

การปรับปรุงระบบเอ็มพีพีทีแบบไม่วนซ์สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์  
เชื่อมต่อกริดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม



นายธนาริพ บุญทวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2565

NON-ITERATIVE MPPT IMPROVEMENT FOR GRID-CONNECTED PV  
SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

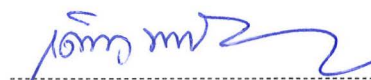


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2022

การปรับปรุงระบบเอ็มพีพีทีแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริด  
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ก้องพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



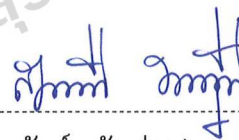
(ผศ. ดร.โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.กิติ อรรถกัจจมงคล)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธนาธิป บุญทวี : การปรับปรุงระบบเอ็มพีพีทีแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์  
เชื่อมต่อ กริดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (NON-ITERATIVE MPPT IMPROVEMENT  
FOR GRID-CONNECTED PV SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK) อาจารย์ที่  
ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 211 หน้า.

คำสำคัญ : วิธีการรบกวนและการสังเกต/วิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร/

วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ/วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วน  
ซ้ำ/ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส/โครงข่ายประสาทเทียม

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นำเสนอระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตาม  
รอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำที่นำโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุง  
ประสิทธิภาพ หลักการการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำจะอาศัยการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้า  
ขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) และกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) คูณกับค่าฟิลแฟคเตอร์ (fill factor:  $FF$ )  
สำหรับคำนวณกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{mpp}$ ) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเมื่อนำไปใช้กับระบบ  
เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบขั้นเดียว พบว่าไม่สามารถควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด  
ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเพิ่มวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า  
เข้าไปในระบบกลายเป็นโครงสร้างระบบแบบสองขั้น โดยใช้หลักการวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด  
แบบไม่วนซ้ำด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์  
แสงอาทิตย์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริด  
ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะอาศัยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงควบคู่กับการควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยตัว  
ควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำด้วยวิธีเทียบสัดส่วน  
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด  
ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงนำโครงข่ายประสาทเทียมเข้า  
เข้ามาช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยการจำลอง  
สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปด้วย  
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 เพื่อยืนยันว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ  
ที่มีการปรับปรุงด้วยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และ  
การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์  
แสงอาทิตย์และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเทียบสัดส่วน  
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา ธนาธิป บุญทวี

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ก้องพันธ์ อารีรักษ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ก้องพันธ์ อารีรักษ์



TANATIP BOONTAWEE : NON-ITERATIVE MPPT IMPROVEMENT FOR GRID-  
CONNECTED PV SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 211 PP.

Keyword : Perturb and Observe Method/Fractional Open Circuit Voltage Method/  
Iterative MPPT/Non-Iterative MPPT/Single-phase Grid-Connected PV System/  
Neural Network

The thesis presents a non-iterative MPPT improvement for grid-connected PV system using neural network to improve efficiency. The non-iterative MPPT technique relies on multiplying the fill factor ( $FF$ ) with the open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) and short circuit current ( $I_{sc}$ ) measurements to calculate the maximum power ( $P_{mpp}$ ). However, when applied to a single-phase grid-connected system, it was found that the maximum power point of the solar cell cannot be achieved. Therefore, this thesis introduces a two-stage power converter structure by using non-iterative maximum power point tracking technique based on the fractional open circuit voltage method. The control of PV voltage to operate at the maximum power point is controlled by PI controller. For power transfer to the grid, the DC bus voltage control is operated with the current control using a hysteresis controller. The fractional open circuit voltage, which represents the non-iterative MPPT technique, has some limitations in accurately tracking the maximum power point of PV systems under changing environmental conditions. Therefore, an ANN is incorporated to enhance the performance of the proposed method. The thesis utilizes MATLAB/Simulink software to simulate the scenarios and hardware testing using the TMS320F28335 microcontroller board to validate the effectiveness of the proposed MPPT technique with neural networks. The simulation and hardware testing results demonstrate that the proposed method can effectively track the maximum power point of the solar cell and transfer power to the grid more efficiently compared to the fractional open circuit voltage method as well as the iterative MPPT approach.

School of Electrical Engineering  
Academic Year 2022

Student's Signature สุวิทย์ วรรณ  
Advisor's Signature Prof.  
Co-Advisor's Signature Korn

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทาง อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมไปถึงเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตประจำวันหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและเลขานุการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้ความกรุณาสำหรับคำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิดในด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งเสมอมา

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ในระดับบัณฑิตศึกษาในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุม ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในด้านวิชาการ ด้านการใช้ชีวิตประจำวัน และเป็นกำลังใจให้โดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษามาอย่างดียิ่งเสมอมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อย ๆ มา

ธนาธิป บุญทวี

# 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. ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3. ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4. ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6. การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2. ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1. บทนำ.....	6
2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบ เซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด.....	6
2.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบ เซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า.....	11
2.4. สรุป.....	16
<b>3. ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส     ที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำ.....</b>	<b>17</b>
3.1. บทนำ.....	17
3.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
3.2.1. ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
3.2.2. ผลกระทบการต่ออนุกรมและขนานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสสลับแบบขั้นเดียวและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	23
3.3.1 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	29
3.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	35
3.4 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O.....	38
3.5 การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า.....	43
3.6 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	45
3.7 การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบ เซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดด้วยวิธี P&O.....	48
3.8 หลักการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิสสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับชนิดหนึ่งเฟส.....	52
3.9 การจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิส.....	54
3.10 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง.....	56
3.11 การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า แบบฮีสเทอรีซิส.....	58
3.12 การจำลองสถานการณ์ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วย วิธี P&O สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	59
3.13 สรุป.....	67
<b>4 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ.....</b>	<b>68</b>
4.1 บทนำ.....	68
4.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	68
4.2.1 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ.....	69
4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แบบไม่วนซ้ำ.....	71
4.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	71
4.3.2 แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์.....	75

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 โครงสร้างภาคกำลังแยบสองชั้นที่มีการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้า สูงสุดแบบไม่ว่าน้ำ.....	81
4.5 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV .....	81
4.6 การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV.....	83
4.7 สรุป.....	90
<b>5 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการควบคุมการตามรอย จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่ว่าน้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อม ต่อกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....</b>	<b>91</b>
5.1 บทนำ.....	91
5.2 องค์ความรู้พื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม.....	91
5.2.1 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม.....	92
5.2.2 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	99
5.3 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้า สูงสุดแบบไม่ว่าน้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้า หนึ่งเฟส.....	100
5.4 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN.....	101
5.5 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม.....	103
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN.....	111
5.7 สรุป.....	117
<b>6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธีแบบวนซ้ำและวิธีแบบไม่ว่าน้ำ.....</b>	<b>119</b>
6.1 บทนำ.....	119
6.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์.....	119
6.2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV.....	120
6.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV – ANN.....	125



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV - ANN.....	130
6.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ด้วยการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	137
6.3.1 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV.....	137
6.3.2 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV – ANN.....	142
6.3.3 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV - ANN.....	147
6.4 สรุป.....	152
<b>7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>153</b>
7.1 สรุป.....	153
7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	155
รายการอ้างอิง.....	156
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับ ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด บนโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	160
ภาคผนวก ข. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 และการเชื่อมต่อกับ โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับการทดสอบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	170
ภาคผนวก ค. การเขียนโค้ดโปรแกรมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 สำหรับการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	173
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	185
ประวัติผู้เขียน.....	211

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด..... 7
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า..... 11
3.1	พารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว..... 35
3.2	พารามิเตอร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง..... 44
3.3	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด..... 49
3.4	พารามิเตอร์ระบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส..... 55
3.5	พารามิเตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น..... 60
4.1	พารามิเตอร์ระบบไฟฟ้ากรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง..... 73
4.2	พารามิเตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียว..... 77
5.1	องค์ประกอบโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับองค์ประกอบระบบประสาทสมอง..... 94
5.2	ข้อมูลอินพุตและเป้าหมายที่ใช้สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม..... 104
5.3	ผลทดสอบจำนวนชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสม..... 106
5.4	ผลทดสอบจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมของชั้นซ่อนเร้นที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียม..... 107
5.5	ค่าน้ำหนักประสาทของโครงข่ายประสาทเทียมในชั้นซ่อนเร้นที่ 1..... 108
5.6	ค่าน้ำหนักประสาทในชั้นเอาต์พุต..... 109
5.7	ค่าไบอัสของโครงข่ายประสาทเทียม..... 110
6.1	พารามิเตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น..... 119

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
3.2	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	21
3.3	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง.....	22
3.4	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว.....	24
3.5	การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์.....	24
3.6	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว.....	26
3.7	การสร้างสัญญาณการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส.....	27
3.8	ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส.....	30
3.9	แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ในกรณี $M = 0.8$ เมื่อความเข้มแสง เปลี่ยนแปลงจาก $500 \text{ W/m}^2$ เป็น $1,000 \text{ W/m}^2$ .....	36
3.10	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) ในกรณี $M = 0.8$ เมื่อความเข้มแสง เปลี่ยนแปลงจาก $500 \text{ W/m}^2$ เป็น $1,000 \text{ W/m}^2$ .....	37
3.11	แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ในกรณี $M = 0.9$ เมื่อความเข้มแสง เปลี่ยนแปลงจาก $500 \text{ W/m}^2$ เป็น $1,000 \text{ W/m}^2$ .....	37
3.12	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) ในกรณี $M = 0.9$ เมื่อความเข้มแสง เปลี่ยนแปลงจาก $500 \text{ W/m}^2$ เป็น $1,000 \text{ W/m}^2$ .....	38
3.13	กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	40
3.14	แผนภาพการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O .....	42
3.15	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า.....	43
3.16	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	45
3.17	โครงสร้างควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	46
3.18	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด.....	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ .....	50
3.20 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	50
3.21 ผลตอบสนองเอาต์พุตวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า.....	51
3.22 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่เชื่อมต่อกับ ระบบไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟส.....	53
3.23 เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิส.....	53
3.24 โครงสร้างการควบคุมกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิส.....	54
3.25 ผลการจำลองสถานการณ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิส.....	55
3.26 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอย จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	56
3.27 โครงสร้างลู่วัดควบคุมแรงดันไฟฟ้าของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง.....	56
3.28 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขั้นที่ มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธี P&O .....	59
3.29 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์...61	61
3.30 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง.....	62
3.31 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	63
3.32 รูปขยายของรูปที่ 3.31 กรณีเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 300 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> .....	63
3.33 รูปขยายของรูปที่ 3.31 กรณีเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1,000 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> .....	64
3.34 ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	65
3.35 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	66
3.36 รูปขยายกราฟสเปกตรัมของรูปที่ 3.35.....	66
4.1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยมีการระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ.....	69
4.2 วงจรไฟฟ้าภาคกำลังกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	72
4.3 วงจรไฟฟ้าภาคควบคุมกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.4	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	73
4.5	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	74
4.6	ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	74
4.7	วงจรไฟฟ้าภาคกำลังกรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์.....	75
4.8	วงจรไฟฟ้าภาคควบคุมกรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์.....	76
4.9	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	77
4.10	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	78
4.11	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	78
4.12	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์.....	79
4.13	ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์.....	80
4.14	การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่ว่าน้ำวิธี FOCV สำหรับ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น.....	81
4.15	แผนภาพการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV.....	82
4.16	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	84
4.17	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	84
4.18	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง.....	85
4.19	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	86
4.20	รูปขยายของรูปที่ 4.19 กรณีเปลี่ยนความเข้มแสงจาก $300 \text{ W/m}^2$ เป็น $1,000 \text{ W/m}^2$ .....	86
4.21	รูปขยายของรูปที่ 4.19 กรณีเปลี่ยนความเข้มแสงจาก $1,000 \text{ W/m}^2$ เป็น $200 \text{ W/m}^2$ .....	87
4.22	ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	87
4.23	กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	89



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.24	รูปขยายกราฟสเปกตรัมของรูปที่ 4.23.....	89
5.1	โครงสร้างเซลล์ประสาทสมองของมนุษย์.....	92
5.2	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	93
5.3	ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต.....	95
5.4	ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิตแบบสมมาตร.....	95
5.5	ฟังก์ชันเส้นตรง.....	96
5.6	ฟังก์ชันเส้นตรงบวก.....	96
5.7	ฟังก์ชันซิกมอยแบบลอการิทึม.....	97
5.8	ฟังก์ชันซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเปอร์โบลาร์.....	97
5.9	ฟังก์ชันแข่งขัน.....	98
5.10	ฟังก์ชันฐานรัศมี.....	98
5.11	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	99
5.12	การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น.....	101
5.13	แผนภาพการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN.....	102
5.14	กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	112
5.15	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	112
5.16	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง.....	113
5.17	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	114
5.18	รูปขยายของรูปที่ 5.17 กรณีเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 300 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> .....	114
5.19	รูปขยายของรูปที่ 5.17 กรณีการเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 1,000 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> .....	115
5.20	ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	115
5.21	กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	116
5.22	รูปขยายกราฟสเปกตรัมของรูปที่ 5.21.....	117
6.1	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	121

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2	รูปขยายของรูปที่ 6.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C ..... 121
6.3	รูปขยายของรูปที่ 6.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C ..... 122
6.4	รูปขยายของรูปที่ 6.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C ..... 122
6.5	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ณ อุณหภูมิ 40 °C ..... 123
6.6	รูปขยายของรูปที่ 6.5 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C ..... 124
6.7	รูปขยายของรูปที่ 6.5 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C ..... 124
6.8	รูปขยายของรูปที่ 6.5 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C ..... 125
6.9	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ 25 °C ..... 126
6.10	รูปขยายของรูปที่ 6.9 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C ..... 126
6.11	รูปขยายของรูปที่ 6.9 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C ..... 127
6.12	รูปขยายของรูปที่ 6.9 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C ..... 127
6.13	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่าง วิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ 40 °C ..... 128
6.14	รูปขยายของรูปที่ 6.13 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C ..... 129
6.15	รูปขยายของรูปที่ 6.13 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C ..... 129

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 รูปขยายของรูปที่ 6.13 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C.....	130
6.17 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	131
6.18 รูปขยายของรูปที่ 6.17 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	131
6.19 รูปขยายของรูปที่ 6.17 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	132
6.20 รูปขยายของรูปที่ 6.17 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	132
6.21 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิ 40 °C.....	133
6.22 รูปขยายของรูปที่ 6.21 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C.....	134
6.23 รูปขยายของรูปที่ 6.21 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C.....	134
6.24 รูปขยายของรูปที่ 6.21 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C.....	135
6.25 ความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง.....	135
6.26 ผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง.....	136
6.27 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	137
6.28 รูปขยายของรูปที่ 6.27 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	138
6.29 รูปขยายของรูปที่ 6.27 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	138
6.30 รูปขยายของรูปที่ 6.27 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C.....	139

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.31	ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่าง วิธี P&O กับวิธี FOCV ณ อุณหภูมิ 40 °C .....140
6.32	รูปขยายของรูปที่ 6.31 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....140
6.33	รูปขยายของรูปที่ 6.31 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....141
6.34	รูปขยายของรูปที่ 6.31 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....141
6.35	ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่าง วิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ 25 °C .....142
6.36	รูปขยายของรูปที่ 6.35 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C .....143
6.37	รูปขยายของรูปที่ 6.35 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C .....143
6.38	รูปขยายของรูปที่ 6.35 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C .....144
6.39	ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่าง วิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ 40 °C .....145
6.40	รูปขยายของรูปที่ 6.39 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....145
6.41	รูปขยายของรูปที่ 6.39 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....146
6.42	รูปขยายของรูปที่ 6.39 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....146
6.43	ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิ 25 °C .....147
6.44	รูปขยายของรูปที่ 6.43 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C .....148

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.45 รูปขยายของรูปที่ 6.43 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C .....	148
6.46 รูปขยายของรูปที่ 6.43 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C .....	149
6.47 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิ 40 °C .....	150
6.48 รูปขยายของรูปที่ 6.47 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m <sup>2</sup> เป็น 700 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....	150
6.49 รูปขยายของรูปที่ 6.47 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 700 W/m <sup>2</sup> เป็น 200 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....	151
6.50 รูปขยายของรูปที่ 6.47 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 200 W/m <sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C .....	151
ก.1 ชุดบล็อกภาคกำลังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี P&O บนโปรแกรม MALAB/Simulink .....	161
ก.2 ชุดบล็อกภาคควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี P&O บนโปรแกรม MALAB/Simulink .....	162
ก.3 ชุดบล็อกภาคกำลังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV บนโปรแกรม MALAB/Simulink .....	165
ก.4 ชุดบล็อกภาคควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV บนโปรแกรม MALAB/Simulink .....	166
ก.5 ชุดบล็อกภาคกำลังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV – ANN บนโปรแกรม MALAB/Simulink .....	167
ก.6 ชุดบล็อกภาคกำลังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธี FOCV – ANN บนโปรแกรม MALAB/Simulink .....	168
ข.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits .....	171
ข.2 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับโปรแกรม MATLAB/Simulink .....	172



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าปัจจุบันมีความแพร่หลายมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในภาครัฐและภาคเอกชน เนื่องมาจากอัตราประชากรของมนุษย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้อัตราความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น การผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศที่กำลังพัฒนา มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอัตราส่วนของพลังงานสิ้นเปลืองหรือพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (nonrenewable energy) เป็นส่วนใหญ่ เช่น น้ำมันเตา ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เมื่อนำพลังงานเหล่านี้มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าทำให้มีปริมาณลดน้อยลงหรือหมดไปในอนาคต จึงเกิดแนวคิดหาแหล่งพลังงานสำรองสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าคือ พลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล แหล่งพลังงานเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกสำหรับการใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอนาคต ซึ่งพลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติสามารถใช้งานได้โดยไม่จำกัดและยังเป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นในแถบประเทศที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรของโลกเนื่องจากแสงอาทิตย์สามารถตกกระทบกับพื้นโลกได้ดี การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อาศัยอุปกรณ์แปลงผันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าคือ เซลล์แสงอาทิตย์ (sola cell or photovoltaic cell: PV) การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีต้นทุนการผลิตและการติดตั้งที่สูงและประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและโหลดที่ใช้งาน ส่งผลให้ไม่สามารถดึงประสิทธิภาพการผลิตพลังงานได้สูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (maximum power point: MPP) การดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking: MPPT) โดยระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกพัฒนาขึ้นด้วยหลักการที่หลากหลายวิธีการสำหรับดึงจุดจ่ายพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแบ่งวิธีการได้สองหลักการ หลักการแบบวนซ้ำ (iterative method) เช่น วิธีการรบกวนและการสังเกต (perturb and observe method: P&O method) (A. Raiker Guatam, Umanand L. and Reddy B Subba, 2018) วิธีการเพิ่มค่าความนำ (incremental conductance method: IncCond method) (Yacine Triki, Ali Bechouche, Hamid Seddiki

and Djaffar Ould Abdeslam, 2021) และหลักการแบบไม่วนซ้ำ (non-iterative method) เช่น วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (fractional open circuit voltage method: FOCV method) (Nadeem Ahsan, Sher Hadeed Ahmed, Murtaza Ali Faisal and Ahmed Nisar, 2020) วิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (fractional short circuit current method: FSCC method) (Muhammad Hanan, Xin Ai, Muhammad Yaqoob Javed, Muhammad Majid Gulzar and Saqib Ahmad, 2018) เป็นต้น

งานวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (single phase grid connected PV system) โดยเริ่มต้นจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าสามเฟสขั้นเดียวที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีแบบไม่วนซ้ำ (A. Vijayakumari, 2020) โดยวิธีการดังกล่าวอาศัยหลักการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) และกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) สำหรับคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mpp}$ ) ผ่านค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (fill factor:  $FF$ ) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณหากระแสไฟฟ้าอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) ให้กับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis current controller: HCC) เพื่อให้ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าฮิสเทอรีซิสดึงกระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ปัญหาของวิธีการดังกล่าวไม่สามารถดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จริง จึงได้นำเสนอปัญหาวิธีการดังกล่าวไว้ในส่วนบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์ จากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ดำเนินการแก้ไขโดยการใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขั้นโดยมีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการแบบไม่วนซ้ำด้วยวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือ ความผิดพลาดในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัว เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้นำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะอยู่ให้ดียิ่งขึ้น และให้ผลการตอบสนองกำลังไฟฟ้าที่รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธีการรบกวนและการสังเกต การตรวจสอบความถูกต้องและการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูบโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า (power system blocks) พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ และการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำที่พัฒนาขึ้นสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

1.2.2 เพื่อแก้ไขปัญหาและพัฒนาประสิทธิภาพตัวควบคุมสำหรับระบบการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า

1.2.4 เพื่อศึกษาและดำเนินการทดสอบการยืนยันผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 5kW

1.3.2 กริดระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาด 230 V<sub>rms</sub> 50 Hz

1.3.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า

1.3.4 การทดสอบฮาร์ดแวร์ในลูปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 สำหรับยืนยันผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำและแบบไม่วนซ้ำ

1.3.5 การออกแบบตัวควบคุมพีไออาศัยวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ระบบที่พิจารณาเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

1.4.2 การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาปรับปรุงสมรรถนะของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ

1.4.3 การยืนยันผลการศึกษาและการตรวจสอบความถูกต้องของการปรับปรุงสมรรถนะระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการตั้งจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.5.2 ได้วิธีการแก้ไขปัญหาและพัฒนาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

1.5.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการแก้ไขปัญหาการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ

1.5.4 ได้ความรู้การเขียนโปรแกรมและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.5.5 ได้ความรู้การเขียนโปรแกรมและการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 สำหรับการทดสอบฮาร์ดแวร์ในรูป

1.5.6 ได้เผยแพร่บทความการประชุมวิชาการหรือวารสารในระดับชาติ/นานาชาติ

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 7 บท แต่ละบทมีรายละเอียดการนำเสนอต่อไปนี้

บทที่ 1 นำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้นขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดและระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า รวมถึงหลักการองค์ความรู้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้สำรวจในปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำ โดยเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับขึ้นเดียว หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการรบกวนและการสังเกต การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต หลักการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเทอรีซิสสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส การจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเทอรีซิส การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเทอรีซิส และสุดท้ายการจำลองสถานการณ์ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น

บทที่ 4 นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขึ้นเดียว โดยเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขึ้นเดียวที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ การตรวจสอบความถูกต้องของระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ นอกจากนี้ยังอธิบายปัญหาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขึ้นเดียวที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำจากงานวิจัยในอดีตที่ไม่สามารถถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ แนวทางการแก้ไขปัญหของระบบการตามรอยจุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ อธิบายหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น

บทที่ 5 นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส เนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานและการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับแก้ไขปัญหา การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับแก้ไขปัญหาระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร การจำลองสถานการณ์การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมปรับปรุงสมรรถนะของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ

บทที่ 6 นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีต่าง ๆ ที่ถูกนำเสนอในบทก่อนหน้าด้วยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

บทที่ 7 ข้อเสนอของวิทยานิพนธ์นี้รวมถึงข้อเสนอในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต





## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงจำเป็นต้องอาศัยหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานภายใต้สมรรถนะที่ดีที่สุด ซึ่งบทนี้จะอธิบายถึงงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผลการศึกษาและการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยแบ่งการสำรวจงานวิจัยเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 คืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (stand alone PV system) ส่วนที่ 2 คืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า (grid connected PV system) การสืบค้นและการสำรวจได้นำเสนอในรูปแบบการเรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์ผลงานวิจัย

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด

งานวิจัยเกี่ยวกับระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งระบบส่วนใหญ่ที่นิยมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าคือระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด ผู้ทำวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้เริ่มศึกษางานวิจัยการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์จากระบบแยกโดด เพื่อเป็นแนวทางในแก้ไขปัญหาและพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยสามารถสรุปและอธิบายเนื้อหาสาระสำคัญของงานวิจัยที่ศึกษา แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์	บทความนี้นำเสนอวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ซึ่งวิธีการดังกล่าวอาศัยการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และตรวจจับแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่สำหรับคำนวณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้กับระบบควบคุม โดยวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
2015	ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์	บทความนี้นำเสนอวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต หลักการทำงานด้วยการรบกวนแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการรบกวนและการสังเกตมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	Muamer M. Shebani, Tariq Iqbal และ John E. Quaicoe	บทความนี้นำเสนอวิธีเชิงตัวเลขแบบแบ่งส่วนบนพื้นฐานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีดังกล่าวถูกนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำและประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับวิธีเทียบส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและวิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร พบว่าวิธีเชิงตัวเลขแบบแบ่งส่วนมีความแม่นยำกว่าในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะความเข้มแสงที่แตกต่างกัน
2018	Jyothy Lakshmi P.N และ M R Sindhu	บทความนี้เสนอวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนพื้นฐานปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด โดยวิธีดังกล่าวถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบดั้งเดิมทั้ง 3 วิธีได้แก่ วิธีการรบกวนและการสังเกต วิธีการเพิ่มค่าความนำ และวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร พบว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนพื้นฐานปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า เช่น ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเล็กน้อย และให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงและอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	ชวริย์ เกื่อนพังเทียม, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์	บทความนี้นำเสนอวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดด้วยวิธีการอิงกระแสไฟฟ้า โดยวิธีดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการรบกวนและการสังเกต พบว่าวิธีการอิงกระแสไฟฟ้าให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็ว ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวและสามารถถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้องเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง
2019	A. Mohapatra, B. Nayak และ C. Saiprakash	บทความนี้นำเสนอวิธีการรบกวนและการสังเกตเชิงปรับตัวสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิม จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบพบว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตเชิงปรับตัวให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและการสิ้นของผลการตอบสนองที่น้อยกว่า

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	Mayada Yousif Heelan และ Fadhil Abbas M. Al-Qrimli	บทความนี้นำเสนอการออกแบบและการจำลองสถานการณ์ของตัวควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนพื้นฐานนิโวล-พัชซี โดยวิธีดังกล่าวถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมและวิธีตัวควบคุมพัชซีลอจิก ผลการจำลองสถานการณ์พบว่าวิธีการนิโวล-พัชซีมีประสิทธิภาพในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในด้าน ผลตอบสนองที่รวดเร็ว เสถียรภาพที่ดี การสั่นที่เล็กน้อยรอบ ๆ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและการพุ่งเกินที่เล็กน้อยภายใต้เงื่อนไขความเข้มแสงและสภาพอุณหภูมิแวดล้อมเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ
2021	Fatema A. Mohammed, Mohiy E. Bahgat, Saied S. Elmasry และ Soliman M. Sharaf	บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพัชซีลอจิกบนพื้นฐานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการนำอัลกอริธึมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการเพิ่มค่าความนำมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมพัชซีลอจิก ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จากวิธีดังกล่าวเกิดการพุ่งเกินและความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเล็กน้อย

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับใช้งานในด้านอุตสาหกรรมหรือบ้านเรือน จึงเป็นสิ่งสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากประชากรมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าจึงถูกพัฒนาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการ ในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผู้ทำวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าเพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยสามารถสรุปและอธิบายเนื้อหาสาระสำคัญของงานวิจัยที่ศึกษา แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2013	C. Boonmee และ Y. Kumsuwan	บทความนี้นำเสนอเทคนิคแก้ไขการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนพื้นฐานการควบคุมความสัมพันธ์ ระลอกสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟสในระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า โดยวิธีการดังกล่าวถูกพัฒนาจากการใช้ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยแทนตัวกรองผ่านสูงอันดับ 1 และตัวกรองผ่านต่ำ โดยวิธีการดังกล่าวมีความแม่นยำสูงในการแก้ไขจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและยังให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าการใช้งานตัวกรองผ่านสูงอันดับ 1 และตัวกรองผ่านต่ำเมื่อเปรียบเทียบในเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอย่างกะทันหัน



ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์  
เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Wirote Sangtungong, Thaworn Hinsui และ Thipwan Fangsuwannarak	บทความนี้นำเสนอวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนโหมดการเลื่อนมาพร้อมกับอัลกอริทึมการรบกวนและการสังเกตสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวิธีการดังกล่าวอาศัยเส้นตรงเลื่อนและการปรับตำแหน่งจนกว่าเส้นโค้งของคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์กับเส้นตรงเลื่อนนี้ ตัดกันที่ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยอัลกอริทึมการรบกวนและการสังเกตถูกนำมาใช้เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรงเลื่อนเพื่อเคลื่อนย้ายเส้นตรงเลื่อนให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าอาศัยการควบคุมสองลูปด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับชนิดหนึ่งเฟส
2014	Winid Sripipat และ Sakorn Po-Ngam	บทความนี้นำเสนอตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีตัวแปลงกำลังไฟฟ้าสองชั้นเชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอาศัยวิธีการรบกวนและการสังเกต การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับอาศัยหลักการสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนเฟรมหยุดนิ่งจากค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าชนิดด้วยควบพีไอ

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	R. B. Gonzatti, B. P. B. Pereira, L. E. Borges da Silva และ G. Lambert-Torres	บทความนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับตัวแปลงกำลังไฟฟ้าบูรณาการรวมกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบเอชบริดจ์ดั้งเดิมหนึ่งเฟสขึ้นเดียว ซึ่งมีหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือการดัดแปลงวิธีการรบกวนและการสังเกตด้วยระดับการรบกวนเชิงปรับตัว อัลกอริทึมดังกล่าวอาศัยหลักการควบคุมแบบต่อเรียงกัน โดยการควบคุมเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับขึ้นอยู่กับตัวควบคุมพีอา
2018	S. Z. Mohammad, A. M. Omar, M. A. M. Radzi และ Faranadia A.H	บทความนี้ นำเสนอการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสตรึงขึ้นเดียวด้วยเทคนิคการผสมผสานข้อดีของเทคนิคการรบกวนและการสังเกตกับเทคนิคควบคุมพีชชีลอจิก ซึ่งวิธีการดังกล่าวถูกเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบดั้งเดิมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการทดสอบจากชุดทดสอบภายใต้การประเมินสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์  
เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	A. Vijayakumari	บทความนี้ นำเสนอเทคนิคการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคดังกล่าวอาศัยหลักการตรวจจับวัตต์แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดดวงจรและกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรพร้อมด้วยกับค่าฟิลแพกเตอร์ที่สกัดได้จากชุดข้อมูลพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงให้การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับชนิดตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิส
2020	Priyanka K Sorte, Kaibalya Prasad Panda, Rangababu Peesapati และ Gayadhar Panda	บทความนี้ นำเสนอระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียวที่มีเทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนพื้นฐานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยเทคนิคดังกล่าวมีความสามารถในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถฉีดกระแสไฟฟ้าที่มีสัญญาณไซน์ที่บริสุทธิ์เข้าสู่กริดระบบไฟฟ้า โดยมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	Sakdawut Boontua, Prayad Kongsuk และ Vijit kinnares	บทความนี้นำเสนอการประยุกต์เทคนิคการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหลายระดับแบบเอชบริดจ์หนึ่งเฟสห้าระดับสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้า โดยวิธีการรบกวนและการสังเกตถูกใช้เพื่อเก็บรักษาแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ให้คงที่เพื่อรักษากำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งตัวควบคุมที่นำเสนอจะควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ให้อิสระจากภายใต้ความไม่สมดุลของความเข้มแสงและแปรผันกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพด้วยขนาดและมุมของกระแสไฟฟ้ากริดระบบไฟฟ้า

จากการสำรวจและการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด และระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้า พบว่างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีหลายวิธีการ ซึ่งแต่ละวิธีการจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป จากงานวิจัยในอดีต (A. Vijayakumari, 2020) พบว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าสามเฟสชั้นเดียว มีข้อได้เปรียบคือระบบไฟฟ้าและโครงสร้างการควบคุมที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงเล็งเห็นว่าโครงสร้างระบบไฟฟ้าสามารถดัดแปลงแก้ไขจากระบบเชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็นระบบเชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยคงไว้ซึ่งหลักการควบคุมการติดตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จากวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำของเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าในงานวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ พบว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่สามารถถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง ซึ่งการวิเคราะห์ถึงปัญหาดังกล่าวได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 4 ของเล่มวิทยานิพนธ์ จากปัญหาที่ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ไม่สามารถถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ได้ ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้พัฒนาต่อยอดโดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเพิ่มวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในระบบ โดยใช้หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ซึ่งวิธีดังกล่าวอาศัยค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกคำนวณผ่านแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรกับค่า  $K$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งค่า  $K$  คือค่าอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังกำลังไฟฟ้าสูงสุดหารด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร โดยทั่วไปแล้วค่า  $K$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.8-0.85 ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ค่า  $K$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 0.83 ทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่คำนวณได้มีความคาดเคลื่อนกระทบต่อผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวมีความคาดเคลื่อนไปด้วย เพื่อจะแก้ไขปัญหาดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการนำปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเพื่อกำหนดค่า  $K$  ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงไป รายละเอียดการทำวิจัยวิทยานิพนธ์จะได้รับการอธิบายรายละเอียดในบทต่อ ๆ ไป

## 2.4 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงหลักการและวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดและระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการนำปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาแก้ไขปัญหาวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยองค์ความรู้ที่ได้จากผลงานวิจัยในอดีตถือเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

### บทที่ 3

## ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำ

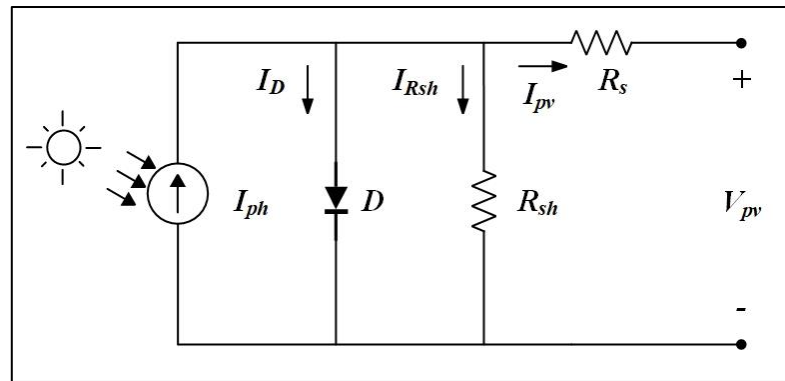
### 3.1 บทนำ

การใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เป็นที่นิยมแพร่หลายคือ วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอวิธีการรบกวนและการสังเกต (P&O method) บนหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสโดยโครงสร้างวงจรสองชั้น ซึ่งวิทยานิพนธ์จะเรียกวิธีการรบกวนและการสังเกตว่าวิธี P&O ในบทนี้ได้อธิบายเนื้อหาอย่างละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับชั้นเดียวและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำด้วยวิธี P&O การออกแบบพารามิเตอร์วงจรต่าง ๆ การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี P&O บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ถูกผลิตจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในอุดมคติต่อขนานกับไดโอดและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.1 กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) สามารถเขียนสมการจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ของกระแสไฟฟ้า (Kirchhoff's Current Law: KCL) บนหลักการผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า ณ จุดใด ๆ จะมีค่าเท่ากับผลรวมกระแสไฟฟ้าที่ไหลออก ณ จุดนั้น ๆ ดังสมการที่ (3-1)

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

จากสมการที่ (3-1) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $I_{pv}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
- $I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงอาทิตย์ (A)
- $I_D$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
- $I_{R_{sh}}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

และจากสมการที่ (3-1) สามารถเขียนพจน์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_D$ ) และพจน์ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{ph}$ ) ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_D$ ) ดังแสดงในสมการที่ (3-2) และสมการที่ (3-3) ตามลำดับ

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_D}{nCV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (3-2)$$

$$I_{R_{sh}} = \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (3-3)$$

จากสมการที่ (3-2) และสมการที่ (3-3) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$I_s$	คือ	กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไดโอดเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$V_D$	คือ	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
$n$	คือ	ค่าคงที่แพกเตอร์ในอุดมคติ (Ideality factor) ของไอโอด (ชนิดซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 1.3)
$C$	คือ	จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมใน 1 มอดูล
$V_{th}$	คือ	ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (threshold voltage) ของไดโอดเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จาก $V_{th} = \frac{KT}{q}$ (V)
$K$	คือ	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (boltzmann constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/Kevin
$T$	คือ	อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Kevin)
$q$	คือ	ค่าประจุของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
$R_{sh}$	คือ	ความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )

เมื่อนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ในสมการที่ (3-2) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์สมการที่ (3-3) ไปแทนในสมการที่ (3-1) จะได้สมการที่ (3-4)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V_D}{nC V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (3-4)$$

จากสมการที่ (3-4) พบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไอโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_s$ ) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในสมการที่ (3-5) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_D$ ) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (3-6)

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nC V_{th}}\right) - 1} \quad (3-5)$$

$$V_D = V_{pv} + I_{pv} R_s \quad (3-6)$$

จากสมการที่ (3-5) และสมการที่ (3-6) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$I_{sc}$	คือ	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$V_{oc}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
$V_{pv}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
$R_s$	คือ	ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )

เมื่อนำกระแสไฟฟ้าอิ้มตัวของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ในสมการที่ (3-5) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ในสมการที่ (3-6) แทนลงในสมการที่ (3-4) จะได้สมการที่ (3-7)

$$I_{pv} = I_{ph} - \left( \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nCV_{th}}\right) - 1} \right) \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{nCV_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (3-7)$$

### 3.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์มีผลต่อจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานภายใต้ประสิทธิภาพไม่เท่ากันในแต่ละวันที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ซึ่งผลกระทบของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลกระทบต่อตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-8) และสมการที่ (3-9) ตามลำดับ

$$I_{sc,T} = I_{sc,T_{ref}} + K_i(T - T_{ref}) \quad (3-8)$$

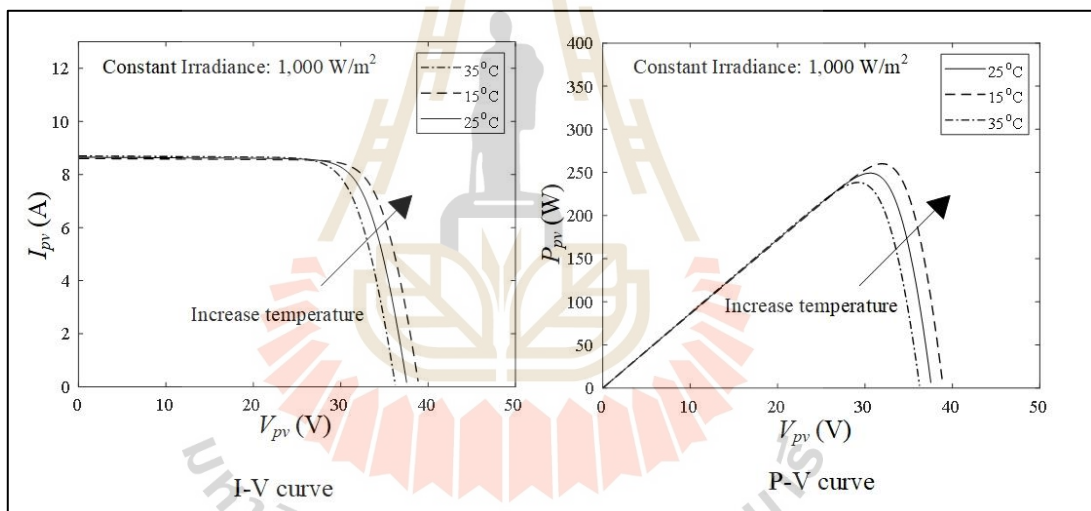
$$V_{oc,T} = V_{oc,T_{ref}} + K_v(T - T_{ref}) \quad (3-9)$$

จากสมการที่ (3-8) และสมการที่ (3-9) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$I_{sc,T}$	คือ	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ อุณหภูมิ $T$ Kelvin (A)
$V_{oc,T}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ อุณหภูมิ $T$ Kelvin (V)
$I_{sc,T_{ref}}$	คือ	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ อุณหภูมิ $T_{ref}$ Kelvin (A)

$V_{oc, T_{ref}}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ อุณหภูมิ
		$T_{ref}$ Kelvin (V)
$K_i$	คือ	ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน (A/ Kelvin)
$K_v$	คือ	ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน (V/ Kelvin)
$T$	คือ	อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่พิจารณา (Kelvin)
$T_{ref}$	คือ	อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 298.15 Kelvin

จากผลกระทบของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาเงื่อนไขความเข้มแสงมีค่าคงที่และอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ผลกระทบของความเข้มแสงต่อพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้จุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลกระทบดังกล่าวส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงอาทิตย์และค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-10) และสมการที่ (3-11) ตามลำดับ

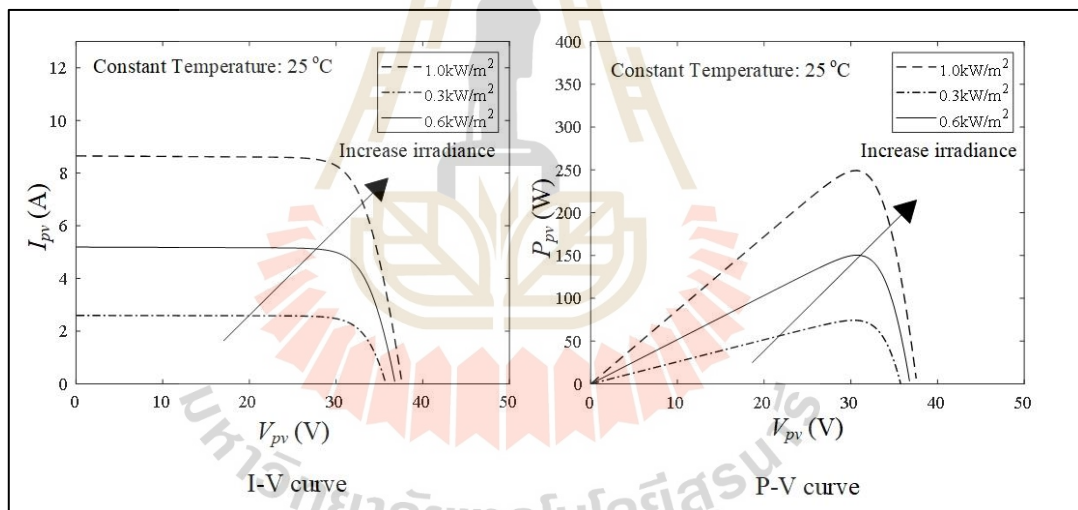
$$I_{ph,G} = I_{sc} \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (3-10)$$

$$R_{sh,G} = R_{sh,G_{ref}} \left( \frac{G_{ref}}{G} \right) \quad (3-11)$$

จากสมการที่ (3-10) และสมการที่ (3-11) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $I_{ph,G}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสง  $G \text{ W/m}^2$  (A)  
 $R_{sh,G}$  คือ ความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสง  $G \text{ W/m}^2$  ( $\Omega$ )  
 $R_{sh,G_{ref}}$  คือ ความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสง  $G_{ref} \text{ W/m}^2$  ( $\Omega$ )  
 $G$  คือ ความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่พิจารณา ( $\text{W/m}^2$ )  
 $G_{ref}$  คือ ความเข้มแสงอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$

จากผลกระทบของความเข้มแสงเมื่อพิจารณาเงื่อนไขอุณหภูมิคงที่และความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

เมื่อนำผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์มารวมกันส่งผลตัวแปรกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงอาทิตย์ ( $I_{ph}$ ) ในพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในสมการที่ (3-12)

$$I_{ph} = \left[ I_{sc} + K_i (T - T_{ref}) \right] \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (3-12)$$

### 3.2.2 ผลกระทบการต่ออนุกรมและขนานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) ในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงจำเป็นต้องมีการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผงสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้อยู่ในช่วง 10-450 วัตต์ โดยการต่อเซลล์แสงอาทิตย์มีสองรูปแบบคือ การต่ออนุกรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการต่อขนานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการต่ออนุกรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นและการต่อขนานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยให้กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลกระทบการต่ออนุกรมและการต่อขนานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-13)

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left( \exp \left( \frac{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{N_s} + \frac{I_{pv} R_s}{N_p}}{nCV_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{\left( \frac{N_p}{N_s} V_{pv} + I_{pv} R_s \right)}{R_{sh}} \quad (3-13)$$

จากสมการที่ (3-13) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$N_p$  คือ จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนานกัน (แผง)

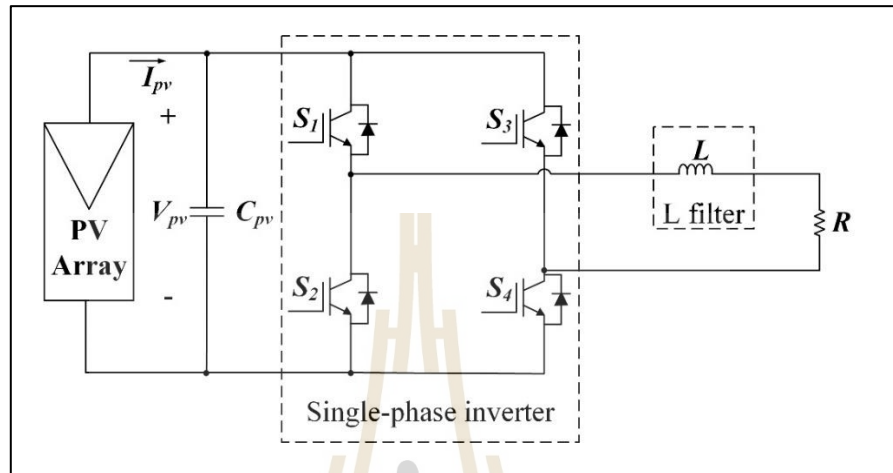
$N_s$  คือ จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน (แผง)

### 3.3 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบขั้นเดียวและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบสำหรับควบคุมการทำงาน โดยการออกแบบระบบควบคุมและการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองของระบบ โดยทั่วไปแบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการทำงานของสวิตช์ทำให้แบบจำลองดังกล่าวมีความซับซ้อนในการนำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบและการวิเคราะห์ระบบ การจำกัดผลของสวิตช์มีหลายวิธีการเพื่อให้ได้แบบจำลองไม่ขึ้นอยู่กับการทำงานของสวิตช์ เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส วิธีการดีคิว (dq transformation) เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับแบบจำลองระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการทำงานของสวิตช์สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

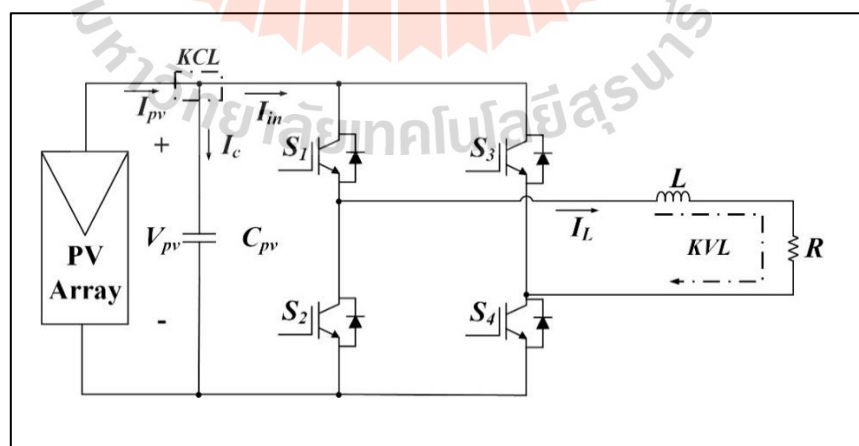


กระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียว โดยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส และขดลวดเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน



รูปที่ 3.4 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียว

เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.4 สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้วยกฎเคอร์ชอฟฟ์ของกระแสไฟฟ้า (Kirchoff's current Law: KCL) และกฎเคอร์ชอฟฟ์ของแรงดันไฟฟ้า (Kirchoff's voltage Law: KVL) แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์

จากรูปที่ 3.5 ประยุกต์ใช้ KCL ที่โหนด  $V_{pv}$  แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (3-14) และประยุกต์ใช้ KVL ที่วงรอบ  $I_L$  แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำดังสมการที่ (3-15)

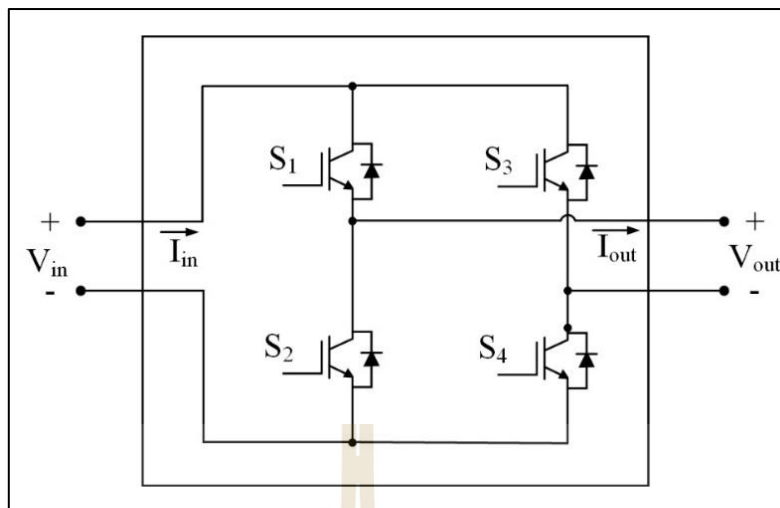
$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}}(I_{pv} - I_{inv}) \quad (3-14)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{out} - I_L R) \quad (3-15)$$

จากสมการที่ (3-14) และสมการที่ (3-15) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$\frac{dV_{pv}}{dt}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V/s)
$C_{pv}$	คือ	ตัวเก็บประจุที่หน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\mu\text{F}$ )
$I_{pv}$	คือ	กระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$I_{inv}$	คือ	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส (A)
$\frac{dI_L}{dt}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (A/s)
$L$	คือ	ขดลวดเหนี่ยวนำ (mH)
$V_{out}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส (V)
$I_L$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (A)
$R$	คือ	ความต้านทาน ( $\Omega$ )

เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียวแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว

จากรูปที่ 3.6 สามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (3-16)

$$\begin{cases} V_{out} = u(t)V_{in} \\ I_{in} = u(t)I_{out} \end{cases} \quad (3-16)$$

จากสมการที่ (3-16) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว (V)
- $I_{in}$  คือ กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว (A)
- $I_{out}$  คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว (A)
- $u(t)$  คือ ฟังก์ชันในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสชั้นเดียว

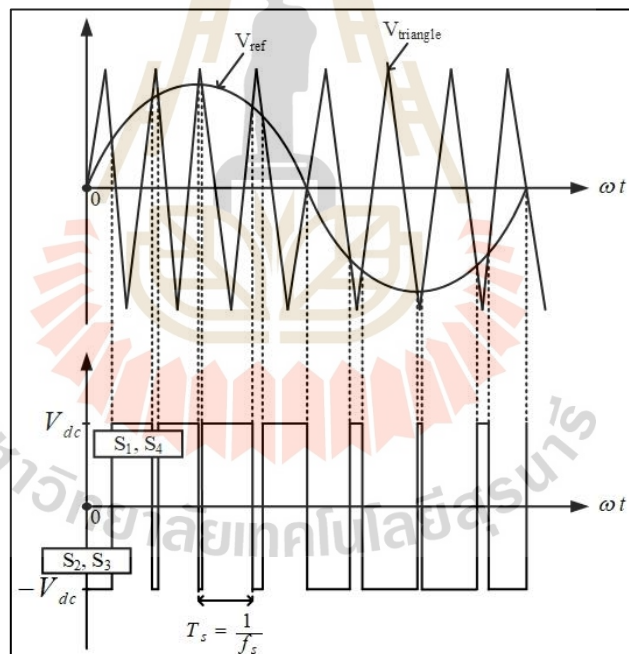
เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับในรูปสัญญาณการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับด้วยเทคนิคพัลส์วidthมอดูเลชัน (pulse width modulation: PWM) ซึ่งเทคนิคการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสดังกล่าวเป็นวิธีการอาศัยสัญญาณสำหรับความกว้างของพัลส์

( $V_{ref}$ ) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $V_{triangle}$ ) ที่มีขนาดและความถี่ของสัญญาณคงที่ โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถอธิบายความสัมพันธ์ในรูปค่าดัชนีการมอดูเลตแบบสองขั้ว (bipolar modulation:  $M$ ) (สุชาติ จินสุทธิ, 2562) แสดงดังสมการที่ (3-17) ซึ่งหลักการทำงานของสวิตช์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสแสดงดังรูปที่ 3.7

$$M = \frac{V_{ref}}{V_{triangle}} \quad (3-17)$$

จากสมการที่ (3-17) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $M$  คือ ค่ามอดูเลตของวงจร โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1
- $V_{ref}$  คือ สัญญาณสำหรับการปรับความกว้างของพัลส์ (V)
- $V_{triangle}$  คือ สัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม (V)



รูปที่ 3.7 การสร้างสัญญาณการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายการทำงานของสวิตช์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส โดยมีเงื่อนไขการทำงานดังนี้

กรณี  $V_{triangle} > V_{ref}$  สวิตช์  $S_2$  และสวิตช์  $S_3$  ทำงาน ส่วน สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_4$  ไม่ทำงาน

กรณี  $V_{triangle} < V_{ref}$  สวิตช์  $S_2$  และสวิตช์  $S_3$  ไม่ทำงาน ส่วน สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_4$  ทำงาน

การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับสามารถหาความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสในรูปสัญญาณค่าเฉลี่ย (root mean square: rms) แสดงดังสมการที่ (3-18)

$$\begin{cases} V_{rms} = \frac{V_{in} M}{\sqrt{2}} \\ I_{rms} = \frac{I_{out} M}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (3-18)$$

จากสมการที่ (3-18) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$V_{rms}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (V)

$I_{rms}$  คือ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (A)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-16) ร่วมกับสมการที่ (3-18) สามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์อินพุตกับเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสได้ใหม่ดังสมการที่ (3-19)

$$\begin{cases} V_{out} = \frac{u(t) V_{in} M}{\sqrt{2}} \\ I_{in} = \frac{u(t) I_{out} M}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (3-19)$$

เมื่อนำสมการที่ (3-19) ไปแทนในสมการที่ (3-14) และสมการที่ (3-15) จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาแสดงดังสมการที่ (3-20) และสมการที่ (3-21) เนื่องจากเป็นผลกระทบจากการทำงานของสวิตช์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส เพื่อที่จะกำจัดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาจำเป็นต้องอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) ในการแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} \left( I_{pv} - \frac{u(t) M I_L}{\sqrt{2}} \right) \quad (3-20)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} \left( \frac{u(t)MV_{pv}}{\sqrt{2}} - I_L R \right) \quad (3-21)$$

