques for pv systems : energetic and cost comparison. **IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, 2008, pp-1-6.
- S.Ji, D. Jang, S. Han, C. Roh and S. Hong. Analog control algorithm for Maximum Power tracker employed in photovoltaic applications. **IPEC 2010 Conference Proc.**, pp.99-103, Oct 2010.
- S.K. Kollimalla and M.K. Mishra. Adaptive perturb & observe MPPT algorithm for photovoltaic system. **IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)**, Champaign, IL, Feb 2013, pp.42-47.
- S.M.Ferdous, Mahir Asif Mohammad, Farhan Nasrullah, Ahmed Mortuza Saleque and A.Z.M.Shahriar Muttalib. Design and Simulation of an Open Voltage Algorithm based Maximum Power Point Tracker for Battery Charging PV System. **IEEE 7th International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE)**, Dhaka, Bangladesh, Dec 2012, pp.908 - 911.
- S. Sreekanth, and I.J. Raglend. A comparative and analytical study of various incremental algorithms applied in solar cell. **IEEE International Conference on Computing, Electronics and Electrical Tech (ICCEET)**, Kumaracoil, March 2012, pp.452-456.
- T. Eswam, and Patrick L. Chapma. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Jun. 2007, vol.22, no.2, pp. pp.360-363.
- V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro. Review of maximum power point tracking algorithms for stand alone photovoltaic systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, July 2006, vol. 90, no. 11, pp-1555-1578
- Z. Liang, R. Guo and A. Huang. A new cost-effective analog maximum power point tracker for PV systems. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Sept. 2010, pp.624-631.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

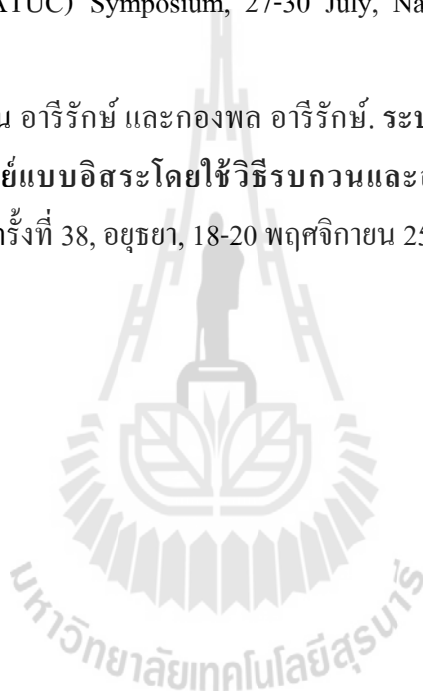


รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. ระบบควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีระบบตามรอยกำลังสูงสุด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37, ขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, vol 1, หน้า 545 – 548.

Patumporn Wongyai, Kongpan Areerak, and Kongpol Areerak. **Averaging model of buck converter fed by solar photovoltaic source.** 9th south east Asian technical university consortium (SEATUC) Symposium, 27-30 July, Nakhonratchasima, Thailand, vol 1, pp.409 - 412.

ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. ระบบตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้วิธีรบกวนและสังเกต. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, อุดรธานี, 18-20 พฤศจิกายน 2558, vol 2, หน้า 393 – 396.



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ระบบควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีระบบตามรอยกำลังสูงสุด Maximum Power Point Tracking for Stand-alone Photovoltaic

ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพัน อารีรักษ์* และกองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี email: kongpan@sut.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีระบบตามรอยกำลังสูงสุด เพื่อให้ได้กำลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุดที่ความเข้มแสงในสภาวะต่าง ๆ โดยใช้วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน สร้างจริงได้ง่ายด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก และประหยัดค่าใช้จ่าย วิธีการดังกล่าวจะนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงหินแบบบัสคัทเพื่อหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมที่นำเสนอ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยกำลัง สามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ระบบตามรอยกำลังสูงสุด วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร

Abstract

The paper presents the maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic to achieve the maximum power for each irradiance. The open-circuit voltage technique is used in the paper because it is simple and easy for implementation via an analog device. This method is operated with a buck converter to determine the maximum power point. The simulation results show that the system with the proposed algorithm can provide the maximum power from the stand-alone photovoltaic compared with the system without the maximum power point tracking control.

Keywords: stand-alone photovoltaic, maximum power point tracking, open voltage algorithm

1. บทนำ

เนื่องด้วยปัจจุบันการอนุรักษ์พลังงานและการหาแหล่งพลังงานทดแทนมีความสำคัญมาก พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะขณะใช้งาน มีความยั่งยืนและไม่มีการสิ้นเปลือง การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) แต่เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีข้อเสีย คือ ใช้ต้นทุนการผลิตและติดตั้งสูง ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงาน

แสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ และระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์นั้นโดยทั่วไปจะให้กำลังงานเอาต์พุตตามที่โหลดต้องการเท่านั้น จึงทำให้ไม่สามารถดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) มาใช้งานได้ ดังนั้นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นคือต้องใช้ระบบควบคุมการตามรอยกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Point tracking: MPPT) เพื่อให้ได้พลังงานสูงสุดในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอระบบควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุด ที่มีความสามารถในการถ่ายโอนกำลังเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด ระบบควบคุมที่นำเสนอในบทความนี้พัฒนามาจากงานวิจัยในอดีต [3] ซึ่งแรงดันแบตเตอรี่กำหนดให้มีค่าคงที่ แต่ในบทความนี้จะทำการปรับปรุงโดยการวัดค่าแรงดันแบตเตอรี่แล้วนำมันกลับให้กับสมการอ้างอิง ส่งผลให้สมการอ้างอิงเปลี่ยนแปลงเป็นปัจจุบันเสมอ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

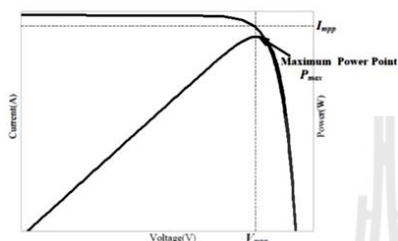
2. หลักการของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT Concept)

การดึงพลังงานที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ที่ความเข้มแสงในสภาวะต่าง ๆ มาใช้งาน จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด จากงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบันพบว่า วิธีการตามรอยกำลังงานสูงสุดที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายวิธีดังเช่น วิธีเทียบสัดส่วนกระแสขณะัดวงจร (Short-Circuit Current: ISC) [1] วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage: VOC) [3-4] วิธีรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation Method: P&O) [5-6] และวิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance: IncCond) [7] เป็นต้น ซึ่งกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุด เป็นการจัดการให้กำลังเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในระดับที่สูงสุด บทความนี้จะเลือกใช้วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน สร้างจริงได้ง่ายด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก และประหยัดค่าใช้จ่าย

ลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบจะส่งผลต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะมีผลต่อแรงดันที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าอุณหภูมิและ

PE046

ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่สามารถสร้างกราฟลักษณะเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงให้เห็นกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{max})



รูปที่ 1 ลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 กราฟลักษณะเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์มีความไม่เป็นเชิงเส้น โดยปกติค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับโหลดซึ่งไม่สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ แต่ถ้าสามารถเลือกจุดทำงานให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) ก็จะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

3. ระบบที่พิจารณา

จากรูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่พิจารณา ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (Stand-alone System) เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งานในพื้นที่ถิ่นทุรกันดารหรือห่างไกลจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบสามารถจ่ายกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร วิธีการดังกล่าวจะนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัพทักเพื่อหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และเนื่องจากเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานสำรอง ซึ่งก็คือ แบตเตอรี่

วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร จะใช้หลักการที่ว่าแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันขณะเปิดวงจร โดยกำหนดให้แรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด เท่ากับ k เท่าของแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) [8] ตัวควบคุมจะทำงานเป็นคาบเวลาโดยอาศัยวงจรตีวงเวลา (Timer) กำหนดช่วงเวลาทำงาน โหลดจะถูกตัดออกชั่วขณะหนึ่ง เพื่อทำการวัดแรงดันขณะเปิดวงจร และใช้วงจรสุ่มค่าและคงค่าสัญญาณ (Sample and Hold) ในการสุ่มค่าแรงดันมากกว่าไว้ในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อนำไปหาแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ดังสมการที่ (1)

$$V_{mpp} = kV_{oc} \tag{1}$$

เมื่อ k มีค่าประมาณ 0.71-0.78

กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิง (reference voltage: V_r) และวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle: d) ของวงจรแปลงผันแบบบัพทักเป็นดังสมการที่ (2)

$$d = 0.2V_r \tag{2}$$

โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัพทัก $V_o = dV_{pv}$ ที่การแทนค่า d จากสมการที่ (2) จะได้

$$V_o = 0.2V_r V_{pv} \tag{3}$$

เมื่อเราต้องการให้แรงดันอินพุตของระบบมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ($V_{pv} = V_{mpp} = kV_{oc}$) และเอาต์พุตของระบบคือแบตเตอรี่ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต $V_o = V_{batt}$ จากสมการที่ (3) จะได้

$$V_{batt} = 0.2V_r kV_{oc} \tag{4}$$

จากสมการที่ (4) จัดรูปใหม่ได้เป็น

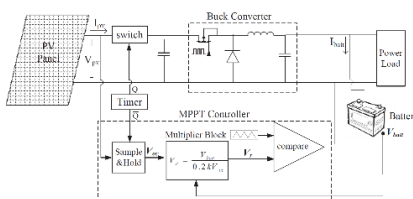
$$V_r = \frac{V_{batt}}{0.2kV_{oc}} \tag{5}$$

