## การควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาโดยใช้ เทคนิคการรบกวนและสังเกต

## MAXIMUM POWER POINT CONTROL OF A ROOFTOP PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING THE PERTURBATION AND OBSERVATION TECHNIQUE



ดุษฎีนิพนธ์นี่เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2564 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## การควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาโดยใช้ เทคนิคการรบกวนและสังเกต



ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2564 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.



COPYRIGHT © 2021 FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2564 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หัวข้อดุษฎีนิพนธ์ การควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาโดยใช้ เทคนิคการรบกวนและสังเกต
 Maximum Power Point Control of a Rooftop Photovoltaic System Using the Perturbation and Observation Technique
 ชื่อ - นามสกุล นายอนุชิต อุไรรัตน์
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
 ปีการศึกษา 2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

20m ู้ (รองศาสตราจารย์นภาพร พ่วงพรพิทักษ์, D.Eng.) ประธานกรรมการ

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์, D.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณฐภัทร พันธ์คง, Ph.D.)

MM กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรินทร์ แหงมงาม, Ph.D.)

- e-e-

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้เป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์, Ph.D.) วันที่ 14 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2565

หัวข้อดุษฎีนิพนธ์	การควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาโดยใช้ เทคนิคการรบกวนและสังเกต
ชื่อ – นามสกุล	นายอนุชิต อุไรรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, DrIng.
ปีการศึกษา	2564

#### บทคัดย่อ

ดุษฎีนิพนธ์นี้นำเสนอการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา โดยใช้เทคนิคการรบกวนและสังเกต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดของการ ไฟฟ้า โดยมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมให้ติดตามจุดจ่ายกำลัง สูงสุดได้เร็วขึ้น สามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เมื่อแสงเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดและลดการแกว่ง รอบจุดจ่ายกำลังสูงสุด โดยอัลกอลิทึมการทำนายล่วงหน้าถูกนำมาใช้สำหรับการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ จ่ายให้กับกริด

อัลกอลิทีมการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดแบบดั้งเดิมนั้นพบว่ามีข้อเสียคือติดตามจุดจ่ายกำลัง สูงสุดช้าเมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ตลอดจนมีการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่อนข้าง สูง วิธีการแบบดั้งเดิมใช้หลักหลักการควบคุมรอบการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าในการการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด วิธีการที่นำเสนอใช้หลักการ ควบคุม กระแสไฟฟ้าบนพื้นฐานอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตร่วมกับอัลกอลิทึมตรรกะคลุมเครือ รวมถึงใช้ หลักการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าแบบไม่คงที่เพื่อให้ระบบติดตามจุดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วเมื่อ แสงมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ตลอดจนเพื่อลดการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลังสูงสุด โดยนำผลของอัลกอ ลิทึมที่ถูกปรับปรุงมาเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม โดยการทดสอบแบ่งออกเป็นสองกรณีคือเมื่อ โหลดเป็นความต้านทานและโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดของการไฟฟ้า

ผลการทดสอบพบว่าอัลกอลิทึมที่นำเสนอสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เร็วกว่าอัลกอลิ ทึมการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์น้อยกว่า ตลอดจนประสิทธิภาพ การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดมีค่าสูงกว่าแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด การรบกวนและสังเกต การทำนาย ตรรกะคลุมเครือ

Dissertation Title	Maximum Power Point Control of a Rooftop Photovoltaic
	System Using the Perturbation and Observation Technique
Name – Surname	Mr. Anuchit Aurairat
Program	Electrical Engineering
Dissertation Advisor	Associate Professor Boonyang Plangklang , DrIng.
Academic Year	2021

#### ABSTRACT

This dissertation investigated the maximum power control of a rooftop photovoltaic system using the perturbation and observation technique in order to increase the efficiency of the grid-connected inverter. The goal was to improve the traditional perturbation and observation algorithm to track the maximum power point faster. The maximum power point was able to be tracked when the sun suddenly changed and the proposed algorithm was able to reduce the oscillations around the maximum power point. A predictive algorithm was used to control the electricity supplied to the grid.

The traditional maximum power tracking algorithm was found to have a disadvantage: it was slow to track the maximum power point when the sun suddenly changed as well as when there were the high oscillations around the maximum power point. The traditional method used a duty cycle control of the DC to DC converter to control the voltage for tracking the maximum power point. The proposed method, meanwhile, used a current control based on perturbation and observation algorithms in combination with fuzzy logic algorithms. It also used the variable step sizes of current adjustments so that the system was able to faster track the maximum power point when the sun changed suddenly. The proposed method was also able to reduce the oscillations around the maximum power point. The results of the proposed modified algorithm were compared with the traditional methods. The experiment was divided into two cases: with resistive load and with the grid-connected inverter.

The results showed that the proposed modified algorithm was able to track the maximum power point faster than the traditional algorithm. The total harmonic distortion was less than the traditional algorithm and a higher maximum power point tracking efficiency was achieved.

**Keywords**: maximum power point control, perturbation and observation, predictive, fuzzy logic

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ที่ให้คำแนะนำการออกแบบอัลกอลิ ทึมการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด จัดหาอุปกรณ์ประกอบในการทำวิจัย ตลอดจนคำแนะนำและ การช่วยเหลือในการเผยแพร่งานงานวิจัยในวารสารระดับชาติและนานาชาติ ขอขอบคุณคณาจารย์และ นักศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่านตลอดจนบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ ที่ให้ คำแนะนำตลอดจนช่วยเหลือซึ่งทำให้การจัดทำทำดุษฎีนิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี ทุกท่านที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือตลอดจน คำแนะนำทุกด้าน รวมถึงให้การสนับสนุนช่วยเหลือให้ดุษฎีนิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษารวมถึงสถานที่ และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากกำลังใจจากทุกคนใน ครอบครัวตลอดจนเพื่อนร่วมงานทุกท่าน



อนุชิต อุไรรัตน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(4 <u>)</u>
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(5 <u>)</u>
กิตติกรรมประกาศ	(6 <u>)</u>
สารบัญ	(7 <u>)</u>
สารบัญตาราง	(9 <u>)</u>
สารบัญรูป	(10 <u>)</u>
สัญลักษณ์และอักษรย่อ	(14 <u>)</u>
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	15
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	16
1.3 สมมุติของฐานการวิจัย	16
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	16
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	17
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	19
2.2 วิวัฒนาการของระบบเซลล์แสงอาทิตย์	21
2.3 ผลกระทบจากการถูกบังบางส่วนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์	26
2.4 เทคนิคการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด	27
2.5 ทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกับการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด	32
2.6 วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง	34
2.7 อินเวอร์เตอร์	36
2.8 ตรรกะคลุมเครือ	
2.9 การคำนวณหาตำแหน่งในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	43
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	43
3.2 หลักการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด	43
3.3 การทดสอบอัลลกอลิทึมที่ถูกพัฒนากับโหลดความต้านทาน	45
3.4 การทดสอบร่วมกับอินเวอร์์เตอร์แบบทำนายล่วงหน้า	53
3.5 การทดสอบความเป็นไปได้ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาทรงจั่ว	71
บทที่ 4 การทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด	75
4.1 บทนำ	75

# สารบัญ (ต่อ)

4.2 การทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน	75
4.3 การทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสู <sup>้</sup> งสุดเมื่อโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์	87
4.4 การทดสอบเมื่อติดตั้งบนหลังคาในทิศทางต่างๆ	100
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	102
5.1 สรุปผลงานวิจัย	102
บรรณานุกรม	104
ภาคผนวก	110
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยตีพิมพ์	111
ประวัติผู้เขียน	157



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	. กฎของตรรกะคลุมเครือ	
ตารางที่ 3.2	2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขับเกตและแรงดันไฟฟ้า	60
ตารางที่ 4.1	. ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	75
ตารางที่ 4.2	2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผัน	76
ตารางที่ 4.3	8 ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง	84
ตารางที่ 4.4	ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	88
ตารางที่ 4.5	5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	
ตารางที่ 4.6	5 ผลการทดสอบการติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ	



## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาทรงปั้นหยา	16
รูปที่ 2.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบ MPPT	18
รูปที่ 2.2	แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	19
รูปที่ 2.3	เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของ I-V และ P-V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ระดับ	เการฉาย
	รังสีที่แตกต่างกัน	20
รูปที่ 2.4	ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	21
รูปที่ 2.5	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์	21
รูปที่ 2.6	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสตริง	23
รูปที่ 2.7	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลรวมต่อขนาน	23
รูปที่ 2.8	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลรวมต่ออนุกรม	24
รูปที่ 2.9	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์โมดูลรวม	25
รูปที่ 2.10	ผลกระทบจากการถูกบังบางส่วน	26
รูปที่ 2.11	วิธีการรบกวนและสังเกต	27
รูปที่ 2.12	ไดอะแกรมวิธีการรบกวนและสังเกต	28
รูปที่ 2.13	วิธีการเพิ่มความนำ	29
รูปที่ 2.14	ไดอะแกรมวิธีการเพิ่มความนำ	
รูปที่ 2.15	วิธีการติดตามดวงอาทิตย์	31
รูปที่ 2.16	วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดทบแรงดันไฟฟ้า	34
รูปที่ 2.17	อินเวอร์เตอร์ชนิดขั้นตอนเดียว	37
รูปที่ 2.18	อินเวอร์เตอร์ชนิดสองขั้นตอน	37
รูปที่ 2.19	รูปแบบของตรรกะคลุมเครือ	40
รูปที่ 2.20	ตัวอย่างของการใช้ฟังก์ชันสมาชิก	41
รูปที่ 2.21	ตำแหน่งในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการคำนวณ	42
รูปที่ 3.1	จุดจ่ายกำลังสูงสุด	44
รูปที่ 3.2	การตรวจจับจุดจ่ายกำลังสูงสุด	44
รูปที่ 3.3	จุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลง	45
รูปที่ 3.4	การควบคุมการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าด้วยอัตราไม่คงที่	45
รูปที่ 3.5	บล๊อคไดอะแกรมวิธีรบกวนและการสังเกตที่ถูกพัฒนา	46
รูปที่ 3.6	บล๊อคไดอะแกรมวิธีการเพิ่มความนำแบบที่ถูกพัฒนา	47
รูปที่ 3.7	ขอบเขตของกระแสอ้างอิง	48

# สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.8	อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิง	49
รูปที่ 3.9	รอบการทำงาน	49
รูปที่ 3.10	บล๊อคไดอะแกรมวิธีรบกวนและการสังเกตร่วมกับเทคนิคการประมาณค่าที่ถูกพัฒนา	50
รูปที่ 3.11	ไดอะแกรมการจำลองการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด	52
รูปที่ 3.12	ไดอะแกรมการทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด	53
รูปที่ 3.13	ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิควิธีการการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า	54
รูปที่ 3.14	บล๊อคไดอะแกรมเทคนิควิธีการการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า	55
รูปที่ 3.15	วงจรสมมูลของการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์	56
รูปที่ 3.16	เทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า	57
รูปที่ 3.17	การตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า	58
รูปที่ 3.18	การแปลงจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นระบบ 2 แกน	58
รูปที่ 3.19	การควบคุมกระแสอ้างอิง	59
รูปที่ 3.20	เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์	60
รูปที่ 3.21	แบบจำลองการแปลงแกน abc เป็นαβ	63
รูปที่ 3.22	ผลการจำลองการแปลงจาก abc เป็นสัญญาณ αβ	64
รูปที่ 3.23	แบบจำลองการสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิง	65
รูปที่ 3.24	กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าจากการแปลงแกน	65
รูปที่ 3.25	หลักการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า	66
รูปที่ 3.26	แบบจำลองวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 2 ระดับ	68
รูปที่ 3.27	ไดอะแกรมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า	69
รูปที่ 3.28	ไดอะแกรมการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด	70
รูปที่ 3.29	การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาทรงปั้นหยา	71
รูปที่ 3.30	ตำแหน่งติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์	73
รูปที่ 4.1	ระดับแสงที่ใช้ในการทดสอบ	76
รูปที่ 4.2	ผลการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม	76
รูปที่ 4.3	ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม .	77
รูปที่ 4.4	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม	77
รูปที่ 4.5	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุ่ตของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม	78
รูปที่ 4.6	การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอ	78
รูปที่ 4.7	ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของวิธีการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอ	78
รูปที่ 4.8	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอ	79
-		

# สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.9	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอ	79
รูปที่ 4.10	เปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดระหว่างวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม วิธีการที่บำเสนอ	งกับ มกับ
<u>รา</u> ที่ 1 11	างไร้แบบที่แบบไระสิทธิภาพการติดตาบอดอ่ายกำลังสาสตระหว่างวิธีการรบกาบและสังบ	00 กต
3071 <del>4</del> .11	กับใช้การที่นำแสนอ	80
รปที่ 1 12	การติดตาบอดอ่ายกำลังสงสดด้ายวิธีการเพิ่บควาบบำ	00
งูบท <del>1</del> .12 รเปพี่ ∆ 13	ประสิทธิกาพการติดตามจดจ่ายกำลังสงสดของวิธีการเพิ่มคาามนำ	01
งูยที่ 4.19 รเปที่ 4.14	แรงดับไฟฟ้าเอาต์พตของวิธีการเพิ่มความบำ	01
รูปที่ 4 15	กระแสไฟฟ้าเอาต์พตของวิธีการเพิ่มความบำ	02
รูปที่ 4 16	เปรียบเทียบการติดตามจดจ่ายกำลังสงสุดระหว่างวิธีเพิ่มความบำกับวิธีการที่บำเสบอ	02
งูยที่ 1.10 รเปที่ 4.17	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสงสุดระหว่างวิธีเพิ่มความบำกับวิธีก	ร
จัยที่ 4.11	ที่บำเสบอ	83
รปที่ 4.18	การทดสอบระบบติดตามจดจ่ายกำลังสงสด	84
รูปที่ 4.19	ผลการทดสอบระบบติดตามจดจ่ายกำลังสงสดด้วยอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกต	85
รูเที่ 4.20	กำลังไฟฟ้าและการติดตามจดจ่ายกำลังไฟฟ้าสงสดของวิธีการรบกวนและสังเกต	
รูปที่ 4.21	ผลการทดสอบระบบติดตามจดจ่ายกำลังสงสดด้วยอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตที่	ถก
v 0	พัฒนา	86
รปที่ 4.22	กำลังไฟฟ้าและการติดตามจดจ่ายกำลังไฟฟ้าสงสดของวิธีการรบกวนและสังเกตที่ถก	
ป	พัฒนา	87
รูปที่ 4.23	การเปลี่ยนแปลงของระดับแสงที่ใช้ในการจำลอง	88
รูปที่ 4.24	การเปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด	90
รูปที่ 4.25	การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าอ้างอิง	90
รูปที่ 4.26	การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังกริต	91
รูปที่ 4.27	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากริต	91
รูปที่ 4.28	ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้า	92
รูปที่ 4.29	การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน	92
รูปที่ 4.30	ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน 1,000 วั	, ัตต์
-	ต่อตารางเมตร 25 องค์ศาเซลเซียส	93
รูปที่ 4.31	ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน 1,000 วั	์ตต์
-	ต่อตารางเมตร 25 องค์ศาเซลเซียส	93
รูปที่ 4.32	การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง	94

# สารบัญรูป (ต่อ)

0.