### 3.3.1 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (A. Emadi, 2004) จะอาศัยอนุกรมฟูเรียร์ที่มีสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาในช่วง  $[t-T, T]$  สามารถเขียนอยู่ในรูปตัวแปร  $x(t)$  ของอนุกรมฟูเรียร์แสดงดังสมการที่ (3-22)

$$x(t) = \sum_{k=-n}^n \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega t} \quad (3-22)$$

$$\text{ดังนั้น } \omega = \frac{2\pi}{T_s}$$

จากสมการที่ (3-22) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$x(t)$	คือ	สัญญาณรายคาบ
$\langle x \rangle_k(t)$	คือ	สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์เชิงซ้อน (complex Fourier coefficients)
$\omega$	คือ	ความถี่ระบบ (rad/s)
$T_s$	คือ	คาบเวลาของสวิตช์

จากสมการที่ (3-20) ตัวแปร  $k$  ของอนุกรมฟูเรียร์เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความแม่นยำและความถูกต้องของอนุกรมฟูเรียร์ กรณีที่  $k$  มีค่าเป็นอนันต์บ่งบอกได้ว่าค่าความผิดพลาดของอนุกรมฟูเรียร์มีค่าเท่ากับ 0 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะมีสถานะเดียวในกรณีที่ตัวแปรสถานะไม่มีการสั่นหรือตัวแปรสถานะมีค่าเกือบจะคงที่พิจารณาให้ค่า  $k=0$  ซึ่งเรียกว่าการประมาณค่าฮาร์มอนิกอันดับที่ศูนย์ (zero-order approximation) กรณีที่ตัวแปรสถานะมีการสั่นในลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์จะพิจารณาให้ค่า  $k=-1,1$  ซึ่งเรียกว่าการประมาณค่าฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่ง (first-order approximation) นอกจากนี้หากตัวแปรสถานะมีองค์ประกอบคงที่และมีการสั่นของสัญญาณจะพิจารณาให้ค่า  $k=-1,0,1$  สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้การประมาณค่าฮาร์มอนิกอันดับที่ศูนย์และการประมาณค่าฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า



คุณสมบัติของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนสำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าประกอบด้วย 3 คุณสมบัติ

1. คุณสมบัติอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงดังสมการที่ (3-23)

$$\frac{d\langle x \rangle_k(t)}{dt} = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k(t) - jk\omega \langle x \rangle_k(t) \quad (3-23)$$

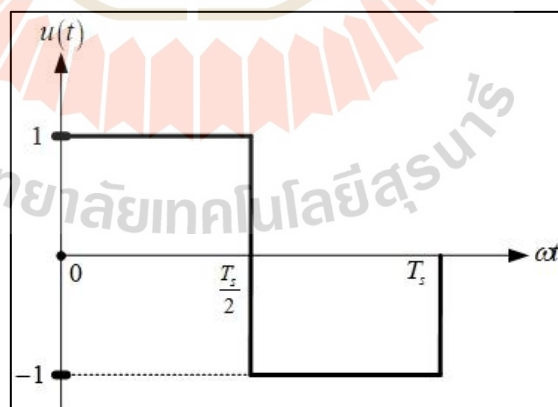
2. คุณสมบัติการคูณแสดงดังสมการที่ (3-24)

$$\langle x \times y \rangle_k = \sum_k \langle x \rangle_{k-i} \times \langle y \rangle_i \quad (3-24)$$

3. คุณสมบัติฟังก์ชันคือจำนวนจริงแสดงดังสมการที่ (3-25)

$$\langle x \rangle_{-k} = \langle \bar{x} \rangle_k = \langle x \rangle_k^* \quad (3-25)$$

เมื่อพิจารณาสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส ในรูปของสัญญาณรายคาบของการทำงานของสวิตช์ช่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส โดยสัญญาณรายคาบของสวิตช์สามารถเขียนในรูปฟังก์ชันการสวิตช์แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณารูปสัญญาณฟังก์ชันสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสสามารถเขียนอธิบายดังสมการที่ (3-26)

$$u(t) = \begin{cases} 1 & 0 < \omega t < \frac{T_s}{2} \\ -1 & \frac{T_s}{2} < \omega t < T_s \end{cases} \quad (3-26)$$

จากสมการที่ (3-26) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$u(t)$  คือ ฟังก์ชันสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส

จากฟังก์ชันสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส เมื่อพิจารณาฟังก์ชันสวิตช์ในรูปสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์เชิงซ้อนด้วยการประมาณค่าฮาร์มอนิกอันดับที่ศูนย์และการประมาณค่าฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งสามารถคำนวณ  $\langle u \rangle_0(t)$  และ  $\langle u \rangle_1(t)$  ดังสมการที่ (3-27) และสมการที่ (3-28) ตามลำดับ

$$k = 0; \langle u \rangle_0(t) = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} 1e^{j0} d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} -1e^{j0} d\theta \right] = 0 \quad (3-27)$$

$$k = 1; \langle u \rangle_1(t) = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} 1e^{-j\theta} d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} -1e^{-j\theta} d\theta \right] = \frac{-2j}{\pi} \quad (3-28)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-20) และสมการที่ (3-21) พบว่าตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสประกอบไปด้วย 4 ตัวแปรแสดงดังสมการที่ (3-29)

$$\begin{cases} \langle V_{pv} \rangle_0 = x_1 \\ \langle I_L \rangle_0 = x_2 \\ \langle V_{pv} \rangle_1 = x_3 + jx_4 \\ \langle I_L \rangle_1 = x_5 + jx_6 \end{cases} \quad (3-29)$$

จากตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสสามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยเริ่มพิจารณาตัวแปรแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) ในรูปสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์เชิงซ้อนดังนี้

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ในสมการที่ (3-20)

กรณีพิจารณา  $k = 0$

$$\left\langle \frac{dV_{pv}}{dt} \right\rangle_0 = \frac{1}{C_{pv}} \left( I_{pv} - \frac{M \langle u(t) \times I_L \rangle_0}{\sqrt{2}} \right)$$

จากคุณสมบัติการคูณข้อที่ 2

$$\langle u(t) \times I_L \rangle_0 = \sum_i \langle u(t) \rangle_{k-i} \times \langle I_L \rangle_i \quad \text{เมื่อ } i = -1, 0, 1$$

$$= \langle u(t) \rangle_{-1} \times \langle I_L \rangle_1 + \langle u(t) \rangle_0 \times \langle I_L \rangle_0 + \langle u(t) \rangle_1 \times \langle I_L \rangle_{-1}$$

$$= \langle u(t) \rangle_{-1} \times \langle I_L \rangle_1 + \langle u(t) \rangle_1 \times \langle I_L \rangle_{-1}$$

จากคุณสมบัติฟังก์ชันคือจำนวนจริงในข้อที่ 3

$$= \langle u(t) \rangle_1^* \times \langle I_L \rangle_1 + \langle u(t) \rangle_1 \times \langle I_L \rangle_1^*$$

$$\left\langle \frac{dV_{pv}}{dt} \right\rangle_0 = \frac{I_{pv}}{C_{pv}} - \frac{M}{\sqrt{2}C_{pv}} \left( \langle u(t) \rangle_1^* \times \langle I_L \rangle_1 + \langle u(t) \rangle_1 \times \langle I_L \rangle_1^* \right)$$

กรณีพิจารณา  $k = 1$

สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เป็นสัญญาณที่มีค่าเกือบคงที่จึงไม่พิจารณากรณี  $k = 1$  เพราะเป็นองค์ประกอบทางด้านกระแสสลับ

เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการแทนตัวแปรในสมการที่ (3-29) จะได้ความสัมพันธ์เชิงอนุพันธ์แสดงดังสมการที่ (3-30)

$$\dot{x}_1 = \frac{I_{pv}}{C_{pv}} - \frac{M}{\sqrt{2}C_{pv}} \left[ \left( \frac{2j}{\pi} \right) (x_5 + jx_6) + \left( -\frac{2j}{\pi} \right) (x_5 - jx_6) \right]$$

$$\dot{x}_1 = \frac{I_{pv}}{C_{pv}} - \frac{4Mx_6}{\sqrt{2}\pi C_{pv}} \quad (3-30)$$

พิจารณากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) ในสมการที่ (3-21)

กรณีพิจารณา  $k = 0$

สัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) เป็นสัญญาณที่มีการสั้นของรูปสัญญาณคล้ายสัญญาณไซน์จึงไม่พิจารณากรณี  $k = 0$  เพราะเป็นองค์ประกอบทางด้านกระแสตรง

กรณีพิจารณา  $k = 1$

จากคุณสมบัติอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาข้อที่ 1

$$\left\langle \frac{dI_L}{dt} \right\rangle_1 = \frac{1}{L} \left( \frac{M \langle u(t) \times V_{pv} \rangle_1}{\sqrt{2}} - \langle I_L \rangle_1 R \right) - j\omega \langle I_L \rangle_1$$

จากคุณสมบัติการคูณข้อที่ 2

$$\begin{aligned} \langle u(t) \times V_{pv} \rangle_1 &= \sum_i \langle u(t) \rangle_{k-i} \times \langle V_{pv} \rangle_i && \text{เมื่อ } i = -1, 0, 1 \\ &= \langle u(t) \rangle_2 \times \langle V_{pv} \rangle_{-1} + \langle u(t) \rangle_1 \times \langle V_{pv} \rangle_0 + \langle u(t) \rangle_0 \times \langle V_{pv} \rangle_1 \\ &= \langle u(t) \rangle_1 \times \langle V_{pv} \rangle_0 \end{aligned}$$

$$\left\langle \frac{dI_L}{dt} \right\rangle_1 = \frac{M \langle u(t) \rangle_1 \times \langle V_{pv} \rangle_0}{\sqrt{2}L} - \frac{\langle I_L \rangle_1 R}{L} - j\omega \langle I_L \rangle_1$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการแทนตัวแปรในสมการที่ (3-29) จะได้ความสัมพันธ์เชิงอนุพันธ์แสดงดังสมการที่ (3-31)

$$\dot{x}_5 + j\dot{x}_6 = \frac{M}{\sqrt{2}L} \left( \frac{-j2}{\pi} \right) (x_1) - \frac{R}{L} (x_5 + jx_6) - j\omega (x_5 + jx_6) \quad (3-31)$$

สามารถเขียนอธิบายแยกเป็นตัวแปร  $\dot{x}_5$  และ  $\dot{x}_6$  แสดงดังสมการที่ (3-32) และสมการที่ (3-33)

$$\dot{x}_5 = \omega x_6 - \frac{R}{L} x_5 \quad (3-32)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{2M}{\sqrt{2}\pi L} x_6 - \omega x_1 - \frac{R}{L} x_5 \quad (3-33)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-31) สมการที่ (3-32) และสมการที่ (3-33) สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการที่ (3-34)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3-34)$$

เมื่อ  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$  และอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส  $u = [I_{pv}]$  สามารถเขียนอธิบายตัวแปร  $A$  และตัวแปร  $B$  คือค่าเมทริกซ์ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{4M}{\sqrt{2}\pi C_{pv}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & \frac{2M}{\sqrt{2}\pi L} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C_{pv}} \end{bmatrix}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-34) เมื่อนำตัวแปร  $A$  และตัวแปร  $B$  แทนในสมการจะสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (3-35)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{4M}{\sqrt{2\pi C_{pv}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & \frac{2M}{\sqrt{2\pi L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C_{pv}} \end{bmatrix} I_{pv} \quad (3-35)$$

จากความสัมพันธ์ของอนุกรมฟูเรียร์เชิงซ้อนสามารถหาค่าตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียวได้ดังสมการที่ (3-36)

$$\begin{cases} V_{pv} = x_1 \\ I_L = 2x_5 \cos(\omega t) - 2x_6 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3-36)$$

### 3.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียวโดยอาศัยการตรวจสอบความถูกต้องด้วยโปรแกรม MATLAB มาเปรียบเทียบกับระหว่างผลตอบสนองของแบบจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นซึ่งพารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียว

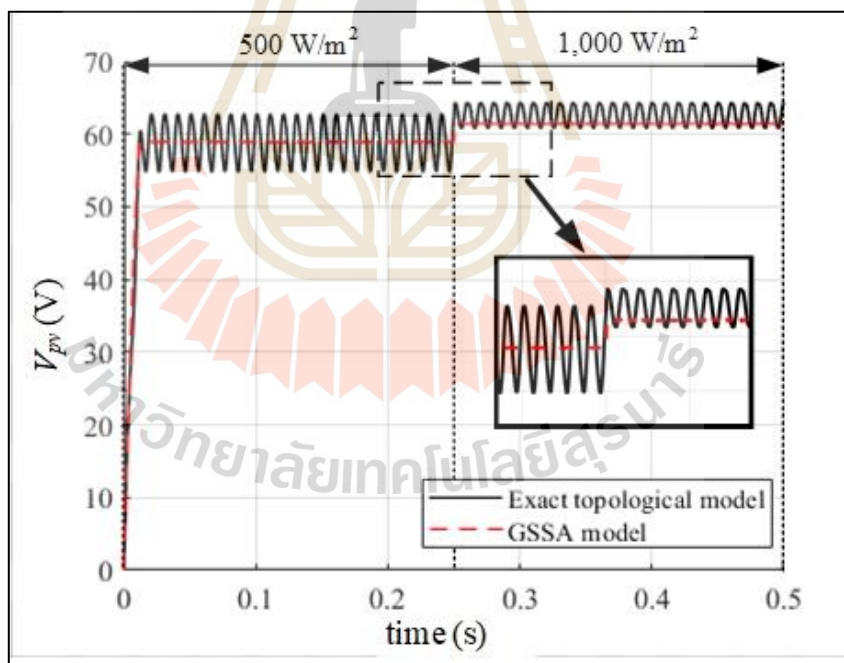
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	64.6	V
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	6.14	A
จำนวนแผงที่ต่ออนุกรม ( $N_s$ )	1	แผง
จำนวนแผงที่ต่อขนาน ( $N_p$ )	1	แผง
ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ )	0.43042	$\Omega$
ขดลวดเหนี่ยวนำ ( $L$ )	5	mH
ความต้านทาน ( $R$ )	10	$\Omega$



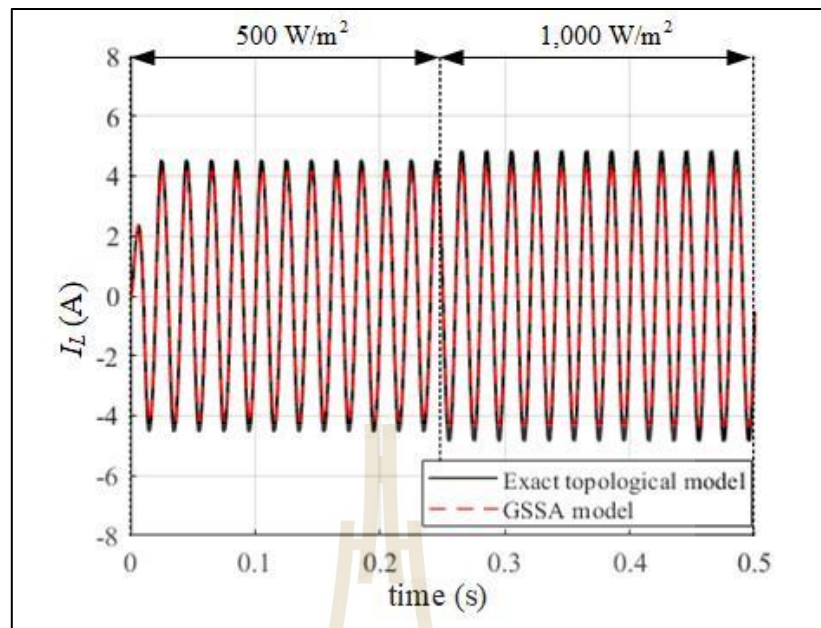
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียว (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ตัวเก็บประจุหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $C_{pv}$ )	450	$\mu\text{F}$
ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ )	$2(50)\pi$	rad/s

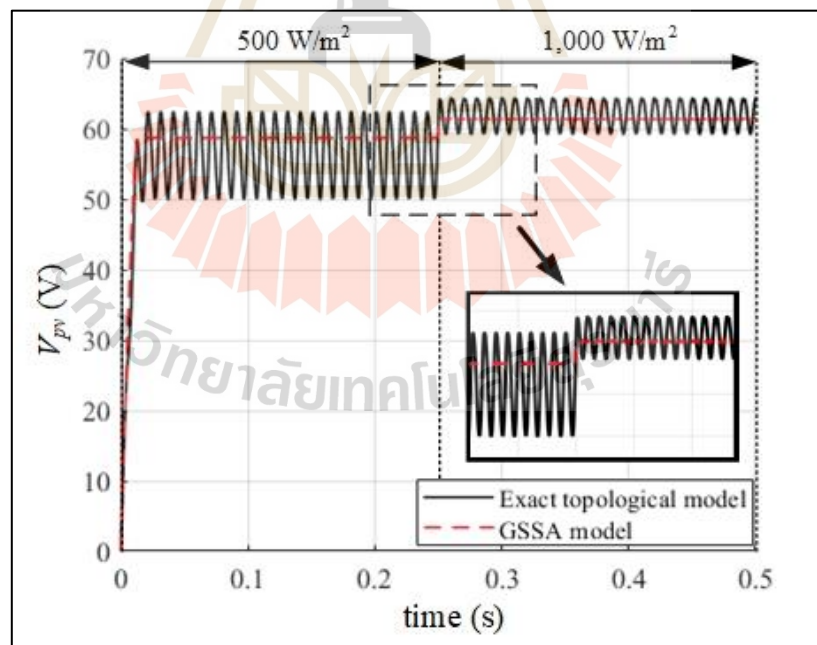
การจำลองสถานการณ์จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $500 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ที่เวลา  $0.25 \text{ s}$  เมื่อพิจารณากรณีค่ามอดูเลตของระบบเท่ากับ  $0.8$  ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) แสดงในรูปที่ 3.9 และผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) แสดงดังรูปที่ 3.10 เมื่อพิจารณากรณีค่ามอดูเลตของระบบเท่ากับ  $0.9$  ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) แสดงในรูปที่ 3.11 และผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) แสดงดังรูปที่ 3.12



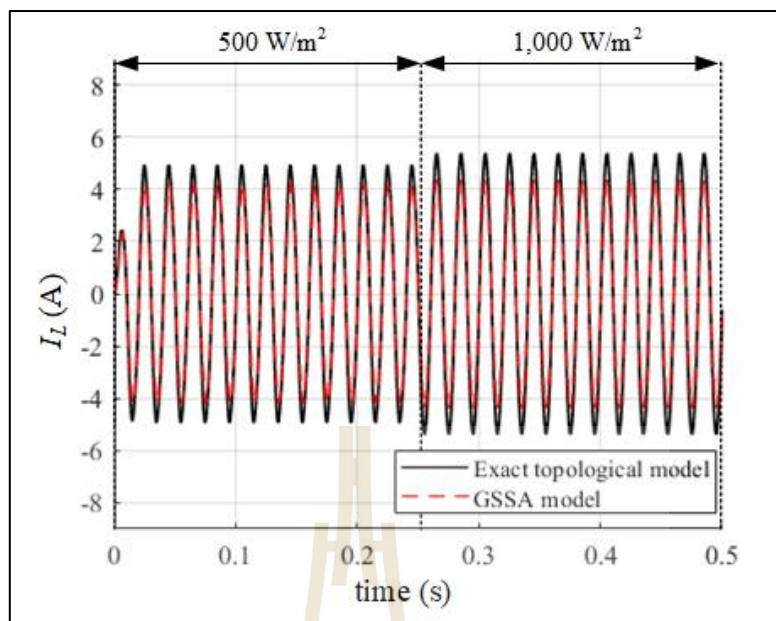
รูปที่ 3.9 แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ในกรณี  $M = 0.8$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก  $500 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 3.10 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) ในกรณี  $M = 0.8$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก  $500 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ในกรณี  $M = 0.9$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก  $500 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 3.12 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) ในกรณี  $M = 0.9$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก  $500 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.11 และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) ในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.12 พบว่าเมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปให้ผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองมาตรฐานทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ดังสังเกตได้จากกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งสอดคล้องไปกับแบบจำลองมาตรฐาน ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นจากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีความถูกต้องและสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปพัฒนาในด้านการออกแบบตัวควบคุมได้ต่อไป โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำแบบจำลองในส่วนของ  $\dot{x}$  ในสมการที่ (3-30) ไปดำเนินการใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมฟิวเจอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.6 ของบทนี้

### 3.4 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O

หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O (K. Anu R, M. S Sheik, M. Shaleena, 2019) มีขั้นตอนการทำงานเป็นคาบเวลาผ่านการปรับการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์อาทิตย์โดยตรงด้วยค่า  $\Delta V$  คงที่ (fixed step size) ซึ่งขึ้นการปรับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มต้นจากการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) และ

กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) สำหรับคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) ดังสมการที่ (3-37)

$$P_{pv}(n) = V_{pv}(n)I_{pv}(n) \quad (3-37)$$

จากสมการที่ (3-37) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $P_{pv}(n)$  คือ กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในค่าคาบเวลาปัจจุบันของขั้นตอนการวนซ้ำรอบที่  $n$  (W)
- $V_{pv}(n)$  คือ แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในค่าคาบเวลาปัจจุบันของขั้นตอนการวนซ้ำรอบที่  $n$  (V)
- $I_{pv}(n)$  คือ กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในค่าคาบเวลาปัจจุบันของขั้นตอนการวนซ้ำรอบที่  $n$  (A)

เมื่อระบบดำเนินการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเสร็จสิ้น ระบบจะดำเนินการขั้นถัดไปคือ คำนวณค่าผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Delta V_{pv}$ ) และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Delta P_{pv}$ ) ค่าคาบเวลาปัจจุบันกับค่าคาบเวลาก่อนหน้าแสดงดังสมการที่ (3-38) และสมการที่ (3-39) ตามลำดับ

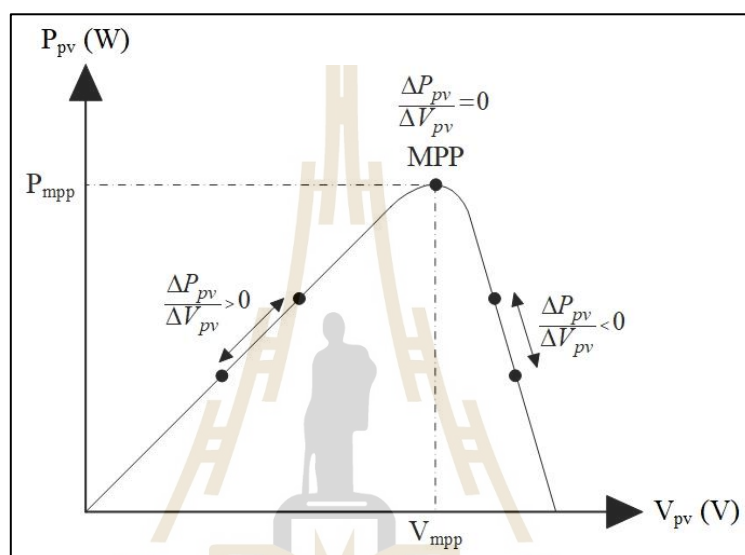
$$\Delta V_{pv} = V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1) \quad (3-38)$$

$$\Delta P_{pv} = P_{pv}(n) - P_{pv}(n-1) \quad (3-39)$$

จากสมการที่ (3-38) และสมการที่ (3-39) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $\Delta V_{pv}$  คือ ผลต่างแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
- $V_{pv}(n-1)$  คือ แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในค่าคาบเวลาก่อนหน้าของขั้นตอนการวนซ้ำรอบที่  $n-1$  (V)
- $\Delta P_{pv}$  คือ ผลต่างกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
- $P_{pv}(n-1)$  คือ กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในค่าคาบเวลาก่อนหน้าของขั้นตอนการวนซ้ำรอบที่  $n-1$  (W)

เมื่อระบบดำเนินการหาค่าผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เสรีจลัน ระบบจะเริ่มดำเนินการวิเคราะห์จุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V curve) แสดงดังรูปที่ 3.13 จากรูปสามารถอธิบายการปรับจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี P&O ได้ดังสมการที่ (3-40)



รูปที่ 3.13 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} > 0; & \quad \text{อยู่ที่ด้านซ้ายของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด} \\
 \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} < 0; & \quad \text{อยู่ที่ด้านขวาของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด} \\
 \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} = 0; & \quad \text{อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด}
 \end{aligned}
 \tag{3-40}$$

เมื่อระบบเริ่มวิเคราะห์ตำแหน่งของจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการตรวจสอบเงื่อนไขของผลต่างกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อผลต่างกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับศูนย์ ( $\Delta P_{pv} = 0$ ) แสดงว่าจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หลังจากนั้นระบบจะดำเนินการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) และกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) ใหม่อีกครั้ง ในกลับกันเมื่อผลต่างกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เท่ากับศูนย์ ( $\Delta P_{pv} \neq 0$ ) แสดงว่าจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระบบจะเริ่มดำเนินการปรับเปลี่ยนจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยเริ่มตรวจสอบเงื่อนไขของผลต่างของกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์



แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าศูนย์ ( $\Delta P_{pv} > 0$ ) ระบบจะดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไขผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลำดับถัดไป เมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าศูนย์ ( $\Delta V_{pv} > 0$ ) ระบบจะดำเนินการปรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแสดงดังสมการที่ (3-41)

$$V_{ref}(n) = V_{ref}(n-1) + \Delta V \quad (3-41)$$

จากสมการที่ (3-41) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$V_{ref}(n)$	คือ	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในค่าคาบเวลาปัจจุบันของขั้นตอนการวนซ้ำรอบที่ $n$ (V)
$V_{ref}(n-1)$	คือ	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในค่าคาบเวลาก่อนหน้าของขั้นตอนการวนซ้ำรอบที่ $n-1$ (V)
$\Delta V$	คือ	ค่าขั้นการรบกวนแรงดันไฟฟ้า (V)

ในทางตรงกันข้ามเมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ( $\Delta V_{pv} < 0$ ) ระบบจะดำเนินการปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแสดงดังสมการที่ (3-42)

$$V_{ref}(n) = V_{ref}(n-1) - \Delta V \quad (3-42)$$

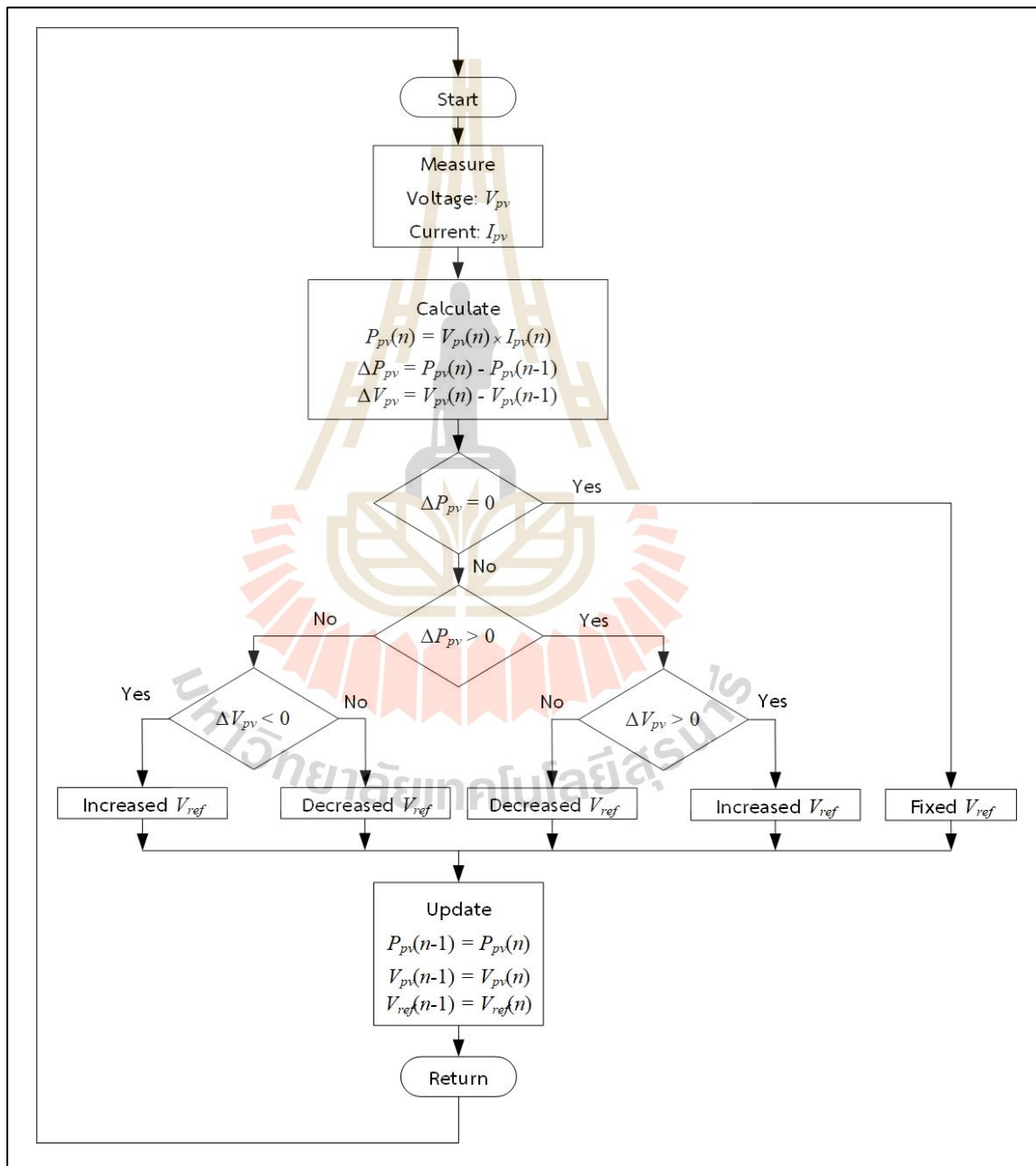
เมื่อพิจารณาในอีกกรณีคือเงื่อนไขผลต่างของกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ( $\Delta P_{pv} < 0$ ) ระบบจะดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไขผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป เมื่อผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าศูนย์ ( $\Delta V_{pv} > 0$ ) ระบบจะดำเนินการปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตามสมการที่ (3-42) ในทางกลับกันเมื่อผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ( $\Delta V_{pv} < 0$ ) ระบบจะดำเนินการปรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตามสมการที่ (3-41) เมื่อระบบดำเนินการขั้นตอนทั้งหมดเสร็จสิ้นระบบจะดำเนินการอัปเดตค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในค่าคาบเวลาปัจจุบันเป็นค่าคาบเวลาก่อนหน้าแสดงดังสมการที่ (3-43) ก่อนที่ระบบจะดำเนินการทำงานซ้ำตั้งแต่เริ่มต้น โดยขั้นตอนการทำงานวิธี P&O สามารถแสดงเป็นแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 3.14



$$V_{pv}(n-1) = V_{pv}(n)$$

$$P_{pv}(n-1) = P_{pv}(n) \quad (3-43)$$

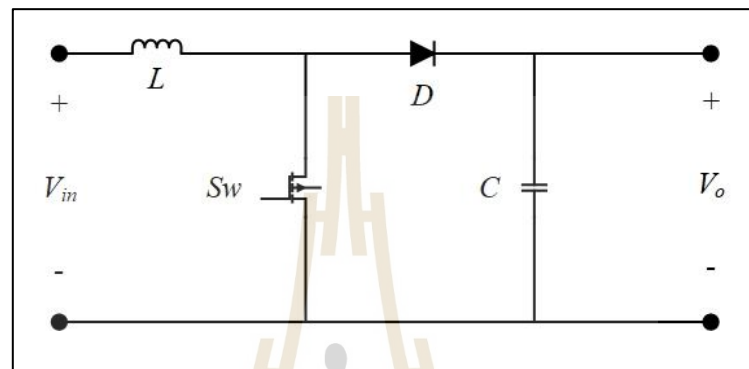
$$V_{ref}(n-1) = V_{ref}(n)$$



รูปที่ 3.14 แผนภาพการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O

### 3.5 การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไปวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า (boost converter) ถูกประยุกต์ใช้งานเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าอินพุต ( $V_{in}$ ) ถูกเพิ่มขึ้นเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) ที่สูงขึ้นตามค่าวัฏจักรหน้าที่ ( $d$ ) โดยรูปวงจรมุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.15 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ไดโอด ( $D$ ) สวิตช์ ( $Sw$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C$ ) โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (3-44)

$$V_o = \frac{V_{in}}{1-d} \quad (3-44)$$

จากสมการที่ (3-44) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจร (V)
- $V_o$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร (V)
- $d$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 - 1

การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีความจำเป็น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของระบบมีผลต่อผลการตอบสนองของวงจรในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จำเป็นต้องคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าพลั่ว (ripple current) ( $\Delta I_L$ ) และแรงดันไฟฟ้าพลั่ว (ripple voltage) ( $\Delta V_o$ ) สำหรับการออกแบบค่า

ขดลวดเหนียวและค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม (Muhammad H. Rashid, 1989) ซึ่งสมการสำหรับออกแบบขดลวดเหนียวแสดงดังสมการที่ (3-45) และสมการสำหรับออกแบบตัวเก็บประจุแสดงดังสมการที่ (3-46)

$$L = \frac{V_{in}(V_o - V_{in})}{V_o \Delta I_L f_{Sw}} \quad (3-45)$$

$$C = \frac{I_o(V_o - V_{in})}{V_o \Delta V_o f_{Sw}} \quad (3-46)$$

จากสมการที่ (3-45) และสมการที่ (3-46) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ดังนี้

$L$	คือ	ขดลวดเหนียว (H)
$C$	คือ	ตัวเก็บประจุ (F)
$I_o$	คือ	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร (A)
$\Delta I_L$	คือ	กระแสไฟฟ้าพลั๊กที่ไหลผ่านตัวขดลวดเหนียวนำ (A)
$\Delta V_C$	คือ	แรงดันไฟฟ้าพลั๊กที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V)
$f_{Sw}$	คือ	ความถี่ในการสวิตซ์ของวงจร (Hz)

สำหรับการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการออกแบบ โดยพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง มีค่าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mpp}$ )	250.002	W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ )	30.6	V
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	37.62	V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mpp}$ )	8.17	A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.59	A

เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณาเท่ากับ 5 kW ซึ่งพิกัดดังกล่าวเกิดจากการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม 5 แผง และต่อแบบขนานกัน 4 ชุดทำให้ได้ตามพิกัดที่ต้องการ โดยการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้

เงื่อนไขสำหรับออกแบบคือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $V_o$ ) เท่ากับ 350 V กระแสไฟฟ้าพัวล์ ( $\Delta I_L$ ) มีค่าเท่ากับ 3 A แรงดันไฟฟ้าพัวล์ ( $\Delta V_o$ ) เท่ากับ 0.5 V ความถี่ในการสวิตช์ ( $f_{sw}$ ) เท่ากับ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าอินพุต ( $V_{in}$ ) เท่ากับ 140 V

จากเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-45) และสมการที่ (3-46) สามารถแสดงการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$L_b = \frac{140 \times (350 - 140)}{350 \times 3 \times 10 \times 10^3} = 2.8 \text{ mH}$$

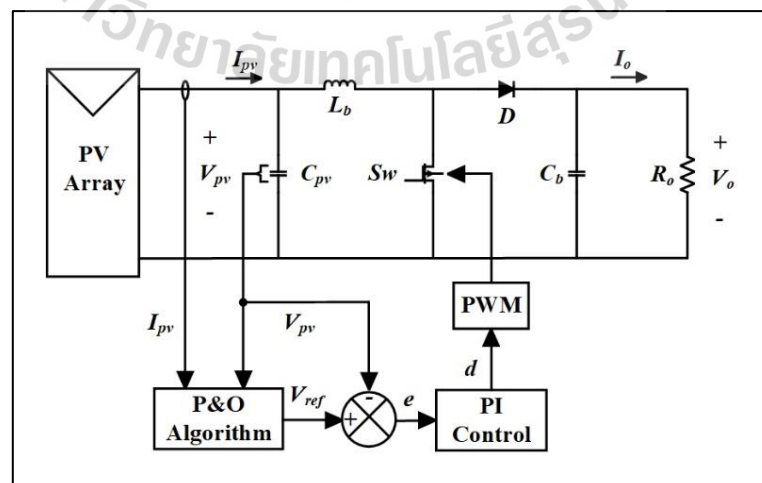
จากสมการที่ (3-46) กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ  $\frac{P_{rated}}{V_o}$

$$C_b = \frac{5 \times 10^3}{350} \times (350 - 140) = 1,714 \mu\text{F}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า  $C_b = 1,800 \mu\text{F}$

### 3.6 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI controller) สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอาศัยหลักการออกแบบด้วยวิธีออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (conventional controller design) ซึ่งวิธีการแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนต่อการออกแบบตัวควบคุม (โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, 2554) ทั้งยังให้ผลการตอบสนองของระบบที่ดี โดยการออกแบบตัวควบคุมจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันการถ่ายโอน (transfer function)  $G(s) = \frac{V_{pv}(s)}{I_{pv}(s)}$  ซึ่งสามารถ

หาได้จากสมการที่ (3-30) ดังนี้

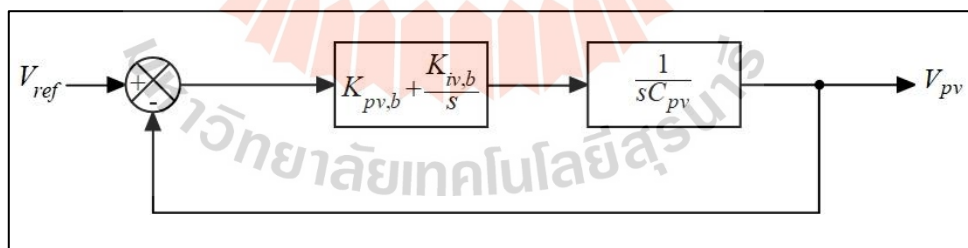
ทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) ในสมการที่ (3-30) จะได้

$$s x_1(s) = s V_{pv}(s) = \frac{I_{pv}(s)}{C_{pv}} - \frac{4M x_6(s)}{\sqrt{2\pi} C_{pv}}$$

กำหนดให้  $x_6(s) = 0$  จะได้

$$G(s) = \frac{V_{pv}(s)}{I_{pv}(s)} = \frac{1}{s C_{pv}}$$

เมื่อนำ  $G(s)$  ที่ได้ไปดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 โครงสร้างควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.17 สามารถเขียนฟังก์ชันการถ่ายโอนของควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (3-47)

$$\frac{V_{pv}}{V_{ref}} = \frac{sK_{pv,b} + K_{iv,b}}{s^2 + \frac{K_{pv,b}}{L}s + \frac{K_{iv,b}}{L}} \quad (3-47)$$

จากสมการที่ (3-47) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$K_{pv,b}$  คือ พารามิเตอร์ตัวควบคุมสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์อาทิตย์

$K_{iv,b}$  คือ พารามิเตอร์ตัวควบคุมปริพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมจะอาศัยหลักการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ตัวหารกับระบบมาตรฐานการควบคุมอันดับสอง ซึ่งมีสมการระบบมาตรฐานการควบคุมอันดับสองแสดงดังสมการที่ (3-48)

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3-48)$$

จากสมการที่ (3-48) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$\zeta$  คือ อัตราหน่วงของระบบควบคุม

$\omega_n$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (rad/s)

เมื่อนำตัวหารของสมการที่ (3-47) มาเปรียบเทียบกับสมการที่ (3-48) สามารถออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดังสมการที่ (3-49) และสมการที่ (3-50)

$$K_{pv,b} = 2\zeta_b \omega_{n,b} C_{pv} \quad (3-49)$$

$$K_{iv,b} = \omega_{n,b}^2 C_{pv} \quad (3-50)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ค่าอัตราหน่วงของระบบควบคุม (damping ratio) ( $\zeta_b$ ) เท่ากับ 0.8 และความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_{n,b}$ ) เท่ากับ 100 rad/s เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-49) และสมการที่ (3-50) สามารถหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอได้ดังนี้

$$K_{pv,b} = 2 \times 0.8 \times 100 \times 4,000 \times 10^{-6} = 0.64$$

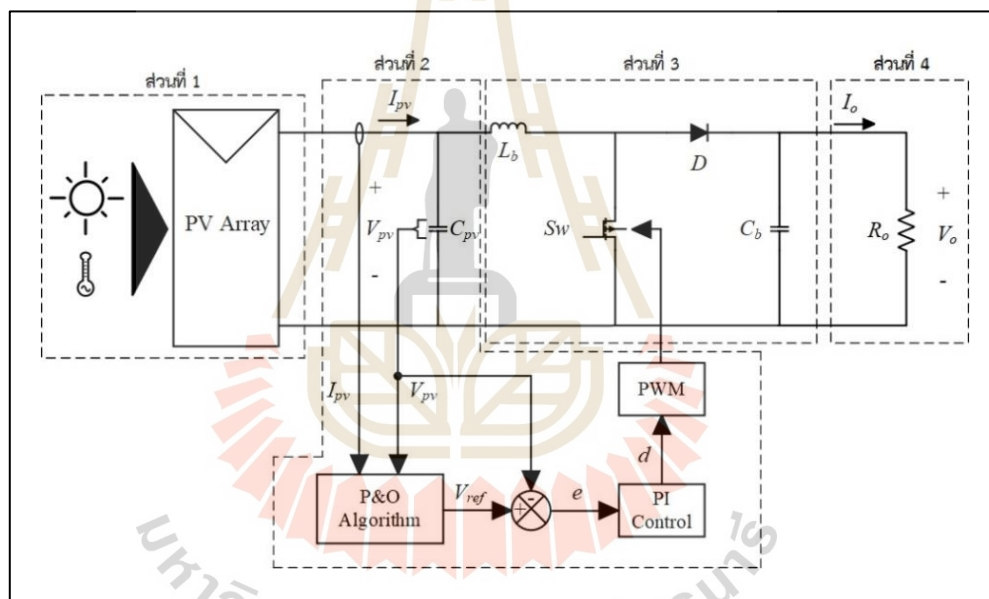
$$K_{iv,b} = 100^2 \times 4,000 \times 10^{-6} = 40$$



### 3.7 การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดด้วยวิธี P&O

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการจำลองสถานการณ์คือระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดแสดงดังรูปที่ 3.18 จากรูปสามารถแบ่งระบบไฟฟ้าเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดพิกัด 5 kW ส่วนที่ 2 ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O ส่วนที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า และส่วนสุดท้าย ส่วนที่ 4 โหลดความต้านทานเอาต์พุต การยืนยันประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O โดยพิจารณาเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีพารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดแสดงดังตารางที่ 3.3

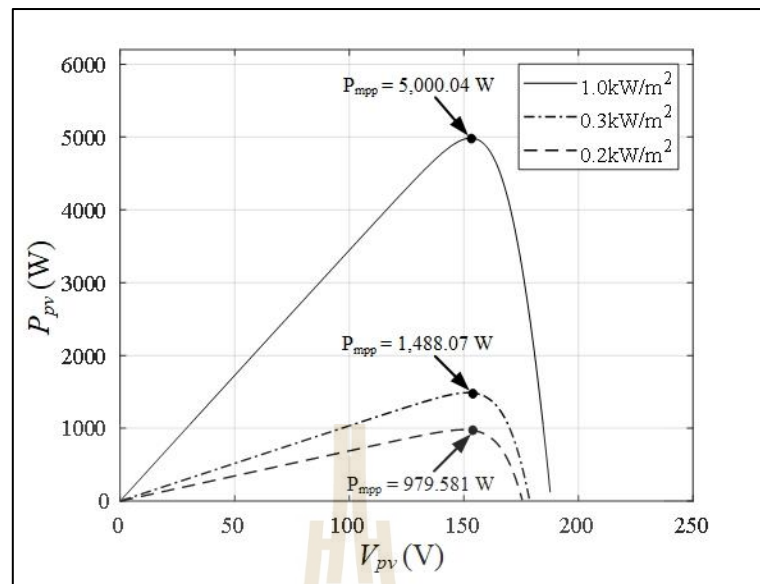


รูปที่ 3.18 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด

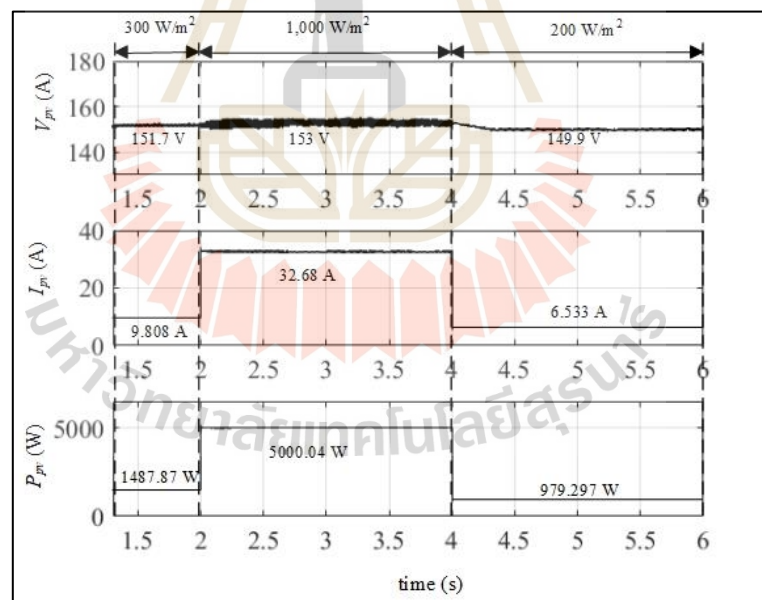
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนด

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ตัวเก็บประจุหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $C_{pv}$ )	4,000	$\mu\text{F}$
ขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $L_b$ )	2.8	mH
ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $C_b$ )	1,800	$\mu\text{F}$
ความต้านทานเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $R_o$ )	100	$\Omega$
พารามิเตอร์ตัวควบคุมสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $K_{pv,b}$ )	0.64	-
พารามิเตอร์ตัวควบคุมปริพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $K_{iv,b}$ )	40	-
ความถี่ในการสวิตช์ ( $f_{sw}$ )	10	kHz
ค่าขั้นการรบกวนแรงดันไฟฟ้า ( $\Delta V$ )	0.1	V

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O โดยอาศัยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สำเร็จรูปในโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) จำเป็นต้องมีการป้อนค่าความเข้มแสง (irradiance:  $I_r$ ) ในหน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) และอุณหภูมิ (temperature: T) ในหน่วย องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) เป็นค่าอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการจำลองสถานการณ์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $25^{\circ}\text{C}$  คงที่ และมีการปรับเปลี่ยนความเข้มแสงแบบสัญญาณขั้นบันได ซึ่งการจำลองสถานการณ์ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O ระบบจะเริ่มดำเนินการจากการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งค่าไปยังอัลกอริทึมวิธี P&O เพื่อให้อัลกอริทึมดำเนินการหาค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับหาค่าผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งค่าที่ได้ออกจากตัวควบคุมพีไอจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ (carrier signal) ของวงจรเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ (pulse width modulation signal: PWM signal) สำหรับสั่งการทำงานสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ในการจำลองสถานการณ์จะพิจารณาช่วงความเข้มแสง 3 ช่วง คือ  $200 \text{ W}/\text{m}^2$ ,  $1,000 \text{ W}/\text{m}^2$  และ  $300 \text{ W}/\text{m}^2$  ซึ่งกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละความเข้มแสงที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.19 โดยผลการจำลองสถานการณ์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโหนดที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O แสดงดังรูปที่ 3.20 ถึงรูปที่ 3.21



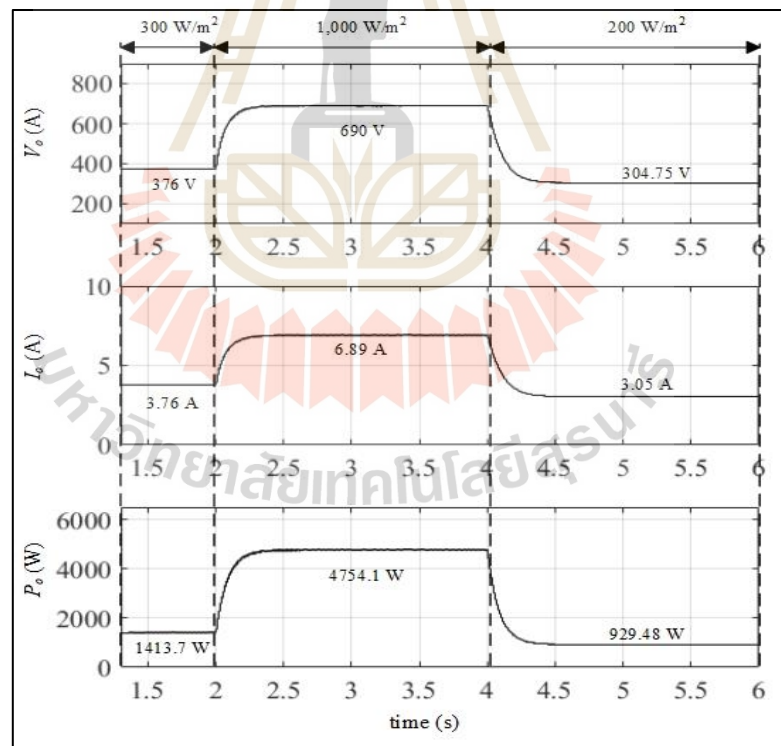
รูปที่ 3.19 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ



รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.20 ผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งช่วงความเข้มแสงได้ทั้งหมด 3 ช่วงคือ ช่วงความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$ ,  $1,000 \text{ W/m}^2$  และ  $200 \text{ W/m}^2$  จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าเมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง

แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ ) และทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ความเข้มแสงนั้น ๆ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ช่วงความเข้มแสงต่าง ๆ มีค่าดังนี้ กรณีความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $1,487.87 \text{ W}$  กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $9.808 \text{ A}$  แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $151.7 \text{ V}$  กรณีความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $5,000.04 \text{ W}$  กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $32.68 \text{ A}$  แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $153 \text{ V}$  กรณีความเข้มแสง  $200 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $979.297 \text{ W}$  กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $6.533 \text{ A}$  แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $149.9 \text{ V}$



รูปที่ 3.21 ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

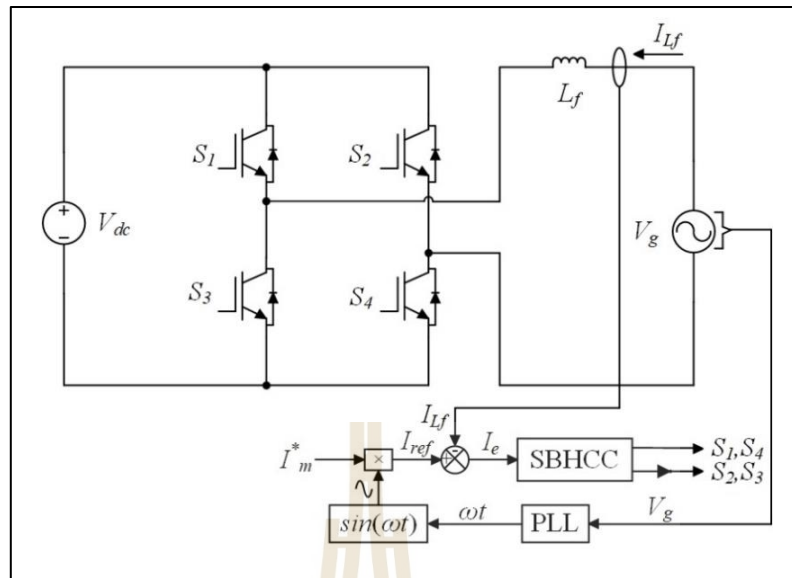
จากรูปที่ 3.21 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า พบว่าเมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความเข้มแสงเช่นกัน โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความเข้มแสงต่าง ๆ ดังนี้ กรณีความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ( $P_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $1,413 \text{ W}$  กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $I_o$ ) เท่ากับ  $3.76 \text{ A}$  แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $376 \text{ V}$  กรณีความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ( $P_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $4,754.1 \text{ W}$  กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $I_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $6.89 \text{ A}$  แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $690 \text{ V}$  กรณีความเข้มแสง  $200 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ( $P_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $929.48 \text{ W}$  กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $I_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $3.05 \text{ A}$  แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าเท่ากับ  $304.75 \text{ V}$

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากเกิดพลังงานสูญเสีย (power lost) ที่สวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.19 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และรูปที่ 3.20 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 3.21 ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันสามารถยืนยันได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลดตัวต้านทานเอาต์พุต แม้ว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมที่มีเปลี่ยนแปลง

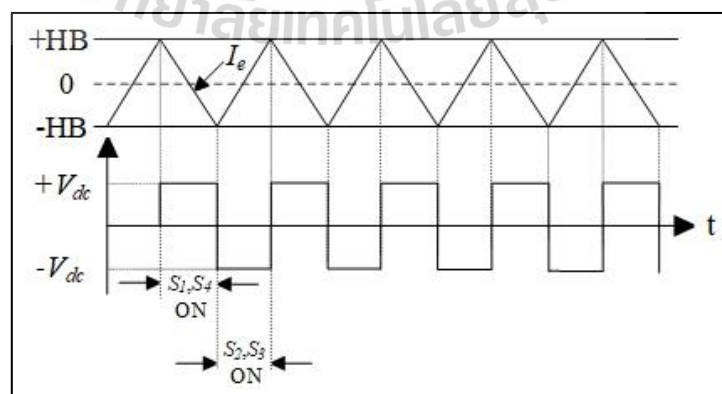
### 3.8 หลักการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเทอรีซิสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับชนิดหนึ่งเฟส

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis current controller: HCC) ถูกประยุกต์ใช้สำหรับสั่งทำงานสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส (dc-ac converter: inverter) ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแสดงดังรูปที่ 3.22



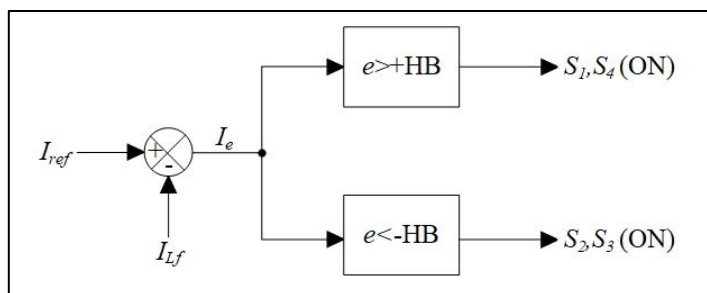
รูปที่ 3.22 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสเป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับมีลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์และยังทำให้ระบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ามีตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสสำหรับระบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยเทคนิควิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสจะอาศัยสัญญาณผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า (current error signal) ( $I_e$ ) แสดงดังรูปที่ 3.23 สำหรับการสร้างสัญญาณพัลส์ที่ต้องการของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส ซึ่งโครงสร้างการควบคุมกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิส





รูปที่ 3.24 โครงสร้างการควบคุมกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส

จากรูปที่ 3.24 สามารถอธิบายพารามิเตอร์และหลักการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสได้ดังนี้

