

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ  
ด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวสำหรับสถานีชาร์จ



นายวีรภัทร คำพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2566

THE MAXIMUM POWER TRACKING OF PV STAND-ALONE SYSTEM  
USING AN ADAPTIVE INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD  
FOR CHARGING STATION



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 2023

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ  
ด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวสำหรับสถานีชาร์จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



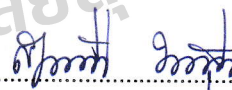
(ผศ. ดร.โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วีรภัทร คำพันธ์ : การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ  
ด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวสำหรับสถานีชาร์จ (THE MAXIMUM POWER  
TRACKING OF PV STAND-ALONE SYSTEM USING AN ADAPTIVE INCREMENTAL  
CONDUCTANCE METHOD FOR CHARGING STATION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์ , 138 หน้า.

คำสำคัญ : การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด/ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ/วิธีการเพิ่มค่าความนำ/  
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน/สถานีอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบ  
อิสระด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวสำหรับสถานีชาร์จ ที่พัฒนามาจากวิธีการเพิ่มค่าความนำ  
แบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง หลักการทำงานจะอาศัยการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  
และกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผ่านการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่  
ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน ซึ่งมีผลทำให้แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง  
และลู่เข้าสู่จุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ในทุกสภาวะความเข้มแสงและอุณหภูมิ งานวิจัยวิทยานิพนธ์  
อาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB บน  
คอมพิวเตอร์ การสร้างชุดทดสอบต้นแบบขนาด 40 W สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ และสร้างชุด  
ทดสอบขนาด 3 kW ติดตั้งและใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มายืนยันประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบ  
ปรับตัว ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมที่นำเสนอใน  
งานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อ  
เทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา..... วีรภัทร คำพันธ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Prof.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... Ken

WEERAPAT KAMPHAN : THE MAXIMUM POWER TRACKING OF PV STAND-ALONE SYSTEM USING AN ADAPTIVE INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD FOR CHARGING STATION.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., Number of 138 page PP.

Keywords : Maximum power point tracking/Autonomous photovoltaic system/  
Incremental Conductance Method/Buck Converter/Charging station  
for electric vehicles

The thesis research presents maximum power point tracing of a PV stand-alone system using an adaptive incremental conductance method for charging stations. The proposed adaptive algorithm is developed from a fixed step size incremental conductance method. The working principle is based on measuring the solar cell voltage and current to calculate the maximum power point by adjusting the duty cycle of the buck converter. As a result, the voltage of the solar cell can be changed and converged to the point where the maximum power is obtained for all conditions of light intensity and temperature. In the thesis research, the simulation results using the power system block with Simulink of the MATLAB program on the computer, 40 W prototype for laboratory testing, and 3 kW prototype installed for charging station at Suranaree University of Technology were used to confirm the effectiveness of the proposed adaptive incremental conductance method. The results show that the proposed algorithm can track the maximum power point faster and more efficiency than the fixed step size incremental conductance method.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2023

Student's Signature..... วิรัชกร คำพันธ์

Advisor's Signature..... Prof.

Co-advisor's Signature..... Kan

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกริช ภัคดีโต รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพล อารีรักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ และนายรัฐพล โพธิ์สังข์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการจัดทำวิจัย ช่วยตรวจทานและแก้ไขเล่มรายงานวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงด้านอื่น ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ ช่วยให้กำลังใจ และยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการใช้ชีวิตในหลายๆด้าน ให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ ผู้ช่วยสอน และเลขานุการประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาทางด้านการ การติดต่อประสานงานต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกในเรื่องของสถานที่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยต่าง ๆ รวมถึงเรื่องการเดินทางเกี่ยวกับงานเอกสารจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์บรรณสารและการศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

วีรภัทร คำพันธ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3. ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.4. ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6. การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
<b>2. ปรัชญารรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>7</b>
2.1. บทนำ.....	7
2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า.....	7
2.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
2.4. สรุป.....	14
<b>3. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์</b> .....	<b>15</b>
3.1. บทนำ.....	15
3.2. ระบบที่พิจารณา.....	15
3.2.1. เซลล์แสงอาทิตย์.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน.....	22
3.2.3. แบตเตอรี่.....	23
3.3. หลักการเบื้องต้นของการออกแบบสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า.....	27
3.4. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต.....	29
3.4.1. หลักการทำงานของวิธีการรบกวนและสังเกต.....	30
3.5. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง.....	33
3.5.1. หลักการทำงานของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง.....	33
3.5.2. การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	38
3.6. การเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีต่างๆ.....	39
3.7. สรุป.....	44
<b>4. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....</b>	<b>45</b>
4.1. บทนำ.....	45
4.2. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....	45
4.2.1. หลักการออกแบบของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....	46
4.2.2. การจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	48
4.3. เปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....	49
4.3.1. ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง.....	49
4.3.2. ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....	51
4.3.3. ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบทั่วไปเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....	53
4.4. สรุป.....	54
<b>5. การสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W.....</b>	<b>55</b>
5.1. บทนำ.....	55



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2. การออกแบบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W.....	55
5.2.1. เซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 40 W.....	57
5.2.2. วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	58
5.2.3. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน.....	61
5.2.4. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	62
5.2.5. วงจรแยกโอดีสัญญาณ.....	62
5.2.6. วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	63
5.2.7. เครื่องมือวัดแสงและอุณหภูมิ.....	65
5.3. ผลการจำลองสถานการณ์.....	66
5.3.1. วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับ วิธีการรบกวนและสังเกต.....	68
5.3.2. การเลือกค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำ แบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง.....	69
5.3.3. วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำ แบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง.....	70
5.4. ผลการทดสอบจากชุดทดสอบพิกัด 40 W.....	71
5.4.1. วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับ วิธีการรบกวนและสังเกต.....	72
5.4.2. การเลือกค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำ แบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง.....	73
5.4.3. วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำ แบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง.....	74
5.5. สรุป.....	75

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6. การสร้างชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า.....	76
6.1. บทนำ.....	76
6.2. การออกแบบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 kW.....	76
6.2.1. เซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW.....	77
6.2.2. วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	78
6.2.3. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน.....	81
6.2.4. เบรกเกอร์และฟิวส์สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง.....	82
6.2.5. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	83
6.2.6. วงจรแยกโดดสัญญาณ.....	84
6.2.7. วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	85
6.3. ผลการทดสอบ.....	86
6.4. สรุป.....	88
7. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	89
7.1. สรุป.....	89
7.2. ข้อเสนอแนะ.....	91
รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและโค้ดการทำงานของการทำงานของการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่พิกัด 40 W และ 3 kW.....	95
ภาคผนวก ข. โค้ดการทำงานของชุดทดสอบพิกัด 40 W และชุดต้นแบบพิกัด 3 kW.....	100
ภาคผนวก ค. การออกแบบและสร้างชุดต้นแบบ ด้วยโปรแกรม Altium Designer .....	113
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	138

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า.....	8
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
3.1	พารามิเตอร์แบตเตอรี่ Lithium titanate (LTO) model: EQ48V40Ah.....	25
3.2	พารามิเตอร์ชุดอัดประจุไฟฟ้า (Sirius capacitor module).....	26
3.3	พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Bifacial solar cell (model: LR4-72HBD-43M).....	27
3.4	พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Bifacial solar cell (model: LR4-72HBD-43M) จำนวน 6 แผง ปรับปรุงจากค่าการสะท้อนที่ 20 %.....	29
3.5	ค่าพารามิเตอร์การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink.....	39
5.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุดทดสอบพิกัด 40 W.....	57
5.2	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink 40 W.....	66
6.1	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอดอนแรงดัน.....	81
6.2	ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอดอนแรงดัน.....	82

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	สถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....2
1.2	โครงสร้างระบบควบคุมพลังงานของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 3
3.1	ระบบที่ทำการพิจารณา..... 16
3.2	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์..... 17
3.3	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์..... 19
3.4	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิคงที่ ที่ $25^{\circ}\text{C}$ และความเข้มของแสงมีการเปลี่ยนแปลง..... 20
3.5	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อความเข้มของแสงคงที่ ที่ $1000\text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง..... 21
3.6	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน..... 22
3.7	แบตเตอรี่ Lithium titanate (LTO) model: EQ48V40Ah..... 25
3.8	แบตเตอรี่ Lithium titanate (LTO) model: EQ48V40Ah..... 26
3.9	การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองหน้า 3 Series box 2 parallel string..... 28
3.10	กราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของวิธีการรบกวนและสังเกต..... 30
3.11	แผนภาพการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต... 32
3.12	กราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง..... 34
3.13	แผนภาพการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง..... 37
3.14	การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink ของวิธีวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง..... 38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ของการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink เมื่ออุณหภูมิคงที่ ที่ 25°C.....	40
3.16 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่า $\Delta d = 0.05$ ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	41
3.17 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่า $\Delta d = 0.03$ ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	42
3.18 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่า $\Delta d = 0.01$ ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	43
4.1 แผนภาพการทำงานของการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....	47
4.2 การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink ของวิธีวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว..	48
4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	50
4.4 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	52
4.5 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	53
5.1 ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 40 W.....	56
5.2 ชุดตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	56
5.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชุดทดสอบ 40 W 40°C.....	58
5.4 การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	59
5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจร ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า..... 60
5.7	การต่อใช้งานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน..... 61
5.8	วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อใช้งานร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ ลดทอนแรงดัน..... 62
5.9	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง..... 63
5.10	การต่อใช้งานวงจรแยกโหนดสัญญาณ..... 63
5.11	วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแยกโหนดสัญญาณ..... 63
5.12	เครื่องมือวัดแสงและอุณหภูมิ..... 65
5.13	การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink ของชุดทดสอบพิกัด 40 W..... 66
5.14	กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับ กระแสไฟฟ้า (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า..... 67
5.15	ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเพิ่มค่า ความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกตที่ความเข้มแสง 1000 W/m <sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า..... 68
5.16	ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดการเลือกค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงของ วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง 1000 W/m <sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า..... 69
5.17	ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว เทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง 1000 W/m <sup>2</sup> ที่ อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า..... 70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกตที่ความเข้มแสง 1000 W/m <sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 40°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	72
5.19 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดการเลือกค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง 1000 W/m <sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 40°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	73
5.20 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเพิ่มความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง 1000 W/m <sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 40°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า.....	74
6.1 ชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 kW.....	76
6.2 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW.....	77
6.3 การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	78
6.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	79
6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า.....	80
6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า.....	80
6.7 วงจรวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันใช้งานกับชุดต้นแบบ 3 kW.....	81
6.8 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	83
6.9 การต่อใช้งานวงจรแยกโดดสัญญาณ.....	84
6.10 สัญญาณอินพุตของวงจรแยกโดดสัญญาณ.....	84
6.11 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกโดดสัญญาณ.....	85
6.12 วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	85
6.13 โซล่าชาร์จเจอร์ พิกัด 60 A 3 kW.....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14 ผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับ โซล่าชาร์จเจอร์ (ก) ความเข้มแสง (ข) กำลังไฟฟ้า.....	87
ก.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง MATLAB/Simulink ที่พิกัด 40 W และ 3 kW.....	96
ก.2 บล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง.....	96
ก.3 บล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการรบกวนและสังเกต.....	96
ก.4 บล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว.....	97
ค.1 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้้าออกแบบด้วยโปรแกรม Altium Designer...	114
ค.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันออกแบบด้วยโปรแกรม Altium Designer.	114
ค.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงออกแบบด้วยโปรแกรม Altium Designer.....	115
ค.4 วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแยกโดดสัญญาณออกแบบด้วย โปรแกรม Altium Designer.....	115





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

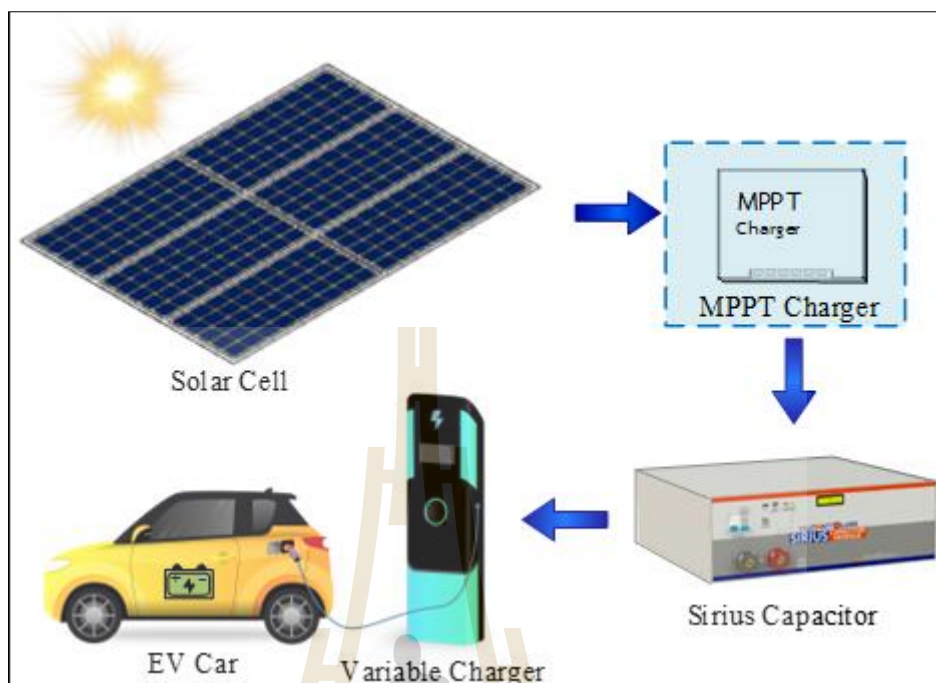
ปัจจุบันปัญหาเรื่องการใช้พลังงานเริ่มมีมากขึ้น พลังงานที่ได้จากทรัพยากรที่มีจำกัด เช่น พลังงานที่ได้จากถ่านหิน หรือจากน้ำมันเป็นพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ทำให้พลังงานทางเลือกที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่จะนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้จะเป็นพลังงานที่สะอาด พลังงานทางเลือกที่นำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น พลังงานจากความร้อนใต้พิภพ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานจากคลื่นทะเล และพลังงานจากแสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ การที่จะแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้นั้น จำเป็นต้องใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่วนใหญ่จะถูกผลิตขึ้นจากจำพวกสารกึ่งตัวนำ โดยจะต้องผ่านวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า มีการใช้ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point tracking : MPPT) และต้องใช้แบตเตอรี่หรือแหล่งกักเก็บพลังงาน เพื่อเก็บพลังงานเอาไว้เพื่อใช้งาน การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า มีความจำเป็นที่ต้องใช้ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง หรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ วิธีควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage: VOC) วิธีเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร (Short Circuit Current: ISC) วิธีวิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation Method: P&O) และวิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance: INC) เป็นต้น จากวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการที่ถูกนำมาใช้งานและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันคือวิธีเพิ่มค่าความนำ ซึ่งเป็นวิธีการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า แล้วคำนวณหาจุดการทำงานถัดไป วิธีนี้ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกต งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้เลือกนำเสนอวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงมาปรับปรุง ทำให้กลายเป็นวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ที่มีความรวดเร็วในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในทุกสภาวะความเข้มของแสงและอุณหภูมิ ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า

ในสถานะอยู่ตัวเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการยืนยันวิธีการควบคุมที่นำเสนอด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Block) บนโปรแกรม MATLAB /Simulink และชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบผลของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง เพื่อยืนยันว่าวิธีที่นำเสนอสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง และจะนำผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวไปใช้กับระบบควบคุมพลังงานของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากรูปที่ 1.1 โครงสร้างระบบควบคุมพลังงานของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่พิจารณาประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 6 แผง กล่องควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด กล่องสำหรับกักเก็บกำลังไฟฟ้า (Sirius Capacitor) ชุดอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า (Variable Charger) และ ยานยนต์ไฟฟ้า (EV Car) แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างระบบควบคุมพลังงานของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

1.2.2 เพื่อแก้ปัญหาและพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เพื่อติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทุกสภาวะความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ

1.2.3 เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้เกี่ยวกับวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ไปประยุกต์ใช้งานจริงกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เบื้องต้นเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน มีแหล่งจ่ายอินพุตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40W

1.3.2 ระบบที่จะนำไปทดสอบที่สถานีชาร์จรถไฟฟ้า เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน มีแหล่งจ่ายอินพุตเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 3 kW โหลดเป็นแบตเตอรี่ขนาด 48 V

1.3.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้าร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB

1.3.4 ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวสำหรับสถานีชาร์จ อาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ระบบที่พิจารณาจะเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน มีแหล่งจ่ายเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่เชื่อมกับสถานีชาร์จ

1.4.2 แรงดันของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต้องมีค่ามากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่

1.4.3 การยืนยันผลการศึกษาและตรวจสอบความถูกต้องของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในงานวิทยานิพนธ์ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ผ่าน Simulink บนโปรแกรม MATLAB และผลทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ รวมถึงผลทดสอบกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการดึงพลังงานสูงสุดจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.5.2 ได้แนวทางแก้ปัญหาและพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระในอดีต
- 1.5.3 ได้ความรู้ในการเขียนโปรแกรมและแบบจำลองสถานการณ์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดบนโปรแกรม MATLAB และได้ความรู้ในการเขียนโปรแกรมและการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมทั้งการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ ทางไฟฟ้า
- 1.5.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการเก็บข้อมูล
- 1.5.5 ได้ชุดอุปกรณ์ทดสอบ สำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการและใช้ทดสอบที่สถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.5.6 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ในระดับชาติ / นานาชาติ

## 1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รูปเล่มรายงานวิทยานิพนธ์มีส่วนประกอบจำนวน 7 บท โดยในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

*บทที่ 1* บทนำ จะนำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย

*บทที่ 2* นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

*บทที่ 3* นำเสนอระบบที่พิจารณา หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง และนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

*บทที่ 4* นำเสนอหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว หลักการออกแบบ และนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

*บทที่ 5* นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ การออกแบบวงจรชุดทดสอบ และนำเสนอผลการทดสอบด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง และวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

บทที่ 6 นำเสนอวิธีการ ออกแบบ ทดสอบ และการสร้างชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากโซล่าชาร์จเจอร์ ที่ติดตั้งและใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของชุดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 7 นำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและแบบเชื่อมกริด ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบสถานีอัดประจุสำหรับชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าได้ ในบทนี้จึงได้นำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ที่มีรายละเอียดของงานวิจัยตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ และสาระสำคัญดังต่อไปนี้

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า

การอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบขนาดของระบบให้เหมาะสมกับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้และแหล่งพลังงานที่มี เพื่อจัดการกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนองานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	M. Nizam and F. X. Rian Wicaksono	นำเสนอการกำหนดค่าระบบพลังงานไฮบริดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ชนบท จะประเมินความเหมาะสมจากการกำหนดค่าต่าง ๆ และเลือกค่าที่ดีที่สุด จากนั้นนำมาติดตั้งกับระบบจัดเก็บพลังงานสามแบบ คือ แบตเตอรี่ Lead Acid และแบตเตอรี่ UNS Lithium เซลล์ Lithium Ion และ Lithium Ferro Phosphate (LFP) เพื่อหาต้นทุนการทำงานและต้นทุนพลังงานขั้นต่ำในแต่ละปี และนำระบบที่ได้ไปใช้สร้างสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่ราคาถูกเพื่อสนับสนุนโครงสร้างพื้นฐานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2019	Y. Zhang, J. He and Dan M. Ionel	นำเสนอแบบจำลองของสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้คอนเวอเตอร์หลายพอร์ต ทำงานร่วมกับระบบการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์และระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยใช้เครื่องมือ ANSYS TwinBuilder เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ SiC ที่ดีกว่าอุปกรณ์ Si แบบดั้งเดิม
2020	S. Bhadra, P. Mukhopadhyay, S. Bhattacharya, S. Debnath, S. Jhampat and A. Chandra	นำเสนอการออกแบบและปรับปรุงสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด จะควบคุมการอัดประจุให้กับยานยนต์ไฟฟ้าและการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ากริดในกรณีที่ไม่มี การชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อจัดการพลังงานให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด



ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	A. Verma	นำเสนอการควบคุมสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และพลังงานจากกริด ที่มีโหมดการทำงานต่างๆ ในการจัดการกับพลังงานที่ผลิตได้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
2021	T.S.Biya and M.R.Sindhu	นำเสนอการออกแบบสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ร่วมกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบกริด นำเสนอแบบจำลองผ่านMATLAB/Simulink เพื่อการเปรียบเทียบและการยืนยันความเสถียรของระบบ

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าในตารางที่ 2.1 สามารถสรุปได้ว่า การอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าสามารถใช้งานร่วมกับแหล่งพลังงานได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น พลังงานจากกริด พลังงานลม พลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีการออกแบบและควบคุมการอัดประจุเพื่อให้มีการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอหลักการออกแบบระบบอัดประจุเบื้องต้นแสดงไว้ในบทที่ 3

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

การดึงพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพลังงานที่ไม่มีการปล่อยมลพิษกลับสู่ชั้นบรรยากาศ และการดึงพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อาศัยระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนองานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	M. Adly, H. El-Sherif and M. Ibrahim	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร ใช้งานร่วมกับวิธีการควบคุมพีซีลอจิก ที่ให้ประสิทธิภาพดีกว่าแบบวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจรแบบทั่วไป นำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
2012	F. Z. Hamidon, P. D. Abd. Aziz, N. H. Mohd Yunus	บทความนี้แนะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้วิธีการวนซ้ำแบบการรบกวนและสังเกต โดยนำเสนอตั้งแต่การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มาของพารามิเตอร์ต่างๆ หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2013	M. A. Abdourraziq, M. Ouassaid, M. Maaroufi, S. Abdourraziq	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระวิธีวนซ้ำแบบวิธีการรบกวนและสังเกตที่ปรับหลักการตามรอยให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบดั้งเดิม โดยจะปรับค่าขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงให้สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ทำให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าที่ไวกว่าแบบคงค่าขั้นตอนการเปลี่ยนแปลง และลดการสั่นไหวของกำลังไฟฟ้าที่ได้ที่สถานะอยู่ตัว
2013	Hadeed A. S, Murtaza A. F., Khaled E. A. and Marcello C.	นำเสนอหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟไลน์ โดยมีวิธีการเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจรแบบแบบทั่วไป (FSCC) วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจรแบบทั่วไป (FOCV) วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) และวิธีการเพิ่มค่าความนำ (INC)
2014	M. A. Abdourraziq, M. Maaroufi and M. Ouassaid	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระวิธีวนซ้ำแบบวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว โดยจะทำการปรับค่าขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงให้ปรับตัวตามความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เพื่อให้ได้การติดตามจุดกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
2016	Sivaramakrishnan S.	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงเส้น (Linear Extrapolated MPPT: LEMPPT) เปรียบเทียบกับวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจรแบบทั่วไป นำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Amit P. and Harpal T.	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระวิธีวนซ้ำแบบวิธีการเพิ่มค่าความนำที่ใช้งานคู่กับการควบคุมค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงด้วยตัวควบคุม PI เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด นำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
2017	Thueanpangthaim C., Wongyai P., Areerak K. and Areerak K.	นำเสนอการการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีอิงกระแสไฟฟ้าจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink
2018	Dilovan Haji, Naci Genc	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระแบบวิธีวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างวิธีการรบกวนและสังเกตกับวิธีการใช้ตัวควบคุมพีซีลลจิกจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB แสดงให้เห็นว่าวิธีการใช้ตัวควบคุมพีซีลลจิกจะสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่า และกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวเกิดการกระเพื่อมน้อยกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต
2019	Mohammed Z., Salaheddine Z., Abdelghani E. O., Belkassem T. and Hafida Z.	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระวิธีวนซ้ำแบบวิธีการรบกวนและสังเกตและแบบวิธีการเพิ่มค่าความนำ โดยใช้เทคนิคตัวควบคุมพีซีลลจิกมาช่วยในการปรับค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมและติดตามกำลังไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด นำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
2022	R.K Rai and O.P. Rahi	นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวควบคุมพีซีลลจิกที่ใช้กราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามาใช้เป็นตัวอ้างอิง และนำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ในตารางที่ 2.2 สามารถสรุปวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้ 2 วิธีดังต่อไปนี้

2.2.1 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระแบบไม่วนซ้ำ (Non-Iterative MPPT) คือเทคนิคที่ใช้เพื่อติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ต้องใช้วิธีการทดลองแบบรอบไปจนกว่าจะได้จุดสูงสุดที่แน่นอน ในขณะที่เทคนิคแบบทดลองแบบวนซ้ำจำเป็นต้องใช้การทดลองและการปรับแก้ไขหลายรอบเพื่อให้ไปสู่จุดสูงสุดที่แน่นอน เทคนิคไม่วนซ้ำนั้นมีข้อดีเช่นเวลาตอบสนองที่เร็วกว่า และมีความซับซ้อนในการคำนวณที่น้อยลง เทคนิคเหล่านี้เป็นประโยชน์มากในสภาวะสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับวิธีการแบบรอบแบบดั้งเดิมในการติดตามจุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้ายกตัวอย่างเช่น

- 1) วิธีการเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร (Short Circuit Current: SCC) เป็นวิธีที่จะใช้การวัดค่ากระแสลัดวงจรชั่วขณะ และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของกราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีนี้มีข้อดีคือมีความรวดเร็ว ง่าย ไม่ซับซ้อนในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่มีข้อเสียในการวัดค่าและการควบคุม อาจมีการสูญเสียพลังงานเล็กน้อยในกระบวนการวัดค่าได้
- 2) วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage: OCV) เป็นวิธีที่จะใช้การวัดค่าแรงดันเปิดวงจรชั่วขณะ และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของกราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีนี้มีข้อดีคือมีความรวดเร็ว ง่าย ไม่ซับซ้อนในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่มีข้อเสียในการวัดค่าและการควบคุม อาจมีการสูญเสียพลังงานเล็กน้อยในกระบวนการวัดค่าเช่นเดียวกับ วิธีการเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร

2.2.2 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระแบบวนซ้ำ (Iterative MPPT) คือเทคนิคที่ใช้เพื่อติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบวนซ้ำและแก้ไขเป็นรอบจนกว่าจะได้จุดสูงสุดที่แน่นอน ในแต่ละ

รอบการทำงาน การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะทดลองเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบเพื่อตรวจสอบว่าจะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในขณะนั้น จากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าก่อนหน้า เพื่อปรับพารามิเตอร์ใหม่ในรอบต่อไป กระบวนการนี้จะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แน่นอนหรือใกล้เคียงทำให้ เทคนิคนี้มีความยืดหยุ่นและสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในสภาวะสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่างวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระแบบวนซ้ำ เช่น

- 1) วิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe: P&O) เป็นวิธีที่จะใช้การวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้ามาคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้า และทำการเปรียบเทียบแบบวนซ้ำกับค่ากำลังไฟฟ้าก่อนหน้า เพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีนี้มีความง่ายในการปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้าหากการวัดค่าแรงดันและกระแสที่มีความคลาดเคลื่อน ก็จะส่งผลต่อการคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้
- 2) วิธีการเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance: INC) เป็นวิธีที่จะใช้การวัดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบวนซ้ำ มาเปรียบเทียบกับหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีนี้มีความง่ายในการปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเหมือนกับวิธีการรบกวนและสังเกต แต่ถ้าหากมีการวัดค่าแรงดันและกระแสที่มีความคลาดเคลื่อนจะส่งผลต่อจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อยกว่า

## 2.4 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นองค์ความรู้พื้นฐานและเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยที่จะนำไปใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่จะเลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจะเลือกวิธีเพิ่มค่าความนำที่เป็นการตามรอยแบบวนซ้ำที่ให้ความแม่นยำ ไม่ซับซ้อน และจะพัฒนาให้สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิได้ โดยใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่แสดงรายละเอียดของระบบและการออกแบบจะอธิบายในบทที่ 3 ต่อไป

## บทที่ 3

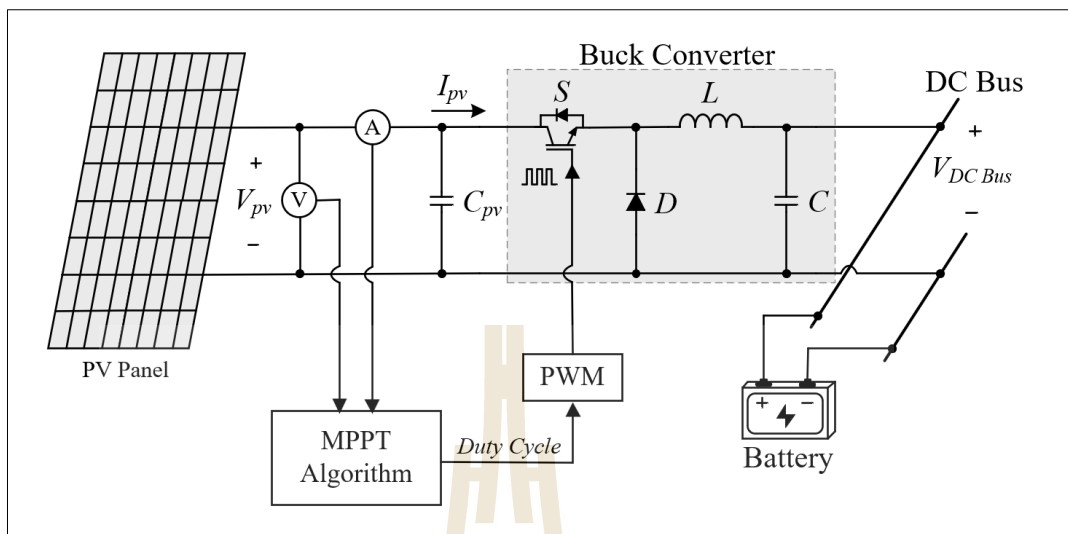
### การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

#### 3.1 บทนำ

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระจำเป็นต้องมีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า งานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าแบบวนซ้ำ 2 วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต และการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำ โดยนำไปประยุกต์ใช้กับระบบสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งได้มีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการศึกษการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะพิจารณาระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีโหลดเป็นแบตเตอรี่เป็นหลัก รายละเอียดจะกล่าวถึงระบบที่พิจารณา เซลล์แสงอาทิตย์ หลักการออกแบบระบบ แบตเตอรี่ การทำงานของวงจรต่าง ๆ และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink

#### 3.2 ระบบที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะพิจารณาจากระบบของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มีส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 3.1



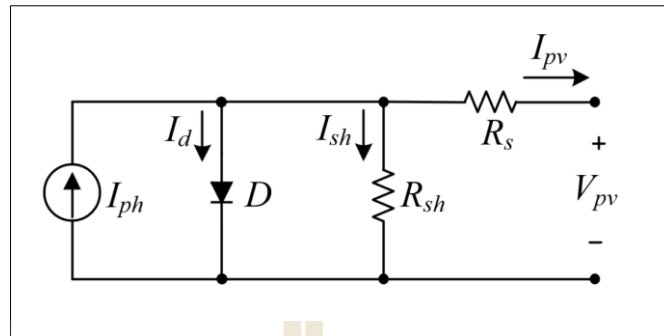
รูปที่ 3.1 ระบบที่ทำการพิจารณา

จากรูปที่ 3.1 ระบบที่ทำการพิจารณาประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เชื่อมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน มีบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแบตเตอรี่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงที่ตกกระทบได้ โดยทั่วไปจะผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำ สามารถอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าผ่านความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าได้จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดกระแสแบบคงที่ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{ph}$ ) ต่อขนานกับไดโอด ความต้านทานขนานที่เกิดจากความต้านทานของซิลิกอนที่เรียงเป็นชั้น ( $R_{sh}$ ) และความต้านทานอนุกรมเกิดจากจุดเชื่อมระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับเซลล์ ( $R_s$ ) กระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกแบ่งไปที่ไดโอด ( $I_d$ ) และไหลผ่านตัวต้านทานขนาน ( $I_{sh}$ ) แสดงดังรูปที่ 3.2





รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนอธิบายคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) กับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าภายในวงจรดังสมการที่ (3-1) จัดสมการใหม่ในรูปสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) ได้ดังสมการที่ (3-2) และผลของการต่ออนุกรมและขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังสมการที่ (3-3)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3-1)$$

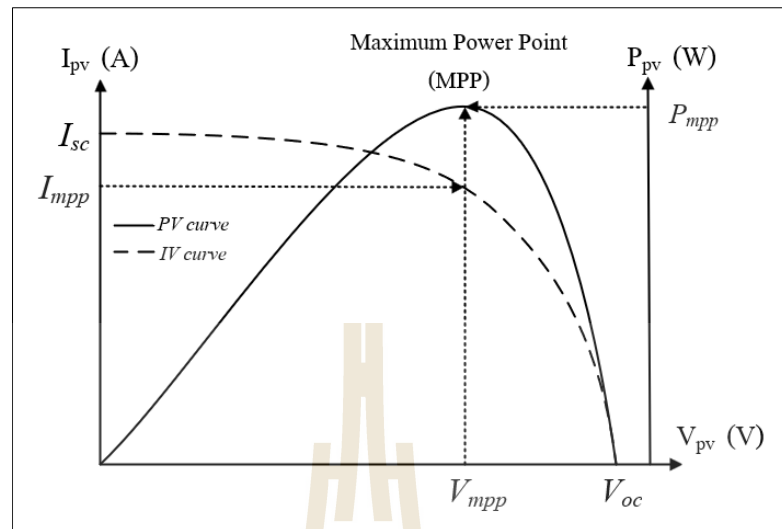
$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( e^{\left( \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{nCV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (3-2)$$

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left( e^{\left( \frac{\left( \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{N_s + N_p} \right)}{nCV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{\left( \frac{N_p}{N_s} V_{pv} + I_{pv}R_s \right)}{R_{sh}} \quad (3-3)$$

- โดยที่  $I_{pv}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (A)  
 $V_{pv}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (V)  
 $I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดแสงอาทิตย์ (A)  
 $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด (A)  
 $I_{sh}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

$I_s$	คือ กระแสไฟฟ้าไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (A)
$n$	คือ ค่าคงที่แพกเตอร์ในอุดมคติ (Ideality factor) ของไดโอด (ชนิดซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 1.3)
$C$	คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมใน 1 โมดูล
$V_t$	คือ Thermal Voltage หาได้จาก $V_t = \frac{kT}{q}$ (V)
$k$	คือ Boltzmann constant มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ (J/Kevin)
$T$	คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Kevin)
$q$	คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ (C)
$R_s$	คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )
$R_{sh}$	คือ ความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )
$N_p$	คือ จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนานกัน
$N_s$	คือ จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน

จากสมการที่ (3-2) และ (3-3) เมื่อพิจารณาคูณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve) และเมื่อนำกระแสไฟฟ้าคูณกับแรงดันไฟฟ้า จะได้กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V curve) มีจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power point: MPP หรือ  $P_{mpp}$ ) และจะทราบค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ ) และกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mpp}$ ) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถอธิบายค่ากระแสไฟฟ้าไบแอสอิมิตัวย้อนกลับของไดโอด ( $I_s$ ) ได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ดังสมการที่ (3-4) และ (3-5)

$$I_s = I_o \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left( \left[ \frac{T}{T_{ref}} - 1 \right] \frac{E_g}{nCV_t} \right)} \quad (3-4)$$

$$I_o = \frac{I_{sc}}{e^{\left( \frac{V_{oc}}{nCV_t} \right)} - 1} \quad (3-5)$$

โดยที่  $I_o$  คือ กระแสไฟฟ้าไบแอสอิมิตัวย้อนกลับที่สภาวะมาตรฐาน (A)