จากสมการที่ (5) จะได้ว่าแรงดันอ้างอิง V_r นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 10 kHz จะได้ว่าวัฏจักรหน้าที่ d นำสัญญาณที่ได้ไปขับสวิทช์ในวงจรมัก ดังรูปที่ 2 ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ค่า V_{mpp} ทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดออกมาได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องมีการอ่านค่า V_{oc} เป็นระยะ ๆ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าระบบสามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด สำหรับทุก ๆ ความเข้มแสงของพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากในแต่ละความเข้มแสง ค่าแรงดัน V_{oc} จะไม่เท่ากัน นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการคำนวณค่า V_r ในสมการที่ (5) ไม่ควรกำหนดให้ค่าแรงดันที่แบตเตอรี่ V_{batt} มีค่าคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นในบทความนี้จะทำการวัดค่าแรงดันดังกล่าวผ่านเซนเซอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณค่า V_r ให้มีความเหมาะสมมากที่สุด และปรับตามจุดการทำงานที่ค่าต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

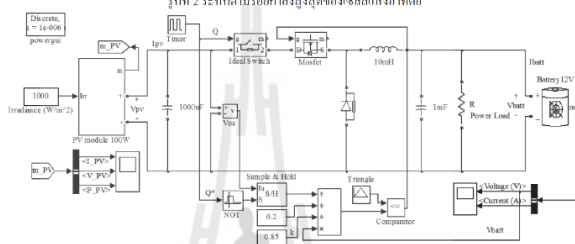
พารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณาในบทความ มีรายละเอียดดังนี้

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Panel): พิจารณาที่สถานะมาตรฐาน ความเข้มแสง $1000W/m^2$ และ อุณหภูมิ $25^\circ C$
- แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) = 22.4V
- กระแสลัดวงจร (I_{sc}) = 5.87A
- แรงดันที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) = 19.12V
- กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) = 106W
- วงจรแปลงผันแบบบัพทัก (Buck Converter):
- ความถี่ในการสวิทช์ (f_{sw}) = 10kHz
- แรงดันอินพุต (V_{pv}) = 19.12V
- แรงดันเอาต์พุต (V_{batt}) = 12V
- ตัวเก็บประจุ (Capacitor) = 1mF
- ความเหนี่ยวนำ (Inductance) = 10mH

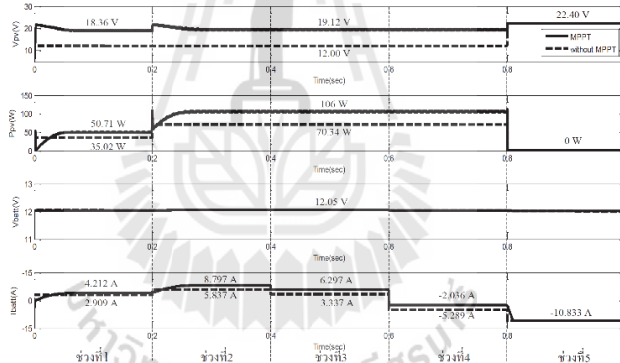
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น



รูปที่ 2 ระบาคอมรอกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3 การจำลองสถานการณ์ที่ระบาคอมรอกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB



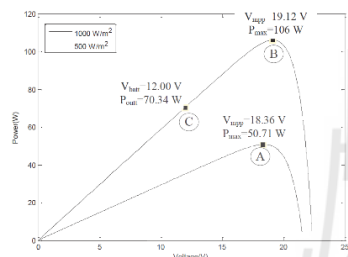
รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์ในเชิงต่างๆ

4. ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 5 ช่วง ดังนี้
ช่วงที่ 1: เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m² และไม่มีภาระจ่ายโหลด
ช่วงที่ 2: เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m² และไม่มีภาระจ่ายโหลด
ช่วงที่ 3: จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 30W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m²
ช่วงที่ 4: จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 130W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m²
ช่วงที่ 5: เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 0 W/m² (ไม่มีแสงอาทิตย์) และจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 130W

การจำลองสถานการณ์ในบทความนี้อาศัยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 5 ช่วง แสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยสามารถวิเคราะห์ผลในแต่ละช่วง ได้ดังนี้
ช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2
 จากรูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบที่ไม่มี การตามรอยกำลังแสดงด้วยกราฟเส้นประ (without MPPT) แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับแรงดันของอาทิตย์ฟิสิกส์คือ แมกเนตอร์รี่ 12V โดยมีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m² กำลังไฟฟ้า ($P_{pv} = V_{pv}I_{pv}$) จะเท่ากับ 35.02W และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m² P_{pv} จะเท่ากับ 70.34W ในขณะที่ระบบที่มีการตามรอยกำลัง (MPPT) แสดงด้วยกราฟเส้นทึบ V_{pv} จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่จุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งในสภาวะนี้คือมีค่าเท่ากับ 19.12V โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m² P_{pp} จะเท่ากับ 50.71W แสดงได้จุด A ในรูปที่ 5 และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m² P_{pp} จะเท่ากับ 106W แสดงได้จุด B ในรูปที่ 5 โดยเมื่อปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลังที่ความเข้มแสง 500 W/m² และ 1000 W/m²

ช่วงที่ 3

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 30 W จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่าลดลง เนื่องจากกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ จะแบ่งกระจายจ่ายให้โหลด

ช่วงที่ 4

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 130W เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เท่ากับ 106W จึงไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลด จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่าลดลง เนื่องจากแบตเตอรี่ช่วยจ่ายกระแสให้โหลด

ช่วงที่ 5

จากรูปที่ 4 เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 0W/m² หรือไม่มีแสงอาทิตย์ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร 22.40V เนื่องจากโหลดต้องการกำลังไฟฟ้า 130W กระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่าลดลงมากกว่าช่วงที่ 4 เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีเพียงแบตเตอรี่จ่ายกระแสให้โหลด

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยกำลัง (เส้นทึบ) สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ถ้าความเข้มแสงมีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่ามาก ถ้าในสภาวะดังกล่าวไม่มีโหลด พลังงานทั้งหมดจะทำการเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ โดยกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ จะมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีการตามรอยกำลัง (เส้นประ) ซึ่งหมายถึง ระบบสามารถอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้เร็วขึ้น สำหรับกรณีที่มีการจ่ายโหลด ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่โหลดต้องการ พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แต่ถ้า

พลังงานที่โหลดต้องการมีค่ามากกว่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดทันที หรือแม้กระทั่งกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายโหลดแทนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีแค่พลังงานสำรองของระบบมาใช้จ่ายโหลดทั้งหมด จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการตามรอยกำลังมีประโยชน์และมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุป

ระบบควบคุมการตามรอยกำลังสูงสุดที่พัฒนาขึ้นโดยการใช้วงจรวัดค่าแรงดันแบตเตอรี่แล้วป้อนกลับให้กับสมการข้างต้นนั้น ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นระบบควบคุมที่นำเสนอ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการตามรอยกำลัง มีความสามารถในการจ่ายไอออนกำลังเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และโหลดได้สูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Diaz, A. Luna, and O. Duarte, "Improved MPPT short-circuit current method by a fuzzy short-circuit current estimator," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, Sept 2011, pp.211-218.
- [2] S.M.Ferdous, Mahir Asif Mohammad, Farhan Nasrullah, Ahmed Mortuza Saleque and A.Z.M.Shahriar Muttalib, "Design and Simulation of an Open Voltage Algorithm based Maximum Power Point Tracker for Battery Charging PV System," in *IEEE 7th International Conference on Elect. & Comput. Eng.*, Dhaka, Bangladesh, Dec 2012, pp.908 - 911.
- [3] J. Ahmad, "A Fractional Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays," in *IEEE 2nd International Conf. on Software Tech. and Eng.*, Oct 2010, vol.1 ,pp.247-250.
- [4] S.K. Kollimalla and M.K. Mishra, "Adaptive perturb & observe MPPT algorithm for photovoltaic system," in *IEEE Power and Energy Conf.*, Champaign, IL, Feb 2013, pp.42-47.
- [5] Ahmed K. Abdelsalam, and Ahmed M. Massoud, "High-Performance Adaptive Perturb and ObserveMPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids," in *IEEE Trans. Power. Electron.*, Vol. 26, no. 4, April 2011.
- [6] R. Faranda, S. Leva, V. Mageri, "MPPT techniques for pv systems: energetic and cost comparison," in *IEEE Power and Energy Conf.*, 21st Century, 2008, pp-1-6.
- [7] T.Esram, P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," in *IEEE Trans. Energy Conversion.*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, June 2007.