$I_{ref}$	คือ	กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (A)
$I_{Lf}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสไฟฟ้า (A)
$I_e$	คือ	ค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสไฟฟ้า (A)
$HB$	คือ	แถบฮีสเตอร์ซิส (A)

หลักการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี

- กรณีที่สัญญาณผิดพลาดของกระแสไฟฟ้ามี่ค่ามากกว่าแถบบนของฮีสเตอร์ซิส ( $I_e > +HB$ ) ระบบจะดำเนินการสั่งสวิตช์  $S_1$  และ  $S_4$  ทำงาน และสวิตช์  $S_2$  และ  $S_3$  หยุดการทำงาน
- กรณีที่สัญญาณผิดพลาดของกระแสไฟฟ้ามี่ค่าน้อยกว่าแถบล่างของฮีสเตอร์ซิส ( $I_e < -HB$ ) ระบบจะดำเนินการสั่งสวิตช์  $S_1$  และ  $S_4$  หยุดการทำงานและสวิตช์  $S_2$  และ  $S_3$  ทำงาน

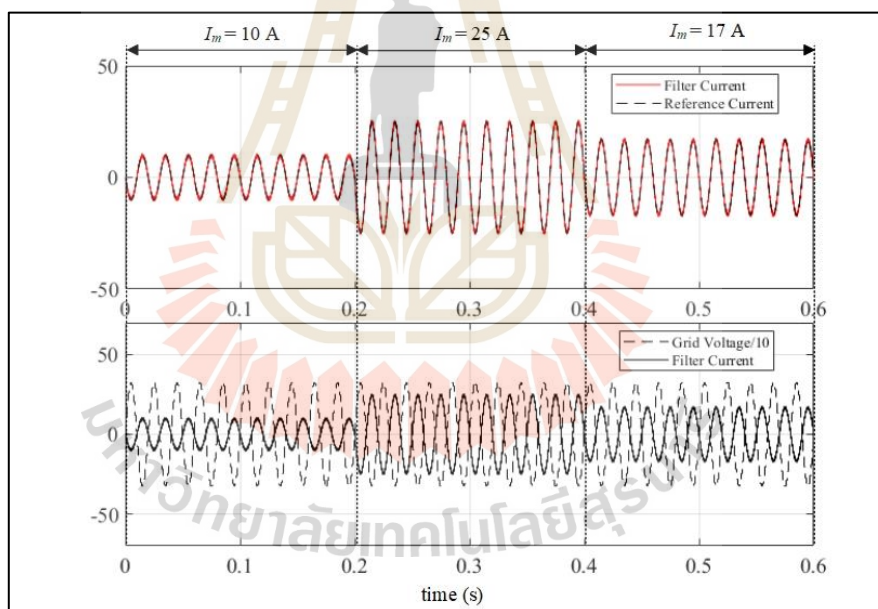
### 3.9 การจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส

เพื่อยืนยันผลการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า โดยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการจำลองสถานการณ์อ้างอิงตามรูปที่ 3.22 การจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าฮีสเตอร์ซิสมีพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้างดตารางที่ 3.4 ผลการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมกระแสฮีสเตอร์ซิสที่มีค่ากระแสอ้างอิงต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.25

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ระบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V_{dc}$ )	350	V
ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ( $L_f$ )	1.1	mH
ขนาดของกริดระบบไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟส ( $V_g$ )	230	$V_{rms}$
ความถี่ของระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $f$ )	50	Hz
แถบฮีสเตอร์ซิส ( $HB$ )	0.5	A

การจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าใน Simulink ซึ่งกำหนดให้ระบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสมีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดกระแสไฟฟ้า ( $I_m$ ) ทั้งหมด 3 ช่วง ช่วงที่ 1  $I_m$  เท่ากับ 10 A ช่วงที่ 2  $I_m$  เท่ากับ 25 A และช่วงสุดท้าย ช่วงที่ 3  $I_m$  เท่ากับ 17 A



รูปที่ 3.25 ผลการจำลองสถานการณ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส

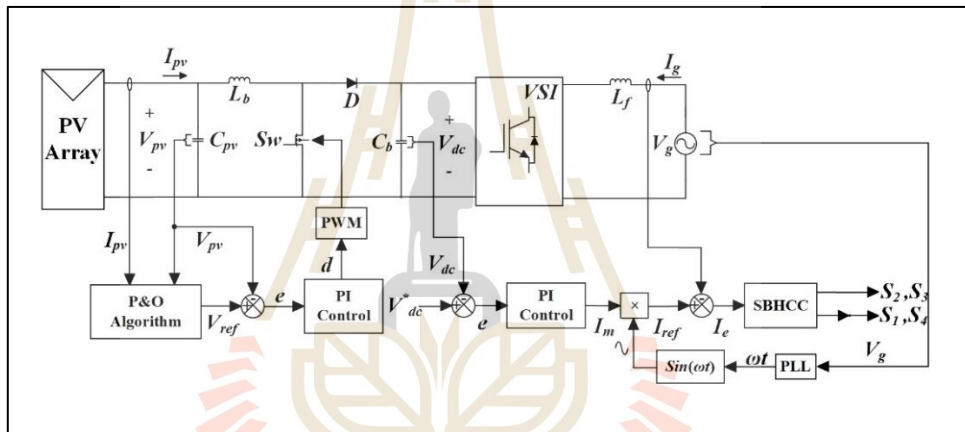
จากรูปที่ 3.25 ผลการจำลองสถานการณ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส เมื่อพิจารณารูปกระแสไฟฟ้าอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสไฟฟ้า ( $I_{Lf}$ ) พบว่าเมื่อขนาดกระแสไฟฟ้าอ้างอิงมีเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับขนาดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง โดยลักษณะสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสไฟฟ้ามีขนาดและมุมเฟสที่ตรงกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อพิจารณารูปกระแสไฟฟ้า

ที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสไฟฟ้ามีมุมเฟสกลับกัน 180 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้า

จากผลการจำลองสถานการณ์ยืนยันว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าทางด้านกระแสตรงไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ โดยมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1

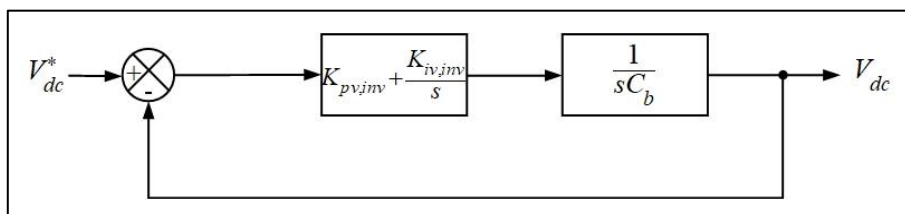
### 3.10 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

เมื่อพิจารณาระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) จะอาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมเช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า โดยโครงสร้างตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้าของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงแสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 โครงสร้างลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

จากรูปที่ 3.27 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปแรงดันไฟฟ้าของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงดังสมการที่ (3-51)

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{sK_{pv,inv} + K_{iv,inv}}{s^2 + \frac{K_{pv,inv}}{C_b}s + \frac{K_{iv,inv}}{C_b}} \quad (3-51)$$

จากสมการที่ (3-51) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$K_{pv,inv}$  คือ พารามิเตอร์ตัวควบคุมสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

$K_{iv,inv}$  คือ พารามิเตอร์ตัวควบคุมปริพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

เมื่อนำตัวหารของสมการที่ (3-51) มาเปรียบเทียบกับสมการที่ (3-48) สามารถออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดังสมการที่ (3-52) และสมการที่ (3-53)

$$K_{pv,inv} = 2\zeta\omega_{n,inv}C_b \quad (3-52)$$

$$K_{iv,inv} = \omega_{n,inv}^2 C_b \quad (3-53)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำหนดให้ค่าอัตราหน่วงของระบบควบคุม (damping ratio) ( $\zeta_{inv}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.8 และความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_{n,inv}$ ) มีค่าเท่ากับ  $2 \times \pi \times 5$  rad/s เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-52) และสมการที่ (3-53) สามารถหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอได้ดังนี้

$$K_{pv,inv} = 2 \times 0.8 \times 2 \times \pi \times 5 \times 1,800 \times 10^{-6} = 0.09$$

$$K_{iv,inv} = (2 \times \pi \times 5)^2 \times 1,800 \times 10^{-6} = 1.7765$$

### 3.11 การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส

การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสเพื่อให้ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะของสัญญาณคล้ายสัญญาณคลื่นไซน์ที่บริสุทธิ์ งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าตามงานวิจัย (S. Jena, N. Tiwary, K. Panigrahi, P. Sahu, 2020) โดยมีสมการการออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้างดังสมการที่ (3-54)

$$L_f = \frac{(V_{dc}^2 - V_g^2)}{4V_{dc}f_sHB} \quad (3-54)$$

จากสมการที่ (3-54) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$L_f$	คือ	ตัวกรองกระแสไฟฟ้า (H)
$V_{dc}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรง (V)
$V_g$	คือ	แรงดันไฟฟ้าค้ำยอดที่กริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (V)
$f_s$	คือ	ความถี่ในการสวิตช์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส (Hz)

การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าของงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ค่า แรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) มีค่าเท่ากับ 350 V แรงดันไฟฟ้าค้ำยอดที่กริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $V_g$ ) มีค่าเท่ากับ  $230\sqrt{2}$  V และความถี่ในการสวิตช์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส ( $f_s$ ) มีค่าเท่ากับ 10 kHz แลบฮีสเตอร์ซิส ( $HB$ ) มีค่าเท่ากับ 0.25 A เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-31) สามารถหาค่าพารามิเตอร์ตัวกรองกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$L_f = \frac{(350^2 - (230\sqrt{2})^2)}{4 \times 350 \times 10 \times 10^3 \times 0.25} = 4.77 \text{ mH}$$

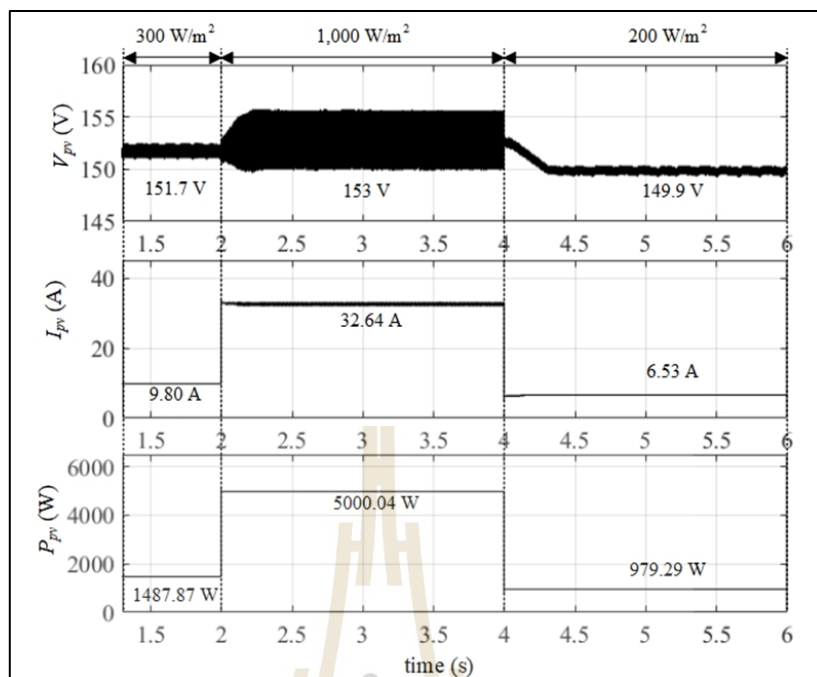




ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น

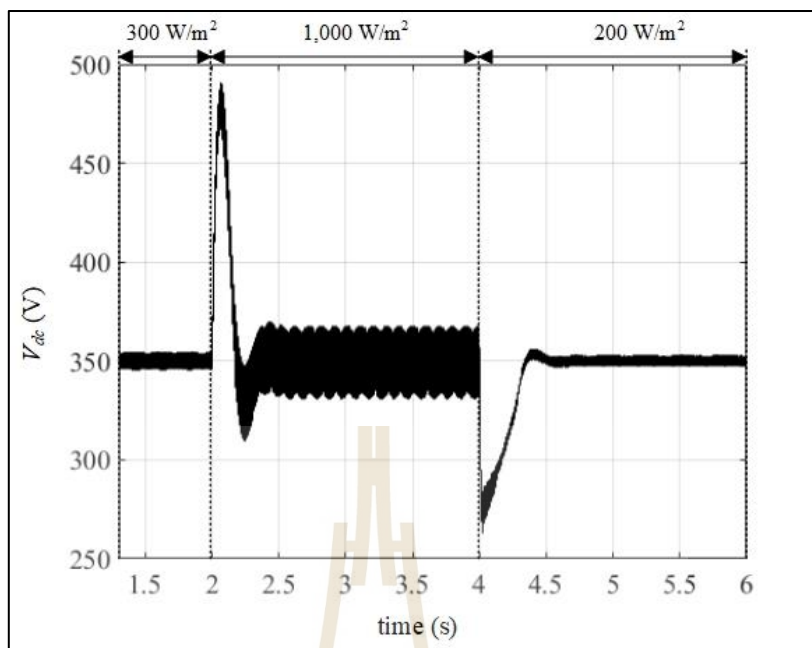
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ตัวเก็บประจุหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $C_{pv}$ )	4,000	$\mu\text{F}$
ขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $L_b$ )	2.8	mH
ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $C_b$ )	1,800	$\mu\text{F}$
ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ( $L_f$ )	4.77	mH
แรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $V_g$ )	230	$V_{\text{rms}}$
แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสไฟตรง ( $V_{dc}^*$ )	350	V
ขั้นการรบกวนแรงดันไฟฟ้า ( $\Delta V$ )	0.01	V
ความถี่สวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $f_{sw}$ )	10	kHz
พารามิเตอร์ตัวควบคุมสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $K_{pv,b}$ )	0.64	-
พารามิเตอร์ตัวควบคุมปริพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $K_{iv,b}$ )	40	-
พารามิเตอร์ตัวควบคุมสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $K_{pv,inv}$ )	0.09	-
พารามิเตอร์ตัวควบคุมปริพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $K_{iv,inv}$ )	1.7765	-
แถบฮีสเทอรีซิส ( $HB$ )	0.25	A

สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์กำหนดให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่  $25^\circ\text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงไปทั้งหมด 3 ช่วง คือ ช่วงความเข้มแสง  $300\text{ W/m}^2$ ,  $1,000\text{ W/m}^2$  และ  $200\text{ W/m}^2$  โดยมีกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.19 โดยผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธี P&O สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้นแสดงดังรูปที่ 3.29 ถึงรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.29 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

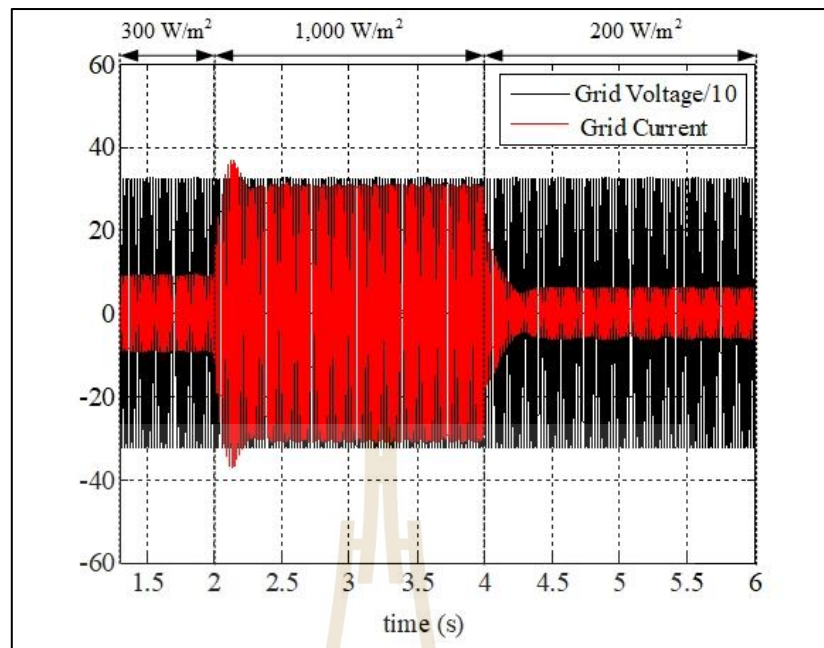
จากรูปที่ 3.29 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธี P&O มีประสิทธิภาพในการดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้ง 3 ช่วง ซึ่งช่วงความเข้มแสงที่ 1 ความเข้มแสง  $300 W/m^2$  มีค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 151.7 V ค่ากระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 9.80 A กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 1,487.87 W ช่วงความเข้มแสงที่ 2 ความเข้มแสง  $1,000 W/m^2$  มีค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 153 V ค่ากระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 32.64 A กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 5,000.04 W และช่วงความเข้มแสงที่ 3 ความเข้มแสง  $200 W/m^2$  มีค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 149.9 V ค่ากระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 6.53 A กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) มีค่าเท่ากับ 979.29 W



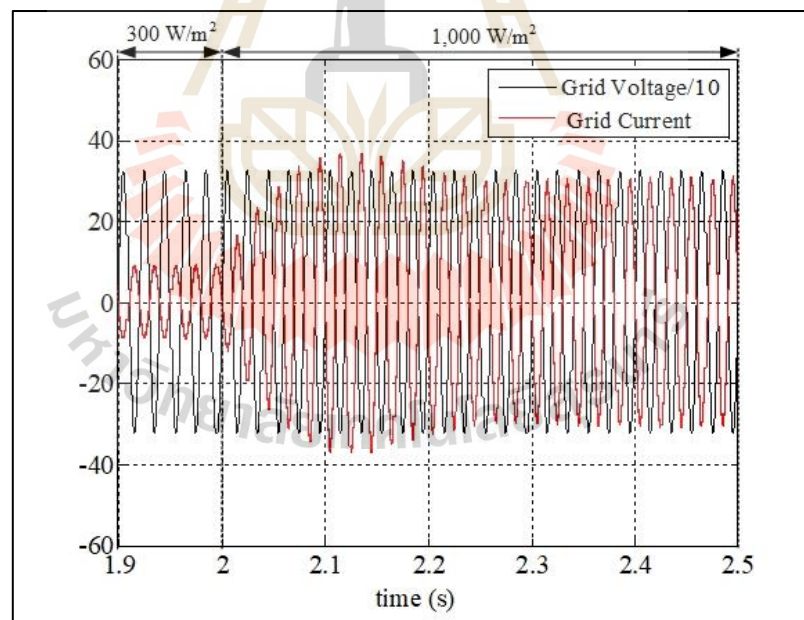
รูปที่ 3.30 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

จากรูปที่ 3.30 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ความเข้มแสงได้แก่  $300 W/m^2$ ,  $1,000 W/m^2$  และ  $200 W/m^2$  ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงให้มีค่าตามแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสไฟตรง โดยแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) มีค่าเท่ากับ  $350 V$  ที่สภาวะอยู่ตัวทั้ง 3 ช่วงความเข้มแสง

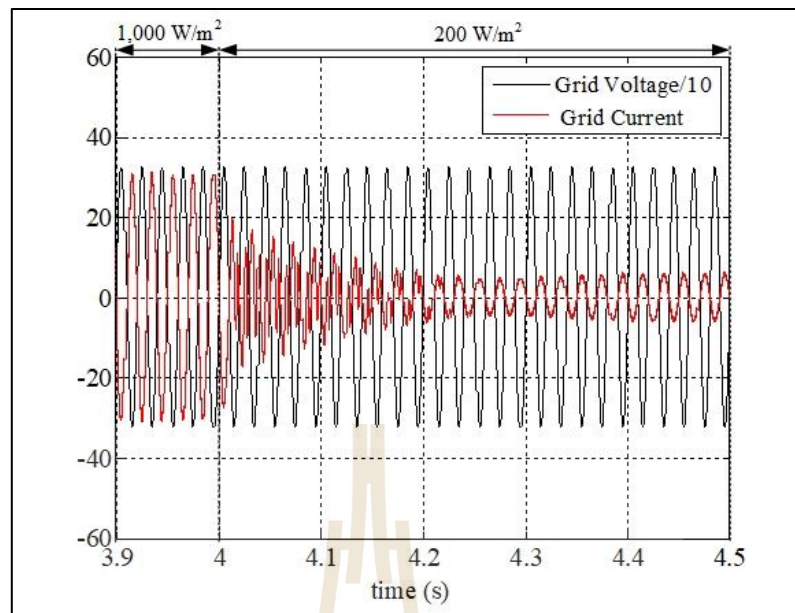
จากผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงแสดงให้เห็นถึงการมีค่าที่พุ่งเกินสูงกว่าที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวมิได้มีผลต่อการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่กิริตระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส เนื่องจากพลวัตของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิสมีความช้ากว่าลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงเป็นอย่างมาก การปรับปรุงสมรรถนะการตอบสนองของระบบจะเป็นข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อยอดจากวิทยานิพนธ์ เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่การหาวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมเท่านั้น การเปรียบเทียบสมรรถนะของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในวิทยานิพนธ์จะดำเนินการปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมสำหรับการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่ยังคงอาศัยลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงที่เหมือนกันตลอดงานวิจัยวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.31 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส



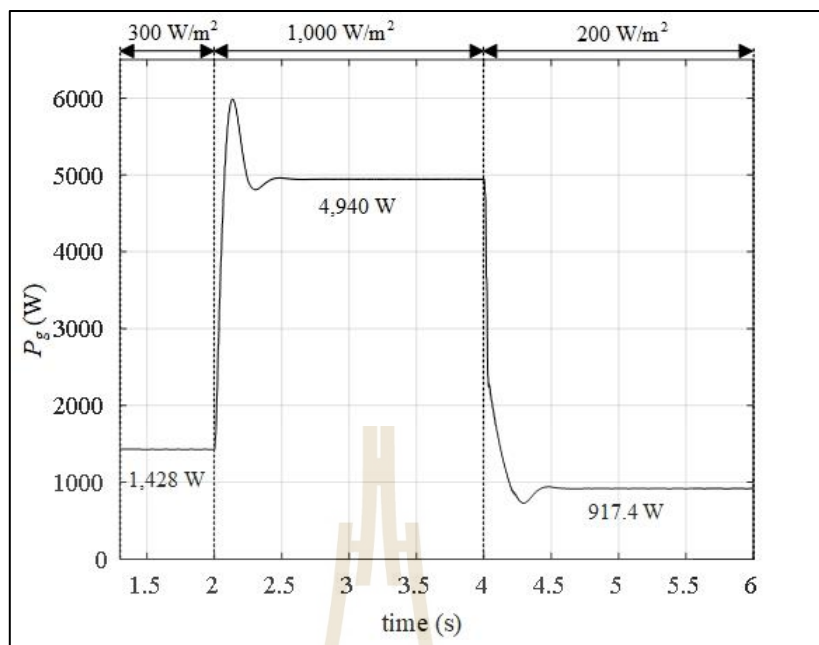
รูปที่ 3.32 รูปขยายของรูปที่ 3.31 กรณีเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $300 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$



(ข)

รูปที่ 3.33 รูปขยายของรูปที่ 3.31 กรณีเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $1,000 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$

จากรูปที่ 3.31 ถึงรูปที่ 3.33 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส แสดงให้เห็นมุมเฟสระหว่างผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสกับผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีมุมกลับกัน  $180$  องศา ซึ่งแสดงถึงว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ โดยมีขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีขนาดกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสดังนี้ เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงลดลงขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีขนาดลดลง

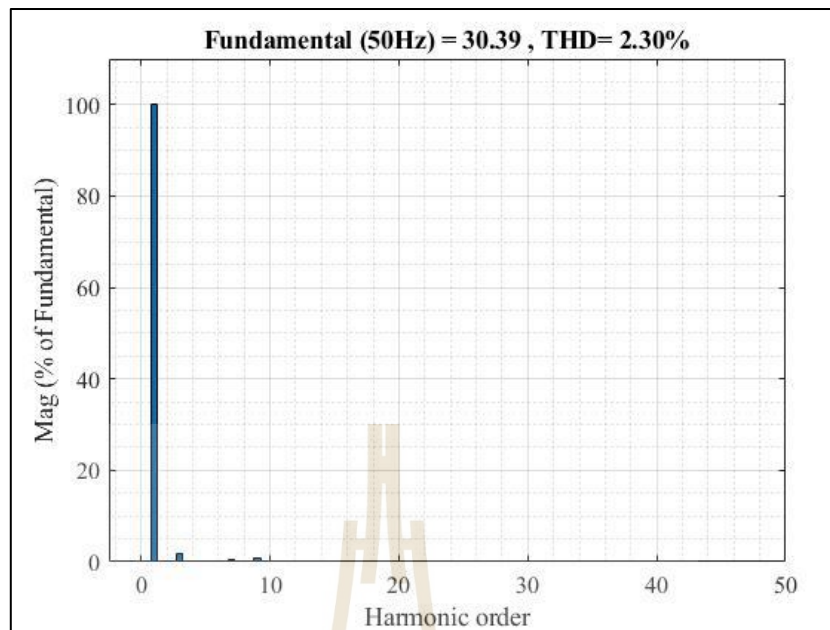


รูปที่ 3.34 ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

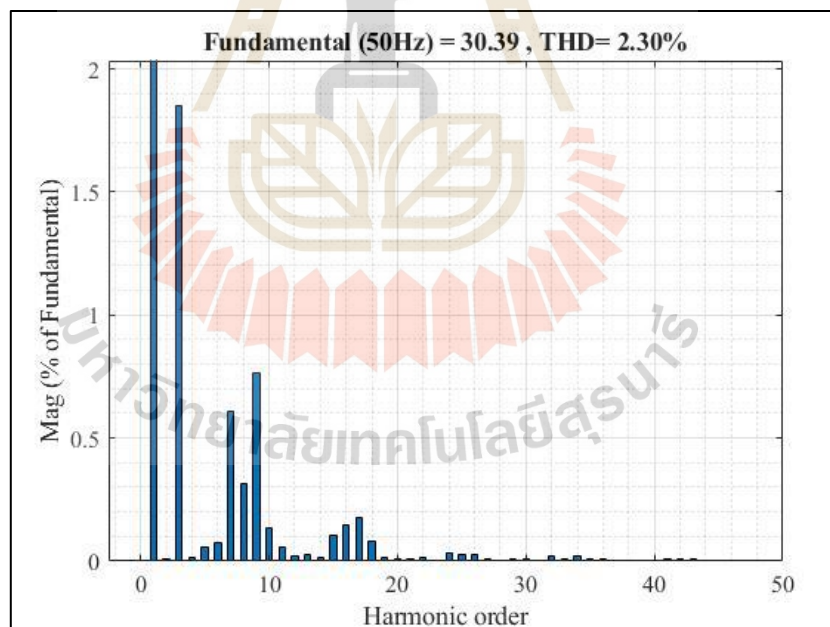
จากรูปที่ 3.34 ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ช่วงที่ 1 ความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$  มีค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $1,428 \text{ W}$  ช่วงที่ 2 ความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  มีค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $4,940 \text{ W}$  และช่วงที่ 3 ความเข้มแสง  $200 \text{ W/m}^2$  มีค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้า ( $P_g$ ) เท่ากับ  $917.4 \text{ W}$  เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่าย พบว่าค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันซึ่งหมายถึงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิส

เมื่อพิจารณาค่าฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส หนึ่งคลื่นไซน์ในช่วงเวลาที่ 3 s ถึง 3.02 s สามารถแสดงกราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งพิจารณาที่ความถี่มูลฐาน ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) ดังรูปที่ 3.35 ถึงรูปที่ 3.36





รูปที่ 3.35 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส



รูปที่ 3.36 รูปขยายกราฟสเปกตรัมของรูปที่ 3.35

จากรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กิริตระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส เมื่อพิจารณามาตรฐานการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้ากิริตระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย โดยอ้างอิงจากมาตรฐานเลขที่ มอก. 2606-2557 พบว่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กิริตระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแต่ละอันดับและฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กิริตระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าอยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

### 3.13 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธี P&O เป็นตัวแทนวิธีแบบวนซ้ำ ซึ่งวิธีดังกล่าวมีความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพสำหรับการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยบทนี้จะกล่าวถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขั้นเดียวและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิส และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดด การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริตระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขั้น จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้องทั้งสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวของผลการตอบสนองและผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธี P&O สามารถถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้องภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์หัวข้อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขั้นเดียวและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ได้รับการตีพิมพ์แล้วดังนี้

- ธนาธิป บุญทวี, โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, จักรกริช ภัคิติโต, กองพันธ์ อารีรักษ์, และกองพล อารีรักษ์, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียวโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 (EECON44), หน้า 61-64.

## บทที่ 4

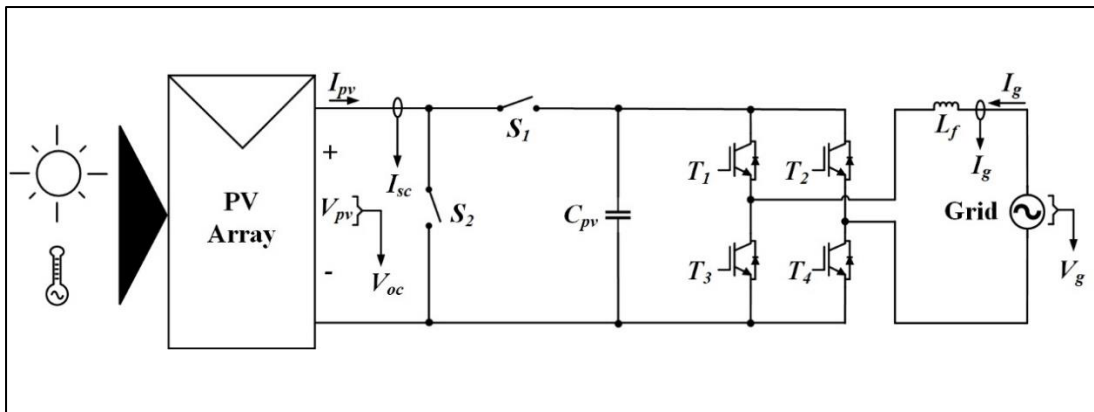
### ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ

#### 4.1 บทนำ

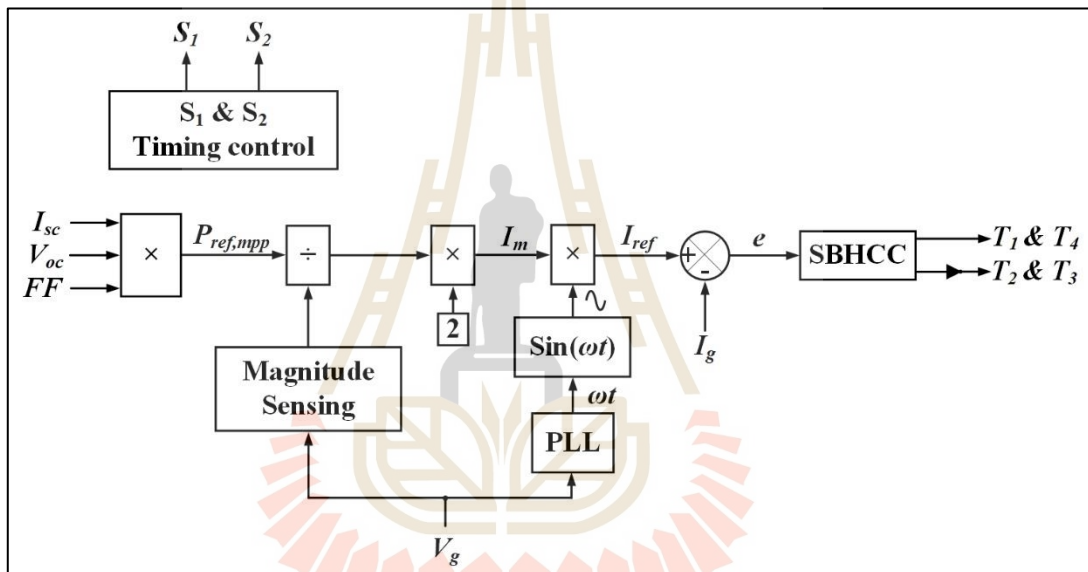
การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำเป็นอีกหนึ่งวิธีการสำหรับการดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธีแบบวนซ้ำ โดยเนื้อหาและรายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึง ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียวที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ ปัญหาที่พบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียวที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ แนวทางการแก้ไขปัญหาของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (FOCV method) ซึ่งวิทยานิพนธ์จะเรียกวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรว่าวิธี FOCV ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ของวิธี FOCV ในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น

#### 4.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียวประกอบไปด้วย 2 ภาควงจรไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.1 ภาควงจรไฟฟ้าที่ 1 ในรูปที่ 4.1(ก) ภาควงจรไฟฟ้ากำลังประกอบไปด้วย 4 ส่วน ส่วนที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส ส่วนที่ 3 ตัวกรองกระแสไฟฟ้า และส่วนที่ 4 กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ภาควงจรไฟฟ้าที่ 2 ในรูปที่ 4.1(ข) ภาควงจรไฟฟ้าควบคุมสำหรับควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ ก: วงจรไฟฟ้าภาคกำลัง ข: วงจรไฟฟ้าภาคควบคุม

#### 4.2.1 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ

จากรูปที่ 4.1 ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียว ซึ่งวิธีการแบบไม่วนซ้ำดังกล่าวได้อ้างอิงหลักการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสามเฟสของงานวิจัยในอดีต (A. Vijayakumari, 2020) ซึ่งผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำเป็นวิธีที่ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบวนซ้ำ สำหรับหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำอาศัยการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่

จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{ref,mpp}$ ) จากการตรวจจับวัตต์แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) และการตรวจจับวัตต์กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คำนวณจากสมการที่ (4-1)

$$P_{ref,mpp} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (4-1)$$

จากสมการที่ (4-1) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$P_{ref,mpp}$	คือ	กำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (W)
$V_{oc}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
$I_{sc}$	คือ	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$FF$	คือ	ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากคุณลักษณะข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โดยกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถถ่ายโอนไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-2)

$$P_{mpp} = V_{mpp} \times I_{mpp} = V_{rms} \times I_{rms} \times \cos(\theta) = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \times \frac{I_m}{\sqrt{2}} \times \cos(\theta) \quad (4-2)$$

จากสมการที่ (4-2) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$P_{mpp}$	คือ	กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (W)
$V_{mpp}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)
$I_{mpp}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)
$V_{rms}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองของกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (V)
$I_{rms}$	คือ	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสองของกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (A)
$V_m$	คือ	ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (V)
$I_m$	คือ	ขนาดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (A)
$\theta$	คือ	มุมเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้า

การดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่องริตระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขั้นเดียวจะอาศัยการควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิส ซึ่งตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสสามารถทำให้ค่าตัวประกอบ



กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 เนื่องจากสัญญาณไซน์ของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซีสมีมูฟเฟสเดียวกันกับมูฟเฟสของสัญญาณไซน์ของแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งมีขนาดของสัญญาณไซน์กระแสไฟฟ้าอ้างอิงของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซีสคำนวณได้ ดังสมการที่ (4-3)

$$I_m = \frac{2 \times P_{mpp}}{V_m} \quad (4-3)$$

จากสมการที่ (4-3) เมื่อนำขนาดกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่คำนวณได้คูณกับสัญญาณไซน์หนึ่งหน่วยที่มีมูฟเฟสเดียวกันกับสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะได้สัญญาณไซน์ของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบไฟฟ้า ซึ่งตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซีสจะดำเนินการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่คำนวณได้กับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับขอบบนและขอบล่างของแถบฮีสเตอร์ซีสของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซีสสำหรับสั่งทำงานสวิตช์ของวงจรแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสตามรูปที่ 4.1(ข)

### 4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ

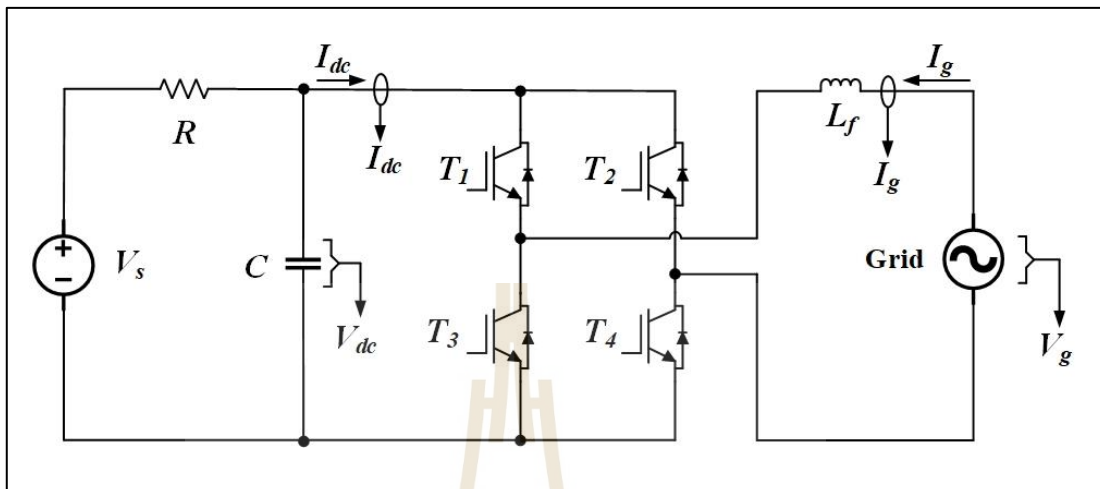
การตรวจสอบความถูกต้องของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เริ่มดำเนินการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ โดยเริ่มดำเนินการศึกษาจากกรณีแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อที่จะตรวจสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากทางด้านกระแสตรงเป็นทางด้านกระแสสลับหนึ่งเฟส ซึ่งระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังกล่าวสามารถพิจารณาการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าด้วยการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) ให้กับระบบควบคุมได้โดยตรง ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงดังกล่าวจะเป็นตัวระบุถึงกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้าสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งรายละเอียดสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3.1 และกรณีแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3.2

#### 4.3.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

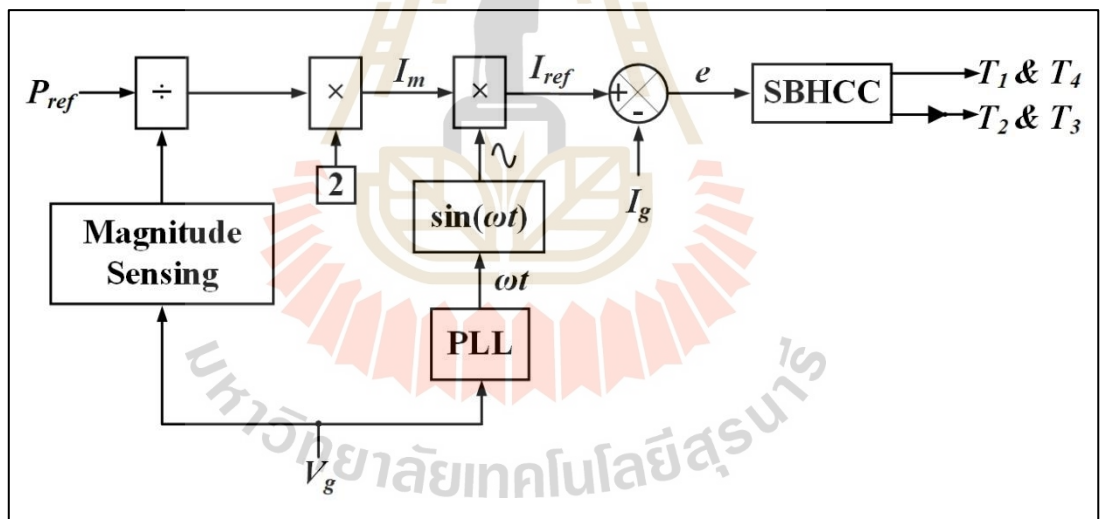
การตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า โดยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ภาควงจรไฟฟ้า



ภาควงจรไฟฟ้าที่ 1 วงจรไฟฟ้าภาคกำลังแสดงดังรูปที่ 4.2 ภาควงจรไฟฟ้าที่ 2 วงจรไฟฟ้าภาคควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 วงจรไฟฟ้าภาคกำลังกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



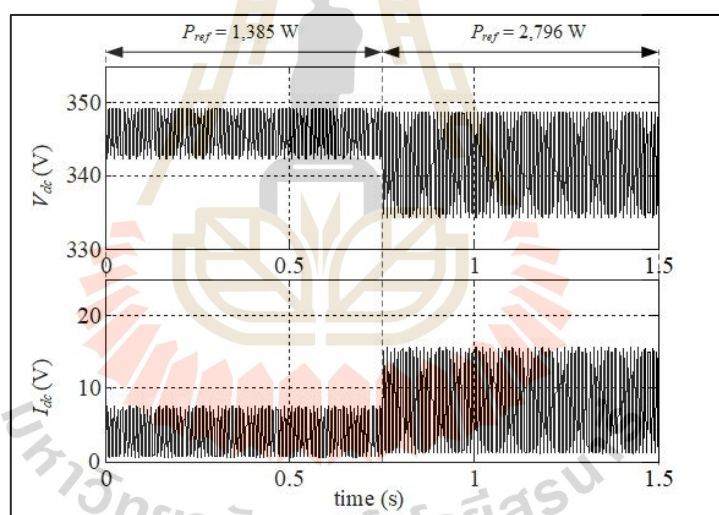
รูปที่ 4.3 วงจรไฟฟ้าภาคควบคุมกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของประสิทธิภาพระบบควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) ให้กับระบบการควบคุม โดยพิจารณาให้ระบบควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงจาก 1,385 W เป็น 2,796 W ณ เวลาที่ 0.75 s ซึ่งพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการตอบสนองของระบบควบคุม

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ระบบไฟฟ้ากรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

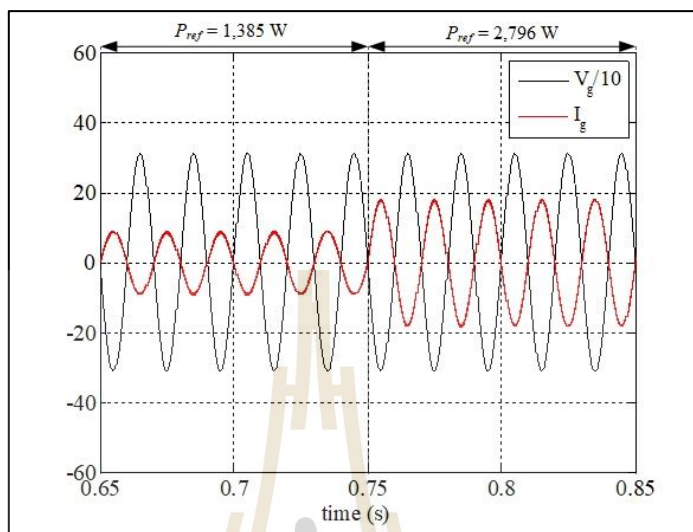
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ )	350	V
ความต้านทาน ( $R$ )	1	$\Omega$
ตัวเก็บประจุ ( $C$ )	500	$\mu\text{F}$
ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ( $L_f$ )	5	mH
ขนาดของกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $V_g$ )	220	$V_{\text{rms}}$
ความถี่ระบบไฟฟ้า ( $f$ )	50	Hz
แถบฮีสเตอร์ซิส ( $HB$ )	0.5	A



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

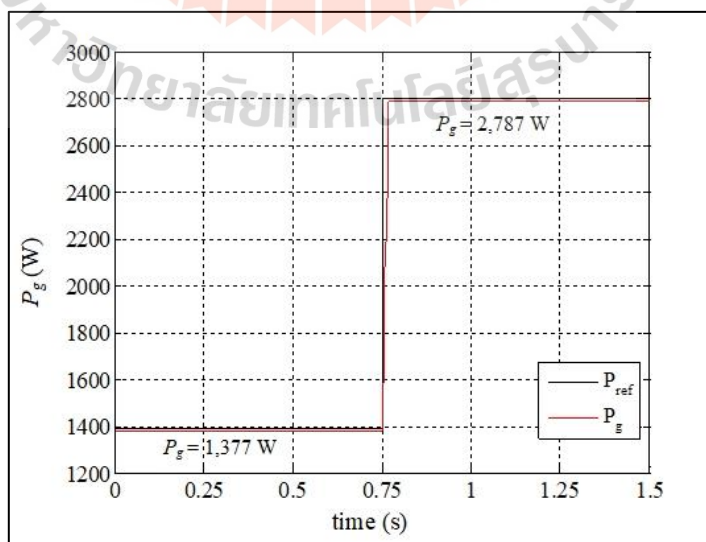
จากรูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง พบว่าตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสสามารถดึงกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งการดึงกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเตอร์ซิสดังกล่าวส่งผลกระทบต่อรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านกระแสตรง ซึ่งทำให้รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีลักษณะการแกว่งไกวของสัญญาณเป็นคลื่นสัญญาณไซน์ที่มีค่าความถี่ของสัญญาณเป็น 2 เท่าของความถี่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา (Gurhan Ertasgin, David M. Whaley, Nesimi Ertugrul

and Wen L. Soong, 2019) ซึ่งพฤติกรรมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณกระแสไฟฟ้าดังกล่าวทำให้ระบบไม่สามารถตรวจจับวัดเป็นกำลังไฟฟ้าทางด้านกระแสตรงได้



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามารถสังเกตได้จากเมื่อกำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะมีขนาดเพิ่มขึ้น

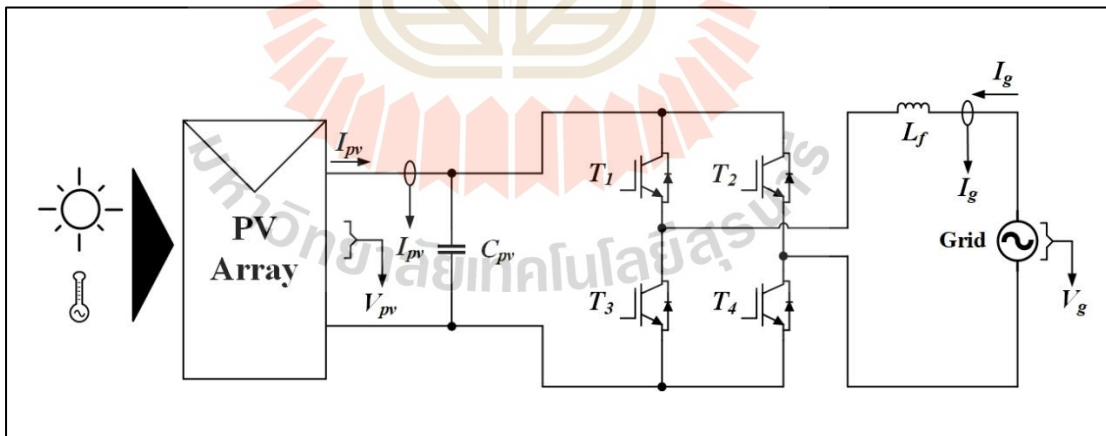


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

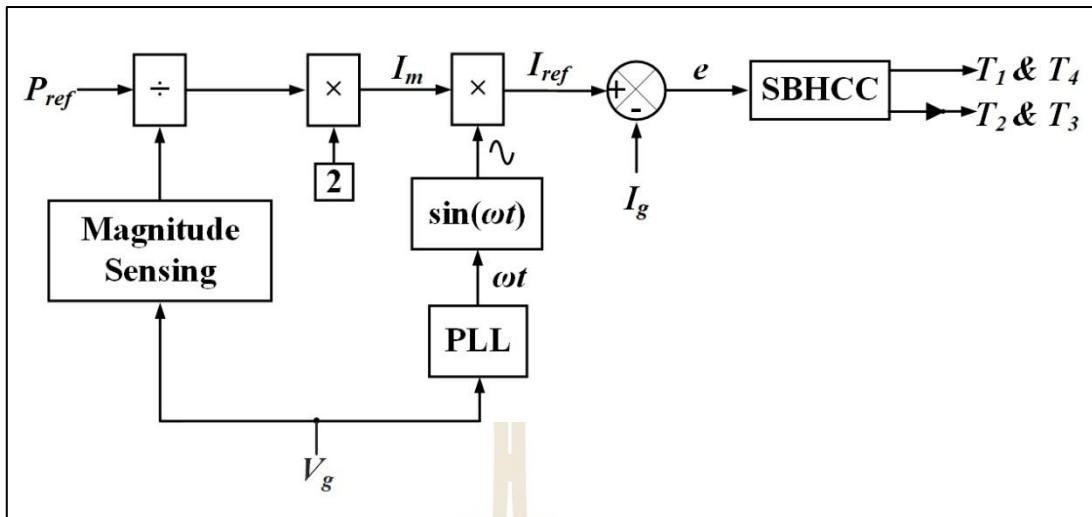
จากรูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) ของระบบเท่ากับ 1,385 W กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) มีค่าเท่ากับ 1,377 W และกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) ของระบบเท่ากับ 2,796 W กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) มีค่าเท่ากับ 2,787 W เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอ้างอิงกับ กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส พบว่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงเล็กน้อย เนื่องมาจากรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีลักษณะของสัญญาณที่ไม่เป็นสัญญาณไซน์ในอุดมคติ (pure sine wave) ส่งผลให้มีกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าน้อยกว่า ซึ่งผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าสามารถยืนยันได้ว่าระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสตามค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบที่กำหนด

#### 4.3.2 แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์

การยืนยันประสิทธิภาพของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงพิจารณากรณีแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้าคือ แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อตรวจสอบว่าระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบไปด้วย 2 ภาควงจรไฟฟ้า ภาควงจรไฟฟ้าที่ 1 วงจรไฟฟ้าภาคกำลังแสดงดังรูปที่ 4.7 ภาควงจรไฟฟ้าที่ 2 วงจรไฟฟ้าภาคควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 วงจรไฟฟ้าภาคกำลังกรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์

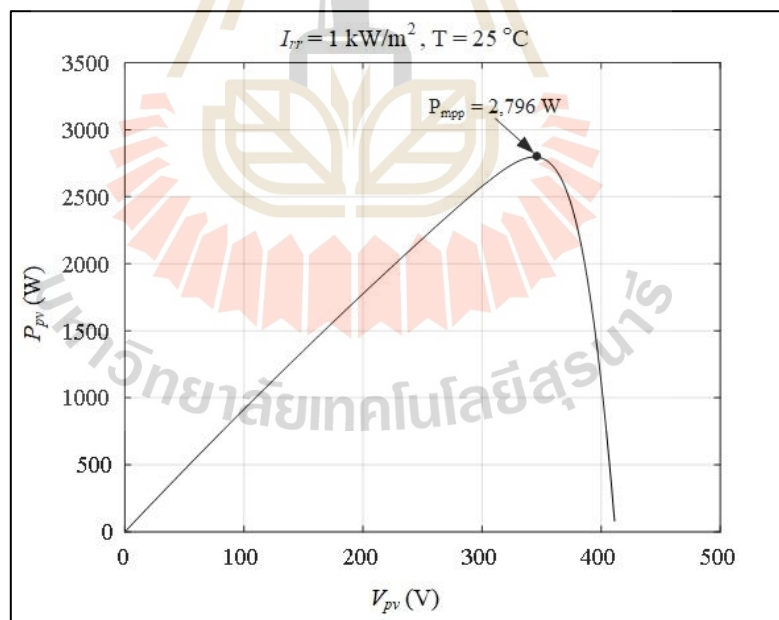


รูปที่ 4.8 วงจรไฟฟ้าภาคควบคุมกรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำกรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีความเข้มแสงที่พิจารณาคงที่เท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  ซึ่งการจำลองสถานการณ์กำหนดให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าอ้างอิงจาก  $1,385 \text{ W}$  เป็น  $2,796 \text{ W}$  ณ เวลาที่  $0.75 \text{ s}$  ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิง  $1,385 \text{ W}$  เป็นค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ประมาณครึ่งหนึ่งของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่พิจารณากำลังไฟฟ้าอ้างอิงเท่ากับ  $2,796 \text{ W}$  ซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่พิจารณา โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสังเกตได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4.9 และกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งพารามิเตอร์ของระบบสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 4.2 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ กรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.13 ตามลำดับ

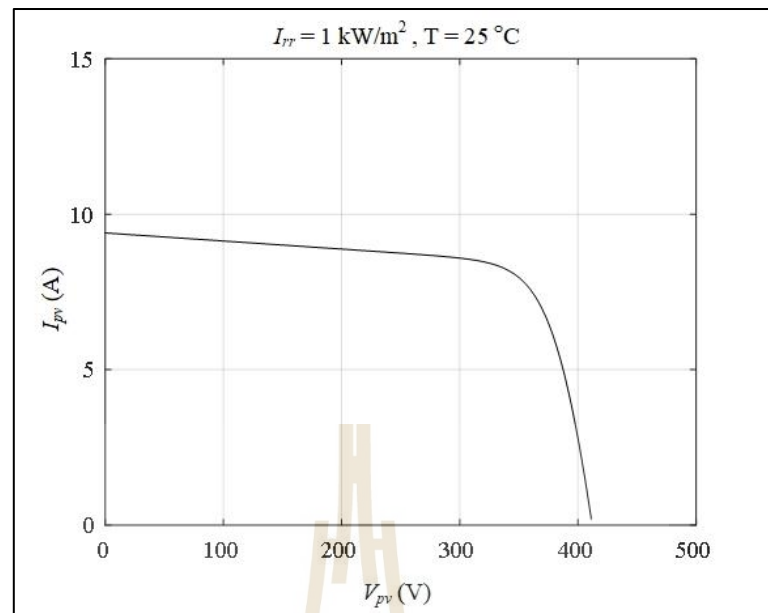
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียว

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mpp}$ )	349.59	W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ )	43	V
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	51.5	V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mpp}$ )	8.13	A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	9.4	A
จำนวนแผงต่ออนุกรม ( $N_s$ )	8	แผง
จำนวนแผงต่อขนาน ( $N_p$ )	1	แผง
ตัวเก็บประจุหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $C$ )	500	$\mu\text{F}$
ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ( $L_f$ )	5	mH
ขนาดของกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $V_g$ )	220	$V_{\text{rms}}$
ความถี่ระบบไฟฟ้า ( $f$ )	50	Hz
แถบฮีสเตอร์ซิส ( $HB$ )	0.5	A