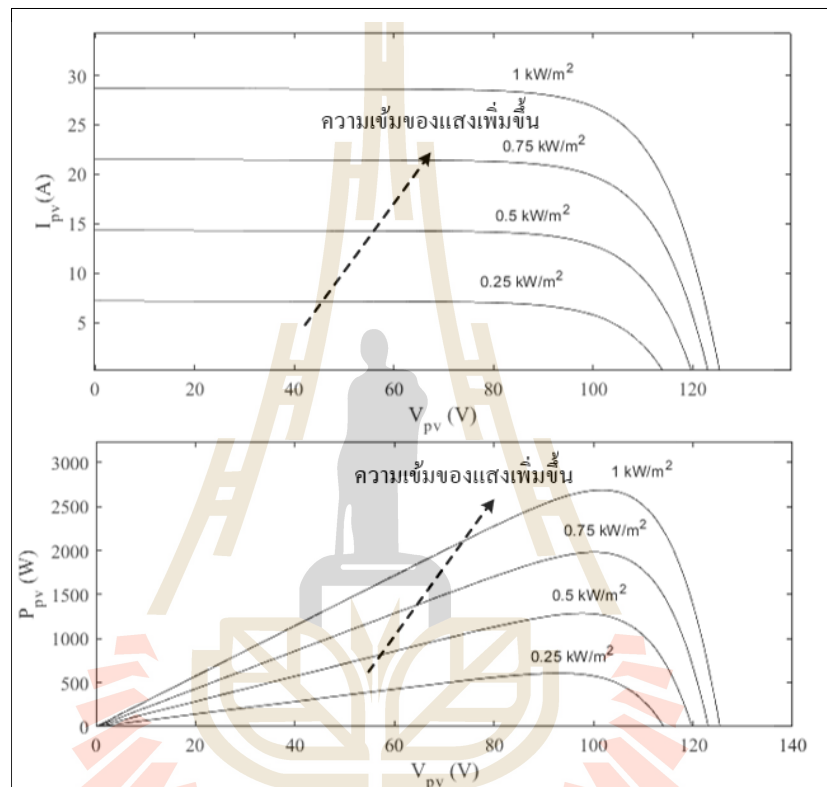
$T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)

$E_g$  คือ พลังงานระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ 1.12eV

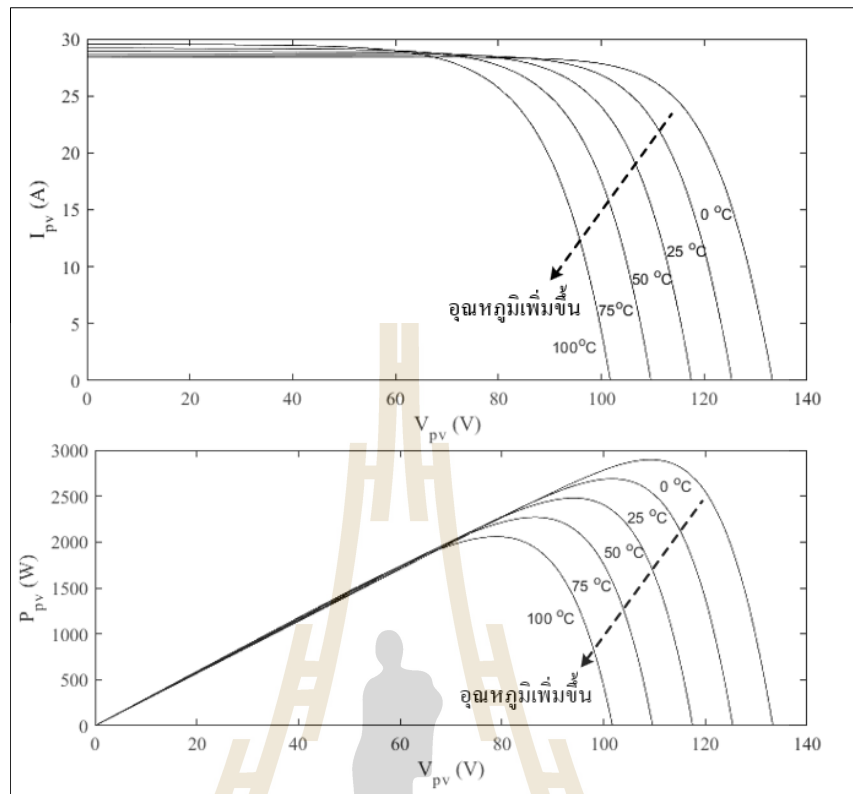
$I_{sc}$  คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (A)

$V_{oc}$  คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายนอกที่ส่งผลโดยตรงต่อจุดการทำงานของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ นั่นก็คือ ปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถอธิบายผลกระทบต่อเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิคงที่ ที่ 25°C และความเข้มของแสงมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.5 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อความเข้มของแสงคงที่ ที่  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 3.4 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิกคงที่ ที่  $25^\circ\text{C}$  และความเข้มของแสงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ก็เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3.5 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อความเข้มของแสงคงที่ ที่  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลง สามารถอธิบาย กระแสไฟฟ้าที่เกิดแสงอาทิตย์ ( $I_{ph}$ ) ได้ดังสมการที่ (3-6)

$$I_{ph} = \left[ I_{sc} + K_i (T - T_{ref}) \right] \cdot \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (3-6)$$

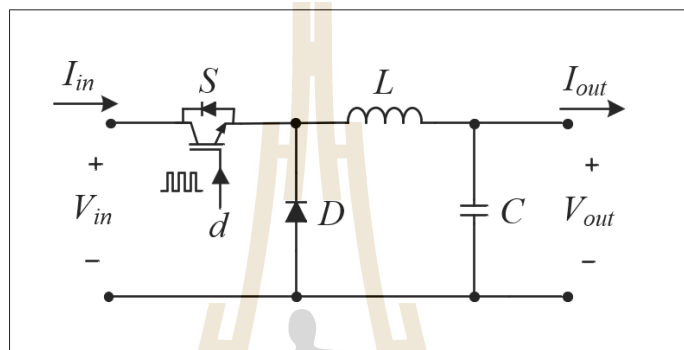
โดยที่  $K_i$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสตัวจกร ( $\text{A}/^\circ\text{C}$ )

$G$  คือ ความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$G_{ref}$  คือ ความเข้มแสงอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

### 3.2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

จากระบบที่ทำการพิจารณารูปที่ 3.1 ระบบจำเป็นต้องมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้งานมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าแบตเตอรี่ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน ซึ่งมีวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

จากรูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันประกอบไปด้วยสวิตซ์ทางไฟฟ้า ไดโอด ขดลวดเหนี่ยวนำ (Capacitor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) สามารถออกแบบพารามิเตอร์ที่จะใช้งานจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน (Muhammad H. Rashid, 1988) ดังสมการที่ (3-6)

$$V_{out} = dV_{in} \quad (3-6)$$

- โดยที่  $V_{out}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน (V)  
 $V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน (V)  
 $d$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

การออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน เนื่องจากมีการใช้งานสวิตช์ทางไฟฟ้า จึงจะต้องคำนึงถึงการกระเพื่อมของสัญญาณที่ได้ ให้มีการกระเพื่อมของสัญญาณน้อยที่สุด และรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ การกระเพื่อมของสัญญาณที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ค่าแรงดันพลิว (Ripple voltage:  $\Delta V_C$ ) และค่ากระแสพลิว (Ripple current:  $\Delta I_L$ ) ของสัญญาณด้านเอาต์พุต การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (Muhammad H. Rashid, 1988) ให้เหมาะสมกับการใช้งานสามารถหาได้ดังสมการที่ (3-7) และ (3-8) ตามลำดับต่อไปนี้

$$L = \frac{V_{out} (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_L f_s V_{in}} \quad (3-7)$$

$$C = \frac{(1-d)V_{out}}{\Delta C_C 8Lf_s^2} \quad (3-8)$$

โดยที่	$L$	คือ ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ (H)
	$C$	คือ ค่าตัวเก็บประจุ (F)
	$f_s$	คือ ความถี่ของสวิตช์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร (Hz)
	$\Delta V_C$	คือ ค่าแรงดันพลิว (V)
	$\Delta I_L$	คือ ค่ากระแสพลิว (A)

### 3.2.3 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของพลังงานที่สามารถเรียกใช้ได้ภายหลัง และมีการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของสารเคมีหรืออิเล็กตรอน ในขณะที่แบตเตอรี่ไม่ถูกใช้งาน พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่สามารถรับส่งไปยังอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าเมื่อจำเป็น แบตเตอรี่มีหลายรูปแบบและขนาดต่างกันโดยได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

- 1) แบตเตอรี่แบบแห้ง (Dry Cell Battery) แบตเตอรี่นี้มักถูกใช้ในอุปกรณ์เล็กๆ เช่น ไฟฉายพกพา รีโมทคอนโทรล นาฬิกา และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพาอื่นๆ แบตเตอรี่แบบแห้งมีโครงสร้างภายในเป็นแผ่นตัวนำบางชิ้นด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ เมื่อใช้งานไปแล้วไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้
- 2) แบตเตอรี่แบบน้ำ (Wet Cell Battery) แบตเตอรี่แบบนี้มักใช้ในรถยนต์ รถจักรยานยนต์ และระบบพลังงานสำรอง แบบที่นิยมใช้งานกันมากที่สุดก็คือ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่แบบนี้มีสารเคมีละลายในน้ำ และสร้างกระแสไฟฟ้าผ่านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างสารในแบตเตอรี่ แบตเตอรี่แบบนี้สามารถเติมสารเคมีและน้ำเพื่อให้มีการใช้งานได้อีกหลายครั้ง แต่ต้องระมัดระวังในการเติมเนื่องจากมีสภาพเป็นกรด
- 3) แบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium-ion Battery) แบตเตอรี่แบบนี้มีความนิยมในระบบอิเล็กทรอนิกส์มือถือ แล็ปท็อป ยานยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์พกพาอื่นๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานสูงและมีน้ำหนักเบา และมีอายุการใช้งานนานกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ แบตเตอรี่ลิเทียมใช้ลิเทียมเป็นวัสดุหลักในการเก็บพลังงานไฟฟ้าและมีระบบควบคุมอิเล็กตรอนในกระบวนการชาร์จและใช้งาน

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้งานแบตเตอรี่ประเภทลิเทียม เนื่องจากจากประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานที่สูง สามารถใช้งานซ้ำได้หลายรอบ มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่เร็ว แบตเตอรี่ที่เลือกใช้งานจะมีอยู่ 2 ส่วนก็คือ

- 1) แบตเตอรี่ Lithium titanate (LTO) model: EQ48V40Ah ติดตั้งในยานยนต์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.7 และมีพารามิเตอร์ในการใช้งานแสดงดังตารางที่ 3.1





รูปที่ 3.7 แบตเตอรี่ Lithium titanate (LTO) model: EQ48V40Ah

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์แบตเตอรี่ Lithium titanate (LTO) model: EQ48V40Ah

ชนิดของแบตเตอรี่	Lithium titanate (LTO)
ความจุพลังงาน (Capacitor of module)	1.92 kWh
ความจุมาตรฐาน (Standard capacity: 1C40A)	40 Ah
ความจุขั้นต่ำ (Minimum Capacity: 6C240A)	37 Ah
แรงดันไฟฟ้า (Rated voltage)	48 V
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Max. Charge voltage)	52 V
แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (Cut-off voltage)	40 V
กระแสไฟฟ้าชาร์จมาตรฐาน (Standard charge current)	40 A (1C)
ระยะเวลาชาร์จ (Charging Time)	About 1.0 hours
กระแสคายประจุต่อเนื่องสูงสุด (Max Continuous discharge current)	100 A (2.5C)
กระแสคายประจุสูงสุด (Peak discharge current)	400 A (10C)
อุณหภูมิการทำงาน (Operate temperature)	Charge 0°C ~ 45°C Discharge -50°C ~ 65°C Storage 0°C ~ 45°C
รอบใช้งาน (Life cycle)	> 20000

- 2) ชุดอัดประจุไฟฟ้า (Sirius capacitor module) model: 3550-48-B-1.7C-M-SD-A-G ใช้งานสำหรับอัดประจุให้กับยานยนต์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.8 และมีพารามิเตอร์ในการใช้งานแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.8 แบตเตอรี่ Lithium titanate (LTO) model: EQ48V40Ah

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ชุดอัดประจุไฟฟ้า (Sirius capacitor module)

ความจุพลังงาน (Capacitor of module)	3.55 kWh
แรงดันไฟฟ้า (Rated voltage)	48 V
ความจุพลังงาน (Capacitor of module)	74 Ah
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Max. Charge voltage)	54 V
ค่าสถานะประจุ (state of charge: SOC)	98
อัตราการชาร์จ (Charging rate)	1.7C

จากการเลือกใช้ชนิดแบตเตอรี่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะเห็นได้ว่า แบตเตอรี่เป็นส่วนที่สำคัญที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงาน จำนวนรอบในการใช้งาน และขนาดที่เหมาะสมต้นทุนที่มี เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งาน

### 3.3 หลักการเบื้องต้นของการออกแบบสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

หลักการเบื้องต้นของการออกแบบสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า จะพิจารณาอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานหรือโหลดใช้งาน และเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะเริ่มพิจารณาจากการประมาณโหลดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ก็คือ แบตเตอรี่ที่ติดตั้งอยู่ที่ยานยนต์ไฟฟ้า เป็นแบตเตอรี่ชนิด Lithium titanate (LTO) จำนวน 4 ลูก และชุดอัดประจุไฟฟ้า 1 ชุด สามารถแสดงการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Total Load} = 3.55 \text{ kWh} + 4 \times 1.92 \text{ kWh} = 11.23 \text{ kWh}$$

เมื่อทำการพิจารณาโหลดใช้งาน จนทราบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จะใช้ จากนั้นจึงเลือกขนาดพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแบบสองหน้า (Bifacial solar cell) model: LR4-72HBD-43M ที่มีการปรับคุณภาพการสะท้อนที่ 20 % ซึ่งมีรายละเอียดพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Bifacial solar cell (model: LR4-72HBD-43M)

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power: $P_{MPP}$ )	430 W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at MPP: $V_{MPP}$ )	40.6 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at MPP: $I_{MPP}$ )	10.6 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Short-circuit current: $I_{sc}$ )	11.30 A
แรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Open circuit voltage: $V_{oc}$ )	48.9 V

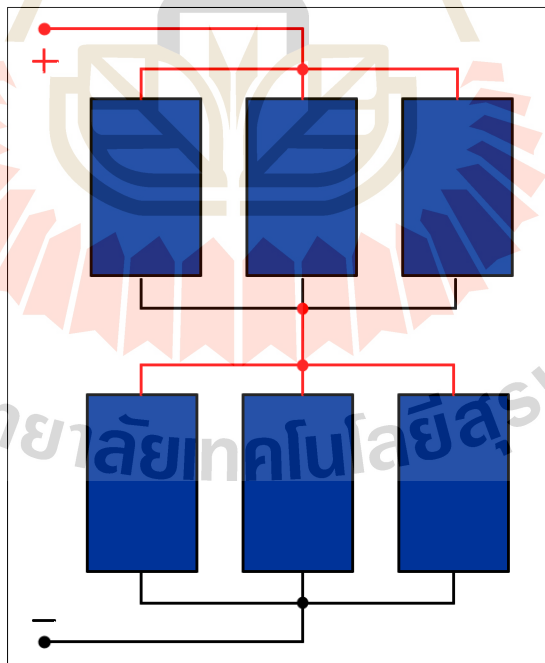
จากตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้เป็นแบบสองหน้า ดังนั้นต้องมีการปรับคุณภาพการสะท้อนที่ 20 % จะได้พิกัดของแผงเพิ่มขึ้นเป็น  $430 \text{ W} \times 1.2 = 516 \text{ W}$  จากนั้นจะทำการหาจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\text{จำนวนแผง} = \frac{\text{Total load} \times \text{Recharge factor} \times (1 + \text{Mppt loss})}{\text{Peak sun hours}} \quad (3-9)$$

$$\text{จำนวนแผง} = \frac{11.23 \text{ kWh/day} \times 1.2 \times (1 + 0.1)}{5 \text{ hr/day}} = 5.74 \approx 6 \text{ แผง}$$

โดยที่	Total load	คือ ผลรวมของการประมาณโหลด (kWh/day)
	Recharge factor	คือ ค่าแฟกเตอร์ตัวปรับคูณโดยมีค่า 1.15 < สำหรับโหลดที่ไม่สำคัญ 1.20 < ค่าเริ่มต้นสำหรับระบบทั่วไป 1.30 < สำหรับระบบที่มีความสำคัญต้องใช้พลังงานตลอดทั้งวัน
	Mppt loss	คือ ค่าชดเชยการสูญเสียพลังงาน
	Peak sun hour	คือ ค่าระยะเวลาที่มีแสง 1kW/m <sup>2</sup> ต่อ 1 วัน

หลังจากมีการคำนวณหาจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว จะต้องมาออกแบบวิธีการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับติดตั้งใช้งาน โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีขนาดพิกัดของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่าแรงดันแบตเตอรี่ เพื่อที่จะใช้งานกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันการอัดประจุ ดังนั้นการต่อเซลล์แสงอาทิตย์จะต่อขนานกัน 3 แผง และนำมาต่ออนุกรมกัน 2 ชุด แสดงดังรูปที่ 3.9 และมีพารามิเตอร์รวมแสดงดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.9 การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองหน้า 2 Series box 3 parallel string

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Bifacial solar cell (model: LR4-72HBD-43M)  
จำนวน 6 แผง ปรับปรุงจากค่าการสะท้อนที่ 20 %

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power: $P_{MPP}$ )	3096 W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at MPP: $V_{MPP}$ )	81.2 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at MPP: $I_{MPP}$ )	38.13 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Short-circuit current: $I_{sc}$ )	41.46 A
แรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Open circuit voltage: $V_{oc}$ )	99 V

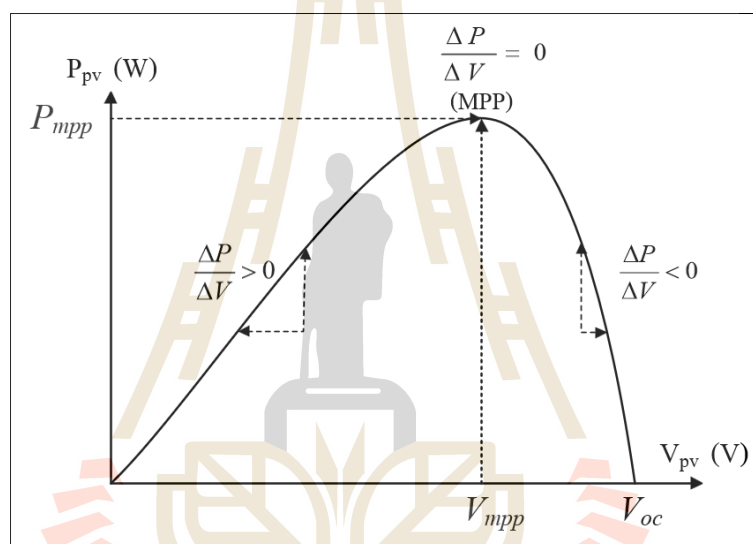
จากหลักการเบื้องต้นของการออกแบบสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าส่วนที่มีความสำคัญต่อการผลิตพลังงานเพื่ออัดประจุให้กับยานยนต์ไฟฟ้านั้นก็คือ เซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีการออกแบบให้เพียงพอต่อการใช้งาน และเลือกใช้ชนิดของแผงให้เหมาะสมกับสถานที่ตำแหน่งที่ติดตั้ง รวมไปถึงประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ต้องสอดคล้องกับการใช้งาน การเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองหน้าเป็นแผงที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับแผงแบบทั่วไปตามท้องตลาด

### 3.4 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตเป็นวิธีการตามรอยไฟฟ้าที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เป็นการทำงานแบบวนซ้ำด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ลู่อเข้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด การควบคุมด้วยเซนเซอร์ในการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ส่วนใหญ่จะใช้งานควบคู่กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ในหัวข้อนี้ จะนำเสนอผลการตอบสนองผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้ากับวิธีอื่น ๆ ต่อไป

### 3.4.1 หลักการทำงานของวิธีการรบกวนและสังเกต

หลักการทำงานของวิธีการรบกวนและสังเกตเป็นการทำงานแบบวนซ้ำผ่านคาบเวลาด้วยการรบกวนการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและทำการปรับค่าแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน สามารถอธิบายด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของวิธีการรบกวนและสังเกตแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  
ของวิธีการรบกวนและสังเกต

จากรูปที่ 3.10 ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPP) จะเห็นได้ว่าความชัน (Slope) ของกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์ จากสมการของแรงดันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันสมการที่ (3-6) และรูปที่ 3.1 ระบบที่พิจารณาให้แรงดันอินพุตวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าคือแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันเอาต์พุตคือแรงดันของแบตเตอรี่หรือแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง จัดรูปสมการใหม่ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-10)

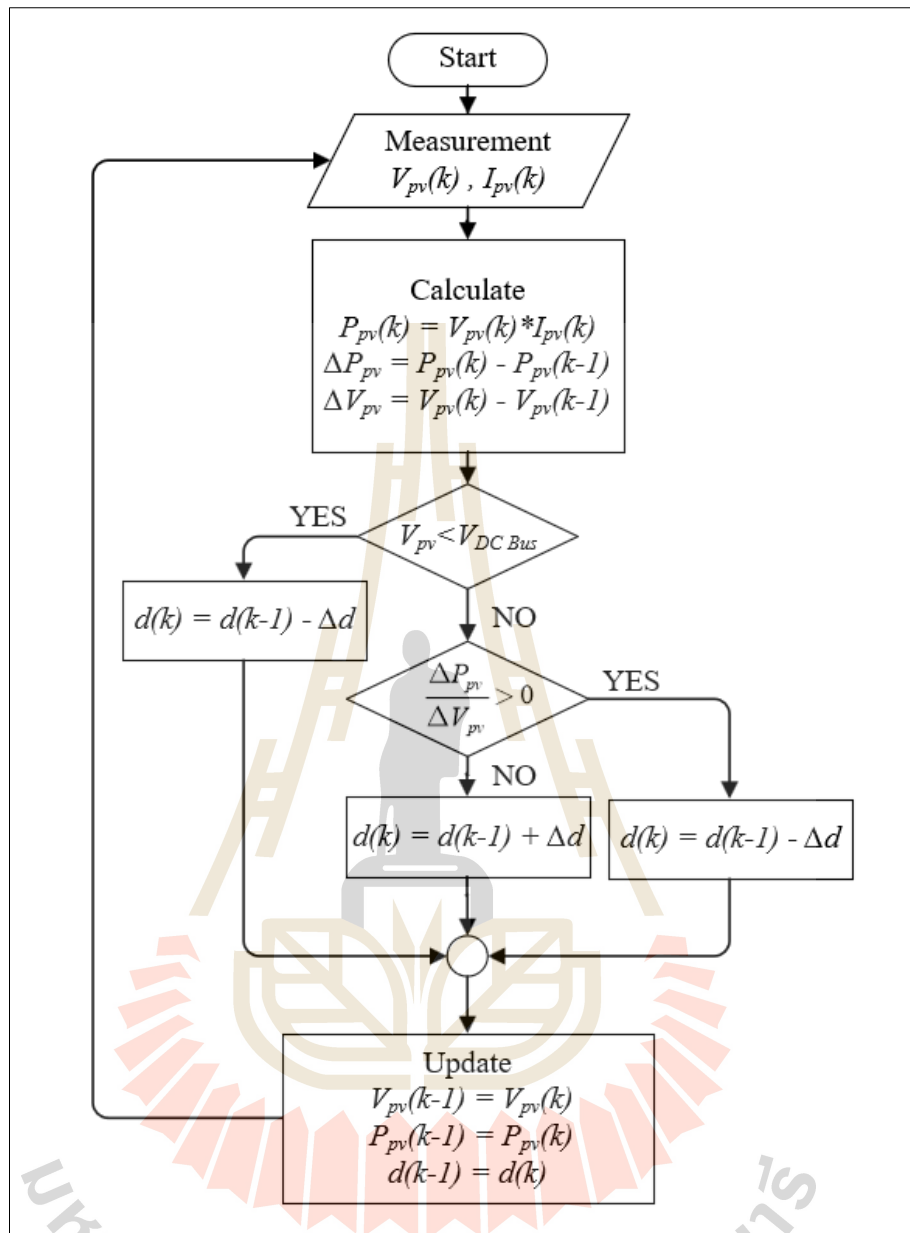
$$V_{pv} = \frac{V_{DCBus}}{d} \quad (3-10)$$

จากสมการที่ (3-10) หากต้องการต้องปรับแรงดันไฟฟ้าให้ได้เท่ากับ  $V_{mpp}$  ด้วยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาจุดการทำงานดังสมการที่ (3-11)

$$\begin{aligned} \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} &= 0; && \text{จุดการทำงานอยู่ที่จุด MPP} \\ \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} &> 0; && \text{จุดการทำงานอยู่ด้านซ้ายจุด MPP} \\ \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} &< 0; && \text{จุดการทำงานอยู่ด้านขวาจุด MPP} \end{aligned} \quad (3-11)$$

จากสมการที่ (3-11) เมื่อทราบจุดการทำงานของหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าแบบรบกวนและสังเกต จะต้องใช้อัลกอริทึมที่ใช้งาน กำหนดให้  $k$  คือรอบในการวนซ้ำในคาบเวลาปัจจุบัน และ  $k-1$  คือ รอบในการวนซ้ำในคาบเวลาก่อนหน้า จะได้แผนภาพการทำงานของหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต แสดงดังรูปที่ 3.11

โดยที่	$V_{pv}(k)$	คือ แรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน (V)
	$I_{pv}(k)$	คือ กระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน (A)
	$P_{pv}(k)$	คือ กำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน (W)
	$d(k)$	คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่รอบปัจจุบัน
	$V_{pv}(k-1)$	คือ แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์รอบก่อนหน้า (V)
	$P_{pv}(k-1)$	คือ กำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบก่อนหน้า (W)
	$d(k-1)$	คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่รอบก่อนหน้า
	$\Delta V_{pv}$	คือ ผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบันกับรอบก่อนหน้า (V)
	$\Delta P_{pv}$	คือ ผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบันกับรอบก่อนหน้า (W)
	$\Delta d$	คือ ค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่



รูปที่ 3.11 แผนภาพการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต



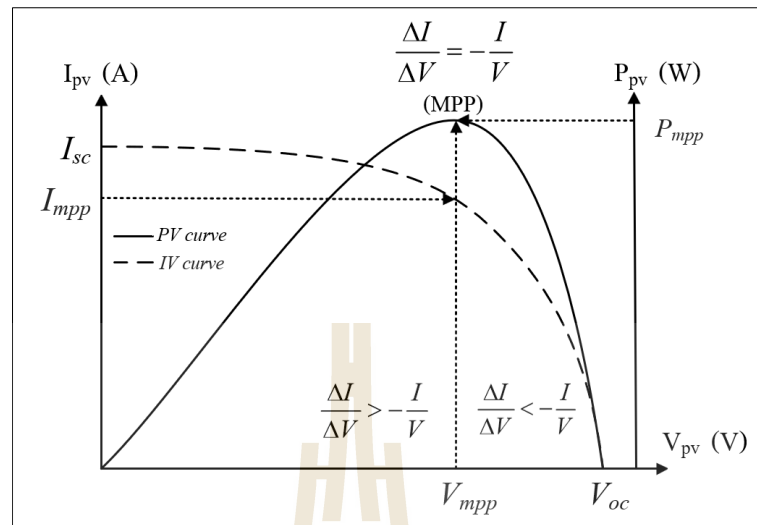
จากรูปที่ 3.11 หลักการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต จะมีการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ มีการคำนวณหา กำลังไฟฟ้า และมีการตรวจสอบแรงดัน หากแรงดันน้อยกว่าแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ให้ระบบลดค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าลงเพื่อเพิ่มแรงดัน จากนั้นตรวจสอบแรงดันว่ามีการทำงานอยู่ที่จุดไหน หากจุดการทำงานอยู่ที่จุด MPP ระบบจะทำการคงค่าแรงดันให้เท่าเดิม หากจุดการทำงานอยู่ด้านซ้ายจุด MPP ระบบจะทำการเพิ่มค่าแรงดันเพื่อให้เข้าใกล้จุด MPP มากขึ้นด้วยการลดค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าลง และหากจุดการทำงานอยู่ด้านขวาจุด MPP ระบบจะทำการลดค่าแรงดันเพื่อให้เข้าใกล้จุด MPP ด้วยการเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขึ้น

### 3.5 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเป็นอีกหนึ่งในวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีหลักการควบคุมเป็นแบบวนซ้ำ เหมือนกับวิธีการรบกวนและสังเกต แต่จะมีการคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าโดยตรง ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการตามรอยที่ดีกว่า โดยนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

#### 3.5.1 หลักการทำงานของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง จะมีหลักการทำงานคล้ายกับวิธีการรบกวนและสังเกต โดยการควบคุมจะเป็นแบบวนซ้ำผ่านควเวลามีปรับการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันเพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่จะแตกต่างกันที่วิธีการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดผ่านกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าโดยตรง สามารถอธิบายด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของเพิ่มค่าความนำแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 3.12 ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ว่าความชันของกำลังไฟฟ้ามักเป็นศูนย์ การหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะอ้างอิงจากสมการกำลังไฟฟ้า ( $P_{pv}$ ) ที่หาได้จากแรงดันไฟฟ้า ( $V_{pv}$ ) คูณกับกระแสไฟฟ้า ( $I_{pv}$ ) ดังสมการที่ (3-12)

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (3-12)$$

จากสมการที่ (3-12) ทำการหาค่าความชันของกำลังไฟฟ้า นั่นก็คือการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับคาบเวลาจะให้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-13)

$$dP_{pv} = V_{pv} \cdot dI_{pv} + I_{pv} \cdot dV_{pv} \quad (3-13)$$

จากสมการที่ (3-13) นำ  $dV_{pv}$  หารตลอดในสมการที่ (3-13) และจัดรูปสมการใหม่จะให้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-14)

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv} \quad (3-14)$$

จากสมการที่ (3-14) หากพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเห็นได้ว่าค่าความชันของกราฟกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเป็นศูนย์ ( $dP_{pv}/dV_{pv} = 0$ ) จะได้สมการความสัมพันธ์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังสมการที่ (3-15)

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3-15)$$

จากสมการที่ (3-15) เมื่อพิจารณาการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับคาบเวลาของสมการกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าของ  $dI_{pv}$  คือ ผลต่างของกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบันเทียบกับรอบก่อนหน้า ( $\Delta I_{pv}$ ) และค่าของ  $dV_{pv}$  คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบันเทียบกับรอบก่อนหน้า ( $\Delta V_{pv}$ ) สามารถพิจารณาจุดการทำงานได้ดังสมการที่ (3-16)

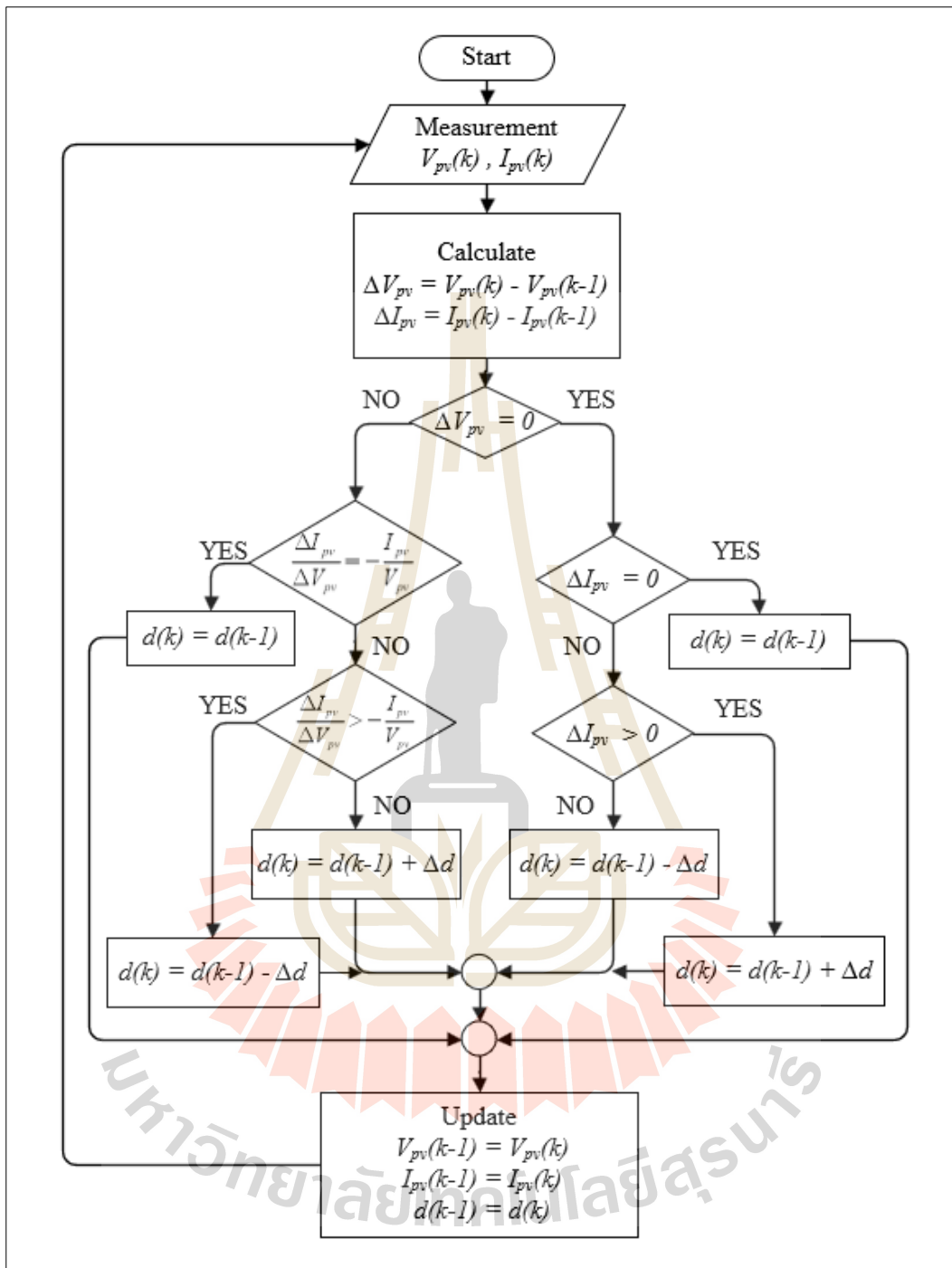
$$\begin{aligned} \Delta I_{pv} / \Delta V_{pv} &= -I_{pv} / V_{pv}; && \text{จุดการทำงานอยู่ที่จุด MPP} \\ \Delta I_{pv} / \Delta V_{pv} &> -I_{pv} / V_{pv}; && \text{จุดการทำงานอยู่ด้านซ้ายจุด MPP} \\ \Delta I_{pv} / \Delta V_{pv} &< -I_{pv} / V_{pv}; && \text{จุดการทำงานอยู่ด้านขวาจุด MPP} \end{aligned} \quad (3-16)$$

จากสมการที่ (3-16) เมื่อทราบจุดการทำงานของหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง จะต้องมีอัลกอริทึมที่ใช้งาน กำหนดให้  $k$  คือรอบในการวนซ้ำในคาบเวลาปัจจุบัน และ  $k-1$  คือ รอบในการวนซ้ำในคาบเวลาก่อนหน้า จะได้แผนภาพการทำงานของหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 3.14

โดยที่  $V_{pv}(k)$  คือ แรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน (V)  
 $I_{pv}(k)$  คือ กระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน (A)  
 $d(k)$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่รอบปัจจุบัน

- $V_{pv}(k-1)$  คือ แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์รอบก่อนหน้า (V)
- $I_{pv}(k-1)$  คือ กระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบก่อนหน้า (A)
- $d(k-1)$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่รอบก่อนหน้า
- $\Delta V_{pv}$  คือ ผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน  
กับรอบก่อนหน้า (V)
- $\Delta I_{pv}$  คือ ผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน  
กับรอบก่อนหน้า (A)
- $\Delta d$  คือ ค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่