AVERAGING MODEL OF BUCK CONVERTER FED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC SOURCE

Patumporn Wongyai, Kongpan Areerak*, and Kongpol Areerak
Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,
School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand *kongpan@sut.ac.th

ABSTRACT

Recently, the solar photovoltaic sources have become a useful renewable energy for a power generation. Normally, the solar cell is operated with the power electronic devices. For analysis and design of such system, the mathematical model is required. Unfortunately, dynamic models of power converter are time-varying in nature because of their switching actions. As a result, the system analysis and design via the time-varying model is very complicated. Therefore, this paper presents the mathematical model of buck converter fed by the PV array. The proposed model is derived from the generalized state-space averaging method. This method is used to eliminate the switching behavior to achieve the time-invariant model suitable for a system analysis and design via the conventional control theory. The intensive time-domain simulations show that the resulting model can provide high accuracies in both transient and steady-state responses with fast simulation time compared with the exact topology model.

1. INTRODUCTION

Generally, dynamic models are very important for system analysis and design. Unfortunately, the models of power electronic based systems are time-varying in nature in which the system analysis and designs via these time-varying models are very complicated. Therefore, several approaches are commonly used for eliminating the switching actions to achieve the time-invariant model. Then, the classical linear control theory can be easily applied. This paper presents how to derive the dynamic model of the example system, a solar photovoltaic feeding a buck converter with a resistive load, by using the generalized state-space averaging (GSSA) method [1]-[4]. The derived model is validated by the intensive time-domain simulation via the exact topology model from SimPowerSystems™ (SPS™) of MATLAB.

The results show that the reported models provide high accuracies in both transient and steady-state responses. Moreover, the fast simulation time can be obtained. Hence, the reported model in the paper can then be applied as the objective function for the optimal controller design using the artificial intelligence techniques in the future works. However, the aim of this paper is focus on only how to derive the time-invariant model of the considered power system.

The paper is structured as follows. In Section 2, the considered system is illustrated. In Section 3, deriving the dynamic model of the considered system using the GSSA methods is explained. In Section 4, the model validation using the small-signal simulation is illustrated. Finally, Section 5 concludes and discusses the advantages of proposed model derived from the GSSA method.

2. STUDIED SYSTEM

The considered system is depicted in Fig. 1. It consists of a PV array, buck converter, and resistive load. It is assumed that the buck converter is operated under a continuous conduction mode (CCM). In Section 3, the model derivation using a GSSA method to achieve the time-invariant model due to eliminating switching actions of switch S_1 will be explained.

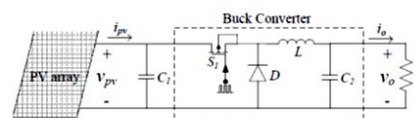


Fig. 1 The studied system

3. DYNAMIC MODEL

In this paper, the GSSA method is used to derive the dynamic model of buck converter in which the switching function under the CCM condition is firstly defined in (1).

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (1)$$

where d is the duty cycle of the switch S_1 as shown in Fig. 1.

Applying the KVL and KCL to Fig. 1, the time-varying model of the studied system is given by (2).

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_{pv} &= \frac{1}{C_1} i_{pv} - \frac{1}{C_1} i_L u(t) \\ \dot{i}_L &= \frac{1}{L} v_{pv} u(t) - \frac{1}{L} v_o \\ \dot{v}_o &= \frac{1}{C_2} i_L - \frac{1}{RC_2} v_o \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

By using the GSSA method, the zero and the first order components of the function $u(t)$ can be expressed as

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 e^{j\omega_s t} dt = \frac{1}{T_s} [t]_{t=0}^{t=dT_s} = d \quad (3)$$

$$\langle u \rangle_1 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 e^{-j\omega_s t} dt = \frac{\sin(2\pi d)}{2\pi} - j \frac{\sin^2(\pi d)}{\pi} \quad (4)$$

Based on the complex Fourier series, the first-order approximations of the actual states are denoted as

$$\left. \begin{aligned} v_{pv} &= \langle v_{pv} \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle v_{pv} \rangle_0 + \langle v_{pv} \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \\ i_L &= \langle i_L \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle i_L \rangle_0 + \langle i_L \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \\ v_o &= \langle v_o \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle v_o \rangle_0 + \langle v_o \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

The Fourier expansion leads to 9 state variables denoted by x_k as follows:

$$\begin{aligned} \langle v_{pv} \rangle_1 &= x_1 + jx_2 & \langle i_L \rangle_1 &= x_3 + jx_4 & \langle v_o \rangle_1 &= x_5 + jx_6 \\ \langle v_{pv} \rangle_0 &= x_7 & \langle i_L \rangle_0 &= x_8 & \langle v_o \rangle_0 &= x_9 \end{aligned}$$

For $k=1$, one can obtain $\frac{d}{dt} \langle v_{pv} \rangle_1$ and $\langle i_L u(t) \rangle_1$ as follows:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \langle v_{pv} \rangle_1 &= \frac{1}{C_1} \langle i_{pv} \rangle_1 - \frac{1}{C_1} \langle i_L u(t) \rangle_1 - j\omega_s \langle v_{pv} \rangle_1 \\ \langle i_L u(t) \rangle_1 &= \langle i_L \rangle_1 \langle u(t) \rangle_0 + \langle i_L \rangle_0 \langle u(t) \rangle_1 \end{aligned}$$

Therefore,

$$\frac{d}{dt} \langle v_{pv} \rangle_1 = \frac{1}{C_1} \langle i_{pv} \rangle_1 - \frac{1}{C_1} \langle i_L \rangle_1 \langle u(t) \rangle_0 - \frac{1}{C_1} \langle i_L \rangle_0 \langle u(t) \rangle_1 - j\omega_s \langle v_{pv} \rangle_1 \quad (6)$$

By substitution, the following relations for \dot{x}_1 and \dot{x}_2 can be obtained

$$\dot{x}_1 = \omega_s x_2 - \frac{d}{C_1} x_3 - \frac{\sin(2\pi d)}{2\pi C_1} x_8 \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 = -\omega_s x_1 - \frac{d}{C_1} x_4 + \frac{\sin^2(\pi d)}{\pi C_1} x_8 \quad (8)$$

Considering the terms $\frac{d}{dt} \langle i_L \rangle_1$ and $\frac{d}{dt} \langle v_o \rangle_1$, in a similar manner one can obtain $\dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5$ and \dot{x}_6 expressed as

$$\dot{x}_3 = \frac{d}{L} x_1 + \omega_s x_4 - \frac{1}{L} x_5 + \frac{\sin(2\pi d)}{2\pi L} x_7 \quad (9)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{d}{L} x_2 - \omega_s x_3 - \frac{1}{L} x_6 - \frac{\sin^2(\pi d)}{\pi L} x_7 \quad (10)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{C_2} x_3 - \frac{1}{RC_2} x_5 + \omega_s x_6 \quad (11)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_2} x_4 - \omega_s x_5 - \frac{1}{RC_2} x_6 \quad (12)$$

For $k=0$, $\frac{d}{dt} \langle v_{pv} \rangle_0$ and $\langle i_L u(t) \rangle_0$ can be derived and expressed by

$$\frac{d}{dt} \langle v_{pv} \rangle_0 = \frac{1}{C_1} \langle i_{pv} \rangle_0 - \frac{1}{C_1} \langle i_L u(t) \rangle_0$$

$$\langle i_L u(t) \rangle_0 = \langle i_L \rangle_0 \langle u(t) \rangle_0$$

Therefore,

$$\frac{d}{dt} \langle v_{pv} \rangle_0 = \frac{1}{C_1} \langle i_{pv} \rangle_0 - \frac{1}{C_1} \langle i_L \rangle_0 \langle u(t) \rangle_0 \quad (13)$$

Hence, \dot{x}_7 can be obtained by substitution as

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{C_1} i_{pv} - \frac{d}{C_1} x_8 \quad (14)$$

In a similar manner, considering $\frac{d}{dt} \langle i_L \rangle_0$ and $\frac{d}{dt} \langle v_o \rangle_0$, the terms \dot{x}_8 and \dot{x}_9 can be derived and expressed by

$$\dot{x}_8 = \frac{d}{L} x_7 - \frac{1}{L} x_9 \quad (15)$$

$$\dot{x}_9 = \frac{1}{C_2} x_8 - \frac{1}{RC_2} x_9 \quad (16)$$

Let $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_9]^T$ be the state vector, $u = [i_{pv}]$ and $y = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_9]$ be the input and the output, respectively. Hence, the obtained linear time-invariant model in the form of