		หนา
รูปที่ 4.33	ผลการจำลองการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด	95
รูปที่ 4.34	การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าอ้างอิง	96
รูปที่ 4.35	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังกริต	
รูปที่ 4.36	ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้า	
รูปที่ 4.37	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลอง	
รูปที่ 4.38	การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง	
รูปที่ 4.39	ผลรวมของความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง	
รูปที่ 4.40	การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน	
รูปที่ 4.41	ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐ	รุาน 100
รูปที่ 4.42	ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะแวดล้อมมาตรร	ฐาน 100
รูปที่ 4.43	เปรียบเทียบผลการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในตำแหน่งต่างๆ	101



# สัญลักษณ์และอักษรย่อ

θ	มุมตกกระทบ
β	มุมระหว่างพื้นเอียงกับพื้นราบ
γ	ทิศทางของดวงอาทิตย์วัดบนพื้นผิวราบ
$\phi$	ทิศทางของดวงอาทิตย์วัดบนพื้นโลก
δ	มุมระหว่างดวงอาทิตย์กับเส้นศูนย์สูตรของโลก
V	เวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
i	เวกเตอร์กระแสโหลด
e	เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ
T <sub>s</sub>	ເວລາสຸ່ມຕັວອຍ່າง
R	ความต้านทาน
L	ความเหนี่ยวนำ
i <sub>ref</sub>	กระแสไฟฟ้าอ้างอิง
i <sub>k</sub>	กระแสไฟฟ้าจริง
i(k+1)	กระแสไฟฟ้าที่ทำนายค่าได้
V <sub>mpp</sub>	แรงดันไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุด
I <sub>mpp</sub>	กระแสไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุด
I <sub>sc</sub>	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร
V <sub>sc</sub>	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร
f <sub>sw</sub>	ความถึ่ของสัญญาณขับ
$\mathbf{C}_{in}$	ตัวเก็บประจุด้านอินพุต
C <sub>o</sub>	ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต
L <sub>in</sub>	ตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุต
T <sub>k</sub>	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ
	S. KOSS &

### บทที่ 1 บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันทุกประเทศทั่วโลกรวมถึงประเทศไทยมีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] จึงทำให้เกิดปัญหามลภาวะซึ่งกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขึ้นสูง ตามไปด้วยประกอบกับปัญหาการต่อต้านการสร้างโรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้า พลังงานน้ำ ปัจจุบันทั่วโลกกำลังเรียกร้องให้หยุดใช้งานโรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้า พลังงานน้ำ ปัจจุบันทั่วโลกกำลังเรียกร้องให้หยุดใช้งานโรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้า พลังงานน้ำ ปัจจุบันทั่วโลกกำลังเรียกร้องให้หยุดใช้งานโรงไฟฟ้าถ่านหินเนื่องจากปล่อยก๊าซเรือนกระจก และฝุ่นเป็นจำนวนมาก สหภาพยุโรปกำลังจัดเก็บภาษีนำเข้าสินค้าตามอัตราการปล่อยก๊าซคาบอนได ออกไซร์ ประกอบกับสภาวะโลกร้อน และปริมาณฝุ่นพิษขนาดเล็กที่เกิดจากการเผาใหม่เชื้อเพลิงของ เครื่องยนต์ที่มีปริมาณสูงขึ้น ทำให้มีการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดปริมาณการปล่อยฝุนขนาดเล็ก จึงมี ความจำเป็นเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่มาทดแทนพลังงานจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นซึ่ง ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกใหม่มาทดแทนพลังงานจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นซึ่ง ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสำหรับประเทศไทยซึ่งมีภูมิประเทศที่ตั้งอยู่ ใกล้เส้นศูนย์สูตรของโลก จึงได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าประเทศในแถบยุโรป อเมริกา เพราะมี แสงอาทิตย์อยู่ตลอดทั้งปี แต่ปัญหาในการใช้เซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าประเทศในแถบยุโรป อเมริกา เพราะมี แสงอาทิตย์อยู่ตลอดทั้งปี แต่ปัญหาในการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิ จึงทำให้ไม่สามารถนำพลังงานจาก เซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากนัก แต่อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าก็มีปัญหา คือต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมากดังนั้นจึงก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเช่นกัน

ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบกริด ที่มีการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาให้ได้กำลังงานสูงสุดโดยใช้หลักการติดตามจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking: MPPT) ขึ้นมาซึ่งระบบการติดตามจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์ ผลิตได้และดึงเอาพลังงานเหล่านั้นมาใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพโดยลดการสูญเสียในวงจรกำลังและวงจร ควบคุมตลอดจนทำให้มีต้นทุนน้อยที่สุด สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้โดยมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เนื่องจากไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้าง อาศัยการปรับเปลี่ยนอัลกอลิทึมในการควบคุม

สำหรับประเทศไทยนั้นหลังคาบ้านส่วนใหญ่เป็นแบบทรงปั้นหยาเนื่องด้วยเพราะต้องการลด ความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวบ้านซึ่งถ้าหากนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งบนหลังคาปัญหาที่ตามมาก็คือ จะทำให้เกิดการบังบางส่วนต่อแผง (patial shading) ในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละวันและแต่ละเดือนไม่

เท่ากันอันเนื่องมาจากตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละฤดูกาลอยู่คนละตำแหน่งกันดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากข้อมูลด้านพลังงานทดแทนที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับ ผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาแบบทรงปั้นหยา เพื่อค้นหาสาเหตุและแนวทางการแก้ปัญหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุง ระบบและอัลกอลิทึมของการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มี ประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยใช้ต้นทุนที่ต่ำลงซึ่งจะส่งผลที่ดีต่อการพัฒนาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในอนาคตต่อไป



รูปที่ 1.1 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาทรงปั้นหยา

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาอัลกอลิทึมที่เหมาะสมที่สุดกับจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง บนหลังคา

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอินเวอร์เตอร์พลังงาน แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

1.2.3 เพื่อใช้เป็นต้นแบบด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าให้กับการติดตั้งไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาบ้านพักอาศัย

1.2.4 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง บนหลังคา

#### 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาอัลกอลิทึมแบบต่างๆที่ใช้ในการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดเพื่อนำมาพัฒนาใช้กับ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

1.3.2 วิเคราะห์ถึงอัลกอลิทึมที่เหมาะสมที่สุดแล้วจำแนกปัจจัยที่จะสามารถปรับปรุงหรือ แก้ไขให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

1.3.3 หลังจากจำแนกปัจจัยที่สามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจึง ดำเนินการหาวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตอินเวอเตอร์ที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ติดตั้งบนหลังคาต่อไป

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษา วิเคราะห์และออกแบบอัลกอลิทึมสำหรับจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา 1.4.2 จำลองการทำงานอินเวอร์เตอร์แบบกริดโดยใช้โปรแกรมแมทแลปซิมมูลิง
 1.4.3 ออกแบบสร้างวงจรควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ฝังตัว

### 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลจากผลกระทบต่อ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาแบบทรงปั้นหยาเช่นผลกระทบจากการ เปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ การถูกบังบางส่วนจากมลภาวะต่างๆ การถูกบังบางส่วนจากรูปทรงของ หลังคาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทำการศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นแยกแยะถึงปัจจัยใดบ้างที่สามารถแก้ไข ปรับปรุง หรือเปลี่ยนแปลง เพื่อช่วย เพิ่มประสิทธิภาพได้และหาวิธีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งมีขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยมี ดังนี้

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เพื่อใช้เป็น ข้อมูลในการวิจัย

้ 1.5.2 วิเคราะห์พร้อมทั้งแยกแยะข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเพื่อหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพ ให้กับการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

1.5.3 เลือกแนวทางที่สามารถเพิ่มประสิทธิให้กับพลังงานให้กับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ทดสอบหาวิธีที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

1.5.4 ดำเนินการทดสอบวิธีการที่เลือกในข้อที่ผ่านมาเพื่อหาอัลกอลิทึมที่สามารรถช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพให้กับการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

1.5.5 วิเคราะห์และสรุปผลกระทบจากการดำเนินงานการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ ติดตั้งบนหลังคา

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ จะสามารถหาแนวทางการเพิ่มสมรรถณะให้กับการ ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา อีกทั้งยังเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อื่นได้ต่อไปซึ่งสามารถสรุปออกมาได้ดังนี้

1.6.1 นำอัลกอลิทึมในการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดมาใช้ในการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

1.6.2 เพิ่มประสิทธิภาพให้กับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา

1.6.3 เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพจากเซลล์ แสงอาทิตย์บนหลังคา

1.6.4 ใช้เป็นต้นแบบด้านการลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้งานมากขึ้น เช่น พลังงานลม แก๊สชีว มวล และพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพลังงานทดแทนส่วนใหญ่เป็น พลังงานสะอาด ก่อให้เกิดมลภาวะน้อยกว่าการใช้พลังงานจากฟอสซิล อีกทั้งในปัจจุบันราคาระบบ พลังงานแสงอาทิตย์ยังมีค่าต่ำลงจากเดิม จึงทำให้สามารถนำมาใช้ได้อย่างแพร่หลาย อีกทั้งมีการส่งเสริม โดยรัฐบาลโดยได้มีนโยบายให้การสนับสนุนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงทำให้มีการนำมาใช้งานอย่าง แพร่หลายมากขึ้น ประกอบกับการที่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านพลังงานแสงอาทิตย์อย่างหลากหลาย จึง ส่งผลให้ผู้ใช้งานมีความเชื่อถือและมั่นใจในการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์อย่างหลากหลาย จึง ส่งผลให้ผู้ใช้งานมีความเชื่อถือและมั่นใจในการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ เท่าที่ควรอันมีสาเหตุมาจาก สภาพภูมิอากาศ การบดบังของเมฆ อุณหภูมิ และบริเวณที่ติดตั้ง โดยเฉพาะการติดตั้งบนหลังคาบ้าน ซึ่งหลังคาบ้านในประเทศไทยเป็นหลังคาแบบทรงปั้นหยา ทำให้เกิด การบดบังจากตัวหลังคาเอง ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจศึกษาถึงการแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาแล้วเพื่อช่วยหาทางออกในการ เพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นให้กับการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบน หลังคาบ้านโดยการหาเทคนิควิธีในการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) เพื่อให้ระบบเข้าสู่จุดการ จ่ายกำลังสูงสุดได้รวดเร็วเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้อุปกรณ์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีราคาต่ำ อีกทั้งยังเป็นต้นแบบให้กับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ ติดตั้งในรูปแบบอื่นที่เกี่ยวข้องกันได้



ร**ูปที่** 2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบ MPPT

ในการติดตามจุดพลังงานสูงสุดในเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์ จำเป็นต้องมีความเข้าใจว่า เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์ทำงานอย่างไร ระบบติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดแต่ละระบบเป็นการรวมกัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่างๆ ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมหรือขนาน [2] ตัวแปลงผัน (DC-DC) รูปที่ 2.1 แสดง บล็อกไดอะแกรมของระบบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

2.1.1 หลักการเซลล์ทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยอุปกรณ์เซมิ คอนดักเตอร์ที่ดูดซับแสงและแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า [3] เซลล์ที่พบบ่อยที่สุดคือ pกจังก์ชั่นซิลิคอน ที่ มีประสิทธิภาพสูงถึง 17 % แต่ละเซลล์ประกอบด้วยฐานที่เจือด้วย p และชั้นบนสุดที่เจือด้วย n เมื่อถูก แสงโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานแถบคาดของเซมิคอนดักเตอร์จะถูกดูดซับ ดังนั้นจึงสร้าง อิเล็กตรอนโฮลเรียกว่าผลโฟโตโวลตาอิก รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ วงจร ประกอบด้วยแหล่งกระแส ไดโอด ตัวต้านทานแบบอนุกรม และตัวต้านทานแบบขนาน รอยต่อ p-n ถูก แทนด้วยไดโอด





กระแสไฟขาออกของเซลล์ PV สามารถกำหนดเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟขาออกของเซลล์ PV ได้ดังสมการที่ 1

$$I = I_{ph} - I_{d} \left[ exp(q(V+IR_{s})/kT_{c}A) - 1 \right] - (V+IR_{s})/R_{p}$$
(2.1)

I<sub>ph</sub> = กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงแดด

l<sub>d</sub> = กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไดโอด

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด

V = แรงดันไฟฟ้าที่ตกคล่อมโหลด

R<sub>s</sub> = ความต้านทานภายในอนุกรม

R<sub>p</sub> = ความต้านทานภายในขนาน q = ประจุอิเล็กตรอน (1.6x10<sup>-19</sup> C) k = ค่าคงที่ของ Boltzmann (1.38x10-23 J/K)

กระแสไฟฟ้า (I<sub>ph</sub>) เป็นสัดส่วนกับการฉายรังสีดวงอาทิตย์ที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ เซลล์ แสงอาทิตย์เชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนานกันเพื่อสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามแบบจำลองวงจรเซลล์ เดียว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังในสมการ 2

$$I = N_{p}I_{ph} - N_{p}I_{d} \left[ exp(q(V/N_{s} + IR_{s}/N_{p})/kT_{c}A - 1 \right] - (N_{p}V/N_{s} + IR_{s})/R_{p}$$
(2.2)

โดยที่ N<sub>s</sub> และ N<sub>p</sub> คือจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนานกันในแผง เส้น โค้งลักษณะ P-V และ I-V ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.3 ด้วยการฉายรังสี 0.2 kW/m<sup>2</sup> ถึง 1.0 kW/m<sup>2</sup> ดังรูปมีจุดกำลังสูงสุดที่ไม่ซ้ำกันหนึ่งจุดบนเส้นโค้ง P-V สำหรับแต่ละระดับการฉายรังสี





2.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามโครงสร้างการผลิตเป็นสองกลุ่มคือ Thin-film และ Crystalline Silicon แสดงดังรูปที่ 2.4

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตยยังสามารถแบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตได้เป็น 3 ชนิดหลัก [4] ได้แก่ 1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนซึ่งมีลักษณะบางและแข็งมากแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ ชนิด ผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) ซึ่งเรียกอีกชื่อคือ Monocrystalline Silicon Solar Cell และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell)

 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากอะมอฟัสซิลิคอนมีลักษณะเป็นฟิล์มบางมีน้ำหนักเบาแต่ประสิทธิภาพ ค่อนข้างต่ำประมาณ 5-10 %  เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำอื่นเช่น คอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (CIS: Copper Indium Diselenide) แกลเลี่ยม อาร์เซไนด์ (GaAs: Gallium Arsenide) แคดเมียม เทลเลอไรด์ (CdTe: Cadmium Telluride) มีประสิทธิภาพสูง 20-25 %



**รูปที่** 2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.2 วิวัฒนาการของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

เทคโนโลยีระบบพลังงานแสงอาทิตย์มีวิวัฒนาการและก้าวหน้าโดยเฉพาะในช่วงสองทศวรรษที่ ผ่านมา ระบบต้นทุนต่ำทั่วเป็นแบบรวมศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์