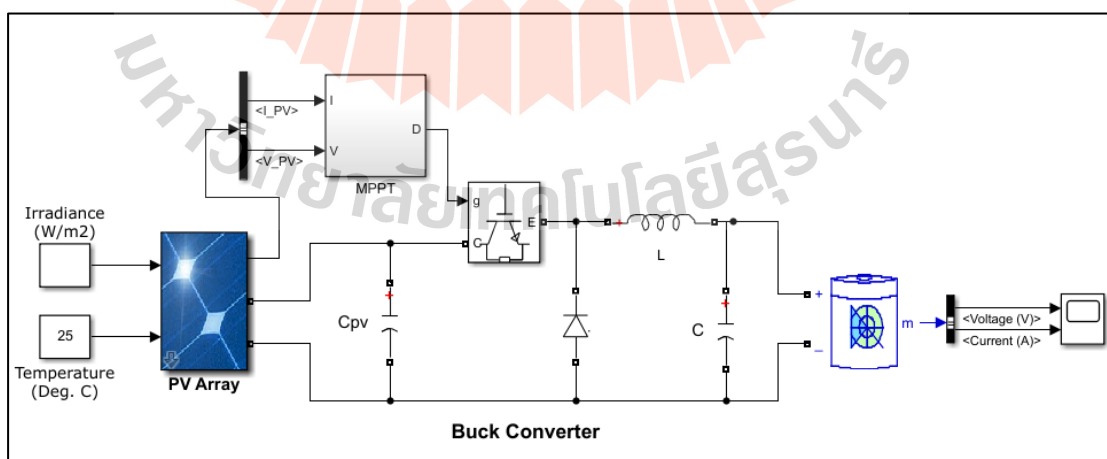


รูปที่ 3.13 แผนภาพการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 3.13 หลักการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง จะมีการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาเหมือนกับวิธีการรบกวนและสังเกต แต่จะมีการเปรียบเทียบจุดการทำงานโดยตรงไม่มีการคำนวณหา กำลังไฟฟ้า จะเริ่มจากการตรวจสอบผลต่างของแรงดันไฟฟ้า เมื่อผลต่างของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์จะตรวจสอบกระแสไฟฟ้า หากกระแสไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงระบบจะคงค่าวัฏจักรหน้าที่ หากมีการเปลี่ยนแปลงระบบเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าให้เข้าใกล้จุด MPP และเมื่อผลต่างของแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นศูนย์ ระบบจะตรวจสอบจุดการทำงานของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หากจุดการทำงานอยู่ที่จุด MPP ระบบจะทำการคงค่าแรงดันให้เท่าเดิม หากจุดการทำงานอยู่ด้านซ้ายจุด MPP ระบบจะทำการเพิ่มค่าแรงดันเพื่อให้เข้าใกล้จุด MPP มากขึ้นด้วยการลดค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าลง และหากจุดการทำงานอยู่ด้านขวาจุด MPP ระบบจะทำการลดค่าแรงดันเพื่อให้เข้าใกล้จุด MPP ด้วยการเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขึ้น

### 3.5.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต และวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง จะอ้างอิงพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบต่างๆจากสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.14



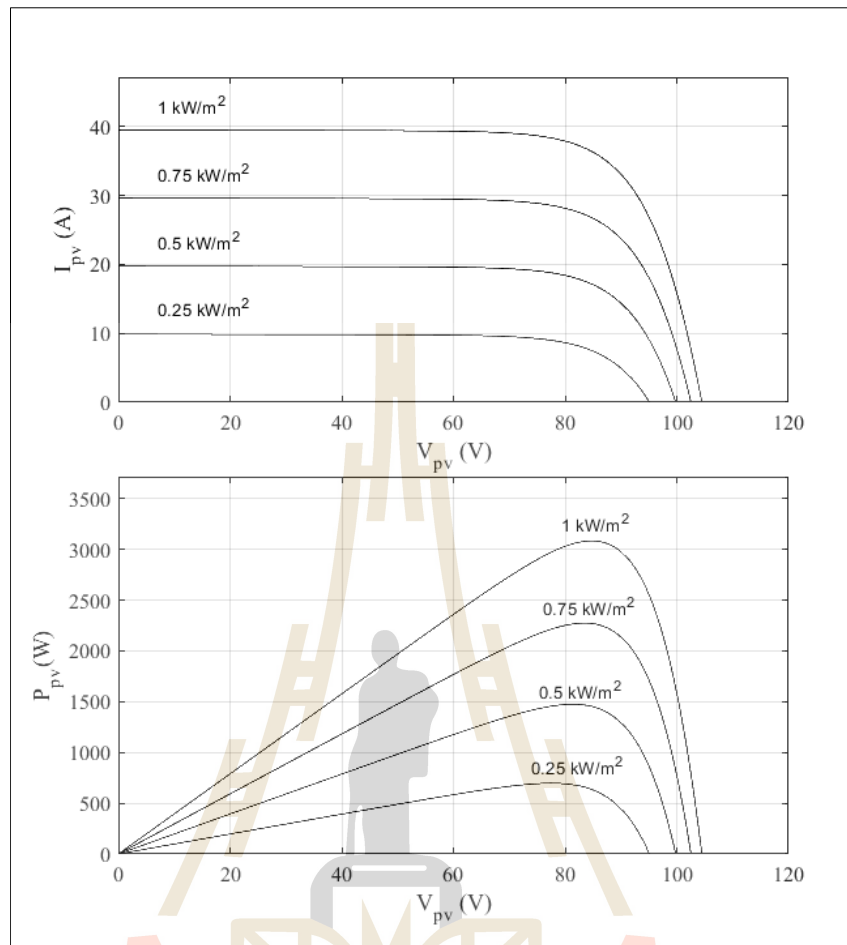
รูปที่ 3.14 การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink ของวิธีวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง

### 3.6 การเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีต่างๆ

การเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะเปรียบเทียบอยู่ 2 วิธี คือ วิธีการรบกวนและสังเกตเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะอ้างอิงให้ใกล้เคียงกับระบบที่ทำการพิจารณา สถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยจะมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.5 และกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ของการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink แสดงดังรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink

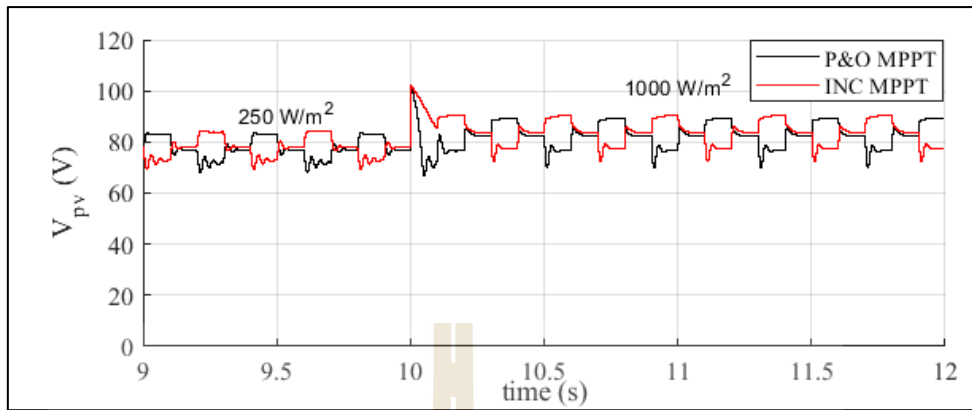
เซลล์แสงอาทิตย์	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power: $P_{MPP}$ )	3095.74 W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at MPP: $V_{MPP}$ )	84.75 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at MPP: $I_{MPP}$ )	36.53 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Short-circuit current: $I_{sc}$ )	39.28 A
แรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Open circuit voltage: $V_{oc}$ )	104.49 V
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน	
$L$ ( $\Delta I \leq 0.04A$ )	15 mH
$C$ ( $\Delta V \leq 0.01V$ )	2200 $\mu F$
$C_{pv}$	1000 $\mu F$
$T_s$	0.1 วินาที
แบตเตอรี่	48 V



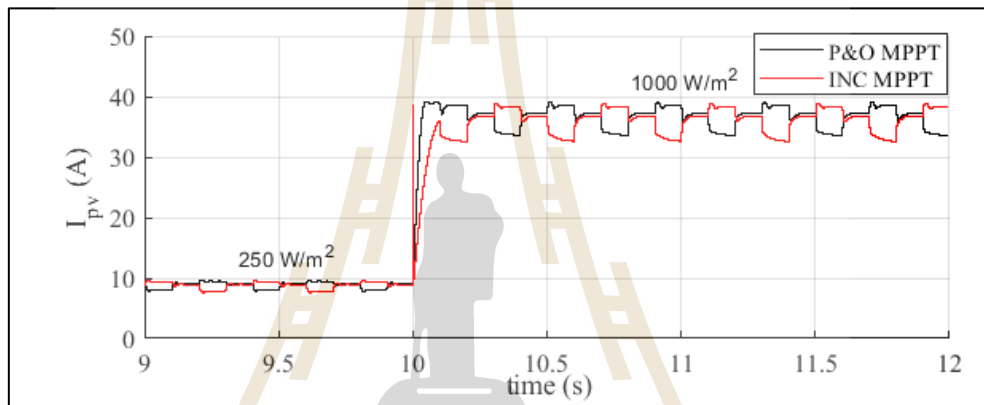
รูปที่ 3.15 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ของการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink เมื่ออุณหภูมิคงที่ ที่  $25^{\circ}\text{C}$

จากตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.15 พารามิเตอร์และกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ของการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink จะทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตามรอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง โดยจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมือนกัน และค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากัน 3 ค่า นั่นก็คือ  $\Delta d = 0.05$   $\Delta d = 0.03$  และ  $\Delta d = 0.01$  ที่ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก  $250 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  กำหนดคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างที่  $0.1\text{s}$  ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 3.16, 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ

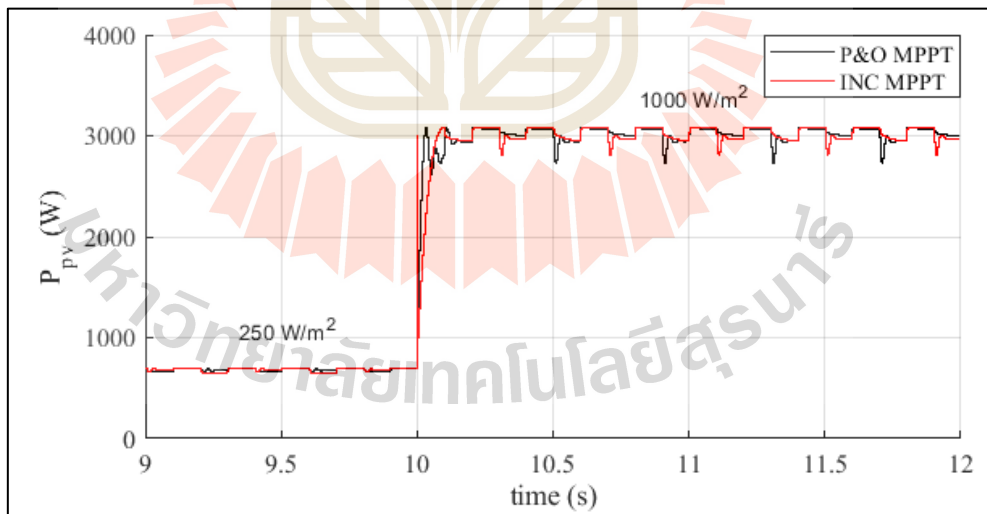




(ก)

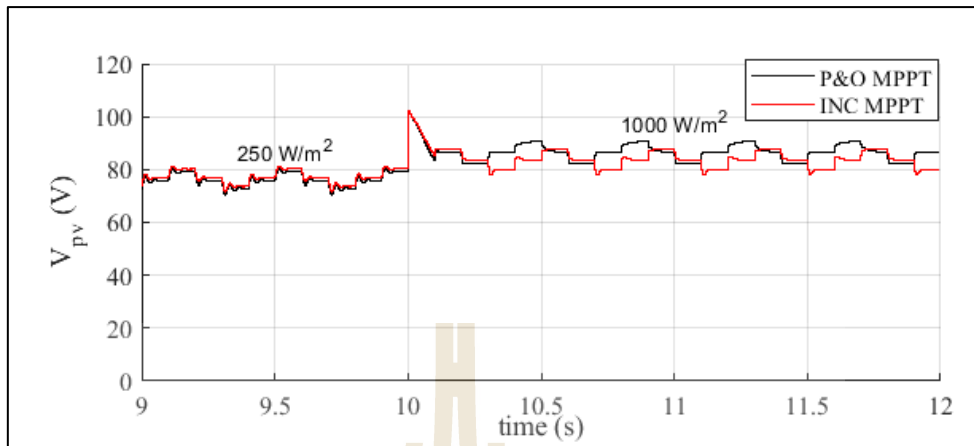


(ข)

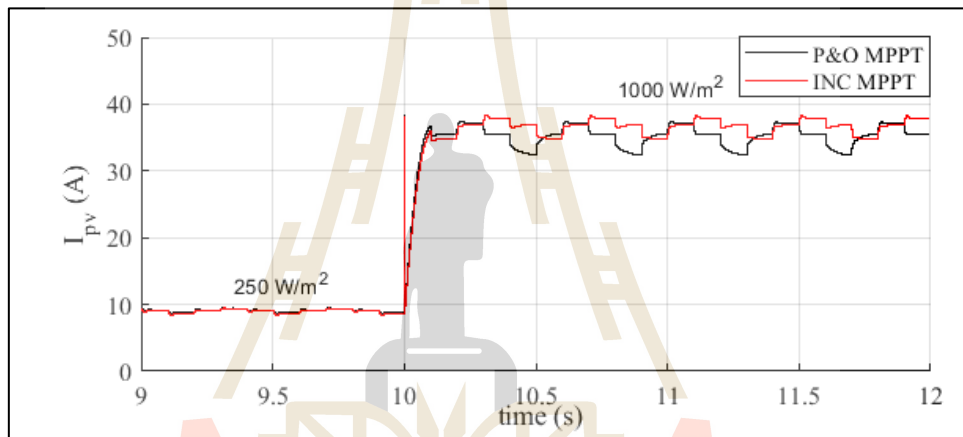


(ค)

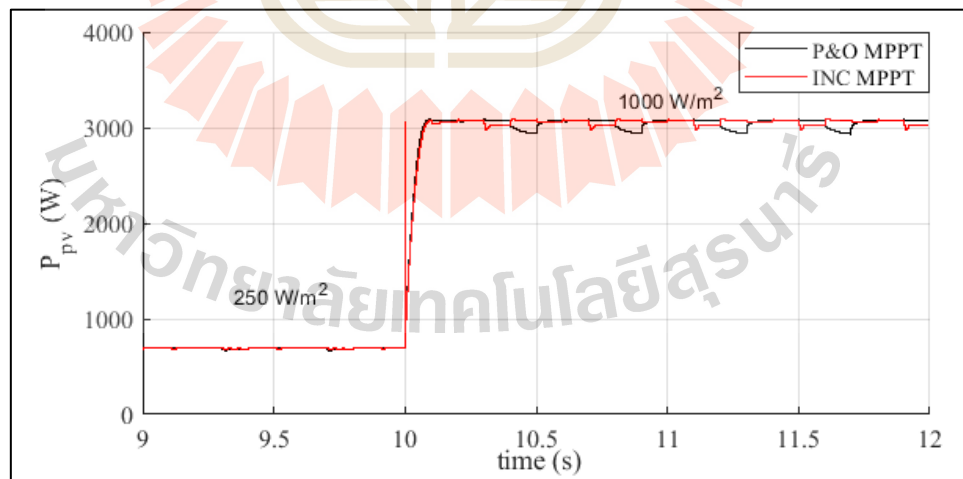
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่า  $\Delta d = 0.05$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า



(ก)



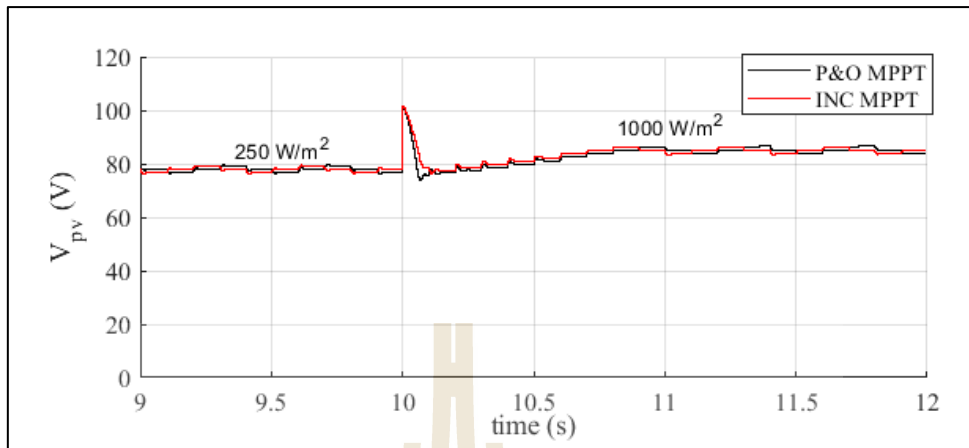
(ข)



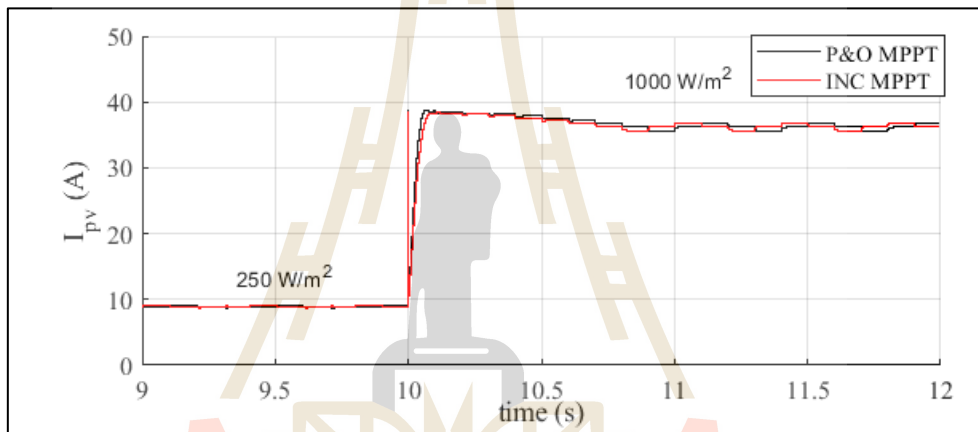
(ค)

รูปที่ 3.17 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่า  $\Delta d = 0.03$

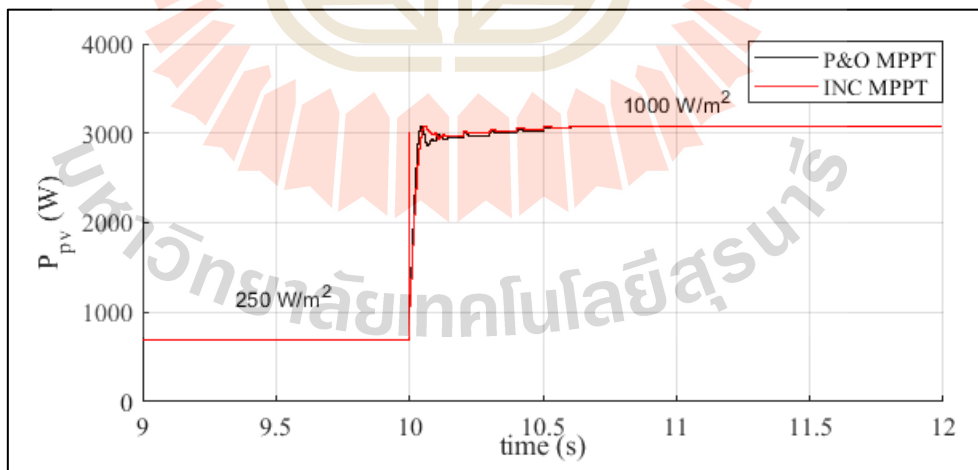
ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.18 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่า  $\Delta d = 0.01$  ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

จากผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธีการรบกวนและสังเกตเทียบกับวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 3.16 ที่ค่า  $\Delta d = 0.05$  ที่สภาวะคงตัว ที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  วิธีเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงมีการสิ้นของกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าวิธีการรบกวนและสังเกตเล็กน้อย จากรูปที่ 3.17 ที่ค่า  $\Delta d = 0.03$  กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะคงตัว ที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  จะเห็นว่าวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงมีการแกว่งไกว้น้อยกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้มีการสิ้นน้อยกว่าตามไปด้วย และจากรูปที่ 3.18 ที่ค่า  $\Delta d = 0.01$  เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจาก  $250 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  วิธีเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต ดังนั้นโดยรวมแล้ววิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

### 3.7 สรุป

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นจะต้องเลือกส่วนประกอบต่างๆในระบบไม่ว่าจะเป็น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แหล่งกักเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่ ให้เหมาะสมกับการใช้งานเพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุนและประสิทธิภาพการผลิตพลังงานที่ได้ นอกจากนี้แล้วอีกส่วนที่สำคัญในการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด จะอาศัยอัลกอริทึมในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้เป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีการใช้งานทั่วไป นั่นก็คือวิธีการรบกวนและสังเกตกับวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง เปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่า วิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงไปพัฒนาให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการตามรอยเพิ่มขึ้น โดยจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

### การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ซึ่งเป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พัฒนาขึ้นจากวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง เพื่อแก้ไขปัญหาการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่แบบคงที่ เมื่อปรับค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่มีขนาดเล็ก จะทำให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้า ในทางกลับกันถ้าปรับค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่มีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดการสั่นไหวที่สภาวะอยู่ตัว วิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวจะอาศัยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้มีการปรับตัวตามกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ทำให้เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วขึ้น และมีการสั่นไหวของกำลังไฟฟ้าน้อยลง เมื่อเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง จุดเด่นของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอผลการทดสอบผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

#### 4.2 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว มีหลักการทำงานคล้ายกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง แต่จะแตกต่างกันที่การปรับเปลี่ยนค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่ จะพิจารณาจากค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ปรับคูณด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ( $N$ ) แสดงดังสมการที่ (4-1)

$$\Delta d = N * \left| \frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} \right| \quad (4-1)$$

โดยที่	$\Delta d$	คือ ค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่
	$N$	คือ ค่าปรับคูนคองที่
	$\Delta V_{pv}$	คือ ผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน กับรอบก่อนหน้า (V)
	$\Delta P_{pv}$	คือ ผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์รอบปัจจุบัน กับรอบก่อนหน้า (W)

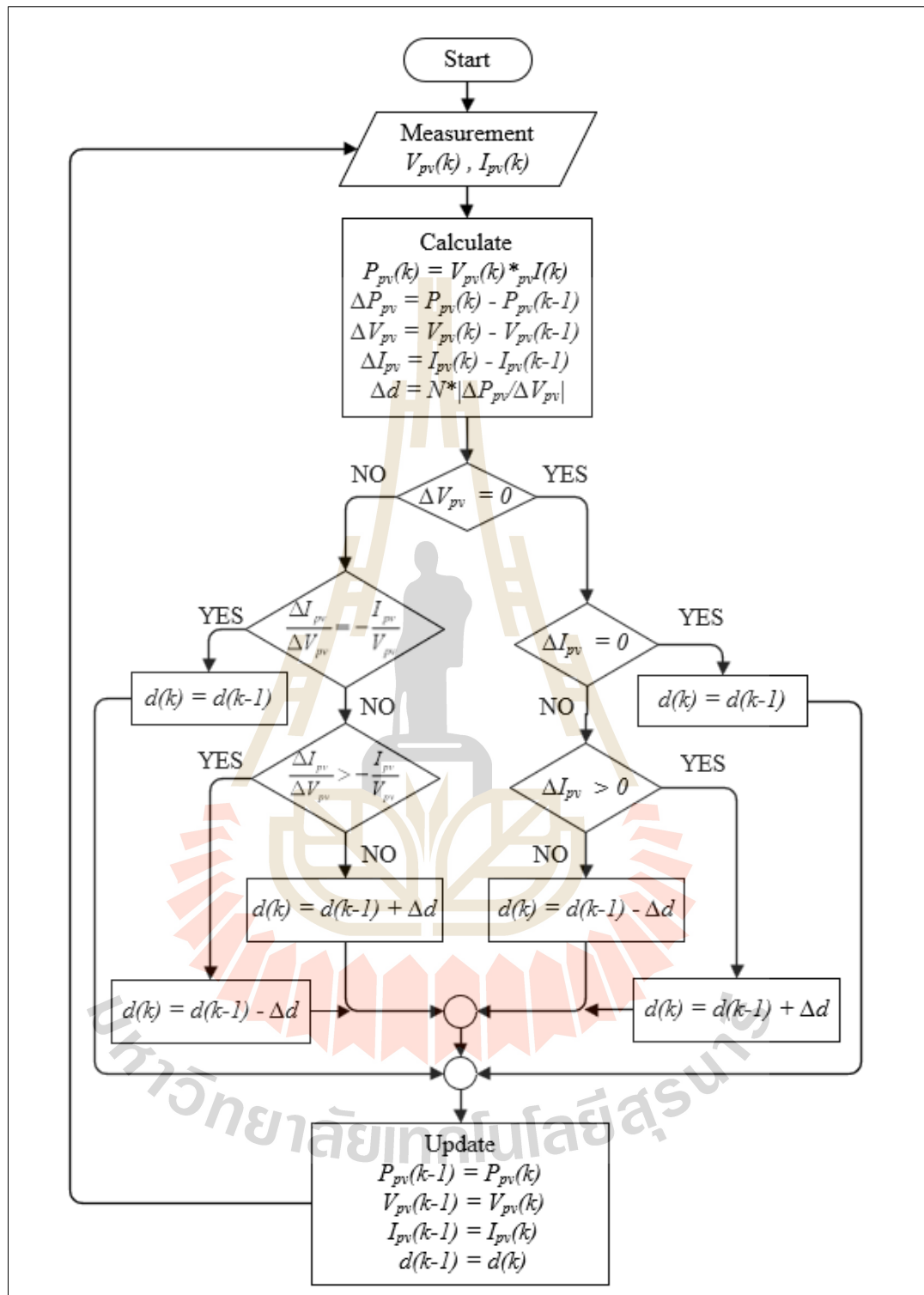
#### 4.2.1 หลักการออกแบบของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

หลักการออกแบบค่าปรับคูนคองที่ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว จะพิจารณาจากผลการตอบสนองของวิธีการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง โดยจะนำผลการตอบสนองที่ดีที่สุดของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงมาพิจารณาค่าการสั้นไกวของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า เพื่อเลือกค่าปรับคูนคองที่ แสดงดังสมการที่ (4-2)

$$N < \left| \frac{\Delta v_{pv, \max}}{\Delta p_{pv} / \Delta v_{pv}} \right| \quad (4-2)$$

โดยที่	$\Delta v_{pv, \max}$	คือ ผลต่างการสั้นไกวสูงสุดแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการ เพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง (V)
	$\Delta v_{pv}$	คือ ผลต่างการสั้นไกวแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำ แบบปรับตัวที่ต้องการ (V)
	$\Delta p_{pv}$	คือ ผลต่างการสั้นไกวกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำ แบบปรับตัวที่ต้องการ (W)

จากสมการที่ (4-2) สามารถออกแบบเลือกค่าปรับคูนคองที่ สำหรับใช้งานกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว โดยมีแผนภาพการทำงานของ การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว แสดงดังรูปที่ 4.1

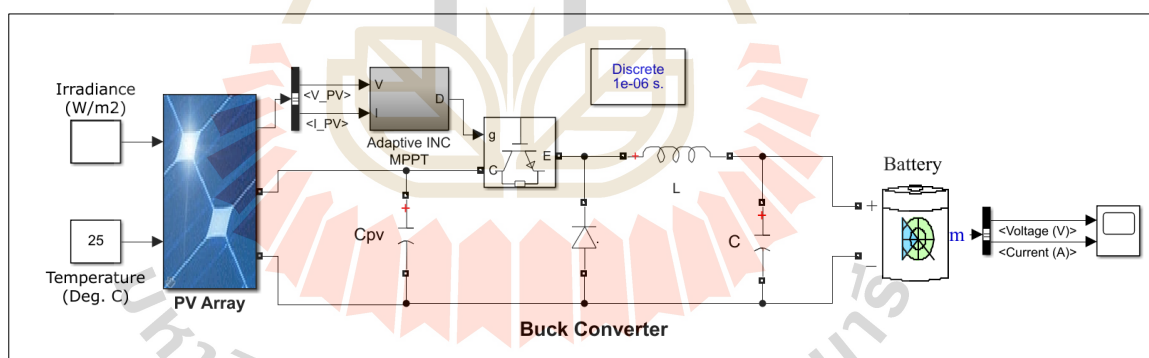


รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

จากรูปที่ 4.1 การทำงานของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว เริ่มการทำงานด้วยการวัดค่าแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า นำค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้า นำค่าความชันที่ได้ไปปรับคูณกับค่าปรับคูณคงที่ เพื่อกำหนดเป็นค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงเมื่อจุดการทำงานอยู่ห่างจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่จะมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อจุดการทำงานเข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่จะมีขนาดลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวลู่เข้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็ว และทำให้มีผลการสั่นไกวน้อยที่สภาวะอยู่ตัว

#### 4.2.2 การจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว จะอ้างอิงพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบต่าง ๆ จากสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink ของวิธีวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว



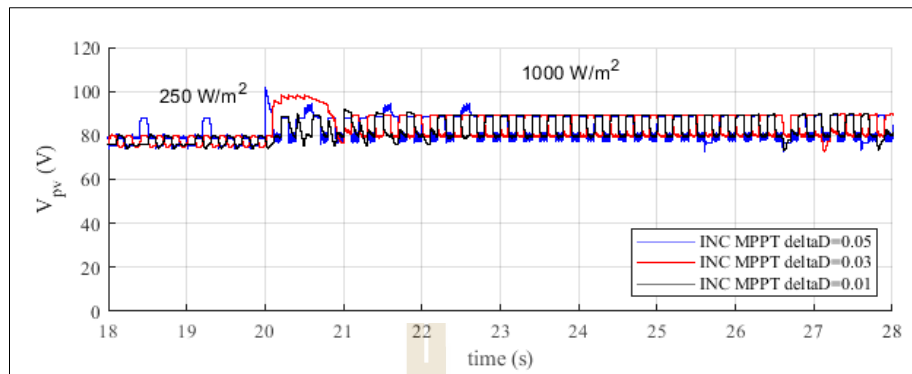
### 4.3 เปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

การจำลองสถานการณ์จะเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.16 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ของการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink เมื่ออุณหภูมิคงที่ที่  $25^{\circ}\text{C}$  มาใช้ในการเปรียบเทียบผล โดยจะเลือกค่าที่ดีที่สุดของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง เปรียบเทียบกับค่าที่ดีที่สุดของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว เพื่อเลือกค่าที่ได้ไปใช้งานในการสร้างชุดทดสอบจริงต่อไป

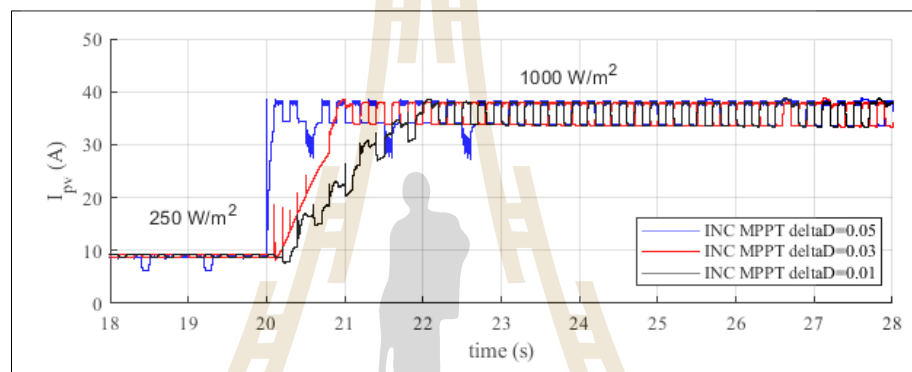
#### 4.3.1 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง

การจำลองสถานการณ์ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง จะเลือกค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง ของค่าวัฏจักรหน้าที่ ให้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน 3 ค่า นั่นก็คือ  $\Delta d = 0.05$   $\Delta d = 0.03$  และ  $\Delta d = 0.01$  ที่ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก  $250 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  กำหนดคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างที่ 0.1 วินาที ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.3

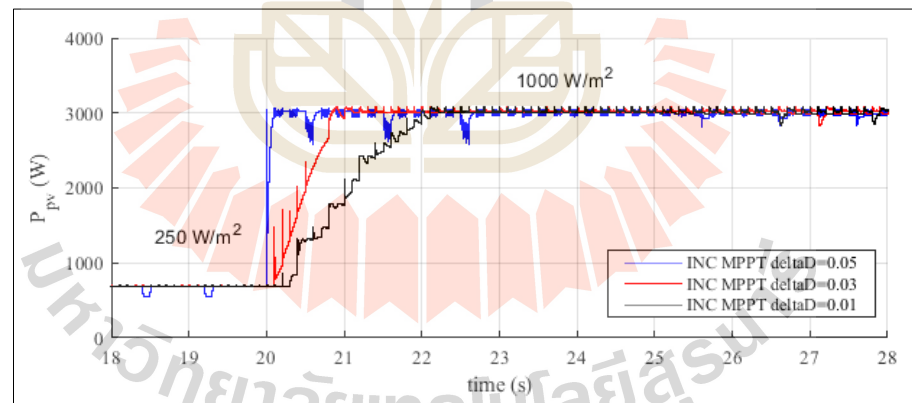
จากผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อปรับค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่ลดลง ส่งผลให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสู่เข้าสภาวะอยู่ตัวช้าลง และทำให้การสั้นไกวของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวมีค่าลดลง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้ค่า  $\Delta d = 0.03$  ซึ่งเป็นค่าที่ให้ผลการตอบสนองดีที่สุด ไปใช้เปรียบเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวต่อไป



(ก)



(ข)

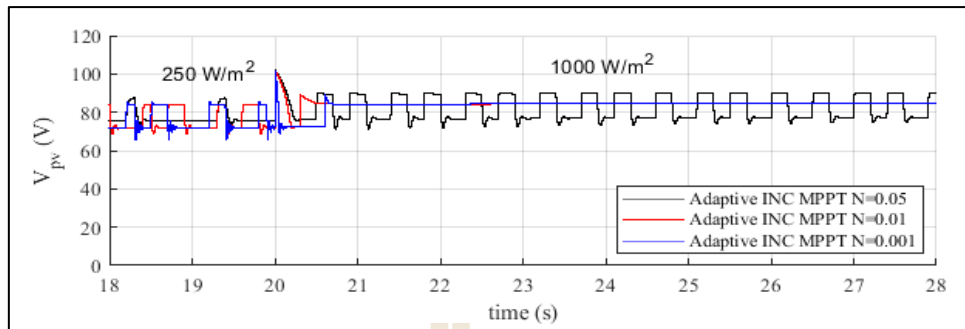


(ค)

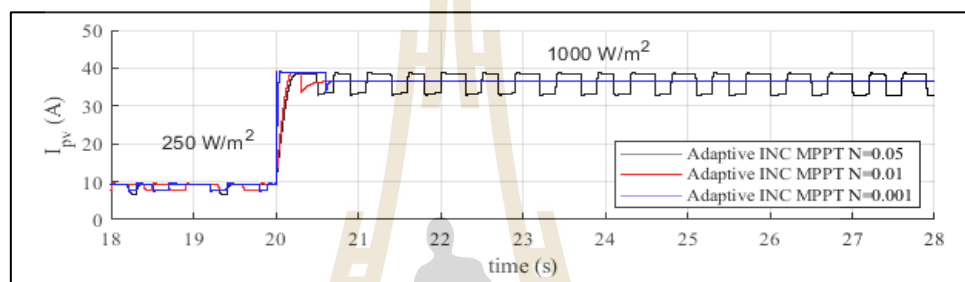
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง  
ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

#### 4.3.2 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

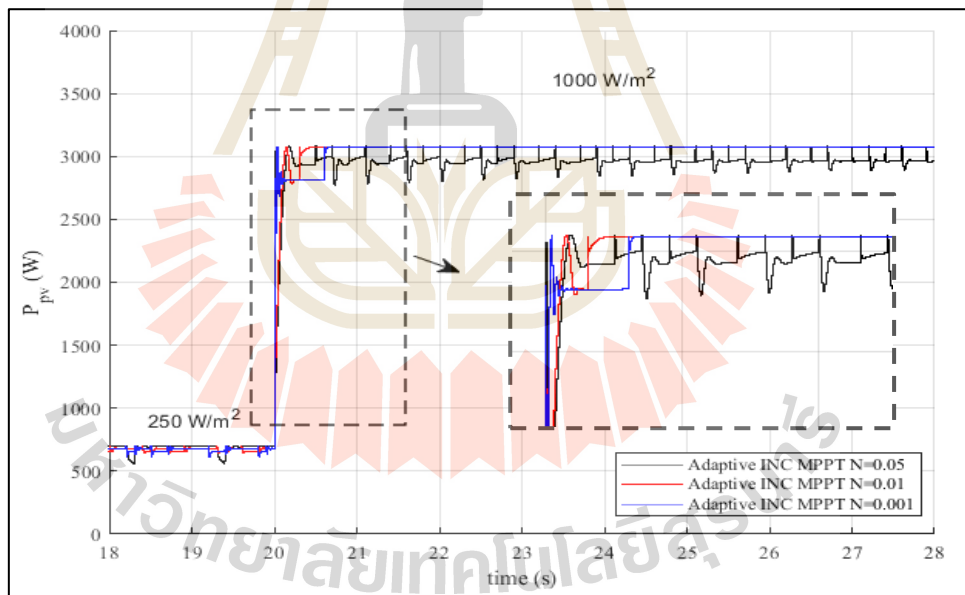
การจำลองสถานการณ์ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว จะเลือกค่าปรับคุณค  
งที่ โดยพิจารณาจากสมการที่ (4-2) กำหนดให้ ผลต่างการสั้นไกวสูงสุดแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัว  
ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 5.8 V ผลต่างการสั้นไกว  
แรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ต้องการเท่ากับ 0.1 V และผลต่าง  
การสั้นไวกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ต้องการเท่ากับ 30 W  
จะได้ค่าปรับคุณคที่ คือ  $N < 0.0193$  ดังนั้นจะเลือกค่าปรับคุณคที่  $N = 0.05$   $N = 0.01$  และ  
 $N = 0.001$  เพื่อให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างการเลือกใช้ค่าที่มากกว่าและค่าที่น้อยกว่าที่ออกแบบได้  
โดยมีค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก  $250 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  กำหนด  
คาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างที่ 0.1 วินาที ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.4