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{cases} \quad (17)$$

The details of \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} and \mathbf{D} are show as follow:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & -\frac{d}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sin(2\pi f)}{2\pi C_1} \\ -\omega_s & 0 & 0 & -\frac{d}{C_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{\sin^2(\pi f)}{\pi C_1} \\ \frac{d}{L} & 0 & 0 & \omega_s & -\frac{1}{L} & 0 & \frac{\sin(2\pi f)}{2\pi} & 0 \\ 0 & \frac{d}{L} & -\omega_s & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & -\frac{\sin^2(\pi f)}{\pi} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} & \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\omega_s & -\frac{1}{RC_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{RC_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{C} = \mathbf{I}_{9 \times 9} \quad \mathbf{D} = \mathbf{0}_{9 \times 1}$$

Standard Test Conditions (STC) : $Irr_o=1000W/m^2$, $T_{ref}=25^\circ C$, $AM=1.5$

The dynamic model in (17) is called the first-order approximation of GSSA model. If the considered waveforms can be assumed that they do not have the ripple, the zero-order approximation can be applied. As a result, only \dot{x}_7 , \dot{x}_8 and \dot{x}_9 are remained in the dynamic model as shown in (19).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d}{C_1} & 0 \\ \frac{d}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} i_{pv} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Based on the first-order approximation (k=1), the output waveforms can then be calculated by the resulting state variables as follow:

$$\begin{aligned}
 v_{pv} &= x_7 + 2x_1 \cos(\omega t) - 2x_2 \sin(\omega t) \\
 i_L &= x_8 + 2x_3 \cos(\omega t) - 2x_4 \sin(\omega t) \\
 v_o &= x_9 + 2x_5 \cos(\omega t) - 2x_6 \sin(\omega t)
 \end{aligned}$$

It can be seen in (19) that when k is equal to 0 for the zero-order approximation, \dot{x}_7 , \dot{x}_8 and \dot{x}_9 are equal to v_{pv} , i_L and v_o , respectively.

where i_{pv} is the output current from the PV array. This current depends on irradiance (Irr) and temperature (T) [5] in which it can be calculated by

$$\frac{1}{C_1} \left[\left(i_{sc} + K_f (T - T_{ref}) \right) \frac{Irr}{Irr_o} - \left(\frac{i_{sc}}{qV_{oc}} \left(e^{\frac{qV_{oc}}{kTn}} - 1 \right) \right) \right] \quad (18)$$

- where
- i_{sc} = short circuit current
- V_{oc} = open circuit voltage
- K_f = current proportionality constant (2.2×10^{-3})
- T = panel temperature (Kelvin)
- Irr = irradiance (W/m^2)
- q = electronic charge (1.6×10^{-19} coulombs)
- C = number of cells in 1 module
- k = Boltzmann's constant (1.3805×10^{-23} j/K)
- n = diode factor (Silicon diode=1.2)

4. MODEL VALIDATION

The obtained models are coded in MATLAB for simulation comparisons with SPSTM software. The simulated circuit as shown in Fig. 2 has the following components:

- Photovoltaic: $T_{ref}=273.15+25$ Kelvin, $Irr_o=1000W/m^2$, $T=273.15+25$ Kelvin, $Irr=1000 W/m^2$, $i_{sc}=2.35 A$, $V_{oc}=21.3 V$, $K_f=2.2 \times 10^{-3}$, $C=36$, $k=1.3806504 \times 10^{-23}$ j/K, $n=1.2$
- Buck Converter : $C_1 = 470\mu F$, $C_2 = 1000\mu F$, $L = 15mH$, $R = 5\Omega$

Simulation results in Fig. 3 to Fig. 5 are the output voltage waveforms of the PV array, the inductor current of buck converter, and the output voltage of buck converter from the zero-order and first-order approximations compared with the results from topology model of SPSTM when the d equal to 0.3.

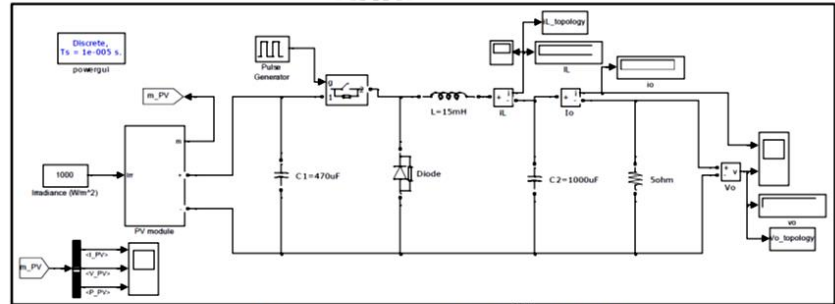


Fig. 2 Topology model simulated in SPSTM of MATLAB

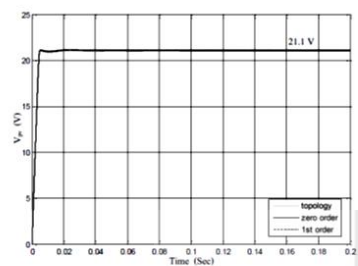


Fig. 3 The output voltage of PV array when $d=0.3$

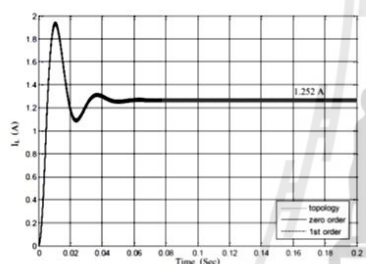


Fig. 4 The inductor current of buck converter when $d=0.3$

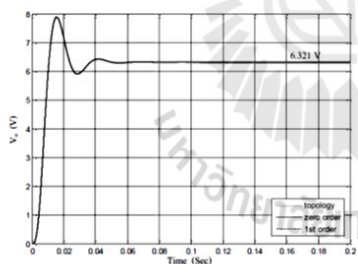


Fig. 5 The output voltage of buck converter when $d=0.3$

The computing times taken by MATLAB coding for the zero- and first-order models are 0.56 s. and 2.54 s., respectively, while SPSTM consumes 11.87 s. for full topology simulation. The comparison of simulation time can be illustrated in terms of computational time saving defined by:

$$\%t_{\text{saving}} = \frac{t_{fs} - t_{av}}{t_{fs}} \times 100\% \quad (20)$$

where t_{fs} and t_{av} are the simulation times of full topology and the averaged GSSA models, respectively. According

to (20), the zero- and first-order GSSA models can provide $\%t_{\text{saving}}$ of 95.28% and 78.60%, respectively. These values indicate that the simulation using the averaged models requires short computational time compared with SPSTM. Note that, more accurate models can be obtained by increasing k in the GSSA derivation in an exchange of more tedious derivation, and computational time increase.

5. CONCLUSION

This paper presents how to derive the dynamic model of the PV array feeding a buck converter. The GSSA method is used to eliminate the switching behaviour of the buck converter. The simulation results show that the proposed averaging model provide a good accuracy in both transient and steady-state responses. Moreover, the proposed model consumes the fast simulation time compared with those of the exact topology model. According to the advantages of the resulting model, the classical control theory can be easily used for the system analysis and design. In addition, the dynamic model derived from the paper is suitable for the optimal controller design using the artificial intelligence techniques because the fast simulation time can be achieved from the proposed model.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand.

REFERENCES

- [1] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, M. Ehsani, Analysis of Power Electronic Converter Using the Generalized State-Space Averaging Approach, *IEEE Trans. On Circuit and System.*, vol. 44, August 1997, pp.767-770
- [2] A. Emadi, Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic System Using the Generalized State-Space Averaging Method, *IEEE Trans. On Indus. Elect.*, vol. 51, n. 3, June 2004, pp. 661-668.
- [3] S.F. Glover, Modeling and stability analysis of power electronics based systems, Ph.D. dissertation, Purdue Univ., 2003.
- [4] S.D. Sudhoff, Analysis and Average-Value Modeling of Dual Line-Commutate Converter-6-Phase Synchronous Machine Systems, *IEEE Trans. on Energy Conversion.*, vol. 8, n. 3, September 1993, pp. 411-417.
- [5] Afshin Izadian, Arash Pourtaherian, and Sarasadat Motahari, Basic model and governing equation of solar cells used in power and control applications, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE.*, 15-20 September 2012, Raleigh, NC, pp. 1483-1488

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

ระบบตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้วิธีรบกวนและสังเกต

Perturb and Observe MPPT for Stand-alone Photovoltaic

ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพัน อารีรัตน์* และกองพล อารีรัตน์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี email: kongpan@cut.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เพื่อให้ได้กำลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด ที่ความเข้มแสงในสภาวะต่าง ๆ โดยใช้วิธีรบกวนและสังเกต ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูง วิธีการดังกล่าวนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงแบบบuckเพื่อหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด การควบคุมของวิธีรบกวนและสังเกตในบทความนี้ได้รับการปรับปรุงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดภายใต้การตอบสนองที่ดี ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าการควบคุมระบบภายใต้วิธีการที่นำเสนอสามารถควบคุมให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบตามรอยกำลังงานสูงสุด เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ วิธีรบกวนและสังเกต

Abstract

The paper presents the maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic to achieve the maximum power for various irradiance using the perturbation and observation (P&O) technique. This technique is simple. However, it can provide a high performance. In this paper, the P&O algorithm is operated with a buck converter to determine the maximum power point. The control algorithm of proposed P&O method is improved. Therefore, the maximum output power can be achieved with a good response. The simulation results show that the system with the proposed algorithm can perfectly provide the maximum power from the stand-alone photovoltaic.