การต่อใช้งานลักษณะนี้มีการใช้ตัวแปลงพลังงานจากส่วนกลางเพียงตัวเดียวพร้อมการ ควบคุมการติดตามจุดไฟสูงสุด แผงโซลาร์เซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งเชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนาน กันเพื่อสร้างไฟฟ้าแรงสูงและกระแสไฟสูง การต่อแบบรวมศูนย์ประเภทนี้พบการใช้งานในโรงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์และบนชั้นดาดฟ้าที่อยู่อาศัย [5] โดยปกติแล้วแรงดันไฟขาออกทั้งหมด (V<sub>pv</sub>) และ กระแสไฟขาออกทั้งหมด (I<sub>pv</sub>) จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์จะถูกตรวจจับเพื่อการควบคุมจุด จ่ายกำลังสูงสุด ข้อดีของสถาปัตยกรรมดังกล่าวคือความเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ เนื่องจากจำเป็นต้องมี ตัวแปลงพลังงานประสิทธิภาพสูงเพียงตัวเดียวในการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด สำหรับระบบเซลล์ แสงอาทิตย์ทั้งหมด ข้อเสียของระบบรวมศูนย์คือ หากสภาพการทำงานของแผงหนึ่งหรือหลายแผงไม่ ตรงกันหรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขการถูกบังบางส่วนตัวควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดจะไม่สามารถควบคุมการ ทำงานที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดของแต่ละแผงได้ ทำให้ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดต่ำกว่า ความเป็นจริง

เนื่องจากผลกระทบของสภาวะที่ไม่ตรงกันจากการถูกบังบางส่วน ระบบที่เรียกว่าระบบสตริง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ได้รับการพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยตัวแปลงพลังงานส่วนกลาง เพียงตัวเดียว การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ระบบนี้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะจัดกลุ่มเป็นสตริง (แผงหลายแผง เชื่อมต่อกันเป็นซุด) และสตริงแต่ละสายเชื่อมต่อกับตัวแปลงพลังงานซึ่งดำเนินการควบคุมจุดจ่ายกำลัง สูงสุดสำหรับแต่ละสตริง แรงดันไฟฟ้าสตริง (V<sub>st</sub>) และกระแสไฟสตริง (I<sub>st</sub>) จากสตริงแผงเซลล์ แสงอาทิตย์แต่ละสายใช้เป็นตัวแปรการตรวจจับจุดจ่ายกำลังสูงสุด ข้อดีของระบบสตริงคือตัวควบคุมจุด จ่ายกำลังสูงสุดที่ระดับสตริง ดังนั้นประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดสูงกว่าแบบรวมศูนย์ ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ตรงกันระหว่างสตริง อย่างไรก็ตามแต่ละสตริงยังคงมีการสูญเสียพลังงานจำนวนมาก ภายใต้สภาวะที่ไม่ตรงกันระหว่างสตริงเดียวกัน เหตุผลก็คือโดยทั่วไปเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อ เป็นสตริงไดโอดบายพาสสามารถวางขนานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงได้ หากแผงเซลล์ แสงอาทิตย์หนึ่งแผงถูกบังบางส่วนแผงนี้จะถูกข้ามไปเพื่อรักษาระดับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการบังบางส่วนแผงนี้จะถูกข้ามไปเพื่อรักษาระดับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ไม่มีกรงกัน กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบายพาสจะสูญเสียไป หากไม่มีการ ใช้ไดโอดบายพาสในแต่ละแผง แผงที่ถูกบังบางส่วนจล์นหนึ่งแผงในสตริงจะนำไปสู่การสูญเสียพลังงานใน สตริงนั้นเนื่องจากแผงที่ถูกบังบางส่วนจะจำกัดกระแสในสตริงเนื่องจากการเชื่อมต่อแบบอนุกรม





เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ สภาวะที่ไม่ตรงกันและสภาวะการถูกบังบางส่วน จึงมีการพัฒนาระบบการต่อแบบผสมซึ่งแต่ละแผงมี ตัวแปลงผันพลังงานและตัวควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด ระบบผสมแบบขนานถูกแสดงดังรูปที่ 2.7 และ ระบบ ผสมแบบอนุกรมถูกแสดงดังรูปที่ 2.8 ข้อดีของระบบแบบผสมคือมีการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงซึ่งช่วยลดผลกระทบจากการที่ไม่ตรงกันและการถูกบังบางส่วน ดังนั้นประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดจึงดีขึ้น ระบบแบบผสมทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน ตัวควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดจะต้องตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแต่ละแผงเพื่อกระจาย การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงซึ่งทำให้ต้นทุนและขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบสตริงและแบบรวมศูนย์



รูปที่ 2.7 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลรวมต่อขนาน





ข้อเสียอย่างหนึ่งของระบบวงจรแปลงผันโมดูลรวมคือถ้าเซลล์บางเซลล์ในแผงถูกบังบางส่วน ระบบนี้ไม่สามารถบรรเทาผลกระทบที่ไม่ตรงกันภายในแผงเดียวกันได้ จึงมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อ ขจัดผลกระทบที่ไม่ตรงกันในระดับแผงโดยใช้ระดับเซลล์หรือระดับเซลล์ที่จัดกลุ่มด้วยการใช้วงจรแปลง ผันโมดูลรวม (module integrated converter: MIC) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แนวคิดหลักคือการเชื่อมต่อ เซลล์เซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดียวหรือหลายเซลล์ด้วยส่วนย่อยของโมดูลรวมที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อ ดำเนินการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด เอาท์พุตของโมดูลย่อยต่อเป็นอนุกรมหรือขนานกันเพื่อจ่าย พลังงานให้กับกริด





รูปที่ 2.9 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์โมดูลรวม

#### 2.3 ผลกระทบจากการถูกบังบางส่วนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ภายใต้ระดับการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่สม่ำเสมอ เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผงในการเชื่อมต่อ แบบอนุกรมมีแสงสว่างเท่ากันและสมมติว่าแผงทั้งหมดมีลักษณะเหมือนกัน ลักษณะเฉพาะของ ้แรงดันไฟกระแสตรงแบบไม่เชิงเส้น (I-V) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดการทำงานที่เหมาะสมที่สุด ้จุดเดียวสอดคล้องกับจุดจ่ายกำลังสูงสุด (MPP) ที่ไม่ซ้ำกันบนเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้า (P-V) ในทางปฏิบัติ เนื่องจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม หรือขนานกัน หากแผงบางแผงถูกบังบางส่วน (เกิดจากอาคารโดยรอบ เมฆบนท้องฟ้า) แผงเซลล์ ้แสงอาทิตย์จะทำงานภายใต้สภาวะการถูกบังบางส่วน ผลกระทบจากการถูกบังบางส่วนเช่นแผงโซลาร์ เซลล์ใต้รุ่มเงาที่มีแสงสว่างน้อย [6-7] จะดูดซับพลังงานจำนวนมากที่เกิดจากเซลล์ที่มีระดับการส่อง ้สว่างที่สูงขึ้นและจะแปลงพลังงานเป็นความร้อนนำไปสู่จุดร้อน ซึ่งมีผลที่อาจทำให้โซลาร์เซลล์เสียหาย ้ได้ เพื่อลดผลกระทบจากการถูกบังบางส่วน การเชื่อมต่อไดโอดบายพาสข้ามพาเนลเป็นวิธีแก้ปัญหาที่ ทราบกันดี อย่างไรก็ตามในกรณีดังกล่าวจะสังเกตพบจุดสูงสุดหลายจุดบนกราฟ I-V และ P-V ดังแสดง ์ ในรูปที่ 2.10 และค่าสูงสุดแบบพหุคุณเหล่านี้จะลดประสิทธิภาพของจุดจ่ายกำลังสูงสุดของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ เนื่องจากจะมีจุดพลังงานสูงสุดหลายจุดบนกราฟลักษณะเฉพาะของ P-V เทคนิคการติดตาม ้จุดจ่ายกำลังสูงสุดทั่วไปอาจล้มเหลว [8-10] ในการติดตามจุดพลังงานสูงสุดที่แท้จริง เนื่องจากไม่ สามารถแยกแยะระหว่างจุดจ่ายกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะซึ่งทำให้พลังงานเอาต์พุตที่ได้จะต่ำ กว่าความเป็นจริง



รูปที่ 2.10 ผลกระทบจากการถูกบังบางส่วน

### 2.4 เทคนิคการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ปริมาณพลังงานที่สกัดจากแผงโซลาร์เซลล์แสงอาทิตย์เป็นฟังก์ชันของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ระดับการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่สม่ำเสมอ ลักษณะเฉพาะของแรงดัน กระแสไฟไม่เชิงเส้น (I-V) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สุดจุดเดียวสอดคล้อง กับจุดกำลังสูงสุด (MPP) ที่ไม่ซ้ำกันบนเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้า (P-V) เทคนิคการติดตามจุดพลังงานสูงสุด (MPPT) มักใช้เพื่อติดตามสภาพการทำงานของดวงอาทิตย์ และดึงพลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวควบคุมการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดใช้เพื่อค้นหา แรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (VMPP) หรือกระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด(IMPP) ที่แผงเซลล์ แสงอาทิตย์โดยทำงานโดยอัตโนมัติเพื่อให้ได้พลังงานเอาต์พุตสูงสุด (PMPP) [11-15] ภายใต้ระดับการ ฉายรังสีที่แน่นอน มีการเสนอเทคนิคและอัลกอริธึมการควบคุมการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่หลากหลาย และอภิปรายในวรรณกรรมในช่วงที่ผ่านมา อัลกอริธึมและเทคนิคการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่หลากหลาย และอภิปรายในวรรณกรรมในช่วงที่ผ่านมา อัลกอริธึมและเทคนิคการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่หลากหลาย (Incremental Conductance (InCond)) อัลกอริธึม Ripple Correlation Control (RCC) อัลกอลิทึม Fractional Open Circuit Voltage (FOCC) อัลกอลิทึม Fractional Short Circuit Current (FSCC) และอัลกอลิทึมโครงข่ายประสาทเทียม(Neural-Network (NN)) ได้รับการพัฒนาเพื่อดึงกำลังสูงสุดจาก แผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.1 วิธีการรบกวนและสังเกต วิธีการรบกวนและสังเกตุใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากความ เรียบง่ายและความสะดวกในการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.11 ข้อดีของวิธีนี้คือไม่เหมือนกับวิธีออฟไลน์ บางวิธีเช่น วิธีการติดตามแรงดันไฟฟ้าคงที่ (constant voltage tracking) ไม่จำเป็นต้องทราบข้อมูล พารามิเตอร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์มาก่อนอย่างไรก็ตาม การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมการ รบกวนและสังเกตุจะทำให้เกิดความผันผวนรอบๆจุดจ่ายกำลังสูงสุด [16-20] ซึ่งนำไปสู่ความแม่นยำใน การติดตามที่ลดลงและการกระจายพลังงานเพิ่มเติมที่ขึ้นอยู่กับขนาดขั้นตอนการรบกวน วิธีการนี้ยัง ต้องการการตรวจจับตัวแปรสองตัวและต้องการการคูณเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้า ไดอะแกรมวิธีการ รบกวนและสังเกตดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 วิธีการรบกวนและสังเกต





วิธีการนี้ระบบจะทำการวัดค่าแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากนั้นจะทำการ คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและนำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าก่อนหน้าหากจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ ด้านซ้ายของจุดจ่ายกำลังสูงสุดระบบก็จะปรับลดแรงดันไฟฟ้าลงหากจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ด้านขวาของ จุดจ่ายกำลังสูงสุดระบบก็จะปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น

2.4.2 วิธีการเพิ่มความนำ วิธีการเพิ่มความนำสามารถกำจัดข้อเสียของวิธีการรบกวนและ สังเกตุโดยกำจัดการสั่นรอบๆจุดจ่ายกำลังสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.13 อย่างไรก็ตามเนื่องจากอัลกอริธึม การเพิ่มความนำต้องการการคำนวณความชันของกราฟพลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเรียลไทม์ การ







2.4.3 วิธีการ RCC MPPT วิธีการ RCC MPPT ใช้อนุพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำของ ตัวแปลงผันพลังงานและระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าเพื่อกำหนดตำแหน่งของจุดการทำงานของแผง เซลล์แสงอาทิตย์ [23-26] ข้อเสียอย่างหนึ่งของวิธีนี้คือถ้าความถี่สวิตชิ่งของตัวแปลงไฟฟ้าแตกต่างกัน จำเป็นต้องออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านใหม่ ซึ่งใช้เพื่อให้ได้อนุพันธ์เวลาของแรงดันและกระแสแผง เซลล์แสงอาทิตย์

2.4.4 วิธีเศษส่วนแรงดันไฟฟ้า/กระแส (Fractional voltage/current) วิธีเศษส่วน แรงดันไฟฟ้า/กระแสจะตั้งค่าแรงดันกระแสอ้างอิงที่เหมาะสมเป็นเศษส่วนของแรงดันไฟในวงจรเปิดของ แผงโซลาร์เซลล์หรือกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ดังนั้นจึงไม่ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดจริงจริง แม้ว่าวิธีนี้จะมี ประสิทธิภาพการติดตามที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะคงตัวแต่อาจไม่สามารถรวมเข้ากับจุดจ่ายกำลังสูงสุด ใหม่ได้ภายใต้สภาวะชั่วคราว [27-28]

2.4.5 วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม ตัวควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามของระบบโดยใช้โครงสร้างการควบคุมแบบหลายชั้น [29-31] อย่างไรก็ ตามวิธีนี้เกี่ยวข้องกับการคำนวณซ้ำและเพิ่มภาระการคำนวณของคอนโทรลเลอร์ วิธีการติดตามจุดจ่าย กำลังสูงสุดทั้งหมดที่กล่าวถึงข้างต้นจำเป็นต้องมีการตรวจจับแรงดันและกระแสของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์และต้องมีฟังก์ชันการคูณเพื่อให้ได้ค่าพลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเพิ่มขนาดและการใช้ พลังงานของตัวควบคุม

2.4.6 วิธีการติดตามดวงอาทิตย์ วิธีการนี้อาศัยหลักการควบคุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ตั้งฉาก กับดวงอาทิตย์ตลอดเวลา จะทำให้ได้จุดจ่ายกำลังสูงสุด ซึ่งวิธีการนี้ต้องใช้พลังงานบางส่วนจากแผง เซลล์แสงอาทิตย์ในขับมอเตอร์เพื่อติดตามดวงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.15



**รูปที่** 2.15 วิธีการติดตามดวงอาทิตย์

### 2.5 ทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากการศึกษาพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้มุ่งเน้นไปที่ระบบ ปัญญาประดิษฐ์ ตรรกศาสตร์และแบบผสมผสานเพื่อแก้ปัญหาของระบบแบบดั้งเดิมที่ไม่สามารถติดตาม จุดจ่ายกำลังสุดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและแสงอย่างรวดเร็วตลอดจนเกิดจากการบังแสง บางส่วน ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่างานวิจัยสมัยใหม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ดีขึ้นเมื่อ เทียบกับวิธีแบบดั้งเดิมโดยเฉพาะวิธีปัญญาประดิษฐ์นั้นทำให้ระบบสามารถลดการแกว่งลู่เข้าได้เร็วขึ้น แต่ยังมีข้อจำกัดในส่วนที่ต้องใช้ตัวควบคุมที่มีความสามารถสูงซึ่งมีความซับซ้อนของระบบควบคุมมาก ขึ้นทำให้ต้นทุนสูงตามขึ้นไปด้วยซึ่งยังเป็นราคาไม่เหมาะสมในการที่จะนำมาใช้งานในปัจจุบันนี้ การ ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

Hadjer Bounechba และคณะ [32] นำเสนอการจ้ำลองอัลกอริธึมการติดตามจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบเรียลไทม์สำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบ จุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลแสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบควบคุมแบบ FSCC and CPA เพื่อลดการแกว่งขณะ เกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงอย่างรวดเร็ว ผลปรากฏว่าอัลกอลิธึม FSCC ลดการแกว่งดีกว่า CPA