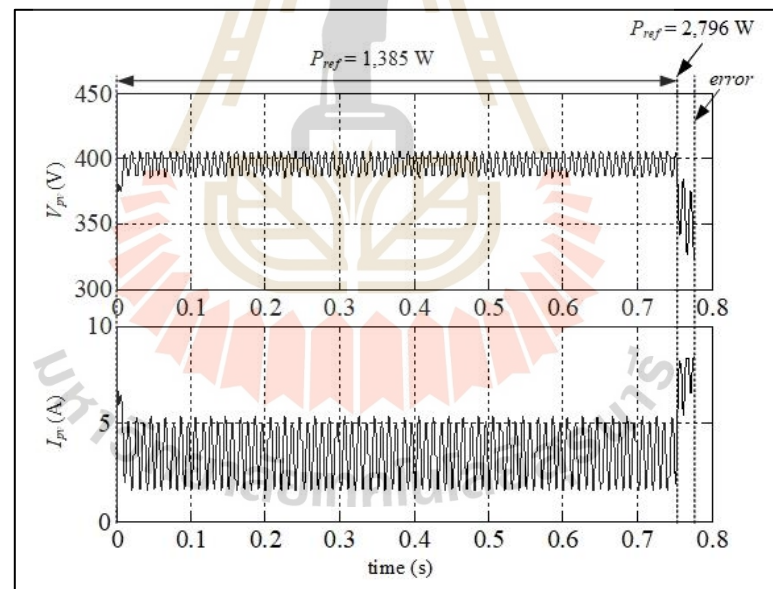


รูปที่ 4.9 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์





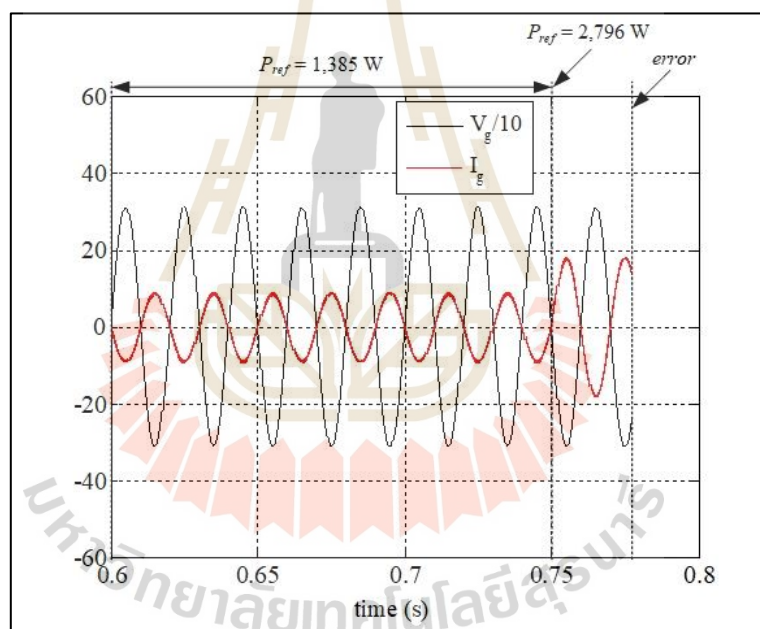
รูปที่ 4.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.11 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ากรณีกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) เท่ากับ 1,385 W ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าฮีสเทอรีซิสสามารถควบคุมการดึงกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ฉีดเข้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าได้ตามกำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบควบคุม กรณีกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2,796 W พบว่า

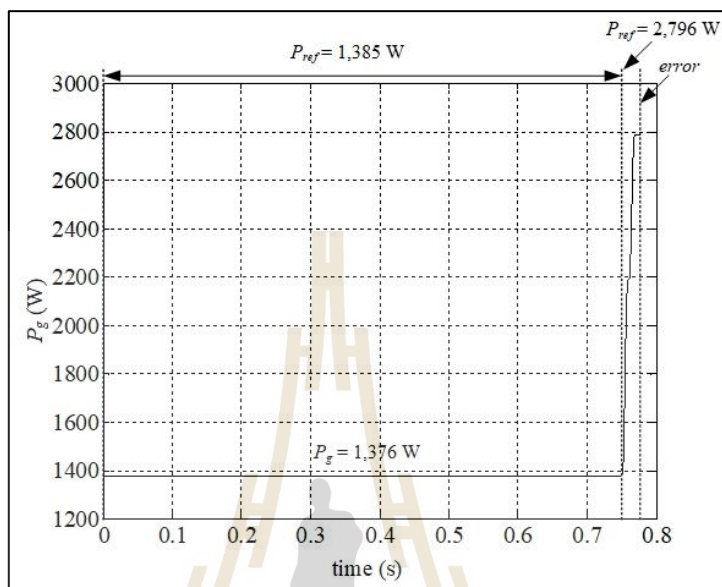
ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสมีการดึงกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยขนาดกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าฮิสเตอร์ซิสส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิส เมื่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดสภาวะการจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่พอเพียงพอต่อความต้องการหรือสภาวะกระแสไฟฟ้าอิมตัวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสภาวะกระแสไฟฟ้าอิมตัวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวสามารถสังเกตได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 4.10 โดยกระแสไฟฟ้าอิมตัวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวจะมีค่าเข้าใกล้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลกระทบของกระแสไฟฟ้าอิมตัวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสไม่สามารถควบคุมการดึงกระแสไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.12 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส พบว่ากรณีกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) เท่ากับ 1,385 W ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้ากริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ตามค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ กำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 2,796 W ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าอ้างอิงของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงดังกล่าวทำให้ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสมีความพยายามดึงกระแสไฟฟ้าให้มีขนาดกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้า

หนึ่งเฟสมีขนาดเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ เมื่อกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เกิดสภาวะการอิ่มตัวของกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลกระทบต่อตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิสไม่สามารถควบคุมการดึงกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้



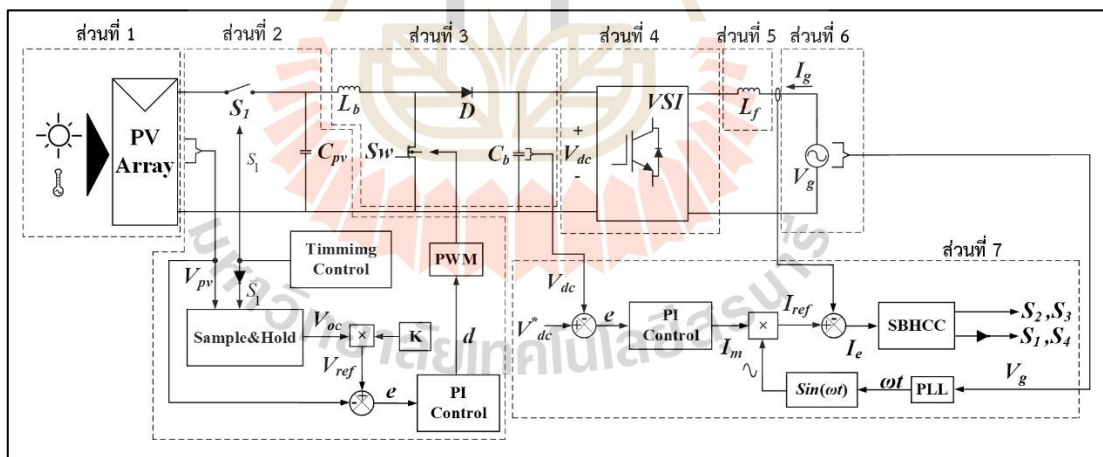
รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส กรณีแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส พบว่ากรณีกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) เท่ากับ 1,385 W ระบบสามารถควบคุมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยมีกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ 1,376 W กรณีกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) เท่ากับ 2,796 W ระบบควบคุมการตามรอยตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำไม่สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าได้ เนื่องจากระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำไม่สามารถควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสามารถยืนยันได้ว่าระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบขั้นเดียวไม่สามารถดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ ต่าง ๆ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำดังกล่าว โดยการเพิ่มวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.4 โครงสร้างวงจรภาคกำลังจึงกลายเป็นแบบสองขั้น

#### 4.4 โครงสร้างวงจรภาคกำลังแบบสองชั้นที่มีการควบคุมตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ

จากปัญหาการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ไม่สามารถดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาหาแนวทางการแก้ไขของปัญหาดังกล่าวด้วยการเพิ่มวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบที่พิจารณาระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสสองชั้นแสดงดังรูปที่ 4.14 โดยยังคงไว้ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ จากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยพบว่าที่วิธี FOCV (Fractional open-circuit voltage method: FOCV method) (Ahsan, N., Hadeed, S., Ali Faisal, M., Nisar, A. 2020) เป็นอีกหนึ่งวิธีในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำและสามารถทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าได้ วิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้วิธี FOCV เป็นตัวแทนวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ โดยวิธี FOCV จะอาศัยหลักการปรับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มตรวจสอบวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV จะกล่าวในหัวข้อที่ 4.5

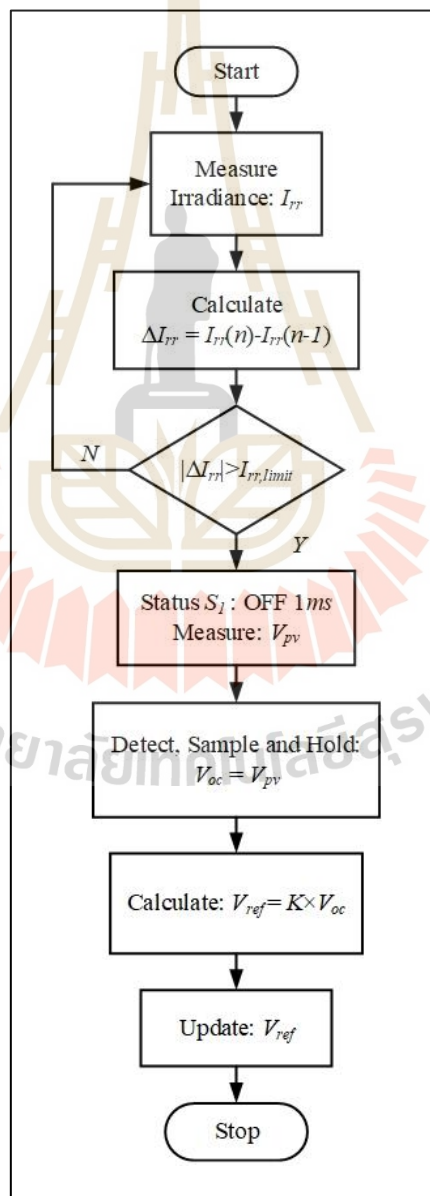


รูปที่ 4.14 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น

#### 4.5 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV

หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV โดยมีขั้นตอนการทำงานโดยการตรวจสอบความเข้มแสง ( $I_{rr}$ ) สำหรับคำนวณผลต่างของความเข้มแสง ( $\Delta I_{rr}$ ) ระหว่างความเข้มแสงคาบเวลา

ปัจจุบัน ( $I_{rr}(n)$ ) กับความเข้มแสงคาบเวลาก่อนหน้า ( $I_{rr}(n-1)$ ) เมื่อผลต่างความเข้มแสงเกินกว่าค่าความเข้มแสงที่กำหนด ระบบจะดำเนินการสั่งการทำงานสวิตช์  $S_1$  เปิดวงจรเป็นระยะเวลา 1 ms สำหรับตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์และดำเนินการคงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรไฟฟ้าจนกว่าจะมีการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรในรอบถัดไป ซึ่งแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า  $K$  เท่าของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและระบบจะดำเนินการอัปเดตแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและระบบจะหยุดการทำงาน ซึ่งมีแผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมวิธี FOCV แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภาพการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV

วิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเป็นวิธีการที่มีความปลอดภัย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ซึ่งวิธีดังกล่าวมีหลักการคือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ ) มีค่าเท่ากับ  $K$  เท่าของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) แสดงสมการที่ (4-1)

$$V_{mpp} \cong K \times V_{oc} \quad (4-1)$$

ดังนั้น 
$$K = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \quad (4-2)$$

จากสมการที่ (4-1) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$K$  คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

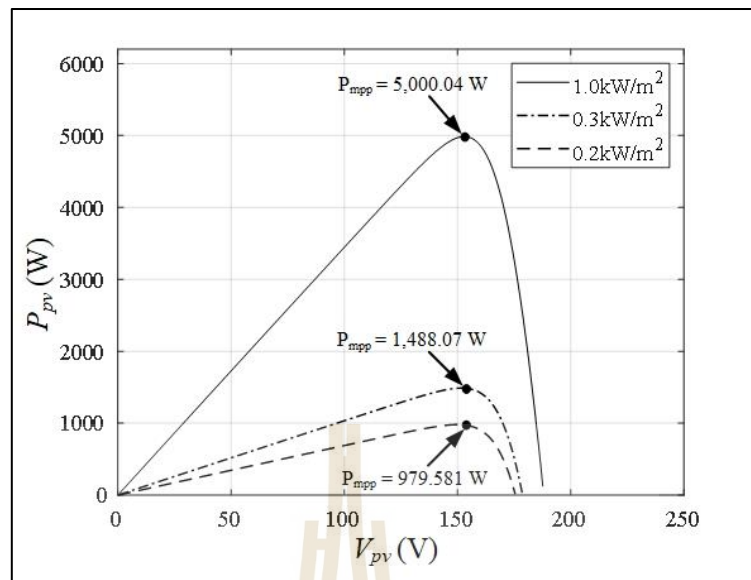
$V_{oc}$  คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

โดยทั่วไป  $K$  มีค่าระหว่าง 0.75-0.85 ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิ ซึ่งวิธี FOCV จะอาศัยวงจรตั้งเวลา (Timer) สำหรับจับเวลาในการตัดวงจรออกชั่วคราวเพื่อตรวจจับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

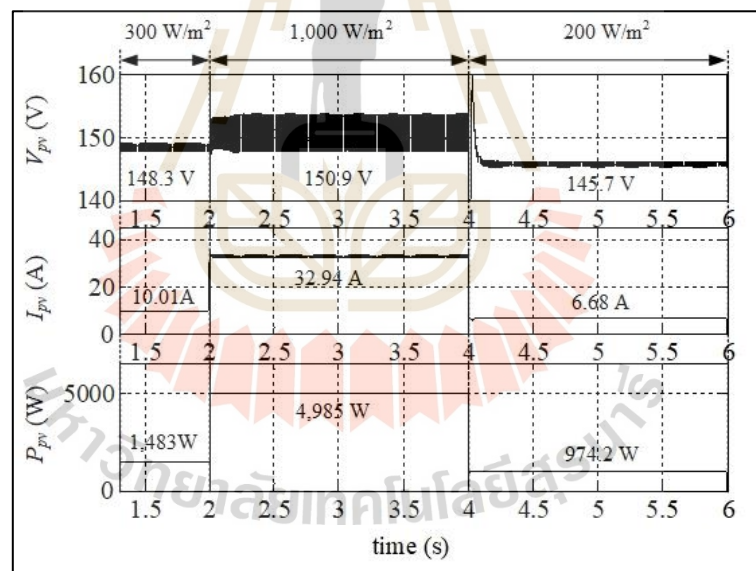
#### 4.6 การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV

สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขั้วด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV ดังรูปที่ 4.14 โดยมีพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV แสดงดังตารางที่ 3.4 ในบทที่ 3 กำหนดให้ความเข้มแสงในการพิจารณาทั้งหมด 3 ช่วง คือ ช่วงความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$ ,  $1,000 \text{ W/m}^2$  และ  $200 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  ซึ่งแสดงกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.16 นอกจากนี้กำหนดให้ค่า  $K$  ของระบบมีค่าเท่ากับ 0.83 ซึ่งค่าดังกล่าวได้มาจากคำนวณจากกรณีเงื่อนไขความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  โดยการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV แสดงในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.21 ตามลำดับ





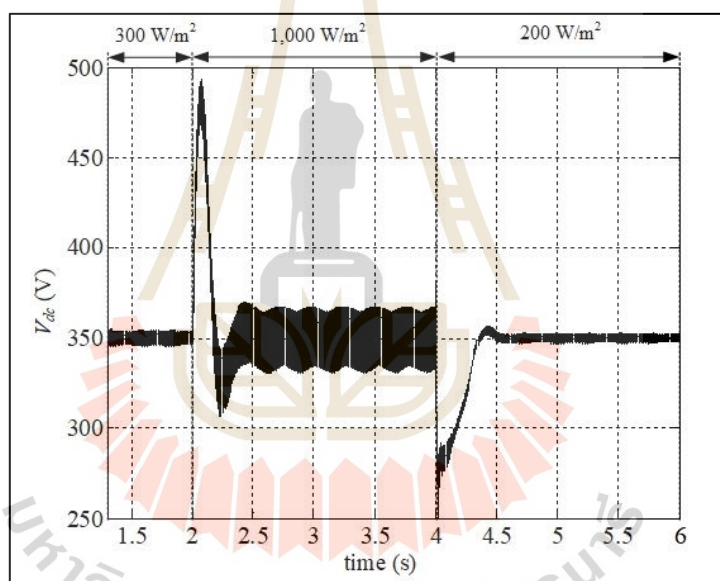
รูปที่ 4.16 กราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

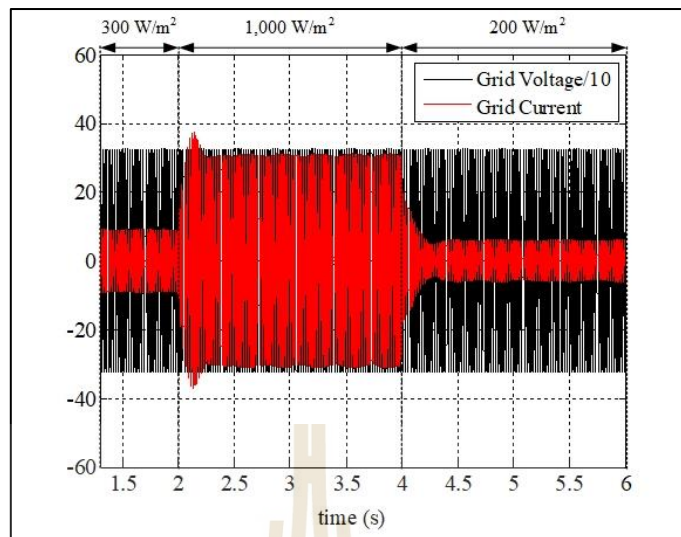
จากรูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV มีประสิทธิภาพในการดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ประกอบไปด้วยความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$ ,  $1,000 \text{ W/m}^2$  และ  $200 \text{ W/m}^2$  ซึ่งช่วงความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$  มีแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เท่ากับ

148.3 V กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) เท่ากับ 10.01 A และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) เท่ากับ 1,483 W ช่วงความเข้มแสง 1,000 W/m<sup>2</sup> มีแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เท่ากับ 150.9 V กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) เท่ากับ 32.94 A และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) เท่ากับ 4,985 W ช่วงความเข้มแสง 200 W/m<sup>2</sup> มีแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เท่ากับ 145.7 V กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) เท่ากับ 6.68 A และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) เท่ากับ 974.2 W จากผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงมีการเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มแสงลดลงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

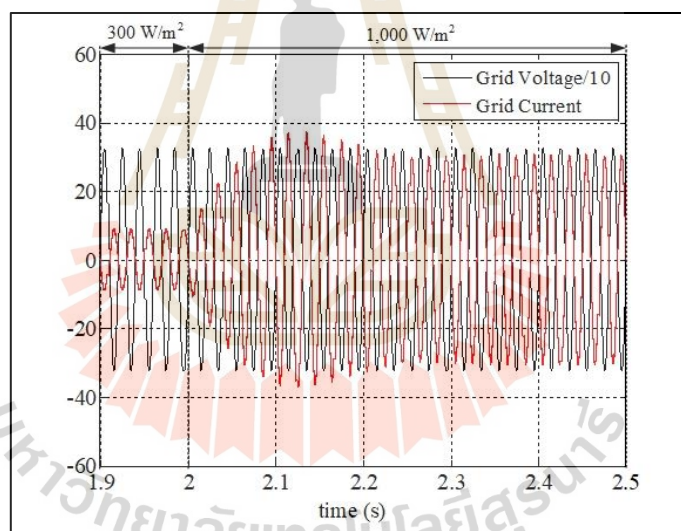


รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

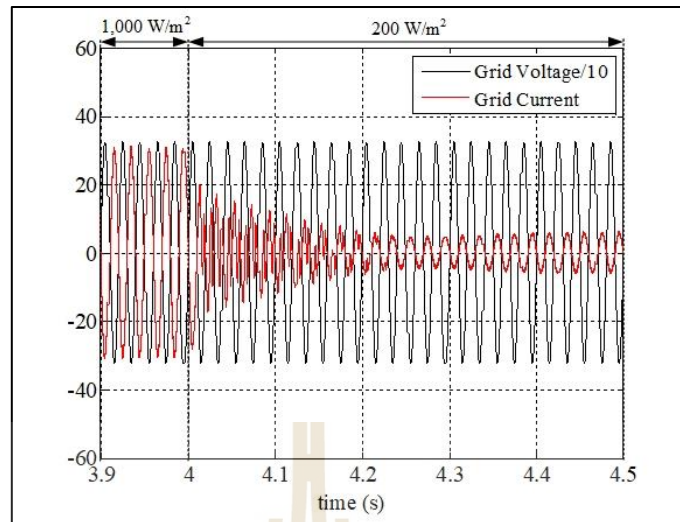
จากรูปที่ 4.18 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงในช่วงความเข้มแสง 300 W/m<sup>2</sup>, 1,000 W/m<sup>2</sup> และ 200 W/m<sup>2</sup> ตัวควบคุมพีไอมีประสิทธิภาพในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงที่สภาวะอยู่ของผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) มีค่าเท่ากับ 350 V



รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

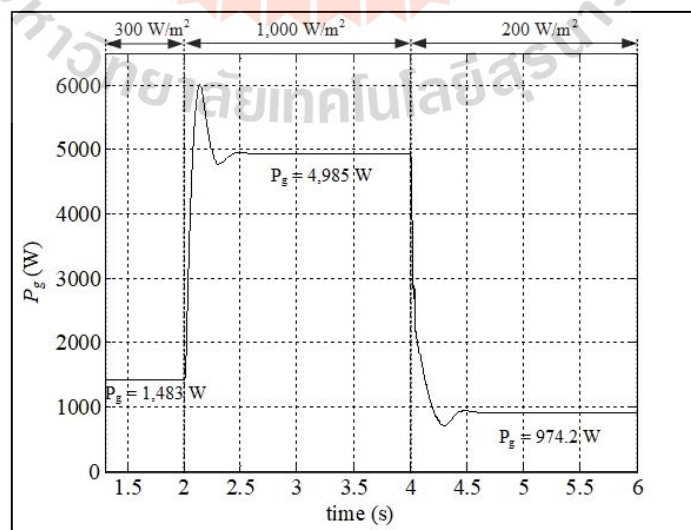


รูปที่ 4.20 รูปภาพขยายของรูปที่ 4.19 กรณีเปลี่ยนความเข้มแสงจาก  $300 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 4.21 รูปขยายของรูปที่ 4.19 กรณีเปลี่ยนความเข้มแสงจาก  $1,000 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$

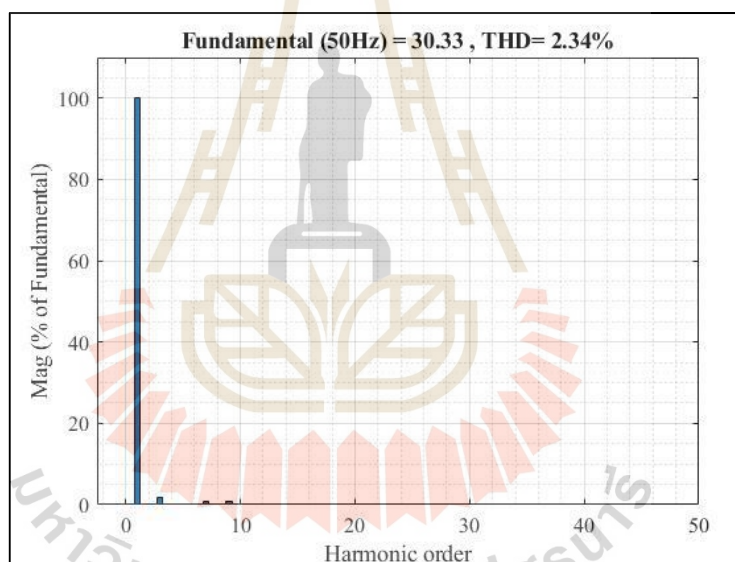
จากรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส แสดงให้เห็นมุมเฟสระหว่างผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสกับผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีมุมกลับกัน  $180$  องศา ซึ่งแสดงถึงว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ โดยมีขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีขนาดกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสดังนี้ เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงลดลงขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีขนาดลดลง



รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

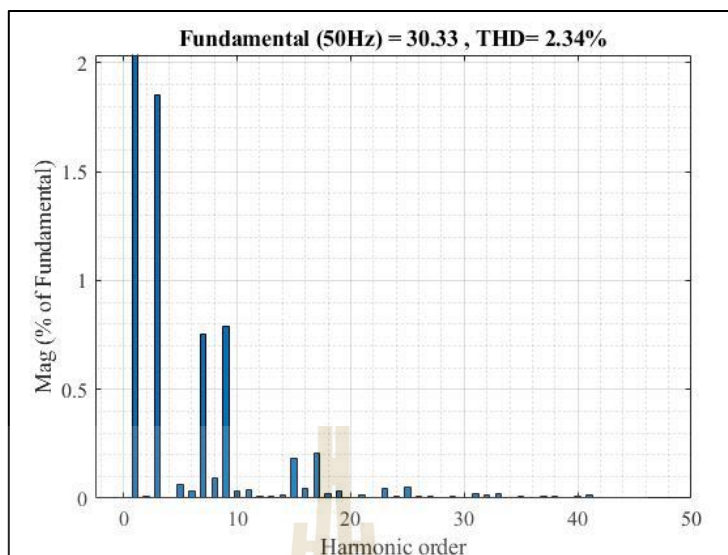
จากรูปที่ 4.22 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส แสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งช่วงความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$  มีกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $1,421 \text{ W}$  ช่วงความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $4,940 \text{ W}$  และช่วงความเข้มแสง  $200 \text{ W/m}^2$  กำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $911.1 \text{ W}$  ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแต่ละช่วงความเข้มแสงที่พิจารณาดังกล่าวมีค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมาในแต่ละช่วงความเข้มแสง

สำหรับการพิจารณาวิเคราะห์สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่ความถี่มูลฐาน ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) ซึ่งพิจารณากระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ณ ช่วงเวลา 3 s ถึง 3.02 s แสดงดังรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส





รูปที่ 4.24 รูปขยายกราฟสเปกตรัมของรูปที่ 4.23

จากรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.24 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส เมื่อพิจารณามาตรฐานการวัดกระแสไฟฟ้าเข้ากิริระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย พบว่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแต่ละอันดับและฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าอยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

#### 4.7 สรุป

สำหรับบทที่ 4 ได้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น โดยเนื้อหาได้กล่าวถึงระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียวที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำและการตรวจสอบความถูกต้องของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ พบว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียวที่นำเสนอไม่สามารถถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ได้นำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำด้วยการเพิ่มวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเข้าไประหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยมีโครงสร้างระบบไฟฟ้าที่ได้คือระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น โดยมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส โดยการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำด้วยวิธี FOCV ซึ่งถูกติดตั้งให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับ



แรงดันไฟฟ้าในการดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสทำหน้าที่ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้นที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำด้วยวิธี FOCV ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี FOCV ซึ่งสามารถดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในส่วนของกริดการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียวที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นของบทที่ 4 ได้รับการตีพิมพ์แล้ว ดังนี้

- Koson Chaicharoenaudomrung, Tanatip Boontawee, Jakkrit Pakdeeto, Kongpan Areerak and Kongpol Areerak, “Single phase grid connected PV system with a non-iterative MPPT”, 2021 International Electrical Engineering Congress (iEECON2021), Pattaya, Thailand: March 10-12, 2021, pp.57-60.

## บทที่ 5

# การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการควบคุมการตามรอยจุด กำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกริด ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

### 5.1 บทนำ

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV เป็นวิธีการอาศัยการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $K$ ) สำหรับคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  หากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีความคาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น สำหรับบทนี้จะนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพวิธี FOCV สำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะถูกเสนอในบทที่ 6 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรจะอาศัยการตรวจจับวัดความเข้มแสง อุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสำหรับคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ส่งผลให้ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำและของผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้า โดยเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำรวมถึงการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้า

### 5.2 องค์ความรู้พื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network: ANN) เป็นโครงสร้างที่มีตัวประมวลผลเป็นจำนวนมาก ซึ่งโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมถูกพัฒนาและคิดค้นจากโครงสร้างการทำงานของระบบประสาทของสมองมนุษย์ การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำได้โดยการเข้าใจการทำงานของระบบประสาทของสมองและอธิบายการทำงานออกมาในรูปแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียมมีหลายประการ เช่น ความสามารถใน

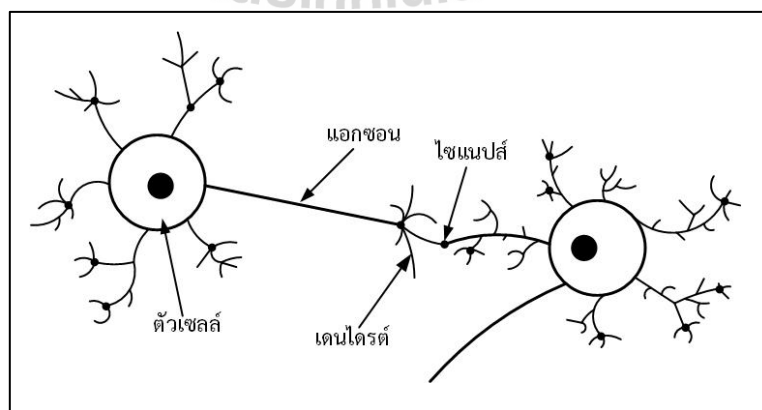
การเรียนรู้ตามสถานการณ์ ความสามารถในการประมาณค่าฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เป็นเชิงเส้น ความสามารถที่มี หลายอินพุตและหลายเอาต์พุตทำให้เหมาะสมกับระบบที่มีหลายตัวแปรในการ แก้ไขปัญหา ความสามารถในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การเกิดความผิดพลาดของ เซลล์ประสาทหรือเรียกว่า ความทนทานต่อความผิดพลาด (fault tolerance) (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

จากข้อดีหลายประการของโครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำมา ประยุกต์ใช้งานกับระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการตั้งจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

### 5.2.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

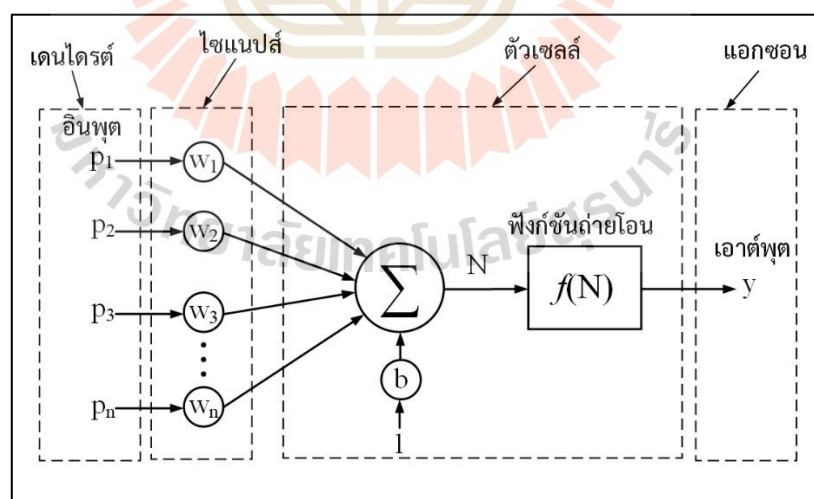
โครงข่ายประสาทเทียมถูกคิดค้นและพัฒนาจากการทำงานของระบบประสาทสมอง มนุษย์ ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจคุณลักษณะเชิงกายภาพและพฤติกรรมต่าง ๆ ของสมองมนุษย์ โดย สมองของมนุษย์ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลขั้นพื้นฐานที่เรียกว่า เซลล์ประสาท (neuron) ที่ เชื่อมโยงกันหลาย ๆ เซลล์เป็นจำนวนมาก ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ก็คือ หน่วยประมวลผล แบบอย่างง่าย โดยการรับส่งสัญญาณไปยังเซลล์ประสาทอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้วเซลล์ประสาทของสมอง มนุษย์สามารถอธิบายในรูปโครงสร้างอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีองค์ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่

- 1) ตัวเซลล์ที่เรียกว่า โซมา (soma) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานในเซลล์ประสาทและ ส่วนที่สร้างสารสื่อประสาท
- 2) เดนไดรต์ (dendrite) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่รับสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่ตัวเซลล์ประสาท ในแต่ละ เซลล์ประสาทก็ประกอบด้วยเดนไดรต์จำนวนมากจัดเรียงตัวในลักษณะคล้ายกิ่งไม้
- 3) แอกซอน (axon) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปสู่เซลล์อื่น ๆ ของเซลล์ประสาท โดยส่วนปลายของแอกซอนมีลักษณะโป่งออกเป็นกระเปาะที่เกือบจะสัมผัสกับปลายเดน ไดรต์ของเซลล์ประสาทอื่น ๆ



รูปที่ 5.1 โครงสร้างเซลล์ประสาทสมองของมนุษย์

การส่งสัญญาณจากแอกซอนไปยังเดนไดรต์สามารถส่งสัญญาณได้สองวิธีคือ สัญญาณเชิงไฟฟ้าและสัญญาณเชิงเคมี โดยส่งผ่านบริเวณปลายแอกซอนที่มีลักษณะโป่งออกเป็นกระเปาะ เรียกว่าไซแนปส์ (synapse) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างปลายแอกซอนกับปลายเดนไดรต์ สัญญาณที่ถูกส่งจากแอกซอนจะถูกตีความด้วยเดนไดรต์ก่อนเข้าสู่เซลล์ประสาท เมื่อสัญญาณดังกล่าวมีผลรวมของสัญญาณถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะกระตุ้นเซลล์ประสาททำให้ตัวเซลล์ประสาทสร้างศักย์กระทำ (action potential) ถ้าผลรวมของสัญญาณไม่ถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดังกล่าวจะสลายตัวไปอย่างรวดเร็วและไม่เกิดการกระตุ้นเซลล์ประสาท ซึ่งความแรงของสัญญาณที่ถูกส่งผ่านไซแนปส์จะขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการเชื่อมต่อของไซแนปส์ ซึ่งสัญญาณที่ส่งดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สัญญาณกระตุ้น (excitatory) และสัญญาณยับยั้ง (inhibitory) โดยความสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียมจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองไซแนปส์ที่มีตัวแปรที่เรียกว่าค่าน้ำหนักประสาท (weight) ซึ่งหากค่าน้ำหนักประสาทมีค่ามากก็เปรียบเสมือนค่าความเหนียวแน่นของการเชื่อมต่อของไซแนปส์ที่มีค่ามากส่งผลให้สามารถส่งสัญญาณได้มากขึ้น หากค่าน้ำหนักประสาทมีค่าน้อยก็เปรียบเสมือนค่าความเหนียวแน่นของการเชื่อมต่อของไซแนปส์ที่มีค่าน้อย นอกจากนี้ถ้าหากค่าน้ำหนักประสาทมีค่าเป็นบวกแสดงถึงลักษณะเป็นสัญญาณกระตุ้น ในทางตรงกันข้ามหากค่าน้ำหนักประสาทมีค่าเป็นลบแสดงถึงลักษณะเป็นสัญญาณยับยั้ง จากเนื้อหาข้างต้นจะเห็นได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีหลักการประมวลผลการทำงานคล้ายกับการประมวลผลการทำงานของสมองมนุษย์ ซึ่งการประมวลผลการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อนำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในรูปที่ 5.2 มาเปรียบเทียบกับสมองมนุษย์สามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับองค์ประกอบระบบประสาทสมอง

โครงข่ายประสาทเทียม	สมองมนุษย์
น้ำหนักประสาท	ไซแนปส์
ตัวรวมสัญญาณและฟังก์ชันถ่ายโอน	ตัวเซลล์
อินพุต	เดนไดรต์
เอาต์พุต	แอกซอน

เมื่อพิจารณาเน็ตอินพุต ( $N$ ) ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-1)

$$N = w_1 p_1 + w_2 p_2 + w_3 p_3 + \dots + w_n p_n + b \quad (5-1)$$

จากเน็ตอินพุต ( $N$ ) ในสมการที่ (5-1) สามารถคำนวณหาเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมดังสมการที่ (5-2)

$$y = f(N) \quad (5-2)$$

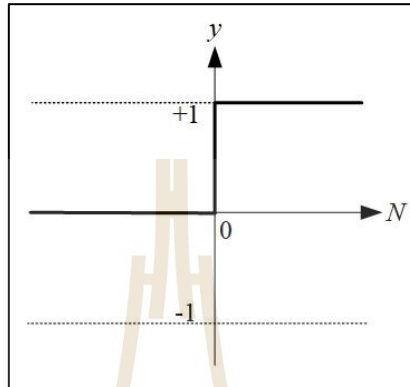
จากสมการที่ (5-1) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $n$  คือ จำนวนอินพุต
- $p_n$  คือ สัญญาณอินพุตตัวที่  $n$  ของโครงข่ายประสาทเทียม
- $W_n$  คือ ค่าน้ำหนักประสาทของอินพุตตัวที่  $n$
- $b$  คือ ค่าไบอัส
- $N$  คือ เน็ตอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน
- $f(N)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน
- $y$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม

จากฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเน็ตอินพุตแล้วทำการตัดสินใจส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปในรูปสัญญาณต่าง ๆ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเป็นได้ทั้งฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันไม่เชิงเส้น การเลือกใช้งาน

ฟังก์ชันถ่ายโอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่พิจารณาเอาโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งาน ฟังก์ชันถ่ายโอนมีหลากหลายรูปแบบดังนี้

- 1) ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต (hard limit) แสดงดังรูปที่ 5.3

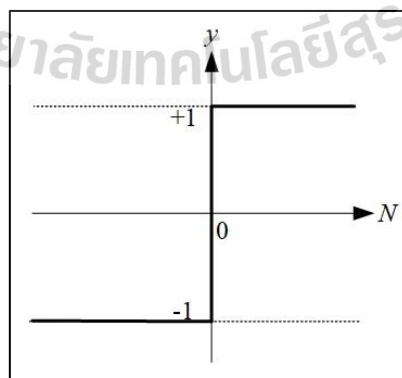


รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต

จากรูปที่ 5.3 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-3)

$$f(N) = \begin{cases} +1, & N \geq 0 \\ 0, & N < 0 \end{cases} \quad (5-3)$$

- 2) ฮาร์ดลิมิตแบบสมมาตร (symmetrical hard limit) แสดงดังรูปที่ 5.4



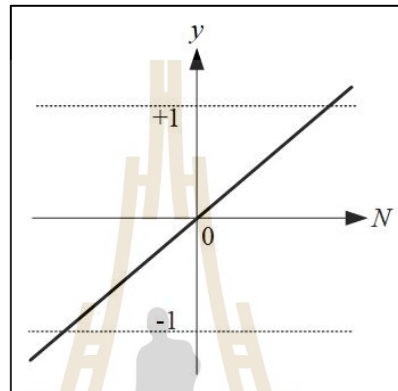
รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิตแบบสมมาตร



จากรูปที่ 5.4 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-4)

$$f(N) = \begin{cases} +1 & , N \geq 0 \\ -1 & , N < 0 \end{cases} \quad (5-4)$$

3) เส้นตรง (linear) แสดงดังรูปที่ 5.5

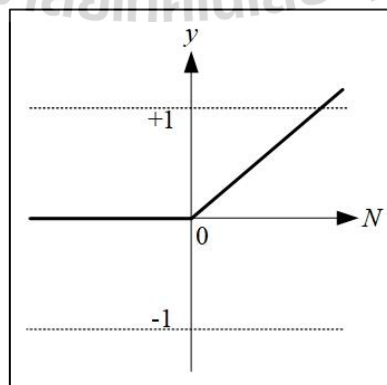


รูปที่ 5.5 ฟังก์ชันเส้นตรง

จากรูปที่ 5.5 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-5)

$$f(N) = N \quad (5-5)$$

4) เส้นตรงบวก (positive linear) แสดงดังรูปที่ 5.6

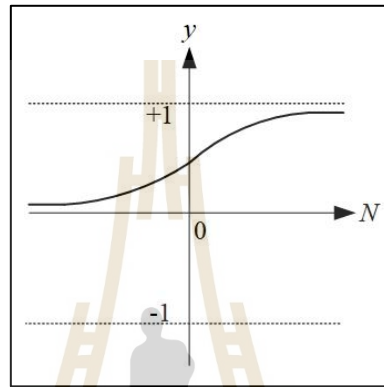


รูปที่ 5.6 ฟังก์ชันเส้นตรงบวก

จากรูปที่ 5.6 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-6)

$$f(N) = \begin{cases} N & , N \geq 0 \\ 0 & , N < 0 \end{cases} \quad (5-6)$$

5) ซิกมอยแบบลอการิทึม (log-sigmoid) แสดงดังรูปที่ 5.7

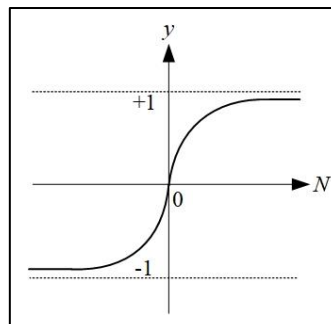


รูปที่ 5.7 ฟังก์ชันซิกมอยแบบลอการิทึม

จากรูปที่ 5.7 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-7)

$$f(N) = \frac{1}{1 + e^{-N}} \quad (5-7)$$

6) ซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเพอร์โบลาร์ (hyperbolic tangent sigmoid) แสดงดังรูปที่ 5.8

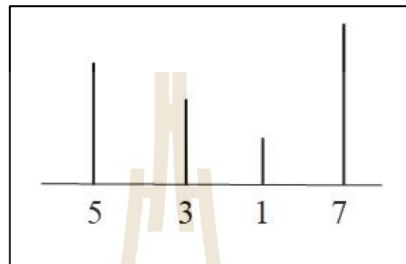


รูปที่ 5.8 ฟังก์ชันซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเพอร์โบลาร์

จากรูปที่ 5.8 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-8)

$$f(N) = \frac{e^N - e^{-N}}{e^N + e^{-N}} \quad (5-8)$$

7) แข่งขัน (competitive) แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันแข่งขัน

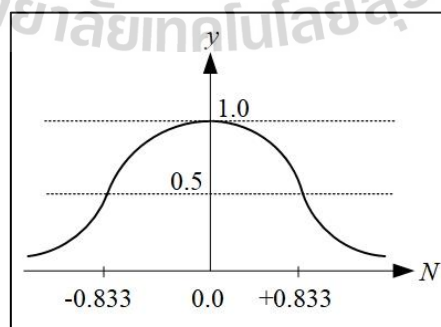
จากรูปที่ 5.9 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-9)

$$f(N) = 1, \text{ เมื่อ } N \text{ มีค่ามากที่สุด}$$

$$f(N) = 0, \text{ เมื่อ } N \text{ เป็นค่าอื่น ๆ}$$

(5-9)

8) ฐานรัศมี (radial basis function) แสดงดังรูป 5.10



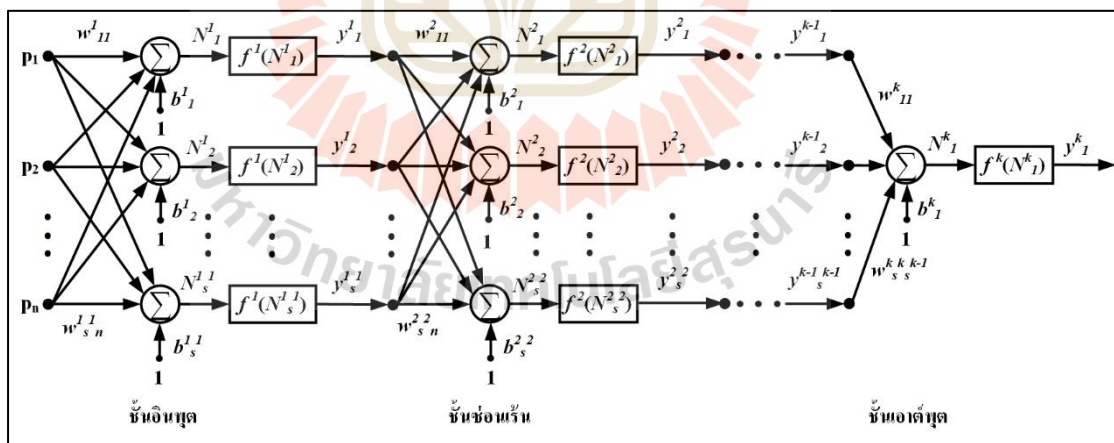
รูปที่ 5.10 ฟังก์ชันฐานรัศมี

จากรูปที่ 5.10 สามารถอธิบายดังสมการที่ (5-10)

$$f(N) = e^{-N^2} \tag{5-10}$$

### 5.2.2 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ

ข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นเดียวคือไม่สามารถแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ ทำให้มีการนำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนชั้นหลายชั้นมาประยุกต์ใช้แก้ไขปัญหามากขึ้น การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายคือ การเรียนรู้แบบแพร่กลับ (backpropagation learning) ซึ่งเป็นการเรียนรู้เรียนรู้ที่อาศัยหลักการค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) ระหว่างเอาต์พุตกับเป้าหมาย ซึ่งขั้นตอนการหาค่าความผิดพลาดมีดังนี้ ดำเนินการป้อนสัญญาณอินพุตแบบไปข้างหน้า (feedforward) ในรูปแบบเอาต์พุตของแต่ละชั้นจะเป็นอินพุตของชั้นถัดไปจนถึงชั้นเอาต์พุตและการแพร่กลับของค่าความผิดพลาดจะดำเนินการแบบย้อนกลับ (feedback) จากชั้นเอาต์พุตจนมาถึงชั้นอินพุต เพื่อดำเนินการปรับค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสในแต่ละชั้นของโครงข่ายประสาทเทียมให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ผลตอบสนองที่ได้จากเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าตรงตามความเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นสามารถแบ่งจำนวนชั้นออกได้เป็น ชั้นอินพุต (input layer) ชั้นซ่อนเร้น (hidden layer) และชั้นเอาต์พุต (output layer) แสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์น้ำหนักประสาทและไบอัสของโครงข่ายประสาทเทียม โดยการสุ่มค่า

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าเอาต์พุตของชั้นอินพุต

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนเร้น

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่าเอาต์พุตของชั้นเอาต์พุต

ขั้นตอนที่ 5 ดำเนินการปรับค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสชั้นเอาต์พุต

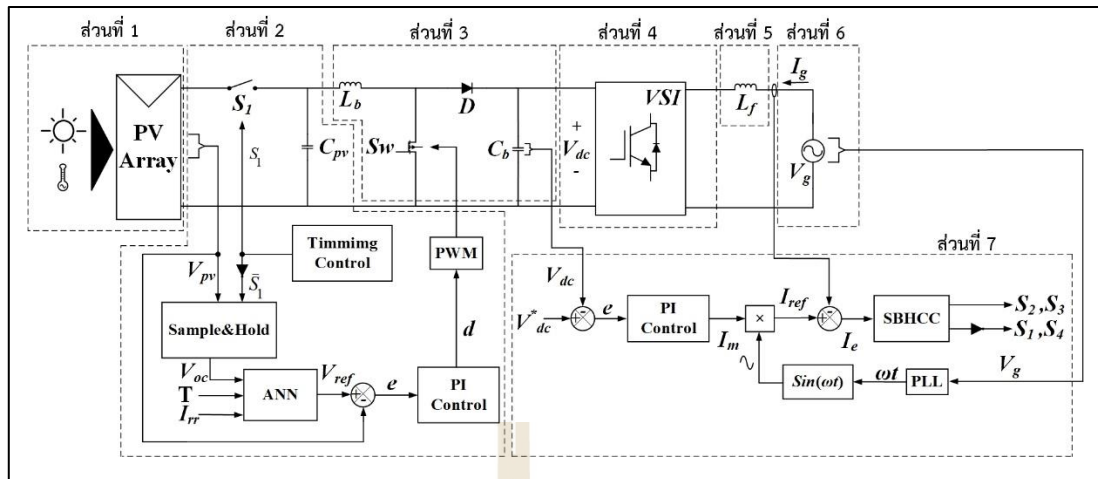
ขั้นตอนที่ 6 ดำเนินการปรับค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสชั้นซ่อนเร้น

ขั้นตอนที่ 7 ดำเนินการปรับค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสชั้นอินพุต

ขั้นตอนที่ 8 ดำเนินการตรวจสอบเงื่อนไขกระบวนการหยุดการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ถ้าเงื่อนไขยังไม่ครบตามที่กำหนดจะดำเนินการทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 จนกว่าจะบรรลุเงื่อนไข

### 5.3 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากองค์ความรู้พื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมจะนำมาประยุกต์แก้ไขปัญหาความแม่นยำของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานะอยู่ตัวให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ซึ่งโครงสร้างระบบที่พิจารณาในการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแสดงในรูปที่ 5.12 จากรูปสามารถอธิบายองค์ประกอบระบบที่พิจารณาได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีวิธีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (FOCV – ANN method) ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเรียกวิธีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรว่า วิธี FOCV – ANN ซึ่งระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะอาศัยการตรวจจับวัด อุณหภูมิ ความเข้มแสง และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเพื่อคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ อุณหภูมิและความเข้มแสงต่าง ๆ ส่วนที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ส่วนที่ 4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส ส่วนที่ 5 ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ส่วนที่ 6 กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส และส่วนสุดท้าย ส่วนที่ 7 ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงกับระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮีสเทอรีซิสที่ต่อเรียงกัน

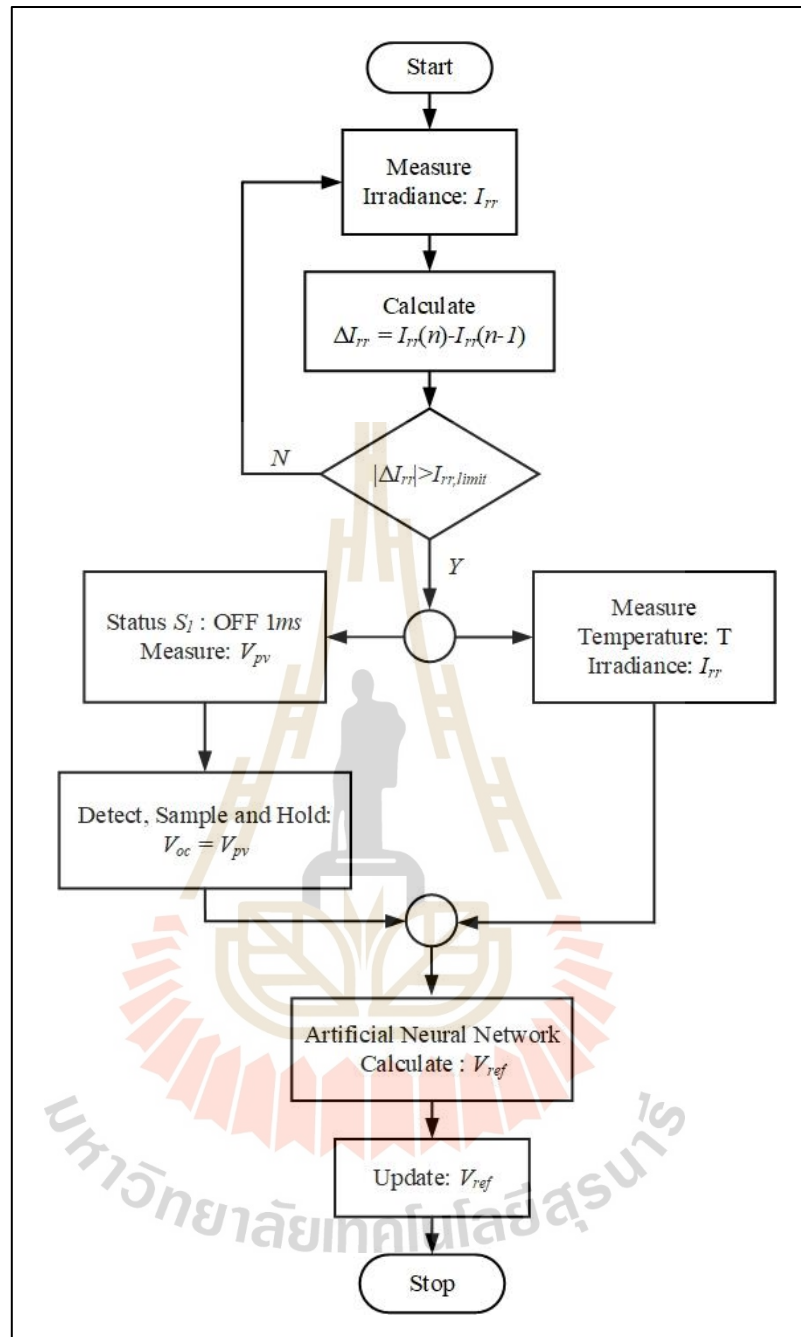


รูปที่ 5.12 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่ว่าน้ำวิธี FOCV – ANN สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขั้ว

#### 5.4 หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN

หลักการทำการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่ว่าน้ำวิธี FOCV – ANN มีขั้นตอนการทำงาน โดยเริ่มต้นจากการตรวจวัดความเข้มแสง ( $I_{rr}$ ) เพื่อคำนวณหาผลต่างของความเข้มแสง ( $\Delta I_{rr}$ ) ระหว่างความเข้มแสงคาบเวลาปัจจุบัน ( $I_{rr}(n)$ ) กับความเข้มแสงคาบเวลาก่อนหน้า ( $I_{rr}(n-1)$ ) เมื่อผลต่างความเข้มแสงเกินค่าที่กำหนด ระบบจะดำเนินการตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิรวมถึงดำเนินการสั่งการทำงานสวิตช์  $S_1$  เปิดวงจรเป็นระยะเวลา 1 ms สำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์และทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรจนกว่าจะมีการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรอีกครั้ง ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีป้อนอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม 3 อินพุต ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร เพื่อคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเสร็จสิ้นระบบจะดำเนินการอัปเดตแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแสดงแผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมวิธี FOCV – ANN แสดงดังรูปที่ 5.13





รูปที่ 5.13 แผนภาพการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN

การตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรยังจำเป็นต้องอาศัยวงจรตั้งเวลาเช่นเดียวกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่ว่าน้ำวิธี FOCV

## 5.5 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นการหาจำนวนชั้นและจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมสำหรับคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการหาจำนวนชั้นและจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนเร้นสามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วยการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ โดยจำนวนชั้นและจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมส่งผลให้ผลตอบสนองของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี FOCV มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะอาศัยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ โดยมีอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม 3 อินพุต ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มแสง และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีเป้าหมายที่ใช้สำหรับการเรียนรู้คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งค่าของอินพุตและค่าของเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำนวนนิวรอนของชั้นอินพุตจะขึ้นอยู่กับจำนวนอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมและจำนวนนิวรอนของชั้นเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับจำนวนเป้าหมายที่ต้องการ การเลือกจำนวนชั้นและจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมในวิทยานิพนธ์จะสังเกตจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุดในการเลือกประยุกต์ใช้งานกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