Keywords: maximum power point tracking, stand-alone photovoltaic, perturbation and observation

1. บทนำ

เนื่องด้วยปัจจุบันการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทนมีความสำคัญมาก พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะขณะใช้งาน มีความยั่งยืนและไม่มีการเสื่อมค่า การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เซลล์

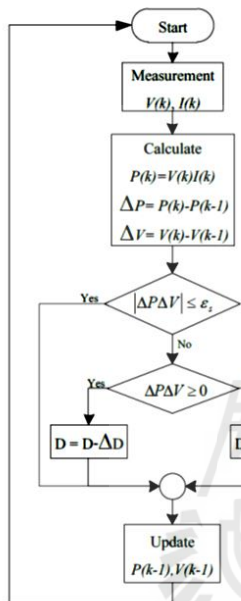
แสงอาทิตย์นั้นมิใช่เสีย คือ ใช้ต้นทุนการผลิตและติดตั้งสูง ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ และระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์นั้น โดยทั่วไปจะให้กำลังงานเอาต์พุตตามที่โหลดต้องการเท่านั้น จึงทำให้ไม่สามารถดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) มาใช้งานได้ ดังนั้นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมการตามรอยกำลังงานสูงสุด (Maximum Power Point tracking: MPPT) เพื่อให้ได้พลังงานสูงสุดในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ บทความนี้จะนำเสนอระบบควบคุมการตามรอยกำลังงานสูงสุด ที่มีความสามารถในการจ่ายโอนกำลังเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และ โหลดได้สูงสุด ระบบควบคุมที่นำเสนอในบทความนี้พัฒนามาจากงานวิจัยในอดีต [1] ซึ่งเมื่อนำไปสร้างจริงด้วยอุปกรณ์และลอจิกประสิทธิภาพของวงจรมีค่าไม่เป็นที่คาดหวัง ในบทความนี้จะทำการพัฒนาและปรับปรุง ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการใช้วิธีรบกวนและสังเกต

2. หลักการของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT Concept)

การดึงพลังงานที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ ที่ความเข้มแสงในสภาวะต่าง ๆ มาใช้งาน จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด จากงานวิจัยในอดีตจึงมีพบว่า วิธีการตามรอยกำลังงานสูงสุดที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายวิธีดังนี้ วิธีเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร (Short-Circuit Current: ISC) [2-3] วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage: VOC) [2-3] วิธีรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation Method: P&O) [4-6] และวิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance: IncCond) เป็นต้น ซึ่งกลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุดเป็นการจัดการให้กำลังเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในระดับที่สูงสุด บทความนี้จะเลือกใช้วิธีรบกวนและสังเกต ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนสร้างจริงได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง

ลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบจะส่งผลต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะมีผลต่อแรงดันที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าอุณหภูมิและ

จะได้ $D = \Delta D$ จากการพิจารณาข้างต้นในกรณีอื่น ๆ สุดท้ายแล้วจะได้แผนภาพโต๊ะแกมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตารางโต๊ะแกมการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต

4. ผลการจำลองสถานการณ์

พารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณาในบทความ มีรายละเอียดดังนี้

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Panel): พิจารณาที่สภาวะมาตรฐาน

ความเข้มแสง 1000W/m² และ อุณหภูมิ 25°C

แรงดันเปิดวงจร (V_{OC}) = 22.4V

กระแสลัดวงจร (I_{SC}) = 5.87A

แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) = 19.12V

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp}) = 106W

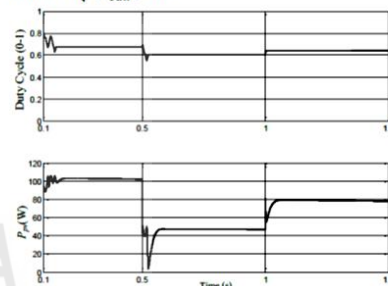
- วงจรแปลงหมันแบบบัพคิก

ความถี่ในการสวิตช์ (f_{sw}) = 10kHz

ตัวเก็บประจุ (Capacitor): C₁ = 470μF, C₂ = 1000μF

ความเหนี่ยวนำ (Inductance) = 10mH

แรงดันเอาต์พุต (V_{bat}) = 12V

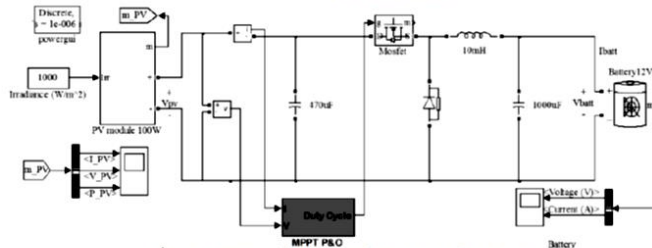


รูปที่ 5 กราฟความชันขั้นระหว่างค่าวัฏจักรหน้าที่กับกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง 1000W/m² 500W/m² และ 800W/m² ที่เวลา t = 0.5 1 และ 1.5 วินาที ตามลำดับ ช่วงแรกค่าวัฏจักรหน้าที่จะแกว่งไม่คงที่เนื่องจากอัลกอริทึมจะทำงานและหาค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม เพื่อจะทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด โดยเมื่อค่าความผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า มีค่าเข้าใกล้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ส่งผลให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงหมันมีค่าคงที่

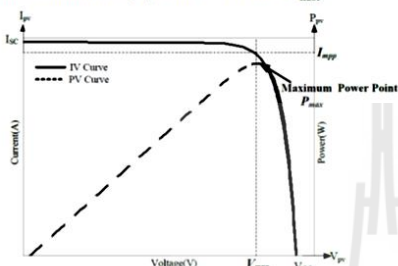
การจำลองสถานการณ์ในบทความนี้อาศัยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 5 ช่วง แสดงได้ดังรูปที่ 7

- ช่วงที่ 1: เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 500 W/m² และ ไม่มีการจ่ายโหลด
- ช่วงที่ 2: เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m² และ ไม่มีการจ่ายโหลด
- ช่วงที่ 3: จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 50W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m²
- ช่วงที่ 4: จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 200W ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m²
- ช่วงที่ 5: เมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 0 W/m² (ไม่มีแสงอาทิตย์) และ จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (Power Load) 200W



รูปที่ 6 การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB

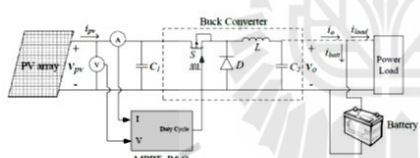
ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่สามารถสร้างกราฟลักษณะเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงให้เห็นถึงกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{max})



รูปที่ 1 ลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 กราฟลักษณะเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์มีความไม่เป็นเชิงเส้น โดยปกติค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับ โหลดจึงไม่สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ แต่ถ้าสามารถเลือกจุดที่งานให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) ก็จะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

3. ระบบที่พิจารณา



รูปที่ 2 ระบบตามรอยกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีรบกวนและสังเกต

จากรูปที่ 2 แผนภาพของระบบที่พิจารณา ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (Stand-alone System) ระบบตามรอยกำลังสูงสุดที่พิจารณาใช้วิธีรบกวนและสังเกต วิธีการดังกล่าวจะนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัก (Buck Converter) เพื่อหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และเนื่องจากเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานสำรองซึ่งก็คือ แบตเตอรี่

หลักการของวิธีรบกวนและสังเกต คือ ทำงานเป็นคาบเวลาโดยทำการปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ขั้นตอนของการรบกวนหลังจากนั้นจะทำการวัดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการรบกวนโดยใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้า แล้วทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลา ก่อน เพื่อนำมาวินิจฉัยเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลง

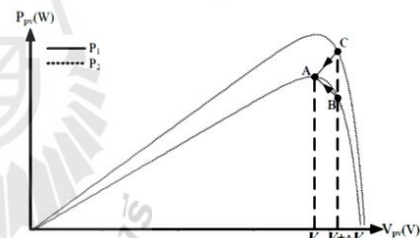
ค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle : D) ของวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อให้จุดทำงานเข้าใกล้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ความเข้มแสงขณะนั้นมากที่สุด วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่มีอัลกอริธึมง่าย และมีประสิทธิภาพสูงในการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัวและไม่สามารถหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง จึงนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาวิธีการรบกวนและสังเกต โดยเมื่อค่าความผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลา ก่อนหน้า มีค่าเข้าใกล้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ϵ_r) จะส่งผลให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันมีค่าคงที่ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าคงที่ ณ ความเข้มแสงขณะนั้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่อินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก เป็นดังสมการที่ (1)

$$V_o = DV_{in} \tag{1}$$

เมื่อเราต้องการให้แรงดันอินพุตของระบบมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด $V_{in} = V_{mpp} = V_{pv}$ และเอาต์พุตของระบบคือแบตเตอรี่ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต $V_o = V_{bat}$ จากสมการที่ (1) จะได้