Houria Boumaaraf และคณะ[33]นำเสนออินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสเมื่อ แหล่งจ่ายเป็นเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้อัลกอลิทึมโครงข่ายประสาทเทียม (neural network: NN) ในการ ติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการทดลองเปรียบเทียบกับแบบตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic: FL) โดยทดสอบทั้งสองแบบกับวงจร two-level inverter และ three-level Neutral Point Clamped (NPC) Voltage Source Inverter (VSI) เมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแสง ระหว่างการควบคุมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับแบบตรรกะคลุมเครือ ผลการทดสอบปรากฏว่าอัล กอลิทึมโครงข่ายประสาทเทียมมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าแบบตรรกะคลุมเครือ

A.S. Oshaba และคณะ [34] นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI) โดยใช้ อัลกอริธึม Artificial Bee Colony algorithm (ABC) และ Genetic algorithm (GA) ในการออกแบบ ค่า PI เพื่อให้ได้มาซึ่งจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแสง และโหลด โดยโหลดเป็นมอเตอร์ปั๊มน้ำโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดอนุกรมและมีวงจรแปลงผัน ไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC) การควบคุมโดยใช้อัลกอลิทึมแบบ ABC จะมีการตอบสนองต่อการ เปลี่ยนแปลงของแสงและโหลดได้รวดเร็ว

Mahdi Rajabi Vincheh และคณะ [35] นำเสนอวิธีการควบคุมแบบไฮบริดสำหรับการติดตาม จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุดของ PV เมื่อสภาพแวดล้อมและโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยใช้การ ควบคุมแบบ Hybrid และใช้ MATLAB/Simulink ในการจำลองโดยใช้ FL- NN และ GA ในการควบคุม การควบคุม ผลการจำลองปรากฏว่าอัลกอลิทึม NN ทำให้ระบบสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้ อย่างรวดเร็วที่สุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแสงทันทีทันใด

Guan-Chyun Hsien และคณะ [36] นำเสนอการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิ ทึมการเพิ่มความนำ (Increment conductance: INC) ด้วยการติดตามแบบสองเฟส งานวิจัยนี้นำเสนอ การเปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลแสงอาทิตย์ระหว่าง PI-INC กับ INC ผลทการ ทดสอบ อัลกอลิทึม PI-INC ติดตาม MPPT ได้ดีกว่าอัลกอลิทึม INC

Ahmed A.S. Mohamed และคณะ [37] นำเสนอการออกแบบและการใช้งานฮาร์ดแวร์ของ การควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมตรรกะคลุมเครือของระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ GA และการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก (Small-Signal Analysis) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความ น่าเชื่อถือของการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอัลกอลิทึม FL-MPPT โดยใช้ GA และการ วิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กในการออกแบบ Fuzzy rules ผลการศึกษาระบบสามารถติดตามจุดจ่าย กำลังสูงสุดได้เร็ว

Muamer M. Shebani และคณะ [38] นำเสนอการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิ ทึม FSCC และอัลกอลิทึม FOCC งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบความแม่นยำในการติดตามจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่าง FSCC กับ FOCC ซึ่งผลการทดสอบ FSCC มีความแม่นยำสูงกว่า FOCC

Farhad Khosrojerdi และคณะ [39] นำเสนออัลกอลิทึมการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด แบบอิงตามระบบการอนุมาน Neuro-Fuzzy แบบปรับได้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อไม่ใช้ตัวตรวจจับกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วยอัลกอลิ ทึม INFIS-MPPT ผลการทดสอบระบบสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

Marco Balato และคณะ [40] นำเสนอการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบกระจาย (DMPPT) ที่ถูกปรับปรุงเพื่อติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการ ตรวจสอบการทดลองใต้สภาวะที่แผงถูกบังบางส่วน โดยมีวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาการถูกบัง บางส่วนซึ่งผลการทดสอบปรากฏว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูก บังบางส่วน

Yaoqiang WANG และคณะ [41] นำเสนอการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิทึม Practical Step-variation (PSV) มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลดเป็น อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของอัลกอลิทึมที่สามารถติดตาม จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว

Ruben B. Godoy และคณะ [42] นำเสนออัลกอลิทึม Artificial Neural Networks (ANN) เพื่อให้ตรงกับการตอบสนองแบบไดนามิกในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยไมโครอินเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมด้วย Droop-Controlled โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าขณะ เชื่อมต่อกับกริด ผลการทดสอบสามารถลดการกระเพื่อมขณะเชื่อต่อกับกริดได้

Manel Hammami และคณะ [43] นำเสนออัลกอริธึม Ripple Correlation Control (RCC) ในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบไฮบริดที่ได้รับการปรับปรุงสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อ กับกริดระบบเฟสเดียวโดยแหล่งจ่ายเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดการกระเพื่อม ของแรงดันและกระสไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อกับกริด ผลการทดสอบอัลกอลิทึมที่นำเสนอสามารถลดการ กระเพื่อมขณะเชื่อมต่อกับกริดได้เมื่อแสงมีการเปรี่ยนแปลงทันทีทันใด

Almas Shintemirov และคณะ [44] นำเสนอการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยระบบ ขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อติดตามดวงอาทิตย์แบบไม่ใช้ตัวตรวจจับ (sensorless) ด้วยวิธีการ ้คำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ล่วงหน้า ผลการทดสอบระบบสามารถติดตามดวงอาทิตย์ได้แต่มีข้อเสีย ้ คือต้นทุนที่สูงขึ้นและสูญเสียพลังงานบางส่วนในการขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Ping Yang และคณะ [45] นำเสนอวิธีการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์ แสงอาทิตย์แบบใหม่ด้วยวิธีการ Region Partition บนพื้นฐานของอัลกอลิทึม Variable Step-size INC ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้จุดด้อยของอัลกอลิทึมการรบกวนละสังเกต (INC) ในด้านการแกว่งรอบๆจุด ้จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลการทดสอบอัลกอลิทึมที่ถูกปรับปรุงสามารถลดข้อด้อยของอัลกอลิทึมการ รบกวนและสังเกตแบบเดิมได้

Ammar Ghalib Al-Gizi และ Sarab Jwaid Al-Chlihawi [46] น้ำเสนอการศึกษาอัลกอลิทึม การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัลกอลิทึมตรรกะคลุมเครือ (FLC) โดยเปรียบเทียบกับอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกต (P&O) และอัลกอลิทึมการเพิ่มความนำ (INC) ผล การทดสอบปรากฏว่าอัลกอลิทึมตรรกะคลุมเครือติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุด

#### 2.6 วงจรแปลงผันผลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter)

้วัตถุประสงค์ของวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงคือต้องการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดขณะที่แสงและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ทันทีทันใด ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพของพลังงานสูงสุด วงจรแปลงผันที่นิยมนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (DC-DC Boost converter) [47] ดังแสดงใน รูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดทบแรงดันไฟฟ้า

สมมติว่าวงจรแปลงผันทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่องในขณะที่กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ไม่เคยตกไปที่ศูนย์ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรแปลงผันสามารถพิจารณาจากการทำงานในสภาวะคง ้ตัว แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$V_{L(avg)}(t) = \frac{1}{T} \int_{t}^{t+t} V_{L}(t) dt$$
(2.8)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตภายใต้โหมดกระแสไฟฟ้าไหล แบบต่อเนื่องดังสมการที่ 2.9

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 \cdot D}$$
(2.9)

โดยที่ D คือรอบการทำงาน (Duty Cycle) ของสวิทซ์ หากรอบการทำงานเท่ากับศูนย์ แรงดัน เอาต์พุตของวงจรแปลงผันจะมีค่าต่ำสุดและจะเข้าสู่ระยะอนันต์เมื่อรอบการทำงานเปลี่ยนเป็นหนึ่ง พิจารณาวงจรแปลงผันกรณีไม่การสูญเสียเกิดขึ้นในวงจร ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$\frac{I_i}{I_o} = \frac{1}{1 \cdot D}$$
(2.10)

ระลอกคลื่นของกระแสเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11 โดยที่แรงดันไฟฟ้าตกคล่อม ตัวเหนี่ยวนำระหว่างที่สวิตช์ถูกปิด

$$V_{L} = L \frac{di}{dt}$$
(2.11)

สมมติให้ I<sub>L</sub> เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นดังนั้

$$V_{L} = \frac{L(I_{Lmax} - I_{Lmin})}{t_{on}} = \frac{L\Delta I_{L}}{t_{on}}$$
(2.12)

โดยที่ ∆เ∟ คือกระแสที่กระเพื่อมของกระแสเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันโดยที่

$$\Delta I_{L} = \frac{V_{i}D}{f_{sw}L}$$
(2.13)

การกระเพื่อมของแรงดันไฟขาออกของวงจรแปลงผันเกิดจากกระบวนการเก็บประจุและคาย ประจุของตัวเก็บประจุ เมื่อปิดสวิตช์ตัวเหนี่ยวนำจะเริ่มเก็บพลังงานและตัวเก็บประจุจะจ่ายกระแสไฟ ให้กับโหลด ในขณะที่สวิตช์เปิดอยู่พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำจะถ่ายโอนไปยังตัวเก็บประจุและ โหลด

การคำนวณระลอกแรงดันไฟขาออกของวงจรแปลงผันดังแสดงในสมการที่ 2.14

$$\Delta V_{c} = \frac{1}{C} \int_{0}^{t_{on}} I_{O} dt = \frac{I_{o}}{C} \int_{0}^{t_{on}} dt = \frac{I_{o} t_{on}}{C}$$
(2.14)

ดังนั้น
$$\Delta V_{\rm C} = \frac{I_{\rm o}D}{f_{\rm sw}C}$$
(2.15)

กระแสเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดถูกกำหนดโดยใช้ค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงของกระแส

$$I_{max} = I_{L} + \frac{\Delta i_{L}}{2} = \frac{V_{i}}{(1-D)^{2}R} + \frac{V_{i}DT}{2L}$$
(2.16)

$$I_{\min} = I_{L} - \frac{\Delta i_{L}}{2} = \frac{V_{i}}{(1-D)^{2} R} - \frac{V_{i} DT}{2L}$$
(2.17)

ตราบใดที่กระแสไฟเหนี่ยวนำเป็นบวกวงจรแปลงผันจะทำงานในโหมดต่อเนื่อง ดังนั้นขอบเขต ระหว่างกระแสเหนี่ยวนำต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องถูกกำหนดโดยสมการที่ 2.18

$$I_{\min} = 0 = \frac{V_i}{(1-D)^2 R} - \frac{V_i DT}{2L}$$
(2.18)

โดยในกรณีนี้

$$L \geq \frac{(1-D)^2 DR}{2f_{sw}}$$
(2.19)

ตัวเก็บประจุควรมีขนาดใหญ่พอที่จะจำกัดการกระเพื่อมของแรงดันไฟขาออก การคำนวณตัว เก็บประจุกรองดังสมการที่ 2.20

$$V_{\rm r} = \frac{\Delta V_{\rm C}}{V_{\rm C}} = \frac{I_{\rm o}D}{V_{\rm C}f_{\rm sw}C} = \frac{D}{Rf_{\rm sw}C}$$
(2.20)

ดังนั้น

$$\mathbf{C} \ge \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{Rf}_{sw}\mathbf{V}_{R}}$$
(2.21)

## 2.7 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

เพื่อให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดต้องเชื่อมต่อกับตัวแปลงผันกระแสตรง เป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) หรือ (DC-AC Converter) โดยใช้อัลกอริทึมดังที่กล่าวมาแล้ว ข้างต้นเพื่อติดตามและควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด ส่วนอื่นๆของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมและเซ็นเซอร์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าไปยังกริด ฟังก์ชัน พื้นฐานสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดทั้งหมด ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ผลรวมความ ผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ (Total Harmonic Didtortion: THD) การรบกวนของแรงดันไฟฟ้าในโครงข่าย การ แปรผันของแรงดันไฟในโครงข่าย [48] การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) และการตรวจจับการแรงงาบางส่วน การทำงานที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เป็น เอกภาพ (p.f.=1) ตามที่กำหนดโดยมาตรฐาน การตรวจจับแรงดันไฟที่รวดเร็วและการตรวจจับความถี่ที่ รวดเร็ว ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ถูกจำกัดและกำหนดโดยมาตรฐาน การติดตามจุดจ่ายกำลัง สูงสุดต้องมีประสิทธิภาพสูงมากในสภาวะคงตัว การติดตามอย่างรวดเร็วระหว่างการเปลี่ยนแปลงการ ฉายรังสีอย่างรวดเร็วและการทำงานที่เสถียรที่ระดับการฉายรังสีที่ต่ำมาก ปัจจุบันระบบเซลล์ แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือระบบแบบสแตนด์อะโลนและระบบที่เชื่อมต่อกับก ริด โดยทั่วไประบบแบบสแตนด์อโลนจะใช้ในระบบพลังงานต่ำเช่น การใช้งานในที่พักอาศัย ดังนั้นจึง จำเป็นต้องมีแบตเตอรีเพื่อเก็บพลังงานที่ผลิตโดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบที่เชื่อมต่อกับกริดเหมาะ อย่างยิ่งสำหรับการฉีดพลังงานสูงสุดที่ดึงมาจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังกริดแม้ว่าอุณหภูมิและ ระดับการแผ่รังสีจะเปลี่ยนไป อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดแบ่งออกเป็นขั้นตอนเดียว (Single-State) และสองขั้นตอน (Two-State) [49] ระบบสเตจเดียวเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างด้านอาเรย์และด้าน อินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ระบบสองขั้นตอนต้องใช้ตัวแปลง DC-DC เพื่อเชื่อมต่อเซลล์ แสงอาทิตย์เข้ากับด้านอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.18





องค์ประกอบที่สำคัญของระบบเซลล์แสงอาทิตย์คือระบบที่เชื่อมต่อกับกริด ระบบที่เชื่อมต่อ กับกริดเหมาะอย่างยิ่งสำหรับการฉีดพลังงานให้ได้มากที่สุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังกริด มีหลายวิธีใน การควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเช่นตัวควบคุมสัดส่วน-อินทิกรัล (PI) ตัวควบคุม สัดส่วน-เรโซแนนซ์ (PR) การควบคุมกระแสไฟแบบ PI ที่ใช้ในซิงโครนัสเฟรมมักใช้ในคอนเวอร์เตอร์สาม เฟส ในส่วนของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวความสามารถของคอนโทรลเลอร์แบบสัดส่วน-อินทิกรัลการ ติดตามการสัญญาณอ้างอิงนั้นถูกจำกัดและตัวควบคุมสัดส่วน-เรโซแนนซ์สามารถให้ประสิทธิรูปที่ดีขึ้น

### 2.8 ตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy logic)

ตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy logic: FL) คือการอัลกอลิทึมที่ออกแบบมาให้คอมพิวเตอร์สามารถใช้ เหตุผลที่คล้ายกับวิธีการใช้เหตุผลของมนุษย์ [50-52] ซึ่งต่างกับการตัดสินใจว่าถูกหรือผิด ซึ่งโดยปกติ คอมพิวเตอร์จะตัดสินใจว่าถูกหรือผิดส่วนมนุษย์ก็เช่นกันคำตอบส่วนใหญ่มักเป็นถูกหรือผิด แต่บางครั้ง คำตอบก็อาจจะอยู่ในรูปของค่าระดับเช่น น้อย ปานกลาง มาก ดังนั้นนี่คือที่มาของตรรกะคลุมเครือซึ่ง ข้อดีของตรรกะคลุมเครือคือ สามารถใช้จัดการกับความไม่แน่นอน (Uncertainly) สามารถพิจารณาถึง ระดับของความเป็นจริง (Degree of truth) และสามารถพิจารณาส่วนหนึ่งของสมาชิกที่อยู่ในเซต (Patial membership) หลักการออกแบบระบบควบคุมด้วยตรรกะคลุมเครือนิยมใช้หลักการของ ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายฟังก์ชันสมาชิกจะอยู่ในรูปของสมการทาง คณิตศาสตร์ซึ่งแสดงในรูปของกราฟ 2 มิติ