สำหรับการเลือกจำนวนชั้นซ่อนเร้นกำหนดให้จำนวนนิวรอนแต่ละชั้นของชั้นซ่อนเร้นเท่ากับ 1 นิวรอน และชั้นเอาต์พุตมีจำนวนนิวรอนเท่ากับ 1 นิวรอน โดยมีพารามิเตอร์สำหรับการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้ ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นเอาต์พุตคือ ฟังก์ชันแบบเส้นตรงและพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนแต่ละชั้นของชั้นซ่อนเร้นคือ ฟังก์ชันซิกมอยด์แบบลอการิทึม จำนวนรอบในการฝึกสอน 1,000 รอบ ค่าความชันที่น้อยที่สุดเท่ากับ  $1 \times 10^{-15}$  ค่าความผิดพลาดเป้าหมาย  $1 \times 10^{-18}$  ค่าคงที่การปรับค่าถ่วงน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสในการลู่เข้าคำตอบเท่ากับ  $1 \times 10^{100}$  โดยการฝึกสอนดังกล่าวจะหยุดการฝึกสอนเมื่อจำนวนรอบครบตามจำนวนหรือระบบบรรลุเงื่อนไขพารามิเตอร์อื่น ๆ ก่อน ซึ่งการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับโดยมีข้อมูลอินพุตและเป้าหมายในการฝึกสอนแสดงในตารางที่ 5.2 และผลการทดสอบหาจำนวนชั้นที่เหมาะสมของชั้นซ่อนเร้นแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลอินพุตและเป้าหมายที่ใช้สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม		เป้าหมายที่ต้องการ
ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)	แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)
อุณหภูมิ 20 °C		
100	173.82	149.6
200	179.14	153.54
300	182.16	155.38
400	184.36	156.38
500	186.02	156.9
600	187.52	157.12
700	188.58	157.14
800	189.06	157.02
900	189.96	156.78
1,000	191.45	156.46
อุณหภูมิ 25 °C		
100	170.03	145.87
200	175.48	149.92
300	178.69	151.718
400	180.97	152.76
500	182.63	153.43
600	183.84	153.72
700	185.28	153.63
800	186.08	153.55
900	187.05	152.27
1,000	188.1	153
อุณหภูมิ 30 °C		
100	166.28	142.16
200	171.94	146.26
300	175.18	148.2
400	177.42	149.26
500	179.14	149.84
600	180.7	150.1
700	181.9	150.16
800	182.82	150.08

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลอินพุตและเป้าหมายที่ใช้สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม (ต่อ)

อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม		เป้าหมายที่ต้องการ
ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)	แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)
อุณหภูมิ 30 °C		
900	183.88	149.88
1,000	184.74	149.62
อุณหภูมิ 35 °C		
100	162.84	138.44
200	168.44	142.62
300	171.6	144.62
400	174.02	145.7
500	175.7	146.32
600	177.22	146.6
700	178.42	146.7
800	179.48	146.62
900	180.64	146.44
1,000	181.42	146.16
อุณหภูมิ 40 °C		
100	159.14	134.74
200	164.82	139
300	168.06	141.04
400	170.34	142.16
500	172.32	142.8
600	173.66	143.12
700	175.08	143.22
800	176	143.18
900	177.2	143
1,000	178.04	142.85

ตารางที่ 5.3 ผลทดสอบหาจำนวนชั้นซ้อนเร้นที่เหมาะสม

ค่าทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนชั้นโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้น						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	0.0358	0.0358	0.0358	0.0358	0.0358	0.0358
จำนวนชั้นโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้น						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	0.0364	0.0365	0.0364	0.0364	0.0362	0.03638
จำนวนชั้นโครงข่ายประสาทเทียม 3 ชั้น						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	26.1	21.7	20.8	26.1	30.7	25.08
จำนวนชั้นโครงข่ายประสาทเทียม 4 ชั้น						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7

จากการทดสอบหาจำนวนชั้นของชั้นซ้อนเร้น สำหรับค้นหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบโดยใช้จำนวนชั้นซ้อนเร้น 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่าจำนวนชั้นซ้อนเร้น 1 ชั้น เป็นชั้นที่ให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่น้อยที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกจำนวนชั้นซ้อนเร้นของโครงข่ายประสาทเทียมเท่ากับ 1 ชั้น

สำหรับการเลือกจำนวนนิรอนในชั้นซ้อนเร้นที่ 1 จะอาศัยการฝึกสอนเช่นเดียวกับการเลือกจำนวนชั้นของชั้นซ้อนเร้น กำหนดให้ชั้นเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีจำนวนนิรอน 1 นิรอน และพารามิเตอร์สำหรับการฝึกสอนโดยใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวกันกับการทดสอบหาจำนวนชั้นของชั้นซ้อนเร้น ผลการทดสอบหาจำนวนนิรอนที่เหมาะสมของชั้นซ้อนเร้นที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียม แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลทดสอบจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมของชั้นซ่อนเร้นที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียม

ค่าทดสอบ \n ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนนิวรอนเท่ากับ 5 นิวรอน						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	24.3	26	24.8	26.8	25.6	25.5
จำนวนนิวรอนเท่ากับ 10 นิวรอน						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	24	27.8	25.1	19.4	23.5	23.96
จำนวนนิวรอนเท่ากับ 15 นิวรอน						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	0.0349	0.034	0.0355	0.0355	0.0364	0.03526
จำนวนนิวรอนเท่ากับ 20 นิวรอน						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	0.0116	0.0235	0.0241	0.0269	0.0211	0.02144
จำนวนนิวรอนเท่ากับ 25 นิวรอน						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	0.0516	0.0527	0.0378	0.0338	0.0356	0.0423
จำนวนนิวรอนเท่ากับ 30 นิวรอน						
ค่าความผิดพลาด กำลังสองเฉลี่ย	23.2	23.3	20.7	22.4	21.6	22.24

จากผลการทดสอบหาจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนเร้นที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ ค้นหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบโดยใช้จำนวนนิวรอน 5 10 15 20 25 และ 30 ตามลำดับ พบว่าจำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนเร้นที่ 1 เท่ากับ 20 นิวรอน เป็นจำนวนนิวรอนที่ทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมค่าน้อยที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้จำนวนนิวรอนของชั้นซ่อนเร้นที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมเท่ากับ 20 นิวรอน



จากผลการทดสอบหาจำนวนชั้นซ้อนเร้นและจำนวนนิวรอนของชั้นซ้อนของโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถสรุปโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบไปด้วย 3 ชั้นคือ ชั้นอินพุตจำนวน 3 นิวรอน ชั้นซ้อนเร้นที่ 1 จำนวน 20 นิวรอน และชั้นเอาต์พุตจำนวน 1 นิวรอน โดยมีค่าน้ำหนักประสาทของชั้นซ้อนเร้นที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมโดยแบ่งออกตามอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังนี้ ค่าน้ำหนักประสาทของอุณหภูมิจ ค่าน้ำหนักประสาทของความเข้มแสง และค่าน้ำหนักประสาทของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดดวงจรแสดงในตารางที่ 5.5 ค่าน้ำหนักประสาทชั้นเอาต์พุตแสดงในตารางที่ 5.6 และค่าไบอัสแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.5 ค่าน้ำหนักประสาทของโครงข่ายประสาทเทียมในชั้นซ้อนเร้นที่ 1

ลำดับนิวรอน	ค่าน้ำหนักประสาทของอุณหภูมิจ	ค่าน้ำหนักประสาทของความเข้มแสง	ค่าน้ำหนักประสาทของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดดวงจร
1	-0.1999	-0.7090	-0.2305
2	-0.0124	-5.0734	0.0798
3	0.2628	-0.8536	0.1481
4	0.3505	0.2368	2.3407
5	-0.5049	1.8522	-11.2955
6	-32.3087	-6.0964	24.2886
7	0.8411	-7.2398	-0.2102
8	-0.5363	1.4347	0.4670
9	-0.5631	-0.1648	-0.1709
10	-4.8478	-1.1443	-0.6755
11	0.0839	-0.8507	-0.1057
12	3.4917	-0.2643	3.9464
13	0.6864	3.3834	4.5044
14	50.8724	1.5314	-11.4561
15	-16.274	-39.828	-5.9590
16	0.1295	0.6611	0.3066
17	1.2928	0.4437	-2.6141
18	-85.8718	18.8116	-125.4088
19	-11.8264	-6.1903	6.1859
20	-0.4654	1.1	0.2514

ตารางที่ 5.6 ค่าน้ำหนักประสาทในชั้นเอาต์พุต

ลำดับนิวรอน	ค่าน้ำหนักประสาท
1	16.0186
2	42.8774
3	15.8922
4	22.0363
5	2.0841
6	0.2108
7	5.61208
8	19.8733
9	2.7038
10	8.4141
11	3.6965
12	-1.7138
13	17.5205
14	-0.2580
15	1.5504
16	23.2280
17	0.7914
18	15.2766
19	-0.4280
20	20.7650

ตารางที่ 5.7 ค่าไบอัสของโครงข่ายประสาทเทียม

ลำดับนิวรอน	ค่าไบอัส
ชั้นซ่อนเร้นที่ 1	
1	13.5771
2	-13.3060
3	3.0968
4	1.5
5	-9.6087
6	5.8024
7	-11.6573
8	-14.4655
9	-14.3241
10	7.459
11	-1.2838
12	-731.0711
13	7.8052
14	0.9039
15	0.4457
16	-4.8555
17	1.9431
18	-3.8023
19	4.3488
20	-7.2954
ชั้นเอาต์พุต	
1	21.9261

จากตารางค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยชุดข้อมูลสามารถคำนวณหาเอาต์พุตแต่ละชั้นของโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังนี้

ค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนเร้นที่ 1 ของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังสมการที่ (5-11)

$$y_s = \frac{1}{1 + e^{-N_s}} \quad (5-11)$$

จากสมการที่ (5-11) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $y_s$  คือ เอาต์พุตชั้นซ่อนเร้นของนิวรอนตัวที่  $s$  ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 20  
 $N_s$  คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักประสาทกับอินพุตบวกกับค่าไบอัส
- $$N_s = \sum_{n=1}^{20} w_{s,n} p_n + b_s \quad \text{โดยที่ } n \text{ คือจำนวนอินพุตมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3}$$
- $w_{s,n}$  คือ ค่าน้ำหนักประสาทตัวที่  $s$  ของอินพุตที่  $n$   
 $p_n$  คือ อินพุตที่  $n$   
 $b_s$  คือ ค่าไบอัสของนิวรอนตัวที่  $s$  ของชั้นซ่อนเร้น

ค่าเอาต์พุตของชั้นเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังสมการที่ (5-12)

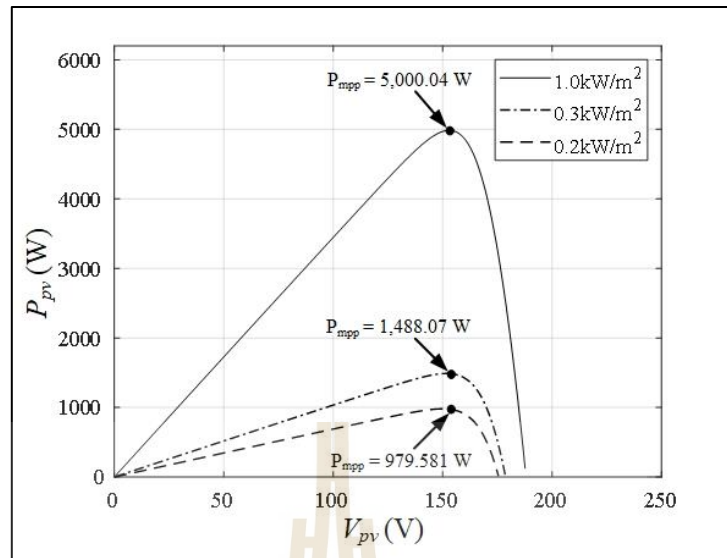
$$y = \sum_{s=1}^{20} y_s w_s + b \quad (5-12)$$

จากสมการที่ (5-11) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- $y$  คือ เอาต์พุตของชั้นเอาต์พุต  
 $w_s$  คือ ค่าน้ำหนักประสาทตัวที่  $s$   
 $b$  คือ ค่าไบอัสของชั้นเอาต์พุต

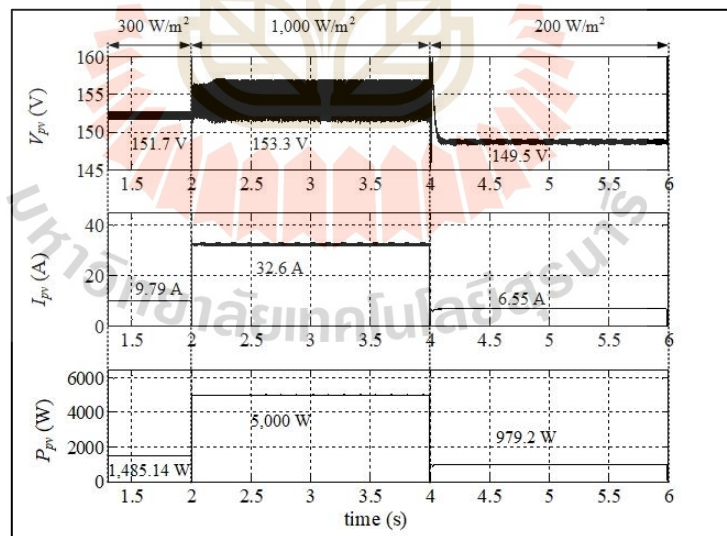
## 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN

สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ในรูปที่ 5.12 จะอาศัยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งมีพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.4 ในบทที่ 3 โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาสำหรับการจำลองสถานการณ์โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  และพิจารณาเงื่อนไขความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง คือ ช่วงความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$ ,  $1,000 \text{ W/m}^2$  และ  $200 \text{ W/m}^2$  โดยกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

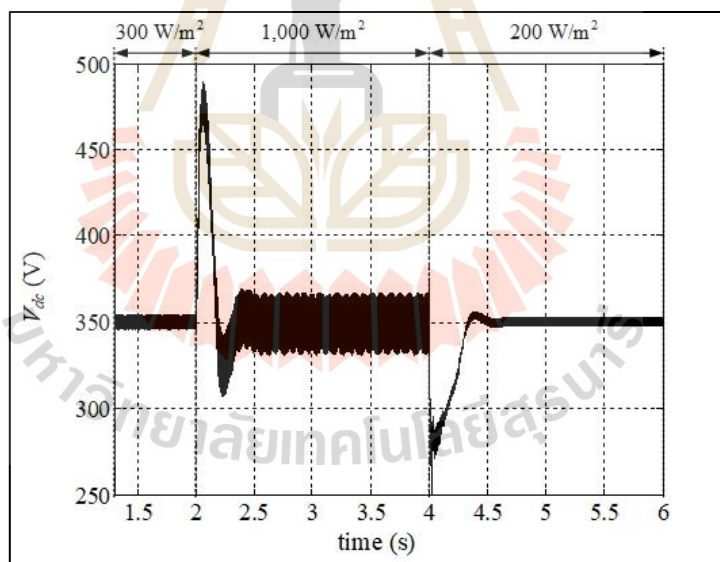
เมื่อดำเนินการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริด ระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขั้วที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่ว่าน้ำวิธี FOCV - ANN ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.15 จนถึงรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเมื่อพิจารณาความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ซึ่งได้แก่ 300 W/m<sup>2</sup>, 1,000 W/m<sup>2</sup> และ

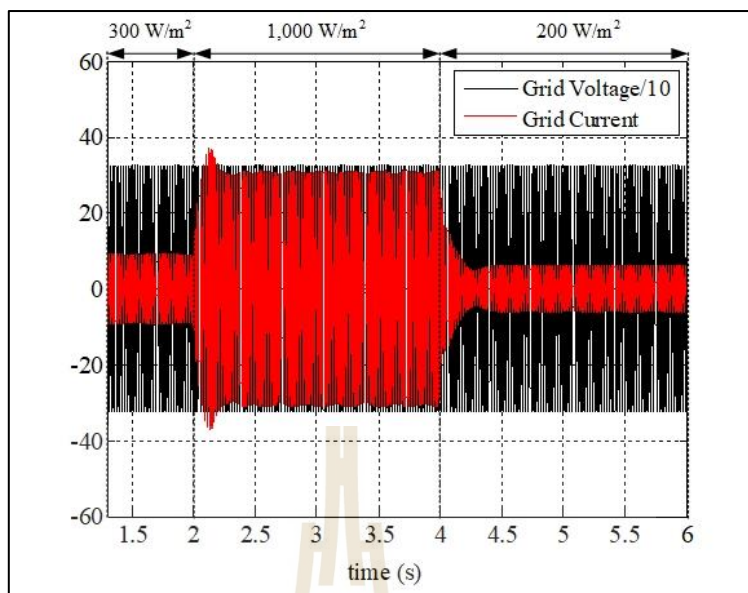
200 W/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าช่วงความเข้มแสง 300 W/m<sup>2</sup> มีค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เท่ากับ 151.7 V กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) เท่ากับ 9.79 A และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) เท่ากับ 1,485.14 W ช่วงความเข้มแสง 1,000 W/m<sup>2</sup> มีค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เท่ากับ 153.3 V กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) เท่ากับ 32.6 A และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) เท่ากับ 5,000 W และช่วงความเข้มแสง 200 W/m<sup>2</sup> มีค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) เท่ากับ 149.5 V กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) เท่ากับ 9.78 A และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) เท่ากับ 1,483.63 W เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ที่พิจารณามาเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 5.15 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ความเข้มแสงที่พิจารณามีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV – ANN สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



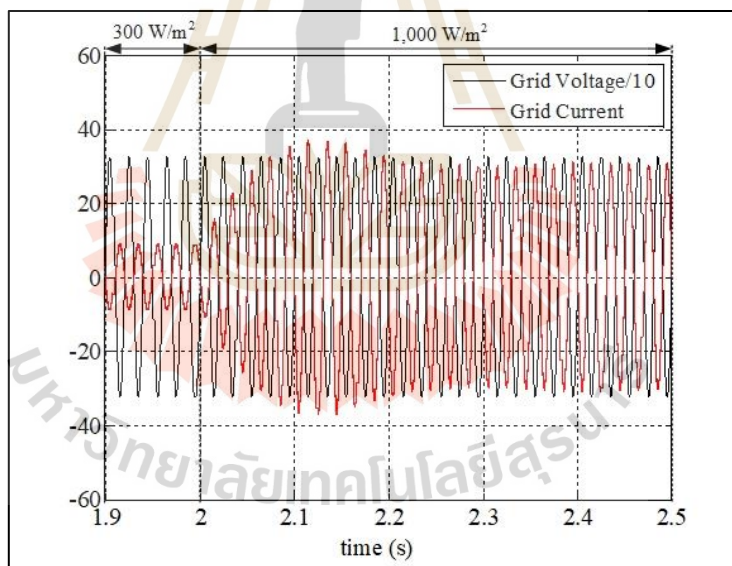
รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

จากรูปที่ 5.16 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงในช่วงความเข้มแสง 300 W/m<sup>2</sup>, 1,000 W/m<sup>2</sup> และ 200 W/m<sup>2</sup> ตัวควบคุมพีไอมีประสิทธิภาพในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงที่สภาวะอยู่ของผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) มีค่าเท่ากับ 350 V

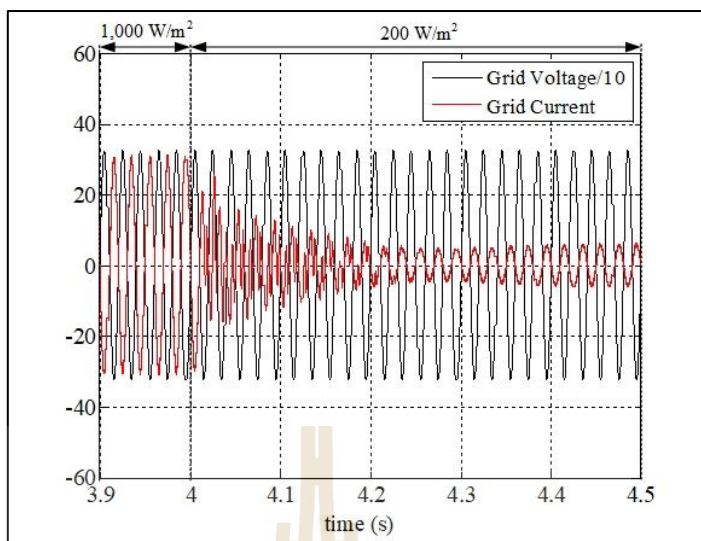




รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

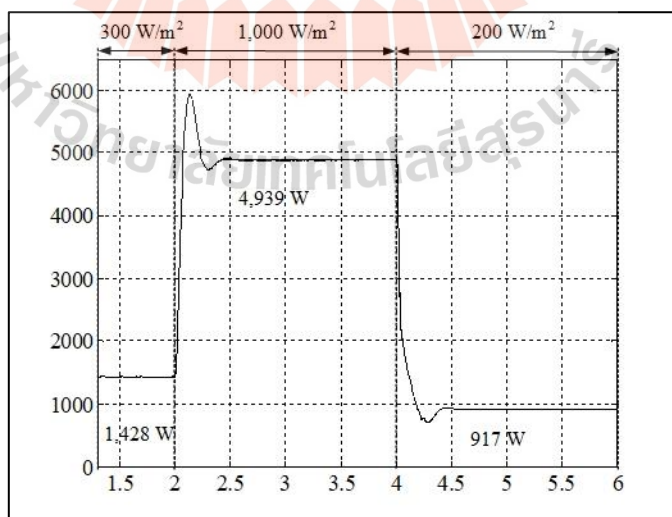


รูปที่ 5.18 รูปขยายรูปที่ 5.17 กรณีเปลี่ยนความเข้มแสงจาก  $300 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 5.19 รูปขยายรูปที่ 5.17 กรณีเปลี่ยนความเข้มแสงจาก  $1,000 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$

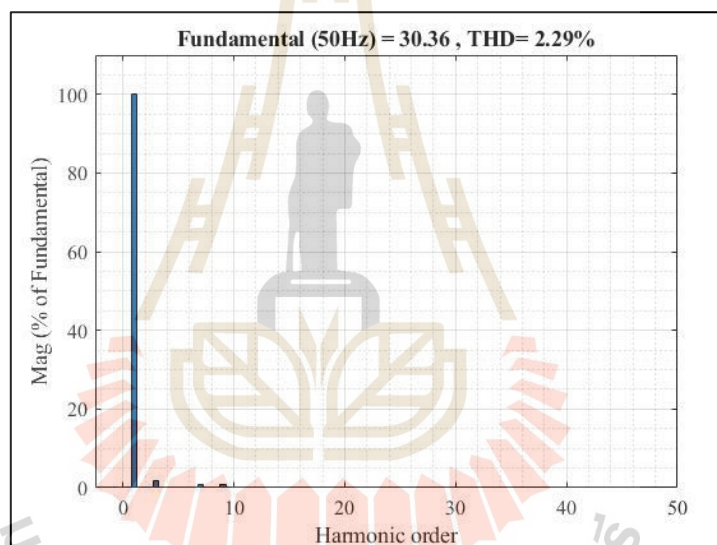
จากรูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.19 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส พบว่าแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีมุมเฟสกลับกัน 180 องศา แสดงถึงว่าตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถควบคุมการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ โดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงลดลงขนาดของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะมีขนาดลดลง



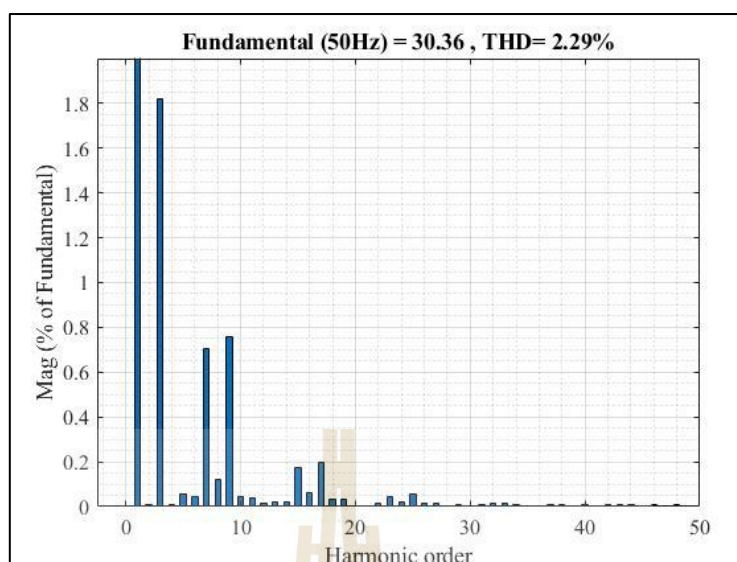
รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 5.20 ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส พบว่าเมื่อพิจารณาความเข้มแสง 3 ช่วง ซึ่งได้แก่ ความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$ ,  $1,000 \text{ W/m}^2$  และ  $200 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ โดยช่วงความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$  มีค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $1,428 \text{ W}$  ช่วงความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  มีค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $4,939 \text{ W}$  และช่วงความเข้มแสง  $200 \text{ W/m}^2$  มีค่ากำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $P_g$ ) เท่ากับ  $917 \text{ W}$  เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์กับกำลังไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส พบว่ากำลังไฟฟ้ามียุคใกล้เคียงกันซึ่งแสดงถึงว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสสามารถถ่ายโอนกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้

เมื่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ณ ช่วงเวลา 3 s ถึง 3.02 s ที่ความถี่มูลฐาน ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) แสดงดังรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.21 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส



รูปที่ 5.22 รูปขยายกราฟสเปกตรัมของรูปที่ 5.21

จากรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้ากริดระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย พบว่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสแต่ละอันดับและฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

## 5.7 สรุป

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV – ANN ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนาต่อยอดจากการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV โดยมีโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยมีโครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ไขปัญหาทั้งเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น จำนวนชั้นซ่อนเร้นและจำนวนนิวรอนแต่ละชั้นซ่อนเร้นในการแก้ไขปัญหาของโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องมีจำนวนที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อการแก้ไขปัญหา ซึ่งจำนวนชั้นซ่อนเร้นและจำนวนนิวรอนแต่ละชั้นซ่อนเร้นของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้จากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับด้วยการป้อนอินพุตและเป้าหมายที่ต้องการให้กับโครงข่ายประสาทเทียม จากผลการทดสอบหาจำนวนชั้นซ่อนเร้นและจำนวนนิวรอนแต่ละชั้นซ่อนเร้นของโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้จำนวนชั้นซ่อนเร้นของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้น ที่มีจำนวนนิวรอน 15 นิวรอน ซึ่งเป็นจำนวนชั้นและจำนวนนิวรอนที่ให้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

เชื่อมต่อกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV – ANN แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV – ANN สามารถดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป และในบทต่อไปจะดำเนินการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ของ 3 วิธีการในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือ การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธี P&O ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 และการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV – ANN ที่ได้นำเสนอในบทนี้





## บทที่ 6

# การเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี แบบวนซ้ำและวิธีแบบไม่วนซ้ำ

### 6.1 บทนำ

ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการแบบวนซ้ำ ซึ่งแทนด้วยวิธี P&O ซึ่งเป็นวิธีที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 และระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการแบบไม่วนซ้ำ ซึ่งแทนด้วยวิธี FOCV ที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธีการแบบวนซ้ำแต่มีข้อเสียเปรียบในการเข้าถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV จึงได้นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV - ANN ที่นำเสนอในบทที่ 5 ซึ่งเป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหมด 3 แนวทาง ได้แก่ การเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV การเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 วิธีที่นำเสนอ ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะพิจารณาที่ละแนวทางด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และวิธีการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB/Simulink

### 6.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

หัวข้อนี้จะนำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองขั้วทั้งหมด 3 แนวทางด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงดังตารางที่ 6.1 กำหนดให้  $\Delta V$  ของวิธี P&O มีค่าเท่ากับ 0.1 V และพารามิเตอร์  $K$  ของวิธี FOCV มีค่าเท่ากับ 0.83 โดยรายละเอียดของระบบการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ก



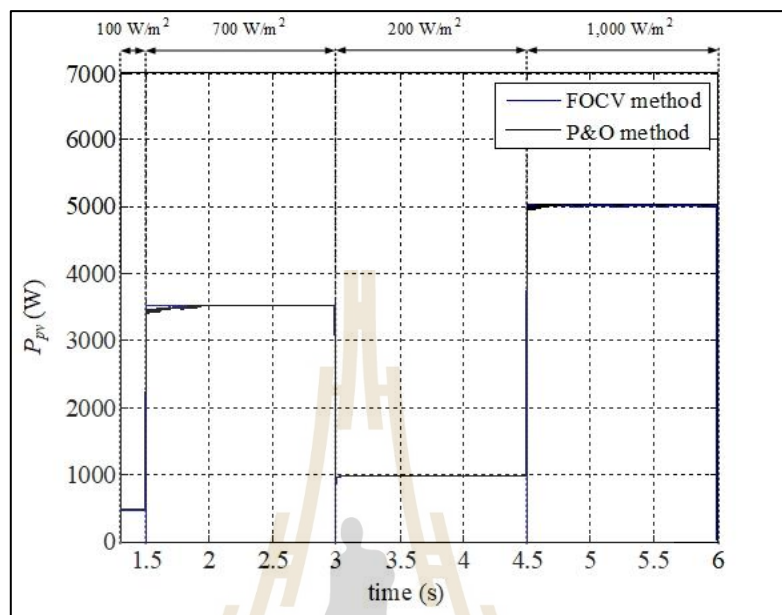
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mpp}$ )	250.002	W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ )	30.6	V
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	37.62	V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mpp}$ )	8.17	A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.59	A
จำนวนแผงที่ต่อแบบอนุกรม ( $N_s$ )	5	แผง
จำนวนแผงที่ต่อแบบขนาน ( $N_p$ )	4	แผง
ตัวเก็บประจุหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $C_{pv}$ )	4,000	$\mu\text{F}$
ขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $L_b$ )	2.8	mH
ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $C_b$ )	1,800	$\mu\text{F}$
ตัวกรองกระแสไฟฟ้า ( $L_f$ )	4.77	mH
แรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ( $V_g$ )	230	$V_{rms}$
ความถี่ระบบไฟฟ้า ( $f$ )	50	Hz
แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสไฟตรง ( $V_{dc}^*$ )	350	V
ความถี่สวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ( $f_{Sw}$ )	10	kHz
พารามิเตอร์ตัวควบคุมสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $K_{pv,b}$ )	0.64	-
พารามิเตอร์ตัวควบคุมปริพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $K_{iv,b}$ )	40	-
พารามิเตอร์ตัวควบคุมสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $K_{pv,inv}$ )	0.09	-
พารามิเตอร์ตัวควบคุมปริพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง ( $K_{iv,inv}$ )	1.7765	-
แถบฮีสเทอรีซิส ( $HB$ )	0.25	A

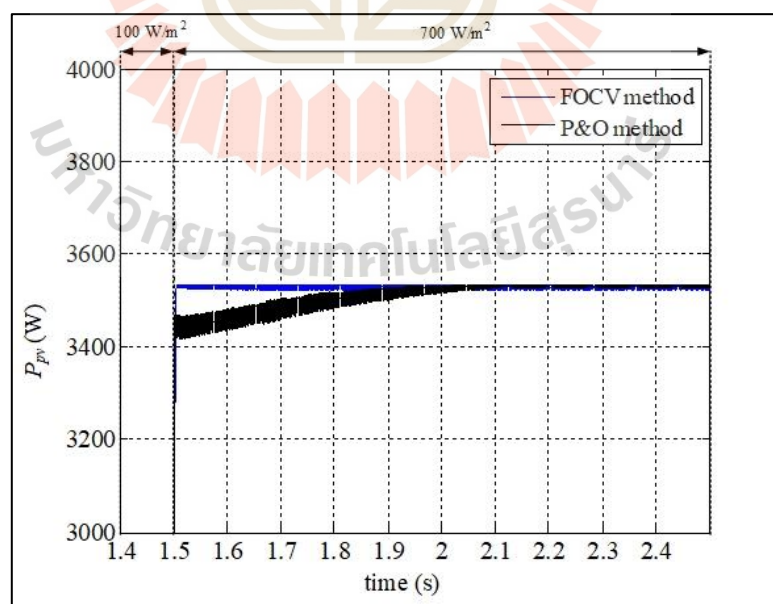
### 6.2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV

สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนดให้อุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  และพิจารณาเงื่อนไขความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100\text{ W/m}^2$  เป็น  $700\text{ W/m}^2$  ช่วงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700\text{ W/m}^2$  เป็น  $200\text{ W/m}^2$  และช่วงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200\text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000\text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

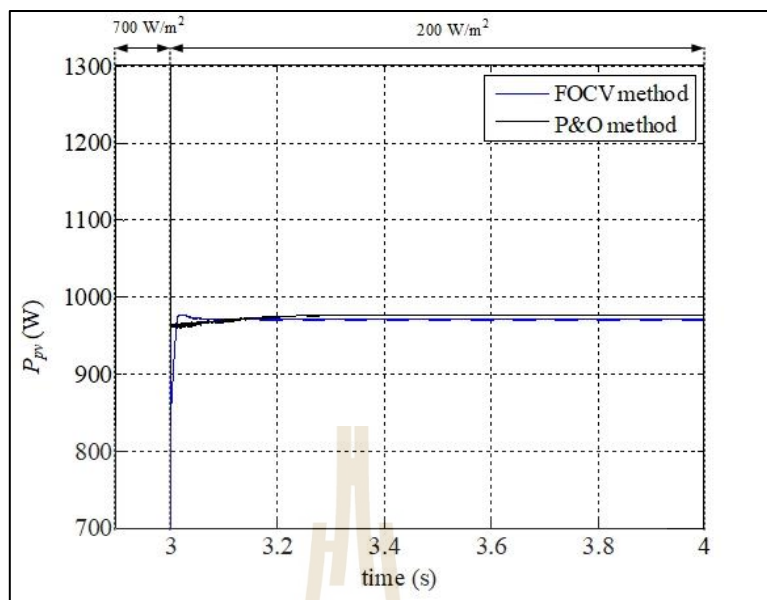
ระหว่างวิธี P&O เส้นสีดำ กับวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.1 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงในรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.4



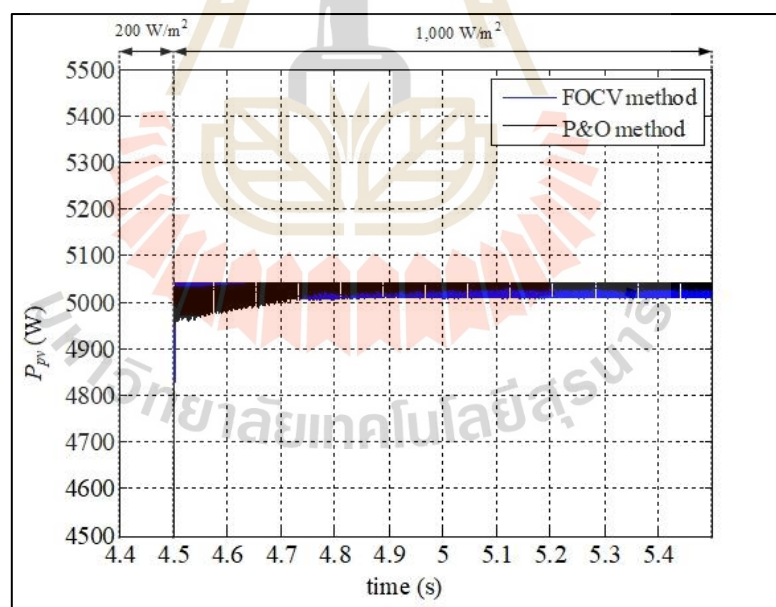
รูปที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ณ อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 6.2 รูปขยายของรูปที่ 6.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100  $W/m^2$  เป็น 700  $W/m^2$  ณ อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 6.3 รูปขยายของรูปที่ 6.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

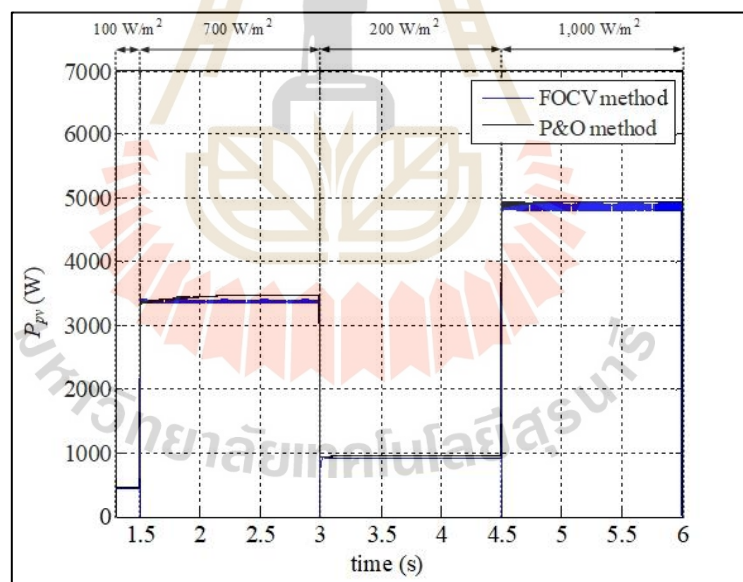


รูปที่ 6.4 รูปขยายของรูปที่ 6.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

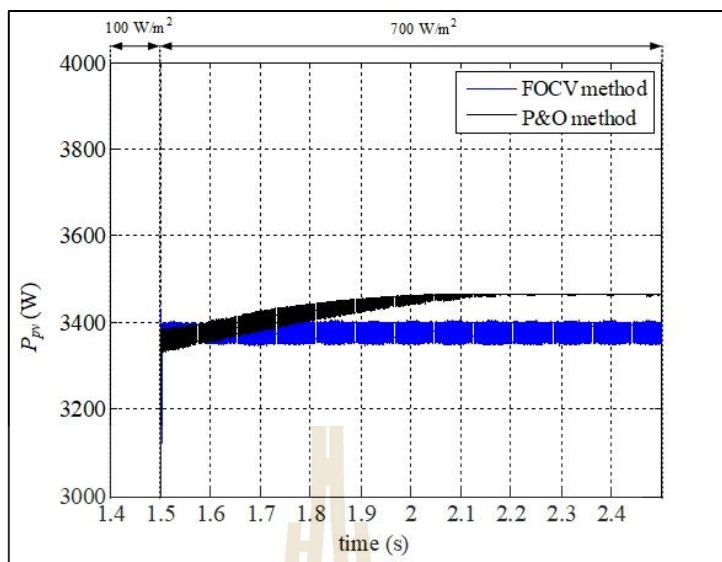
จากรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่าง ๆ ณ อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าของวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O และให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวที่ใกล้เคียงกันระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV สามารถยืนยันได้ว่าวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี P&O

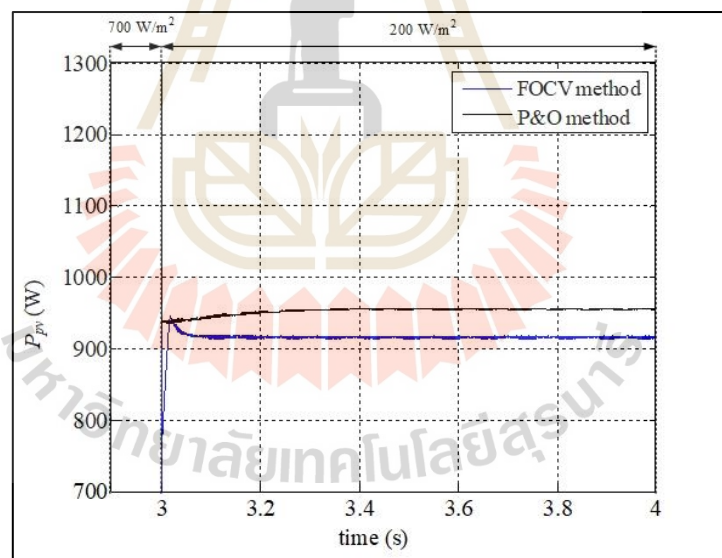
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิคงที่  $40^{\circ}\text{C}$  มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100\text{ W/m}^2$  เป็น  $700\text{ W/m}^2$  ช่วงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700\text{ W/m}^2$  เป็น  $200\text{ W/m}^2$  และช่วงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200\text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000\text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O เส้นสีดำ กับวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน โดยผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วงแสดงดังรูปที่ 6.5 และผลรูปขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.6 ถึงรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.5 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ณ อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$

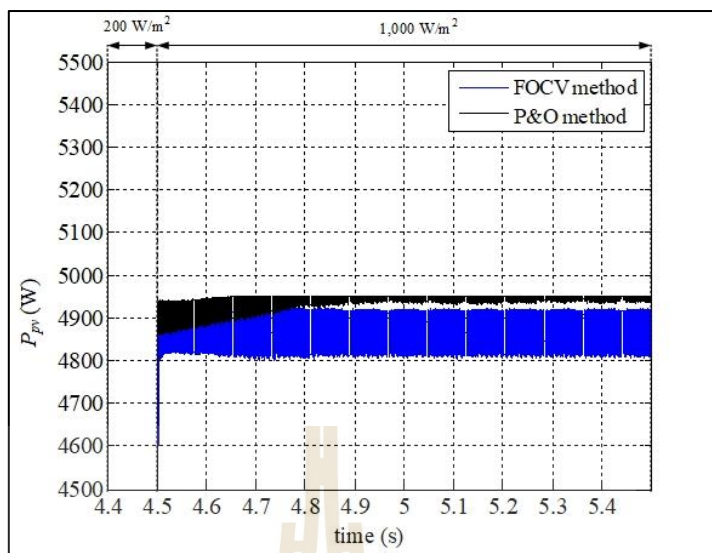


รูปที่ 6.6 รูปขยายของรูปที่ 6.5 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$



รูปที่ 6.7 รูปขยายของรูปที่ 6.5 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$





รูปที่ 6.8 รูปขยายของรูปที่ 6.5 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$

จากรูปที่ 6.6 ถึงรูปที่ 6.8 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่าง ๆ ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$  พบว่าเมื่ออุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงวิธี FOCV ให้ผลตอบแทนของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี P&O แต่ยังคงให้ผลตอบแทนของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสถานะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV สามารถยืนยันได้กว่าเมื่ออุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงวิธี FOCV สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้น้อยกว่าวิธี P&O เนื่องจากค่า  $K$  ของระบบที่เลือกใช้งานไม่เหมาะสมกับอุณหภูมิที่พิจารณาทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

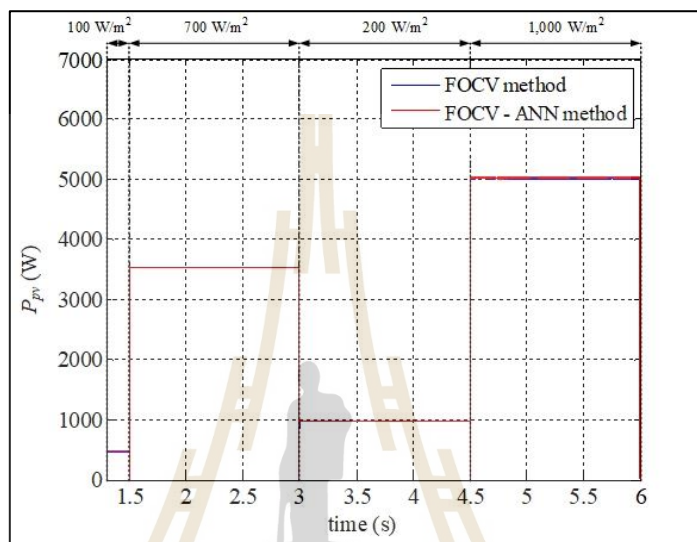
จากผลการจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงวิธี FOCV ให้ผลตอบแทนของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีความคลาดเคลื่อนจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง เนื่องจากค่า  $K$  ที่ใช้งานเหมาะสมสำหรับพิจารณาที่เงื่อนไขอุณหภูมิคงที่  $25^\circ \text{C}$  เมื่อนำค่า  $K$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  มาใช้ที่อุณหภูมิอื่น ๆ ที่ไม่ใช่  $25^\circ \text{C}$  จะส่งผลให้ผลตอบแทนของกำลังไฟฟ้าวิธี FOCV มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง

## 6.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN

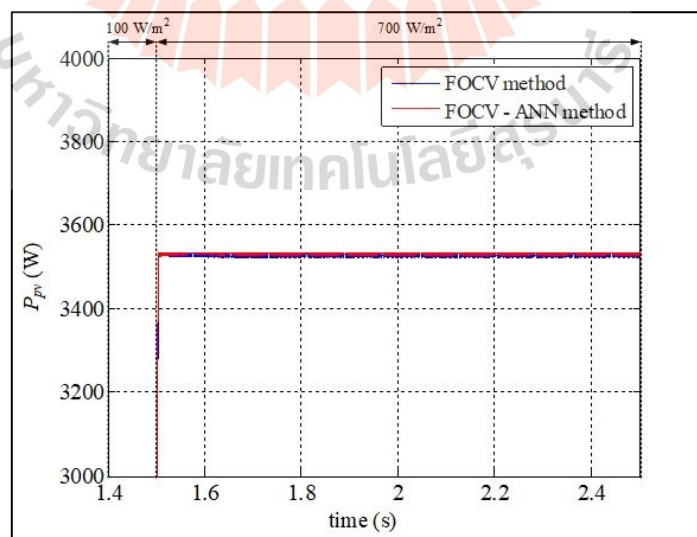
สำหรับการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกำหนดให้อุณหภูมิที่พิจารณามีค่าคงที่  $25^\circ \text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3



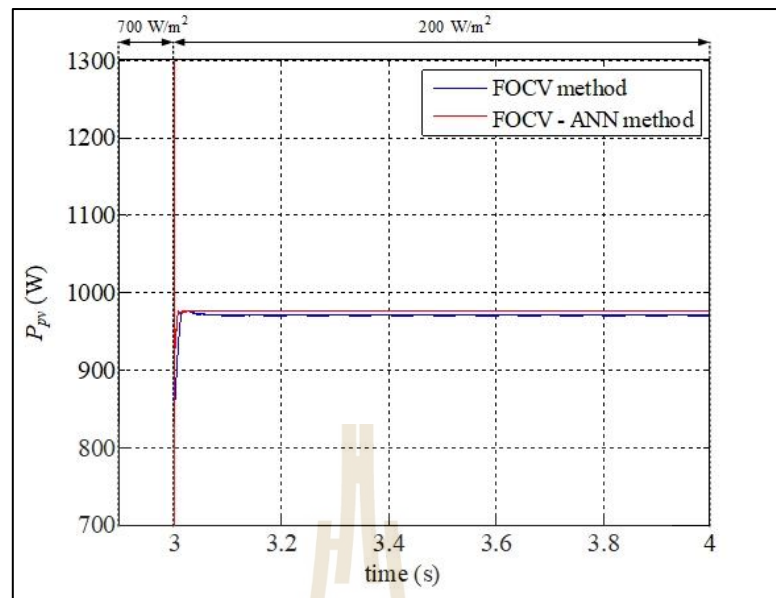
ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน กับวิธี FOCV - ANN เส้นสีแดง ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.9 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.10 ถึงรูปที่ 6.12



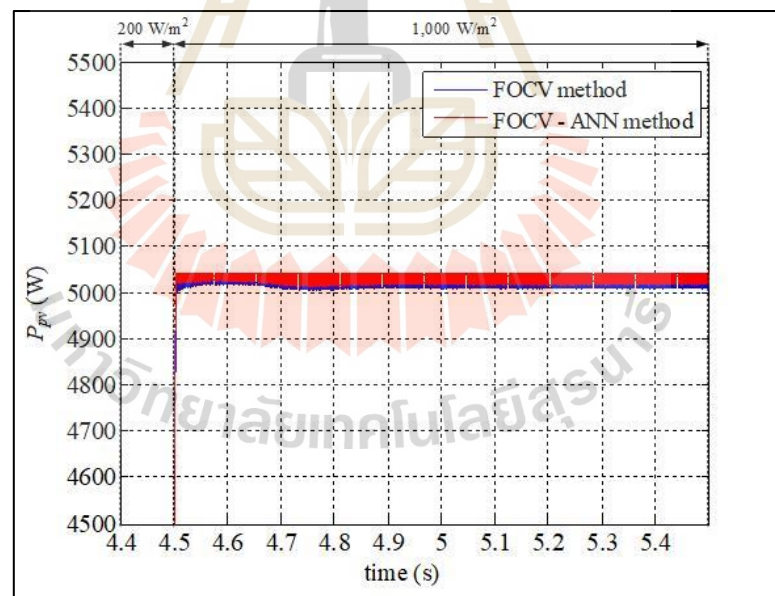
รูปที่ 6.9 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$



รูปที่ 6.10 รูปขยายของรูปที่ 6.9 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$



รูปที่ 6.11 รูปขยายของรูปที่ 6.9 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$

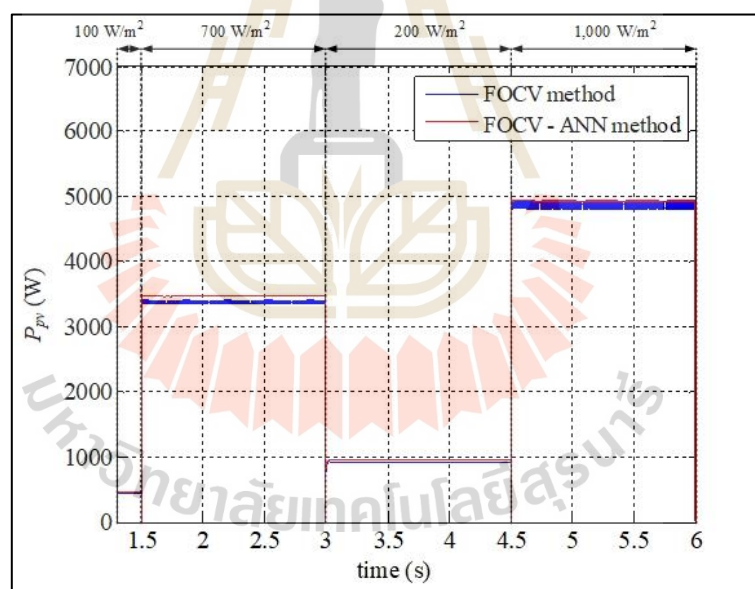


รูปที่ 6.12 รูปขยายของรูปที่ 6.9 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$

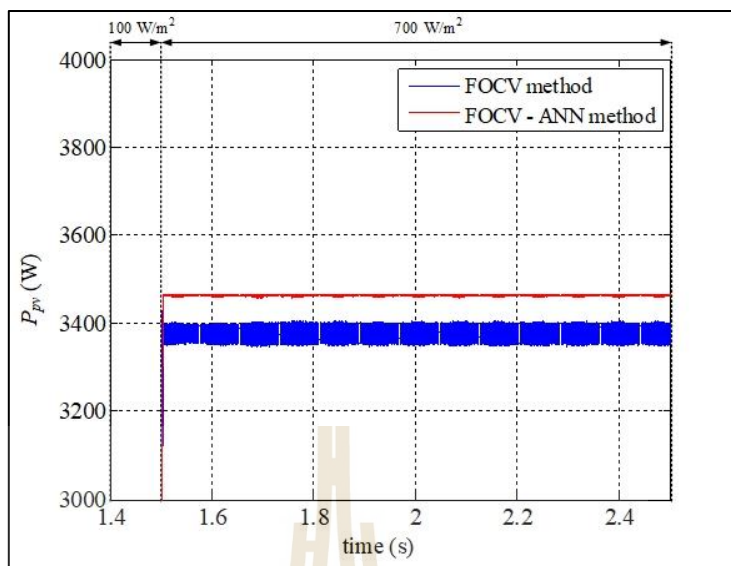
จากรูปที่ 6.10 ถึงรูปที่ 6.12 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้สูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับ FOCV - ANN ณ อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  ช่วงความเข้มแสงต่างๆ พบว่าวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้ใกล้เคียงกับผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้วิธี FOCV

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้สูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN สามารถยืนยันได้ว่ที่อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้วิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้ที่ใกล้เคียงกับวิธี FOCV

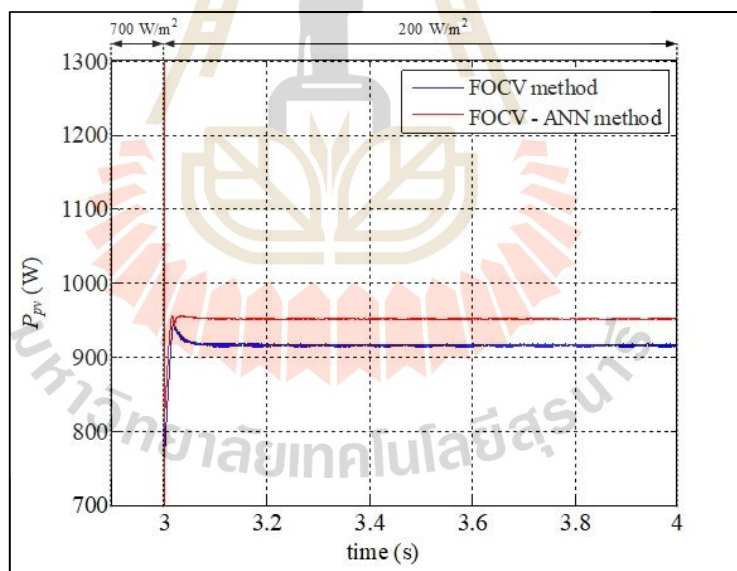
พิจารณา ณ อุณหภูมิคงที่  $40^{\circ}\text{C}$  กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100\text{ W/m}^2$  เป็น  $700\text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700\text{ W/m}^2$  เป็น  $200\text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200\text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000\text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้สูงสุดระหว่างวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน กับ FOCV - ANN เส้นสีแดง ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.13 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงในรูปที่ 6.14 ถึงรูปที่ 6.16



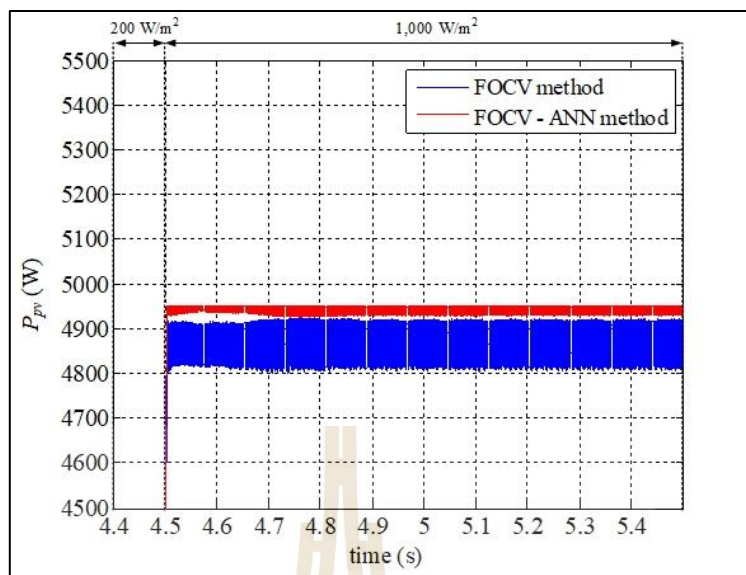
รูปที่ 6.13 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้สูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 6.14 รูปขยายของรูปที่ 6.13 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$