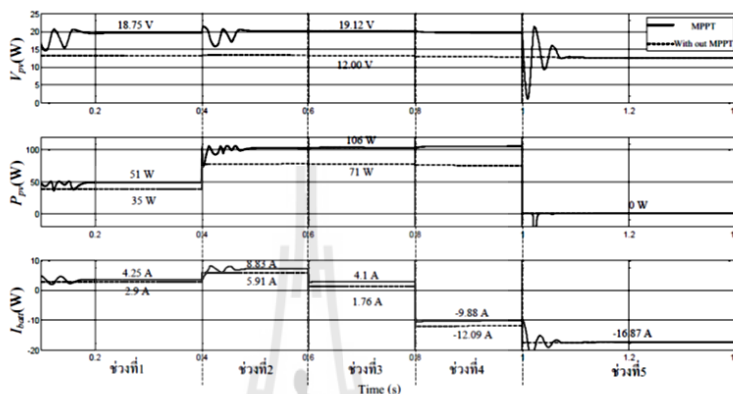
$$D = \frac{V_{bat}}{V_{in}} \tag{2}$$



รูปที่ 3 โด่จะเห็นการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต

รูปที่ 3 เป็นกราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V Curve) เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจะได้ P-V Curve ของ P_1 และ P_2 โดยความเข้มแสงของ P_1 มากกว่า P_2 ทำให้กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ P_1 มากกว่า P_2 และพิจารณาเมื่อเปลี่ยนจุดการทำงานจากจุด B ไปยังจุด A จะทำให้ค่าแรงดันของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลา ก่อน (ΔP) มีค่าเพิ่มขึ้น $-\Delta P$ และค่าผลต่างของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลา ก่อน (ΔV) จะมีค่าลดลง $-\Delta V$ ดังนั้น $\Delta P \Delta V < 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องทำการลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จากสมการที่ (2) ถ้าแรงดันแบตเตอรี่มีค่าคงที่และต้องการลดแรงดันจะต้องปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) เพิ่มขึ้น $D = \Delta D$ และเมื่อพิจารณาเปลี่ยนจุดการทำงานจากจุด C ไปยังจุด A จะได้ $-\Delta P$ และ $-\Delta V$ ดังนั้น $\Delta P \Delta V \geq 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องทำการลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย



รูปที่ 7 ผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงต่าง ๆ

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการควบคุมกำลัง (เส้นทึบ) สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ณ ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ถ้าความเข้มแสงมีค่ามาก กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่ามาก ถ้าในสภาวะดังกล่าวไม่มีโหลด พลังงานทั้งหมดจะทำการเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ โดยกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ จะมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีควบคุมกำลัง (เส้นประ) ซึ่งหมายถึง ระบบสามารถอัดประจุที่แบตเตอรี่ได้เร็วขึ้น สำหรับกรณีที่มีการจ่ายโหลด ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่โหลดต้องการ พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แต่ถ้าพลังงานที่โหลดต้องการมีค่ามากกว่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะจ่ายโหลดทันที หรือแม้กระทั่งกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่จะจ่ายโหลดแทนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นช่วงที่เมื่อพลังงานสำรองของระบบมาใช้จ่ายโหลดทั้งหมด จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการควบคุมกำลังมีประโยชน์และมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุป

ระบบควบคุมกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตที่พัฒนาขึ้น โดยทำการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าและเข้าสู่อัลกอริทึมการประมวลผล ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นระบบที่นำเสนอ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีมีการควบคุมกำลัง มีความสามารถในการจ่ายอินกำลังเอาต์พุตจาก เซลล์แสงอาทิตย์สู่แบตเตอรี่และ โหลดได้สูงสุด

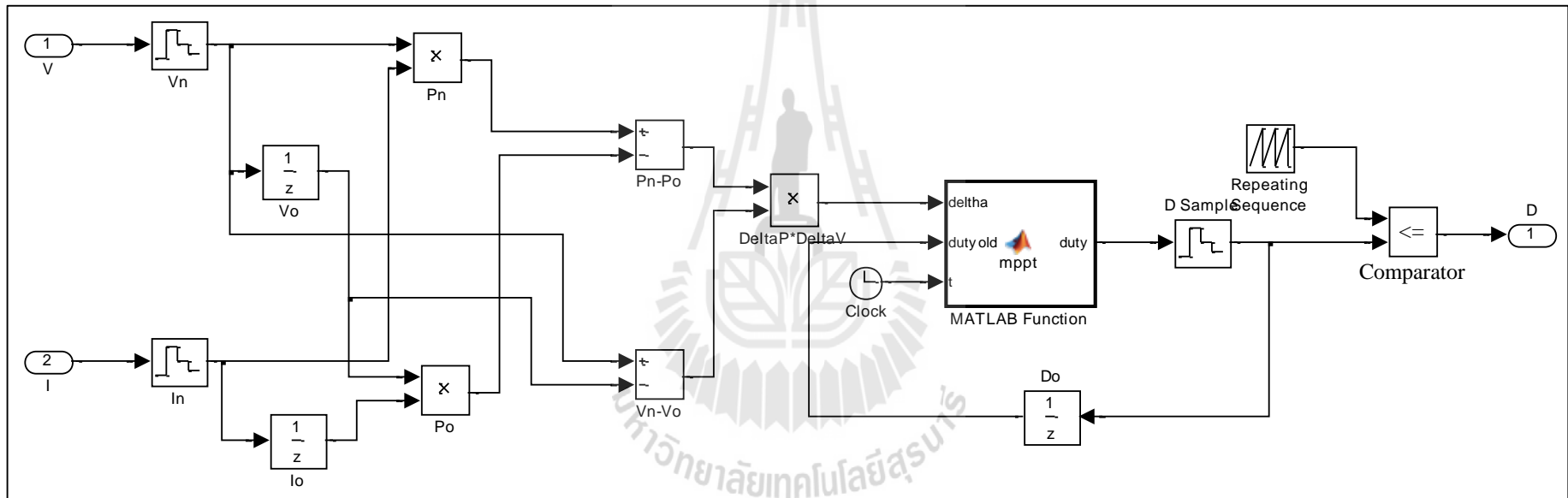
เอกสารอ้างอิง

- [1] ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพันธ์ อธิวิรัตน์ และกองพล อธิวิรัตน์, “ระบบควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีระบบควบคุมกำลังสูงสุด,” *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37*, ขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, vol 1, หน้า 545 – 548.
- [2] Ahmad J, “A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays,” in *2nd International Conference on Software Technology and Engineering(ICSTE)*, San Juan, PR, Oct 2010, vol.1, pp.247-250.
- [3] R. Faranda, S. Leva, V. Maugeri, “MPPT techniques for pv systems: energetic and cost comparison.” *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp-1-6.
- [4] Ahmed K. Abdelsalam, and Ahmed M. Massoud, “High-Performance Adaptive Perturb and ObserveMPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids,” in *IEEE Trans. Power. Electron.*, Vol. 26, no. 4, April 2011.
- [5] R. Faranda, S. Leva, V. Maugeri, “MPPT techniques for pv systems: energetic and cost comparison.” in *IEEE Power and Energy Conf.*, 21st Century, 2008, pp-1-6.
- [6] Dong Jie, Zhang Chun-jiang, Li Yan-bang, “Comparison of Duty Ratio Perturbation & Observation and Reference Voltage Perturbation & Observation Methods Applied in MPPT,” in *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC) 7th International.*, Harbin, June 2012, Vol. 2, pp-1358-1362.