โดยที่

แกน X แทนขอบเขตที่เราสนใจเช่น น้อย ปานกลาง มาก แกน y แทนระดับความเป็นสมาชิก และรูปแบบกราฟิกที่ได้รับความนิยมดังแสดงในรูปที่ 2.19 คือ

- 1. ซึ่งเกิลตัน (Singleton)
- 2. สามเหลี่ยม (Triangular)
- 3. สี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal)
- 4. เกาส์เซียน (Gaussian)





**รูปที่** 2.19 รูปแบบของตรรกะคลุมเครือ (ก) ซิงเกิลตัน (ข) สามเหลี่ยม (ค) สี่เหลี่ยมคางหมู (ง) เกาส์เซียน



# 2.9 การคำนวณหาตำแหน่งในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตำแหน่งในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่าย พลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หากต้องการให้เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดต้องให้แผง หันเข้าหาดวงอาทิตย์และทำมุม 90° กับดวงอาทิตย์ตลอดเวลาซึ่งวิธีการนี้จำเป็นต้องมีระบบปรับ ตำแหน่งของแผงซึ่งมีต้นทุนที่สูงขึ้นและต้องสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งในการขับเคลื่อนแผง ดังนั้นการ คำนวณหาตำแหน่งในการติดตั้งแผงดังสมการที่ 2.17 ซึ่งจากสมการทำให้ได้ตำแหน่งในการติดตั้งดังรูป ที่ 2.21 เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงที่สุด





# บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือระบบควบคุมจุดจ่ายกำลังลังสุดโดยโหลดเป็น ความต้านทานและโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริด โดยในส่วนแรกใช้โปรแกรมแมทแลป ซิมมูลิงค์ (MATLAB-Simulink) ในการทดสอบเบื้องต้น โดยนำเอาอัลกอลิทึมที่ออกแบบมาเปลียบเทียบ กับอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิม ในส่วนที่สองทดสอบอัลกอลิทึมควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดกับอินเวอร์เตอร์ แบบทำนายล่วงหน้า โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมเพื่อแสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพของอัลกอลิทึมที่พัฒนาขึ้นซึ่งดีกว่าแบบดั้งเดิม

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 3.1.1 ศึกษาข้อมูลอัลกอริทึมแบบต่างๆที่ใช้ในการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด
- 3.1.2 ศึกษาข้อมูลอินเวอร์เตอร์แบบทำนายล่วงหน้า
- 3.1.3 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมแมทแลปซิมมูลิงค์
- 3.1.4 นำอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุดมาปรับปรุงและทดสอบโดยใช้โปรแกรมแมทแล็ป

ซิมมูลิงค์

3.1.5 นำอัลกอริทึมที่ปรับปรุงไปใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมจุดจ่ายกำลัง

สูงสุด

3.1.6 สรุปผลการทดลอง

#### 3.2 หลักการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด

หลักการของการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT) คือการดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงสุดตลอดเวลาเมื่อแสง อุณหภูมิและโหลดมีการ เปลี่ยนแปลง วิธีการดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงสุดมีหลายวิธีด้วยกันเช่นระบบติดตาม แสงอาทิตย์ซึ่งมีสองวิธีด้วยกันคือการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับแสงอาทิตย์ซึ่งวิธีนี้หากแสงอาทิตย์มีการ เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดเช่นมีเมฆบังก็จะทำให้ระบบไม่สามารถติดตามดวงอาทิตย์ได้และอีกวิธีคือการ คำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ล่วงหน้าระบบจะติดตามตำแหน่งที่คำนวณไว้ล่วงหน้าแต่มีข้อเสียคือ ถ้าหากเวลาในโปรแกรมที่ป้อนให้กับระบบควบคุมมีการผิดพลาดตำแหน่งก็จะผิดพลาดตามไปด้วยและ ยังมีต้นทุนที่สูงอีกทั้งยังต้องเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปกับการขับเคลื่อนแผงเพื่อติดตามดวงอาทิตย์ ซึ่ง ระบบนี้จะควบคุมให้แผงเซลแสงอาทิตย์ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์มากที่สุด หลักการพื้นฐานของการควบ ควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดคือให้จุดทำงานอยู่ตรงจุดโค้งหัวเข่า (MPP) ตามรูปที่ 3.1



**รูปที่ 3.**1 จุดจ่ายกำลังสูงสุด

ในปัจจุบันวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้แก่การตรวจจับจุดจ่ายกำลังสูงสุด(MPPT) ซึ่ง มีข้อดีคือไม่ส่วนที่เคลื่อนที่ทำให้ต้นทุนต่ำและพลังงานสูญเสียน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.2



**รูปที่ 3.2** การตรวจจับจุดจ่ายกำลังสูงสุด

หากมีระบบตรวจจับที่ดีก็จะทำให้กำลังเอาท์พุทอยู่ตรงจุดโค้งหัวเข่าตามการเปลี่ยนแปลงของ แสงอาทิตย์อยู่เสมอดังแสดงในรูปที่ 3.3





### 3.3 การทดสอบอัลกอลิทึมที่ถูกพัฒนากับโหลดความต้านทาน

3.3.1 วิธีควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการการควบคุมกระแสบนพื้นฐานวิธีรบกวนและการ สังเกตแบบขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ร่วมกับตรรกะแบบคลุมเคลือ (Current control best on variable step size Perturbation and Observation plus Fuzzy logic control: CCVP&O-FLC)



รูปที่ 3.4 การควบคุมการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าด้วยอัตราไม่คงที่

วิธีนี้จะทำงานเป็นคาบเวลา โดยใช้การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเซลแสงอาทิตย์ในเวลา ปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้านั้น โดยถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเป็นบวก ระบบจะปรับ กระแสไฟฟ้าไปในทิศทางเดิมแต่ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเป็นลบ ระบบก็จะปรับ กระแสไฟฟ้าไปในทิศทางตรงกันข้ามในอัตราตราที่ไม่คงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และตรรกะแบบ คลุมเคลือทำหน้าที่ควบคุมไม่ให้จุดจ่ายกำลังสูงสุดแกว่งบริเวณรอบจุดจ่ายกำลังสูงสุด บล๊อคไดอะแกรม วิธีควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการการควบคุมกระแสบนพื้นฐานวิธีรบกวนและการสังเกตแบบ ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ร่วมกับตรรกะแบบคลุมเคลือดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 บล็อคไดอะแกรมวิธีรบกวนและการสังเกตที่ถูกพัฒนา

3.3.2 วิธีการควบคุมกระแสด้วยวิธีการเพิ่มความนำแบบขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ร่วมกับ ตรรกะแบบคลุมเคลือ (Current control variable step size best on Incremental Conductance plus Fuzzy logic control: CCVINC-FLC) วิธีนี้ทำได้โดยการตรวจจับแรงดันและกระแสเอาต์พุตของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังเทียบกับแรงดันจาก สมการ dP/dV = I/V+dI/dV โดยที่ I/V คือค่าความนำของเซลแสงอาทิตย์ และ dI/dV คืออัตราการ เปลี่ยนแปลงความนำ มีค่าเป็นบวกแสดงว่าระบบทำงานด้านซ้ายของจุดจ่ายกำลังสูงสุดตัวระบบก็จะ ปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นขึ้น แต่ถ้าผลเป็นลบแสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านขวาของจุดจ่ายกำลังสูงสุด ระบบก็จะปรับกระแสไฟฟ้าลดลงลดลง แต่ถ้าผลรวมเท่ากับศูนย์แสดงว่าระบบทำงานที่จุดจ่ายกำลัง สูงสุด ระบบก็จะคงยังขับสวิตซ์ที่ให้กระแสไฟฟ้าคงเดิมไว้ บล๊อคไดอะแกรมถูกแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บล๊อคไดอะแกรมวิธีการเพิ่มความนำแบบที่ถูกพัฒนา

ตรรกะคลุมเครือดังตารางที่ 3.1 S M และ L คือขนาดของรอบการทำงาน (Duty cycle) เป็น ศูนย์ ขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ตามลำดับ N Z และ P คือการปรับของรอบการทำงานใน ทิศทางลบ (Negative) ตำแหน่งเดิม (Zero) และทิศทางบวก (positive) ตามลำดับ Err และ dErr คือ ค่าคลาดเคลื่อนของกระแสอ้างอิงและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าคลาดเคลื่อนของกระแสอ้างอิง ตามลำดับ

Err	N	Z	Р
dErr			
Ν	Z	Ζ	Z
Z	Z	Ζ	S
Р	S	Μ	L

ตารางที่ 3.1 กฎของตรรกะคลุมเครือ

ด้วยการใช้กฎของตรรกะคลุมเครือ ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของลอจิกตรรกะ คลุมเครือจะแสดงในรูปที่ 3.7 3.8 และ 3.9 ตามลำดับโดยขอบเขตของกระแสอ้างอิง (I<sub>ref</sub>) อัตราการ เปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิง (dI<sub>ref</sub>) และรอบการทำงาน (Duty cycle) ถูกกำหนดเป็น -20 ถึง 20, -1 ถึง 1 และ 0 ถึง 100 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ขอบเขตของกระแสอ้างอิง



**รูปที่ 3.9** รอบการทำงาน

3.3.3 วิธีการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการการควบคุมกระแสบนพื้นฐานวิธีรบกวนและ การสังเกตแบบร่วมกับการประมาณค่า (Estimate current control best on Perturbation and Observation) วิธีการนี้ใช้เซ็นเซอร์วัดแสงอาทิตย์เพื่อประมาณค่ากระแสอ้างอิงเริ่มต้นในการควบคุมจุด จ่ายกำลังสูงสุด ซึ่งมีข้อดีคือลดรอบการทำงานในช่วงเริ่มต้นทำให้ระบบติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เร็ว ขึ้น



รูปที่ 3.10 บล๊อคไดอะแกรมวิธีรบกวนและการสังเกตร่วมกับเทคนิคการประมาณค่าที่ถูกพัฒนา

โดยที่

- I<sub>refmax</sub> คือกระแสอ้างอิงสูงสุด
- I<sub>refmin</sub> คือกระแสอ้างอิงต่ำสุด
- I<sub>refinit</sub> คือกระแสอ้างอิงเริ่มต้น
- $\Delta \mathsf{I}_{\mathsf{ref}}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิง
- I<sub>ref</sub>(k) คือกระแสอ้างอิง ณ เวลาปัจจุบัน
- I<sub>ref</sub>(k-1) คือกระแสอ้างอิง ณ เวลาก่อนหน้า
- M คือค่าสัมบูรณ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาปัจจุบัน
- V<sub>pv</sub> (k) คือแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาปัจจุบัน
- V<sub>pv</sub> (k-1) คือแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาก่อนหน้า
- $\Delta V_{
  m pv}$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
- I<sub>pv</sub> (k) คือกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาปัจจุบัน
- I<sub>pv</sub> (k-1) คือกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาก่อนหน้า
- P<sub>pv</sub> (k) คือกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาปัจจุบัน
- P<sub>pv</sub> (k-1) คือกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาก่อนหน้า
- $\Delta \mathsf{P}_\mathsf{pv}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
- FLC คือตรรกะคลุมเครือ



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมการจำลองการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด

3.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอลิทึมที่ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรมแมทแลปซีมูลิงค์ ใดอะแกรมการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV panel) วงจร แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดัน (Boost converter) ชุดควบคุมจุดการ ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด (Maximum power point tracking: MPPT) และโหลดความต้านทาน (Resistive load)

3.3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอลิทึมที่ถูกพัฒนาในห้องปฏิบัติการ ไดอะแกรมการ ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.12 การทดสอบนี้เพื่อแสดงให้เห็นถูกประสิทธิภาพของอัลกอลิทึมที่ถูกพัฒนา เพื่อติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเมื่อแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ดังนั้นการทดสอบจึงใช้ชุด จำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Emulated PV source) และชุดควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลโดยการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากชุดจำลองเพื่อ คำนวนหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.12 ไดอะแกรมการทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด

#### 3.4 การทดสอบร่วมกับอินเวอร์เตอร์แบบทำนายล่วงหน้า

3.4.1 การทดสอบจุดจ่ายกำลังสูงสุดร่วมกับระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการทำนาย ค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้าดังแสดงในรูปที่ 3.13 ประกอบด้วย แผงแซลล์แสงอาทิตย์ (PV Panel) อินเวอร์เตอร์สามเฟส (Three phase Inverter) กริดสามเฟส (Three phase AC Grid) ชุดควบคุม และเซ็นเซอร์ (Controller and Sensor)





เทคนิคการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าถูกประยุกด์ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็น แนวทางเชิงทฤษฎีในการประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด [53-55] ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้าสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1. ตั้งค่าฟังก์ชันต้นทุนสมการ
- 2. สร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์และการออกแบบขับอุปกรณ์สวิตช์
- 3. สร้างแบบจำลองสำหรับการทำนาย



รูปที่ 3.14 บล๊อคไดอะแกรมเทคนิควิธีการการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าคือการจำกัดข้อผิดพลาดระหว่างกระแสที่วัด ได้กับกระแสอ้างอิง[56] ฟังก์ชันต้นทุนสามารถเขียนได้ในรูปของแกนตั้งฉาก การวัดค่าความผิดพลาด ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่วัดได้แสดงไว้ในสมการ 3.1

$$g = \left| i_{\alpha}^{*}(k+1) - i_{\alpha}^{p}(k+1) \right| + \left| i_{\beta}^{*}(k+1) - i_{\beta}^{p}(k+1) \right|$$
(3.1)

โดยที่

- $i^p_{lpha}\left(k{+}1
  ight)$  คือค่าจริง
- $i^p_{eta}(k+1)$  คือค่าจินตภาพ
- $i^p\left(k+1
  ight)$  คือค่าของโหลดเวกเตอร์
- $i^*_{lpha}\left(k{+}1
  ight)$  คือค่าจริงของกระแสอ้างอิง
- $i^*_{m{eta}}\left(k\!+\!1
  ight)$  คือค่าจินตภาพของกระแสอ้างอิง

ค่าของโหลดเวกเตอร์ถูกใช้เพื่อกำหนดเวกเตอร์แรงดัน กระแสที่คาดการณ์นี้ใช้สำหรับโมเดล โหลด หลักการทำนายกระแสของอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถกำหนดได้โดยแรงดันตกคร่อมและ แรงดันไฟฟ้าของกริด วงจรสมมูลของการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์

การทำนายกระแสโหลดในแบบจำลองที่ไม่ต่อเนื่องของแบบจำลองสามารถอธิบายได้โดย สมการ 3.2

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ri} + \mathbf{L} \frac{\mathbf{d}_i}{\mathbf{d}_t} + \mathbf{e}$$
(3.2)

โดยที่ v คือเวกเตอร์แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ i คือเวกเตอร์กระแสโหลดและ e คือ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ T<sub>s</sub> คือเวลาสุ่มตัวอย่าง แสดงในสมการ 3.3

$$\frac{d_i}{d_t} \approx \frac{i(k+1)-i(k)}{Ts}$$
(3.3)