รูปที่ 6.15 รูปขยายของรูปที่ 6.13 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$



รูปที่ 6.16 รูปขยายของรูปที่ 6.13 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$

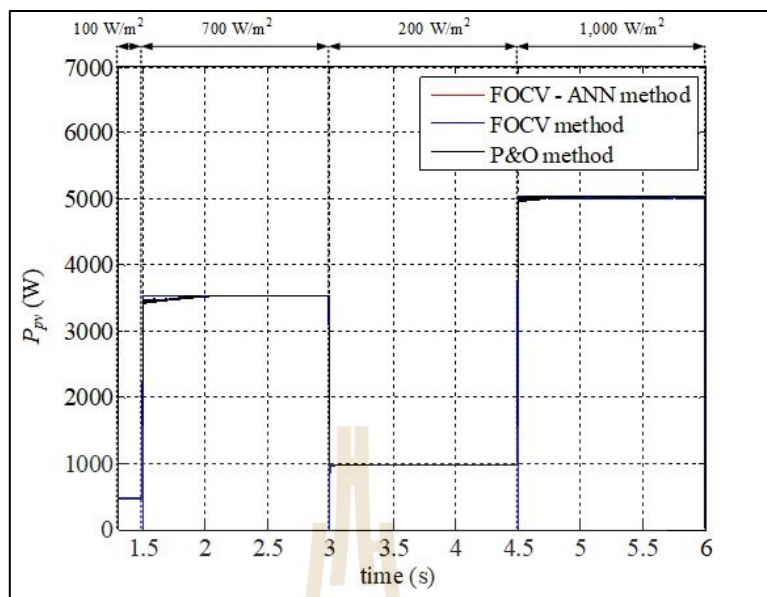
จากรูปที่ 6.14 ถึงรูปที่ 6.16 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิคงที่  $40^\circ\text{C}$  ช่วงความเข้มแสงต่าง ๆ พบว่าวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวที่มากกว่าวิธี FOCV

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN เมื่ออุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ  $40^\circ\text{C}$  ช่วงความเข้มแสงต่าง ๆ สามารถยืนยันได้ว่าวิธี FOCV - ANN สามารถดึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากกว่าวิธี FOCV ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง

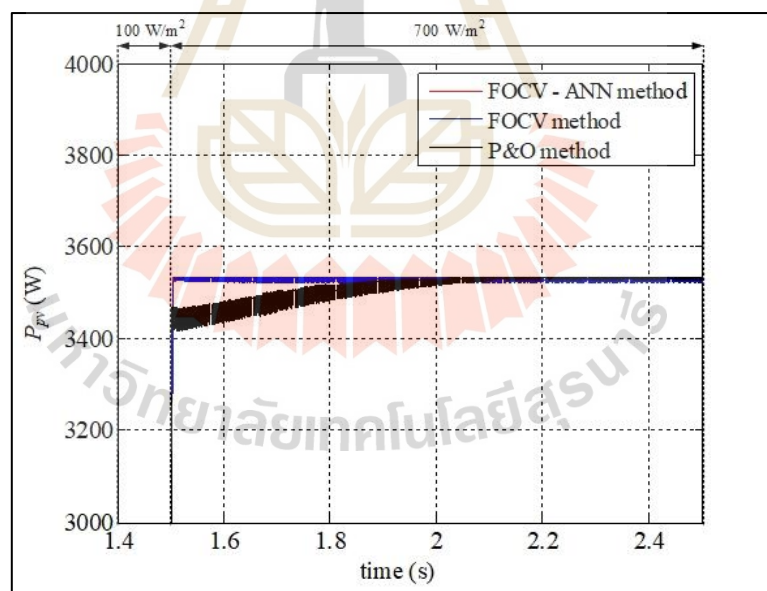
### 6.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN

สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN จะพิจารณาอุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN เส้นสีแดงจะถูกเปรียบเทียบกับวิธี P&O เส้นสีดำ และวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน โดยผลการจำลองสถานการณ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้ง 3 ช่วง แสดงดังรูปที่ 6.17 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงดังรูปที่ 6.18 ถึงรูปที่ 6.20



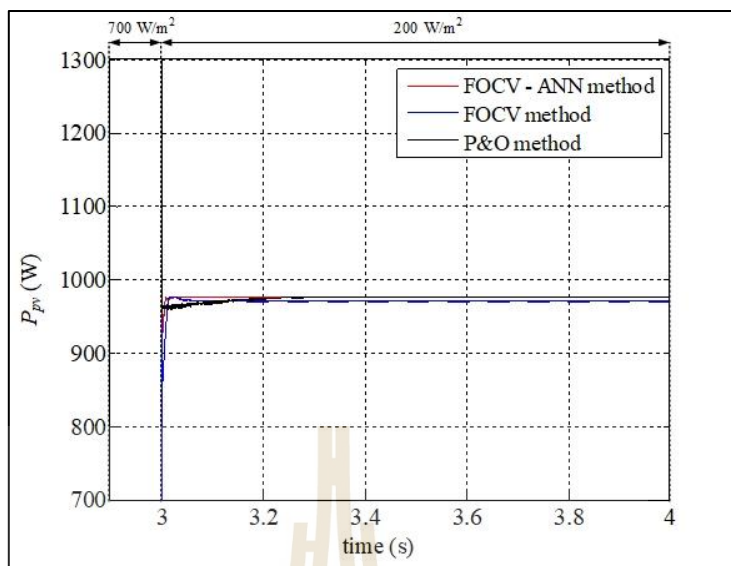


รูปที่ 6.17 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิ 25 °C

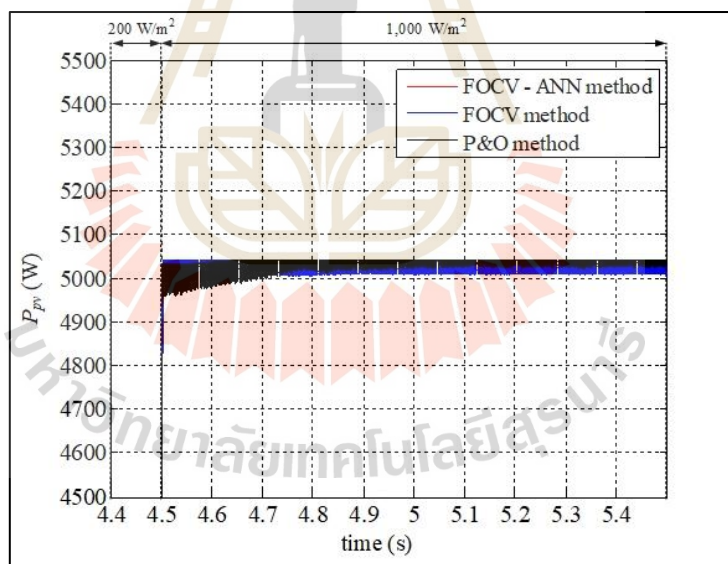


รูปที่ 6.18 รูปขยายของรูปที่ 6.17 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100  $W/m^2$  เป็น 700  $W/m^2$  ณ อุณหภูมิ 25 °C





รูปที่ 6.19 รูปขยายของรูปที่ 6.17 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

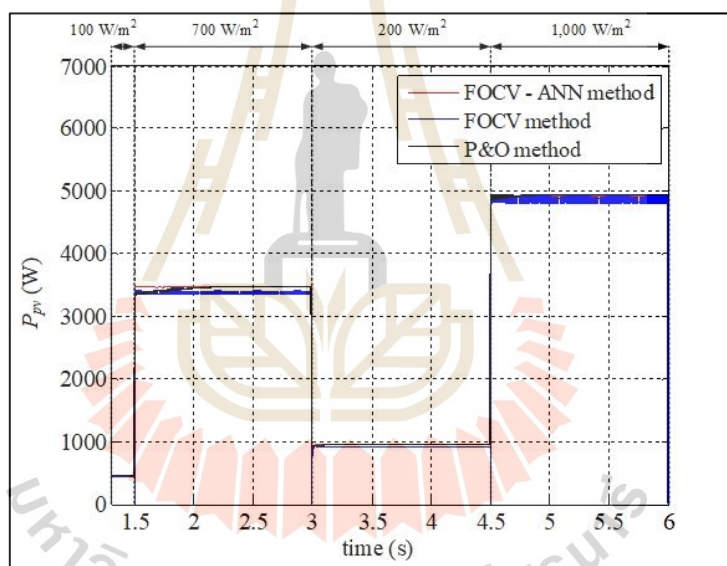


รูปที่ 6.20 รูปขยายของรูปที่ 6.17 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

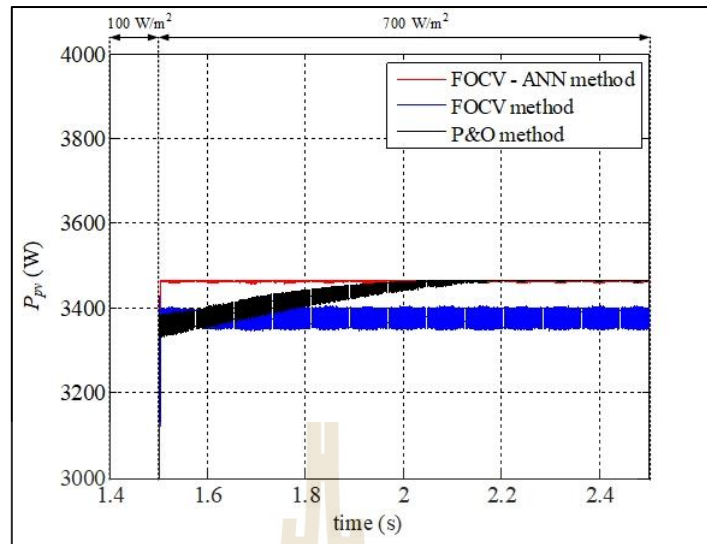
จากรูปที่ 6.18 ถึงรูปที่ 6.20 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิคงที่  $25^\circ \text{C}$  ช่วงความเข้มแสงต่าง ๆ พบว่าวิธี FOCV - ANN วิธี FOCV และวิธี P&O ให้ผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธี FOCV - ANN กับวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองในการลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี P&O

จากผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  วิธี FOCV – ANN และวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสถานะอยู่ตัวรวดเร็วกว่าวิธี P&O นอกจากนี้ยังให้ผลตอบสนองที่สถานะอยู่ตัวที่เข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

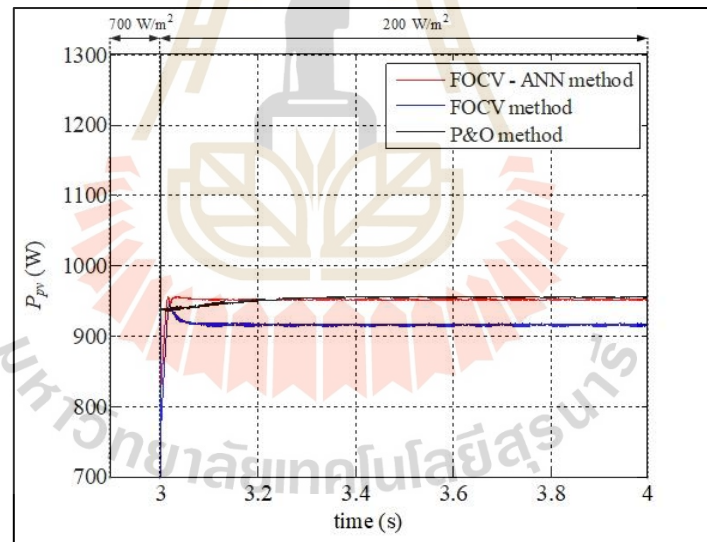
พิจารณา ณ อุณหภูมิคงที่  $40^{\circ}\text{C}$  และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100\text{ W/m}^2$  เป็น  $700\text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700\text{ W/m}^2$  เป็น  $200\text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200\text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000\text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN เส้นสีแดง เปรียบเทียบกับวิธี P&O เส้นสีดำ และวิธี FOCV เส้นสีน้ำ ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.21 และผลขยายแต่ละความเข้มแสดงดังรูปที่ 6.22 ถึงรูปที่ 6.24



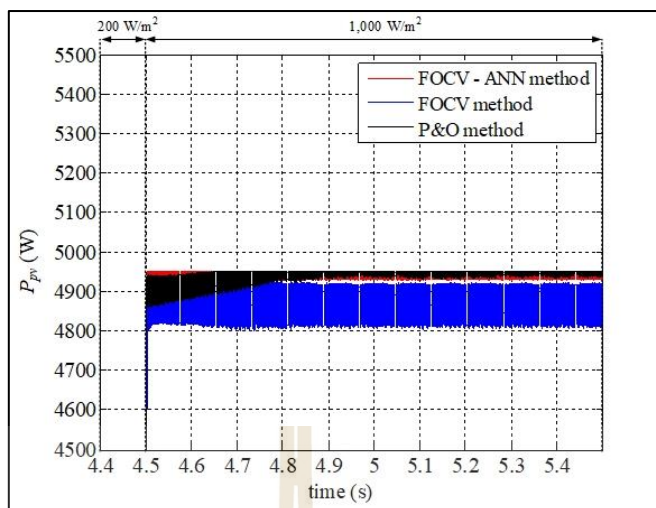
รูปที่ 6.21 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 6.22 รูปขยายของรูปที่ 6.21 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$



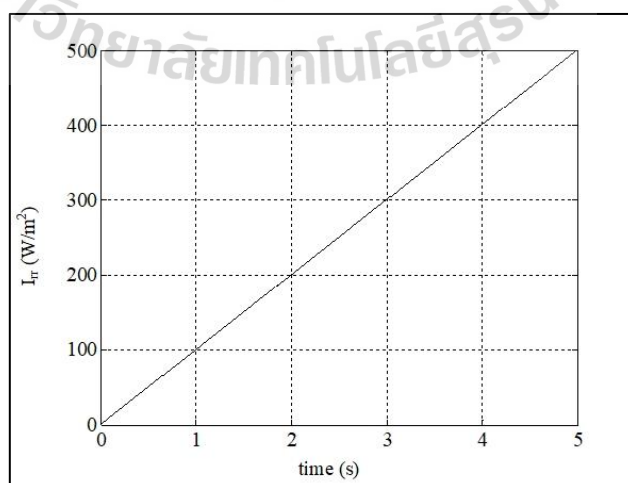
รูปที่ 6.23 รูปขยายของรูปที่ 6.21 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$



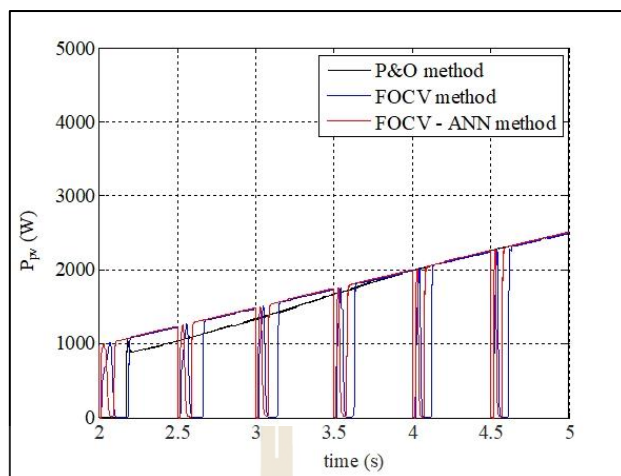
รูปที่ 6.24 รูปขยายของรูปที่ 6.21 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$

จากรูปที่ 6.22 ถึงรูปที่ 6.24 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิคงที่  $40^\circ \text{C}$  ช่วงความเข้มแสงต่าง ๆ พบว่าวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวที่มากกว่าวิธี FOCV และให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O นอกจากนี้ยังให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวมีค่าใกล้เคียงกับวิธี P&O

การจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O วิธี FOCV และวิธี FOCV - ANN เพิ่มเติม กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียงตามรูปที่ 6.25 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ของทั้ง 3 วิธี แสดงดังรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.25 ความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง



รูปที่ 6.26 ผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง

จากรูปที่ 6.26 ผลการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี P&O วิธี FOCV และวิธี FOCV – ANN กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง พบว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 วิธีสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามวิธี P&O ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าน้อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยช่วงเริ่มต้นของผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าวิธี P&O จะมีค่าน้อยกว่าวิธี FOCV และวิธี FOCV – ANN เนื่องจากการกำหนดจุดการทำงานเริ่มต้นของอัลกอริทึมวิธี P&O มีค่าไกลจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ควรจะเป็น ในขณะที่วิธี FOCV กับวิธี FOCV – ANN ยังให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบลาดเอียง เมื่อเงื่อนไขของผลต่างของความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าค่าที่กำหนดระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV และวิธี FOCV – ANN จะดำเนินการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรใหม่เพื่อกำหนดจุดการทำงานใหม่ให้กับระบบควบคุม ส่งผลให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้านี้มีการลดลงแล้วค่อยเพิ่มขึ้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งวิธี FOCV – ANN ที่พัฒนาขึ้นยังให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่รวดเร็วกว่าวิธี FOCV เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานจากระบบและให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แม่นยำ

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สามารถยืนยันได้ว่าวิธี FOCV – ANN ที่พัฒนาขึ้นให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง



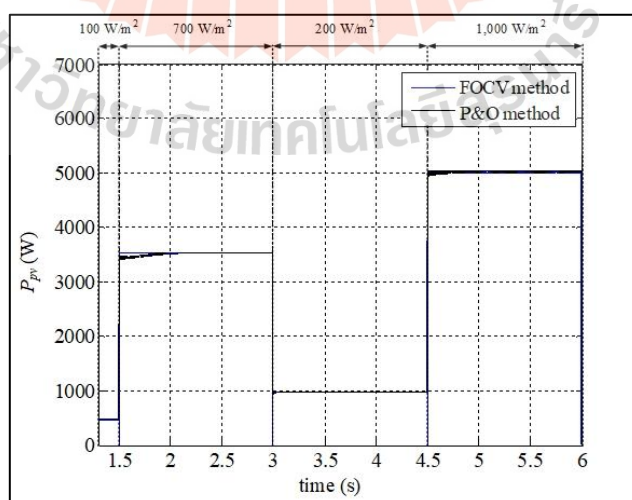
### 6.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอการยืนยันผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แนวทางด้วยการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปจำเป็นต้องอาศัยการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ร่วมกับชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยรายละเอียดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 และการเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับโปรแกรม MATLAB/Simulink (ทศพร ณรงค์ฤทธิ, 2557) ได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ข และการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีต่าง ๆ ที่นำเสนอในภาคผนวก ค

การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปจะกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าดังตารางที่ 6.1 ในหัวข้อที่ 6.2

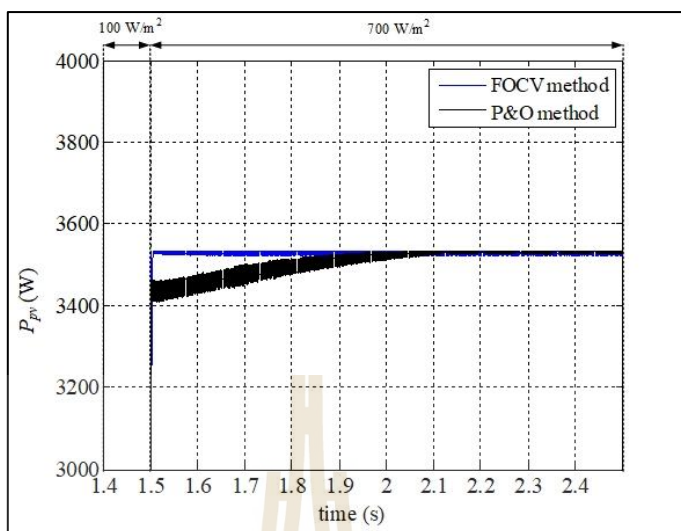
#### 6.3.1 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV

สำหรับการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปในการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด กำหนดให้อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 3 ช่วง ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100\text{ W/m}^2$  เป็น  $700\text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700\text{ W/m}^2$  เป็น  $200\text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200\text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000\text{ W/m}^2$  ซึ่งผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O เส้นสีดำ กับวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงในรูปที่ 6.27 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.28 ถึงรูปที่ 6.30

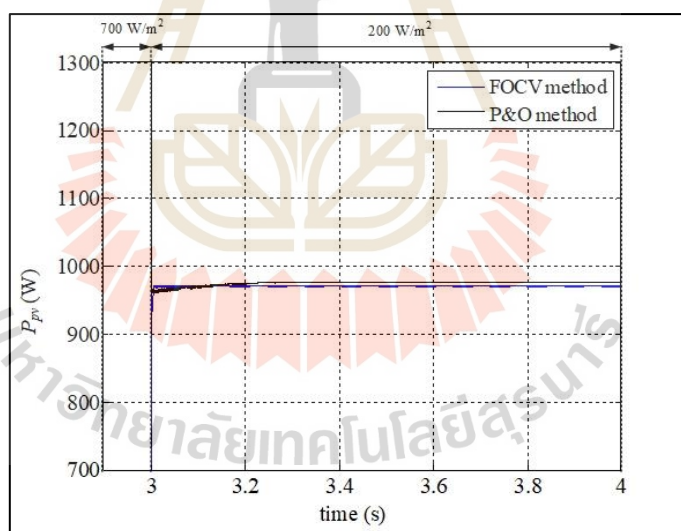


รูปที่ 6.27 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O วิธี FOCV ณ อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

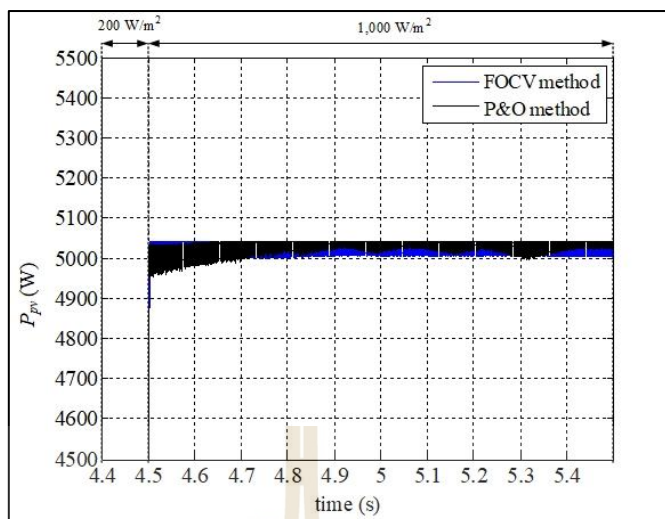




รูปที่ 6.28 รูปขยายของรูปที่ 6.27 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$



รูปที่ 6.29 รูปขยายของรูปที่ 6.27 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

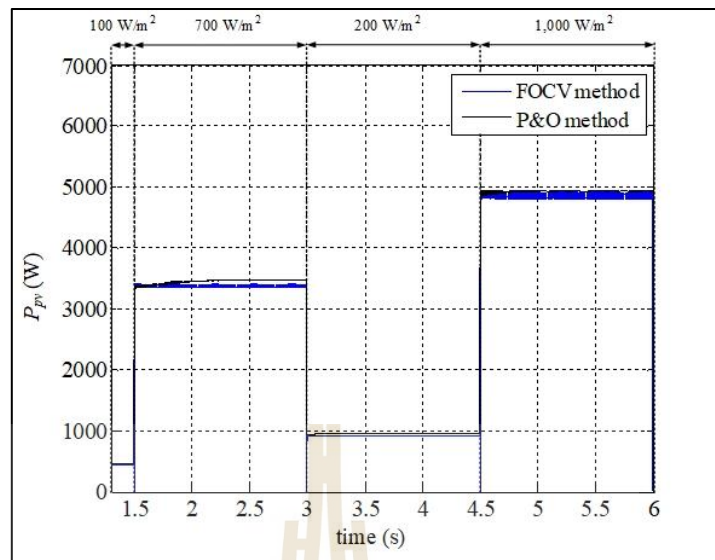


รูปที่ 6.30 รูปขยายของรูปที่ 6.27 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

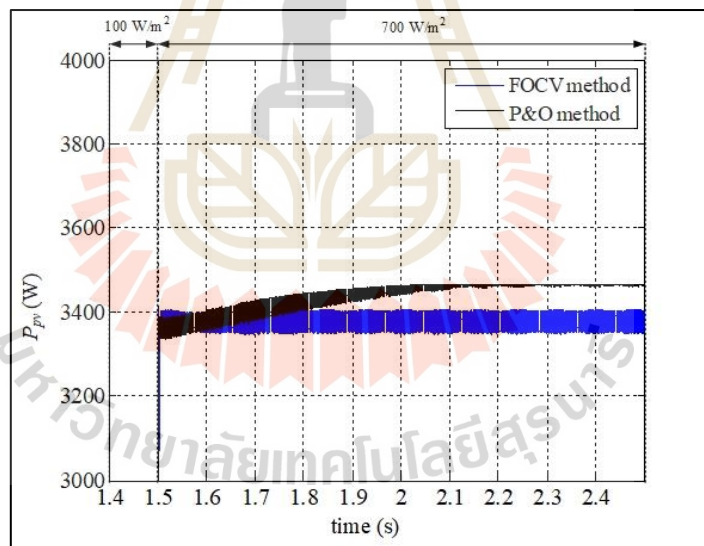
จากรูปที่ 6.28 ถึงรูปที่ 6.30 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ช่วงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่าง ๆ ณ อุณหภูมิคงที่  $25^\circ \text{C}$  แสดงให้เห็นว่าวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O โดยมีผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวใกล้เคียงกับวิธี P&O

จากการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV สามารถยืนยันได้ว่าวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O และให้ผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวที่ใกล้เคียงกับวิธี P&O ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

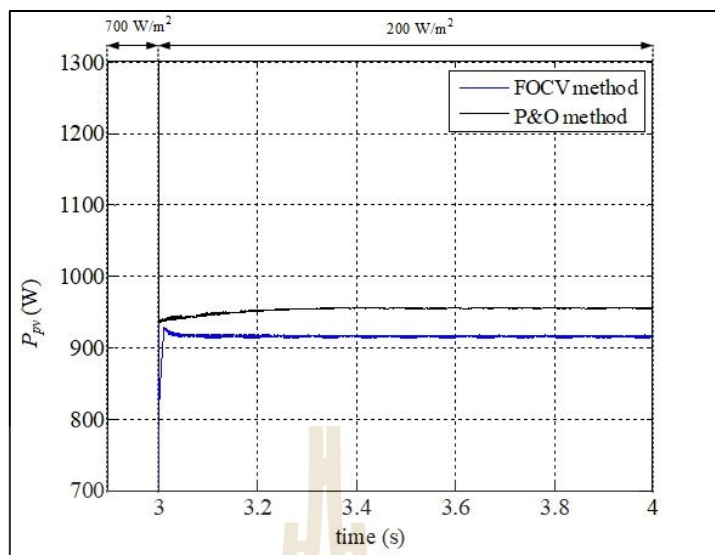
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกิ่งที่  $40^\circ \text{C}$  กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O เส้นสีดำ กับวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน ทั้ง 3 ช่วงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.31 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.32 ถึงรูปที่ 6.34



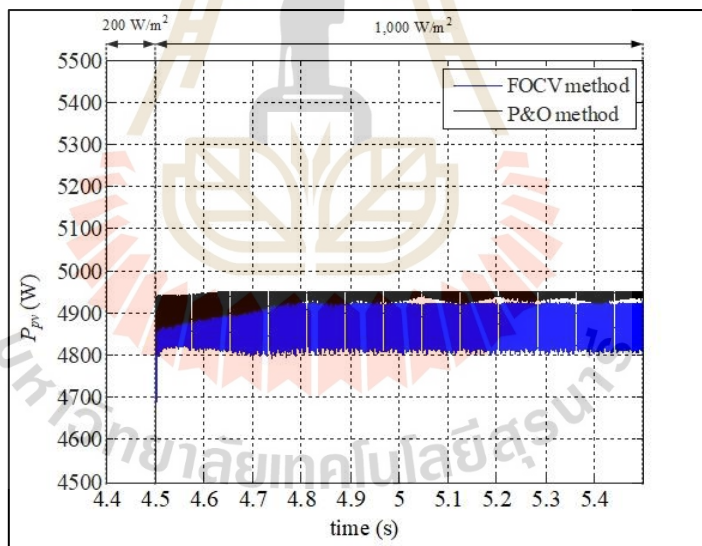
รูปที่ 6.31 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O วิธี FOCV ณ อุณหภูมิ  $40^{\circ}C$



รูปที่ 6.32 รูปขยายของรูปที่ 6.31 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 W/m^2$  เป็น  $700 W/m^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^{\circ}C$



รูปที่ 6.33 รูปขยายของรูปที่ 6.31 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$



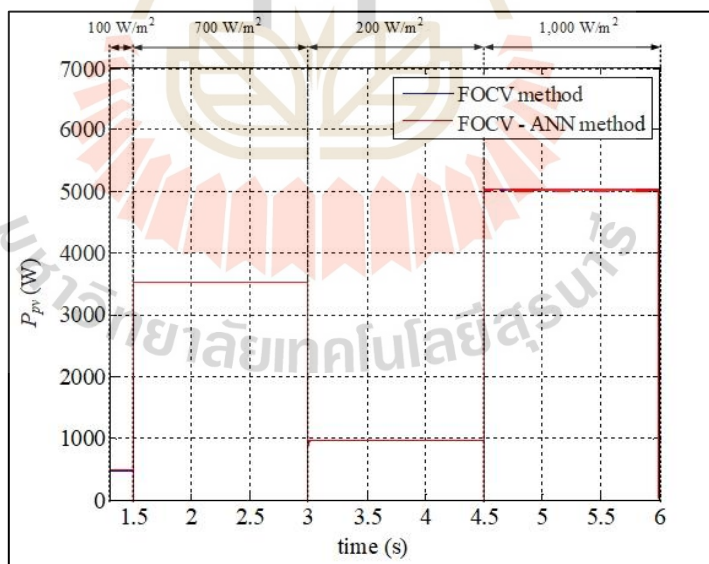
รูปที่ 6.34 รูปขยายของรูปที่ 6.31 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$

จากรูปที่ 6.32 ถึงรูปที่ 6.34 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV ณ อุณหภูมิคงที่  $40^\circ \text{C}$  มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่าง ๆ พบว่าวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวน้อยกว่าวิธี P&O แต่ยังคงมีความไวในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O

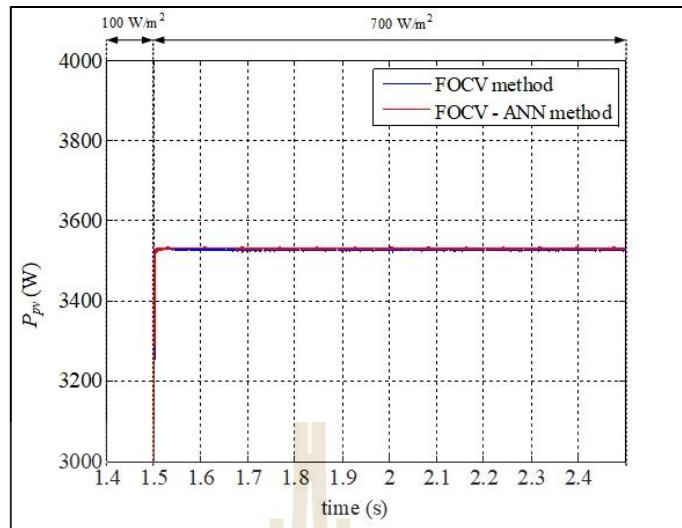
จากการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV สามารถยืนยันได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก  $25^{\circ}\text{C}$  เป็น  $40^{\circ}\text{C}$  วิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวที่น้อยกว่าวิธี P&O เนื่องจากค่า  $K$  ของระบบที่เลือกใช้ไม่เหมาะสมกับอุณหภูมิที่พิจารณาทำให้เกิดความคาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

### 6.3.2 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN

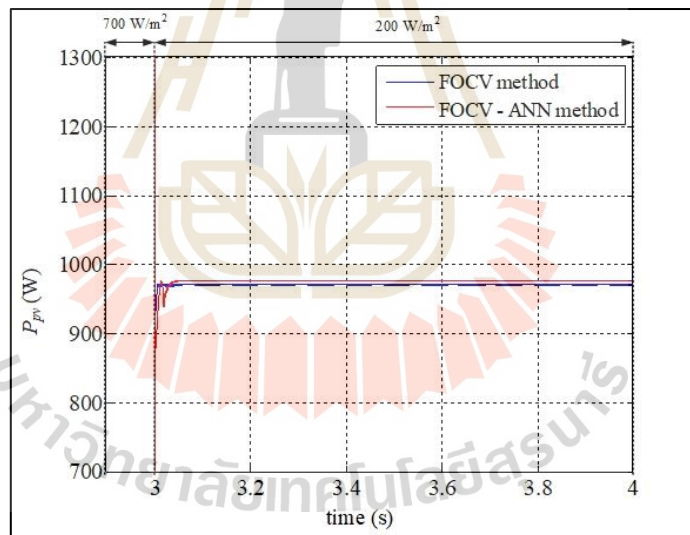
สำหรับการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปในการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN จะพิจารณาที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100\text{ W/m}^2$  เป็น  $700\text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700\text{ W/m}^2$  เป็น  $200\text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200\text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000\text{ W/m}^2$  ซึ่งผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน กับวิธี FOCV - ANN เส้นสีแดง ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.35 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.36 ถึงรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.35 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

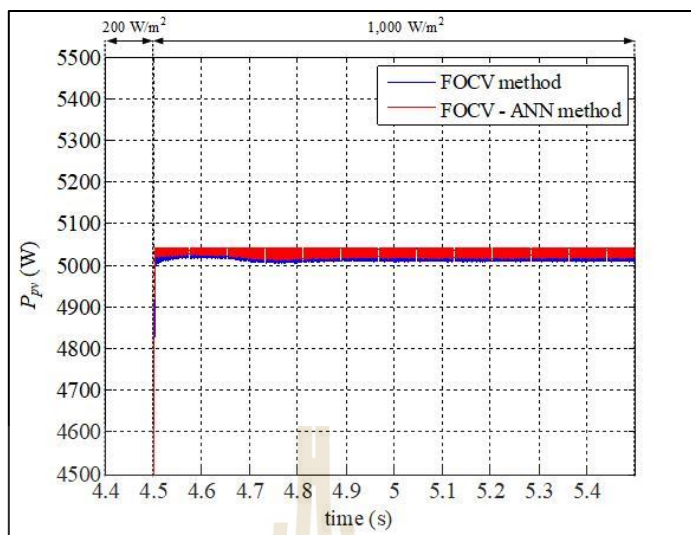


รูปที่ 6.36 รูปขยายของรูปที่ 6.35 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$



รูปที่ 6.37 รูปขยายของรูปที่ 6.35 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$



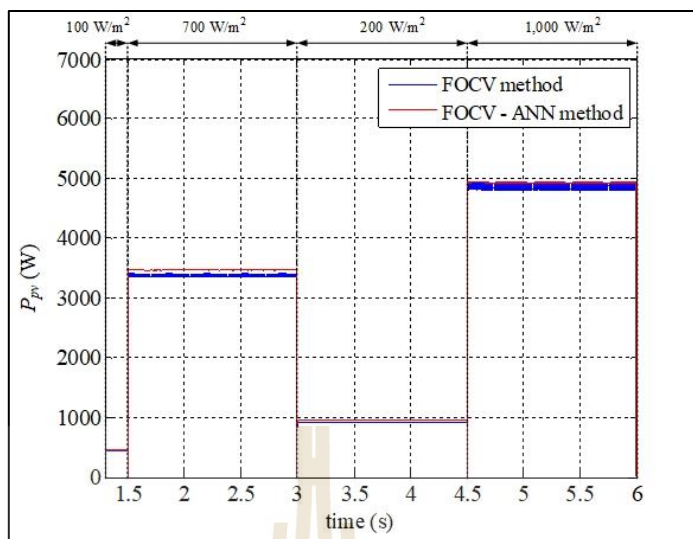


รูปที่ 6.38 รูปขยายของรูปที่ 6.35 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$

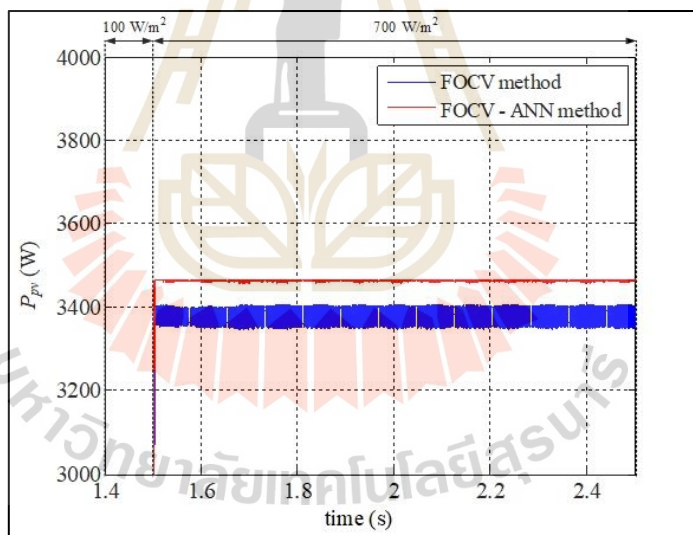
จากรูปที่ 6.36 ถึงรูปที่ 6.38 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV วิธี FOCV – ANN ณ อุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่าง ๆ พบว่าวิธี FOCV และวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน

จากผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  สามารถยืนยันได้ว่าวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับวิธี FOCV ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV – ANN ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

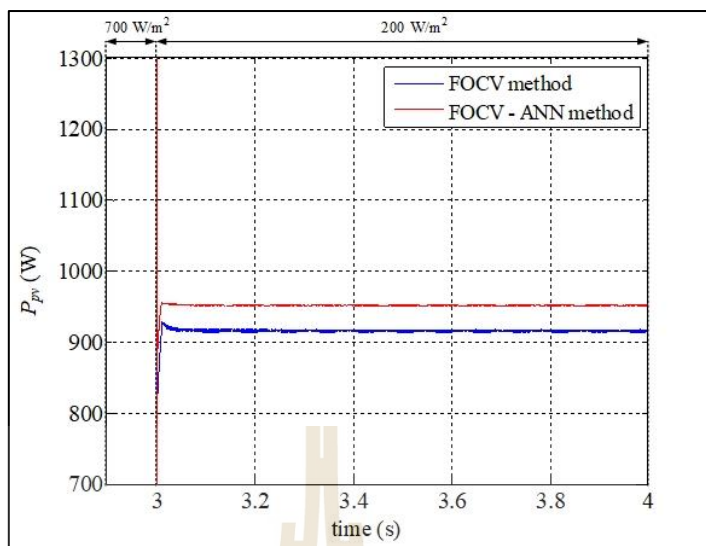
เมื่อพิจารณาทดสอบที่อุณหภูมิคงที่  $40^\circ\text{C}$  มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน กับวิธี FOCV - ANN เส้นสีแดง ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.39 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงในรูปที่ 6.40 ถึงรูปที่ 6.42



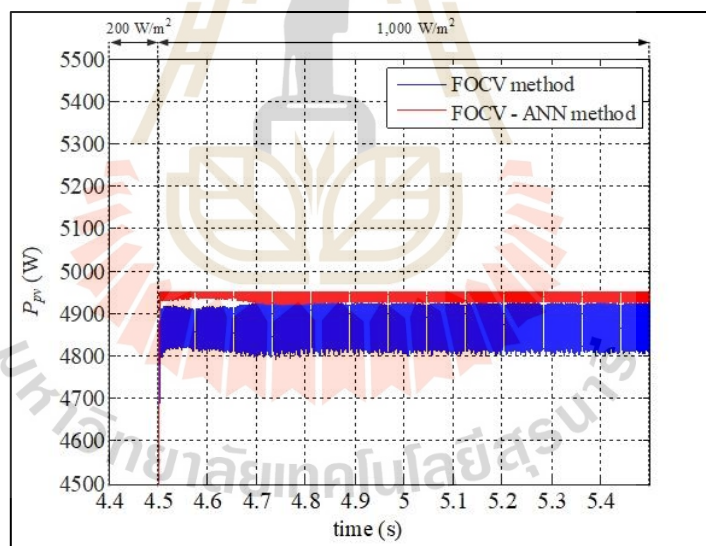
รูปที่ 6.39 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 6.40 รูปขยายของรูปที่ 6.39 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m<sup>2</sup> เป็น 700 W/m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 6.41 รูปขยายของรูปที่ 6.39 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$



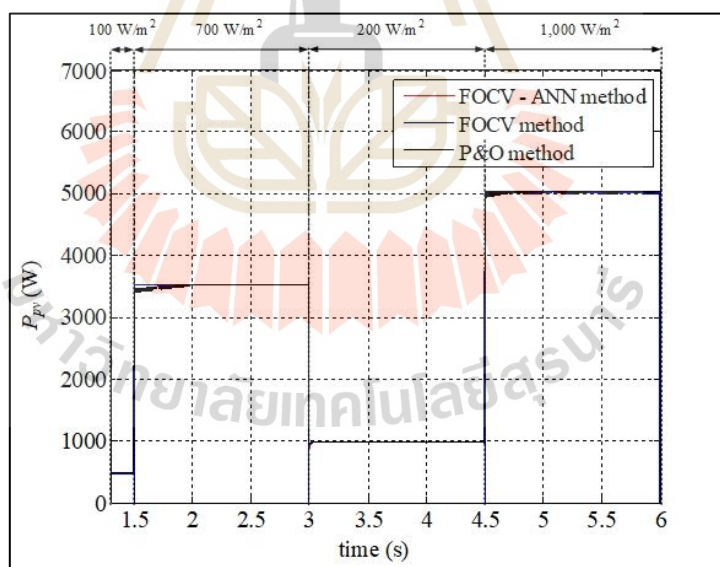
รูปที่ 6.42 รูปขยายของรูปที่ 6.39 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$

จากรูปที่ 6.40 ถึงรูปที่ 6.42 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN พบว่าเมื่ออุณหภูมิคงที่  $40^\circ \text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง แสดงให้เห็นว่าวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวที่มากกว่าวิธี FOCV ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง

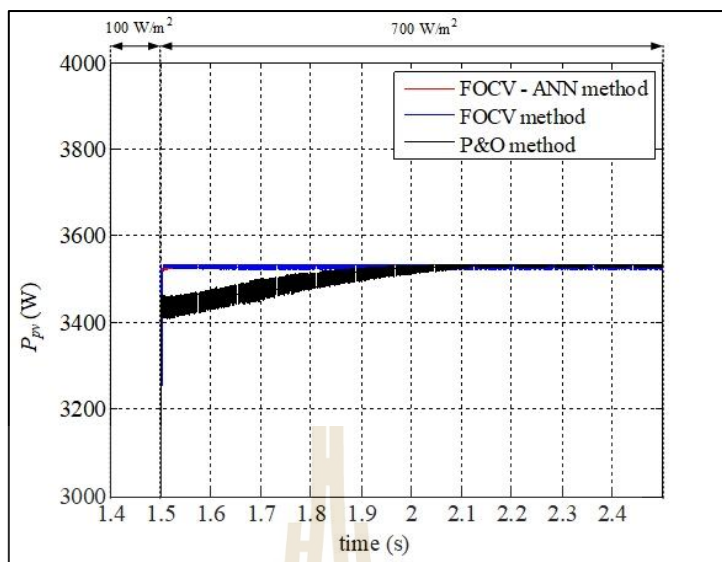
จากผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธีการ FOCV - ANN สามารถยืนยันได้ว่าเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิจาก  $25^{\circ}\text{C}$  คงที่เป็น  $40^{\circ}\text{C}$  คงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่มากกว่าวิธี FOCV ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

### 6.3.3 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN

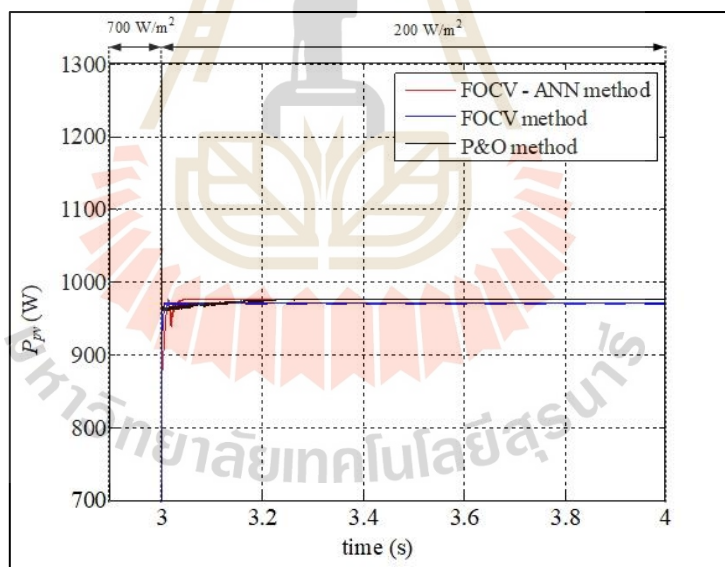
สำหรับการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปในการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN อุณหภูมิคงที่  $25^{\circ}\text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100\text{ W/m}^2$  เป็น  $700\text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700\text{ W/m}^2$  เป็น  $200\text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200\text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000\text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN เส้นสีแดง มาเปรียบเทียบกับวิธี P&O เส้นสีดำ และวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน ทั้ง 3 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.43 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.44 ถึงรูปที่ 6.46



รูปที่ 6.43 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

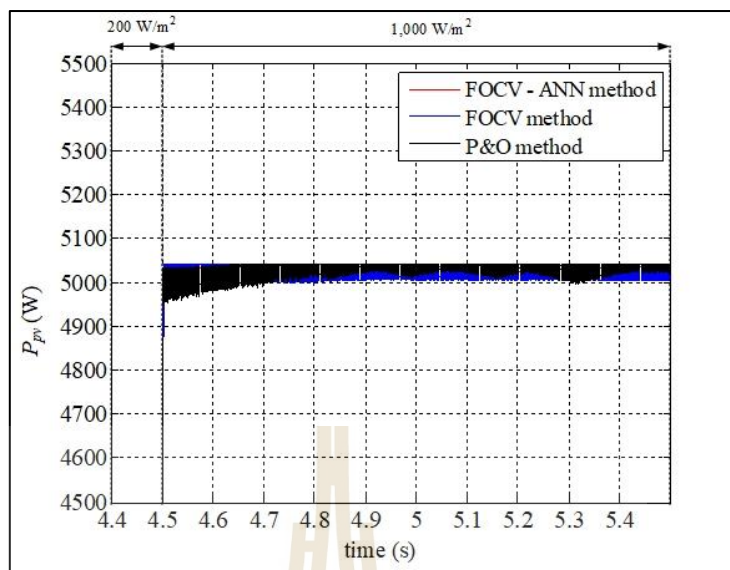


รูปที่ 6.44 รูปขยายของรูปที่ 6.43 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$



รูปที่ 6.45 รูปขยายของรูปที่ 6.43 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$





รูปที่ 6.46 รูปขยายของรูปที่ 6.43 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$

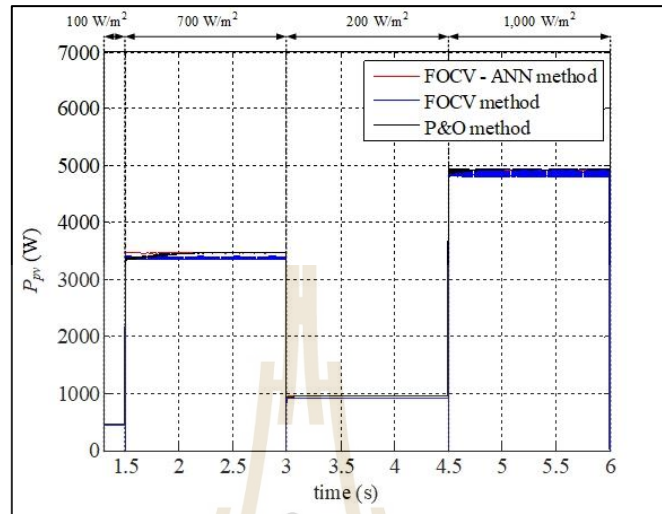
จากรูปที่ 6.44 ถึงรูปที่ 6.46 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ช่วงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่าง ๆ พบว่าวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O และให้ตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวเข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้วิธี FOCV - ANN ยังให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวที่มากกว่าวิธี FOCV

จากการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN ที่อุณหภูมิคงที่  $25^\circ\text{C}$  สามารถยืนยันได้ว่าวิธี FOCV - ANN และวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O นอกจากนี้วิธี FOCV - ANN ที่พัฒนาขึ้นสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และให้ผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวที่เข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ใกล้เคียงกับวิธี P&O และวิธี FOCV ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

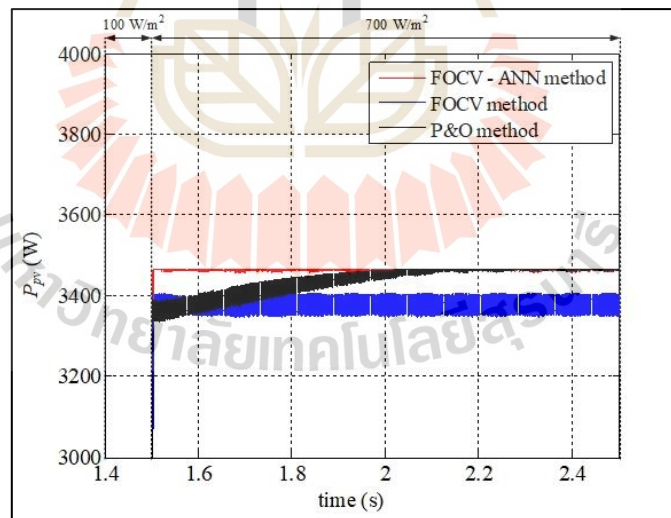
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกคงที่  $40^\circ\text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $100 \text{ W/m}^2$  เป็น  $700 \text{ W/m}^2$  ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN เส้นสีแดง มาเปรียบเทียบกับวิธี P&O เส้นสีดำ และวิธี FOCV เส้นสีน้ำเงิน ทั้ง 3 ช่วงการ



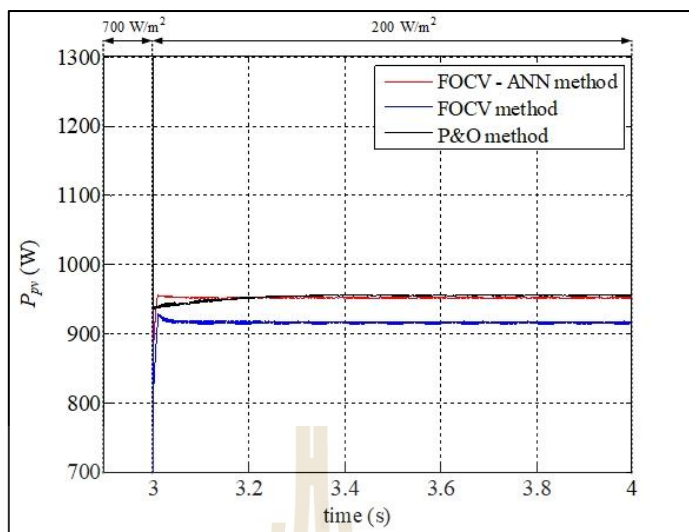
เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.47 และผลขยายแต่ละความเข้มแสงแสดงดังรูปที่ 6.48 ถึงรูปที่ 6.50



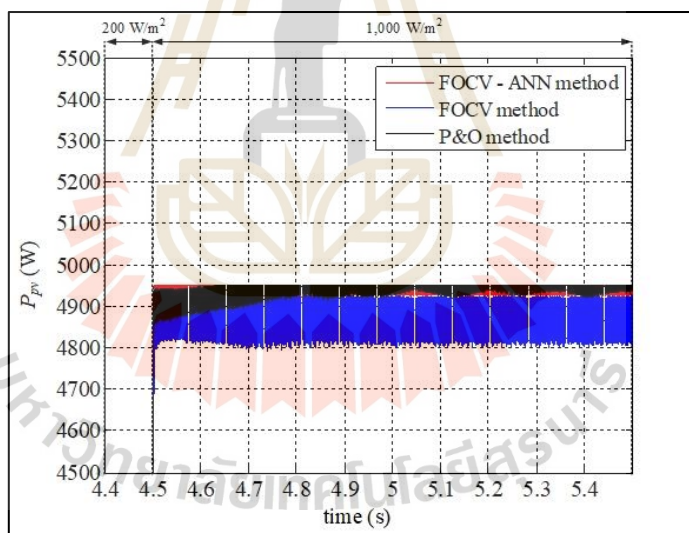
รูปที่ 6.47 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV - ANN ณ อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 6.48 รูปขยายของรูปที่ 6.47 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 100 W/m² เป็น 700 W/m² ณ อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 6.49 รูปขยายของรูปที่ 6.47 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $700 \text{ W/m}^2$  เป็น  $200 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$



รูปที่ 6.50 รูปขยายของรูปที่ 6.47 ช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $200 \text{ W/m}^2$  เป็น  $1,000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $40^\circ \text{C}$

จากรูปที่ 6.48 ถึงรูปที่ 6.50 ผลทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ที่อุณหภูมิคงที่  $40^\circ \text{C}$  และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้ง 3 ช่วง พบว่าผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าของวิธี FOCV - ANN ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวที่มากกว่าวิธี FOCV นอกจากนี้ยังให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสถานะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธี P&O และยังให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวใกล้เคียงกับวิธี P&O

ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ด้วยการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป สามารถยืนยันได้ว่าวิธี FOCV - ANN ที่พัฒนาขึ้นให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง

#### 6.4 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 3 วิธี ได้แก่ วิธี P&O วิธี FOCV และวิธี FOCV – ANN ที่พัฒนาขึ้นโดยแบ่งพิจารณาเป็น 3 แนวทาง ได้แก่ การเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี P&O กับวิธี FOCV การเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างวิธี FOCV กับวิธี FOCV - ANN และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธี FOCV – ANN ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2 วิธี คือ วิธีการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และวิธีการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์การเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่าวิธี FOCV - ANN ที่พัฒนาขึ้นให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์หัวข้อการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 อยู่ระหว่างรอการตีพิมพ์บทความวิจัย

- ธนาธิป บุญทวี, โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, กองพัน อารีรักษ์, และ กองพล อารีรักษ์, “วิธีแบบไม่วนซ้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริตซินีหนึ่งเฟส”, วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม-มีนาคม 2567.

## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ โดยมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำด้วยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาพแวดล้อมของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้เริ่มศึกษาและค้นคว้าปรีทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกโดดและระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้า โดยผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอจะแสดงถึงสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยที่แสดงถึงวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีต่าง ๆ หลายวิธีการ ซึ่งได้นำเสนอไว้ในส่วนของปรีทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบไปด้วย กราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่มีต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบการต่อแผงแบบขนานและแบบอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสขึ้นเดียวด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้นจะแทนด้วยวิธี P&O ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยวิธี P&O เป็นวิธีที่ต้องอาศัยการปรับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของระบบด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าผ่านการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยควบคุมพีไอที่มีค่าเหมาะสม การหาออกแบบตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะอาศัยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงควบคู่กับการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่กริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยรายละเอียดต่าง ๆ และหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธี P&O ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้นที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำวิธี P&O บนโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งพบว่า การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำ

วิธี P&O สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียว ซึ่งหลักการทำงานโดยการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรคูณกับค่าฟิลแพคเตอร์ที่ได้จากชุดข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีดังกล่าวถูกนำไปใช้งานกับระบบเชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสชั้นเดียว พบว่าระบบไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการเพิ่มวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเข้าไประหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสทำให้ได้โครงสร้างเป็นระบบเชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น และมีหลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV โดยวิธี FOCV เป็นวิธีที่กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการตรวจจับวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรคูณกับค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรที่มีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV ซึ่งวิธี FOCV สามารถติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ แสดงในบทที่ 4 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นปัญญาประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาได้หลากหลายทั้งปัญหาที่มีความเป็นเชิงเส้นและปัญหาที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยชุดข้อมูลอินพุตและเป้าหมายที่ต้องการแก้ไข ปัญหา โดยวิธีการแก้ไขปัญหาคือโครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวมีความเหมาะสมกับการแก้ไขปัญหาการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น จึงได้นำโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาปรับปรุงประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV เพื่อคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้กับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้นำเสนอวิธี FOCV - ANN รวมไปถึงการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV - ANN บนโปรแกรม MATLAB/Simulink จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำวิธี FOCV - ANN พบว่าวิธี FOCV - ANN มีประสิทธิภาพในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปยังกริดระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ แสดงในบทที่ 5 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดจำเป็นต้องมีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำกับการ



ตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำแสดงในบทที่ 6 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดประกอบไปด้วย 3 วิธี ได้แก่ วิธี P&O วิธี FOCV และวิธี FOCV - ANN โดยพิจารณาการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2 วิธี วิธีการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และวิธีการเปรียบเทียบสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป จากผลการจำลองสถานการณ์และการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงให้เห็นว่าวิธี FOCV ให้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในการลู่เข้าสู่ภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วแต่มีข้อเสียเปรียบที่ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัวมีความคาดเคลื่อนเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง จึงได้มีการนำเสนอวิธี FOCV – ANN ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ โดยให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง

## 7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- 1) ควรปรับปรุงเรื่องโครงสร้างระบบเป็นโครงสร้างระบบเชื่อมต่อกิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขึ้นไปเดี่ยวเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดสอบและยังให้ผลตอบสนองที่กิริระบบไฟฟ้าที่ดีกว่าระบบเชื่อมต่อกิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสสองชั้น
- 2) ควรมีการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อพิกัดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องและแม่นยำภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่าง
- 3) ควรมีการใช้ตัวควบคุมอื่น ๆ เช่น ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก ตัวควบคุมทางปัญญาประดิษฐ์ แทนตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้น



## รายการอ้างอิง

- ปทุมพร วงศ์ใหญ่, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. (2557). ระบบควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น., หน้า 545–548.
- ปทุมพร วงศ์ใหญ่, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์.. (2558). ระบบตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้วิธีรบกวนและสังเกต. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 – 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย., หน้า 393–396.
- ชวริย์ เกื้อนพังเทียม, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. (2561). อัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13, ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2561., หน้า 1-15.
- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2557). การออกแบบตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวสำหรับวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง. (2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุชาวดี จินสุทธิ. (2562). การสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมระบบเซลล์แสงอาทิตย์ – ลักษณะของการเชื่อมระบบจำหน่ายไฟฟ้า. มอก. 2606-2557.
- Emadi, A. (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution System Using the Generalized State-Space Averaging Method. IEEE Trans. On Indus. Elect., Vol. 51, No.5, pp. 992-1000.

- Boonmee, C. and Kumsuwan, Y. (2013). Modified maximum power point tracking based on ripple correlation control application for single-phase VSI grid-connected PV systems. **10th International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology.**
- Sangtungtong, W. Hinsui, T. and Fangsuwannarak, T. Study on Sliding-Mode Based MPPT for PV Array and Supplying Power to AC Grid. **11th International Conference Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).**
- Muamer M. Shebani, Tariq Iqbal and John E. Quicoe. (2016). Comparing bisection numerical algorithm with fractional short circuit current and open circuit voltage methods for MPPT photovoltaic systems. **IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC).**
- R. B. Gonzatti, B. P. B. Guimaraes, R. R. Pereira, L. E. Borges da Silva and G. Lambert-Torres. (2017). Implementation of a single-stage single-phase grid connected PV Converter. **Brazilian Power Electronics Conference (COBEP).**
- S. Z. Mohammad Noor, A.M. Omar, M.A.M. Radzi and A.H. Faranadia. (2018). Artificial Intellifence based Fuzzy-MPPT Technique of H-Bridge Inverter for Grid-Connected Photovoltaic System. **AEIT International Annual Conference.**
- Lakshmi P.N Jyothy and M R Sindhu. (2018). An Artificial Neural Network based MPPT Algorithm For Solar PV System. **4<sup>th</sup> International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES).**, pp.375-380.
- Muhammad Hanan, Xin Ai, Muhammad Yaqoob Javed, Muhammad Majid Gulzar and Saqib Ahmad. (2018). A Two-Stage Algorithm to Harvest Maximum Power from Photovoltaic System. **IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).**
- Raiker Guatam, A. Umanand, L. and Reddy B Subba. (2018). Perturb and Observe with Momentum Term applied to Current Referenced Boost Converter for PV Interface. **International Conference on Power Electronics , Drives and EnergySystems (PEDES).**

- Anu R, K., S Sheik, M., Shaleena, M. (2019). Comparison of P&O MPPT Based Solar PV System with Interleaved Boost Converter. **International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies.**, pp.1370-1376.
- Mohapatra, A. Nayak, B. and Saiprakash, C. (2019). Adaptive Perturb & Observe MPPT for PV System with Experimental Validation. **IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS).**, pp.257-261.
- Priyanka K Sorte, Kaibalya Prasad Panda, Rangababu Peesapati and Gayadhar Panda. (2020). An Improved Control Strategy for Single-Phase Single-Stage Grid-Tied PV System With Current Reference MPPT Control. **IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON).**, pp.461-466.
- Mayada Yousif Heelan and Fadhil Abbas M. Al-Qrimli. (2020). Design and Simulation of Neuro-Fuzzy Based MPPT Controller for PV Power System. **International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE).**
- Muhammad H. Rashid, POWER ELECTRONICS HANDBOOK. **Electrical and Computer Engineering University of West Florida.**
- Jena, S., Tiwary, N., Kumar Panigrahi, C., Kumar Sahu, P. (2020) Performance Improvement of Grid Integrated Voltage Source Inverter Using Different Hysteresis Current Controllers. **International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering.**
- Vijayakumari, A. (2020). A non-iterative MPPT of PV array with online measured short circuit and open circuit quantities. **Journal of King Saud University – Engineering Science.**
- Ahsan, N., Hadeed Ahmed, S., Ali Faisal, M., Nisar, A. (2020). An online fractional open-circuit voltage maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on sliding mode control. **International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering & Computer Sciences (RAEE & CS).**

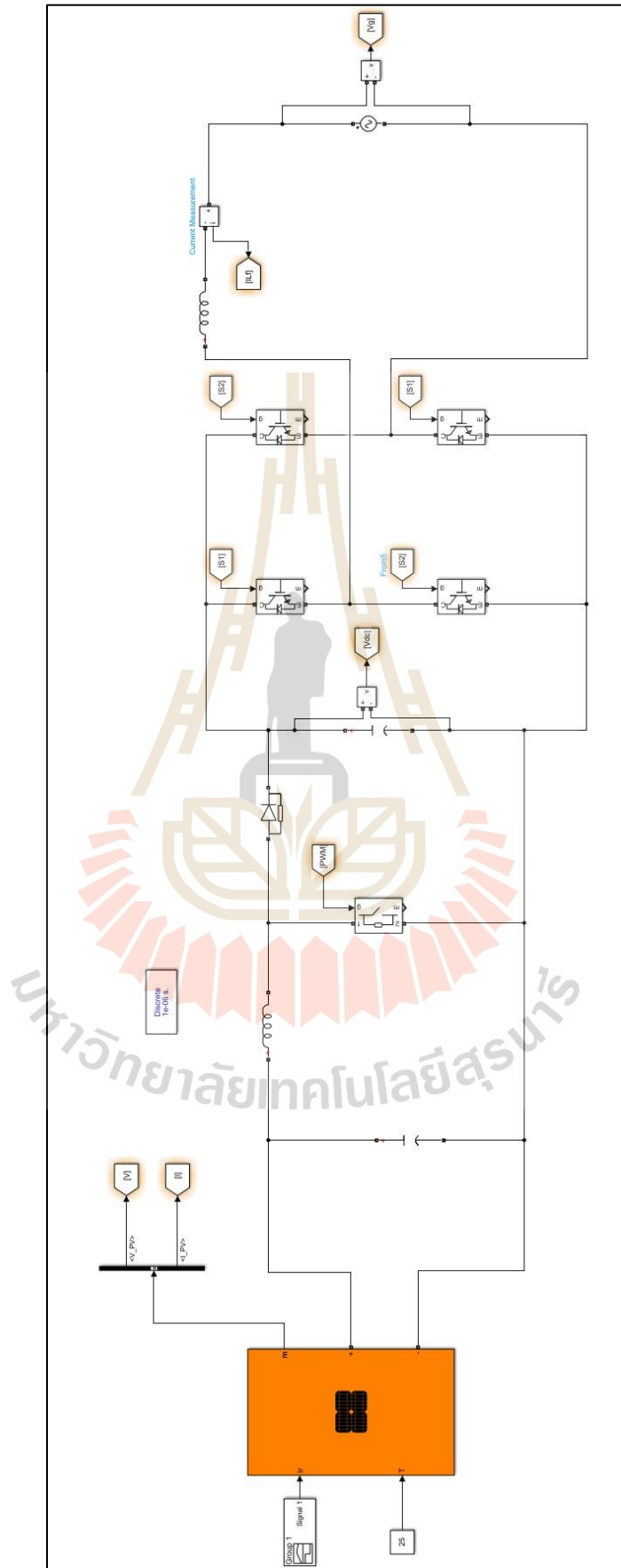
- Nadeem Ahsan, Sher Hadeed Ahmed, Murtaza Ali Faisal and Ahmed Nisar. (2020). An online fractional open-circuit voltage maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on sliding mode control. **International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering & Computer Sciences (RAEE & CS)**.
- Fatema A. Mohammed, Mohiy E. Bahgat, Saied S. Elmasry and Soliman M. Sharaf. (2021). Design of a Fuzzy Logic Controller for DC Converter of a Stand-Alone PV System Based on Maximum Power Point Tracking. **22<sup>nd</sup> International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)**., pp.7-13.
- Boontua, S. Kongsuk, P. and Kinnares, V. (2021). Fice-level Cascaded Multilevel H-Bridge Inverter for Single-Phase PV Grid-Connected System. **18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**., pp.418-421.
- Yacine Triki, Ali Bechouche, Hamid Saddiki and Djaffar Ould Abdeslam. (2021). An Improved Incremental Conductance Based MPPT Algorithm for Photovoltaic System. **IEEE Industrial Electronics Society (IECON)**.



ภาคผนวก ก

ชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่ง  
เฟสที่มีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนโปรแกรม MATLAB/Simulink

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 ชุดบล็อกภาคกำลังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้สูงสูตวิธี่ P&O บนโปรแกรม MALAB/Simulink



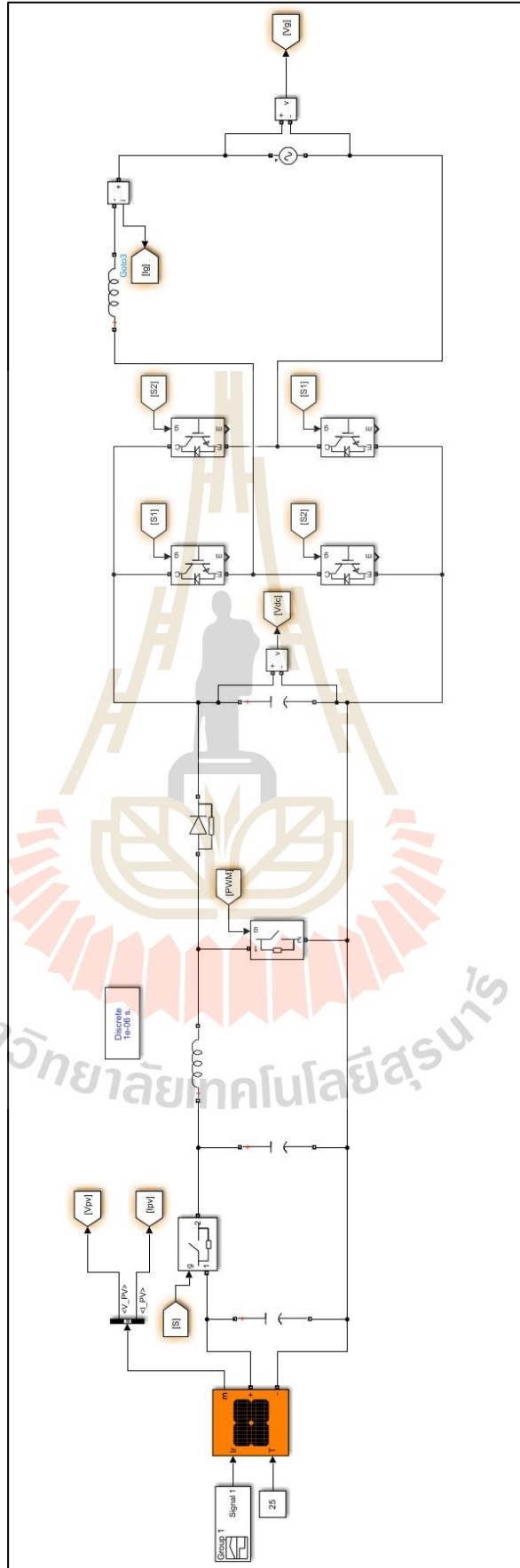


\*\*\*\*\*  
 โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตบนโปรแกรม  
 MATLAB/Simulink  
 \*\*\*\*\*

```
function Vref = PandO(V,I)
%กำหนดค่าต่าง ๆ
Vmax=188.1;
Vmin=0;
Vrefinit=142;
deltaV=0.1;
persistent Vold Pold Vrefold
dataType='double';
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Vrefold=Vrefinit;
end
%โปรแกรมได้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีการรบกวนและการสังเกต
P=V*I;
dV=V-Vold;
dP=P-Pold;
if dP ~= 0
    if dP>0
        if dV>0
            Vref=Vrefold+deltaV;
        else
            Vref=Vrefold-deltaV;
        end
    else
        if dV<0
            Vref=Vrefold+deltaV;
        else
            Vref=Vrefold-deltaV;
        end
    end
end
```

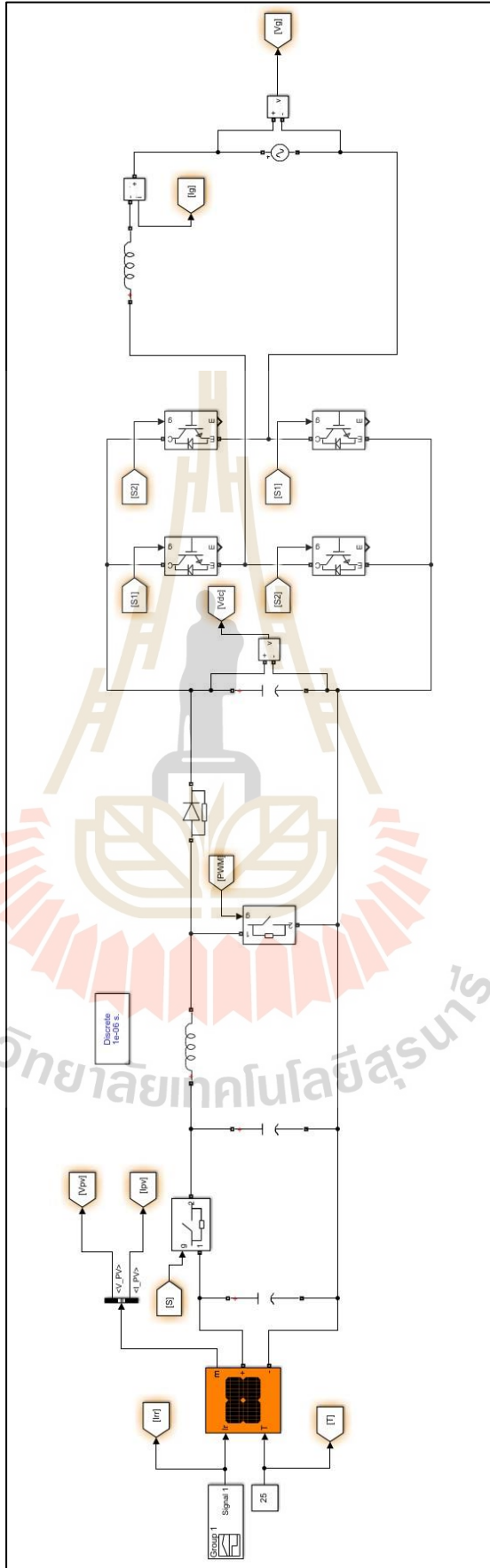
```
end
  end
else
  Vref=Vrefold;
end
if Vref>=Vmax||Vref<=Vmin
  Vref=Vrefold;
end
Vrefold=Vref;
Vold=V;
Pold=P;
```





รูปที่ ก.3 ชุดบล็อกภาคกำลังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้สูงสุตวิธี่ FOCV บนโปรแกรม MALAB/Simulink





รูปที่ ก.5 ชุดบล็อกภาคกำลังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุตวิธิ FOCV - ANN บนโปรแกรม MALAB/Simulink





\*\*\*\*\*  
 โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธี  
 เทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรบนโปรแกรม MATLAB/Simulink  
 \*\*\*\*\*

function Vref = ANN(T,Irr,Voc)

%โปรแกรมโค้ดโครงข่ายประสาทเทียม

%ชั้นซ่อนเร้นที่ 1

B1=1/(1+exp(-((-0.1999\*T)+(-0.7090\*Irr)+(-0.2305\*Voc)+13.5771)));

B2=1/(1+exp(-((-0.0124\*T)+(-5.0734e-4\*Irr)+(0.0798\*Voc)-13.3060)));

B3=1/(1+exp(-((0.2628\*T)+(-0.8536\*Irr)+(0.1481\*Voc)+3.0968)));

B4=1/(1+exp(-((0.3505\*T)+(0.2368\*Irr)+(2.3407\*Voc)+1.5)));

B5=1/(1+exp(-((-0.5049\*T)+(1.8522\*Irr)+(-11.2955\*Voc)-9.6087)));

B6=1/(1+exp(-((-32.3087\*T)+(-6.0964\*Irr)+(24.2886\*Voc)+5.8024)));

B7=1/(1+exp(-((0.8411\*T)+(-7.2398\*Irr)+(-0.2102\*Voc)-11.6573)));

B8=1/(1+exp(-((-0.5363\*T)+(1.4347\*Irr)+(0.4670\*Voc)-14.4655)));

B9=1/(1+exp(-((-0.5631\*T)+(-0.1648\*Irr)+(-0.1709\*Voc)-14.3241)));

B10=1/(1+exp(-((-4.8478\*T)+(-1.1443\*Irr)+(-0.6755\*Voc)+7.4590)));

B11=1/(1+exp(-((0.0839\*T)+(-0.8507\*Irr)+(-0.1057\*Voc)-1.2838)));

B12=1/(1+exp(-((3.4917\*T)+(-0.2643\*Irr)+(3.9464\*Voc)-731.0711)));

B13=1/(1+exp(-((0.6864\*T)+(3.3834\*Irr)+(4.5044\*Voc)+7.8052)));

B14=1/(1+exp(-((50.8724\*T)+(1.5314\*Irr)+(-11.4561\*Voc)+0.9039)));

B15=1/(1+exp(-((-16.2745\*T)+(-39.8928\*Irr)+(-5.9590\*Voc)+0.4457)));

B16=1/(1+exp(-((0.1295\*T)+(0.6611\*Irr)+(0.3066\*Voc)-4.8555)));

B17=1/(1+exp(-((1.2928\*T)+(0.4437\*Irr)+(-2.6141\*Voc)+1.9431)));

B18=1/(1+exp(-((-85.8718\*T)+(18.8116\*Irr)+(-125.4088\*Voc)-3.8023)));

B19=1/(1+exp(-((-11.8264\*T)+(-6.1903\*Irr)+(6.1859\*Voc)+4.3488)));

B20=1/(1+exp(-((-0.4654\*T)+(1.1\*Irr)+(0.2514\*Voc)-7.2954)));

%=ชั้นเอาต์พุต

Vref=B1\*16.0186+B2\*42.8774+B3\*15.8922+B4\*22.0363+B5\*2.0841+B6\*0.2108+B7\*5.61  
 20+B8\*19.8733+B9\*2.7038+B10\*8.4141+B11\*3.6965+B12\*(-  
 1.7138)+B13\*17.5205+B14\*(0.2580)+B15\*1.5504+B16\*23.2280+B17\*0.7914+B18\*15.276  
 6+B19\*(-0.4280)+B20\*20.7650+21.9261;



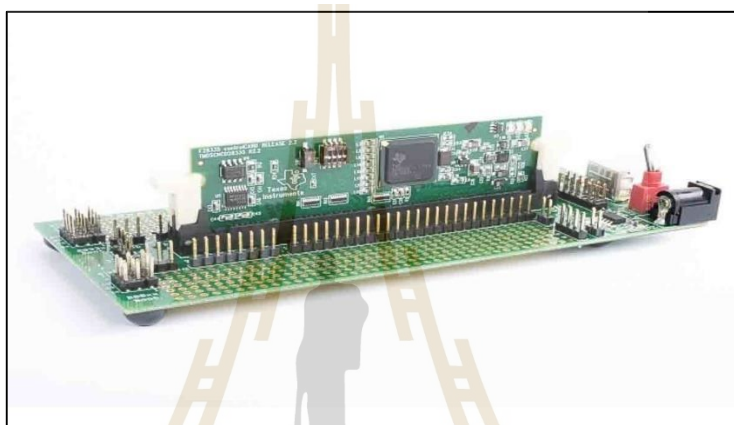
ภาคผนวก ข

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 และการเชื่อมต่อโปรแกรม  
MATLAB/Simulink สำหรับการทดสอบฮาร์ดแวร์ในรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท Texas Instruments แสดงในรูปที่ ข.1 ซึ่งประกอบไปด้วยการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ที่ใช้หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Controller: DSC) ซึ่งมีสาย USB JTAG emulation สำหรับใช้งานเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ รวมทั้งมีพอร์ตต่าง ๆ เช่น พอร์ตเอดีซี (ADC) ขาอินพุตและขาเอาต์พุต (GPIO) ที่สามารถโปรแกรมใช้งานหรือกำหนดให้มีหน้าที่ได้



รูปที่ ข.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits

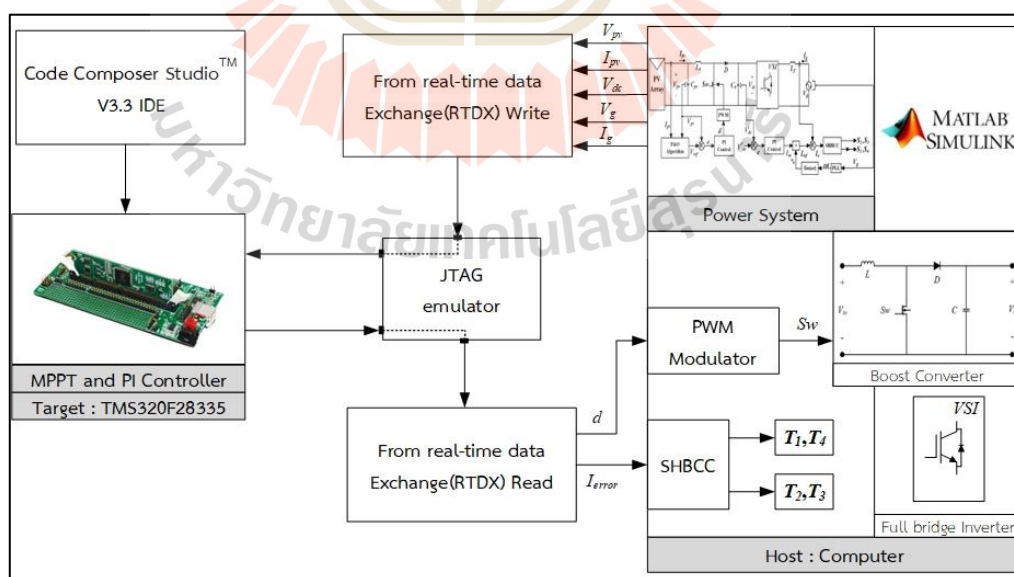
คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits

1. หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล 32 บิต เบอร์ TMS320F28335 รองรับการประมวลผลทั้งแบบ floating point unit และ fixed point unit
2. สัญญาณนาฬิกาอินพุต (On-chip oscillator) 30 MHz. ความเร็วในการประมวล 150 MHz. หรือ 6.67 ns. ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
3. หน่วยความจำประกอบด้วย
  - หน่วยความจำประเภท RAM 68 Kbytes
  - หน่วยความจำประเภท Flash 512 Kbytes
  - หน่วยความจำประเภท SRAM 256 Kbytes
4. พอร์ตเชื่อมต่อ XDS100 JTAG Emulator และพอร์ตเชื่อมต่อ RS232 แบบแยก (isolated RS232) สำหรับโปรแกรมแบบเวลาจริง (real-time in system programming)
5. พอร์ต Analog to Digital converter แบบ 12 bit ความเร็วในการสุ่มวัดสูงสุด 12.5 MSPS (80 ns Conversion Rate) จำนวน 16 ช่อง

6. ePWM 12 channel ที่มีความละเอียดสูงสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM
7. Enhanced capture modules จำนวน 6 ชุด
8. Enhanced QEP (Quadrature Encoder Pulse) modules จำนวน 2 ชุด
9. Enhanced controller area network (eCAN) module จำนวน 2 ชุด
10. Serial communications interface modules จำนวน 3 ชุด
11. Serial peripheral interface (SPI) modules จำนวน 1 ชุด
12. ขาอินพุตและขาเอาต์พุตสำหรับเลือกโปรแกรมใช้งานจำนวน 100 ขา
13. Jumper สำหรับเลือกโหมดในการบูตทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

### การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับโปรแกรม MATLAB/Simulink

การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม MATLAB/Simulink กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ประมวลผลและส่งคำสั่งส่วนโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำหน้าที่เป็นชุดทดสอบบล็อกกำลังไฟฟ้าสำหรับทดสอบโค้ดโปรแกรม ซึ่งการเขียนโปรแกรมสำหรับทดสอบจะเขียนผ่านโปรแกรม CCStudioV3.3 โดยการทำงานระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับโปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูป มีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับโปรแกรม MATLAB/Simulink

ภาคผนวก ค

การเขียนโค้ดโปรแกรมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 สำหรับ  
การทดสอบฮาร์ดแวร์ในรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



```

*****
โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตสำหรับบอร์ด
ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335
*****

#include <stdio.h>
#include "SumDiff.h"
#include <rtdx.h>
#include "target.h"
#include <math.h>
void mppt_grid(float*in1,float*out1);
float din1[5];
float dout1[3];
//----mppt-----//
float Ts=1e-5;
float Vpv,Ipv,Ppv;
float Vold=0,Pold=0;
float dP,dV;
float Vrefold=140,Vref=140,deltaV=0.15;
float Vmax=186.5,Vmin=0;
float Kpv_b=0.64,Kiv_b=40;
float Verror_b=0,ExcV_b=0,Sumv_b=0,D=0;
//----Timer-----//
float time=0;
float previousTime=0;
float sam=1e-2;
//----Inverter -----//
float Vdcref=350,Iref=0;
float Iref_sin=0,Vg_pu=0;
float Vdc,Vg,Ig;
float lerror=0;
float Verror_inv=0,ExcV_inv=0,Sumv_inv=0;
float Kpv_inv=0.0861,Kiv_inv=1.7765;

```

```

RTDX_CreateInputChannel(ichan1);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);
void main()
{
    TARGET_INITIALIZE();
    RTDX_enableInput(&ichan1);
    RTDX_enableOutput(&ochan1);
    while (1){
        RTDX_read(&ichan1,din1,5*sizeof(long));
        mppt_grid(din1,dout1);
        while(RTDX_writing != NULL)
        {
            #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
                RTDX_Poll();
            #endif
        }
        RTDX_write(&ochan1,dout1,3*sizeof(long));
    }
}
%P&O method
void mppt_grid(float*in1,float*out1)
{
    time=time+Ts;
    if((time-previousTime)<1.002e-2&&(time-previousTime)>=1e-2){
        previousTime=previousTime+sam;
        Vpv=in1[0];
        Ipv=in1[1];
        Ppv=Vpv*Ipv;
        dV=Vpv-Vold;
        dP=Ppv-Pold;
    }
}

```

```

if(dP!=0){
    if(dP>0){
        if(dV>0){
            Vref=Vrefold+deltaV;}
        else{
            Vref=Vrefold-deltaV;}
        }
    else{
        if(dV>0){
            Vref=Vrefold-deltaV;}
        else{
            Vref=Vrefold+deltaV;}
        }
    }
else{
    Vref=Vrefold;}
if(Vref>=Vmax||Vref<=Vmin){
    Vref=Vrefold;}
    Pold=Ppv;
    Vold=Vpv;
    Vrefold=Vref;
}
Vdc=in1[2];
Vg=in1[3];
Ig=in1[4];
%P&O Control Boost converter
Verror_b=Vref-in1[0];
Exc_v_b=Verror_b*Kpv_b;
Sumv_b=Sumv_b+Kiv_b*Verror_b*Ts;
D=Sumv_b+Exc_v_b;

```

```
%Control DC bus
Verror_inv=Vdcref-Vdc;
Exc_v_inv=Verror_inv*Kpv_inv;
Sumv_inv=Sumv_inv+Kiv_inv*Verror_inv*Ts;
Iref=Sumv_inv+Exc_v_inv;
%Hysteresis Current Control
Vg_pu=Vg/(230*sqrt(2));
Iref_sin=Iref*Vg_pu;
Ierror=Iref_sin-Ig;
if(D>0.9){
out1[0]=0.9;}
else if(D<0){
out1[0]=0;}
else{
out1[0]=D;}
out1[1]=Vref;
out1[2]=Ierror;
return;
}
```

\*\*\*\*\*  
 โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสำหรับ  
 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335  
 \*\*\*\*\*

```
#include <stdio.h>
#include "SumDiff.h"
#include <rtdx.h>
#include "target.h"
#include <math.h>
void mppt(float*in1,float*out1);
float din1[5];
float dout1[5];
/--time
float Ts=1e-5;
float previousTime=0;
float time=-1.75e-3;
/--Non-iterative mppt
float Vref,D,Voc;
float K=0.83;
float Kpv_b=0.64,Kiv_b=40;
float Verror_b=0,Excvc_b=0,Sumv_b=0;
/--Inverter Control
float Vdc,Vg,Ig;
float Vdcref=350;
float Iref=0;
float Iref_sin=0,Vg_pu=0,Ierror=0;
float Kpv_inv=0.0861,Kiv_inv=1.7765;
float Verror_inv=0,Excvc_inv=0,Sumv_inv=0;
RTDX_CreateInputChannel(ichan1);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);
```

```

void main()
{
    TARGET_INITIALIZE();
    RTDX_enableInput(&ichan1);
    RTDX_enableOutput(&ochan1);
    while(1){
        RTDX_read(&ichan1,din1,5*sizeof(long));
        mppt(din1,dout1);
        while(RTDX_writing != NULL){
            #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
                RTDX_Poll();
            #endif
        }
        RTDX_write(&ochan1,dout1,5*sizeof(long));
    }
}

void mppt(float*in1,float*out1)
{
    time=time+Ts;
    if((time-previousTime)<=1.499&&(time-previousTime)>=-1.75e-3){
        out1[0]=1;}
    else{
        out1[0]=0;}
    if((time-previousTime)>=1.500){
        time=-1.5e-3;}
}

//---Voc Boost control
Voc=in1[1];
Vref=Voc*K;
Verror_b=Vref-in1[0];
Exc_v_b=Verror_b*Kpv_b;
Sum_v_b=Sum_v_b+Verror_b*Kiv_b*Ts;
D=Exc_v_b+Sum_v_b;

```



```
//---Inverter
Verror_inv=Vdcref-in1[2];
Exc_v_inv=Verror_inv*Kpv_inv;
Sumv_inv=Sumv_inv+Verror_inv*Kiv_inv*T_s;
Iref=Exc_v_inv+Sumv_inv;
//---Hysteresis
Vg_pu=in1[3]/(230*sqrt(2));
Iref_sin=Vg_pu*Iref;
Ierror=Iref_sin-in1[4];
if(D>0.9){
    out1[1]=0.9;}
else if(D<0){
    out1[1]=0;}
else{
    out1[1]=D;}
out1[2]=Ierror;
out1[3]=Vref;
out1[4]=time;
return;
}
```

```

*****
โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับวิธี
เทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335
*****

#include <stdio.h>
#include "SumDiff.h"
#include <rtdx.h>
#include "target.h"
#include <math.h>
void mppt(float*in1,float*out1);
float din1[7];
float dout1[5];
//---time
float Ts=1e-5;
float previousTime=0;
float time=-1.75e-3;
//---ANN
float B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B11,B12,B13,B14,B15,B16,B17,B18,B19,B20;
float T,Irr;
//---Non-iterative mppt
float Vref,D,Voc;
float Kpv_b=0.64,Kiv_b=40;
float Verror_b=0,Excvc_b=0,Sumv_b=0;
//---Inverter Control
float Vdc,Vg,Ig;
float Vdcref=350;
float Iref=0;
float Iref_sin=0,Vg_pu=0,Ierror=0;
float Kpv_inv=0.0861,Kiv_inv=1.7765;
float Verror_inv=0,Excvc_inv=0,Sumv_inv=0;
RTDX_CreateInputChannel(ichan1);
RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);

```

```
void main()
{
    TARGET_INITIALIZE();
    RTDX_enableInput(&ichan1);
    RTDX_enableOutput(&ochan1);
    while(1){
        RTDX_read(&ichan1,din1,7*sizeof(long));
        mppt(din1,dout1);
        while(RTDX_writing != NULL){
            #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
                RTDX_Poll();
            #endif
        }
        RTDX_write(&ochan1,dout1,5*sizeof(long));
    }
}

void mppt(float*in1,float*out1)
{
    time=time+Ts;
    if((time-previousTime)<=1.499&&(time-previousTime)>=-1.75e-3){
        out1[0]=1;}
    else{
        out1[0]=0;}
    if((time-previousTime)>=1.5){
        time=-1.5e-3;}
    Voc=in1[1];
    T=in1[5];
    Irr=in1[6];
}
```

```

//---Artificial intelligence Neural Network
//--- Hidden Layer 1
B1=1/(1+exp(-((-0.1999*T)+(-0.7090*Irr)+(-0.2305*Voc)+13.5771)));
B2=1/(1+exp(-((-0.0124*T)+(-5.0734e-4*Irr)+(0.0798*Voc)-13.3060)));
B3=1/(1+exp(-((0.2628*T)+(-0.8536*Irr)+(0.1481*Voc)+3.0968)));
B4=1/(1+exp(-((0.3505*T)+(0.2368*Irr)+(2.3407*Voc)+1.5)));
B5=1/(1+exp(-((-0.5049*T)+(1.8522*Irr)+(-11.2955*Voc)-9.6087)));
B6=1/(1+exp(-((-32.3087*T)+(-6.0964*Irr)+(24.2886*Voc)+5.8024)));
B7=1/(1+exp(-((0.8411*T)+(-7.2398*Irr)+(-0.2102*Voc)-11.6573)));
B8=1/(1+exp(-((-0.5363*T)+(1.4347*Irr)+(0.4670*Voc)-14.4655)));
B9=1/(1+exp(-((-0.5631*T)+(-0.1648*Irr)+(-0.1709*Voc)-14.3241)));
B10=1/(1+exp(-((-4.8478*T)+(-1.1443*Irr)+(-0.6755*Voc)+7.4590)));
B11=1/(1+exp(-((0.0839*T)+(-0.8507*Irr)+(-0.1057*Voc)-1.2838)));
B12=1/(1+exp(-((3.4917*T)+(-0.2643*Irr)+(3.9464*Voc)-731.0711)));
B13=1/(1+exp(-((0.6864*T)+(3.3834*Irr)+(4.5044*Voc)+7.8052)));
B14=1/(1+exp(-((50.8724*T)+(1.5314*Irr)+(-11.4561*Voc)+0.9039)));
B15=1/(1+exp(-((-16.2745*T)+(-39.8928*Irr)+(-5.9590*Voc)+0.4457)));
B16=1/(1+exp(-((0.1295*T)+(0.6611*Irr)+(0.3066*Voc)-4.8555)));
B17=1/(1+exp(-((1.2928*T)+(0.4437*Irr)+(-2.6141*Voc)+1.9431)));
B18=1/(1+exp(-((-85.8718*T)+(18.8116*Irr)+(-125.4088*Voc)-3.8023)));
B19=1/(1+exp(-((-11.8264*T)+(-6.1903*Irr)+(6.1859*Voc)+4.3488)));
B20=1/(1+exp(-((-0.4654*T)+(1.1*Irr)+(0.2514*Voc)-7.2954)));
//---Output layer
Vref=B1*16.0186+B2*42.8774+B3*15.8922+B4*22.0363+B5*2.0841+B6*0.2108+B7*5.61
20+B8*19.8733+B9*2.7038+B10*8.4141+B11*3.6965+B12*(1.7138)+B13*17.5205+B14*(-
0.2580)+B15*1.5504+B16*23.2280+B17*0.7914+B18*15.2766+B19*(0.4280)+B20*20.765
0+21.9261;
//---ANN Boost control
    Verror_b=Vref-in1[0];
    Exc_v_b=Verror_b*Kpv_b;
    Sum_v_b=Sum_v_b+Verror_b*Kiv_b*Ts;
    D=Exc_v_b+Sum_v_b;

```

```
//---Inverter
Verror_inv=Vdcref-in1[2];
Excv_inv=Verror_inv*Kpv_inv;
Sumv_inv=Sumv_inv+Verror_inv*Kiv_inv*Ts;
Iref=Excv_inv+Sumv_inv;
//---Hysteresis
Vg_pu=in1[3]/(230*sqrt(2));
Iref_sin=Vg_pu*Iref;
Ierror=Iref_sin-in1[4];
if(D>0.9){
    out1[1]=0.9;}
else if(D<0){
    out1[1]=0;}
else{
    out1[1]=D;}
out1[2]=Ierror;
out1[3]=Vref;
out1[4]=time;
return;
}
```

ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

### รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว

ธนธิป บุญทวี, โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, จักรกริช ภัคคีโต, กองพัน อารีรักษ์, และ กองพล อารีรักษ์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียว โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 (EECON44), หน้าที่ 61-64.

Koson Chaicharoenaudomrung, Tanatip Boontawee, Jakkrit Pakdeeto, Kongpan Areerak and Kongpol Areerak. **Single phase grid connected PV system with a non-iterative MPPT.** 2021 International Electrical Engineering Congress (iEECON2021), Pattaya, Thailand: March 10-12, 2021, pp.57-60.

### รายชื่อบทความวิชาการที่อยู่ระหว่างรอการตีพิมพ์

ธนธิป บุญทวี, โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, กองพัน อารีรักษ์, และ กองพล อารีรักษ์. **วิธีแบบไม่วนซ้ำ** สำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกิริตชนิดหนึ่งเฟส. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 17, ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มีนาคม 2567.

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



## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียวโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

### Modeling of PV Connected Single-State Single Phase Inverter Using GSSA Method

ธนธิป บุญทวี<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@sut.ac.th](mailto:kongpan@sut.ac.th)

<sup>2</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อโดยตรงกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส แบบจำลองวงจรแปลงผันกำลังโดยทั่วไปเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลา เนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง แบบจำลองดังกล่าวใช้เวลานานในการจำลองสถานการณ์ การวิเคราะห์และออกแบบมีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา วิธีการปริภูมิสถานะที่สามารถกำจัดผลของการสวิตช์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาแบบจำลองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส การตรวจสอบความถูกต้องอาศัยการจำลองสถานการณ์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นได้ว่าแบบจำลองที่นำเสนอมีผลตอบสนองที่สอดคล้องกับแบบจำลองมาตรฐาน

**คำสำคัญ:** แบบจำลองคณิตศาสตร์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

#### Abstract

This paper presents a mathematical model of a photovoltaic system connected to single-stage single-phase inverter. Generally, power converter models are time-varying due to the switching actions of power electronic devices. The time-varying model is not suitable for analysis and design. The generalized state-space averaging method can be used to eliminate the switching actions. The simulation was used to validate the proposed model. The simulation results show that a response of the proposed model corresponds to the exact topology model.

**Keywords:** Mathematical model, DC to AC converter, PV system, Generalized state-space averaging approach

#### 1. บทนำ

เมื่อประชากรเพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น พลังงานทดแทนจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญมาก เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ทำให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม ถ่านหินพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ใช้เป็นพลังงานทดแทน อาศัยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้งานร่วมกับวงจรแปลงผันกำลัง การออกแบบระบบสำหรับควบคุมและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังอาศัยแบบจำลองของระบบ อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลาเนื่องจากพฤติกรรมการทำงานของสวิตช์ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ความซับซ้อนในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการวิเคราะห์และออกแบบ

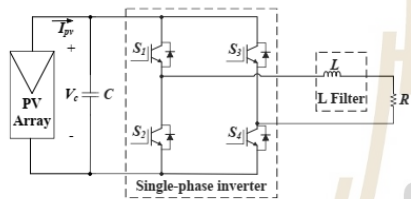
ปัจจุบันมีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการกำจัดผลของสวิตช์หลายวิธีการเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) ที่เหมาะสมกับระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง [1] วิธีการดีคิว (dq transformation) ที่เหมาะสมกับระบบสามเฟส [2] ในบทความนี้นำเสนอวิธีการที่ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสแบบขั้นเดียว โดยมีโหนดขั้วกลางหนึ่งขั้วนำอนุกรมกับโหนดตัวต้านทาน การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบผลตอบสนองทั้งสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวของแบบจำลองที่พิสูจน์กับแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

บทความนี้ประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ส่วนที่ 1 บทนำ ส่วนที่ 2 ระบบที่พิจารณา ส่วนที่ 3 การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุป



**2. ระบบที่พิจารณา**

บทความนี้นำเสนอระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่กระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสแบบซันเดียว แสงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสและโหลดขดลวดเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทาน การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับอาศัยเทคนิคที่ดับเบิลวิดท์ (Pulse-width modulation; PWM)

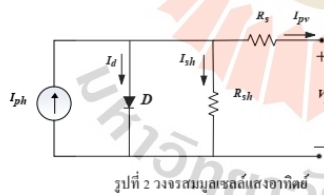


รูปที่ 1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสแบบซันเดียว

**3. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

**3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เซลล์แสงอาทิตย์**

โดยทั่วไปวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วยไดโอดขนานกับความต้านทานชันเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติและความต้านทานอนุกรมสามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2 จากวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2 สามารถอธิบาย  $I_{pv}$  ในสมการที่ (1)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

$$I_{pv} = N_p \left[ (I_{cc} + K_f (T - T_{ref})) \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \right] - \left[ \left( \frac{I_{cc}}{\frac{V}{nqV_T}} - 1 \right) \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \left( e^{\left( \frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \left( \frac{V}{nqV_T} \right)} \right) \left( e^{\left( \frac{V_{oc}}{N_s n q V_T} - \frac{I_{pv} R_s}{N_s n q V_T} \right)} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

เมื่อ  $I_{pv}$  คือกระแสเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์  $N_p$  คือจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนาน  $N_s$  คือจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรม  $K_f$  คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสตัวจริง ( $6.167 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ )  $q$  คือประจุอิเล็กตรอน ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )  $n$  คือ Ideal factor (0.9507)  $c$

คือจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันใน 1 โมดูล (96 เซลล์)  $E_g$  คือพลังงานระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำ ( $1.12 \text{ eV}$ )  $k$  คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มันน์ ( $1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J/Kelvin}$ )  $V_T$  คือ Thermal voltage

**3.2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (GSSA Method)**

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะอาศัยอนุกรมฟูรีเยร์ที่มีสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาในช่วงเวลา  $[t-T, T]$  สามารถเขียนในรูปสัญญา  $x(t)$  ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการที่ (2)

$$x(t) = \sum_{k=-n}^n \langle x \rangle_k (t) e^{jk\omega t} \quad (2)$$

เมื่อ  $\omega = 2\pi / t$  คือความถี่เชิงมุมพื้นฐาน  $n$  คือระดับความแม่นยำ และถ้า  $n$  มีค่าเข้าใกล้อนันต์ค่าความผิดพลาดจากการประมาณมีค่าเข้าใกล้ศูนย์  $\langle x \rangle_k$  คือสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

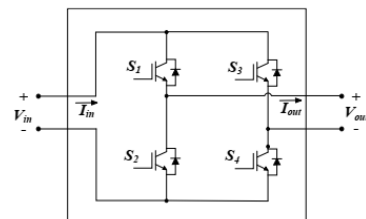
$$\langle x \rangle_k (t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(t) e^{-jk\omega t} dt \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาทอม  $k$  วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะมีสถานะเดียว หากตัวแปรสถานะไม่มีการสั่นหรือเกือบจะคงที่จะพิจารณาที่  $k=0$  ถ้าตัวแปรสถานะมีการสั่นคล้ายคลื่นไซน์จะพิจารณาที่  $k=-1, 1$  ซึ่งเรียกว่าการประมาณฮาร์โมนิกอันดับหนึ่ง นอกจากนี้ถ้าหากตัวแปรสถานะมีส่วนประกอบคงที่และมีการสั่นจะพิจารณา  $k=-1, 0, 1$  อย่างไรก็ตามสามารถพิจารณาเงื่อนไขเพิ่มเติมได้เพื่อความแม่นยำที่มาก

**3.3 แบบจำลองและการวิเคราะห์ห้วงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ**

พิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่กระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟสในรูปที่ 3 พิจารณาสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับสามารถเขียนฟังก์ชันสวิทช์  $u(t)$  ของวงจรในสมการที่ (4)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < \pi \\ -1, & \pi < t < 2\pi \end{cases} \quad (4)$$



รูปที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่กระแสตรงเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส

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



จากรูปที่ 3 สามารถอธิบายความสัมพันธ์อินพุตกับเอาต์พุตของ  
 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับดังสมการที่ (5)

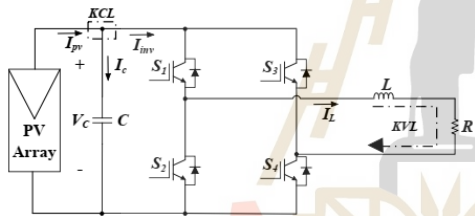
$$\begin{cases} V_{out} = u(t) \cdot V_{in} \\ I_{in} = u(t) \cdot I_{out} \end{cases} \quad (5)$$

การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ  
 ด้วยวิธีพีดีบีลู่เชื่อม จากสมการที่ (5) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์  
 อินพุตและเอาต์พุตใหม่ได้ดังสมการที่ (6)

$$\begin{cases} V_{out} = \frac{u(t) \cdot M \cdot V_m}{\sqrt{2}} \\ I_{in} = \frac{u(t) \cdot M \cdot I_{out}}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (6)$$

เมื่อ  $M$  คือค่าดัชนีมอดูเลตมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

พิจารณาวงจรรูปที่ 1 ประยุกต์ใช้ KCL และ KVL แสดงดังรูปที่ 4  
 ผลลัพธ์จากการประยุกต์แสดงได้ดังสมการที่ (7)



รูปที่ 4 การวิเคราะห์วงจรด้วย KCL และ KVL

$$\begin{cases} \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( -\frac{u(t) M I_L}{\sqrt{2}} + I_{pv} \right) \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} \left( \frac{u(t) M V_c}{\sqrt{2}} - I_L R \right) \end{cases} \quad (7)$$

จากแบบจำลองด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผัน  
 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ เมื่อพิจารณาอินพุตด้วย  
 วิธีการประมาณค่าอันดับศูนย์และเอาต์พุตด้วยวิธีการประมาณค่าอันดับ  
 หนึ่งของวิธีปริภูมิสถานะทั่วไป ดังนั้นตัวแปรสถานะจึงมีสามตัวแปร  
 ตามสมการดังนี้

$$\langle I_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad \langle V_c \rangle_0 = x_3$$

เมื่ออาร์มอนิกอันดับหนึ่งของฟังก์ชันสวิตช์คือ  $\langle u \rangle_1 = -j \frac{2}{\pi}$  หลักการ

คำนวณสามารถเขียนอยู่ในรูปตัวแปรสถานะดังสมการที่ (8)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (8)$$

เมื่อ  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  อินพุตคือ  $u = [I_{pv}]$  โดย  $A$  และ  
 $B$  มีรายละเอียดดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & \frac{2M}{\sqrt{2}\pi L} \\ 0 & -\frac{4M}{\sqrt{2}\pi C} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (8) สามารถนำตัวแปรสถานะเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์  
 สรุปลักษณะแสดงดังสมการที่ (9)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & \frac{2M}{\sqrt{2}\pi L} \\ 0 & -\frac{4M}{\sqrt{2}\pi C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C} \end{bmatrix} I_{pv} \quad (9)$$

เมื่อ  $\omega$  คือความถี่เชิงมุมคลื่นสี่เหลี่ยมของวงจรแปลงผัน  
 กำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ และ  $I_{pv}$  สามารถแทนได้จาก  
 สมการที่ (1) จากตัวแปรสถานะในสมการที่ (9) สามารถคำนวณค่า  $I_L$   
 และ  $V_C$  ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ

**4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์**

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่  
 นำเสนอทำได้โดยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB เพื่อ  
 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองสถานการณ์ (MATLAB/Simulink) กับ  
 แบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น การจำลองสถานการณ์ที่รายละเอียดของ  
 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ตามตารางที่ 1 และรายละเอียด  
 พารามิเตอร์ของระบบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

พารามิเตอร์	รายละเอียด	หน่วย
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	6.14	A
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	64.6	V
จำนวนแผงที่ต่ออนุกรม ( $N_s$ )	1 แผง	แผง
จำนวนแผงที่ต่อขนาน ( $N_p$ )	1 แผง	แผง
ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ )	0.43042	$\Omega$

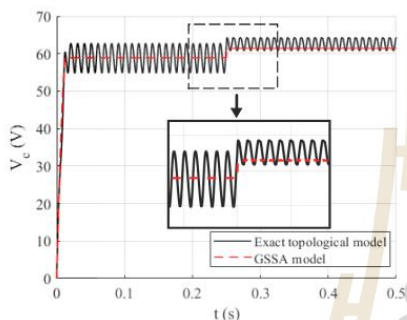
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	รายละเอียด	หน่วย
ขดลวดเหนี่ยวนำ ( $L$ )	5	mH
ความต้านทาน ( $R$ )	10	$\Omega$
ตัวเก็บประจุ ( $C$ )	450	$\mu F$
ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ )	$2(50)\pi$	rad/s

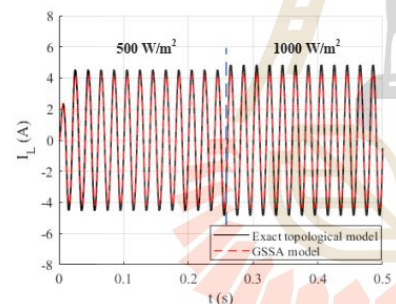
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44  
 The 44<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON44)  
 วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 ณ โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



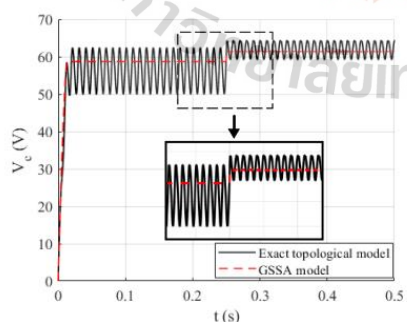
การจำลองสถานการณ์กำหนดค่าให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงจาก 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup> ที่เวลา 0.25 วินาที ในกรณีค่าดัชนีมอดูเลตเท่ากับ 0.8 ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 สำหรับกรณีค่าดัชนีมอดูเลต 0.9 เมื่อกำหนดค่าให้ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup> ที่เวลา 0.25 วินาที ผลการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8



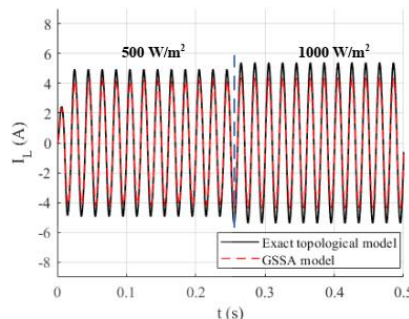
รูปที่ 5 แรงดัน  $V_C$  ในกรณี  $M = 0.8$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนจาก 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup>



รูปที่ 6 กระแส  $I_L$  ในกรณี  $M = 0.8$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนจาก 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup>



รูปที่ 7 แรงดัน  $V_C$  ในกรณี  $M = 0.9$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนจาก 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup>



รูปที่ 8 กระแส  $I_L$  ในกรณี  $M = 0.9$  เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนจาก 500 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup>

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแรงดัน  $V_C$  และกระแส  $I_L$  ในกรณีที่  $M = 0.8$  และ  $M = 0.9$  พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นนี้มีผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว สอดคล้องกับการจำลองด้วยแบบจำลองมาตรฐาน

### 5. สรุป

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์แบบขั้นเดียวโดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสามารถกำจัดผลของสวิตช์เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา แบบจำลองที่ได้จากการพิสูจน์นี้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้องสามารถแสดงได้ชัดเจนจากผลการตอบสนองทั้งสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และการออกแบบของระบบในอนาคต

### 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] Ying Gao, Jianwei Ye, "A SVPWM Compensation Current Tracking Control Method Based on dq Transformation for Shunt Active Power Filter," in 2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS), 2018
- [3] Adil Sarwar, Abdulla Shahid, Utkarsh Gupta, Mohd. Wahab, "Generalized state-space model for an n-phase interleaved buck-boost converter," in 2017 4<sup>th</sup> IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON), 2017



## Single phase grid connected PV system with a non – iterative MPPT

Koson Chaicharoenaudomrung<sup>2</sup> Tanatip Boontawe<sup>1</sup> Jakkrit Pakdeeto<sup>3</sup>  
Kongpan Areerak<sup>1\*</sup> and Kongpol Areerak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering , Instituted of Engineering, Suranaree University of Technology

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

<sup>3</sup> Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB  
\*kongpan@sut.ac.th

**Abstract**—This paper presents a non-iterative maximum power point tracking (MPPT) method for photovoltaic (PV) system. Power from PV is fed to the grid system with a single-stage single-phase inverter. The proposed MPPT method can realize the maximum power using the fill factor from the datasheet parameters of PV panel combined with measurements of open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) and short circuit current ( $I_{sc}$ ). The non-iterative MPPT algorithm generates power reference used in the control. The single-phase grid connected inverter used double band hysteresis current controller. The converter power circuit is modified to execute  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$  measurements. The proposed method was confirmed by simulation using MATLAB/Simulink. The simulation results under steady state and changing irradiance show that the maximum power from PV can be fed to the grid with THD<sub>i</sub> = 2.9 % and PF = 0.95.