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

```

*****
โค้ด โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O จากโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK
ใน MATLAB โดยใช้บล็อก MATLAB FUNCTION
*****

function duty = mppt(deltha,dutyold,t)
//อินพุตของบล็อก MATLAB FUNCTION คือ ค่าผลต่างค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคาบเวลา
ปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า  $\Delta P \times \Delta V$  ค่าวัฏจักรหน้าที่คาบเวลาก่อนหน้า  $d(k-1)$  และ
เวลา  $t$ 
es=0.005;           //กำหนดค่าความผิดพลาด  $\varepsilon_s$ 
//ค่า Step size  $\Delta d$ 
if deltha >= 5
    dd=0.01;
else
    dd=0.001;
end
//โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
if t<0.1
    duty=0.5;
else
    if abs(deltha) <= es
        duty=dutyold;
    elseif deltha >= 0
        duty=dutyold-dd;
    else
        duty=dutyold+dd;
    end
end
end

```




ภาคผนวก ค

โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O
จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

```

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

//กำหนดตัวแปร เป็นตัวเลขทศนิยม
float V_k,P_k,Deltha_V_k,Deltha_P_k,Deltha_duty,Duty_k,Deltha_PandV_k;
float V_k1=0,P_k1=0,Deltha_V_k1=0,Deltha_P_k1=0,Duty_k1=50;
float Voltage_Sense,Current_Sense,Voltage_Actual,Current_Actual,Power_Actual;
//กำหนดให้รับค่าช่องสัญญาณ ADC7 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ได้จาก
วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า
int Voltage_Sensor=7;
//กำหนดให้รับค่าช่องสัญญาณ ADC0 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ได้จาก
//วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า
//กำหนดตัวแปร เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม
int Current_Sensor=0;
int Read_Voltage,Read_Current;
//*****
//ฟังก์ชันตั้งค่าของบอร์ด arduino [void setup()] เพื่อกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่
//*****

int pwm=11;
void setup()
{
Serial.begin(19200);
Serial.begin(9600);
Serial.flush();
pinMode(pwm,OUTPUT);
TCCR1A=(1<<COM1A1)|(0<<COM1A0)|(1<<COM1B1)|(0<<COM1B0);
TCCR1B=(1<<WGM13)|(0<<WGM12);
TCCR1A|=(0<<WGM11)|(0<<WGM10);
TCCR1B|=(0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
TCNT1=0;

```

```

OCR1A=0;
OCR1B=0;
ICR1=800;
}

//*****

//ฟังก์ชันวนรอบของบอร์ด arduino [void loop()] เพื่อวนรอบสั่งค่าวัฏจักรหน้าที่ สำหรับ
การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

//*****

void loop()
{
  while(1)
  {
    //การอ่านค่าแรงดันจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและแปลงค่าตามสมการ (5-3)
    Read_Voltage=analogRead(Voltage_Sensor);
    Voltage_Sense=((float)Read_Voltage)/1024*5;
    Voltage_Actual=10.65*Voltage_Sense;
    //การอ่านค่ากระแสจากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแปลงค่าตามสมการ (5-11)
    Read_Current=analogRead(Current_Sensor);
    Current_Sense=((float)Read_Current)/1024*5;
    Current_Sense=((float)Read_Current)/1024*5;
    Current_Actual=(1.04575* Current_Sense)-0.033;

    //*****

    // โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

    //*****

    Power_Actual=Voltage_Actual*Current_Actual;
    V_k=Voltage_Actual;
    P_k=Power_Actual;
    Deltha_V_k=V_k-V_k1;
    Deltha_P_k=P_k-P_k1;
    Deltha_PandV_k=Deltha_V_k*Deltha_P_k;
  }
}

```

```

//Step size Deltha_PandV
if(abs(Deltha_PandV_k)>=1.00)
{
Deltha_duty=1;
}
else if(abs(Deltha_PandV_k)<1.00)
{
Deltha_duty=0.01;
}
//ปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ตามอัลกอริทึม โดยกำหนดให้ค่าความผิดพลาดเท่ากับ0.05
if(abs(Deltha_PandV_k)<=0.05)
{
Duty_k=Duty_k1;
}
else if(abs(Deltha_PandV_k)>0.05)
{
Duty_k=Duty_k1-Deltha_duty;
}
else
{
Duty_k=Duty_k1+Deltha_duty;
}
OCR1A=ICR1*(Duty_k/100); //ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0-100
Duty_k1=Duty_k; //อัปเดตค่าวัฏจักรหน้าที่
Deltha_V_k1=Deltha_V_k; //อัปเดตค่าผลต่างแรงดันไฟฟ้า
Deltha_P_k1=Deltha_P_k; //อัปเดตค่าผลต่างกำลังไฟฟ้า
V_k1=V_k; //อัปเดตค่าแรงดันไฟฟ้า
P_k1=P_k; //อัปเดตค่ากำลังไฟฟ้า
}
}

```

ภาคผนวก ง

คู่มือการใช้งาน ชุดชำระเซลล์แสงอาทิตย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง1. คู่มือการใช้งาน ชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด
ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (MPPT VOC Charger)



รูปที่ ง.1 กล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังงานสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดัน
ขณะเปิดวงจร

MPPT VOC Charger มีคุณสมบัติหลัก ดังนี้

1. ถูกควบคุมด้วยอัลกอริทึมการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก
2. มีไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์, แบตเตอรี่ และ โหลด
3. มีระบบป้องกัน over-charge ,over-discharge และ over-load

การแสดงสถานะการทำงานของ MPPT VOC Charger

1. สถานะของแผงโซลาร์เซลล์และการชาร์จแบตเตอรี่

ไฟ SUN จะติดสีแดงค้าง เมื่อมีแสงแดดและสามารถชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ได้

ไฟ SUN จะดับเมื่อไม่มีแสงแดดหรือมีการถอดสายของแผงโซลาร์เซลล์ออก กรณีนี้จะไม่
ไฟชาร์จเข้าแบตเตอรี่

2. สถานะของแบตเตอรี่

ไฟ BAT จะติดสีเขียวค้าง เมื่อมีการต่อสายไฟที่ช่อง Battery ของ MPPT VOC Charger

ไฟ BAT จะดับ เมื่อมีการถอดสายของแบตเตอรี่ออก

3. สถานะของโหลด

เมื่อกดสวิทช์ ON/OFF Load

ไฟ LOAD จะติดสีเขียวค้าง เมื่อ Load ทำงานปกติ

ไฟ LOAD จะดับ เมื่อ Load ถูกปิดการทำงาน

การเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับ MPPT VOC Charger

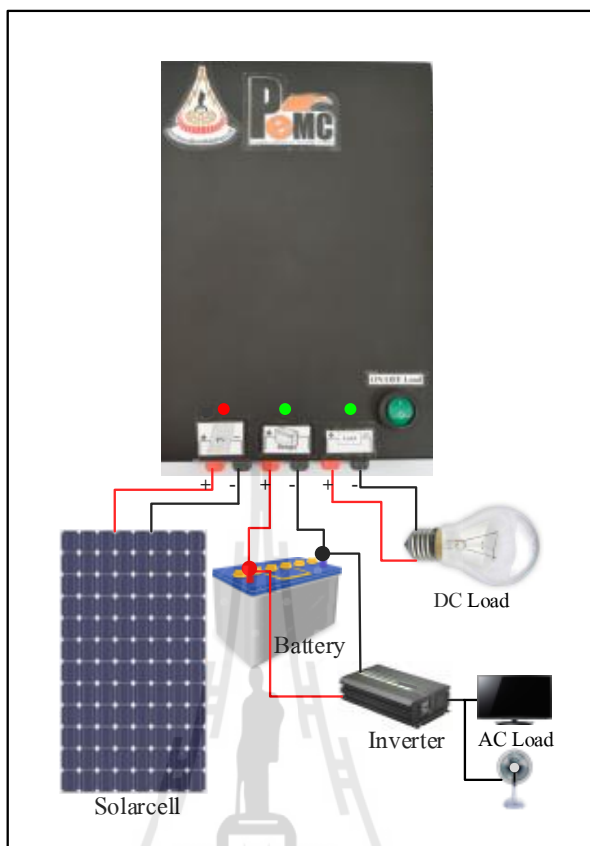
1) ต่อสายไฟที่ช่อง Battery ของ MPPT VOC Charger จากนั้นให้ต่อสายไฟไปยังขั้วของแบตเตอรี่ ต้องต่อให้ถูกขั้ว ระวังอย่าต่อสลับขั้วเด็ดขาด ถ้าต่อสายถูกต้องจะมีไฟ BAT ติดขึ้นมา

2) ต่อสายไฟที่ช่อง Solar Cell ของ MPPT VOC Charger จากนั้นให้ต่อสายไฟไปยังแผงโซลาร์เซลล์ ต้องต่อให้ถูกขั้ว ระวังอย่าต่อสลับขั้วเด็ดขาด ถ้าต่อสายถูกต้องและมีแสงแดด ไฟ SUN จะติดขึ้นมา

3) ต่อโหลด DC เช่น หลอดไฟ LED หรือ โหลดทางไฟฟ้าอื่นๆ ที่ช่อง Load ของ MPPT VOC Charger ต้องต่อให้ถูกขั้ว ระวังอย่าต่อสลับขั้วเด็ดขาด มิฉะนั้นจะทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าเสียหายได้

หมายเหตุ ถ้าเป็นโหลด AC จะต้องใช้ Inverter ทำการแปลงไฟ DC เป็น AC หรือไฟบ้านก่อน โดยต่อสายแบตเตอรี่จากขั้วแบตเตอรี่ไปยังขั้วไฟฝั่ง DC ของ Inverter จากนั้นให้ต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆเข้ากับ Inverter ที่ช่องเสียบปลั๊กไฟหรือที่ช่อง AC Output

การเชื่อมต่อสายไฟของอุปกรณ์ระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับ MPPT VOC Charger แสดงดังรูปที่



รูปที่ ง.2 การเชื่อมต่อสายไฟของระบบ โซลาร์เซลล์เข้ากับ MPPT VOC Charger

ภาคผนวก ง2. ชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังงานสูงสุด
ด้วยวิธีรบกวนและสังเกต (MPPT P&O Charger)