(ก)



(ข)

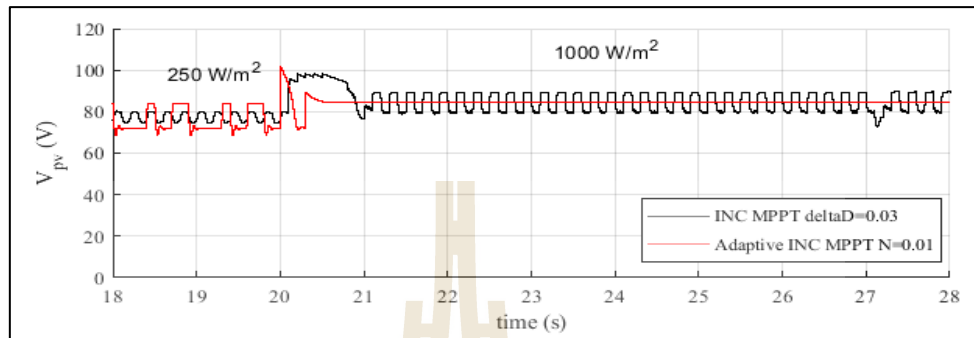


(ค)

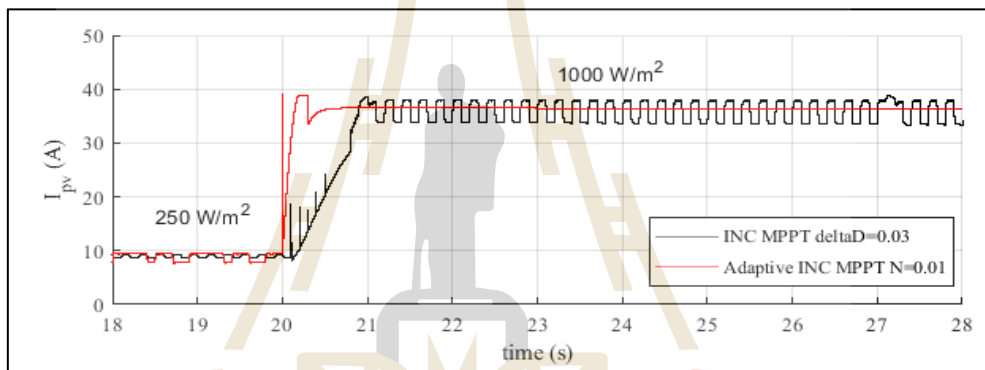
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ที่อุณหภูมิ 25°C

(ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

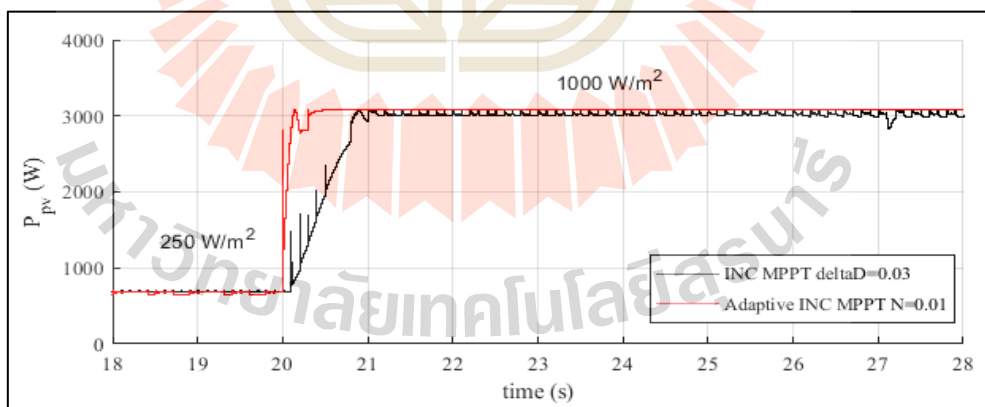
### 4.3.3 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบทั่วไปเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ที่อุณหภูมิ 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

จากผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว รูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า หลักการพิจารณาหาค่าปรับคุณคงที่ สามารถพิจารณาเลือกค่าที่เหมาะสมเพื่อให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด หากเลือกค่าปรับคุณคงที่มากกว่าค่าที่ออกแบบ จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวเกินการสั้นไกว และหากเลือกค่าปรับคุณคงที่น้อย จะทำให้ระบบลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้า ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่า  $N = 0.01$  และเมื่อนำผลการตอบสนองของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวมาเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงไปตั้งรูปที่ 4.5 เห็นได้ว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวมีการลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า และเกิดการสั้นไกวน้อยกว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง

#### 4.4 สรุป

จากผลการจำลองสถานการณ์ในบทนี้ จะเห็นได้ว่า การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ให้ประสิทธิภาพในการตามรอยที่ดีกว่า ลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า และเกิดการสั้นไกวน้อยกว่าวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง หลักการพิจารณาค่าปรับคุณคงที่ ที่นำเสนอสามารถออกแบบเลือกค่าที่เหมาะสมกับระบบได้ การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวสำหรับสถานีชาร์จที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้ ได้ตีพิมพ์ในบทความการประชุมวิชาการนานาชาติ ในงาน 2019 9<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress ระหว่างวันที่ 10 - 12 มีนาคม 2564 ในบทความเรื่อง “The Maximum Power Point Tracking of Charging Stations by using an Adaptive Incremental Conductance” หน้าที่ 53 – 56 ซึ่งจะแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ง

## บทที่ 5

### การสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W

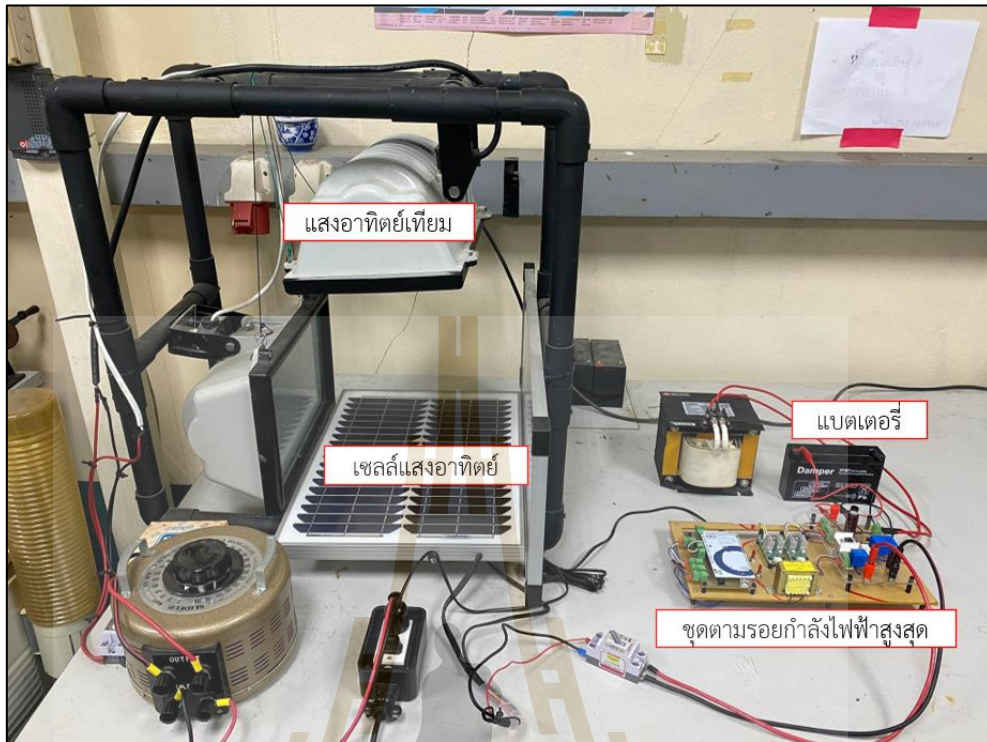
#### 5.1 บทนำ

จากผลการจำลองสถานการณ์ ของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์บทนี้จะยืนยันผลการทดสอบผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และชุดทดสอบพิกัด 40 W ในห้องปฏิบัติการ ผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง จะนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต จากนั้นจะนำวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะนำวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ไปใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าพิกัด 3 kW ต่อไป

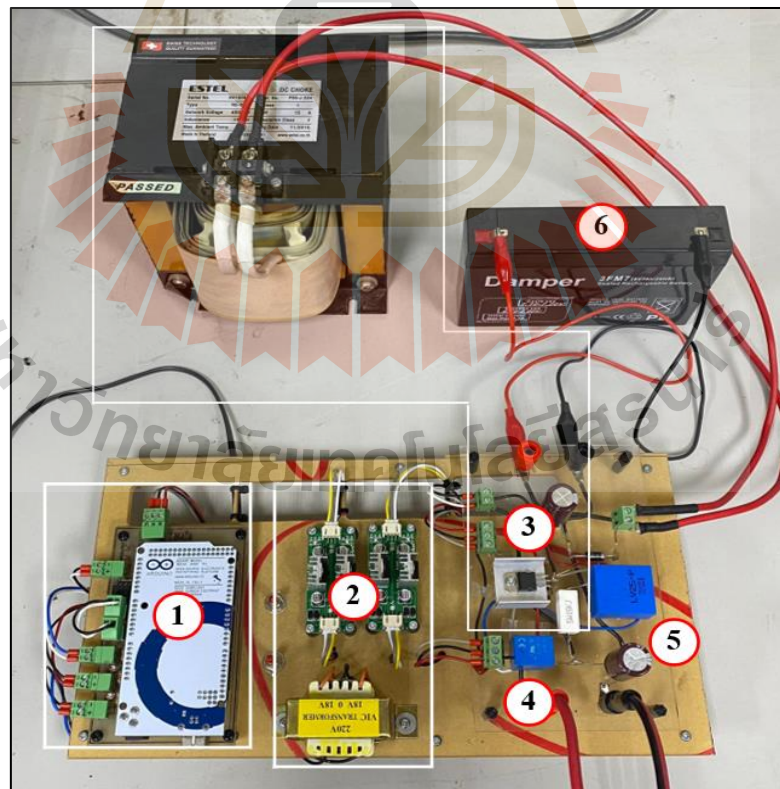
#### 5.2 การออกแบบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W

การออกแบบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 40 W จะพิจารณาจากระบบของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าพิกัด 3 kW ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 40 W ประกอบด้วยหลอดไฟสปอร์ตไลท์หรือแสงอาทิตย์เทียม เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W ชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด และแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 5.1 และชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด แสดงดังรูปที่ 5.2 ประกอบด้วย

- 1.) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2560 และวงจรแยกโดดสัญญาณ
- 2.) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- 3.) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน
- 4.) วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า
- 5.) วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า
- 6.) แบตเตอรี่



รูปที่ 5.1 ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 40 W



รูปที่ 5.2 ชุดตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



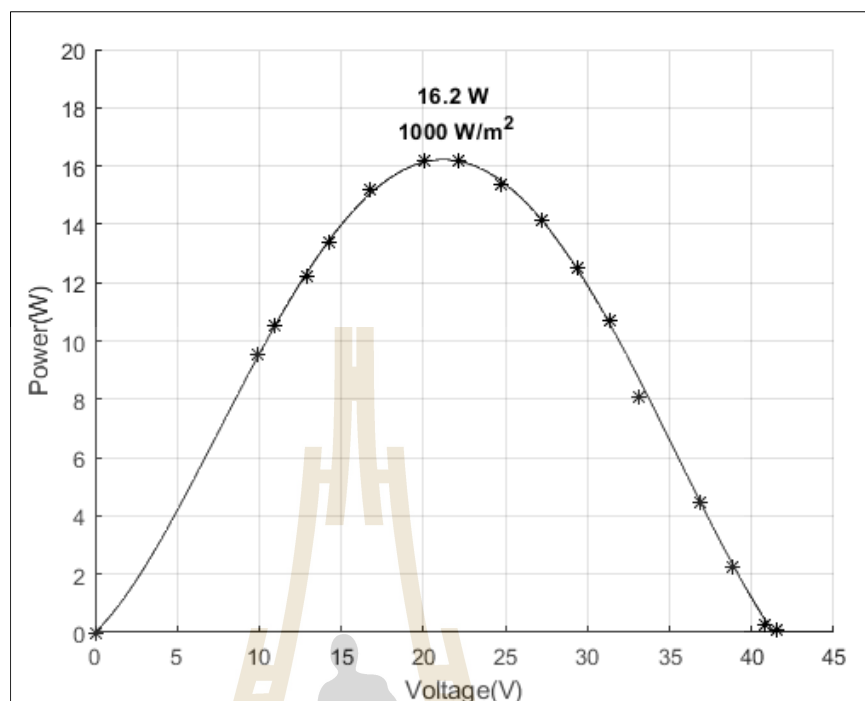
จากรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 40 W มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุดทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุดทดสอบพิกัด 40 W

เซลล์แสงอาทิตย์	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power: $P_{MPP}$ )	40 W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at MPP: $V_{MPP}$ )	38.125 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at MPP: $I_{MPP}$ )	1.033 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Short-circuit current: $I_{sc}$ )	1.1 A
แรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Open circuit voltage: $V_{oc}$ )	43.125 V
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน	
$L$ ( $\Delta I \leq 0.04A$ )	15 mH
$C$ ( $\Delta V \leq 0.01V$ )	2200 $\mu F$
$C_{pv}$	220 $\mu F$
$T_s$	1 วินาที
$f_s$	10 kHz
แบตเตอรี่	6 V

### 6.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 40 W

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ และเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหากราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในชุดทดสอบได้ด้วยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0% ถึง 100% เพื่อหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมาได้ ณ อุณหภูมิหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทดสอบ  $40^{\circ}C$  ที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ได้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 16.2 W แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



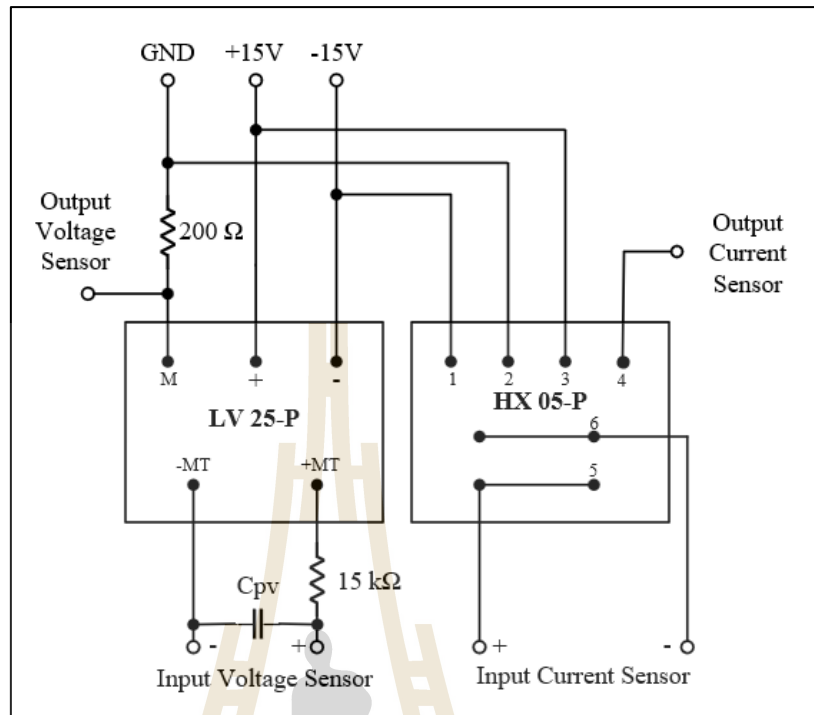
รูปที่ 5.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชุดทดสอบ 40 W 40°C

## 5.2.2 วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า

วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในชุดทดสอบ จะใช้เซนเซอร์แรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงเท่ากับ 500V พิกัดกระแสไฟฟ้าด้านแรงสูงเท่ากับ 10 mA ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 V , 0 และ -15 V ในการทำงาน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะออกแบบแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงไว้ที่ 150 V ดังนั้นสามารถหาค่าความต้านทานด้านแรงสูงได้จากสมการที่ (5-1) ใช้ตัวต้านทานขนาด 15 kΩ ในส่วนของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจะมีการต่อตัวต้านทานเพื่อปรับจูนสัญญาณเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ ประมวลผลกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะเลือกใช้ค่าความต้านทานขนาด 200 Ω

$$R_{HV} = \frac{V_{HV}}{I_{HV}} = \frac{150V}{10mA} = 15k\Omega \quad (5-1)$$

วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในชุดทดสอบ จะใช้เซนเซอร์กระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-P มีพิกัดการวัดกระแสไฟฟ้าที่ 10 A ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 V , 0 และ -15 V ในการทำงาน การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.4 การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะต้องมีการทดสอบเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงกับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดัน และทดสอบหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ทดสอบด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจร 0 – 150V และ 0 – 3A นำค่าที่ทดสอบได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ (5-2) และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (5-3) เพื่อใช้งานในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

$$V_{HV} = 30V_{output,LP25-P} + 0.26 \quad (5-2)$$

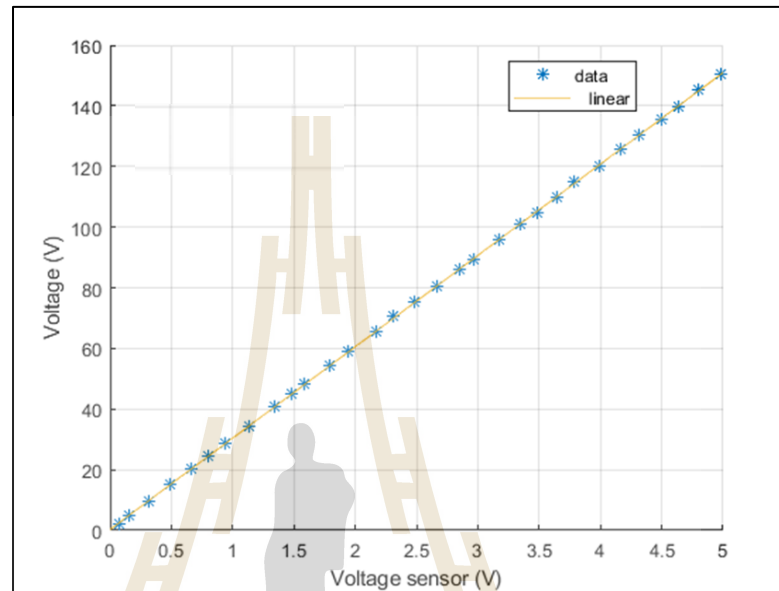
$$I_{HV} = 1.3V_{output,HX05-P} + 0.038 \quad (5-3)$$

โดยที่  $V_{HV}$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (V)

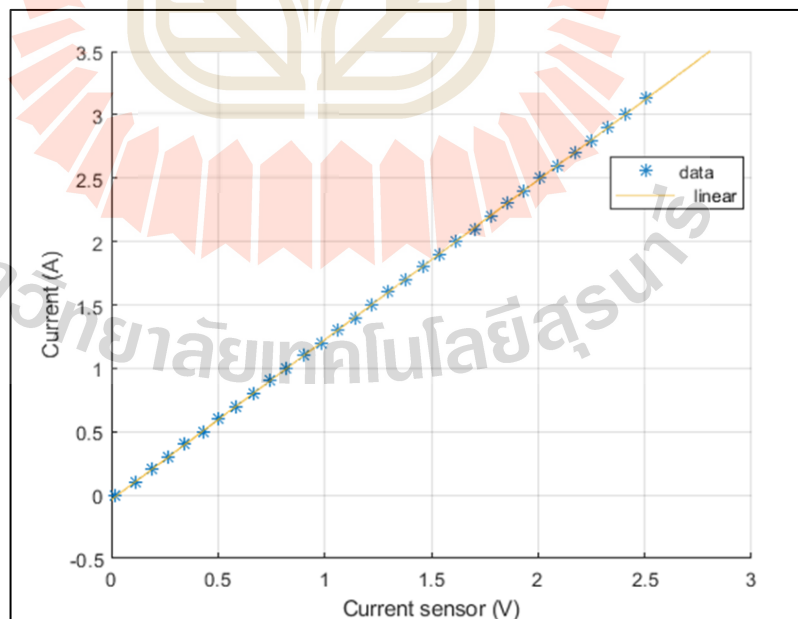
$I_{HV}$  คือ กระแสไฟฟ้าด้านแรงสูงของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (A)

$V_{output,LP25-P}$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (V)

$V_{output,HX05-P}$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (V)



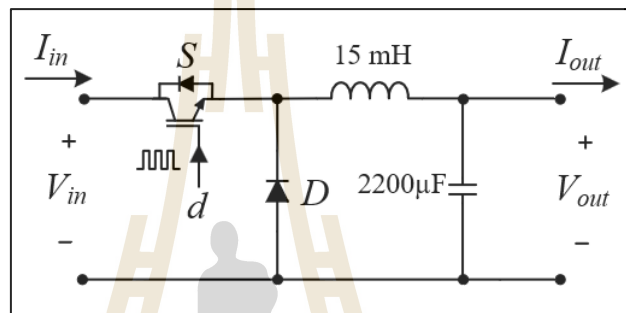
รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับ  
สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ  
สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

### 5.2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่ใช้งานในชุดทดสอบพิกัด 40 W มีค่าพิกัดที่ใช้งาน กำหนดแรงดันพรีลิวและกระแสพรีลิว เพื่อเลือกค่าตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ แสดงไว้ดังตารางที่ 5.1 ใช้สวิตช์ทางไฟฟ้าเป็น IGBT เบอร์ STGP10NC60HD และไดโอดเบอร์ SAC15/B มีการต่อใช้งานแสดงดังรูปที่ 5.7 มีรูปวงจรที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.8



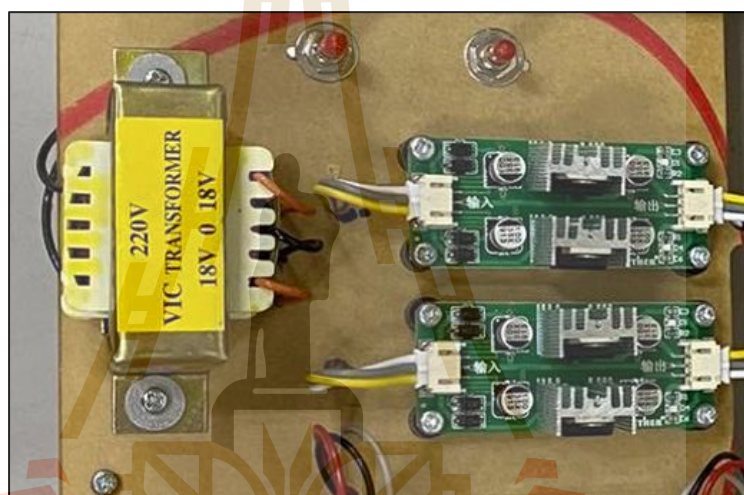
รูปที่ 5.7 การต่อใช้งานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน



รูปที่ 5.8 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่อใช้งานร่วมกับ  
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

#### 5.2.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

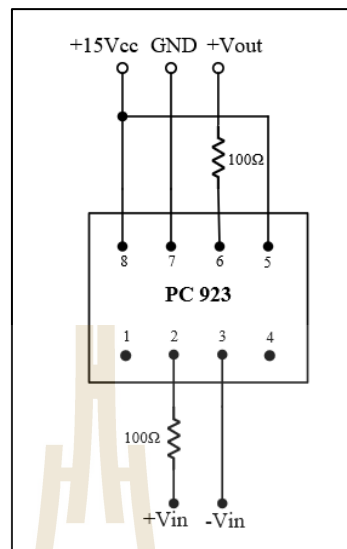
จากรูปที่ 5.4 การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเห็นได้ว่า จะต้องมีการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 V , 0 และ -15 V ในการทำงาน ดังนั้นชุดทดสอบจะต้องใช้แหล่งจ่ายจากการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดแรงดัน มีวงจรเรียงกระแสไดโอด และผ่านไอซีคงค่าแรงดันเบอร์ 7815CT และ 7915CT เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

#### 5.2.5 วงจรแยกโดดสัญญาณ

วงจรแยกโดดสัญญาณหรือวงจรจุดฉนวนเกทเป็นวงจรที่ออกแบบมาใช้งานเพื่อแยกกราวด์ของวงจรไฟฟ้าด้านแรงสูงกับวงจรไฟฟ้าด้านของบอร์ดควบคุม เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้งาน วงจรแยกโดดสัญญาณในชุดทดสอบนี้จะใช้ไอซีเบอร์ PC923 มีการต่อใช้งานแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 การต่อใช้งานวงจรแยกโตดสัญญาณ

### 5.2.6 วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA 2560 มาใช้ในประมวลผลการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ รูปวงจรถัดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแยกโตดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแยกโตดสัญญาณ

จากรูปที่ 5.11 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์จะใช้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มาคำนวณค่าวัฏจักรหน้าที่ สร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-Width- Modulation : PWM) ด้วยไทม์เมอร์/เคาน์เตอร์ 1 ให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน ใช้งานพอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล หรือ ADC (Analog to digital converter) ความละเอียด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5V แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีมอดูล ADC จำนวน 16 ช่องสัญญาณ คือ ADC0 – ADC15 ในชุดทดสอบจะเลือกใช้ช่องสัญญาณ ADC0 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิตอล และ ADC1 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิตอล การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ (5-4)

$$ADC = \frac{V_{output} \times 1024}{V_{ref}} \quad (5-4)$$

โดยที่  $ADC$  คือ ค่าการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

$V_{output}$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (V)

$V_{ref}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งกำหนดไว้ 5 V (V)

การสร้างสัญญาณสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ จะต้องสร้างเฟสและความถี่ของสัญญาณโดยอ้างอิงสัญญาณจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ความถี่ที่ต้องการใช้ในชุดทดสอบคือ 10 kHz สามารถหาค่าที่กำหนดให้กับปริจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิตได้จากสมการที่ (5-5)

$$TOP = \frac{f_{clk}}{2 \times N \times f_{PWM}} = \frac{16 \times 10^6}{2 \times 1 \times 10^3} = 800 \quad (5-5)$$

โดยที่  $f_{PWM}$  คือ ความถี่สัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Hz)

$f_{clk}$  คือ ความถี่สัญญาณนาฬิกาของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ มีขนาด 16 MHz

$TOP$  คือ ค่าที่กำหนดให้กับปริจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

$N$  คือ ค่าปริสเกลเลอร์ (ตัวลดทอนสัญญาณ) ในที่นี้กำหนดให้  $N = 1$



ชุดทดสอบจะเลือกใช้ช่องสัญญาณ PWM 11 ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายสัญญาณผ่านวงจรแยกโดดสัญญาณ ให้กับ IGBT ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

### 5.2.7 เครื่องมือวัดแสงและอุณหภูมิ

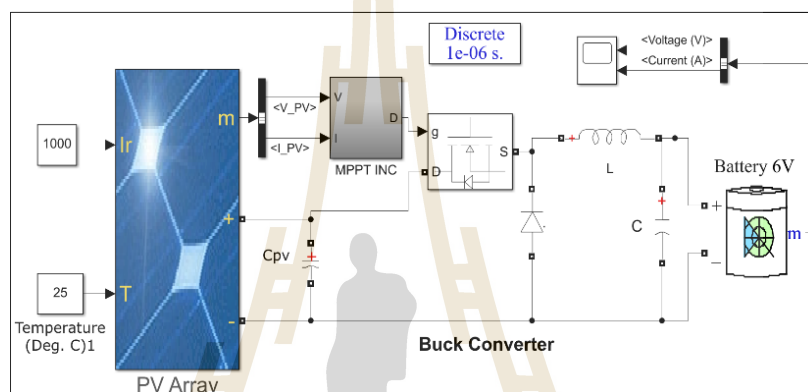
เครื่องมือวัดค่าแสงสว่างที่บริเวณหน้าแผงของเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้เครื่องมือวัดค่าความเข้มแสง (Lux meter) และเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer) รุ่น DL333380 แสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 เครื่องมือวัดแสงและอุณหภูมิ

### 5.3 ผลการจำลองสถานการณ์

จากระบบของชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จำเป็นต้องมีการจำลองสถานการณ์ เพื่อตรวจสอบผลของการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานกับชุดทดสอบพิกัด 40 W การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink ของชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5.13 มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ แสดงดังตารางที่ 5.2



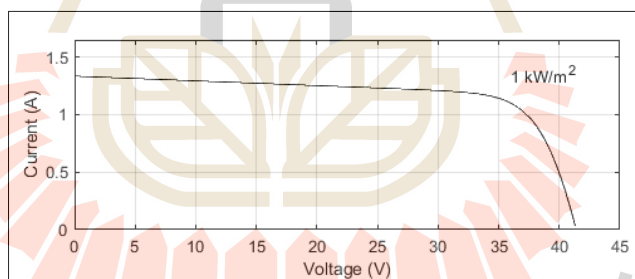
รูปที่ 5.13 การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink ของชุดทดสอบพิกัด 40 W

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink 40 W

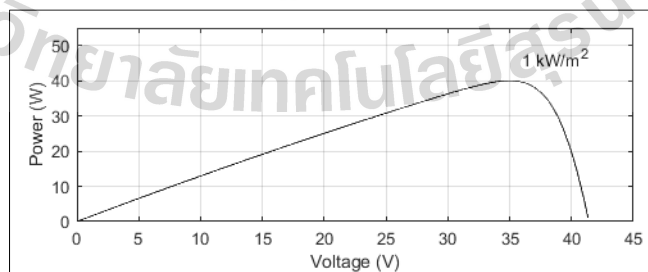
เซลล์แสงอาทิตย์	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power: $P_{MPP}$ )	40 W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at MPP: $V_{MPP}$ )	38.125 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at MPP: $I_{MPP}$ )	1.033 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Short-circuit current: $I_{sc}$ )	1.1 A
แรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Open circuit voltage: $V_{oc}$ )	43.125 V
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน	
$L$ ( $\Delta I \leq 0.04A$ )	15 mH
$C$ ( $\Delta V \leq 0.01V$ )	2200 $\mu F$
$C_{pv}$	220 $\mu F$
$T_s$	0.1 วินาที
แบตเตอรี่	6 V

การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลของการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานกับชุดทดสอบพิกัด 40 W จะจำลองสถานการณ์ที่ความเข้มของแสง 1000 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 25°C ได้ กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 5.14 การจำลองสถานการณ์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งส่วนที่ 1 ในหัวข้อที่ 5.3.1 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต แสดงดังรูปที่ 5.15 ส่วนที่ 2 หัวข้อที่ 5.3.2 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการเลือกค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 5.16 และส่วนที่ 3 หัวข้อที่ 5.3.3 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 5.17

การจำลองสถานการณ์ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว จะเลือกค่าปรับคูณคงที่ โดยพิจารณาจากสมการที่ (4-2) กำหนดให้ ผลต่างการสั้นไมวสูงสุดแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.2 V ผลต่างการสั้นไมวแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ต้องการเท่ากับ 0.03 V และผลต่างการสั้นไมวกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ต้องการเท่ากับ 3 W จะได้ค่าปรับคูณคงที่ คือ  $N < 0.002$  ดังนั้นจะเลือกค่าปรับคูณคงที่  $N = 0.001$



(ก)



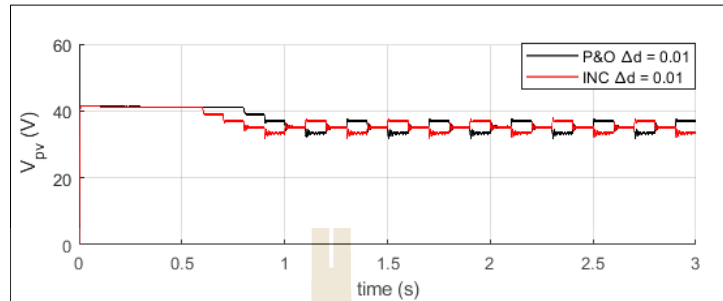
(ข)

รูปที่ 5.14 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

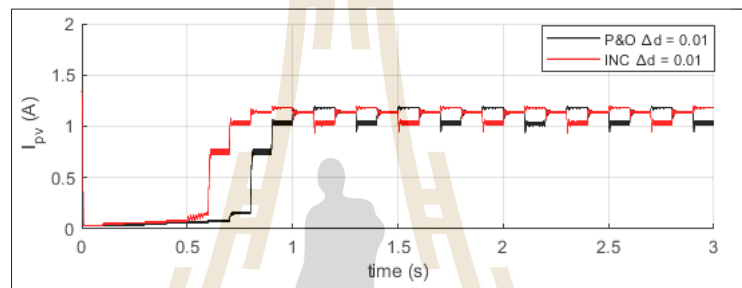
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า

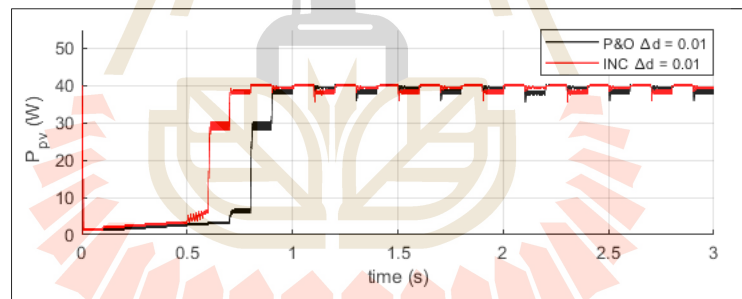
### 5.3.1 วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต



(ก)



(ข)

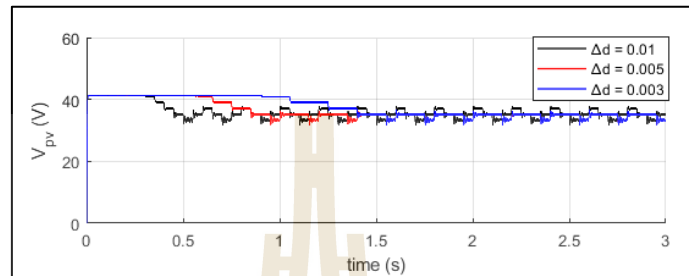


(ค)

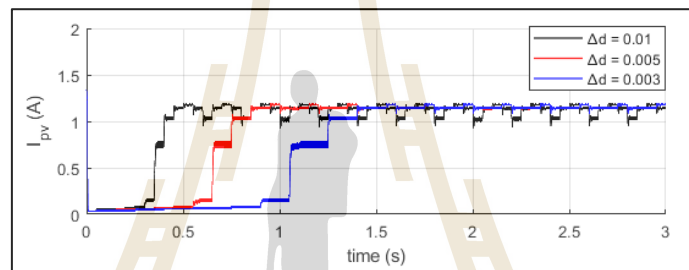
รูปที่ 5.15 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกตที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.15 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต จะเห็นได้ว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต เมื่อปรับค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงที่เท่ากัน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงไปพัฒนาเป็นวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

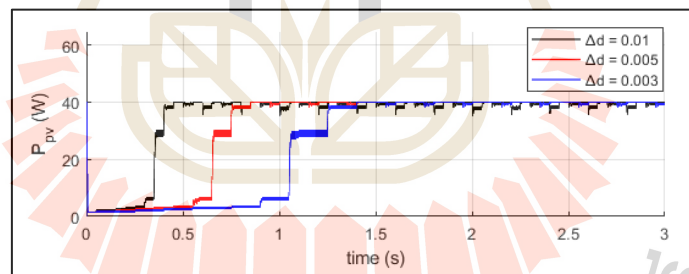
### 5.3.2 การเลือกค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง



(ก)



(ข)



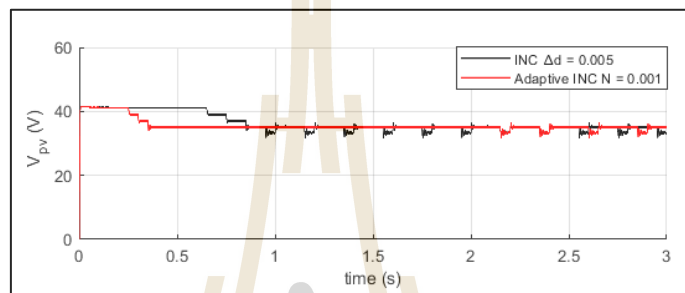
(ค)

รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดการเลือกค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

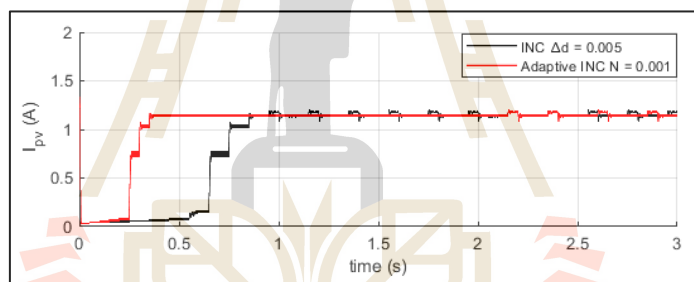
จากรูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดการเลือกค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าขั้นการเปลี่ยนแปลงที่ให้ผลตอบแทนใกล้เคียงกัน 3 ค่า นั่นก็คือ  $\Delta d = 0.01$ ,  $\Delta d = 0.02$  และ  $\Delta d = 0.1$  การเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดสอบกับชุดทดสอบ  $40 \text{ W}$  จะใช้ค่า  $\Delta d = 0.02$  เนื่องจากค่าดังกล่าวให้ผลการ

ตอบสนองของการสั้นไกวกำลังไฟฟ้าที่สามารถอยู่ตัวไม่มากเกินไป และลู่เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ช้าเกินไป เพื่อไปเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

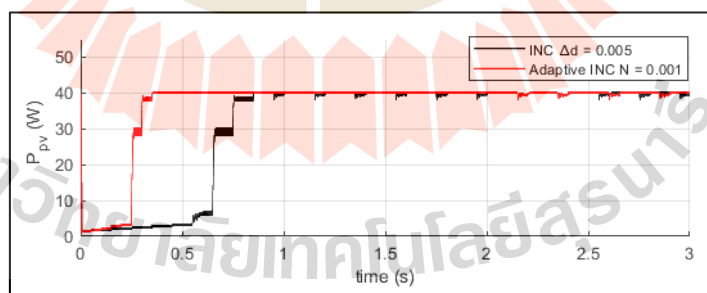
### 5.3.3 วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.17 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว เทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

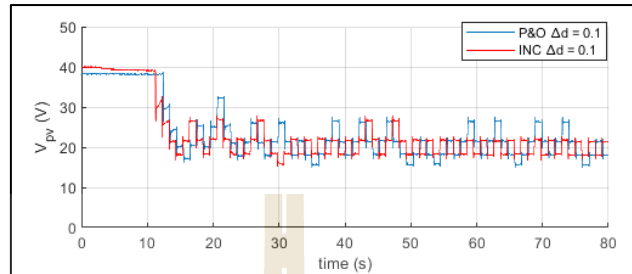
จากรูปที่ 5.17 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวมีการลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า และเกิดการสั้นไวน้อยกว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง

#### 5.4 ผลการทดสอบจากชุดทดสอบพิกัด 40 W

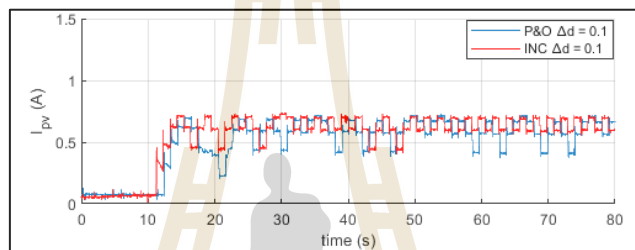
การทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W ทดสอบที่ความเข้มของแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งส่วนที่ 1 ในหัวข้อที่ 5.4.1 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต แสดงดังรูปที่ 5.18 ส่วนที่ 2 หัวข้อที่ 5.4.2 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบเลือกค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 5.19 และส่วนที่ 3 หัวข้อที่ 5.4.3 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 5.20 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.2 และกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชุดทดสอบพิกัด 40 W ในการตรวจสอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด กำหนดคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างที่ 1 วินาที

การทดสอบของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว จะเลือกค่าปรับคูณคงที่ โดยพิจารณาจากสมการที่ (4-2) กำหนดให้ ผลต่างการสั้นไวน้อยสุดแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ  $0.2 \text{ V}$  ผลต่างการสั้นไวน้อยสุดแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ต้องการเท่ากับ  $0.03 \text{ V}$  และผลต่างการสั้นไวน้อยสุดกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ต้องการเท่ากับ  $3 \text{ W}$  จะได้ค่าปรับคูณคงที่ คือ  $N < 0.002$  ดังนั้นจะเลือกค่าปรับคูณคงที่  $N = 0.001$

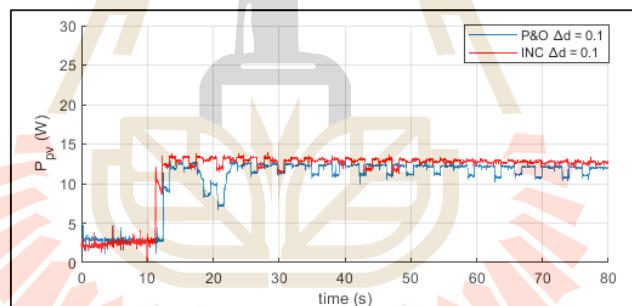
#### 5.4.1 วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต



(ก)



(ข)



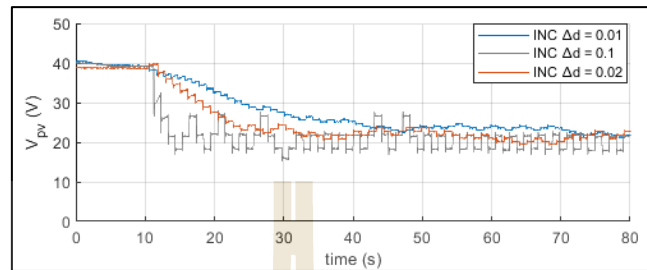
(ค)

รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกตที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

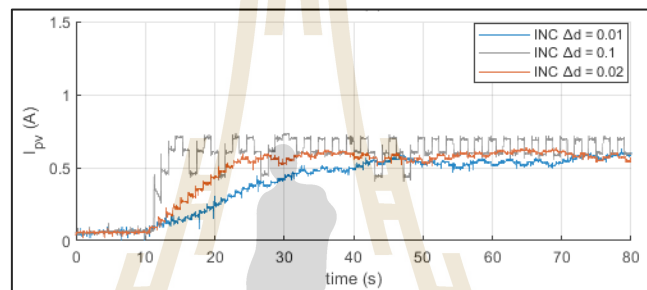
จากรูปที่ 5.18 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต จะเห็นได้ว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต เมื่อปรับค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงที่เท่ากัน ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงไปพัฒนาเป็นวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว



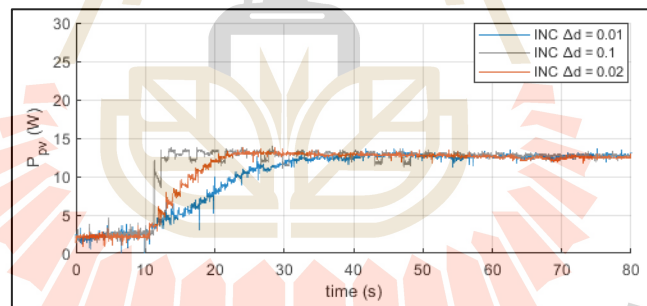
#### 5.4.2 การเลือกค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง



(ก)



(ข)



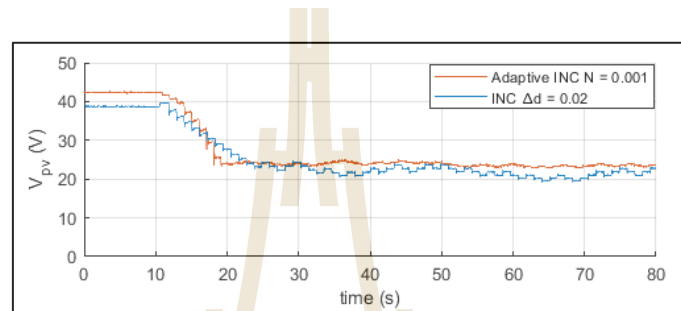
(ค)

รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดการเลือกค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

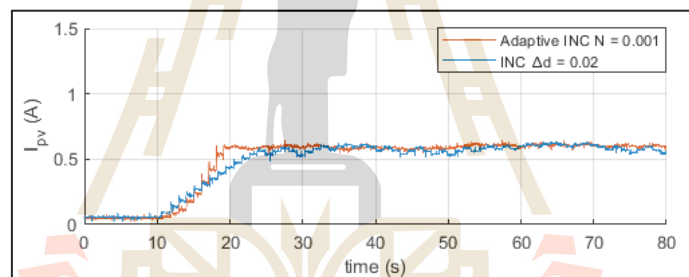
จากรูปที่ 5.19 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดการเลือกค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าขั้นการเปลี่ยนแปลงที่ให้ผลตอบสนองใกล้เคียงกัน 3 ค่า นั่นก็คือ  $\Delta d = 0.1$   $\Delta d = 0.02$  และ  $\Delta d = 0.01$  การเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับการจำลองสถานการณ์สำหรับชุดทดสอบ 40 W จะใช้ค่า  $\Delta d = 0.02$  เนื่องจากค่า

ดังกล่าวให้ผลการตอบสนองของการสั้นไกวกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวไม่มากเกินไป และลู่เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ช้าเกินไป เพื่อไปเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

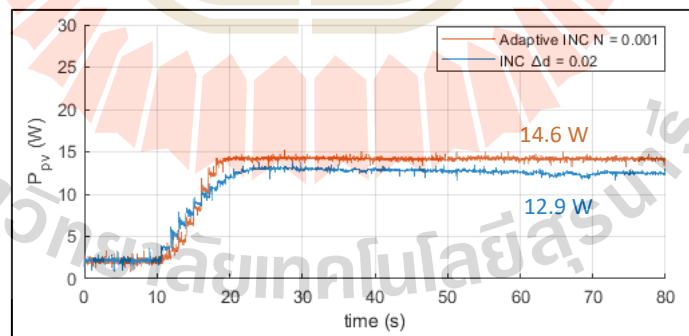
#### 5.4.3 วิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเพิ่มความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มความนำแบบคงค่าขั้นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.20 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเพิ่มความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีเพิ่มความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าวิธีการเพิ่มความนำแบบปรับตัวได้กำลังไฟฟ้า 14.6 W ซึ่งมากกว่าวิธีเพิ่มความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงที่ได้กำลังไฟฟ้า 12.9 W มีการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า และเกิดการสั่นไกวน้อยกว่าวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง

## 5.5 สรุป

จากผลการจำลองสถานการณ์ และผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับชุดทดสอบ 40 W จะเห็นได้ว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มความนำแบบปรับตัว ให้ประสิทธิภาพในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าที่ดีกว่า เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า ได้กำลังไฟฟ้ามากกว่า และเกิดการสั่นไกวน้อยกว่าวิธีเพิ่มความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบยืนยันประสิทธิภาพการทำงานได้ว่าสามารถนำไปใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 1 การทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงสำหรับชุดทดสอบ 40 W ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้ ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรมของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - มีนาคม 2567 ประเภท บทความวิจัย ในบทความเรื่อง “การจำลองสถานการณ์และผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีเพิ่มความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่” ซึ่งจะแสดงในภาคผนวก ก

## บทที่ 6

### การสร้างชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า

#### 6.1 บทนำ

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ที่ได้ทดสอบกับชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ สามารถตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์บทนี้จึงเลือกวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวมาใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW ที่ติดตั้งอยู่กับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า ผลการทดสอบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากโซล่าชาร์จเจอร์ (solar charge controller) ที่ติดตั้งและใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของชุดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

#### 6.2 การออกแบบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 kW

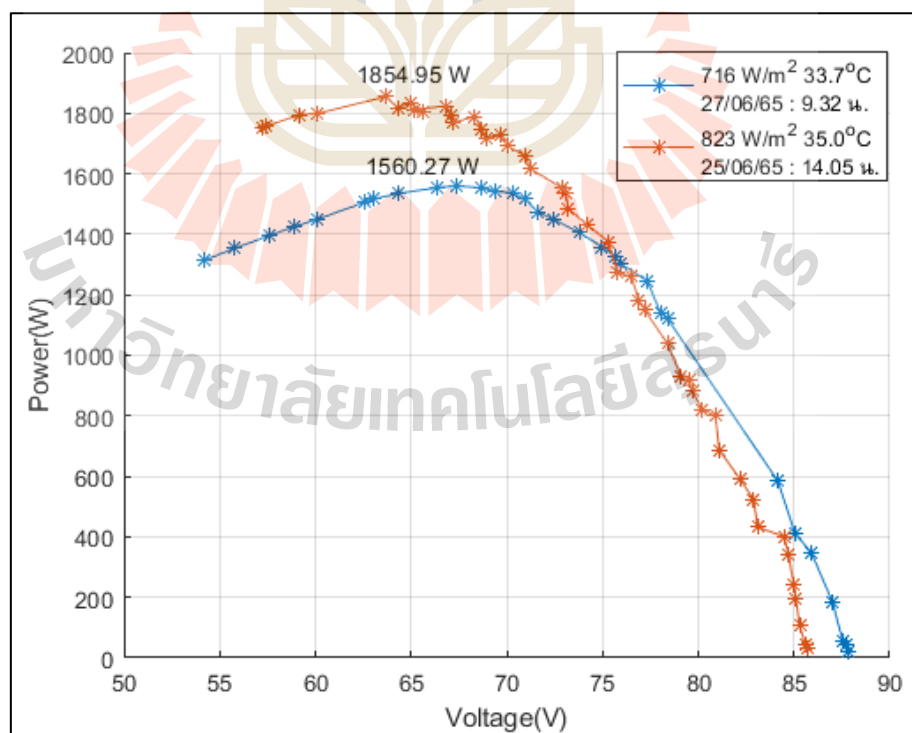


รูปที่ 6.1 ชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 kW

จากรูปที่ 6.1 การออกแบบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 kW จะพิจารณาจากระบบของสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าพิกัด 3 kW ซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในรูปที่ 3.1 ของบทที่ 3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ของชุดต้นแบบให้สามารถใช้งานได้พิกัด 3 kW มีรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงได้ดังต่อไปนี้

### 6.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีพารามิเตอร์แสดงไว้ในส่วนของบทที่ 3 ตารางที่ 3.4 สามารถทดสอบคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ด้วยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันต่อกับแบตเตอรี่ขนาด 48 V จาก 0% ถึง 100% ทดสอบวันที่ 25 มิถุนายน 2565 เวลา 14.05 น. ความเข้มของแสง 1023 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 35.0°C และทดสอบวันที่ 27 มิถุนายน 2565 เวลา 9.32 น. ความเข้มของแสง 816 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 33.7°C ผลการทดสอบกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่กับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 6.2 ผลการทดสอบนี้จะใช้ยืนยันการทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อไป



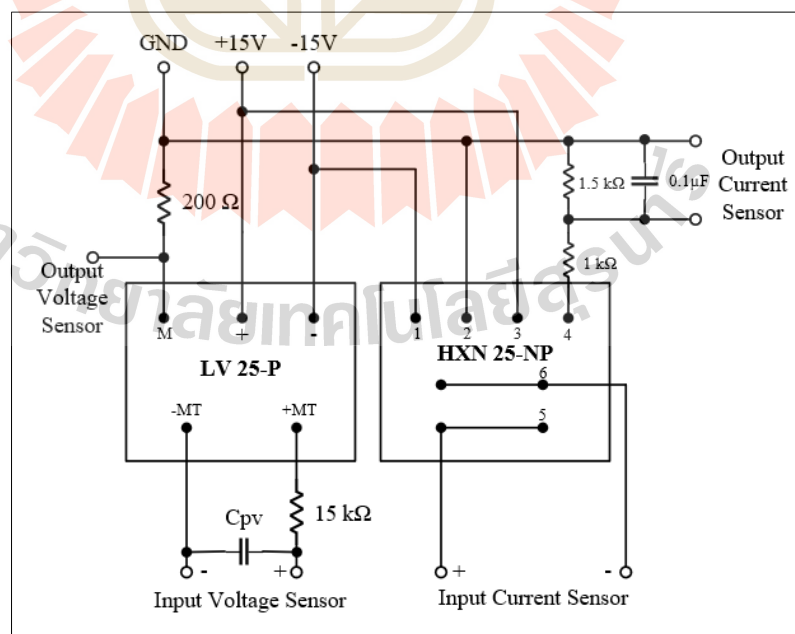
รูปที่ 6.2 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW

## 6.2.2 วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า

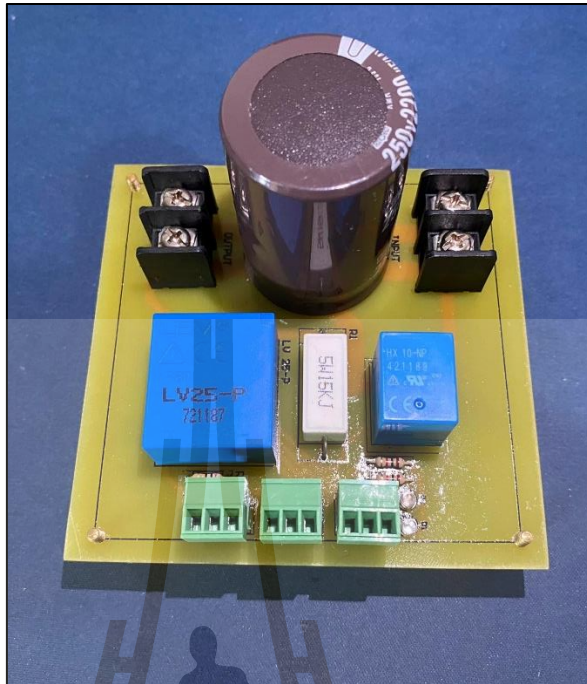
วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในต้นแบบ จะใช้เซนเซอร์แรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงเท่ากับ 500V พิกัดกระแสไฟฟ้าด้านแรงสูงเท่ากับ 10 mA ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 V , 0 และ -15 V ในการทำงาน จะออกแบบแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงไว้ที่ 150 V สามารถหาค่าความต้านทานด้านแรงสูงได้จากสมการที่ (6-1) ใช้ตัวต้านทานขนาด 15 k $\Omega$  ในส่วนของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจะมีการต่อตัวต้านทานเพื่อปรับจูนสัญญาณเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ประมาณผลกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะเลือกใช้ค่าความต้านทานขนาด 200  $\Omega$

$$R_{HV} = \frac{V_{HV}}{I_{HV}} = \frac{150V}{10mA} = 15k\Omega \quad (6-1)$$

วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในต้นแบบ จะใช้เซนเซอร์กระแสไฟฟ้าเบอร์ HXN 25-NP มีพิกัดการวัดกระแสไฟฟ้าที่ 60 A ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 V , 0 และ -15 V ในการทำงาน มีการต่อตัวต้านทานขนาด 1 k $\Omega$  1.5 k $\Omega$  และตัวเก็บประจุขนาด 0.1  $\mu$ F เพื่อปรับปรุงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 6.3 และรูปวงจรถ่ายที่ใช้งานแสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 6.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.3 การต่อใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะต้องมีการทดสอบเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงกับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดัน และทดสอบหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ทดสอบด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจร 0 – 150V และ 0 – 6A นำค่าที่ทดสอบได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ (5-2) และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (5-3) เพื่อใช้งานในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

$$V_{HV} = 30V_{output,LP25-P} + 0.26 \quad (6-2)$$

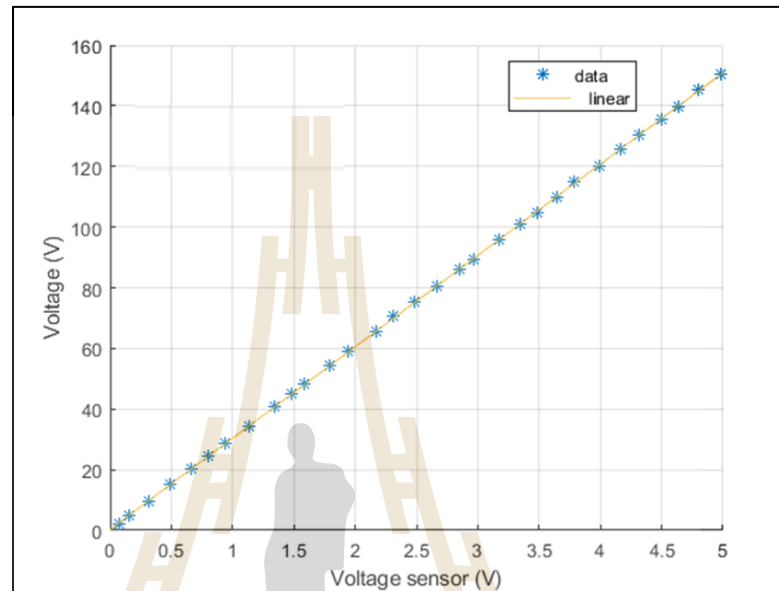
$$I_{HV} = 8.4V_{output,HXN25-NP} + 0.072 \quad (6-3)$$

โดยที่  $V_{HV}$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (V)

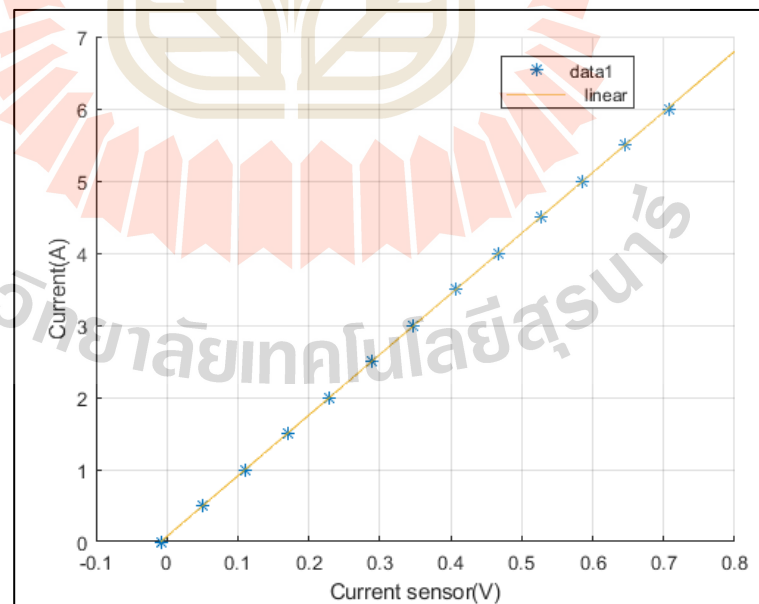
$I_{HV}$  คือ กระแสไฟฟ้าด้านแรงสูงของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (A)

$V_{output,LP25-P}$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (V)

$V_{output,HXN25-NP}$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (V)



รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับ  
สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ  
สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า



### 6.2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่ใช้งานชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีการออกแบบสวิตซ์ทางไฟฟ้าให้มีพิกัดเหมาะสมกับการใช้งาน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกใช้สวิตซ์ทางไฟฟ้าเป็นโมดูล IGBT เบอร์ MDI 145-12 A3 พิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 1200 V พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 160 A และใช้ฮีตซิงก์ระบายความร้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ พิจารณาการออกแบบจากสมการที่ (3-7) และ (3-8) ที่ได้แสดงในส่วนของบทที่ 3 พิจารณาค่าแรงดันพลิ้วและกระแสพลิ้วเพื่อออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ เลือกพิกัดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 6.1 และรูปวงจรวจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่ใช้งานกับชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 kW แสดงดังรูปที่ 6.7

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรวจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

อุปกรณ์	พิกัด
โมดูล IGBT เบอร์ MDI 145-12 A3	1200 V 160 A
ตัวเก็บประจุ ( $\Delta V \leq 0.01V$ )	2200 $\mu F$ 250 V
ขดลวดเหนี่ยวนำ ( $\Delta I \leq 1A$ )	1 mH 80 A 250 V
$f_s$	10 kHz



รูปที่ 6.7 วงจรวจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันใช้งานกับชุดต้นแบบ 3 kW

จากรูปที่ 6.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันใช้งานกับชุดต้นแบบ 3 kW จะต้องมีการทดสอบก่อนนำไปใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับระบบของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า วงจรที่ใช้ทดสอบจะใช้แหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแส มีโหลดเป็นตัวต้านทานขนาด  $10 \Omega$  4 kW กำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่ใช้โมดูลสวิตช์ IGBT เท่ากับ 80% และความถี่ในการสวิตช์ของวงจรเท่ากับ 10 kHz ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ (W)	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V)	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (A)	อุณหภูมิโมดูล IGBT ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิโหลดตัวต้านทาน ( $^{\circ}\text{C}$ )
500	70	6.88	29	73
1000	105.2	10.25	29.3	133
1500	129.8	12.64	29.4	149.2
2000	150	14.5	31.4	185.9
2500	155.5	16.2	32.8	200.1
3000	160.3	18.7	38.5	211.5

จากตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มพิกัดของกำลังไฟฟ้าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันสามารถทำงานได้โดยที่มีอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก สามารถนำไปใช้งานได้กับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 6.2.4 เบรกเกอร์และฟิวส์สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง

เบรกเกอร์และฟิวส์สำหรับไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานในชุดทดสอบ จะเลือกใช้เบรกเกอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ยี่ห้อ LIKET เบอร์ LKTB1-50/PV พิกัด 500 V 63A และใช้ระบอกรฟิวส์ ยี่ห้อ Yinrong เบอร์ YRPV-63 ซึ่งในระบอกรฟิวส์จะมีลิงค์ฟิวส์ทรงระบอกรขนาดพิกัด 1500V 63A เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินจากเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW และแบตเตอรี่

### 6.2.5 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

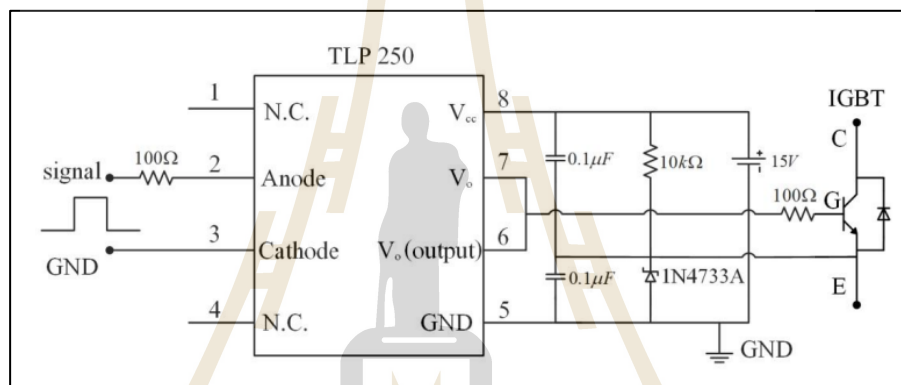
วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ XP เบอร์ JCK2048S12 มีพิกัดของแรงดันไฟฟ้าอินพุตอยู่ระหว่าง 38 – 75V แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 12V ทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาด 48 V และจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 V ให้กับไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้าทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ ไอซีเบอร์ IL1215S จ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด +15V 0V ให้กับวงจรแยกโดดสัญญาณ ไอซีเบอร์NMV1215SC จ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด +15V -15V 0V ให้กับวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ไอซีเบอร์ MEE1S1212SC จ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด +12V 0V ให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ภายในวงจรไอซีทุกตัวที่นำมาใช้นั้นจะเป็นไอซีที่แยกโดดสัญญาณกระแสตรง (DC/DC isolator) ทุกตัวเพื่อไม่ให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในชุดต้นแบบได้รับความเสียหายหากเกิดการลัดวงจร นอกจากนี้ในวงจรยังมีการต่อใช้งานรีเลย์ ขนาด 5V เพื่อรับคำสั่งให้ทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากสวิทช์หน้าตู้ของชุดต้นแบบ ไปที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และหลอดไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของชุดต้นแบบ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 6.8



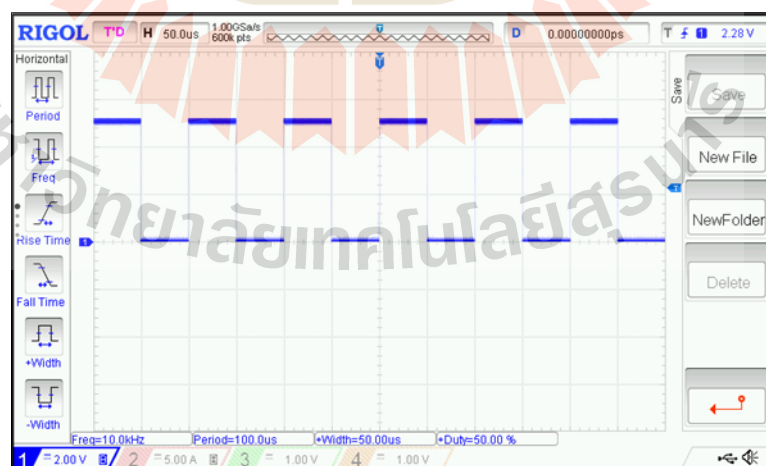
รูปที่ 6.8 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

## 6.2.6 วงจรแยกโศดสัญญาณ

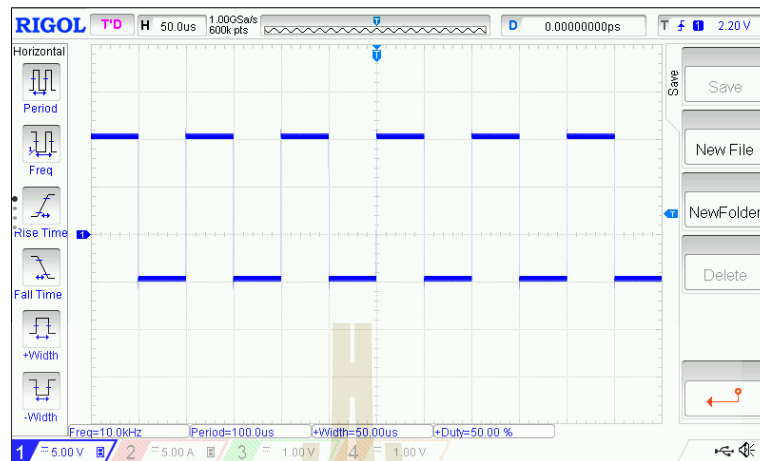
วงจรถแยกโศดสัญญาณหรือวงจรถจุดชนวนเกทเป็นวงจรถที่ออกแบบมาใช้งานเพื่อแยกกรวด์ของวงจรถไฟฟ้าด้านแรงสูงกับวงจรถไฟฟ้าด้านของบอร์ตควบคุม เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้งาน วงจรถแยกโศดสัญญาณในชุดต้นแบบจะใช่อิซียีห้อ TOSHIBA เบอร์ TLP205 มีการต่อใช้งานแสดงดังรูปที่ 6.9 จะแยกสัญญาณระหว่างสัญญาณจุดชนวนเกทของบอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์กับสัญญาณจุดชนวนเกทของสวิตช์ IGBT โดยสัญญาณอินพุตที่ได้แสดงดังรูป 6.10 และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้แสดงดังรูป 6.11



รูปที่ 6.9 การต่อใช้งานวงจรถแยกโศดสัญญาณ



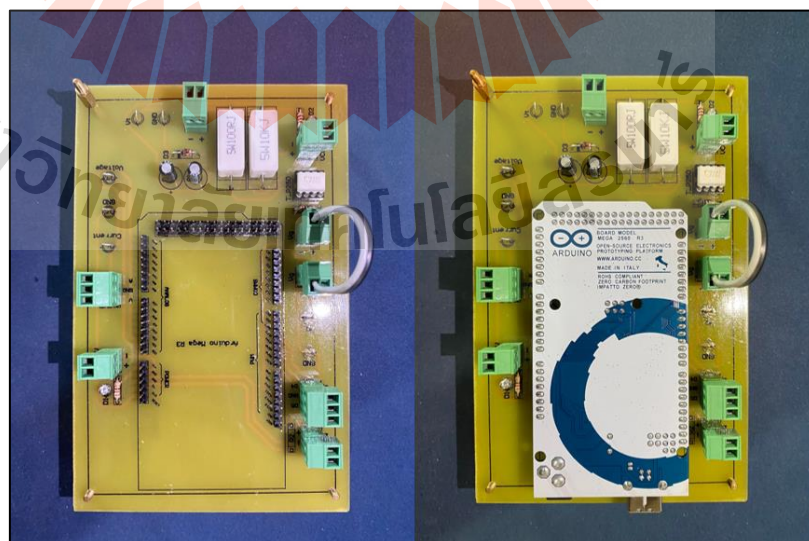
รูปที่ 6.10 สัญญาณอินพุตของวงจรถแยกโศดสัญญาณ



รูปที่ 6.11 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกโอดสัญญาณ

### 6.2.7 วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานกับชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 kW จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA 2560 เหมือนกับชุดทดสอบพิกัด 40 W ที่ได้อธิบายไว้ในส่วนของบทที่ 5 มาใช้ในประมวลผลการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ออกแบบเป็นชิพบอร์ดควบคุมเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน มี LED แสดงสถานะการทำงาน แสดงดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

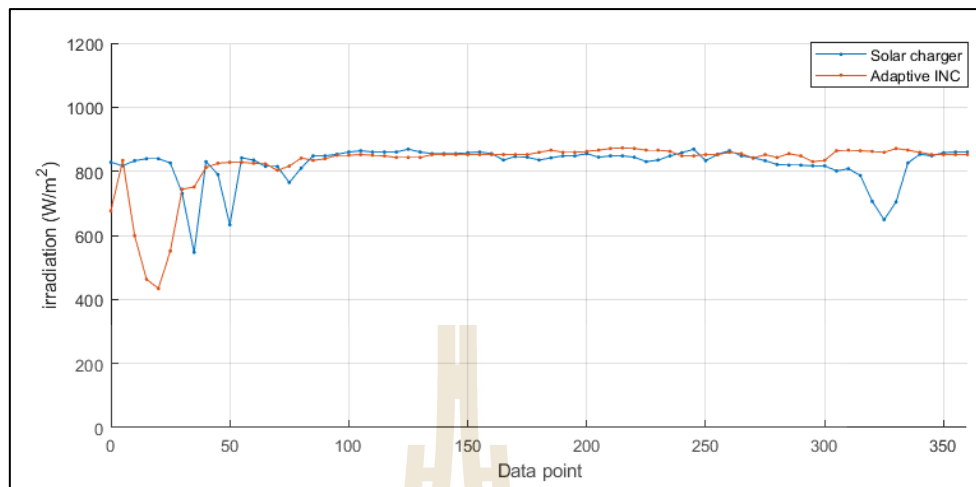
### 6.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบสำหรับชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว จะทดสอบเทียบกับโซล่าชาร์จเจอร์ พิกัด 60 A 3 kW ที่ติดตั้งและใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 6.13