**Keywords**—non-iterative MPPT, PV system, Fill factor, hysteresis control

### I. INTRODUCTION

Energy is important to meet human needs, and is also necessary to both business and industry. Energy resources can be classified according to their use in two types: consumed energy resources such as fossil fuels. Another type is called renewable energy or alternative energy, such as wind and solar energy. Currently, renewable energy has gained increased popular due to declining fossil fuels and will be depleted in the future. THAILAND is located near the equator, thus there is a high irradiance all year. Therefore, solar energy is suitable to use as an alternative energy. The conversion of solar energy into electrical energy using solar cells. Grid-connected photovoltaic power generation systems are increasingly expanding with supporting the use of renewable energy [1]-[2]. The power from PV panel is feeding to the grid through a power converter. The power of PV panel depends on the temperature and irradiance. Both of these parameters are uncontrollable and changing over time resulting in power from PV isn't constant. In order to ensure the continuous transfer of peak power from PV to the grid, the MPPT is required.

Perturb and observe (P&O) and incremental (INC) MPPT algorithm are commonly used in PV systems,

both methods are under numerical iterative [3]-[4]. These iterations of MPPT require maximum power point convergence time due to no information about maximum power point (MPP) since the beginning of the iterative. The algorithm starts from the sampling rate, the control signal of the power converter through perturbations and continues to reach the MPP. The effectiveness of this control depends on the step size. The small step size results in a slow response and often unable to track changes in under conditions of rapid irradiance and partial shading. The MPPT method is evaluated by index value such as complexity, convergence time, oscillation around MPP and MPP tracking accuracy. Grid-connected PV systems with MPPT iterative operate through DC-DC converter's duty cycle and convert to AC with inverter [4]. In contrast, a non-iterative MPPT method can generate a control reference signal that results in MPP within a single perturb. The reference power is calculated by measuring  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$  during control, then calculate the voltage  $V_{mpp}$  or current  $I_{mpp}$  corresponding to the MPP can be determined.

This paper proposes a non-iterative MPPT method, which applied to single state single-phase grid connect for PV system. The power converter has been modified by adding a switch for interrupt between  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$  measurements. The paper is organized into five sections. section II and III presents the proposed MPPT and the considered power converter system. The validation by simulation results are shown in section IV. Finally, section V is conclusion.

### II. THE PROPOSED NON-ITERATIVE MPPT

Generally, the PV module consists of the many cells connected from the combination between series and parallel alignments. Each of these cells has the p-n junction and it was created from the semiconductor[6]. The equivalent circuit of the PV module is shown in Fig. 1.

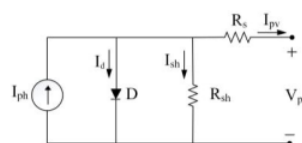


Fig. 1 The equivalent circuit of PV module



According to Fig. 1, the parallel components, which are the diode ( $D$ ) and the shunt resistor ( $R_{sh}$ ), are connected with an ideal current source and a series resistor ( $R_s$ ). From this circuit, the equation that is explained the behavior of  $I_{pv}$  can be calculated in (1)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{A k T} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

where  $I_{pv}$  is the output current from PV module.  $I_0$  is the saturation bias current of diode.  $V_{pv}$  is the output voltage of PV module.  $q$  is the electron charge ( $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ).  $A$  is the ideal constant factor.  $k$  is the Boltzman constant ( $1.3806504 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ) and  $T$  is the operating temperature of PV module. This paper use PV panel in Table 1. Characteristics are shown in Fig. 2.

Table 1 PV panel of Unisolar 1STH-350-WH

Parameter	Detail
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ )	360.5 V
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	9.4 A
Voltage at MPP ( $V_{mp}$ )	301 V
Current at MPP ( $I_{mp}$ )	8.13 A

Note: Data at the Standard test conditions (STC):  
Irradiance 1,000 W/m<sup>2</sup> and Temperature 25°C

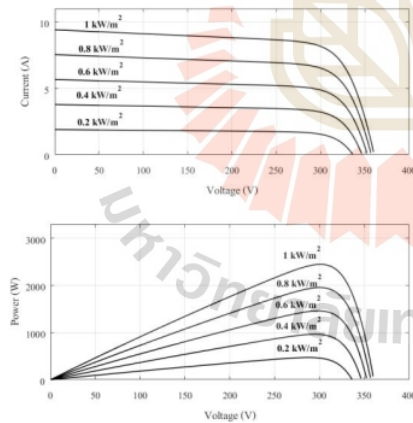


Fig. 2 I-V curve and P-V curve

Special characteristics of PV panels consist of  $V_{mpp}$  &  $I_{mpp}$  and  $V_{oc}$  &  $I_{sc}$ . The maximum power can be calculated by (2). Performance of PV panel is evaluated by the fill factor (FF), which is the ratio of the maximum power to the product of the short-circuit current and the open-circuit voltage given in (3). The open and short circuit test results of PV panels under different irradiance conditions with FF values are shown in Table 2.

$$P_{mpp} = V_{mpp} I_{mpp} \quad (2)$$

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3)$$

$V_{oc}$  and  $I_{sc}$  are always measured via the sensors. In addition the FF is also determined. Thus, the maximum power of PV panel can be calculated by (4)

$$P_{mpp} = V_{oc} I_{sc} \times FF \quad (4)$$

This calculate  $P_{mpp}$  is used as a reference to trace the maximum power of PV panel that can be controlled to operate in the correct direction under rapidly changing irradiance. This is the concept of the proposed non-iterative MPPT [6].

### III. SINGLE PHASE GRID CONNECTED WITH DOUBLE-BAND HYSTERESIS CURRENT-CONTROL WITH MPPT PROPOSE

Grid-connected PV systems require an inverter as a power conversion [8]. This paper uses a single state single phase inverter fed power from PV panel to the grid. Power circuit modification is required by adding  $S_1$  to measure  $V_{oc}$  and  $S_2$  to measure  $I_{sc}$  measurements as shown in Fig 3. The diagram of the inverter control with double-band hysteresis current-controlled and the proposed MPPT are shown in Fig 4. The double-band hysteresis current-controlled regulator controls the output current of the inverter to be equal to the current reference ( $I_{ref}$ ) in (5). The control of the inverter takes the error of the output current relative to the reference current with a sinusoidal characteristic between the upper and lower limits of the hysteresis by (6) and (7), respectively.

$$I_{ref} = I_m \sin \omega t \quad (5)$$

$$I_{up} = (I_{ref} + H) \sin \omega t \quad (6)$$

$$I_{low} = (I_{ref} - H) \sin \omega t \quad (7)$$

when  $H$  is the band of hysteresis

The control starts with the measurement of  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$ . Then, the  $P_{mpp}$  is calculated by multiplying the FF following by (4). The power is converted to the magnitude current ( $I_m$ ) by dividing the magnitude of the grid voltage. The  $I_{ref}$  is calculated by multiplying the  $I_m$  and the function sine wave ( $\sin \omega t$ ) as given in (5). The reference current is also used to control the inverter to inject the current into the grid by double-band hysteresis current-controlled.

Table 2 PV panel specification of Unisolar 1STH-350-WH and Fill factor

Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>mpp</sub> (V)	I <sub>mpp</sub> (A)	FF
1000	360.5	9.40	301.0	8.13	0.722
800	356.7	7.55	300.3	6.51	0.725
600	352.5	5.68	298.6	4.89	0.729
400	346.4	3.78	294.7	3.27	0.735
200	336.5	1.92	287.2	1.64	0.729

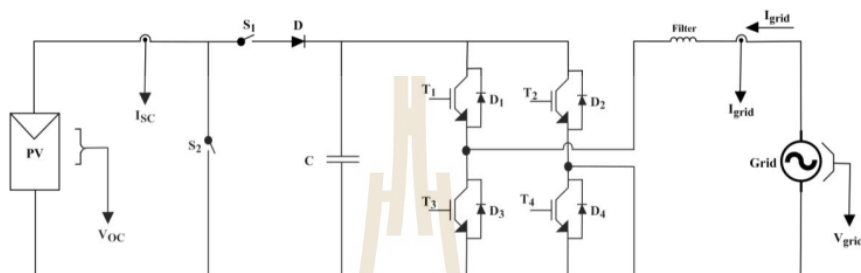


Fig 3 Modified power circuit for the proposed method

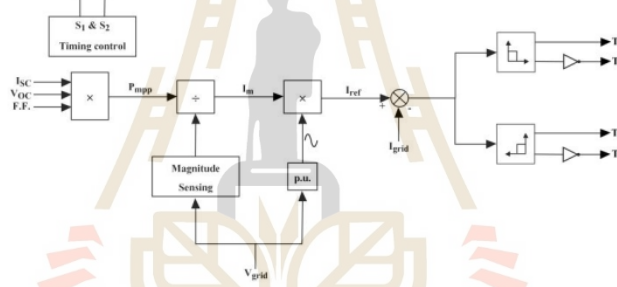


Fig. 4 Block diagram of the proposed method

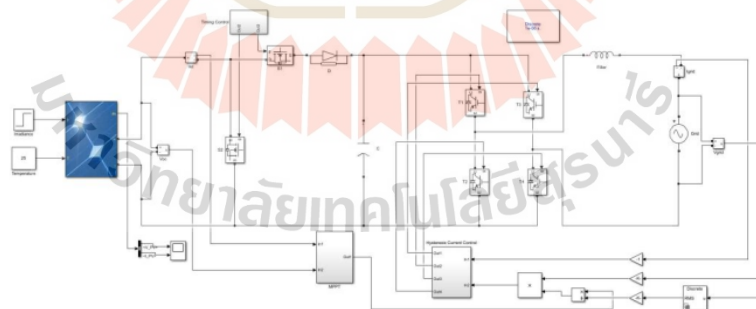


Fig. 5 Diagram simulation with MATLAB/Simulink

IV. SIMULATION RESULTS

This section is validation of the control performance with simulation. The system parameters are detailed as follows. The PV panel is shown in section II, the capacitor is 450 μF, the filter inductance

is 10 mH and the grid voltage is 220 V<sub>rms</sub> 50 Hz. In Fig. 5 shows the simulation diagram of single phase grid connected PV system with MPPT proposed using MATLAB/Simulink. The switch operation S<sub>2</sub> short-circuit the photovoltaic modules for a period of 2 ms and delay 2 ms. Then V<sub>oc</sub> is measured by open circuit

operation of switch  $S_j$  at  $t = 3.2$  ms with switching frequency 25 Hz. During the open circuit, the maximum power that the PV panel cannot be delivered to the grid. Hysteresis band ( $H$ ) is set equal to 0.05 A. The simulation results under constant irradiance conditions at  $500 \text{ W/m}^2$  and  $1000 \text{ W/m}^2$  are shown in Fig. 6 and Fig. 7, respectively.

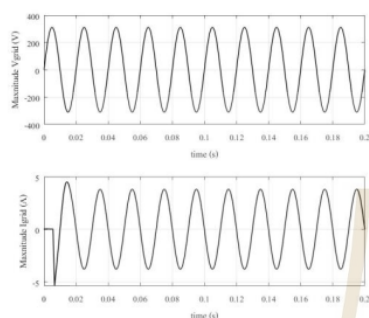


Fig. 6 Grid voltage and current under irradiance of  $500 \text{ W/m}^2$

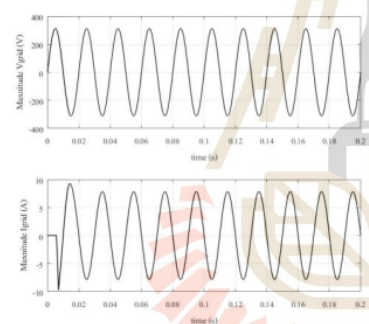


Fig. 7 Grid voltage and current under irradiance of  $1000 \text{ W/m}^2$

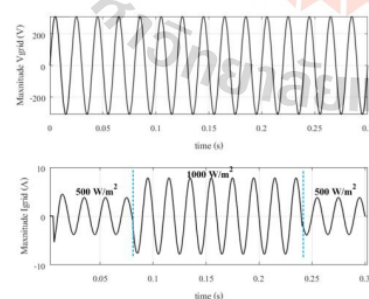


Fig. 8 The voltage and current delivered during irradiance change

In Fig. 8 shows the simulation results when irradiance changes. The proposed method can be fed the maximum power of PV panel to the grid with a power factor of 0.95 and total harmonics distortion of input current (THD<sub>i</sub>) equal to 2.9%. The test results of the MPPT proposed methods are shown in Table 3.

Table 3 The simulation results of proposed method

Irradiance $\text{W/m}^2$	$V_{OC}$ (V)	$I_{SC}$ (A)	$P_{MPP}$ Measured (W)	$P_{MPP}$ Data sheet (W)
1000	360.5	9.4	2434.4	2447.13
500	350.0	4.7	1182.7	1212.07

## V. CONCLUSION

This paper presents an application of the non-iterative MPPT method to inverter grid connected PV system. The control process uses  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$  measurements and fill factor values to calculate  $P_{mpp}$  of PV panel. That power is fed to the grid by a single-state single-phase inverter with double-band hysteresis current control. The performance of the proposed method was confirmed with steady-state and transient-state simulations. The simulation results show that the power can be transferred from PV panel to the grid efficiently with  $\text{THD}_i = 2.9\%$  and  $\text{PF} = 0.95$ .

## REFERENCES

- [1] W. Hongbin and T. Xiaofeng, "Three phase photovoltaic grid-connected generation technology with MPPT function and voltage control", 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 19 January 2010.
- [2] N. Chatrenour, H. Razmi, and H. Doagou-Mojarrad, "Improved double integral sliding mode MPPT controller based parameter estimation for a stand-alone photovoltaic system". *Energy Convers. Manag.* 139, 97–109.
- [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] D. Verma, S. Nema, A.M. Shandilya, S.K. Dash, "Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 1018–1034.
- [5] N.F. Guerrero-Rodriguez, A.B. Rey-Boué, E.J. Bueno, O. Ortiz, E. Reyes-Archundia, "Synchronization algorithms for grid-connected renewable systems: Overview, tests and comparative analysis". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75, 629–643.
- [6] Husain, M.A., Khan, Z.A., Tariq, A., 2017. A novel solar PV MPPT scheme utilizing the difference between panel and atmospheric temperature. *Renew. Energy Focus* 11–22.
- [7] A. Vijayakumari. "A non-iterative MPPT of PV array with online measured short circuit and open circuit quantities". *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, 2020
- [8] S. Kouro, J.I. Leon, D. Vinnikov, L.G. Franquelo, "Grid-connected photovoltaic systems: an overview of recent research and emerging pv converter technology". *IEEE Ind. Electron. Mag.* 9, 47–61.



ที่ อว 0604.8.1.3/1021

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

1 มิถุนายน 2566

เรื่อง ตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

เรียน คุณกองพัน อารีรักษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย เรื่อง “วิธีแบบไม่วนซ้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดชนิดหนึ่งเฟส” โดยมีผู้เขียนร่วมคือ ธนาธิป บุญทวี (ชื่อแรก) , โกศล ชัยเจริญอุดม รุ่ง และ กองพล อารีรักษ์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ตามความทราบนั้น

บัดนี้ บทความดังกล่าวของท่าน ได้ผ่านการประเมินจากกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และกองบรรณาธิการ ได้พิจารณาเห็นชอบในการนำบทความของท่าน เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ.บ.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 : engg\_assistant@ubu.ac.th



บทความวิจัย

## วิธีแบบไม่วนซ้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกับกริดชนิดหนึ่งเฟส

### Non-iterative method for maximum power point tracking of single phase grid connected PV system

ธนาธิป บุญทวี<sup>1</sup> โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง<sup>2</sup> กองพัน อารีรักษ์<sup>1\*</sup> กองพล อารีรักษ์<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Tanatip Boontawee<sup>1</sup> Koson Chaicharoenaudomrung<sup>2</sup> Kongpan Areerak<sup>1\*</sup> Kongpol Areerak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Instituted 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

บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดหนึ่งเฟสโดยใช้วิธีแบบไม่วนซ้ำ ซึ่งวิธีดังกล่าวจะพิจารณาบนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำลังไฟฟ้ายิ่งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คำนวณได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ทำให้ผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ใช้วิธีดังกล่าวมีความรวดเร็วกว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำ ประสิทธิภาพของวิธีแบบไม่วนซ้ำที่นำเสนอในบทความนี้ได้รับการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 บนโปรแกรม MATLAB/Simulink จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปแสดงถึงประสิทธิภาพในการค้นหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระยะเวลาสั้น ๆ ของวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ

#### คำสำคัญ

การปรับวงและการสังเกต การเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร วิธีการแบบวนซ้ำ วิธีการแบบไม่วนซ้ำ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดชนิดหนึ่งเฟส

#### Abstract

This paper presents a maximum power point tracking (MPPT) of single-phase grid connected photovoltaic (PV) system using non-iterative method. The proposed method considers the change in PV voltage. The reference maximum power of PV panel was calculated by the open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ). Therefore, the power response using the proposed method is faster than that from the iterative MPPT methods. The effectiveness of the proposed non-iterative method was confirmed by computer simulation and hardware in the loop simulation using a TMS320F28335 microcontroller



board with MATLAB/Simulink. The results show that the proposed MPPT method can reach the maximum power point in a shorter time compared with the traditional iterative methods.

#### Keywords

Perturb and Observe method; Fractional Open Circuit Voltage method; Iterative MPPT; Non-Iterative MPPT; Grid-Connected PV System;

### 1. บทนำ

แหล่งพลังงานทดแทนมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองต่อความต้องการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ในด้านธุรกิจและอุตสาหกรรม เนื่องจากพลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ในปัจจุบันการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นประโยชน์มากที่สุด เนื่องจากมีมลพิษน้อย อุปสรรคหลักของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สำคัญคือ ต้นทุนเริ่มต้นสูงและไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมในช่วงวัน นอกจากนี้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำมาก ดังนั้นการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) จึงมีส่วนสำคัญต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อมั่นใจว่าตัวแปลงพลังงานทำงานอยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่าง ๆ ได้รับการพัฒนามากขึ้น [1]-[2] ความแตกต่างของอัลกอริทึมต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนเซนเซอร์ ความซับซ้อนและต้นทุนการดำเนินการของอัลกอริทึม วัตถุประสงค์หลักของอัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหลายเหล่านั้นคือ การบรรลุประสิทธิภาพการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีความรวดเร็ว ความแม่นยำ และลดความผันผวนที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

อัลกอริทึมต่างๆสามารถแบ่งประเภทของอัลกอริทึมได้เป็น 2 ประเภทหลัก

1) อัลกอริทึมแบบวนซ้ำ (Iterative algorithm) ตัวอย่างเช่น วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturb and observe method: P&O method) [3]-[5] วิธีการเพิ่มความเหนี่ยวนำ (Incremental conductance method: INC method) [6]-[9]

2) อัลกอริทึมแบบไม่วนซ้ำ (Non-iterative algorithm) ตัวอย่างเช่น วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Fractional open-circuit voltage method: FOVCV method) [10]-[11] วิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Fractional short-circuit current method: FSCC method) [12]-[14]

วิธีการรบกวนและการสังเกต (P&O method) เป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งวิธีการรบกวนและการสังเกตอาศัยหลักการทำงานด้วยการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าด้วยค่า  $\Delta V$  (Fixed Step Size) สำหรับติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด กระบวนการเหล่านี้ถูกทำงานซ้ำ ๆ จนกระทั่งถึงจุดการทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะอยู่ตัว ข้อเสียวิธีนี้คือ เกิดการสั่นของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัว การลดการสั่นของกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยการกำหนด  $\Delta V$  ที่มีขนาดเล็กลงค่าขนาดแต่แลกมาด้วยความไวในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (FOVCV method) อาศัยหลักการความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร โดยการกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ  $K_p$  เท่าของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร



วิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (FSCC method) อาศัยหลักการความสัมพันธ์เชิงเส้นของกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร โดยการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ  $K_c$  เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร

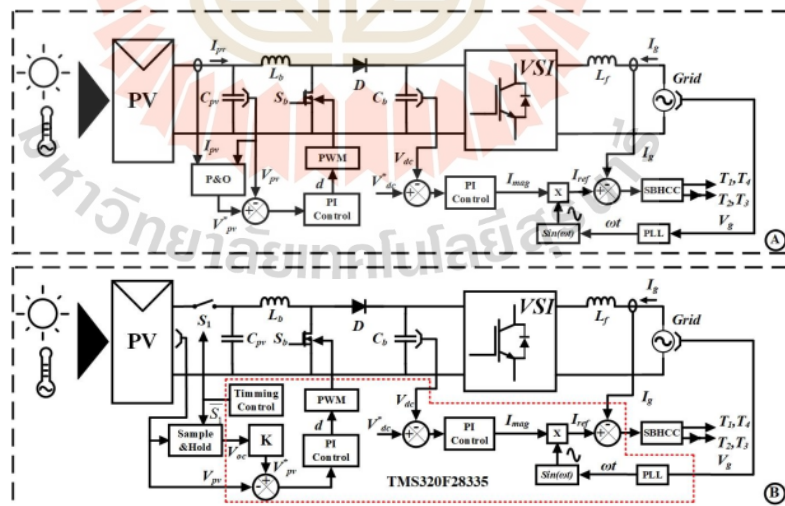
บทความนี้ได้เลือกใช้วิธีการรบกวนและการสังเกต เป็นตัวแทนวิธีแบบวนซ้ำ เพราะวิธีดังกล่าวเป็นวิธีเรียบง่ายสำหรับวิธีแบบวนซ้ำ และมีประสิทธิภาพ ในบทความนี้เลือกใช้วิธีเปรียบเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร เพราะข้อได้เปรียบด้านความปลอดภัยเมื่อเทียบกับวิธีเทียบสัดส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร

บทความนี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน รายละเอียดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงในหัวข้อที่ 2 ในหัวข้อที่ 3 อธิบายรายละเอียดวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ ในหัวข้อที่ 4 กล่าถึงการออกแบบพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ (Simulation) และ

ผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop: HIL) ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5 ในส่วนสุดท้าย หัวข้อที่ 6 สรุปข้อดีของวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ

2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาในบทความนี้คือ ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดหนึ่งเฟส ประกอบด้วย 2 ระบบ ระบบที่ 1) ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีแบบวนซ้ำแสดงในรูปที่ 1A 2) ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดวิธีแบบไมวนซ้ำแสดงในรูปที่ 1B ซึ่งระบบที่พิจารณาทั้งสองวิธีการมีองค์ประกอบร่วมกันคือ วงจรแปลงผันแบบบูสท์ (Boost converter) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) ตัวชดเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับกริดแบบเฟสเดียว และระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณา

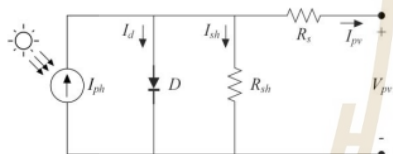


รูปที่ 1 ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด A: วิธีแบบวนซ้ำ, B: วิธีแบบไมวนซ้ำ

3. หลักการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 ระบบที่พิจารณามีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคือเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปประกอบไปด้วยไดโอดขนานกับความต้านทานชั้นเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในอุดมคติและความต้านทานอนุกรมแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบาย ( $I_{pv}$ ) ในสมการที่ 1

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left( e^{\frac{q(V_{pv}/N_s + I_{pv} R_s / N_p)}{kT}} - 1 \right) - \frac{N_p V_{pv} / N_s + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

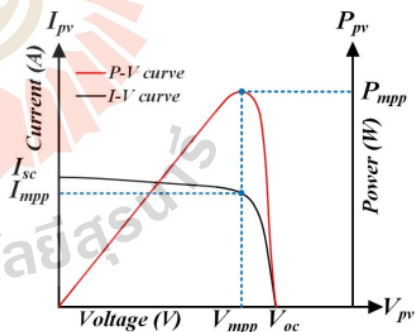
เมื่อ  $I_{pv}$  คือกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  $I_{ph}$  คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงหรือกระแสโฟโต  $N_p$  คือจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนาน  $N_s$  คือจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรม  $I_{rs}$  คือกระแสไฟฟ้าความอิ่มตัวของไดโอด  $V_{pv}$  คือแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  $k$  คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน ( $1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J / Kelvin}$ )  $A$  คือค่าคงที่อุดมคติของไดโอด  $T$  คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อระบบที่พิจารณามีค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์

พารามิเตอร์	รายละเอียด	หน่วย
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mpp}$ )	32.6	A
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ )	154.5	V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	34.64	A
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	186.5	V
จำนวนแผงที่ต่ออนุกรม ( $N_s$ )	5	แผง
จำนวนแผงที่ต่อขนาน ( $N_p$ )	4	แผง

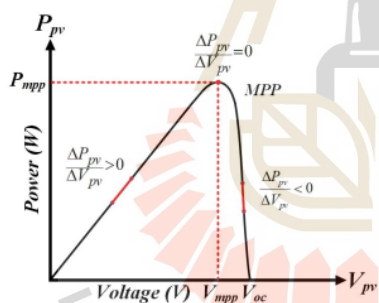
จากสมการกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีพฤติกรรมคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.2 วิธีการแบบวนซ้ำ

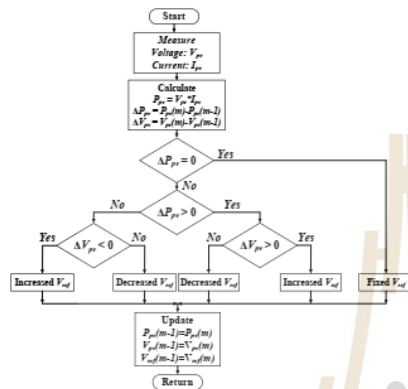
วิธีการรบกวนและการสังเกตเป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวนซ้ำที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีดังกล่าวทำงานเป็นคาบเวลาผ่านการรบกวนด้วยการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{pv}$ ) ด้วยค่า  $\Delta V$  คงที่ ขั้นตอนการรบกวนแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์อาศัยการตรวจจ็กรวดแรงดันและกระแสเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อคำนวณหา กำลังไฟฟ้าและนำแรงดันกับกำลังไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับค่าในคาบเวลาปัจจุบันกับค่าในคาบเวลาก่อนหน้าเพื่อวิเคราะห์หาจุดการทำงานของระบบโดยอาศัยกราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันกับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4 จากรูปสามารถอธิบายการปรับจุดทำงานของระบบได้แสดงในสมการที่ 2



รูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned} \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} > 0; & \text{ at Right side of MPP} \\ \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} < 0; & \text{ at Left side of MPP} \\ \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} = 0; & \text{ at MPP} \end{aligned} \quad (2)$$

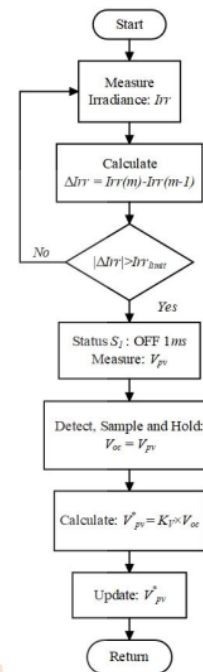
หลักการทํางานของอัลกอริทึมการรบกวนและการสังเกตแสดงแผนผังการทํางานของอัลกอริทึมในรูปที่ 5 เริ่มต้นกระบวนการทํางานจากการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับคํานวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และดําเนินการคํานวณหามลต่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าค่าปัจจุบันกับค่าในอดีต เมื่อดําเนินการเสร็จสิ้นระบบจะเริ่มดําเนินการตรวจสอบเงื่อนไขการทํางานของวงจรซึ่งเริ่มจากการตรวจสอบว่ามลต่างกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่ ซึ่งถ้าพบว่ามลต่างของกำลังไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ระบบดําเนินการคงค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในทางตรงกันข้ามมลต่างกำลังไฟฟ้าไม่เท่ากับศูนย์ระบบดําเนินการตรวจสอบเงื่อนไขมลต่างกำลังไฟฟ้ามากกว่าศูนย์หรือไม่ ซึ่งถ้ามลต่างกำลังไฟฟ้ามากกว่าศูนย์ระบบดําเนินการตรวจสอบเงื่อนไขมลต่างแรงดันไฟฟ้า เมื่อมลต่างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าศูนย์ระบบดําเนินการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในทางกลับกันมลต่างแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าศูนย์ระบบดําเนินการลดระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในอีกกรณีหนึ่งมลต่างกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าศูนย์ระบบดําเนินการตรวจสอบเงื่อนไขมลต่างแรงดันไฟฟ้า เมื่อมลต่างแรงดันไฟฟ้ามากกว่าศูนย์ระบบดําเนินการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในทางตรงกันข้ามมลต่างแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าศูนย์ระบบดําเนินการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อระบบดําเนินการทํางานตามเงื่อนไขเสร็จสิ้นระบบจะทำการอัปเดตค่าแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นค่าในอดีตก่อนเริ่มดําเนินการทํางานซ้ำตามขั้นตอน แสดงแผนผังการทํางานของอัลกอริทึมในรูปที่ 5 จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 4 และความสัมพันธ์ของสมการที่ 2 สามารถอธิบายจุดการทํางานของการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตด้วยการปรับเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย  $\Delta V$  ที่มีคําคงที่ให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 5 แผนภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต

### 3.3 วิธีการแบบไม่ว่าน้ำ

วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรร (FOCV method) เป็นวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าชนิดหนึ่งของวิธีการแบบไม่ว่าน้ำ หลักการทำงานของอัลกอริทึมเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรร เริ่มต้นกระบวนการทำงานจากการวัดค่าความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบผลต่างของความเข้มแสงขณะนั้นกับค่าความเข้มแสงในอดีตเมื่อผลต่างของความเข้มแสงเกินค่าที่กำหนดระบบดำเนินการสั่งการทำงานของสวิตช์  $S_1$  เปิดวงจรรเป็นเวลา 1 ms เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรรและคงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรรสำหรับการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจากการประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า  $K_V$  เท่าของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรรและดำเนินการอัปเดตแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงก่อนเริ่มดำเนินการทำงานซ้ำตามขั้น แสดงแผนผังการทำงานของอัลกอริทึมในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรร

วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรร (FOCV method) ถือว่าเป็นวิธีที่ทำงานได้ง่าย ซึ่งวิธีดังกล่าวอาศัยการทำงานบนหลักการแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรร ( $V_{oc}$ ) โดยประมาณ  $K_V$  เท่าแสดงในสมการที่ 3

$$V_{mpp} \cong K_V V_{oc} \quad (3)$$

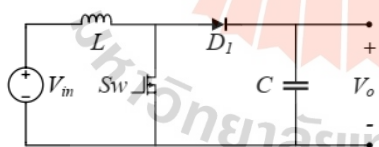
ดังนั้น 
$$K_V = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \quad (4)$$

เมื่อ  $V_{mpp}$  คือแรงดันที่จุดกำลังไฟสูงสุด  $K$  คือค่าคงที่อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟสูงสุด ( $V_{mpp}$ ) ต่อแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) โดยทั่วไปค่า  $K$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 0.85 โดยค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเข้มแสง ( $I_{rr}$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ) วิธีนี้ทำงานเป็นคาบเวลาโดยอาศัยวงจรตั้งเวลา (Timer) เพื่อกำหนดช่วงเวลาการตัดวงจรออกชั่วคราวสำหรับตรวจจับการวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร และใช้วงจรสุ่มค่าและคงค่าสัญญาณแรงดัน (Sample and Hold: S&H) เพื่อคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟ ( $V_{mpp}$ ) ในช่วงเวลาที่กำหนด

4. การออกแบบพารามิเตอร์ของระบบ

4.1 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัสต์

วงจรแปลงผันแบบบัสต์แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ให้แรงดันไฟฟ้าอินพุตถูกเพิ่มเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้นตามค่าวัฏจักรหน้าที่ ( $D$ ) ตามความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัสต์สามารถอธิบายได้ในสมการที่ 5



รูปที่ 7 วงจรแปลงผันแบบบัสต์

$$V_o = \frac{V_m}{1-D} \tag{5}$$

เมื่อ  $V_m$  คือแรงดันไฟฟ้าอินพุต  $V_o$  คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $D$  คือค่าวัฏจักรหน้าที่

บทความนี้มีการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันแบบบัสต์สำหรับติดตามจุดกำลังไฟสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับกริดหนึ่งเฟส การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัสต์ซึ่งมีความสำคัญต่อการตอบสนองของวงจรในการติดตามจุดกำลังไฟสูงสุด โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันแบบบัสต์ประกอบไปด้วย ขวดลวดเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ไดโอด ( $D_1$ ) สวิตช์ ( $Sw$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C$ ) การออกแบบขวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแสดงในสมการที่ 6 และสมการที่ 7 ตามลำดับ

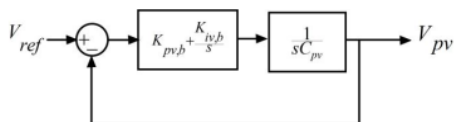
$$L = \frac{V_m(V_o - V_m)}{f_{s,b}\Delta I_L V_o} \tag{6}$$

$$C = \frac{I_o(V_o - V_m)}{f_{s,b}\Delta V_C V_o} \tag{7}$$

เมื่อ  $f_{s,b}$  คือความถี่ของสวิตช์  $\Delta I_L$  คือกระแสไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำของขวดลวดเหนี่ยวนำ  $I_o$  คือกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_o$  คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_m$  คือแรงดันไฟฟ้าอินพุตและ  $\Delta V_C$  คือแรงดันไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำของตัวเก็บประจุ

4.2 การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสต์

การออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คของวงจรแปลงผันแบบบัสต์ในบทความนี้อาศัยหลักการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบดั้งเดิมของระบบควบคุม ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่เรียบง่าย การออกแบบตัวควบคุมนี้ถูกประยุกต์ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงแผนภาพของลูปแรงดันไฟฟ้าได้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพลูบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 8 สามารถเขียนอธิบายในรูปฟังก์ชันการถ่ายโอนของลูบแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ 8

$$\frac{V_{pv}}{V_{pv}^*} = \frac{K_{pv,b} + K_{iv,b}}{s^2 + \frac{sK_{pv,b} + K_{iv,b}}{C_{pv}}} \quad (8)$$

เมื่อ  $V_{pv}^*$  คือแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์  $K_{pv,b}$  และ  $K_{iv,b}$  คือพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ  $C_{pv}$  คือตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีแบบดั้งเดิมจะอาศัยระบบสมการมาตรฐานอันดับ 2 ของระบบควบคุมแบบวงปิด ซึ่งมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ 9

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

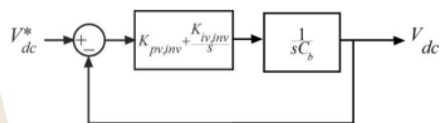
เมื่อ  $\omega_n$  คือความถี่ของแถบหรือความถี่ธรรมชาติ  $\zeta$  คืออัตราส่วนการหน่วง เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ตัวหารของสมการที่ 8 กับสมการที่ 9 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของ  $K_{pv,b}$  และ  $K_{iv,b}$  แสดงในสมการที่ 10 และสมการที่ 11 ตามลำดับ

$$K_{pv,b} = 2\zeta\omega_n C_{pv} \quad (10)$$

$$K_{iv,b} = \omega_n^2 C_{pv} \quad (11)$$

### 4.3 การออกแบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงอาศัยหลักการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบดั้งเดิม เช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมลูบแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ ซึ่งตัวควบคุมนี้ถูกประยุกต์ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่สามารถแสดงแผนภาพของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพลูบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง

จากรูปที่ 9 สามารถเขียนอธิบายในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนของลูบแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงในสมการที่ 12

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{K_{pv,inv} + K_{iv,inv}}{s^2 + \frac{sK_{pv,inv} + K_{iv,inv}}{C_b}} \quad (12)$$

เมื่อ  $V_{dc}$  คือแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง  $C_b$  คือตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ตัวหารของสมการที่ 12 กับสมการที่ 9 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอม  $K_{pv,inv}$  และ  $K_{iv,inv}$  แสดงได้ในสมการที่ 13 และสมการที่ 14 ตามลำดับ

$$K_{pv,inv} = 2\zeta\omega_n C_b \quad (13)$$

$$K_{iv,inv} = \omega_n^2 C_b \quad (14)$$



**4.4 การออกแบบตัวกรองกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิส**

บทความนี้มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสสำหรับส่งถ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังกริดซึ่งทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าเท่ากับ 1 หลักการของตัวควบคุมกระแสฮิสเตอร์ซิสอาศัยการสวิงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง ( $L_f$ ) โดยมีขอบเขตการสั่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างคือ แถบฮิสเตอร์ซิส (hysteresis band: HB) เทียบกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในการปรับเพิ่มลดกระแสไฟฟ้าผ่านการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองสามารถแสดงในสมการที่

15

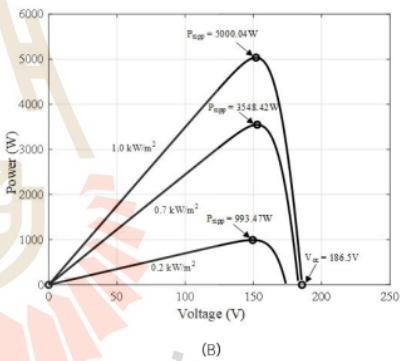
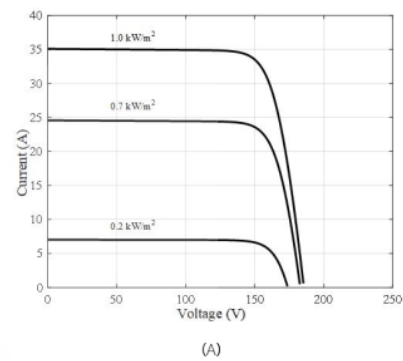
$$L_f = \frac{V_{dc}^2 - V_g^2}{4V_{dc} f_z HB} \quad (15)$$

เมื่อ  $V_g$  คือแรงดันไฟฟ้ากริด  $V_{dc}$  คือแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรง  $f_z$  คือความถี่ของสวิทช์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ  $HB$  คือแถบฮิสเตอร์ซิส

**5. ผลการจำลองสถานการณ์และผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป**

การตรวจสอบประสิทธิภาพของการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งในส่วนผลการจำลองสถานการณ์และในส่วนผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป โดยพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 10

**5.1 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์**



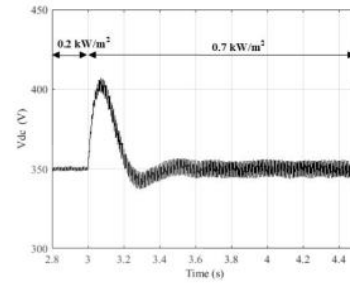
รูปที่ 10 กราฟคุณลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ A: กราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า B: กราฟเส้นโค้งกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า

**5.2 พารามิเตอร์ของระบบ**

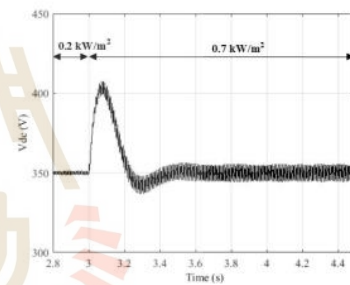
การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของการควบคุม โดยกำหนดพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าทั้งสองวิธีการมีค่าดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า

พารามิเตอร์	รายละเอียด	หน่วย
$C_{pv}$	4000	$\mu\text{F}$
$L_b$	2.6	mH
$C_b$	4000	$\mu\text{F}$
$f_{z,b}$	10	kHz
$K_{sp,b}$	0.365	-
$K_{v,b}$	40	-
$V_{dc}^*$	350	V
$V_g$	230	$V_{rms}$
$L_f$	18	mH
$HB$	0.001	A
$K_{pi,inv}$	0.161	-
$K_{vi,inv}$	2.527	-
$\Delta V$	0.2	V
$K_V$	0.83	-



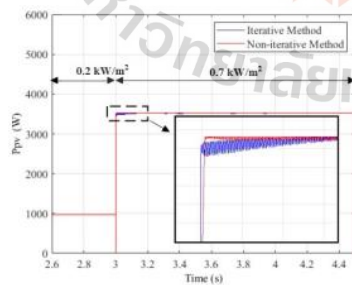
รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์การณรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของวิธีแบบวนซ้ำ



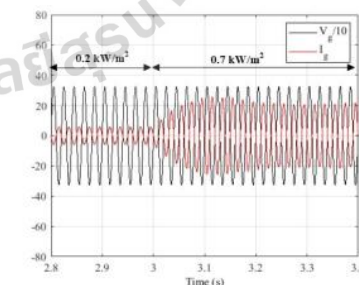
รูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์การณรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของวิธีแบบไม่วนซ้ำ

5.3 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

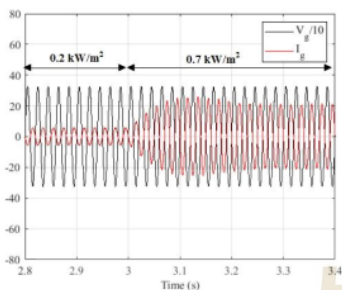
การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อยืนยันผลการเปรียบเทียบวิธีแบบวนซ้ำกับวิธีแบบไม่วนซ้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดหนึ่งเฟส



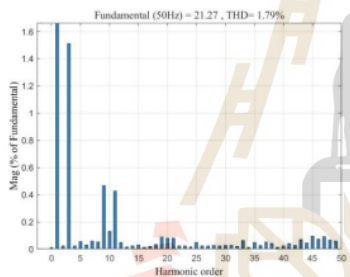
รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าวิธีแบบวนซ้ำกับวิธีแบบไม่วนซ้ำ



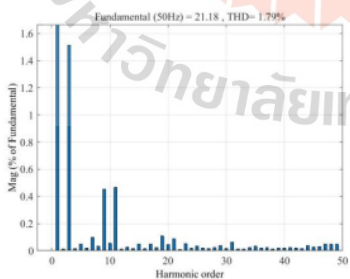
รูปที่ 15 ผลการจำลองสถานการณ์การณรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบวนซ้ำ



รูปที่ 16 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดของแบบไม่ว่าน้ำ



รูปที่ 17 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบวนน้ำ



รูปที่ 18 กราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบไม่ว่าน้ำ

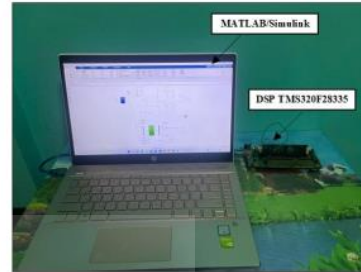
จากรูปที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบวิธีแบบวนน้ำกับวิธีแบบไม่ว่าน้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด การกำหนดให้ค่า  $K_f$  ของระบบวิธีแบบไม่ว่าน้ำมีค่าคงที่ ในบทความนี้พิจารณาจากกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 10(B) ที่ความเข้มแสง  $0.7 \text{ kW/m}^2$  พบว่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร  $V_{oc} = 186.5V$  และแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด  $V_{mpp} = 154.5V$  คำนวณค่า  $K_f$  ได้เท่ากับ 0.83 จากผลการตอบสนองของกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าวิธีแบบไม่ว่าน้ำมีความไวในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วกว่าวิธีแบบวนน้ำ ซึ่งสังเกตจากผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $0.2 \text{ kW/m}^2$  เป็น  $0.7 \text{ kW/m}^2$  ณ เวลาที่ 3 วินาที ประสิทธิภาพของวิธีแบบไม่ว่าน้ำขึ้นอยู่กับค่าคงที่  $K_f$  ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3

จากรูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงผลการตอบสนองของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของวิธีแบบวนน้ำและวิธีแบบไม่ว่าน้ำ เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสไฟตรงเท่ากับ  $350 \text{ V}$  จากผลการตอบสนองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงของทั้งสองวิธีสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงให้คงที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบัสไฟตรง สังเกตได้จากผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก  $0.2 \text{ kW/m}^2$  เป็น  $0.7 \text{ kW/m}^2$

จากรูปที่ 15 และรูปที่ 16 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดของวิธีแบบวนน้ำและวิธีแบบไม่ว่าน้ำ จากผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริด พบว่าตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์ซิสทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่า 0.95 และมุมเฟสของกระแสไฟฟ้าที่กริดกลับกันกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่กริด 180 องศา แสดงว่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดได้

จากรูปที่ 17 และรูปที่ 18 แสดงกราฟสเปกตรัมฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าที่กริดแต่ละอันดับของวิธีแบบวนน้ำและวิธี

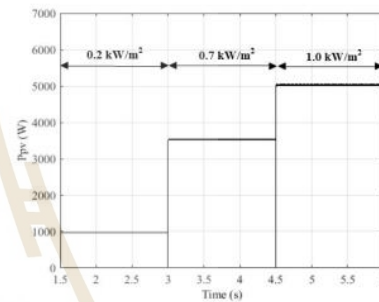
แบบไม่วนซ้ำ จากกราฟสเปกตรัมพบว่าค่าฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้ากริด (THD) ของวิธีแบบวนซ้ำคือ 1.79% และค่าฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้ากริด (THD) ของวิธีแบบไม่วนซ้ำคือ 1.79% เมื่อพิจารณาสเปกตรัมแต่ละอันดับกับมาตรฐานการบิดกระแสไฟฟ้าเข้ากริดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย พบว่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้ากริดแต่ละอันดับและฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้ากริดมีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐานเลขที่ มอก. 2606-2557 [15] ที่กำหนด



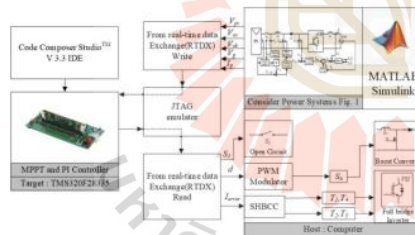
รูปที่ 20 ระบบทดสอบฮาร์ดแวร์ในลูป

5.4 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปในการตรวจสอบยืนยันประสิทธิภาพการติดตามจุดกำลังไฟสูงสุดของวิธีแบบไม่วนซ้ำ โดยมีค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบตามตารางที่ 2 การทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปอาศัยการทำงาน ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงในรูปที่ 19 และระบบทดสอบแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 21 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน

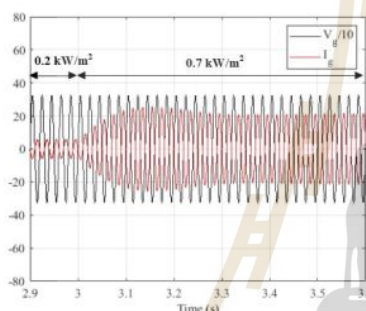
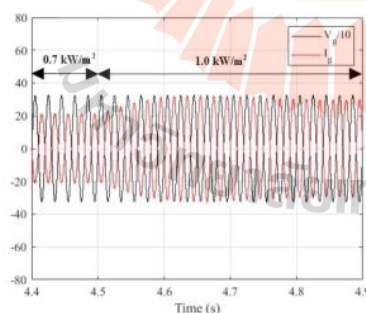


รูปที่ 19 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 กับโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากรูปที่ 21 แสดงผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟสูงสุดแบบไม่วนซ้ำ กรณีมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 2 ช่วง ช่วงที่ 1 ณ เวลาที่ 3 วินาที เปลี่ยนจากความเข้มแสง 0.2 kW/m² เป็น 0.7 kW/m² และช่วงที่ 2 ณ เวลาที่ 4.5 วินาที เปลี่ยนจากความเข้มแสง 0.7 kW/m² เป็น 1 kW/m² จากผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าของวิธีแบบไม่วนซ้ำทั้ง 2 ช่วง พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถติดตามจุดกำลังไฟสูงสุดได้ใกล้เคียงกับจุดกำลังไฟสูงสุดที่ได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงผลการทำงานของระบบฮาร์ดแวร์ในลูปในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

ความเข้มแสง ( $kW/m^2$ )	$P_{mpp}$ (W)	$P_{pv}$ (W)
0.2	976.5	971
0.7	3532	3532
1.0	5042	5042

รูปที่ 22 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปลี่ยนความเข้มจาก 0.2 kW/m<sup>2</sup> เป็น 0.7 kW/m<sup>2</sup>รูปที่ 23 ผลทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปลี่ยนความเข้มจาก 0.7 kW/m<sup>2</sup> เป็น 1.0 kW/m<sup>2</sup>

จากรูปที่ 22 และรูปที่ 23 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กริดกรณีมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 2 ช่วงที่พิจารณา จากผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่กริดแสดงให้เห็นว่ามุมเฟสของกระแสไฟฟ้ามุมเฟสกลับกับผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าอยู่ 180 องศา ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดโดยมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.95 และฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดมีขนาดอยู่ภายใต้มาตรฐานการมีกริดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

## 6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีแบบไม่วุ่นซ้ำสำหรับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดหนึ่งเฟส ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1(A) และรูปที่ 1(B) แสดงให้เห็นว่าวิธีแบบไม่วุ่นซ้ำมีความไวในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รวดเร็วกว่าวิธีแบบวนซ้ำ โดยผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัสไฟตรงได้ และส่วนสุดท้ายของการจำลองสถานการณ์ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กริดยืนยันว่าระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริด โดยมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่า 0.95 รวมไปถึงค่าฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริดมีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ผลการทดสอบแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1(B) วิธีแบบไม่วุ่นซ้ำสามารถยืนยันได้ว่าตั้งจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ภายใต้สภาวะความเข้มแสงที่มีเปลี่ยนแปลง และระบบสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุม (PEMC) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่และเครื่องมือต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Alrubaie Ali Jawad, Al-Khaykan Ameer, Malik R. Q., Talib Suhair Hussein, Mousa Mohammed Imran and . Kadhim Ashraq Mohammed. Review on MPPT Techniques in Solar System. *Proceeding of The 8<sup>th</sup> International Engineering Conference (IEC-2022)*. 2022 23-24 February; Iraq. Erbil. 2022. p. 123-128.
- [2] Singh Davinder and Singh Harjinder. Technical Survey and review on MPPT techniques to attain Maximum Power of Photovoltaic system. *Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPPCC)*. 2019 10-12 October; India. Solan. 2019. p. 265-268.
- [3] Krishnan Anu R, Mohammed S Sheik and Manafudeen Shaleena. Comparison of P&O MPPT Based Solar PV System with Interleaved Boost Converter. *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*. 2019 5-6 July; India. Kannur. 2019. p. 1370-1376.
- [4] Ramon Lopez-Erauskin, Ander Gonzalez, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo and Johan Gyselinck. Multi-Variable Perturb and Observe Algorithm for Grid-Tied PV Systems With Joint Central and Distributed MPPT Configuration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2021. 12(1): 360-367.
- [5] A. Raiker Gaitam, Umanand L. and Reddy B Subba. Perturb and Observe with Momentum Term applied to Current Referenced Boost Converter for PV Interface. *Proceeding of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2018 18-21 December; India. Chennai. 2018.
- [6] Yacine Triki, Ali Bechouche, Hamid Seddiki and Djaffar Ould Abdeslam. An Improved Incremental Conductance Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Proceeding of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. 2021 13-16 October; Canada. Toronto, ON. 2021.
- [7] Anwar Md Hasan and Roy Provashish. A Modified Incremental Conductance Based Photovoltaic MPPT Charge Controller. *Proceeding of the International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*. 2019 7-9 February; Bangladesh. Cox'sBazar. 2019.
- [8] Zakzouk Nahla E., Abdelsalam Ahmed K, Helal Ahmed A. and Williams Barry W. PV Single-Phase Grid-Connected Converter: DC-Link Voltage Sensorless Prospective. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017. 5(1): 526-546.
- [9] Mahmoud N. Ali, Karar Mahmoud, Matti Lehtonen and Mohamed M. F. Darwish. An Efficient Fuzzy-Logic Based Variable-Step Incremental Conductance MPPT Method for Grid-Connected PV Systems. *IEEE Access*. 2021. 9: 26420-26430.



- [10] Nadeem Ahsan, Sher Hadeed Ahmed, Murtaza Ali Faisal and Ahmed Nisar. An online fractional open-circuit voltage maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on sliding mode control. *Proceeding of the International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering & Computer Sciences (RAEE & CS)*. 2020 20-22 October; Pakistan. Islamabad. 2020.
- [11] Mentaly Lahcen EL, Amghar Abdellah and Sahsah Hassan. Comparison between HC, FOCV and TG MPPT algorithms for PV solar systems using buck converter. *Proceeding of the International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*. 2017 19-20 April; Morocco. Fez. 2017.
- [12] Nivedha S and Vijayalaxmi. M. Performance Analysis of Fuzzy based Hybrid MPPT Algorithm for Photovoltaic system. *Proceeding of the International Conference on Communication, Control and Information Sciences (ICCISC)*. 2021 16-18 June; India. Idukki. 2021.
- [13] Muhammad Hanan, Xin Ai, Muhammad Yaqoob Javed, Muhammad Majid Gulzar and Saqib Ahmad. A Two-Stage Algorithm to Harvest Maximum Power from Photovoltaic System. *Proceeding of the IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2018 20-22 October; China. Beijing. 2018.
- [14] Trabelsi Hedi, Elloumi Mourad, Abid Hafedh and Kharrat Maher. MPPT controllers for PV array panel connected to Grid. *Proceeding of the 18<sup>th</sup> International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*. 2017 21-23 December; Tunisia. Monastir. 2017. p. 505-510.
- [15] กระทรวงอุตสาหกรรม. *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมระบบเซลล์แสงอาทิตย์ – ลักษณะของการเชื่อมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า*. มอก. 2606-2557. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2557/E/111/2.PDF> [เข้าถึงเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2565].

## ประวัติผู้เขียน

นายธนธิป บุญทวี เกิดในวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2540 ที่จังหวัดนครปฐม เริ่มศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-4 ณ โรงเรียนใจเพียรวิทยานุสรณ์ และระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 5-6 ณ โรงเรียนอนุบาลสิงห์บุรี ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนสิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถานศึกษาในระดับอุดมศึกษาเดิม

สำหรับการศึกษาระดับปริญญาโท ได้รับทุนการศึกษา “ทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก” และได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 1 รายวิชาดังนี้ ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการขับเคลื่อน และปฏิบัติการของสาขาวิชาเครื่องกล 1 รายวิชาดังนี้ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบฝังตัว ในระหว่างการศึกษาได้ทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้รับองค์ความรู้ทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติ ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และปัญญาประดิษฐ์ นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 3 บทความซึ่งได้ปรากฏอยู่ในภาคผนวก ง