โดยแทนสมการที่ 3.3 ลงในสมการที่ 3.2 ได้สมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.5

$$\mathbf{v}_{k} = \operatorname{Ri}(k) + L \frac{i(k+1) - i(k)}{\operatorname{Ts}} + e(k)$$
(3.4)

$$i(k+1) = \frac{T_s}{L}(v(k)-e(k)+i(k)\left(1-\frac{RT_s}{L}\right)$$
(3.5)

เทคนิคการทำนายล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) เหมาะสำหรับระบบที่ไม่เป็น เชิงเส้น สามารถควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยการวัดค่ากระแสจากระบบและคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า ของระบบที่เวลาล่วงหน้า (t+1) จากนั้นประมาณค่าจากเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับแรงดันจนครบทุกเวกเตอร์และสร้างสัญญาณขับอินเวอร์เตอร์ที่มีความสอดคล้องและ ถูกต้องตรงตามสถานะของการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เทคนิคการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

อัลกอลิทึมทำนายค่ากระแสไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้ในการควบคุมการฉีดกระแสไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านอินเวอร์เตอร์เข้าสู่กริด การสร้างสัญญาณขับอินเวอร์เตอร์มีหลักการทำงานคือ เซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จากนั้น แปลงจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นระบบ 2 แกนดังแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ i\*(k) เพื่อให้ระบบสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด (MPPT) เมื่อแสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง สัญญาณกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (i\*(ref)) ถูกควบคุมโดยอัลกอลิทึมควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยการ ควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงระบบ 2 แกน คือ i\*(d) และ i\*(q) เพื่อให้กำลังไฟฟ้าต้านกลับเป็นศูนย์จึง กำหนดให้ i\*(q) เท่ากับศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 3.19



**รูปที่ 3.18** การแปลงจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นระบบ 2 แกน



จากหลักการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าที่อธิบายในเบื้องต้น เมื่อทราบค่าเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ดับ ทำให้สามารถสร้างสัญญาณขับอินเวอตอร์ได้อย่างถูกต้องในแต่ละรอบของการทำนายค่า กระแสไฟฟ้า การวิเคราะห์แรงดันเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สามารถแสดงแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ เพื่อเชื่อมต่อกับกริดแบบ สมมาตรและจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กริด สัญญาณขับเกตของอินเวอร์เตอร์ถูกแทนด้วยสถานะทำงานของ สวิตช์แบบ 2 สถานะ คือ เปิด (on) และ ปิด (off) (Si1, Si2: i = a, b, c) เมื่อ a, b, c คือลำดับเฟส ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส สัญญาณขับเกตของอินเวอเตอร์ดังสมการที่ 3.6

$$S = \frac{2}{3} \left( S_{a} + aS_{b} + a^{2}S_{c} \right)$$
(3.6)

เมื่อ a=e<sup>(j2π/3)</sup> หากสัญญาณขับเกตมีสถานะเปิด Si1 ถูกแทนค่าด้วย 1 และหาก Si2 มีสถานะ ปิดถูกแทนค่าด้วย 0 จะได้สมการเอาท์พุตในรูปของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ 3.7

$$V = \frac{2}{3} \left( V_{an} + a V_{bn} + a^2 V_{cn} \right)$$
(3.7)

เมื่อ V<sub>an</sub> V<sub>bn</sub> และ V<sub>cn</sub> คือแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟส เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับถูกกำหนดโดยสมการที่ 3.7 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าถูกแสดงดังรูปที่ 3.20 ซึ่งสัมพันธ์กับ การเชื่อมต่อกับกริด สถานะสัญญาณขับเกตของอินเวอร์เตอร์แสดงดังสมการที่ 3.8

$$V(S_{a}, S_{b}, S_{c}) = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left(S_{a} + S_{b} e^{\frac{j2\pi}{3}} + S_{c} e^{\frac{j4\pi}{3}}\right)$$
(3.8)

เมื่อ V<sub>dc</sub> คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์



ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามารถแทน ด้วยสมการที่ 3.9

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{\rm dc} \bullet \mathbf{S} \tag{3.9}$$

การแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการใช้สมการทาง คณิตศาสตร์ สามารถสรุปเป็นสมการเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าและสัญญาณขับเกตแสดงดังตารางที่ 3.2

		สัญญาณขับเกต			
r 111raig 1	สมบาวตวงผนเพพ.เฉ.เออบ	Sa	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>	
0	200	20	0	0	
1	(2/3) V <sub>dc</sub>	1	0	0	
2	((1/3)V <sub>dc</sub> )+(j(sqrt(3)/3)V <sub>dc</sub> )	1	1	0	
3	((-1/3)V <sub>dc</sub> )+(j(sqrt(3)/3)V <sub>dc</sub> )	0	1	0	
5	((1/3)V <sub>dc</sub> )-(j(sqrt(3)/3)V <sub>dc</sub> )	0	0	1	
6	((-1/3)V <sub>dc</sub> )-(j(sqrt(3)/3)V <sub>dc</sub> )	1	0	1	
7	0	1	1	1	

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขับเกตและแรงดันไฟฟ้า

3.4.2 การแปลงแกนและการสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิง การแปลงเวกเตอร์แรงดันและ กระแสไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้อยู่ในรูปแบบ 2 เฟส (abc-αβ)ประกอบไปด้วยแกนจริงและ แกนจินตภาพซึ่งทำมุมห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ถูกนำมาใช้เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จากการ วิเคราะห์สมการทางไฟฟ้าในวงจรระบบไฟฟ้า 3 เฟส ของอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับกริด ดังรูปที่ 3.13 แทนด้วย αβγ แสดงดังสมการที่ 3.10

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$
(3.10)

เมื่อ  $\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_b$  และ  $\mathbf{X}_c$ คือเอาท์พุตของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 เฟส และ  $\mathbf{T}_{_{\alpha\beta\gamma}}$ ดังสมการที่ 3.11

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$
(3.11)

นำสมการเวกเตอร์ 3 มิติ แทนด้วยเวกเตอร์พื้นฐานดังสมการที่ 3.12 ในรูปแบบของการ



แทนค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดฉากด้วยเวกเตอร์ดังสมการที่ 3.13

แปลงแกน  $T_{_{\alpha\beta\gamma}}$ 

$$\begin{bmatrix} 1\\ -\frac{1}{2}\\ -\frac{1}{2}\\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0\\ \frac{\sqrt{3}}{2}\\ -\frac{\sqrt{3}}{2}\\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\\ \frac{1}{2}\\ \frac{1}{2}\\ \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$
(3.13)

นำสมการที่ 3.13 แทนในสมการที่ 3.14 เมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตร โดยที่  $X_a + X_b + X_c = 0$  และ  $X_{\gamma} = 0$  นั่นคือระบบไฟฟ้า 3 เฟส ถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ 2 เฟสใน ระบบ  $X_a, X_\beta$  โดยที่  $X_{\gamma} = 0$ 

$$\begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{b} \\ x_{c} \end{bmatrix}$$
(3.14)

การแปลงกลับของเวกเตอร์ αβ-abc ดังสมการที่ 3.15 Γ Γ

$$\begin{bmatrix} x_{a} \\ x_{b} \\ x_{c} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \end{bmatrix}$$
(3.15)



**รูปที่ 3.21** แบบจำลองการแปลงแกน abc เป็น lphaeta

จะเห็นได้ว่าการแปลงแกนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีความสอดคล้องกับกรอบอ้างอิ่งในระบบ 2 เฟส สามารถแปลงกลับได้ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าสมมาตร ดังสมการที่ 3.14 และ สมการที่ 3.15 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการจำลองการจาก abc เป็นสัญญาณ αβ ดังรูปที่ 3.21 และ 3.22 ตามลำดับ



ร**ูปที่ 3.22** ผลการจำลองการแปลงจาก abc เป็นสัญญาณ αβ

3.43 การสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิง แบบจำลองการสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ แสดงดัง รูปที่ 3.23





รูปที่ 3.23 แบบจำลองการสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิง

กระแสไฟฟ้าอ้างอิงในระบบไฟฟ้า 3 เฟส (abc)เมื่อแปลงให้อยู่ในรูปแบบ 2 แกน(αβ)ถูก แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าจากการแปลงแกน

3.44 สมการแบบจำลองโหลดและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด แหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบไปด้วยโหลดหรือภาระทางไฟฟ้าสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลง กระแสไฟฟ้าของโหลดเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสมการการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองของโหลดได้ดัง สมการที่ 3.16

$$\mathbf{v}_{aN} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_{a}}{d_{t}} + \mathbf{R}\mathbf{i}_{a} + \mathbf{e}_{a} + \mathbf{v}_{nN}$$

$$\mathbf{v}_{bN} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_{b}}{d_{t}} + \mathbf{R}\mathbf{i}_{b} + \mathbf{e}_{b} + \mathbf{v}_{nN}$$

$$\mathbf{v}_{cN} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_{c}}{d_{t}} + \mathbf{R}\mathbf{i}_{c} + \mathbf{e}_{c} + \mathbf{v}_{nN}$$
(3.16)

เมื่อ R คือค่าความต้านทานของโหลด และ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของโหลด นำสมการที่ 3.11 แทนค่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะลงในสมการจะได้



รูปที่ 3.25 หลักการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าจากเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.25 ภาพขยายแสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าในรูปแบบการแปลง แกนที่ตำแหน่ง i∝ ประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (i\*) หรือ i<sub>ref</sub> , กระแสไฟฟ้าจริง (i) หรือ ik และ กระแสไฟฟ้าที่ทำนายค่าได้ (i<sup>p</sup>) หรือ i(k+1) จากการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าในตำแน่งที่สถานะของการ ทำงานของสัญญาณขับเกตไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ให้ทำงานในตำแหน่งที่ถูกต้อง สอดคล้องกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า ∨(k)

3.46 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับด้วยระบบทางคณิตศาสตร์ ถูกสร้างด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 3.26 จากภาพแบบจำลองประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส กริด 3 เฟส เซ็นเซอร์แรงดันและกระแสไฟฟ้า ชุดแปลงแกนในระบบ 3 เฟสให้อยู่ ในรูปแบบ 2 เฟส ชุดควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดและชุดทำนายค่ากระแสไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าของระบบเพื่อใช้ในการคำนวณและทำนายค่ากระแสไฟฟ้าตลอดจน สร้างสัญญาณขับอินเวอร์เตอร์ ไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้าและ ควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดอยู่ในรูปแบบของ M-File ดังรูปที่ 3.27 และ 3.28 ตามลำดับ





รูปที่ 3.26 แบบจำลองวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 2 ระดับ



รูปที่ 3.27 การเขียนโปรแกรมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.28 การเขียนโปรแกรมการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุด

## 3.5 การทดสอบความเป็นไปได้ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

ตำแหน่งในการติดตั้งแสงอาทิตย์จำเป็นต้องคำนวณหามุมในการติดตั้งซึ่งประเทศไทยทิศทางที่ เหมาะสมคือหันไปทางทิศใต้และทำมุมประมาณ 14 องศา ถึง 15 องศา เนื่องจากในประเทศไทยนั้น หลังคาบ้านส่วนใหญ่เป็นทรงปั้นหยาที่ออกแบบมาเพื่อสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศ ปัญหาของหลังคา ทรงปั้นหยานั้นไม่สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สอดคล้องกับตำแหน่งการโคจรของดวงอาทิตย์ ได้ทุกจุดดังแสดงในรูปที่ 3.29 ทำให้เสียพื้นที่ไปส่วนหนึ่งดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษา การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาทรงปั้นหยาในตำแหน่งที่ไม่สอดคล้องกับการโคจรของดวง อาทิตย์ โดยโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับกริดโดยมีระบบติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอดจนรุ่น และขนาดเดียวกันเพื่อทดสอบการติดตั้งบนหลังคาในตำแหน่งทิศเหนือ ทิศตะวันออกและในทิศใต้ซึ่ง สอดคล้องกับการโคจรของดวงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.29 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาทรงปั้นหยา


(ป)



(ค)

**รูปที่ 3.30** ตำแหน่งติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ทิศเหนือ (ข) ทิศใต้ (ค) ทิศตะวันออก-ตะวันตก

เพื่อพิสูจน์ถึงผลจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งดำเนินการโดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในตำแหน่งที่ไม่สอดคล้องกับการโคจรของดวงอาทิตย์ในทิศเหนือและทิศตะวันออก-ตะวันตก เพื่อนำผล ที่ได้มาเปรียบเทียบกับการติดตั้งในทิศใต้ซึ่งเป็นทิศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทย



# บทที่ 4 การทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

### 4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดและอินเวอร์เตอร์ที่ถูกออกแบบไว้ใน บทที่ 3 การทดสอบจะกำหนดตามขอบเขตของงานวิจัยคือ ทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของอัล กอลิทึมที่นำเสนอโดยเปลียบเทียบกับอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมเมื่อโหลดเป็นความต้านตานโดยที่แสง เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดและทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของอัลกอลิทึมที่นำเสนอโดยเปลียบ เทียบกับอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมเมื่อโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด โดยในการทดสอบ กำหนดให้แสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

## 4.2 การทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน

4.2.1 การทดสอบด้วยการจำลอง

การทดสอบด้วยการจำลองจะทำการทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดโดยใช้ MATLAB/Simulink ในการจำลองโดยมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดทบแรงดัน (DC-DC boost converter) ทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลดและมีอัลกอลิทึมควบคุม จุดจ่ายกำลังสูงสุดทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุม จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ วงจรแปลงผันแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ การทดสอบเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์มีการ เปลี่ยนแปลงจาก 600 W/m<sup>2</sup> เป็น 1,000 W/m<sup>2</sup> และลดลงเป็น 900 W/m<sup>2</sup> ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ข้อมูลจำเพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ขนาด
แรงดันไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุด (V <sub>mpp</sub> )	29 V
กระแสไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุด (I <sub>mpp</sub> )	7.35 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (I <sub>sc</sub> )	7.84 A
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V <sub>sc</sub> )	36.3 V
กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิมาตรฐาน	213.15 W
จำนวนสตริงที่ต่อขนาน	1
จำนวนโมดูลที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมต่อสตริง	8

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผัน

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผัน	ขนาด
ความถี่ของสัญญาณขับ (f <sub>sw</sub> )	20 kHz
ตัวเก็บประจุด้านอินพุต (C <sub>in</sub> )	100 <b>µ</b> F
ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต (C <sub>o</sub> )	280 <b>µ</b> F
ตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุต (L <sub>in</sub> )	420 mH



รูปที่ 4.1 ระดับแสงที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากภาพแสดงให้เห็นว่าวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมสามารถติดตามจุดจ่าย กำลังสูงสุดได้เมื่อแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อด้อยคือมีการแกว่ง ของกำลังไฟฟ้ารอบๆ จุดจ่ายกำลังสูงสุดซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปบางส่วน ประสิทธิภาพการ ติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพยังอยู่ในระดับที่สูง



รูปที่ 4.2 ผลการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม

<sup>4.2.1.1</sup> การทดสอบด้วยอัลกอลิทึมรบกวนและสังเกต



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดังเดิมดัง รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ภาพขยายแสงให้เห็นชัดเจนว่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวิธีการนี้มีการ กระเพื่อมอย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีการแกว่งรอบๆ จุดจ่าย กำลังสูงสุดซึ่งเป็นข้อเสียของวิธีการแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.5 กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.6 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอ



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของวิธีการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอ

เมื่อพิจารณาการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธิการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอดังรูปที่ 4.6 จะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าในสภาวะคงตัวไม่มีการแกว่งรอบๆจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังนั้นทำให้ ประสิทธิภาพของการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในระดับที่สูงดังแสดงในรูปที่ 4.7