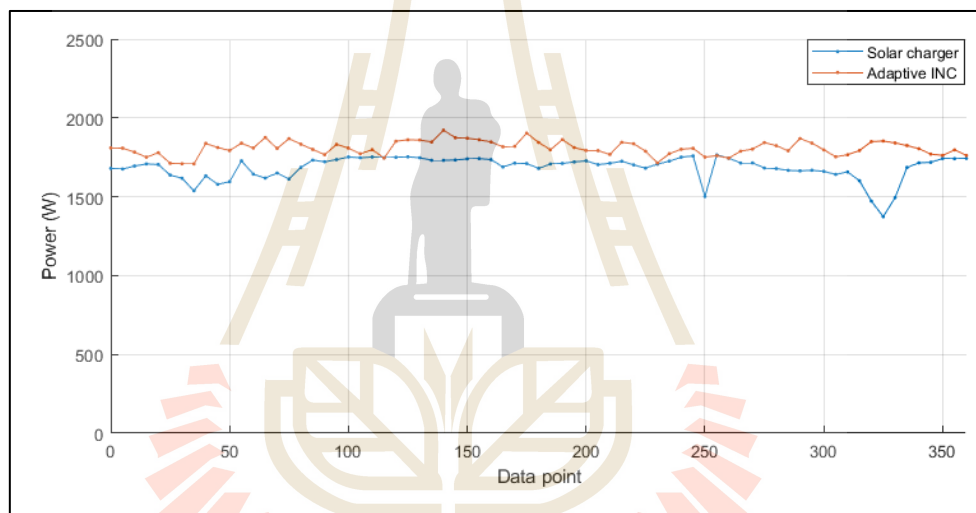


รูปที่ 6.13 โซล่าชาร์จเจอร์ พิกัด 60 A 3 kW

การทดสอบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว และโซล่าชาร์จเจอร์ จะอ้างอิงผลการทดสอบจากกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW มาใช้เปรียบเทียบหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยจะทดสอบในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน ท้องฟ้าโปร่งและอุณหภูมิคงที่ การทดสอบได้ดำเนินการในวันที่ 25 มิถุนายน 2565 จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ช่วงเวลาคือ เวลา 14.30 – 15.00 น. โดยจะทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว และเวลา 15.10 – 15.40 น. จะทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโซล่าชาร์จเจอร์ ทดสอบเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 วินาที นำผลการทดสอบทั้ง 2 ช่วงเวลามาเปรียบเทียบกัน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.13



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.14 ผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับ

โซล่าชาร์จเจอร์ (ก) ความเข้มแสง (ข) กำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.14 ผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับโซล่าชาร์จเจอร์ จะเห็นได้ว่าที่ค่าความเข้มแสงใกล้เคียงกันที่จุดข้อมูลที่ 150 ความเข้มแสง  $825 \text{ W/m}^2$  ชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว ได้กำลังไฟฟ้าที่  $1871 \text{ W}$  ขณะที่จุดข้อมูลเดียวกันโซล่าชาร์จเจอร์ได้กำลังไฟฟ้าที่  $1740 \text{ W}$  และโดยรวมแล้ว ชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากกว่าโซล่าชาร์จเจอร์  $7.01\%$

## 6.4 สรุป

การทดสอบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันเพื่อให้สามารถใช้งานที่พิกัด 3 kW ส่วนของวงจรบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์จะใช้อุปกรณ์แยกโดดสัญญาณทุกส่วนเพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์หากเกิดการลัดวงจร มีการติดตั้ง LED แสดงสถานะการทำงาน ผลการทดสอบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเปรียบเทียบกับโซล่าชาร์จเจอร์แสดงให้เห็นว่าชุดต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการที่น่าเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของการผลิตพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สามารถรองรับพิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 3 kW ที่มีโหลดเป็นแบตเตอรี่ และยังมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับโซล่าชาร์จเจอร์ที่ติดตั้งและใช้งานอยู่ก่อนหน้านี้ 7.01%





## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวสำหรับสถานีชาร์จ ที่ใช้งานกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและแบบเชื่อมกริด ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบสถานีอัดประจุสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าได้ รายละเอียดได้นำเสนอไว้ในส่วนปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2

งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมานำเสนอ 2 วิธีคือ วิธีการรบกวนและสังเกตเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง ส่วนประกอบต่าง ๆ และพารามิเตอร์ระบบของสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้นำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการจำลองสถานการณ์ในบทที่ 3 สรุปได้ว่าที่ค่าขึ้นเปลี่ยนแปลงคงที่ที่เท่ากัน วิธีการเพิ่มค่าความนำให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการเพิ่มค่าความนำไปพัฒนาให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการตามรอยเพิ่มขึ้น ด้วยการพัฒนาเป็นวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

บทที่ 4 ได้นำเสนอหลักการออกแบบการเลือกค่าปรับคณค่งที่ที่เหมาะสม เพื่อให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด หากเลือกค่าปรับคณค่งที่มากกว่าค่าที่ออกแบบ จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวเกิดการสั้นไกว และหากเลือกค่าปรับคณค่งที่น้อย จะทำให้ระบบลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้า ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เปรียบเทียบระหว่างวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบค่งค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว สรุปได้ว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวมีการลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า และเกิดการสั้นไกวน้อยกว่าวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบค่งค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 5 ได้นำเสนอผลการทดสอบผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink หลักการออกแบบ และผลการทดสอบของชุดทดสอบพิกัด 40 W ในห้องปฏิบัติการ โดยเป็นการเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบค่งค่าชั้นการเปลี่ยนแปลงกับวิธีการรบกวนและสั่งเกต และวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบค่งค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง จากผลจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบสรุปได้ว่า การทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวให้ประสิทธิภาพในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าที่ดีกว่า ลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า ได้กำลังไฟฟ้ามากกว่า และเกิดการสั้นไกวน้อยกว่าวิธีเพิ่มค่าความนำแบบค่งค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวไปใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6 ได้นำเสนอการทดสอบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวที่ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบบเร็วสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน และนำเสนอผลการทดสอบชุดต้นแบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวเปรียบเทียบกับโซล่าชาร์จเจอร์ สรุปได้ว่า ชุดต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของการผลิตพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับโซล่าชาร์จเจอร์ที่ติดตั้งและใช้งานอยู่ก่อนหน้านี้ 7.01%

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1) การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัวไม่ควรเลือกค่าปรับคูนคงที่น้อยเกินไป เพราะจะทำให้การลู่เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดช้าลง หรือไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ และไม่ควรเลือกค่าปรับคูนคงที่มากเกินไปที่ออกแบบ เพราะจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวเกิดการสั่นไหว

2) การใช้งานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูง ต้องมีการทดสอบ และติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันและวงจรแยกโดดสัญญาณ เพื่อไม่ให้อุปกรณ์อื่น ๆ และบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับความเสียหาย



## รายการอ้างอิง

- M. Nizam and F. X. Rian Wicaksono. (2018). Design and Optimization of Solar Wind and Distributed Energy Resource (DER) Hybrid Power Plant for Electric Vehicle (EV) Charging Station in Rural Area. **2018 5<sup>th</sup> International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)**., October 30-31, 2018. Surakarta. Indonesia.
- Y. Zhang, J. He and Dan M. Ionel. (2019). Modeling and Control of a Multiport Converter based EV Charging Station with PV and Battery. **2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)**.
- S. Bhadra, P. Mukhopadhyay, S. Bhattacharya, S. Debnath, S. Jhampat and A. Chandra (2020). Design and Development of Solar Power Hybrid Electric Vehicles Charging Station. **2020 IEEE International Conference for Convergence in Engineering**.
- A. Verma. (2020). Integration of Solar PV-WECS and DG Set for EV Charging Station. **2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)**.
- T.S.Biya and M.R.Sindhu. (2021). Design and Power Management of Solar Powered Electric Vehicle Charging Station with Energy Storage System. **3<sup>rd</sup> International Conference on Electronics Communication and Aerospace Technology [ICECA 2019]**.
- M. Adly, H. El-Sherif and M. Ibrahim. (2011). Maximum power point tracker for a PV cell using a fuzzy agent adapted by the fractional open circuit voltage technique. **2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011)**.

- F. Z. Hamidon, P. D. Abd. Aziz, N. H. Mohd Yunus. (2012). Photovoltaic Array Modelling with P&O MPPT Algorithm in MATLAB. **2012 International Conference on Statistics in Science, Business and Engineering (ICSSBE)**. 10-12 September 2012.
- M. A. Abdourraziq, M. Ouassaid, M. Maaroufi, S. Abdourraziq. (2013). Modified P&O MPPT Technique for Photovoltaic Systems. **International Conference on Renewable Energy Research and Applications.**, Madrid, Spain, 20-23 October 2013.
- Hadeed A. S, Murtaza A. F., Khaled E. A. and Marcello C. (2013). An intelligent off-line MPPT technique for PV applications. **2013 IEEE Conference on Systems, Process & Control (ICSPC)**., Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 December 2013.
- M. A. Abdourraziq, M. Maaroufi and M. Ouassaid. (2014). A new variable step size INC MPPT method for PV systems. **International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)**., 14-16 April 2014.
- Sivaramakrishnan S. (2016). Linear extrapolated MPPT - an alternative to fractional open circuit voltage technique. **2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)**., Bengaluru, India, 21-23 January 2016.
- Amit P. and Harpal T. (2017). Implementation of INC-PIMPPT and its comparison with INC MPPT by direct duty cycle control for solar photovoltaics employing zeta converter. **2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)**., Indore, India, 17-19 August 2017.
- Thueanpangthaim C., Wongyai P., Areerak K. and Areerak K. (2017). The maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based approach. **2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)**., pp. 1-4.

Dilovan Haji, Naci Genc. (2018). Fuzzy and P&O Based MPPT Controllers under Different Conditions. **2018 7<sup>th</sup> International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**., Paris, France, 14-17 October 2018.

Mohammed Z, Salaheddine Z., Abdelghani E. O., Belkassem T. and Hafida Z. (2019). Improvement of Conventional MPPT Techniques P&O and INC by Integration of Fuzzy Logic. **2019 7<sup>th</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)**., Agadir, Morocco, 27-30 November 2019.

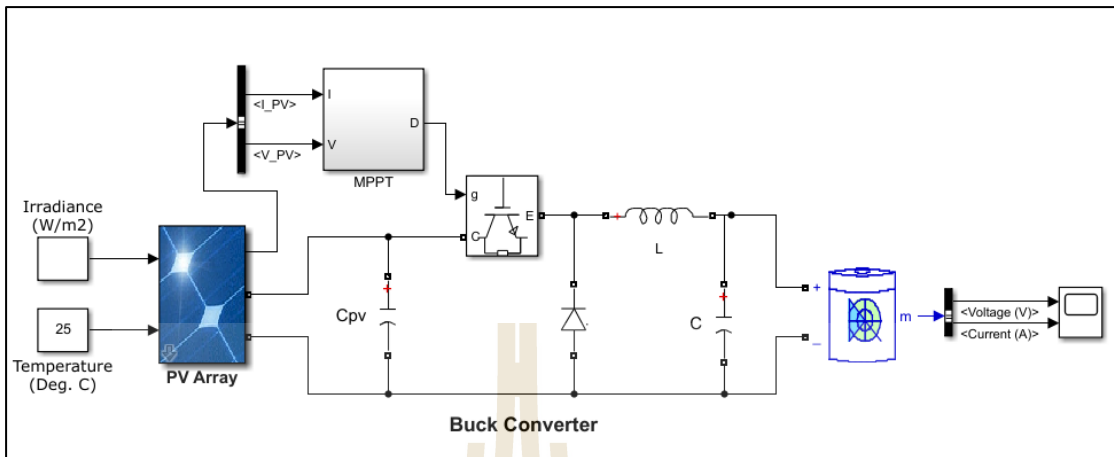
R.K Rai and O.P. Rahi. (2022). Fuzzy Logic based Control Technique using MPPT for Solar PV System. **2022 First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)**., Trichy, India, 16-18 February 2022.



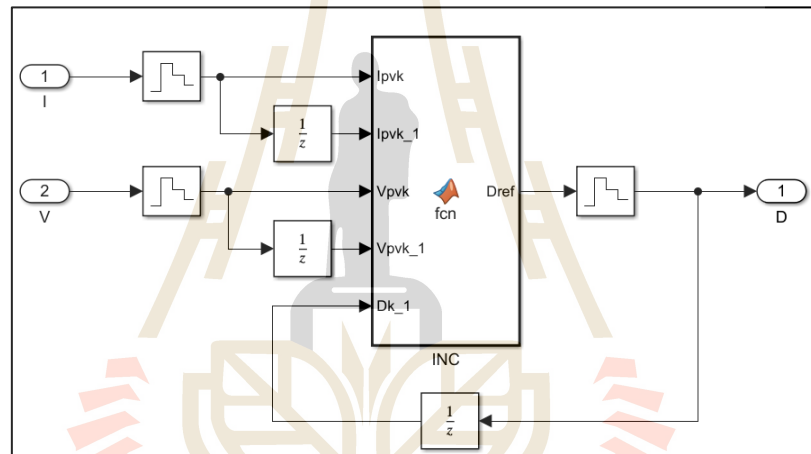


ภาคผนวก ก

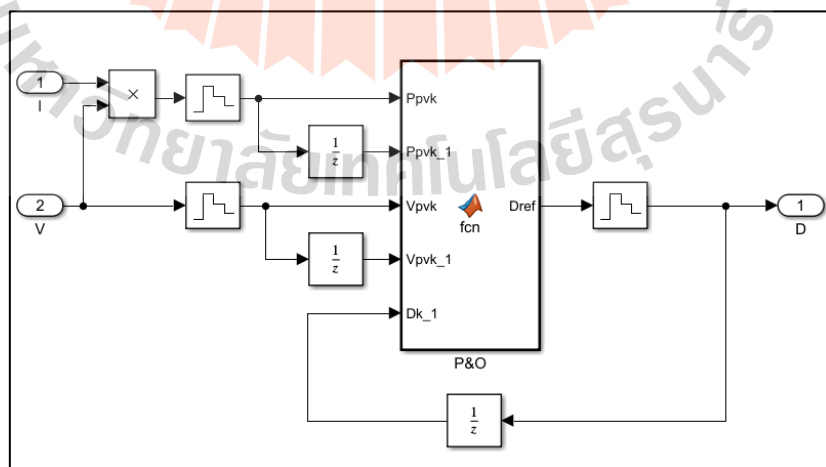
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและโค้ดการทำงานของเครื่องจำลองสถานการณ์ด้วย  
โปรแกรม MATLAB/Simulink ที่พิกัด 40 W และ 3 kW



รูปที่ ก.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง MATLAB/Simulink ที่พิกัด 40 W และ 3 kW

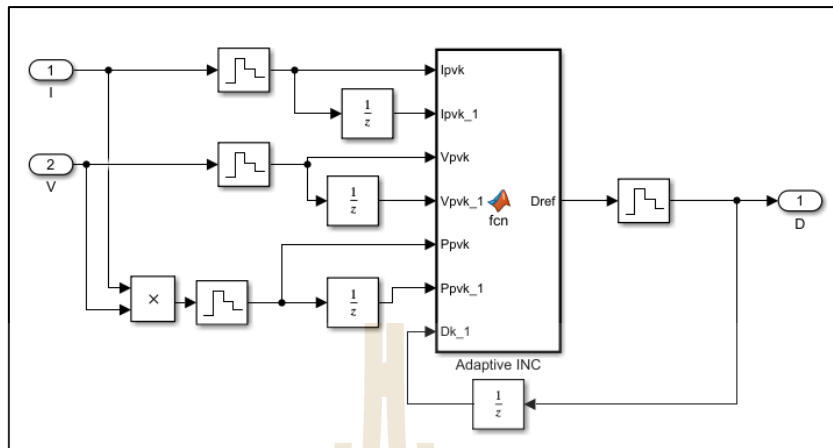


รูปที่ ก.2 บล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าขึ้นการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ ก.3 บล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการรบกวนและสังเกต





รูปที่ ก.4 บล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว

```

*****
โค้ดการทำงานของบล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการเปลี่ยนแปลง
*****

function Dref = fcn(Ipvk, Ipvk_1, Vpvk, Vpvk_1, Dk_1)
K = 0.01;
dl = Ipvk - Ipvk_1;
dV = Vpvk - Vpvk_1;
if (dV==0)
    if(dl==0) deltaD = deltaD;
    else (dl>0) deltaD = +K;
    else deltaD = -K;
    end
else if (dl/dV) == -(Ipvk/Vpvk) deltaD = deltaD;
    else if (dl/dV) > -(Ipvk/Vpvk) deltaD = -K;
    else deltaD = +K;
    end
end
Dref = Dk_1 + deltaD;
end

```

```
*****  
โค้ดการทำงานของบล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการรบกวนและสังเกต  
*****
```

```
function Dref = fcn(Ppvk, Ppvk_1, Vpvk, Vpvk_1, Dk_1)
```

```
K = 0.01;
```

```
dP = Ppvk - Ppvk_1;
```

```
dV = Vpvk - Vpvk_1;
```

```
if dP/dV > 0
```

```
    deltaD = K;
```

```
else
```

```
    deltaD = -K;
```

```
end
```

```
Dref = Dk_1 + deltaD;
```

```
end
```

\*\*\*\*\*  
 โค้ดการทำงานของบล็อกไฟฟ้ากำลัง MPPT ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว  
 \*\*\*\*\*

```
function Dref = fcn(Ipvk, Ipvk_1, Vpvk, Vpvk_1, Ppvk, Ppvk_1, Dk_1)
```

```
dP = Ppvk - Ppvk_1;
```

```
dV = Vpvk - Vpvk_1;
```

```
dI = Ipvk - Ipvk_1;
```

```
Slope = dP/dV;
```

```
N = 0.001;
```

```
K = N*abs(Slope);
```

```
if (dV==0)
```

```
    if(dI==0) deltaD = deltaD;
```

```
    else (dI>0) deltaD = +K;
```

```
    else deltaD = -K;
```

```
    end
```

```
else if (dI/dV) == -(Ipvk/Vpvk) deltaD = deltaD;
```

```
    else if (dI/dV) > -(Ipvk/Vpvk) deltaD = -K;
```

```
    else deltaD = +K;
```

```
    end
```

```
end
```

```
Dref = Dk_1 + deltaD;
```

```
end
```

ภาคผนวก ข

โค้ดการทำงานของชุดทดสอบพิกัด 40 W และชุดต้นแบบพิกัด 3 kW

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\*\*\*\*\*  
 โค้ดการทำงานของบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบคงค่าชั้นการ  
 เปลี่ยนแปลง  
 \*\*\*\*\*

```
// INC MPPT
int ClockPin = 11;
int SW = 8;
float StepSize = 0.01*800;
float Ts = 1; // samplingtime(s)
float count = 0;
float Voltage = 0, Current = 0;
float Vpv = 0, Ipv = 0;
float Ipv_1=0,Vpv_1=0, dI, dV, Dref, D_0 = 0, D_1 = 0, deltaD = 0;
long previousTime = 0;
int DriveON = 0, Action = 0;
void setup() {
  // clock
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
  //Pinmode
```

```
pinMode(ClockPin,OUTPUT);
pinMode(SW, INPUT_PULLUP)
pinMode(13, OUTPUT);
Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  Switch();
  if(millis() - previousTime >= Ts*1000) /*1000 make for seconds
  {
    previousTime = millis();
    Voltage_sensor();
    Current_sensor();
    Check_Vpv();
    MPPT();
    count = count + Ts;
    if (count == 60){count = 0;};
  }
}
void Voltage_sensor(){
  int  Read_Voltage_sensor = analogRead(A0);
  Voltage = Read_Voltage_sensor* (5.0 / 1023.0);
  Vpv = 30*Voltage + 0.26;
  Vpv = constrain(Vpv,0,150);
}
void Current_sensor(){
  int  Read_Current_sensor = analogRead(A1);
  Current = Read_Current_sensor* (5.0 / 1023.0);
```

```

// Ipv = 5*Current + 0.19;// HX10-NP
// Ipv = 8.4*Current - 0.072;// HXN 25-NP
    Ipv = 1.3*Current - 0.038;// HX05-P
    Ipv = constrain(Ipv,0,60);
}

void MPPT(){
    dV = Vpv - Vpv_1;
    dI = Ipv - Ipv_1;
    if (dV == 0){
        if (dI == 0){deltaD = 0;}
        else if (dI > 0){deltaD = -StepSize;}
        else{deltaD = StepSize;}
    }
    else{
        if ((dI/dV) == -(Ipv/Vpv)){deltaD = 0;}
        else if((dI/dV) > -(Ipv/Vpv)){deltaD = -StepSize;}
        else {deltaD = StepSize;}}

    Dref = (D_0 + D_1 + deltaD)*Action;
    Dref = constrain(Dref,0,800);
    OCR1A = Dref; // Duty cycle
    D_1 = OCR1A;
    Vpv_1 = Vpv;
    Ipv_1 = Ipv;
}

void Switch()
    int Sw = digitalRead(SW);
    if (Sw == 0) {

```

```
digitalWrite(13, HIGH);  
DriveON = 1;  
}  
else {  
digitalWrite(13, LOW);  
DriveON = 0;  
}  
}  
void Check_Vpv()  
{  
if (DriveON != 0 && Vpv > 5) {  
D_0 = 1;  
Action = 1;  
}  
else {  
D_0 = 0;  
Action = 0;  
}  
}
```



```

*****
โค้ดการทำงานของบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ของวิธีการรบกวนและสังเกต
*****

// P&O MPPT
int ClockPin = 11;
int SW = 8;
float StepSize = 0.01*800;
float Ts = 0.1; // samplingtime(s)
float count = 0;
float Voltage = 0, Current = 0;
float Vpv = 0, Ipv = 0;
float Ppv, Ppv_1, Vpv_1=0, dP, dV, Dref, D_0 = 0, D_1 = 0, deltaD;
long previousTime = 0;
int DriveON = 0, Action = 0;
void setup() {
  // clock
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
  //Pinmode
  pinMode(ClockPin,OUTPUT);

```

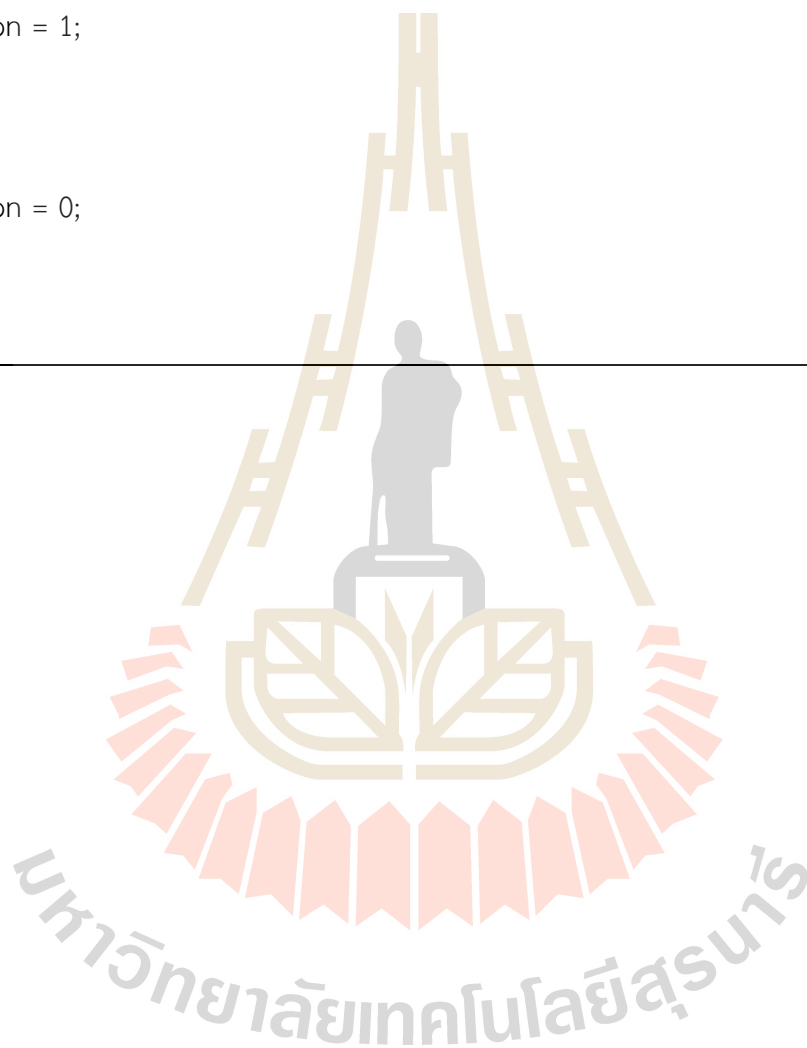
```
pinMode(SW, INPUT_PULLUP);
pinMode(13, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  Switch();
  if(millis() - previousTime >= Ts*1000) /**1000 make for seconds
  {
    previousTime = millis();
    Voltage_sensor();
    Current_sensor();
    Check_Vpv();
    MPPT();
    count = count + Ts;
    if (count == 60){count = 0;};
  }
}
void Voltage_sensor(){
  int  Read_Voltage_sensor = analogRead(A0);
  Voltage = Read_Voltage_sensor* (5.0 / 1023.0);
  Vpv = 30*Voltage + 0.26;
  Vpv = constrain(Vpv,0,150);
}
void Current_sensor(){
  int  Read_Current_sensor = analogRead(A1);
  Current = Read_Current_sensor* (5.0 / 1023.0);
  // Ipv = 5*Current + 0.19;// HX10-NP
```

```
// Ipv = 8.4*Current - 0.072;// HXN 25-NP
    Ipv = 1.3*Current - 0.038;// HX05-P
    Ipv = constrain(Ipv,0,60);
}

void MPPT(){
    Ppv = Vpv/Ipv;
    dP = Ppv - Ppv_1;
    dV = Vpv - Vpv_1;
    if (dP/dV == 0){deltaD = 0;}
    else if (dP/dV > 0) {deltaD = -StepSize;}
        else {deltaD = StepSize;}
    Dref = (D_0 + D_1 + deltaD)*Action;
    Dref = constrain(Dref,0.2*800,800);
    OCR1A = Dref; // Duty cycle
    D_1 = Dref;
    Ppv_1 = Ppv;
    Vpv_1 = Vpv;
}

void Switch()
{
    int Sw = digitalRead(SW);
    if (Sw == 0) {
        digitalWrite(13, HIGH);
        DriveON = 1;
    }
    else {
        digitalWrite(13, LOW);
        DriveON = 0;
    }
}
```

```
}  
}  
void Check_Vpv()  
{  
  if (DriveON != 0 && Vpv > 5) {  
    Action = 1;  
  }  
  else {  
    Action = 0;  
  }  
}
```



```

*****
โค้ดการทำงานของบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ของวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบปรับตัว
*****

//Adaptive INC MPPT
int ClockPin = 11;

int SW = 8;

float N = 0.01; // Multiplicative constant
float StepSize = 0;
float slope = 0;
float Ts = 0.1; // samplingtime(s)
float count = 0;
float Voltage = 0, Current = 0;
float Vpv = 0, Ipv = 0;
float Ppv, Ppv_1, Ipv_1=0, Vpv_1=0, dl, dV, dP, Dref, D_0 = 0, D_1 = 0, deltaD;
long previousTime = 0;
int DriveON = 0, Action = 0;
void setup() {
  // clock
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);

  ICR1 = 800;

  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;

  TCNT1 = 0;

  //Pinmode

```

```
pinMode(ClockPin,OUTPUT);
pinMode(SW, INPUT_PULLUP);
pinMode(13, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  Switch();
  if(millis() - previousTime >= Ts*1000) /*1000 make for seconds
  {
    previousTime = millis();
    Voltage_sensor();
    Current_sensor();
    Check_Vpv();
    MPPT();
    count = count + Ts;
    if (count == 60){count = 0;};
  }
}
void Voltage_sensor(){
  int  Read_Voltage_sensor = analogRead(A0);
  Voltage = Read_Voltage_sensor* (5.0 / 1023.0);
  Vpv = 30*Voltage + 0.26;
  Vpv = constrain(Vpv,0,150);
}
void Current_sensor(){
  int  Read_Current_sensor = analogRead(A1);
  Current = Read_Current_sensor* (5.0 / 1023.0);
  // Ipv = 5*Current + 0.19;// HX10-NP
```

```
// Ipv = 8.4*Current - 0.072;// HXN 25-NP
```

```
    Ipv = 1.3*Current - 0.038;// HX05-P
```

```
    Ipv = constrain(Ipv,0,60);
```

```
}
```

```
void MPPT(){
```

```
    Ppv = Vpv*Ipv;
```

```
    dV = Vpv - Vpv_1;
```

```
    dP = Ppv - Ppv_1;
```

```
    dI = Ipv - Ipv_1;
```

```
    slope = abs(dP*dV);
```

```
    slope = constrain(slope,1,100);
```

```
    StepSize = N*slope*800;
```

```
    if (dI/dV == -Ipv/Vpv){deltaD = 0;}
```

```
    else if (dI/dV > -Ipv/Vpv) {deltaD = -StepSize;}
```

```
    else {deltaD = StepSize;}
```

```
    Dref = (D_0 + D_1 + deltaD)*Action;
```

```
    Dref = constrain(Dref,0.2*800,800);
```

```
    OCR1A = Dref; // Duty cycle
```

```
    D_1 = Dref;
```

```
    Ppv_1 = Ppv;
```

```
    Ipv_1 = Ipv;
```

```
    Vpv_1 = Vpv;
```

```
}
```

```
void Switch()
```

```
{
```

```
    int Sw = digitalRead(SW);
```

```
    if (Sw == 0) {
```

```
        digitalWrite(13, HIGH);
```

```
    DriveON = 1;
  }
  else {
    digitalWrite(13, LOW);
    DriveON = 0;
  }
}

void Check_Vpv()
{
  if (DriveON != 0 && Vpv > 5) {
    Action = 1;
  }
  else {
    Action = 0;
  }
}
```

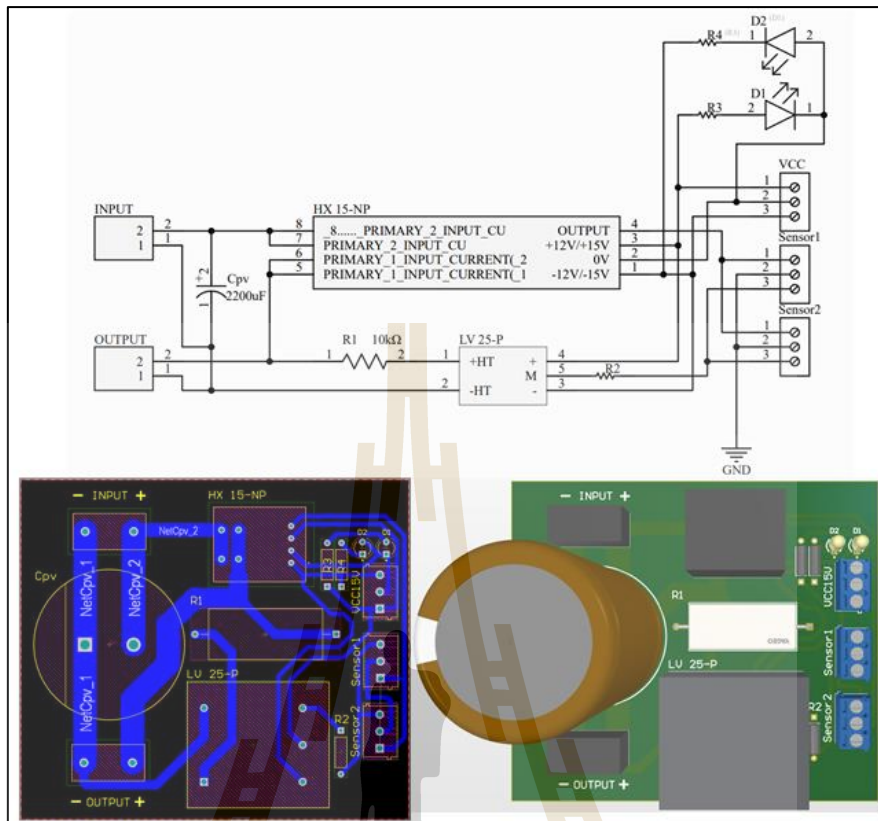




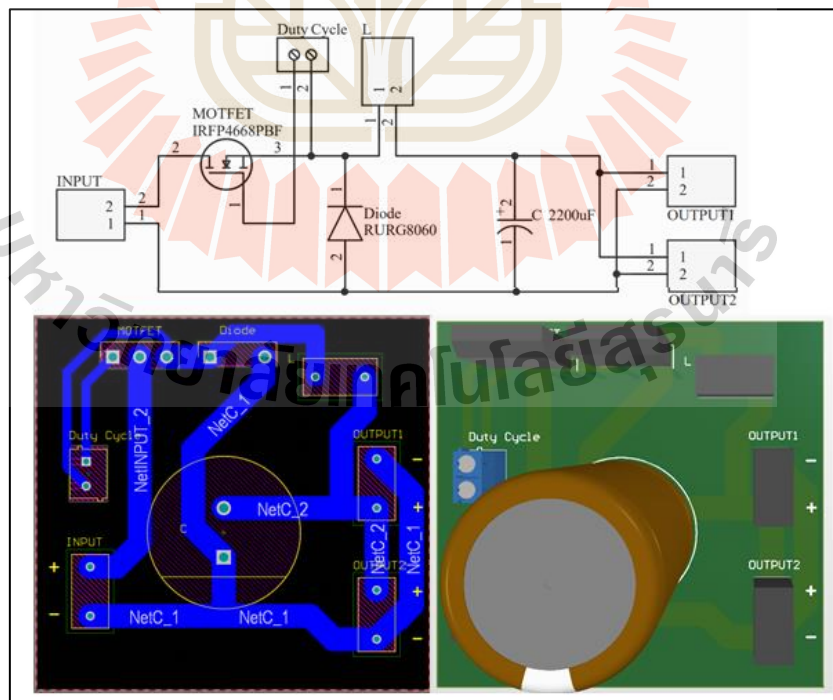
ภาคผนวก ค

การออกแบบและสร้างชุดต้นแบบ ด้วยโปรแกรม Altium Designer

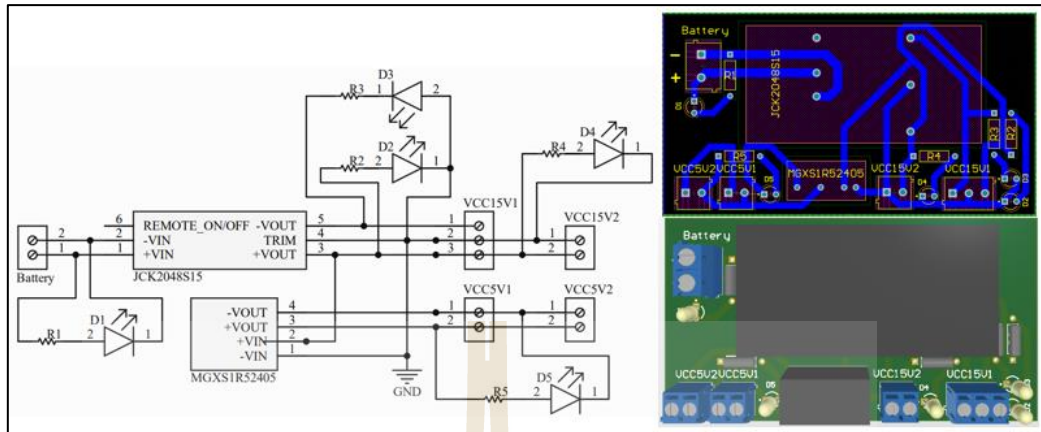
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



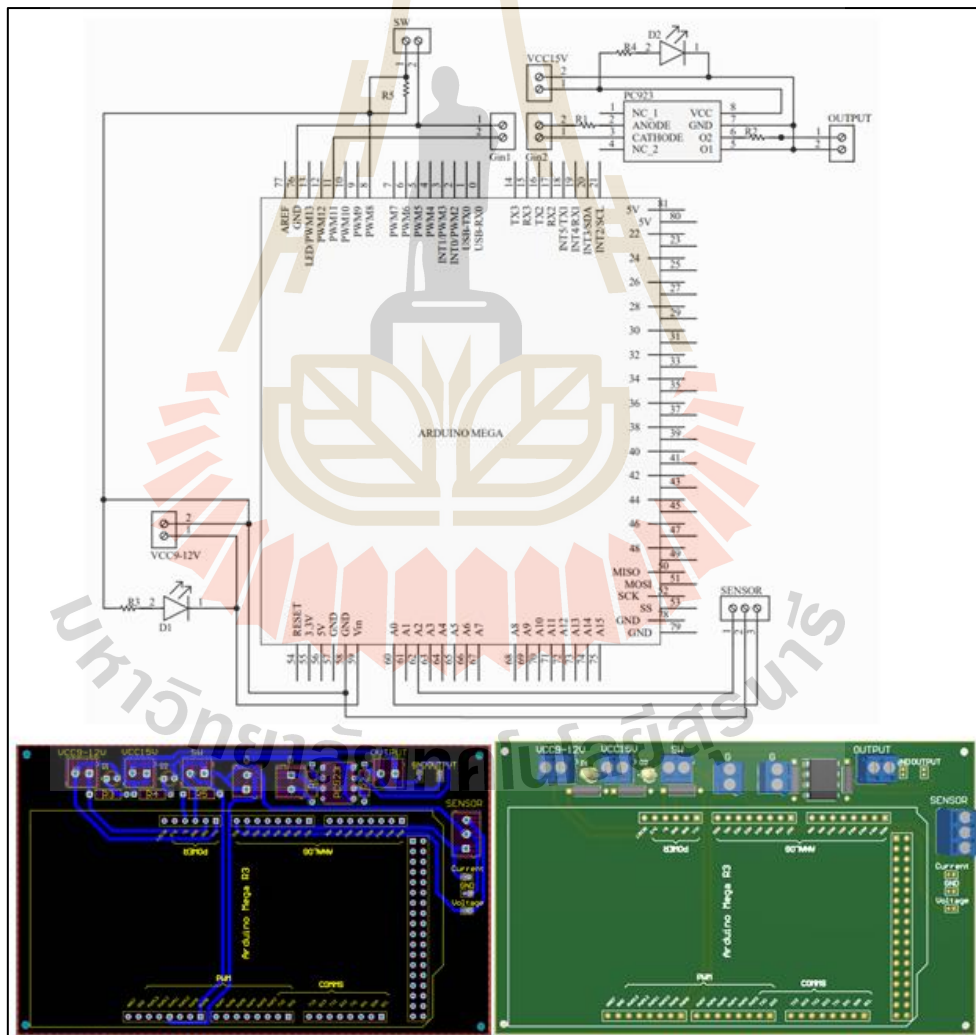
รูปที่ ค.1 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกแบบด้วยโปรแกรม Altium Designer



รูปที่ ค.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันออกแบบด้วยโปรแกรม Altium Designer



รูปที่ ค.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงออกแบบด้วยโปรแกรม Altium Designer



รูปที่ ค.1 วงจรชุดบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแยกโดตสัญญาณออกแบบด้วยโปรแกรม Altium Designer



ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

### รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว

วีรภัทร คำพันธ์, โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, จักรกริช ภัคดีโต, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์.

แบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมกับวงจรแปลงผันไฟตรงชนิดลดทอนแรงดันที่ต่อแบบขนาน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 (EECON44), หน้าที่ 65-68.

Jakkrit Pakdeeto, Weerapat Kamphan, Koson Chaicharoenudomrung, Kongpan Areerak and Kongpol Areerak. The Maximum Power Point Tracking of Charging Stations by using an Adaptive Incremental Conductance. 2021 International Electrical Engineering Congress (IEECON2021), Pattaya, Thailand: March 10-12, 2021, pp.53-56.

### รายชื่อบทความวิชาการที่อยู่ระหว่างรอการตีพิมพ์

วีรภัทร คำพันธ์, โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, รัฐพล โพธิ์สังข์, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์ และทิพย์วรรณ พังสุวรรณรักษ์. การจำลองสถานการณ์และผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 17, ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มีนาคม 2567.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## แบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมกับวงจรแปลงผันไฟตรงชนิดลดทอนแรงดันที่ต่อแบบขนาน

### Generalized State-Space Averaging Model for PV Connected to Parallel Buck Converter

วีรภัทร คำพันธ์<sup>1</sup>, โกลล ชัยเจริญอุดมรุ่ง<sup>2</sup>, จักรกริช ภักดีโต<sup>3</sup>, กองพัน อารีรัมย์<sup>4</sup> และกองพล อารีรัมย์<sup>5</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [kongpan@suat.ac.th](mailto:kongpan@suat.ac.th)

<sup>2</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมกับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดลดทอนแรงดันแบบขนาน การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา หากนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบทั่วไปที่ขึ้นอยู่กับเวลาแล้ว แบบจำลองที่ได้ไม่มีผลต่อการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จึงช่วยลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์และการออกแบบวงจรได้ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น มีความถูกต้องสอดคล้องกับแบบจำลองแบบทั่วไปทั้งผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ขึ้นอยู่กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่าน โปรแกรม MATLAB/Simulink

**คำสำคัญ:** วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบขนาน ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

#### Abstract

This paper presents a generalized state-space averaging model for PV included parallel buck converter. The mathematical model derived by generalized state-space averaging approach is a time-invariant model. The proposed technique is able to eliminate the switching action of power electronics to provide the time-invariant model. The resulting model is suitable for system analysis and design. The simulation in MATLAB was used to validate the model. The results show that good agreement between the proposed model and the exact topological model can be achieved.

**Keywords:** Buck Converter, Photovoltaic System, Generalized state-space averaging approach.

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานทางเลือกที่ผลิตไฟฟ้าได้เริ่มได้รับความนิยมมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานจากคลื่นทะเล รวมไปถึงพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากพลังงานทางเลือกเหล่านี้ เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) ซึ่งจะต้องใช้งานร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัคค์ต่ออยู่กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่ออยู่นั้น มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ เนื่องจากจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาก็คือเป็นแนวทางที่จะช่วยลดความซับซ้อน ทำให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น และง่ายต่อการออกแบบวงจร

วิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา มีหลายวิธีการ เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging method: GSSA method) [1] ที่เหมาะสมกับระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง หรือกระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบเฟสเดียวหรือเฟสคู่[3] และวิธีการดีคิว (DQ Transformation) ที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าสามเฟสในบทความนี้นำเสนอวิธีการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัคค์ที่ขนานกันและต่ออยู่กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ในบทความนี้เลือกวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัคค์ ที่นำมาขนานกัน[2] เพราะว่าการนำวงจรไปใช้งานจริงที่พิกัดของระบบสูงๆ หากเลือกเป็นวงจรเดี่ยวจำเป็นจะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีพิกัดขนาดใหญ่และมีราคาแพง เพื่อที่จะให้ทนต่อการแสไฟฟ้าใช้งานที่สูง ดังนั้นการเลือกใช่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัคค์ ที่นำมาขนานกันจะช่วยลดขนาดพิกัดของขดลวดเหนี่ยวนำได้ ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัคค์ที่นำมาขนานกันสองวงจรต่ออยู่กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา จะนำเสนอโดยการเปรียบเทียบผลตอบสนองทั้งสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวของแบบจำลองที่พิสูจน์กับแบบจำลองมาตรฐาน

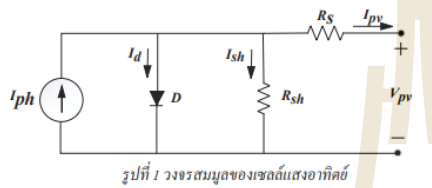
รายละเอียดของบทความนี้ประกอบด้วย 6 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนที่ 1 บทนำ ที่อธิบายที่มาของวิธีการ และที่มาของระบบที่พิจารณา ส่วนที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ต่างๆ ส่วนที่ 3 จะเป็นระบบที่นำมาพิจารณา ส่วนที่ 4 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ส่วนที่ 5 จะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผล

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44  
 The 44<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON44)  
 วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 ณ โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



**2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์**

เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะถูกมาจากสารกึ่งตัวนำที่มีวงจรมวลของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วยประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{ph}$ ) ต่อขนานกับไดโอด ความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) และความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) กระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแบ่งไปที่ไดโอด ( $I_d$ ) และไหลผ่านตัวต้านทานขนาน ( $I_{sh}$ ) กระแสไฟฟ้าขาออก ( $I_{pv}$ ) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรมวลเซลล์ของแสงอาทิตย์ในรูปที่ 1 สามารถอธิบาย  $I_{pv}$  ได้ในสมการที่ (1)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{pv} + I_{mpp}R_s)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{mpp}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{ph} = (I_{s.c.} + K_i(T - T_{ref})) \frac{I_{rr}}{I_{rr,ref}}$$

เมื่อ  $V_{pv}$  คือแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์,  $I_0$  คือกระแสในอัสอิมตัวย้อนกลับกับไดโอด,  $I_{sc}$  คือกระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25°C,  $A$  คือแฟกเตอร์ในอุดมคติ,  $k$  คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ  $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/Kevin,  $T$  คือ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์,  $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 25°C,  $q$  คือประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C,  $K_i$  คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร มีค่าเท่ากับ  $6.167 \times 10^{-4}$  C,  $I_{rr}$  คือ ความเข้มแสงมีหน่วยเป็น W/m<sup>2</sup> และ  $I_{rr,ref}$  คือ ความเข้มแสงอ้างอิงที่ 1000 W/m<sup>2</sup>

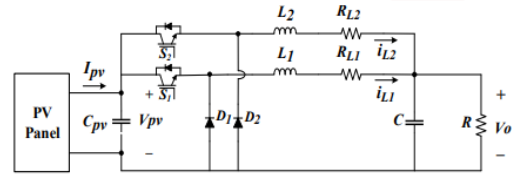
ในบทความนี้เลือกโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 315 W (Sunpower SPR-315E-WHT-D) ค่าพารามิเตอร์ของโมดูลดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C และความเข้มแสงอ้างอิงที่ 1000 W/m<sup>2</sup>

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ Sunpower SPR-315E-WHT-D

Parameter	Value	Unit
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ )	64.6	V
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	6.14	A
Voltage at maximum power point ( $V_{mpp}$ )	54.7	V
Current at maximum power point ( $I_{mpp}$ )	5.76	A

**3. ระบบที่พิจารณา**

บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบักที่ที่นำมาขนานกันสองวงจรและต่ออยู่กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2 โดยวงจรที่ทำการพิจารณามีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันแบบบักที่ขนานกัน 2 วงจร (2-Phase Buck Converter) ที่มีแหล่งจ่ายเป็นแผงโซลาร์เซลล์

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร

Parameter	Value	Unit
$R_{L1}, R_{L2}$	0.002	$\Omega$
$L_1, L_2$	1	mH
$R$	10	$\Omega$
$C$	10	$\mu$ F
$C_{pv}$	220	$\mu$ F
$T_s$	0.1	ms

**4. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

**4.1 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (GSSA Method)**

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะอาศัยอนุกรมฟูเรียร์ที่มีสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กัเวลามีคาบเป็น  $T_s$  ที่สัญญาณ  $f(t)$  ใด ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูเรียร์ (Complex Fourier Series) ได้ ดังสมการที่ (2)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (2)$$

เมื่อ  $\omega_s = 2\pi / T_s$  คือความถี่เชิงมุมของระบบ และ  $\langle x \rangle_k(t)$  คือสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์เชิงซ้อน (Complex Fourier coefficient) สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3)$$

จากสมการที่ (1) ค่า  $k$  คือตัวแปรสถานะ เป็นตัวบ่งบอกถึงความถูกต้องของการใช้ออนุกรมฟูเรียร์ ถ้าหากพิจารณาสัญญาณเกือบจะคงที่ไม่มีมีการสั่นไหว (สัญญาณ DC) เราจะใช้  $k = 0$  เรียกว่า zero-order approximation แต่ถ้าหากพิจารณาสัญญาณที่มีการสั่นไหว เราจะใช้  $k = -1, 0, 1$  ซึ่งเรียกว่า first-order approximation ซึ่งจะให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ สามารถอธิบายผลของการตอบสนองของแบบจำลองที่มีการสั่นไหวได้

**4.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร**

พิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบบักที่นำมาขนานกันสองวงจรและต่ออยู่กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์จากรูปที่ 2 สามารถวิเคราะห์ฟังก์ชันการสวิตช์ในรูปสมการที่คิดอยู่ในรูปฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step function) ดังสมการที่ (4)

$$u(t) = \begin{cases} 1 & ; 0 \leq t \leq dT_s \\ 0 & ; dT_s \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (4)$$

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44  
 The 44<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON44)  
 วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 ณ โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



เมื่อ  $t_{on} = dT_s$  จะได้ คาบวัฏจักรหนึ่งที (duty cycle) คือ  $d = t_{on} / T_s$   
 จากวงจรในรูปที่ 2 สามารถวิเคราะห์วงจรด้วยกฎ KCL และ KVL เพื่อหา  
 แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรที่มีอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่ง  
 หน่วยได้ดังสมการที่ (5)

$$\begin{cases} \dot{i}_{L1} = \frac{1}{L1}(V_{pv} \cdot u(t) - v_o - i_{L1}R_{L1}) \\ \dot{i}_{L2} = \frac{1}{L2}(V_{pv} \cdot u(t) - v_o - i_{L2}R_{L2}) \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C}(i_{L1} + i_{L2} - \frac{v_o}{R}) \\ \dot{v}_{pv} = \frac{1}{C_{pv}}(i_{pv} - i_{L1} \cdot u(t) - i_{L2} \cdot u(t)) \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาด้วยวิธีการประมาณค่าอันดับศูนย์ ( $k = 0$ ) ซึ่งหมายถึงการ  
 ละเว้นการสั้น โกวของระบบ จะสามารถเขียนตัวแปรสถานะของฟังก์ชัน  
 ขั้นบันไดหนึ่งหน่วยได้ดังสมการที่ (6)

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u(t) e^0 dt = \frac{dT_s}{T_s} = d \quad (6)$$

พิจารณาตัวแปรสถานะของสมการที่ (5) โดยการนำค่าตัวแปรสถานะของ  
 ฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยในสมการที่ (6) แทนค่าในสมการ จะสามารถเขียน  
 ตัวแปรสถานะใหม่ได้ดังสมการที่ (7)

$$\begin{cases} \dot{i}_{L1} = \frac{d}{L1} V_{pv} - \frac{1}{L1} v_o + \frac{R_{L1}}{L1} i_{L1} \\ \dot{i}_{L2} = \frac{d}{L2} V_{pv} - \frac{1}{L2} v_o + \frac{R_{L2}}{L2} i_{L2} \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C} i_{L1} + \frac{1}{C} i_{L2} - \frac{1}{RC} v_o \\ \dot{v}_{pv} = \frac{i_{pv}}{C_{DC}} - \frac{d}{C_{DC}} i_{L1} - \frac{d}{C_{DC}} i_{L2} \end{cases} \quad (7)$$

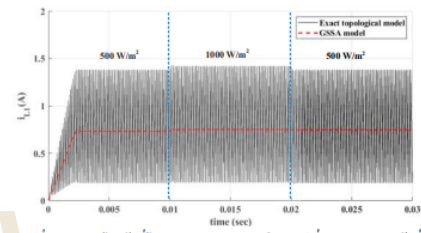
จากสมการที่ (7) สามารถนำตัวแปรสถานะเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์รูปตัว  
 แปรแสดงได้ดังสมการที่ (8) ในรูปสมการอนุพันธ์และแทนค่า  $I_{pv}$  จากสมการ  
 ที่ (1) เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $i_{L1}, i_{L2}, v_o$  และ  $V_{pv}$  ในรูป

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

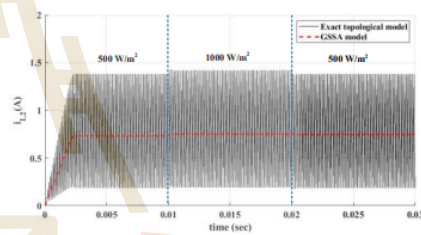
$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{i}_{L2} \\ \dot{v}_o \\ \dot{v}_{pv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{L1}}{L1} & 0 & -\frac{1}{L1} & \frac{d}{L1} \\ 0 & \frac{R_{L2}}{L2} & -\frac{1}{L2} & \frac{d}{L2} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 \\ -\frac{d}{C_{pv}} & -\frac{d}{C_{pv}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ v_o \\ v_{pv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C_{pv}} \end{bmatrix} I_{pv} \quad (8)$$

5. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

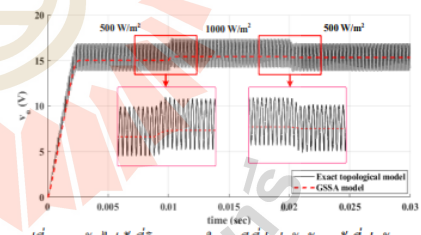
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่  
 นำเสนอ ทำได้โดยการแก้สมการอนุพันธ์บน โปรแกรม MATLAB เพื่อ  
 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองสถานการณ์ใน MATLAB/Simulink กับ  
 แบบจำลองที่ได้ โดยการจำลองสถานการณ์กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลง  
 ของความเข้มแสงจาก 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup> ที่เวลา 0.1 วินาที และ  
 1000 W/m<sup>2</sup> เป็น 500 W/m<sup>2</sup> ที่เวลา 0.2 วินาที ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25° C ใน  
 กรณีที่คาบวัฏจักรหนึ่งทีเท่ากับ 0.25 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 3  
 รูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 3 กระแสไฟฟ้ที่ไหลผ่านขดลวด  $i_{L1}$  ในกรณีที่ค่าวัฏจักรหนึ่งทีเท่ากับ 0.25



รูปที่ 4 กระแสไฟฟ้ที่ไหลผ่านขดลวด  $i_{L2}$  ในกรณีที่ค่าวัฏจักรหนึ่งทีเท่ากับ 0.25

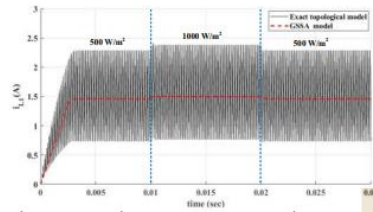


รูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้ที่ไหล  $v_o$  ในกรณีที่ค่าวัฏจักรหนึ่งทีเท่ากับ 0.25

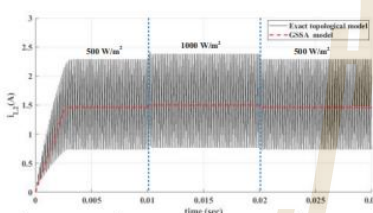
การจำลองสถานการณ์กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงจาก  
 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup> ที่เวลา 0.1 วินาที และ 1000 W/m<sup>2</sup> เป็น 500 W/m<sup>2</sup> ที่  
 เวลา 0.2 วินาที ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25° C ในกรณีที่คาบวัฏจักรหนึ่งทีเท่ากับ 0.5 ผล  
 การจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 6 รูปที่ 7 และรูปที่ 8



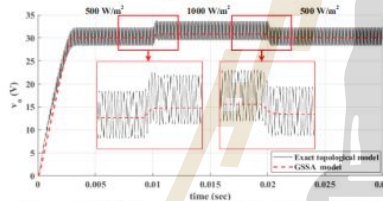
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44  
 The 44<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON44)  
 วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 ณ โรงแรม ดิ อินทพรสวรรค์ อิมเมืองน่าน จังหวัดน่าน



รูปที่ 6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด  $i_{L1}$  ในกรณีที่ค่าตัวจูนจิกอร์หนักที่เท่ากับ 0.5

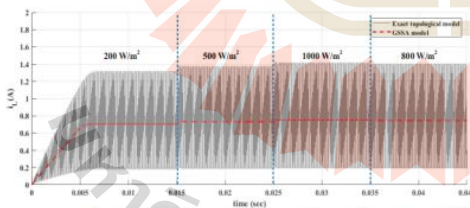


รูปที่ 7 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด  $i_{L2}$  ในกรณีที่ค่าตัวจูนจิกอร์หนักที่เท่ากับ 0.5



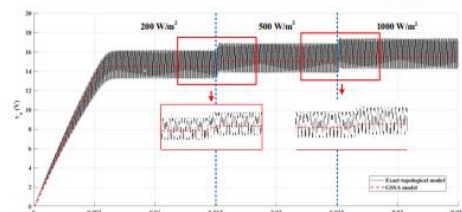
รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าที่โหลด  $v_o$  ในกรณีที่ค่าตัวจูนจิกอร์หนักที่เท่ากับ 0.5

นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอื่นๆ ที่ตัวจูนจิกอร์หนักที่เท่ากับ 0.25 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด  $i_{L1} = i_{L2}$  แสดงดังรูปที่ 9 และค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลด  $v_o$  แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด  $i_L$  ในกรณีที่ค่าตัวจูนจิกอร์หนักที่เท่ากับ 0.25

จากการผลการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB Simulink รูปที่ 3 ถึงรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองที่ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีความถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วครู่และในสภาวะอยู่ตัวถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าตัวจูนจิกอร์หนักก็ตามสามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ และการออกแบบได้



รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าที่โหลด  $v_o$  ในกรณีที่ค่าตัวจูนจิกอร์หนักที่เท่ากับ 0.25

6. สรุป

การใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับวงจรหมักแบบขนาน สามารถกำจัดผลการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์และการออกแบบวงจรในโดเมนเวลา โดยแบบจำลองที่ได้จากการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้องทั้งผลการตอบสนองทั้งในสภาวะชั่วครู่และในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์วิเคราะห์และออกแบบวงจรสำหรับระบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Yanbo Che, Guojian Liu, Zhangang Yang, Xiaokun Liu, "Model of inverter in more electric aircraft based on generalized state space averaging approach", in 2015 6<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics Systems and Application (PESA), 2015.  
 [2] Peter Azer. "Generalized State Space Average Model for Multi-Phase Interleaved Buck, Boost, and BuckBoost DC-DC Converters: Transient, Steadystate and Switching Dynamics." McMaster Institute for Automotive Research and Technology, McMaster University, Hamilton, ON L8P 0A6, Canada, 2017.  
 [3] Kaimin Hao, "Modeling Research of Dual Active Bridge DC Converter Based on Double Phase Shift Control", 3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Robotics and Automation Sciences, Naval Aviation University Institute of Aviation Basic Yantai, China, 2019.  
 [4] Hadi Ebrahimi, "A Novel GSSA Method for Modeling of Controllers in the Multi-Converter System of an Advanced Aircraft Electric Power System (AAEPS)", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), The University of Texas at Tyler Texas, United States, 2012.  
 [5] Hadi Ebrahimi, "Novel GSSA Modeling and Control of High Power Inverters for Modern Aircraft Electric Power Systems", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), The University of Texas at Tyler Texas, United States, 2016.

## The Maximum Power Point Tracking of Charging Stations by using an Adaptive Incremental Conductance

Jakkrit Pakdeeto<sup>1</sup> Weerapat Kamphan<sup>2</sup> Koson Chaicharoenuomrung<sup>3</sup> Kongpan Areerak<sup>2\*</sup> and Kongpol Areerak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB

<sup>2</sup> School of Electrical Engineering, Instituted of Engineering, Suranaree University of Technology

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB  
kongpan@sut.ac.th

**Abstract**—This paper presents an adaptive incremental conductance to track the maximum power point for charging station. The proposed technique is used to increase the performance of the conventional incremental conductance approach. The simulation results via MATLAB/SimPowerSystem<sup>®</sup> are used for validation. The results show that the MPP of PV panel can be achieved even the irradiance value is changed instantaneously. Moreover, the proposed adaptive step-size of duty cycle is very simple for proposed implementation.

**Keywords**— maximum power point tracking (MPPT), incremental conductance, standalone operation, photovoltaic system

### I. INTRODUCTION

Nowadays, the use of renewable energy has extremely increased because it cannot release the CO<sub>2</sub> and other greenhouse effect gases [1]. One of the many renewable energy types is the photovoltaic (PV) that the people interest to use it more than in the past [2]. The PV system is suitable to apply in the older power system because it can be used for the grid connected operation [3, 4]. Nevertheless, the PV system can be also used in the standalone mode [5-7]. As the aforementioned, the PV system is the popular choice in Thailand in which the location is the subtropical region with the great sunshine irradiance [5]. Unfortunately, the performance of the PV energy is poor in both the operational modes (grid connected and standalone mode) since it depends on the natural irradiance. Thus, many systems including the PV are necessary to have the maximum point tracking (MPPT) for the achievement of the maximum energy from PV. For the standalone mode, the energy from the PV source depends on the natural sun irradiance and the connected load condition [8]. When the characteristic of the P-V curve is considered, it has been found that the PV source cannot supply the energy in the maximum power point (MPP) at any natural irradiance. Hence, the PV standalone system is necessary to have the MPPT which can control the maximum output energy from the PV source. For this paper, the considered PV system is the charging station which can be only concerned in the standalone operation mode. Therefore, the MPPT is important to ensure that the energy from the PV source will be controlled at the MPP in every irradiance condition. For the charging station, when the energy is over to supply the loads, the remaining power will be charged into the battery.

It is well-known that many techniques can be applied for the MPPT such as the rotational PV tracking toward the sun by the mechanical system or the MPPT algorithms possessing in the controller of the power converter [5]. The MPPT algorithms are widely used in the PV system because of incomplexity and inexpensive costs. Many approaches of the MPPT algorithm can be found in [9, 10] such as the fuzzy logic, neural network, fractional open-circuit voltage, ripple correlation control (RCC), perturbation and observation (P&O), incremental conductance (IncCond) and etc. Both of the IncCond and the P&O methods have been commonly used to determine the MPP in the PV system [11-13]. From the summarized literature reviews [10, 14, 15], it can be seen that the IncCond is more lightly complex than the P&O [3]. However, the IncCond provides a good performance in both the transient and steady-state responses [3, 9]. In addition, the IncCond can effectively track the MPP under the fast-changing condition of solar irradiance compared with the P&O method. For the conventional IncCond method, the slope of the I-V curve is used to determine the MPP in term of the derivative of current and voltage with respect equal to 0 ( $di/dV = 0$ ) [16]. The output IncCond method is the fixed step-size value of the duty cycle for the power converter [17]. When the slope will be nearly going to zero, the constant duty cycle can affect to mistake the accurate MPP resulting in an oscillation of power response. Therefore, this paper presents the adaptive step-size output into the conventional IncCond algorithm process for the charging station in which this method can solve the problems and increase the performance.

This paper consists of five parts as follows: An introduction is presented in section I. Section II describes the considered system and the details of the PV characteristic curves and the adaptive step-size IncCond are presented in section III. In section IV, the simulation results of the proposed technique are addressed. Finally, section V provide the conclusion.

### II. The Considered System

In this paper, the charging station operated in the standalone mode is considered as shown in Fig. 1. It consists of the PV panel, buck converter and the 4 series of 12V battery (48V). In addition, the current and voltage sensors are used for the power calculation in the procedure of the proposed MPPT algorithm.

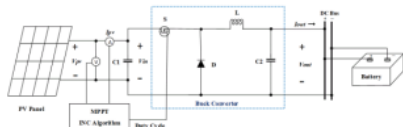


Fig. 1 The considered system.

It is shown in Fig.1 that the buck converter receives the energy from the PV panel and supplies this energy into the DC bus. When the loads are not connected to the DC bus, whole energy from the PV source will be charged into the battery. For the buck converter, the MPPT algorithm is used to control this converter for tracking the MPP. The output from the algorithm is the duty cycle ( $d$ ) for controlling the input voltage of the buck converter because the output voltage of this converter is naturally regulated by battery as shown in (1) [5].

$$V_{pv} = V_{in} = \frac{V_{out}}{d} \quad (1)$$

In the part of the model and characteristic of PV module, the equivalent circuit generally consists of the ideal DC current source parallel with the diode and parallel resistor ( $R_{sh}$ ), series resistor ( $R_s$ ) as shown in Fig. 2 [18].

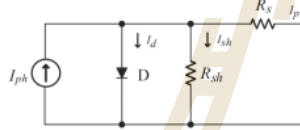


Fig. 2 The equivalent circuit of PV source.

From Fig. 2, the equation that will be used to explain the behavior of the PV is shown in (2). The details of the variable values and the equation of  $I_0$  in (2) can be found from [18]. In (2), the  $I_{ph}$  can be calculated by using (3) that depends on the irradiance and temperature.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{kT}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$I_{ph} = I_{s.c.} + (K_i(T - T_{ref})) \frac{I_{rr}}{I_{rr,ref}} \quad (3)$$

After the (2) is used to find the characteristic P-V and I-V curve, these curves of the considered system are shown as Fig. 3 at the fixed temperature equal to 25°C and varied irradiance equal to 200, 500, 600, 800, and 1000W/m<sup>2</sup>, respectively. The parameters of PV module are described as follows:  $I_{rr,ref} = 1000\text{W/m}^2$ ,  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ ,  $I_{s.c.} = 9.013\text{A}$ ,  $V_{o.c.} = 45.666\text{V}$ . In the considered system, there are six modules connection to be the PV panel in which they are 2 module string and 3 parallel strings. It can be seen in Fig. 3 (I-V and P-V curves) that each irradiance values have only one-point of the MPP.

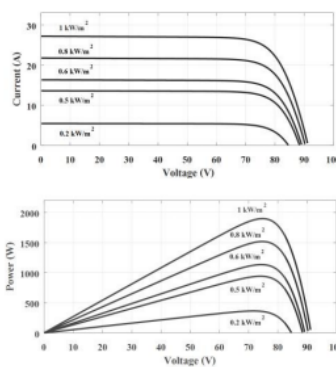


Fig. 3 The characteristic curves of the considered PV source.

### III. The principle of the proposed technique

The conventional IncCond is well-known for tracking the MPPT of the PV system because it is simple and better performance. Based on the slope of the P-V curve, the IncCond algorithm will use this curve in term of  $dI/dV$  in order to track the MPP as shown in Fig. 4. From Fig. 1, the MPPT algorithm receives the discrete-time values of current and voltage from the sensors. These values will be calculated in each of the period time and the algorithm will determine the  $d$  to control the buck converter. The output  $d$  from the IncCond algorithm is varied with the fixed step-size ( $\Delta d$ ) until the output voltage of PV panel is regulated at MPP. When the output voltage of PV source is controlled at MPP, the maximum power from this source is achieved.

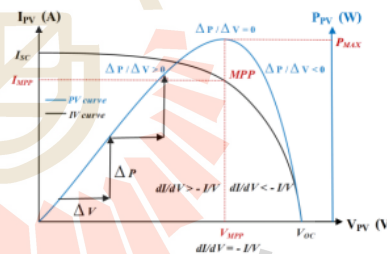


Fig. 4 The I-V and P-V curves for the process of IncCond.

The power from PV source as shown in (4) will be regarded in the conventional IncCond. The slope of the power can be calculated in term of the period time by using the derivative with respect to time as expressed in  $dP/dt = \Delta P = P_{n+1} - P_n$ . The  $P_{n+1}$  and  $P_n$  is the PV power in current time and previous time, respectively. The  $\Delta t$  and  $\Delta V$  are similarly as  $\Delta P$  in which they are equal to  $dI/dt$  and  $dV/dt$ . When the (4) is divided by  $\Delta V$ , the summarized equation is shown in (5).

$$P = I \cdot V \quad (4)$$

2021 International Electrical Engineering Congress (IEECON2021)  
March 10-12, 2021, Pattaya, THAILAND

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= \frac{IV}{dV} \\ \frac{dP}{dV} &= I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} \\ \frac{\Delta P}{\Delta V} &= I + V \frac{dI}{dV} \\ \therefore \frac{\Delta P}{\Delta V} &= I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \end{aligned} \quad (5)$$

From Fig. 4, it can be seen at the MPP that the slope of  $\Delta P/\Delta V$  is equal to 0. Therefore, the concept of IncCond can be calculated by (6).

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\Delta V} &= 0 = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \\ V \frac{\Delta I}{\Delta V} &= -I \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &= -\frac{I}{V} \end{aligned} \quad (6)$$

In the conventional IncCond algorithm, the  $\Delta d$  is set to be the constant value for controlling the buck converter. If the  $\Delta d$  is defined as too much, it may generate the oscillation around the MPP. On the other hand, the response of the MPPT is very slow when the  $\Delta d$  is very small. To solve this problem, this paper presents the adaptive step-size IncCond for the MPPT applied in the charging station. The flowchart of the proposed technique is depicted in Fig. 5.

In Fig. 5, the proposed algorithm will receive the current and voltage from sensors to calculate the power. After the power is determined, there are three-stage to decide the step-size in which it is a new approach for the IncCond. It can be seen in the highlight part that the  $\Delta d$  is adjusted. For example, if the  $\Delta P/\Delta V$  is not lesser than 5, the  $\Delta d$  will be equal to 0.01. In addition, the  $\Delta d$  may be equal 0.05 or 0.01 when the  $\Delta P/\Delta V$  is more over 5. Nevertheless, the desired values of  $\Delta d$  are obtained from the trial and error in which it is suitable and can provide the good performance. However, if the system is changed, this condition will be changed. The trial and error approach is repeated again. After the  $\Delta d$  is defined, the next process of the proposed method is the operating point consideration at the current time. If the power from PV is the MPP ( $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ ), the algorithm will only update the parameters. However, the  $d$  will be added by  $\Delta d$  when the operating point of output power from PV source is more than the MPP ( $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ ). On the other hand, if the MPP is more than the operating point ( $\frac{\Delta I}{\Delta V} \geq -\frac{I}{V}$ ), the  $\Delta d$  will be minus from the  $d$ . After the proposed algorithm is used, the  $d$  is varied to control the input voltage of the buck converter. When the input voltage of the buck converter is controlled at the MPP, the maximum output power from PV panel is always obtained.

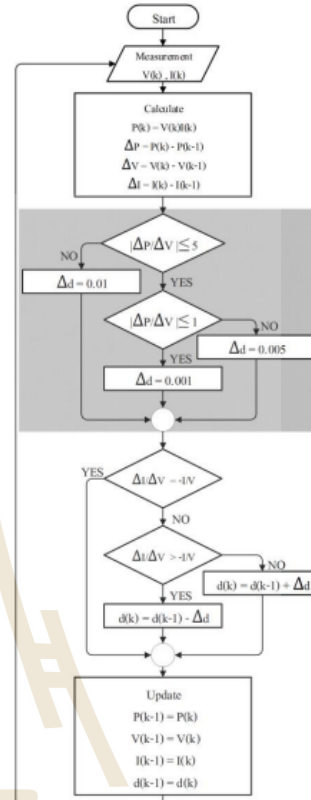


Fig. 5 The adaptive IncCond flowchart.

To ensure the proposed algorithm, the simulation results will be presented in section IV.

#### IV. The simulation results

In this paper, the considered system in Fig. 1 will be simulated by using MATLAB/SimPowerSystem<sup>®</sup>. The system parameters are defined as follows:  $V_{in} = 48V$ ,  $C_1 = 100\mu F$ ,  $C_2 = 220\mu F$ ,  $L = 10mH$ . The switching frequency of buck converter is equal to 10kHz. To assess the proposed algorithm, the irradiance is set to rapidly change between 500 and 1000W/m<sup>2</sup>. The simulation result is illustrated in Fig. 6.

It can be seen in Fig. 6 that both of algorithms (conventional and proposed IncCond) can be used to track the MPP when the irradiance is varied. The responses from these algorithms are almost similar in the steady-state operation. However, the transient responses are significantly different as depicted in. When the irradiance is changed to increase and decrease, the zoom area from Fig. 6 can be shown in Fig. 7 and Fig. 8, respectively.

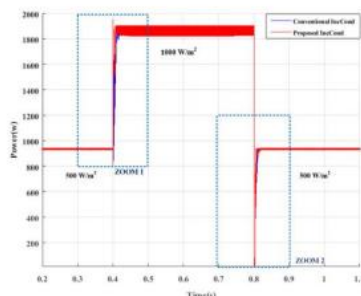


Fig. 6 The MPPT simulation result.

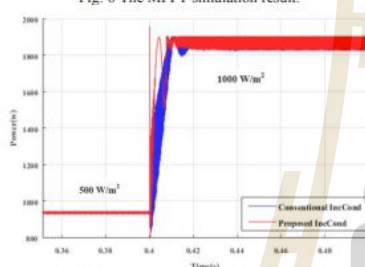


Fig. 7 The response of zoom1 area in Fig. 6.

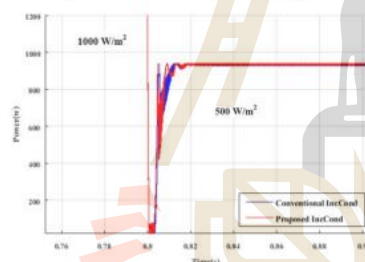


Fig. 8 The response of zoom2 area in Fig. 6.

As seen in Fig. 7 and Fig. 8, it can confirm that the proposed IncCond can rapidly track the MPP of PV panel compared with the conventional approach. Therefore, the adaptive step-size of  $\Delta d$  can be modified into the conventional method to achieve the good performance of MPP. Moreover, the proposed algorithm is very simple and comfortable to modify in the microcontroller board.

## V. Conclusion

This paper presents the adaptive step-size of  $\Delta d$  into the conventional IncCond for the achievement of the MPPT applied in the charging station. In this paper, the PV panel model is explained. In addition, the characteristics of P-V and I-V curves are addressed to describe the behavior of the considered PV source. After the proposed algorithm modified by three-stage of adaptive step-size is implemented, the simulation results show that the MPP of PV panel is achieved while the irradiance value is quickly changed. Moreover, the

proposed adaptive step-size of  $\Delta d$  is very simple to use for the experiments in the future.