รูปที่ ง.3 กล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังงานสูงสุดด้วยวิธี P&O

MPPT P&O Charger มีคุณสมบัติหลัก ดังนี้

1. ถูกควบคุมด้วยอัลกอริทึมการตามรอยกำลังสูงสุด ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์
2. มีไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์, แบตเตอรี่ และโหลด
3. มีระบบป้องกัน over-charge ,over-discharge และ over-load

การแสดงผลสถานะการทำงานของ MPPT P&O Charger

1. สถานะของแผงโซลาร์เซลล์และการชาร์จแบตเตอรี่

ไฟ SUN จะติดสีแดงค้าง เมื่อมีแสงแดดและสามารถชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ได้

ไฟ SUN จะดับเมื่อไม่มีแสงแดดหรือมีการถอดสายของแผงโซลาร์เซลล์ออก กรณีนี้จะไม่มีการชาร์จเข้าแบตเตอรี่

2. สถานะของแบตเตอรี่

ไฟ BAT จะติดสีเขียวค้าง เมื่อมีการต่อสายไฟที่ช่อง Battery ของ MPPT P&O Charger

ไฟ BAT จะดับ เมื่อมีการถอดสายของแบตเตอรี่ออก

3. สถานะของโหลด

เมื่อกดสวิตช์ ON/OFF Load

ไฟ LOAD จะติดสีแดงค้าง เมื่อ Load ทำงานปกติ

ไฟ LOAD จะดับ เมื่อ Load ถูกปิดการทำงาน

การเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับ MPPT P&O Charger

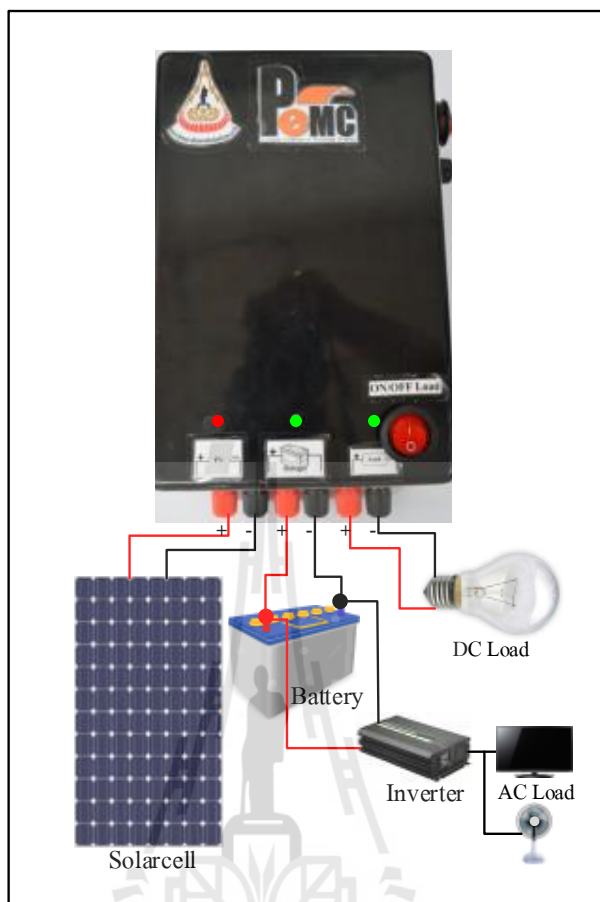
1) ต่อสายไฟที่ช่อง Battery ของ MPPT P&O Charger จากนั้นให้ต่อสายไฟไปยังขั้วของแบตเตอรี่ ต้องต่อให้ถูกขั้ว ระวังอย่าต่อสลับขั้วเด็ดขาด ถ้าต่อสายถูกต้องจะมีไฟ BAT ติดขึ้นมา

2) ต่อสายไฟที่ช่อง Solar Cell ของ MPPT P&O Charger จากนั้นให้ต่อสายไฟไปยังแผงโซลาร์เซลล์ ต้องต่อให้ถูกขั้ว ระวังอย่าต่อสลับขั้วเด็ดขาด ถ้าต่อสายถูกต้องและมีแสงแดด ไฟ SUN จะติดขึ้นมา

3) ต่อโหลด DC เช่น หลอดไฟ LED หรือ โหลดทางไฟฟ้าอื่นๆ ที่ช่อง Load ของ MPPT P&O Charger ต้องต่อให้ถูกขั้ว ระวังอย่าต่อสลับขั้วเด็ดขาด มิฉะนั้นจะทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าเสียหายได้

หมายเหตุ ถ้าเป็น โหลด AC จะต้องใช้ Inverter ทำการแปลงไฟ DC เป็น AC หรือ ไฟบ้านก่อน โดยต่อสายแบตเตอรี่จากขั้วแบตเตอรี่ไปยังขั้วไฟฝั่ง DC ของ Inverter จากนั้นให้ต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆเข้ากับ Inverter ที่ช่องเสียบปลั๊กไฟหรือที่ช่อง AC Output

การเชื่อมต่อสายไฟของอุปกรณ์ระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับ MPPT P&O Charger แสดงดังรูปที่



รูปที่ ง.4 การเชื่อมต่อสายไฟของระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับ MPPT P&O Charger

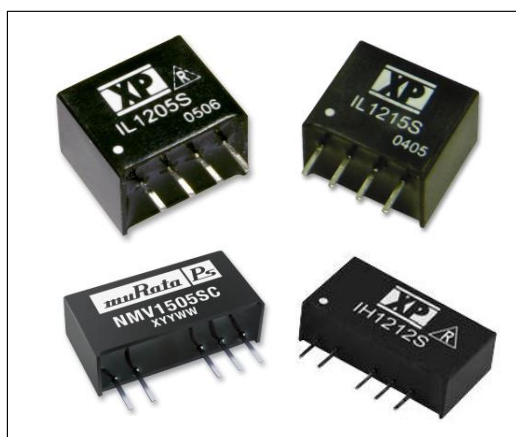
ภาคผนวก จ

ตัวแยกกรวดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ dc/dc isolate มีหน้าที่แยกกราวด์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตออกจากกัน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะให้อินพุตของตัวแยกกราวด์คือแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และด้านเอาต์พุตของตัวแยกกราวด์จะเป็นแหล่งจ่ายให้แก่วงจรควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด และวงจรแยกโคดสัญญาณ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับวงจรไฟฟ้า และป้องกันการลัดวงจรจากวงจรแปลงผันแบบบัตต์ก์เข้าสู่วงจรจุดชนวนเกท

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบคงค่าแรงดันเอาต์พุตแบบ Single Output และแบบ Multi Output โดยแรงดันอินพุตคือแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ และค่าแรงดันเอาต์พุตจะแล้วแต่เบอร์ของตัวแยกกราวด์ที่เลือกใช้งาน เช่น ถ้าตัวแยกกราวด์เบอร์ 1205 คือแรงดันอินพุต 12 โวลต์จะได้แรงดันเอาต์พุต 5 โวลต์ ถ้าตัวแยกกราวด์เบอร์ 1212 คือแรงดันอินพุต 12 โวลต์จะได้แรงดันเอาต์พุต 12 โวลต์ ถ้าตัวแยกกราวด์เบอร์ 1215 คือแรงดันอินพุต 12 โวลต์จะได้แรงดันเอาต์พุต 15 โวลต์ เป็นต้น นอกจากนี้ตัวแยกกราวด์แบบคงค่าแรงดันเอาต์พุตมีทั้งแบบ Single Output และแบบ Multi Output โดยถ้าเลือกใช้ตัวแยกกราวด์แบบ Single Output เช่น เบอร์ 1212 ค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็น 12 และ 0 โวลต์ ถ้าเลือกใช้ตัวแยกกราวด์แบบ Single Output เบอร์ 1215 ค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็น 15 และ 0 โวลต์ และถ้าเลือกใช้ตัวแยกกราวด์แบบ Multi Output เช่น เบอร์ 1212 ค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็น +12, -12 และ 0 โวลต์ ถ้าเลือกใช้ตัวแยกกราวด์แบบ Multi Output เบอร์ 1215 ค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็น +15, -15 และ 0 โวลต์ เป็นต้น สำหรับการเลือกใช้ตัวแยกกราวด์นั้นขึ้นอยู่กับการใช้งาน ค่าแรงดันอินพุต – เอาต์พุตที่ต้องการ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้งาน ซึ่งตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแสดงไฟดังรูป จ.1



รูป จ.1 ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ dc/dc isolate

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปทุมพร วงศ์ใหญ่ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2534 การศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนบ้านโฮ้งวิทยา ระดับมัธยมศึกษาปีที่โรงเรียนธีรกานท์บ้านโฮ้ง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2556 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าพื้นฐาน ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ และปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม โดยมีความสนใจในด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจ ทางด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และมีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดังภาคผนวก ก. จำนวน 3 ฉบับ