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะสังเกตุเห็นได้ชัดเจนว่าไม่มีการกระเพื่อม ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวิธีการรบกวนและสังเกตของวุธีการที่นำเสนอดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการรบกวนและสังเกตที่นำเสนอ





เมื่อเปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดระหว่างวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมกับ วิธีการที่นำเสนอจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมนั้นมีการแกว่งรอบๆ จุด จ่ายกำลังสูงสุดสูงมากดังแสดงในรูปที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดระหว่างวิธีการรบกวนและสังเกต แบบดั้งเดิมกับวิธีการที่นำเสนอดังรูปที่ 4.11 วิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบดั้งเดิมอย่าง ชัดเจน









4.2.1.2 การทดสอบด้วยอัลกอลิทึมการเพิ่มความนำ

การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีการเพิ่มความนำดังแสดงในรูปที่ 4.12 จาก ภาพขยายจะเห็นได้ชัดเจนว่ามีการแกว่งบริเวณรอบๆ จุดจ่ายกำลังสูงสุดเช่นเดียวกับวิธีการรบกวนและ สังเกตซึ่งเป็นข้อเสียของทั้งสองวิธีการดังกล่าวอันนำไปสู่การสูญเสียกำลังไฟฟ้าแต่อย่างไรก็ตาม

ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีการเพิ่มความนำก็ยังอยู่ในระดับที่สูงดังแสดงใน รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มความนำ



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของวิธีการเพิ่มความนำ

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวิธีการเพิ่มความนำดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะ สภาวะคงตัวซึ่งเป็นข้อเสียของวิธีการเพิ่มความนำอันนำไปสู่การแกว่งของกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์รอบๆจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด









เมื่อเปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดระหว่างวิธีเพิ่มความนำกับวิธีการที่นำเสนอดังรูป ที่ 4.16 จากภาพขยายแสดงให้เห็นว่าขณะสภาวะคงตัววิธีการเพิ่มความนำมีการแกว่งรอบๆ จุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างชัดเจนในขณะที่วิธีการที่นำเสนอไม่มีการแกว่ง

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดระหว่างวิธีการเพิ่มความนำกับวิธีการที่ นำเสนอดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงกว่า



**รูปที่ 4.16** เปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดระหว่างวิธีเพิ่มความนำกับวิธีการที่นำเสนอ



**รูปที่ 4.17** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดระหว่างวิธีเพิ่มความนำกับวิธีการที่ นำเสนอ

### 4.2.2 การทดสอบระบบติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด

เพื่อทดสอบระบบติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมที่นำเสนอในห้องปฏิบัติการ ด้วยแหล่งจ่ายแสงอาทิตย์เทียมรุ่น SM300-10D PV และแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่สามารถโปรแกรมได้รุ่น SM300-20 โดยใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดทบแรงดันเป็นอุปกรณ์ในการเชื่อมโยงระหว่าง แหล่งจ่ายและโหลดโดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4VGA เป็นอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งมีข้อมูลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และส่วนประกอบต่างๆ ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยการทดสอบ ด้วยอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตเปรียบเทียบกับอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตที่พัฒนาขึ้นเพื่อ ศึกษาพฤษติกรรมการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อแสงเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจาก 1,000 W/m<sup>2</sup> เป็น 600 W/m<sup>2</sup>

4	1	9	6	6	<b>A</b> (0	
ตารางท 4.3	คาพาร′	ามเตอ	วรของเ	ซลลแสงส	อาทตยจาล	ାତଏ

ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง	ขนาด
์ แรงดันไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V <sub>mpp</sub> )	230 V
กระแสไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I <sub>mpp</sub> )	3 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (I <sub>sc</sub> )	4 A
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V <sub>sc</sub> )	245 V



รูปที่ 4.18 การทดสอบระบบติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด

4.2.1.1 การทดสอบระบบการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมรบกวนและสังเกต ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการ จำลองซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมนั้นมีข้อเสียคือติดตามจุดจ่าย กำลังสูงสุดได้ช้า มีการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลังสูงสุดและมีการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้าในช่วงสภาวะคงตัว โดยที่เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด เท่ากับ 216 มิลลิวินาที และกำลังไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุดเท่ากับ 606.567 วัตต์ ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้า สูงสุด 87.97 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบระบบติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกต



รูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าและการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีการรบกวนและสังเกต

4.2.1.2 การทดสอบระบบการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมรบกวนและสังเกต ที่พัฒนา

ผลการทดสอบระบบการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมรบกวนและ สังเกตที่ถูกพัฒนาดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวิธีการติดตามจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกพัฒนาขึ้น จากภาพจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไม่มีการกระเพื่อมของกระแสและ แรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว ตลอดจนไม่มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้ารอบจุดจ่ายกำลังสูงสุด เมื่อพิจารณา เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดจะเห็นได้ชัดเจนว่าเท่ากับ 146 มิลลิวินาที ซึ่งไวกว่าวิธีการแบบ ดั้งเดิม เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุดมีค่าเท่ากับ 690.67 วัตต์ ประสิทธิภาพการติดตาม จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม



**รูปที่ 4.21** ผลการทดสอบระบบติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตที่ถูก พัฒนา



รูปที่ 4.22 กำลังไฟฟ้าและการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีการรบกวนและสังเกตที่ถูกพัฒนา

## 4.3 การทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์

การทดสอบการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด โดยใช้โปรแกรมแมทแลป/ซิมมูลิงในการทดสอบโดยใช้อัลกอลิทึมการทำนายล่วงหน้า (Model predictive control: MPC) ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กริดโดยใช้อัลกอลิทึมการประมาณ การกระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนพื้นฐานวิธีการรบกวนและการสังเกต (Estimation current control perturbation and observation: ECC-P&O) อัลกอลิทึมการควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนพื้นฐาน วิธีการรบกวนและสังเกต (Current control perturbation and observation: CC-P&O) และอัลกอลิ ทึมการควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงด้วยวิธีการเพิ่มความนำร่วมกับตรรกะคลุมเครือ (Modified current control increment conductance fuzzy logic control: MCC-INC-FLC) โดยที่อินเวอร์ที่เชื่อมต่อ กับกริดเป็นแบบขั้นตอนเดียว (Single-state grid-connected inverter) ซึ่งไม่มีวงจรแปลงผันไฟฟ้า กระแสตรงในการควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.2.1 การทดสอบด้วยอัลกอลิทึมการประมาณการกระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนพื้นฐานรบกวนและ การสังเกต

วิธีการนี้ใชหลักการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมการ ติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นฐานวิธีการรบกวนและสังเกต โดยการ วัดแสงอาทิตย์เพื่อประมาณค่ากระแสอ้างอิงเริ่มต้นในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลการ ทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมสองอัลกอลิทึมได้แก่การควบคุมกระแสอ้างอิง บนพื้นฐานของวิธีการควบคุมและสังเกตแบบดั้งเดิมและการควบคุมกระแสอ้างอิงบนพื้นฐานของวิธีการ เพิ่มความนำแบบดั้งเดิม ข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 4.3 และการ เปลี่ยนแปลงของระดับแสงที่ใช้ในการทดสอบเป็น 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร 200 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.23

<b>ตารางที่ 4.4</b> ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	
ข้อมูลจำเพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ขนาด
แรงดันไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุด (V <sub>mpp</sub> )	54.7 V
กระแสไฟฟ้า ณ จุดจ่ายกำลังสูงสุด (I <sub>mpp</sub> )	5.76 A
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (I <sub>sc</sub> )	6.14 A
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V <sub>sc</sub> )	64.64 V
กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิมาตรฐาน	315.072 W
จำนวนสตริงที่ต่อขนาน	2
จำนวนโมดูลที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมต่อสตริง	8



1

รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงของระดับแสงที่ใช้ในการจำลอง





ร**ูปที่ 4.24** การเปรียบเทียบการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด (ก) การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (ข) 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร (ค) 200 วัตต์ต่อตารางเมตร (ง) 500 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากผลการจำลองดังรูปที่ 4.24(ก) สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัลกอลิทึมการประมาณการ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนพื้นฐานวิธีการรบกวนและการสังเกตที่นำเสนอติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เร็ว ที่สุดและเมื่อพิจารณารูปที่ 4.24(ข) ซึ่งเป็นช่วงที่ระดับพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 1,000 วัตต์ต่อตาราง เมตร วิธีการที่นำเสนอนั้นไม่มีการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลังสูงสุด เมื่อพิจารณาที่ระดับพลังงานแสงอาทิตย์ ลดลงเป็น 200 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังรูปที่ 4.24(ค) วิธีการที่นำเสนอมีการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลังไฟฟ้า สูงสุดน้อยที่สุดและเมื่อระดับพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มเป็น 500 วัตต์ต่อตารางเมตรอย่างทันทีทันใดดังรูป ที่ 4.24(ง) วิธีการที่นำเสนอติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุดและมีการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลัง สูงสุดน้อยที่สุด



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าอ้างอิง



จากรูปที่ 4.25 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อระดับพลังงานแสงอาทิตย์มีการเปรี่ยนแปลง



เมื่อเปรียบเทียบกระแสฟ้าที่จ่ายสู่ดังรูปที่ 4.26 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัลกอลิทึมที่นำเสนอ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้รวดเร็วที่สุด เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าอัลกอลิ ้ทึมที่นำเสนอไม่มีการผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ซึ่งต่างจากอัลกอลึมทึมแบบดั้งเดิมที่มีการผิดเพี้ยน ของรูปคลื่นไปจากสัญญาณไซน์เมื่อระดับพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในระดับต่ำ



รูปที่ 4.27 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของดังแสดงในรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของอัลกอลิ ้ทึมการทำนายล่วงหน้าที่สามารถควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กริดซึ่งสามารถควบคุมตัวประกอบ ้กำลังของอินเวอร์เตอร์ให้เท่ากับ 1 โดยผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังกริด ้ดังแสดงในรูปที่ 4.28 จากภาพแสดงให้เห็นว่าขณะสภาวะคงตัวอัลกอลิทึมที่นำเสนอมีผลรวมความ ผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ต่ำที่สุดและอยู่ในระดับที่ไม่เกินค่ามาตรฐาน



รูปที่ 4.28 ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้า





ผลการจำลองการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน (1,000 วัตต์ต่อ ตารางเมตร 25 องค์ศาเซลเซียส) ดังแสดงในรูปที่ 4.29 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัลกอลิทึมที่นำเสนอ สามารถติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วที่สุดตลอดจนมีการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด น้อยที่สุด โดยที่อัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้า สูงสุดเท่ากับ 70 มิลลิวินาที ในขณะที่อัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับปรุงใช้เวลาในการ ติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 16 มิลลิวินาที

ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของอัลกอลึมทึมที่นำเสนอซึ่งมีค่าผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์อยู่ใน ระดับต่ำที่สุด โดยที่ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมเท่ากับ 1.841 เปอร์เซ็นต์ และอัลกอลิทึมที่นำเสนอเท่ากับ 1.812 เปอร์เซ็นต์ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน ดังรูปที่ 4.31 เป็นที่แน่ชัดว่าประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอัลกอลิทึมที่นำเสนอ อยู่ในระดับที่สูงที่สุด โดยที่อัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมเท่ากับ 87.97 เปอร์เซ็นต์ และอัลกอลิทึมที่นำเสนอ เท่ากับ 99.43 เปอร์เซ็นต์



ร**ูปที่ 4.30** ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน 1,000 วัตต์ต่อ ตารางเมตร 25 องค์ศาเซลเซียส



**รูปที่ 4.31** ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน 1,000 วัตต์ต่อ ตารางเมตร 25 องค์ศาเซลเซียส

4.2.2 การทดสอบด้วยอัลกอลิทึมการควบคุมกระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนพื้นฐานการเพิ่มความนำ ร่วมกับตรรกะคลุมเครือ

วิธีการนี้ใช้หลักการควบคุมกระแสอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ด้วยอัลกอลิทึมการเพิ่มความ นำร่วมกับตรรกะคลุมเครือโดยช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงไม่คงที่ (Variable step size) เพื่อ ควบคุมการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่พลังงานแสงอาทิตย์มีการ เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดดังรูปที่ 4.32 โดยใช้อัลกอลิทึมการทำนายกระแสไฟฟ้าล่วงหน้าในการควบคุม กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริด เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 1,000 300 และ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ผลการจำลองการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์มีการเปรี่ยนแปลง ทันทีทันใดดังแสดงในรูปที่ 4.33(ก) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัลกอลิทึมที่นำเสนอติดตามจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รวดเร็วกว่าอัลกอลึมแบบดั้งเดิม รูปที่ 4.33(ข) แสดงให้เห็นถึงการติดตามจุดจ่าย กำลังสูงสุดของวิธีการที่นำเสนอขณะพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารรางเมตร ซึ่งติดตาม จุดจ่ายกำลังสูงสุดได้รวดเร็วกว่าวิธีการดั้งเดิม เมื่อพลังงานแสงเปลี่ยนแปลงทันที่ทันใดเป็น 300 และ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังรูปที่ 4.33(ค) และ 4.33(ง) เห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถ ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้เร็วกว่าวิธีการดั้งเดิม



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง





**รูปที่ 4.33** ผลการจำลองการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (ก) เปรียบเทียบผลการจำลอง (ข) 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร (ค) 300 วัตต์ต่อตารางเมตร (ง) 500 วัตต์ต่อตารางเมตร



เมื่อเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าอ้างอิงระหว่างอัลกอลึทึมที่นำเสนอกับอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมดัง รูปที่ 4.34 อัลกอลิทึมที่นำเสนอนั้นทำให้กระแสอ้างอิงลู่เข้าสู่กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ รวดเร็วกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน





รูปที่ 4.35(ก) และ 4.35(ข) แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของอัลกอลิทึมที่นำเสนอในควบคุมการ จ่ายกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่กริดได้รวดเร็วกว่าวิธีการดั้งเดิมรวมถึงรูปคลื่นของ กระแสไฟฟ้าของอัลกอลิทึมที่นำเสนอมีความผิดเพื้ยนน้อยกว่าวิธีการดั้งเดิมและผลการจำล<sup>้</sup>องแสดงให้ เห็นถึงผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของอัลกอลึมทึมทั้งสองซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้า





การทดสอบผลตอบสนองของอัลกอลิทึมที่นำเสนอต่อการเปรี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่าง ทันทีทันใดดังแสดงในรูปที่ 4.37 ผลการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง อย่างทันทีทันใดดังแสดงในรูปที่ 4.38 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่ออุณหภูมลดลงอย่างทันทีทันใดนั้นอัล กอลึมทึมที่นำเสนอสามารถควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ดีกว่าอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมรวมทั้ง สามารถติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าได้รวดเร็วและแม่นยำกว่าอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาผลรวมความผิดเพี้ยนของผลรวมฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าเห็นได้ชัดเจนว่าอัลกอ ลิทึมทั้งสองนั้นทำให้มีผลรวมความผิดเพี้ยนของฮามอนิกส์อยู่ในระดับที่ต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38 การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง





เมื่อทดสอบโดยการจำลองในสภาวะแวดล้อมมาตรฐานที่ระดับของพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องค์ศาเซลเซียส เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัลกอลิทึมที่ นำเสนอติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่าอัลกอลิทึมแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.40