## REFERENCE

- [1] N. K. M. A. Alrikabi, "Renewable Energy Types," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 61-64, 2014.
- [2] K. Strunz, E. Abbasi, and D. N. Huu, "DC Microgrid for Wind and Solar Power Integration," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 115-126, 2014.
- [3] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no. 3, pp. 1070-1078, 2013.
- [4] J. Pakdeeto, K. Areerak, and K. Areerak, "The Stability Analysis of DC Micro-Grid System with PV Array," in *2018 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, 2018, pp. 1-4.
- [5] C. Thueanpangthaim, P. Wongyai, K. Areerak, and K. Areerak, "The maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based approach," in *2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, 2017, pp. 1-4.
- [6] M. S. Ngan and C. W. Tan, "A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems," in *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011, pp. 22-27.
- [7] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes, and H. Salhi, "Comparative analysis of P&O, modified hill climbing-FLC, and adaptive P&O-FLC MPPTs for microgrid standalone PV system," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015, pp. 1095-1099.
- [8] S. S. Alli, S. Jovanović, P. Poure, and E. Jamshidpour, "MPPT and output voltage control of Photovoltaic systems using a Single-Switch DC-DC converter," in *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 2016, pp. 1-6.
- [9] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [10] A. K. Podder, N. K. Roy, and H. R. Pota, "MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 10, pp. 1615-1632, 2019.
- [11] I. W. Christopher and R. Ramesh, "Comparative Study of P&O and Inc MPPT Algorithms," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 02, no. 12, pp. 402-408, 2013.
- [12] T. M. Chung, H. Daniyal, M. H. Sulaiman, and M. S. Bakar, "Comparative study of P&O and modified incremental conductance algorithm in solar maximum power point tracking," in *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, 2016, pp. 1-6.
- [13] S. A. Mohamed and M. Abd El Sattar, "A comparative study of P&O and INC maximum power point tracking techniques for grid-connected PV systems," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 2, p. 174, 2019/01/22 2019.
- [14] L. Bouselham, B. Hajji, and H. Hajji, "Comparative study of different MPPT methods for photovoltaic system," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2015, pp. 1-5.
- [15] A. F. Murtaza, H. A. Sher, M. Chiaberge, D. Boero, M. D. Giuseppe, and K. E. Addoewesh, "Comparative analysis of maximum power point tracking techniques for PV applications," in *INMIC*, 2013, pp. 83-88.
- [16] M. Alsumiri, "Residual Incremental Conductance Based Nonparametric MPPT Control for Solar Photovoltaic Energy Conversion System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 87901-87906, 2019.
- [17] N. E. Zakzouk, M. A. Elshahry, A. K. Abdelsalam, A. A. Helal, and B. W. Williams, "Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 561-574, 2016.
- [18] M. F. Nayan and S. M. S. Ullah, "Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters," in *2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET)*, 2015, pp. 1-6.



ที่ อว 0604.8.1.3/806

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
เลขที่ 85 ถ.สถลมารค  
ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ  
จ.อุบลราชธานี 34190

1 พฤษภาคม 2566

เรื่อง ตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

เรียน คุณกองพัน อารีรักษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย เรื่อง “การจำลองสถานการณ์และผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวิถัจกรการทำงานคงที่” โดยมีผู้เขียนร่วมคือ วีรภัทร คำพันธ์ (ชื่อแรก), โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, รัฐพล โพธิ์สังข์, กองพล อารีรักษ์ และทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ตามความทราบนั้น

บัดนี้ บทความดังกล่าวของท่าน ได้ผ่านการประเมินจากกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 คน จากหลากหลายสถาบัน ตามแนวทางของประกาศ ก.พ.อ. และกองบรรณาธิการ ได้พิจารณาเห็นชอบในการนำบทความของท่าน เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - มีนาคม 2567 ประเภท บทความวิจัย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ท่านจะให้ความสนใจในการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารฯ ในโอกาสต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

สำนักงานกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม  
โทร. 045 -353319 อีเมลอิเล็กทรอนิกส์ : engj\_assistant@ubu.ac.th



บทความวิจัย

## การจำลองสถานการณ์และผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนห้วงจักรการทำงานคงที่

### Simulation and Experimental Results the Maximum Power Point Tracking of PV Stand-alone System Using Fixed Step Size Incremental Conductance Method

วีรภัทร คำพันธ์<sup>1</sup> โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง<sup>2</sup> รัฐพล โพธิ์สังข์<sup>1</sup> กองพัน อารีรักษ์<sup>1\*</sup> กองพล อารีรักษ์<sup>1</sup>

ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800

Weerapat Kamphan<sup>1</sup> Koson Chaicharoenudomrung<sup>1</sup> Ratapon Phosung<sup>1</sup> Kongpan Areerak<sup>1\*</sup>

Kongpol Areerak<sup>1</sup> Thipwan Fungsuwannarak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB Bangkok 10800

\* Corresponding author.

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

#### บทคัดย่อ

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ว่าจะเป็นระบบแบบอิสระและระบบที่เชื่อมกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด ดึงศักยภาพสูงสุดเท่าที่แผงของเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตออกมาได้ ที่ทุกการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ในบทความนี้จะนำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำ (Incremental conductance method) สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน (Buck converter) โดยจะอาศัยหลักการปรับตัวของค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle) ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด สมรรถนะการควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอในบทความนี้ยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power system block) ร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB และผลการทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในทุกการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

#### คำสำคัญ

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีการเพิ่มค่าความนำ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

**Abstract**

Tracking the maximum power point of a PV system is essential for both stand-alone and grid-connected PV systems to ensure that the solar cells can produce the highest power for different environmental conditions. This paper proposes the maximum power point tracking for a PV stand-alone system using incremental conductance method. The control principle of the proposed method uses the duty cycle adjustment via the buck converter to obtain the maximum power output of stand-alone PV system. The control performance was confirmed by MATLAB/Simulink simulation and experiment results. It has been demonstrated that the maximum power point tracking of stand-alone PV system by incremental conductance method can follow the peak power point in all environmental changes.

**Keywords**

The Maximum Power Point Tracking; Incremental conductance method; PV Stand-alone system

**1. บทนำ**

ปัจจุบันการใช้พลังงานทางเลือกที่ใช้ผลิตไฟฟ้าได้รับความนิยมมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานจากคลื่นทะเล รวมไปถึงพลังงานแสงอาทิตย์ [1] เนื่องจากพลังงานทางเลือกเหล่านี้ เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ซึ่งจะต้องใช้งานร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า และระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ [2,3,4] เพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุดในทุกสภาวะความเข้มแสงและอุณหภูมิ บทความนี้จะได้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน [5,6] ให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันจะเปลี่ยนแปลงแรงดันไปตามค่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละสภาวะความเข้มแสงและอุณหภูมิ การควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีนี้ จำเป็นจะต้องใช้วิธีการที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในทุกการเปลี่ยนแปลงของสภาวะความเข้มแสงและอุณหภูมิ

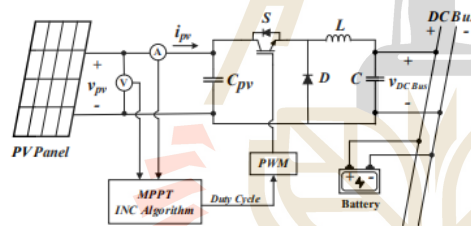
วิธีควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอในอดีตมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage: VOC) [7,8] วิธีเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร (Short Circuit Current: ISC) [9,10] วิธี การรบกวน และการสังเกต (Perturbation and Observation Method: P&O) [11] และวิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: INC) [12,13] เป็นต้น จากวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการที่ถูกนำมาใช้งานและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันคือวิธีเพิ่มค่าความนำ ซึ่งเป็นวิธีการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า แล้วคำนวณหาจุดการทำงานถัดไป วิธีนี้ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าดีกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน [14,15] บทความนี้จะจึงได้เลือกนำเสนอวิธีการเพิ่มค่าความนำ ผ่านผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power system block) ร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB รวมถึงการสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่



บทความนี้ประกอบไปด้วย 8 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบที่ทำการพิจารณา และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่นำมาใช้ในบทความนี้ ส่วนที่ 3 จะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยจะระบุพิกัดที่นำมาใช้ในบทความ ส่วนที่ 4 เป็นหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำ รวมถึงการออกแบบเลือกค่าขนาดของการเปลี่ยนแปลง (step size) ที่เหมาะสมกับระบบ ส่วนที่ 5 จะเป็นขั้นตอนการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ส่วนที่ 6 จะเป็นขั้นตอนการออกแบบการสร้างชุดทดสอบการนำเสนอผลการทดสอบ และส่วนสุดท้าย จะเป็นสรุปและอภิปรายผลการทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้

2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่ทำการพิจารณาในบทความนี้จะประกอบไปด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่ต่ออยู่กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ มีโหลดเป็นแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบที่ทำการพิจารณา

จากคุณสมบัติของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน ที่พิจารณาให้แหล่งจ่ายเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ มีโหลดของวงจรเป็นแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าที่โหลดคงที่ ( $V_{DC Bus}$ ) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) คูณอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ ( $d$ ) แสดงดังสมการที่ (1)

$$V_{DC Bus} = d \cdot V_{pv} \tag{1}$$

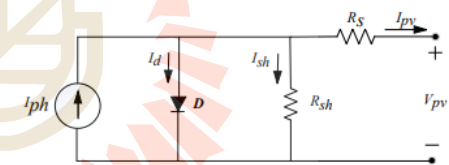
จากสมการที่ (1) พิจารณาแรงดันแบตเตอรี่ให้มีค่าคงที่ เมื่อเราทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันเปลี่ยนไป แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วยแสดงดังสมการที่ (2) หากต้องการให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนไปที่จุดแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังสมการที่ (3)

$$V_{pv} = \frac{V_{DC Bus}}{d} \tag{2}$$

$$V_{pv, mpp} = \frac{V_{DC Bus}}{d_{mpp}} \tag{3}$$

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะถูกผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำ และวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดกระแสด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{ph}$ ) ต่อขนานกับ ไดโอด ความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) และความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) กระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแบ่งไปที่ไดโอด ( $I_d$ ) และไหลผ่านตัวต้านทานขนาน ( $I_{sh}$ ) กระแสไฟฟ้าขาออก ( $I_{pv}$ ) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลเซลล์ของแสงอาทิตย์ในรูปที่ 2 สามารถอธิบาย  $I_{pv}$  ได้ในสมการ

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + I_{mpp}R_s)}{AKT} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{mpp}R_s}{R_{sh}} \tag{4}$$

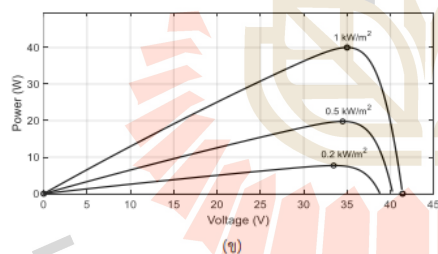
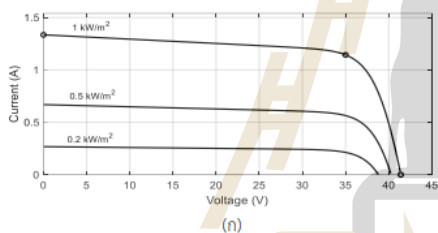
$$I_{ph} = (I_{s.c.} + K_i(T - T_{ref})) \frac{I_{rr}}{I_{rr,ref}} \tag{5}$$

เมื่อ  $V_{pv}$  คือแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์,  $I_{mpp}$  คือกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์,  $I_o$  คือกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด,  $I_{s.c}$  คือกระแสลัดวงจรของเซลล์ที่  $25^\circ C$ ,  $A$  คือแพกเตอร์ในอุดมคติ,  $k$  คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน มีค่าเท่ากับ  $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/Kevin,  $T$  คือ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์,  $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงที่  $25^\circ C$ ,  $q$  คือประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C,  $K_i$  คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร มีค่าเท่ากับ  $6.167 \times 10^{-4}$   $^\circ C$ ,  $I_{rr}$  คือ ความเข้มแสงมีหน่วยเป็น  $W/m^2$  และ  $I_{rr,ref}$  คือ ความเข้มแสงอ้างอิงที่  $1000 W/m^2$  ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้แสดงได้ดังตารางที่ 1 เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โมเดล Geape Solar GS-P-40-PDX บนโปรแกรม MATLAB/Simulink และกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

Parameter	Value	Unit
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ )	40	V
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	2.21	A
Voltage at maximum power point ( $V_{mpp}$ )	31	V
Current at maximum power point ( $I_{mpp}$ )	1.29	A

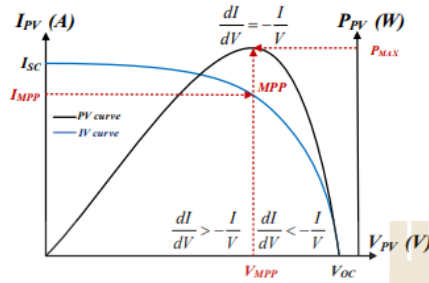
จากกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์รูปที่ 3 (ก) จะเห็นว่าเมื่อความเข้มของแสงอาทิตย์ต่างกันที่ความเข้มแสง  $1k W/m^2$ ,  $0.5 kW/m^2$  และ  $0.2 kW/m^2$  จะสังเกตเห็นว่าเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้ามีความแตกต่างกัน รวมถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข)



รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์  
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า  
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า

#### 4. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการเพิ่มค่าความนำ หลักการนี้จะทำงานเป็นคาบเวลาโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการปรับที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน จากรูปที่ 1 ระบบที่พิจารณา จะเห็นได้ว่าในระบบจะมีการใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยผ่านอัลกอริทึมการเพิ่มค่าความนำจากนั้นทำการจ่ายสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ให้กับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน โดยอัลกอริทึมจะทำการเปรียบเทียบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดควรอยู่ที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่าไร จากนั้นอัลกอริทึมจะทำการปรับเพิ่ม หรือลดแรงดันไฟฟ้า ให้เข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ให้ได้มากที่สุด



รูปที่ 4 การตามรอยจุดกำลังสูงสุดของอัลกอริทึมวิธีการเพิ่มความนำ

อัลกอริทึมของการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการเพิ่มความนำจะอาศัยหลักการที่ว่า จากรูปที่ 4 ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าความชันของรูปกราฟมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จากการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการกำลังไฟฟ้า (P) ที่มีแรงดันไฟฟ้า (V) คูณกับกระแสไฟฟ้า (I) ดังสมการที่ (4)

$$P = V \cdot I \tag{4}$$

จากนั้นทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งโดยเทียบกับเวลา จะได้ดังสมการที่ (5)

$$dP = V \cdot dI + I \cdot dV \tag{5}$$

นำ dV หารตลอด ในสมการที่ (5) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ดังสมการที่ (6)

$$\frac{dP}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \tag{6}$$

พิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แสดงในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าความชันของกราฟ  $P_{pv}$  ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $dP/dV = 0$ ) จัดรูปสมการที่ (6) ใหม่โดยแทนค่า  $dP/dV = 0$  จะได้ดังสมการที่ (7)

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \tag{7}$$

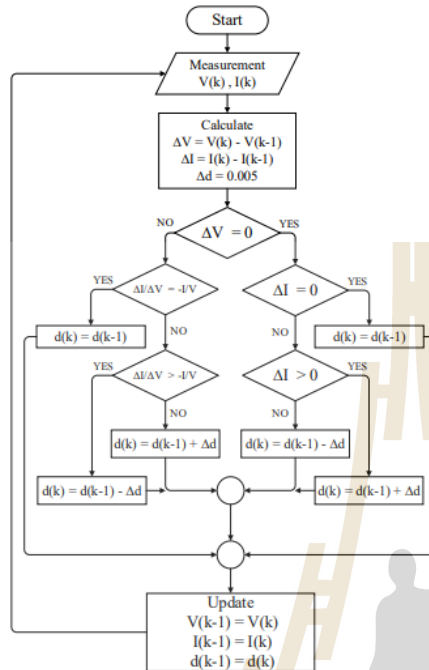
จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไฟฟ้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด อัลกอริทึมจะทำการคงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน เพื่อให้ได้แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ถ้าหากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรูปกราฟ อัลกอริทึมจะทำการปรับลดค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จนได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และหากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรูปกราฟ อัลกอริทึมจะทำการปรับเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อเป็นการลดแรงดันไฟฟ้า จนได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังสมการที่ (8) ,(9) และสมการที่ (10) นอกจากนี้ อัลกอริทึมยังต้องทำการตรวจสอบค่าที่ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอ่านได้ มาตรวจสอบอีกว่าหากขนาดของแรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจะทำการตรวจสอบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง จะทำการคงค่าวัฏจักรหน้าที่ หากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่าศูนย์ จะทำการเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ หากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าศูนย์ จะทำการลดค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกรณีขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทำให้อัลกอริทึมทำงานในรอบต่อไปได้ สามารถเขียนเป็นแผนผังการทำงานของอัลกอริทึมได้ดังรูปที่ 5 โดย step size ( $\Delta d$ ) ที่เลือกใช้ในบทความนี้จะเริ่มทดสอบจากค่าน้อยก่อน

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, \text{ at MPP} \tag{8}$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, \text{ left of MPP} \tag{9}$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, \text{ right of MPP} \tag{10}$$





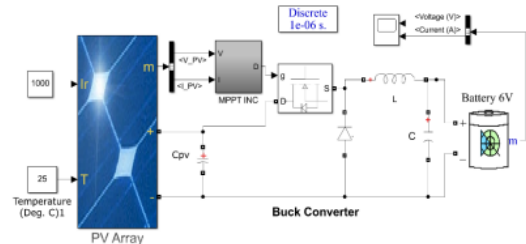
รูปที่ 5 แผนผังหลักการทำงานของอัลกอริทึมวิธีการเพิ่มค่าความนำ

5. การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink

การจำลองสถานการณ์ในบทความนี้จะทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จะแสดงดังตารางที่ 2

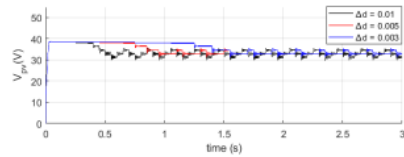
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบ

Parameter	Value	Unit
$L (\Delta I \leq 0.04A)$	15	mH
$C (\Delta V \leq 0.01V)$	2200	$\mu F$
$C_{pv}$	220	$\mu F$
$T_s$	0.1	ms
Battery	6	V

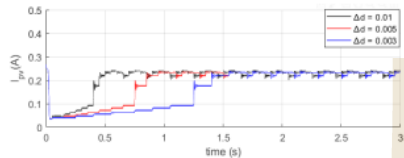


รูปที่ 6 การจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำโปรแกรม MATLAB/Simulink

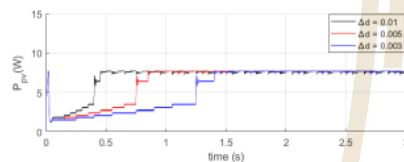
การจำลองสถานการณ์ดำเนินการภายใต้ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน และสังเกตการณ์ตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าในความเข้มแสงนั้นๆ โดยความเข้มแสงที่พิจารณา คือ 200 W/m<sup>2</sup>, 500 W/m<sup>2</sup>, 1000 W/m<sup>2</sup> และกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ 25°C เพื่อให้เห็นว่าอัลกอริทึมการเพิ่มค่าความนำ สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้สอดคล้องกับความเข้มแสงต่างๆ การจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงผลของค่า step size ( $\Delta d$ ) ที่ต่างกันจะทำให้การตอบสนองความเร็วในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและการสั่นไหวของกำลังไฟฟ้าที่ต่างกัน บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หลักการพิจารณาจะทำการทดสอบค่า  $\Delta d$  เป็นแต่ละกรณี เริ่มจากค่า  $\Delta d$  น้อยก่อน พิจารณาจากค่าที่สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เกิดการสั่นไหวของกำลังไฟฟ้าน้อย มีระยะเวลาในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ช้าจนเกินไป ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9 อ้างอิงกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่ละความเข้มแสงอ้างอิงจากกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ตามที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3



(ก)

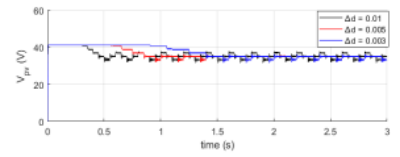


(ข)

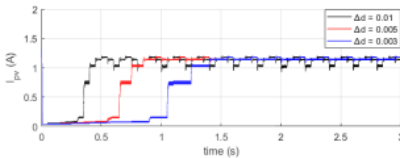


(ค)

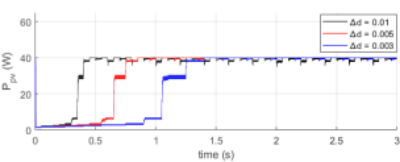
**รูปที่ 7** ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟสูงสุดที่ความเข้มแสง 200 W/m<sup>2</sup> 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า



(ก)

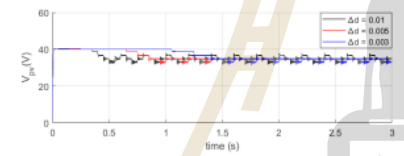


(ข)

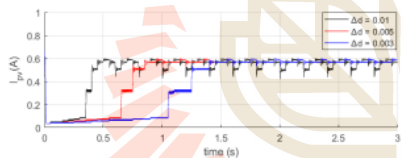


(ค)

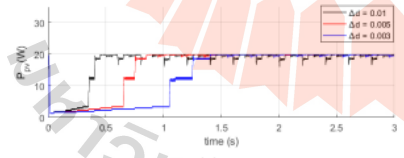
**รูปที่ 9** ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟสูงสุดที่ความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup> 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า



(ก)



(ข)



(ค)

**รูปที่ 8** ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟสูงสุดที่ความเข้มแสง 500 W/m<sup>2</sup> 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

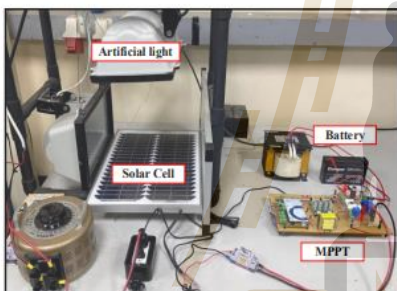
จากผลการจำลองสถานการณ์ที่ความเข้มแสง 200 W/m<sup>2</sup> 500 W/m<sup>2</sup> และ 1000 W/m<sup>2</sup> จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเริ่มต้นการตามรอยจุดกำลังไฟสูงสุดของอัลกอริทึมการเพิ่มค่าความนำแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าที่ลดลงจากที่กีดแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์มาที่แรงดันจุดกำลังไฟสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 7, 8 และ 9 (ก) กระแสไฟฟ้ามักไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังแบตเตอรี่ที่กีดกำลังไฟสูงสุดดังรูปที่ 7, 8 และ 9 (ข) ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟสูงสุดนั่นก็คือ 8 W ที่ความเข้มแสง 200 W/m<sup>2</sup>, 20 W ที่ความเข้มแสง 500 W/m<sup>2</sup> และ 40 W ที่ความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup> ดังรูปที่ 7, 8 และ 9(ค) ผลของการลู่เข้าจุดกำลังไฟสูงสุดของแต่ละความเข้มแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับการปรับค่า  $\Delta d$  หากปรับกว้างจะทำให้ลู่เข้าจุดกำลังไฟสูงสุดได้เร็ว แต่จะเกิดการสั่นของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัว ถ้าหากปรับแคบจะทำให้ลู่เข้าจุดกำลังไฟสูงสุดได้ช้า แต่ที่สถานะอยู่ตัวจะได้กำลังไฟฟ้าที่แกว่งไกวน้อย ในบทความนี้จะเลือกใช้ค่า  $\Delta d$  ที่ 0.005 สำหรับการ

นำไปใช้เป็นค่าตั้งต้นของชุดทดสอบ จะต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่า  $\Delta d$  ที่เหมาะสมใหม่ โดยพิจารณาจากการเพื่อให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

**6. ผลการทดสอบ**

จากระบบที่พิจารณา สามารถออกแบบชุดทดสอบที่ประกอบไปด้วย แสงอาทิตย์เทียม เซลล์แสงอาทิตย์ ชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด และแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 10

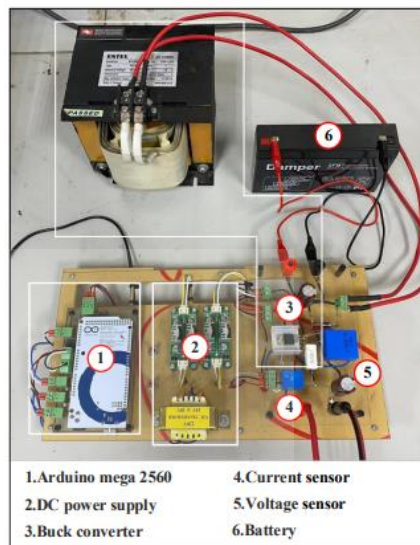
และจากรูปที่ 10 ชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะประกอบไปด้วย Arduino mega 2560 , แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน, วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า รูปที่ 11 แสดงรายละเอียดส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ พารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดทดสอบแสดงในตารางที่ 3 โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น Sun Solar Ecotech 40W



รูปที่ 10 ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ 40W

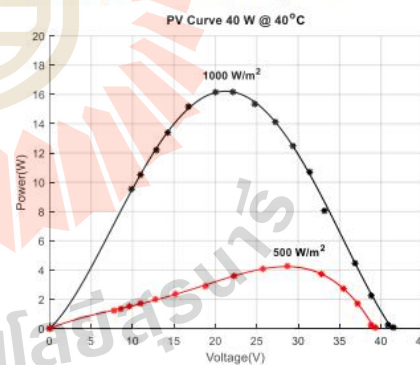
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในชุดทดสอบ

Parameter	Value	Unit
$L (\Delta I \leq 0.04A)$	15	mH
$C (\Delta V \leq 0.01V)$	2200	$\mu F$
$C_{pv}$	220	$\mu F$
$T_s$	1	s
Battery	6	V
Power Solar cell ( $P_{max}$ )	40	W
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ )	43.125	V
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	1.1	A
Voltage at MPP ( $V_{mpp}$ )	38.73	V
Current at MPP ( $I_{mpp}$ )	1.033	A



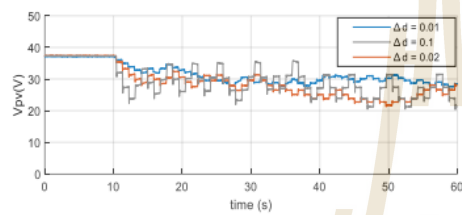
รูปที่ 11 ชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)

จากระบบของชุดทดสอบสามารถหาค่าคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในชุดทดสอบได้ด้วยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0% ถึง 100% เพื่อหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมาได้ ณ อุณหภูมิหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทดสอบ  $40^{\circ}C$  ที่ความเข้มแสง  $500 W/m^2$  ได้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่  $4.3 W$  และที่ความเข้มแสง  $1000 W/m^2$  ได้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่  $16.2 W$  แสดงได้ดังรูปที่ 12

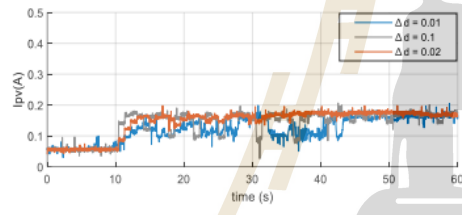


รูปที่ 12 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชุดทดสอบ 40W  $40^{\circ}C$

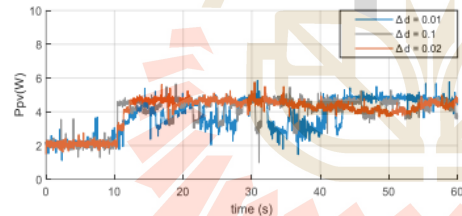
จากระบบของชุดทดสอบ จำเป็นต้องทดสอบค่า  $\Delta d$  ใหม่ เนื่องจากไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แท้จริงได้รวมถึงปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เช่น อุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ผลจากการจำลองสถานการณ์ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่าตั้งต้นและการวิเคราะห์สำหรับการสร้างชุดทดสอบ การทดสอบชุดทดสอบในบทความนี้ได้เพิ่มระยะเวลาการทำงาน ( $T$ ) ของชุดทดสอบ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า



(ก)



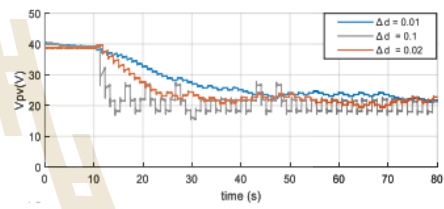
(ข)



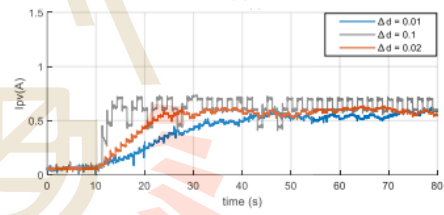
(ค)

รูปที่ 13 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 500 W/m<sup>2</sup> 40°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

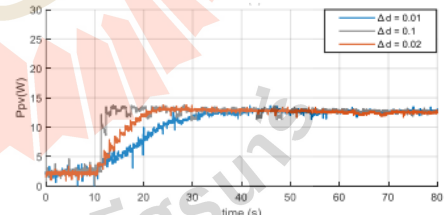
จากผลการทดสอบรูปที่ 13 การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 500 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิที่ 40°C จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเริ่มการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวิถึจักรการทำงานครั้งที่ 10 วินาทีที่ 10 อัลกอริทึมจะทำการลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลงมาให้อยู่ในจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดดังรูปที่ 13 (ก) ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังแบตเตอรี่ดังรูปที่ 13 (ข) ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 4.32 W ดังรูปที่ 13 (ค) เมื่อเปรียบเทียบความไวในการเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวของกำลังไฟฟ้าระหว่างการปรับค่า  $\Delta d$  ต่างกัน ค่า  $\Delta d$  ที่ลู่เข้าไวที่สุดก็คือ  $\Delta d = 0.1$  และช้าที่สุดก็คือ  $\Delta d = 0.01$  ส่วนค่า  $\Delta d = 0.02$  จะลู่เข้าช้ากว่า  $\Delta d = 0.1$  แต่จะมีความคงตัวที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ค่าข้างต้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 14 ผลทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup> 40°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

จากผลการทดสอบรูปที่ 14 การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิที่ 40°C เมื่อมีการเริ่ม การทำงานของอัลกอริทึม ที่วินาทีที่ 10 อัลกอริทึมจะทำการ ลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลงมาให้อยู่ในจุดที่ได้กำลังไฟฟ้า สูงสุดดังรูปที่ 14 (ก) ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากเซลล์ แสงอาทิตย์ไปยังแบตเตอรี่ดังรูปที่ 14 (ข) ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด อยู่ที่ 14.2 W ดังรูปที่ 14 (ค) เมื่อเปรียบเทียบผลการ ทดสอบของระหว่างการปรับค่า  $\Delta d$  ต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta d = 0.1$  จะมีการตอบสนองลู่เข้าสู่ภาวะอยู่ตัวไวที่สุดแต่ จะมีการสั่นของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาจะเป็นค่า  $\Delta d = 0.02$  และ  $\Delta d = 0.01$  จะมีการสั่นของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดแต่ให้ผลตอบสนองที่ช้าที่สุด

จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของการตามรอยกำลังไฟฟ้า สูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่ ที่ความเข้มแสงทั้ง 2 ค่า มีค่า  $\Delta d$  ที่เหมาะสมที่จะเลือกใช้ สำหรับชุดทดสอบในบทความนี้นั้นก็คือ  $\Delta d = 0.02$  ซึ่งให้ผล การตอบสนองที่ดีในสภาวะอยู่ตัว และมีความไวที่เหมาะสมกับ การเลือกไปใช้งานกับชุดทดสอบ

#### สรุป

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบ เปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่ที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถ ถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ไป ยังแบตเตอรี่ได้ การติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถติด ตามที่ความเข้มของแสงอาทิตย์ต่างกัน ส่วนความเร็วในการ ติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและการสั่นไหวของกำลังไฟฟ้าที่ได้ จะขึ้นอยู่กับการใช้ค่า  $\Delta d$  ให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบจากชุด ทดสอบมีความสอดคล้องและสามารถยืนยันประสิทธิภาพของ การควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถนำไปปรับใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ มากกว่านี้ได้ แต่มีข้อจำกัดในการเลือกค่า  $\Delta d$  ให้เหมาะสมกับ ระบบ หากปรับค่า  $\Delta d$  น้อยเกินไปจะทำให้ระบบติดตามจุด กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้า หากปรับค่า  $\Delta d$  มากเกินไปจะทำให้เกิด กำลังไฟฟ้ามืดการสั่นไหวสูงและอาจส่งผลให้ชุดทดสอบเกิด ความเสียหายได้ ดังนั้นในอนาคตจะเป็นการพัฒนาให้ค่าของ  $\Delta d$  สามารถปรับตัวเพื่อที่จะเป็นการปรับปรุงสมรรถภาพของ การควบคุมให้ดียิ่งขึ้น

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี(SUT) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม (TSRI) และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการ ทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Alrikabi N. K. M. A. Renewable Energy Types. *Journal of Clean Energy Technologies*. 2014. Vol.2. no. 1. pp. 61-64.
- [2] Shiau J.K., Wei Y.C. and Chen B.C. A Study on the Fuzzy-Logic-Based Solar Power MPPT Algorithms Using Different Fuzzy Input Variables. Tamkang University. 2015. 8(2): 100-127.
- [3] Podder A. K., Roy N. K. and Pota H. R. MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature. *IET Renewable Power Generation*. 2019. vol. 13. no. 10. pp. 1615-1632.
- [4] Esram T. and Chapman P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007. vol. 22. no. 2. pp. 439-449.



- [5] Strunz K, Abbasi E., and Huu D. N. DC Microgrid for Wind and Solar Power Integration. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2014. vol. 2. no. 1. pp. 115-126.
- [6] Ngan M. S. and Tan C. W. A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems. *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*. 2011. pp. 22-27.
- [7] Ahmad J. A Fractional Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays. *IEEE 2<sup>nd</sup> International Conf. on Software Tech. and Eng.* Oct 2010. vol.1. pp.247-250.
- [8] Alli S. S., Jovanović S., Poure P. and Jamshidpour E. MPPT and output voltage control of Photovoltaic systems using a Single-Switch DC-DC converter. *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2016. pp. 1-6.
- [9] Diaz N., Luna A. and Duarte O. Improved MPPT short-circuit current method by a fuzzy short-circuit current estimator. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Phoenix. AZ. Sept 2011, pp.211-218.
- [10] Thueanpangthaim C., Wongyai P., Areerak K. and Areerak K. The maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based approach. *2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*. 2017. pp. 1-4.
- [11] Boukenoui R., Bradai R., Mellit A., Ghanes M. and Salhi H. Comparative analysis of P&O, modified hill climbing-FLC, and adaptive P&O-FLC MPPTs for microgrid standalone PV system. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2015. pp. 1095-1099.
- [12] Halder T. A maximum power point tracker (MPPT) using the incremental conductance (INC) technique. *7<sup>th</sup> India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. 17-19 November 2016.
- [13] Abdourraziq M. A., Maaroufi M., Ouassaid M. A new variable step size INC MPPT method for PV systems. *International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. 14-16 April 2014.
- [14] Jain K., Gupta M. and Bohre A. K. Implementation and Comparative Analysis of P&O and INC MPPT Method for PV System. *8<sup>th</sup> IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. 13-15 Dec 2018. pp 1-6.
- [15] Sera D., Mathe L., Kerekes T., Spataru S. V. and Teodorescu R. On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2013. vol. 3. no. 3. pp. 1070-1078.

## ประวัติผู้เขียน

นายวีรภัทร คำพันธ์ เกิดวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2540 ที่จังหวัดอุบลราชธานี เริ่มศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 4 ณ โรงเรียนบ้านจุกการ และระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 - 6 ณ โรงเรียนบ้านก่อ ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ณ โรงเรียนดงใหญ่วิทยาคม รัชมังคลาภิเษก สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถานศึกษาในระดับอุดมศึกษาเดิม

สำหรับการศึกษาระดับปริญญาโท ได้รับทุนการศึกษา “ทุนกิตติบัณฑิต” ซึ่งเป็นทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 4 รายวิชาดังนี้ (1) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการขับเคลื่อน (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมควบคุม ในระหว่างการศึกษได้ทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้รับองค์ความรู้ทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติ ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และปัญญาประดิษฐ์ นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 3 บทความซึ่งได้ปรากฏอยู่ในภาคผนวก ง