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะสภาวะคงตัวอัลกอลิทึม ทั้งสองมีประสิทธิรูปที่ไกล้เคียงกันมากดังแสดงในรูปที่ 4.41 ในขณะที่ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ ของกระแสไฟฟ้าของอัลกอลิทึมทั้งสองอยู่ในระดับที่ต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.42

ผลจากการจำลองพบว่าอัลกอลิทึมการเพิ่มความนำที่ถูกปรับปรุงใช้เวลาในการติดตามจุดจ่าย กำลังไฟฟ้าสูงสุด 20 มิลลิวินาที ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 97.89 เปอร์เซ็นต์ ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์เท่ากับ 2.036 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัลกอลิทึมการเพิ่มความ นำแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 160 มิลลิวินาที ประสิทธิภาพการ ติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 99.85 เปอร์เซ็นต์ ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์เท่ากับ 1.79 เปอร์เซ็นต์



**รูปที่ 4.40** การติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน



รูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน



รูปที่ 4.42 ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน

## 4.4 การทดสอบเมื่อติดตั้งบนหลังคาในทิศทางต่างๆ

การดำเนินการวิจัยในส่วนนี้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์รวมถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดและรุ่น เดียวกันและติดตั้งในหมู่บ้านเดียวกันเพื่อให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไกล้เคียงกันมากที่สุดดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 โดยการดำเนินการเก็บผลตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 จนกระทั่งถึงเดือนมิถุนายน 2563 ดัง แสดงในตารางที่ 4.5

### ตารางที่ 4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	ขนาด	จำนวน	
เซลล์แสงอาทิตย์	350 W/แผง	30 แผง	
อินเวอร์เตอร์	5 kW	1 ตัว	

ตำแหน่งในการติดตั้ง	ผลที่ได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)						
	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	ນີ.ຍ	ຽວນ
ทิศเหนือ	418.7	484.8	501.8	466.8	549.4	397.9	2819.4
ทิศใต้	716.2	677.9	805.5	646	605	510	3960.6
ทิศตะวันออก-ตะวันตก	582.4	591.1	520.2	533.9	340.4	302.9	2852.9

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 4.43 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการติดตั้ง ในตำแหน่งที่สอดคล้องกับการโคจรของดวงอาทิตย์นั้นมีกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด การติดตั้งในทิศทาง กำลังไฟฟ้าต่ำที่สุดคือทิศเหนือ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ได้ยังคุ้มค่าเนื่องจากต้นทุนในปัจจุบันต่ำลง และหากมีการพัฒนาเทคโนโลยีการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ดีขึ้นมาใช้ในอนาคตจะทำให้ได้ กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบผลการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในตำแหน่งต่างๆ

## บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

้งานวิจัยการควบคุมจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาให้เหมาะสมกับ ้อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบเชื่อมต่อกับกริดโดยใช้โมเดลการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบทำนายค่า กระแสไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อปรับปรุงอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตและอัลกอลิทึมการ ้เพิ่มความนำซึ่งเป็นอัลกอลิทึมที่นิยมใช้ในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นอัลกอลิทึมที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนแต่มีข้อเสียคือมีการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดช้า เมื่อแสงและอุณหภูมิมีการเปรี่ยนแปลงทันทีทันใดตลอดจนมีการกระเพื่อมรอบๆ จุดจ่ายกำลังไฟฟ้า ้สูงสุดทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ผลการทดสอบการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลด เป็นความต้านทานพบว่าอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตร่วมกับตรรกะคลุมเครือใช้เวลาในการติดตาม จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 146 มิลลิวินาที ในขณะที่อัลกอลิทึมแบบรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม ใช้เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 216 มิลลิวินาที ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่าย ้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของอัลกอลิทึมที่ถูกปรับปรุงเท่ากับ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ประสิทธิภาพของอัลกอ ลิทึมการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมเท่ากับ 87.97 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองเมื่อโหลดเป็น ้อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดพบว่าอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการติดตามจุด ้จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 70 มิลลิวินาที ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 99.43 เปอร์เซ็นต์ ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์เท่ากับ 1.841 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัลกอลิทึมการ รบกวนและสังเกตที่ถูกปรับปรุงใช้เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 16 มิลลิวินาที ้ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 99.6 เปอร์เซ็นต์ ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอ ้นิกส์เท่ากับ 1.812 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองเมื่อโหลดเป็นอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดด้วยอัลกอลิทึม การเพิ่มความนำพบว่าอัลกอลิทึมการเพิ่มความนำที่ถูกปรับปรุงใช้เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้า สูงสุด 20 มิลลิวินาที ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 97.89 เปอร์เซ็นต์ ผลรวม ้ความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์เท่ากับ 2.036 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัลกอลิทึมการเพิ่มความนำแบบดั้งเดิมใช้ เวลาในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 160 มิลลิวินาที ประสิทธิภาพการติดตามจุดจ่าย ้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 99.85 เปอร์เซ็นต์ ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์เท่ากับ 1.79 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง จากผลการทดสอบและการจำลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดของอัลกอลิ ทึมที่ถูกปรับปรุง ผลการศึกษาการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับกริดบนหลังคาใน ้ตำแหน่งที่ไม่สอดคล้องกับวงโคจรของดวงอาทิตย์ได้กำลังไฟฟ้าที่ไกล้เคียงกับการติดตั้งแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ในตำแหน่งที่ถูกต้องเนื่องจากอินเวอร์เตอร์ทุกตัวมีระบบการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้ที่สนใจสามารถนำอัลกอลิทึมที่นำเสนอไปพัฒนาในส่วนของตรรกะคลุมเครือเพื่อให้การ ติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุดเร็วขึ้นและลดการแกว่งรอบจุดจ่ายกำลังสูงสุดตลอดจนนำอัลกอลิทึมการ ทำนายค่ากระแสไฟฟ้าล่วงหน้าไปพัฒนาในส่วนของการควบคุมกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่ม ความแม่นยำในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสู่กริด



#### บรรณานุกรม

- [1] Khan, M. J. (2021). An AIAPO MPPT controller based real time adaptive maximum power point tracking technique for wind turbine system. ISA Transactions.
- [2] Meryem Fennich "Tracking the global maximum power point of PV arrays under partial shading conditions " Thesis for the degree master of science in electrical engineering University of Texas
- [3] Ahmed, J., & Salam, Z. (2018). An Enhanced Adaptive P&O MPPT for Fast and Efficient Tracking Under Varying Environmental Conditions. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 9(3), 1487-1496.
- [4] บุญยัง ปลั่งกลาง "ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์" เอกสารการเตรียมและวางแผนการสอน รายวิชา 04-210-440 หัวข้อประยุกต์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า
- [5] Yuncong Jiang "Power electronics architectures and control for photovoltaic solar energy systems" Thesis for the degree of doctor of philosophy in the department of electrical and computer engineering in the graduate school of the University of Alabama.
- [6] Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. Energy Reports, 6, 1312-1327.
- [7] Mokhlis, M., Ferfra, M., & Idrissi, R. (2020). High Gain Observer-Based Control for Grid-Connected PV System Under Partial Shading Effect. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, 13(2), 161-172.
- [8] Sridhar, R., Jeevananthan, S., Dash, S. S., & Selvan, N. T. (2015). Unified MPPT Controller for Partially Shaded Panels in a Photovoltaic Array. International Journal of Automation and Computing, 11(5), 536-542.
- [9] Verma, P., Garg, R., & Mahajan, P. (2020). Asymmetrical interval type-2 fuzzy logic control based MPPT tuning for PV system under partial shading condition. ISA Trans, 100, 251-263.
- [10] Zhao, Z., Cheng, R., Yan, B., Zhang, J., Zhang, Z., Zhang, M., & Lai, L. L. (2020). A dynamic particles MPPT method for photovoltaic systems under partial shading conditions. Energy Conversion and Management, 1-15.
- [11] Weddell, A. S., Merrett, G. V., & Al-Hashimi, B. M. (2012). Photovoltaic Sample-and-Hold Circuit Enabling MPPT Indoors for Low-Power Systems. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 59(6), 1196-1204.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Wen, F., Ren, K., Lin, Y., Ye, Y., Xia, H., Xia, Y., & Shi, G. (2020). Hysteresis controlled MPPT for piezoelectric energy harvesting. IEICE Electronics Express, 17(2), 1-5.
- [13] Xu, W., Wang, A., Lin, S., Li, J., Wei, B., Duan, J., & Liu, J. (2020). An internalresistance-adaptive MPPT circuit for energy harvesting. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 1-8.
- [14] Yatimi, H., Ouberri, Y., Chahid, S., & Aroudam, E. (2020). Control of an Off-Grid PV System based on the Backstepping MPPT Controller. Procedia Manufacturing, 46, 715-723.
- [15] Yazıcı, İ., Yaylacı, E. K., & Yalçın, F. (2021). Modified golden section search based MPPT algorithm for the WECS. Engineering Science and Technology, an International Journal, 24(5), 1123-1133.
- [16] Aurairat, A., & Plangklang, B. (2022). An Alternative Perturbation and Observation Modifier Maximum Power Point Tracking of PV Systems. Symmetry, 14(44), 1-17.
- [17] Bhattacharyya, S., Kumar P, D. S., Samanta, S., & Mishra, S. (2021). Steady Output and Fast Tracking MPPT (SOFT-MPPT) for P&O and InC Algorithms. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 12(1), 293-302.
- [18] Aurairat, A., & Plangklang, B. (2022). A modified-simplified MPPT Technique for Three-Phase Single-State Grid-Connected PV Systems. Computers, Materials & Continua.
- [19] Kihal, A., Krim, F., Laib, A., Talbi, B., & Afghoul, H. (2019). An improved MPPT scheme employing adaptive integral derivative sliding mode control for photovoltaic systems under fast irradiation changes. ISA Trans, 87, 297-306.
- [20] Macaulay, J., & Zhou, Z. (2018). A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System. Energies, 11(6), 1-15.
- [21] Fangrui, L., Shanxu, D., Fei, L., Bangyin, L., & Yong, K. (2008). A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(7), 2622-2628.
- [22] Loukriz, A., Haddadi, M., & Messalti, S. (2016). Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems. ISA Trans, 62, 30-38.

#### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] El-Khozondar, H. J., El-Khozondar, R. J., Matter, K., & Suntio, T. (2016). A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms. Renewables: Wind, Water, and Solar, 1-8.
- [24] Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2013). MPPT techniques for photovoltaic applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 793-813.
- [25] Ge, X., Ahmed, F. W., Rezvani, A., Aljojo, N., Samad, S., & Foong, L. K. (2020). Implementation of a novel hybrid BAT-Fuzzy controller based MPPT for gridconnected PV-battery system. Control Engineering Practice 98, 1-12.
- [26] Aurairat, A., & Plangklang B. (2017). Analysis of direct PV application for LED bulbs in daytime without DC to AC Converter and Battery. 5<sup>Th</sup> International Electrical Engineering Congress, 161-164.
- [27] Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1018-1034.
- [28] Sher, H. A., Murtaza, A. F., Noman, A., Addoweesh, K. E., Al-Haddad, K., & Chiaberge, M. (2015). A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O MPPT. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6(4), 1426-1434.
- [29] Ali, K., Khan, L., Khan, Q., Ullah, S., & Ali, N. (2021). Neurofuzzy robust backstepping based MPPT control for photovoltaic system. TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES, 29(1), 421-436.
- [30] Amara, K., Fekik, A., Hocine, D., Bakir, M. L., Bourennane, E.-B., Malek, T. A., & Malek, A. (2018). Improved Performance of a PV Solar Panel with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System ANFIS based MPPT. 7th International Conference on Renewable Energy Research and Application, 1098-1101.
- [31] Harrag, A., & Messalti, S. (2019). IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances. Energy Procedia, 157, 362-374.
- [32] Bounechba, H., Bouzid, A., Snani, H., & Lashab, A. (2016). Real time simulation of MPPT algorithms for PV energy system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 83, 67-78.
- [33] Boumaaraf, H., Talha, A., & Bouhali, O. (2015). A three-phase NPC grid-connected inverter for photovoltaic applications using neural network MPPT. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 1171-1179.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [34] Oshaba, A. S., Ali, E. S., & Abd Elazim, S. M. (2015). PI controller design using ABC algorithm for MPPT of PV system supplying DC motor pump load. Neural Computing and Applications, 28(2), 353-364.
- [35] Vincheh, M. R., Kargar, A., & Markadeh, G. A. (2014). A Hybrid Control Method for Maximum Power Point Tracking (MPPT) in Photovoltaic Systems. Arabian Journal for Science and Engineering, 39(6), 4715-4725.
- [36] Hsieh, G.-C., Hsieh, H.-I., Tsai, C.-Y., & Wang, C.-H. (2013). Photovoltaic Power-Increment-Aided Incremental-Conductance MPPT with Two-Phased Tracking. IEEE Transactions on Power Electronics, 28(6), 2895-2911.
- [37] Mohamed, A. A. S., Berzoy, A., & Mohammed, O. A. (2017). Design and Hardware Implementation of FL-MPPT Control of PV Systems Based on GA and Small-Signal Analysis. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 8(1), 279-290.
- [38] Shebani, M. M., Iqbal, T., Quaicoe, J. E. (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).
- [39] Khosrojerdi, F., Shamsodin Taheri, S., Cretu, A. M. (2016). An Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-based MPPT Controller for Photovoltaic Arrays. IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEG).
- [40] Balato, M., Costanzo, L., Marino, P., Rubino, G., Rubino, L., & Vitelli, M. (2017). Modified TEODI MPPT Technique: Theoretical Analysis and Experimental Validation in Uniform and Mismatching Conditions. IEEE Journal of Photovoltaics, 7(2), 604-613.
- [41] WANG, Y., ZHANG, M., QIN, M., MA X. (2016). A Practical Step-variation MPPT Scheme for Photovoltaic Power Generation Systems. IEEE.
- [42] Godoy, R. B., Bizarro, D. B., de Andrade, E. T., de Oliveira Soares, J., Ribeiro, P. E.
  M. J., Carniato, L. A., Canesin, C. A. (2017). Procedure to Match the Dynamic Response of MPPT and Droop-Controlled
- [43] Hammami, M., Grandi, G., Rudam, M. (2016). An Improved MPPT Algorithm Based on Hybrid RCC scheme for Single-Phase PV Systems. IEEE, 3024-3029.
# บรรณานุกรม (ต่อ)

- [44] Shintemirov, A., Omarali, B., Muratov, F., Issa, M. (2016). A Sensorless MPPT-based Solar Tracking Control Approach for Mobile Autonomous Systems. IEEE, 3006-3011.
- [45] Yang, P., Wang, Y., Qunru Zheng, Q. (2016). Anovel Region Partition MPPT Method Based on Variable Step-size INC. IEEE Innovative Smart Grid Technologies -Asia (ISGT-Asia), 699-704.
- [46] Gizi, A. G. A. & Sarab Jwaid Al-Chlihawi, S. J. A. (2016). Study of FLC Based MPPT in Comparison with P&O and INC for PV Systems. International Symposium on Fundamental of Electrical Engineering University Politehnica of Bucharest.
- [47] Purushothaman, G., Venugopalan, V., & Vincent, A. M. (2013). Real-time simulation platform for photovoltaic system with a boost converter using MPPT algorithm in a DSP controller. Frontiers in Energy, 7(3), 373-379.
- [48] Ahmad, N. S., Tsai, T.-W., & Chen, Y.-M. (2020). Single-Phase Grid-Connected Inverters with Simplified SPWM Control. IEEE Open Journal of Power Electronics, 1, 170-179.
- [49] Ali Khan, M. Y., Liu, H., Yang, Z., & Yuan, X. (2020). A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies. Energies, 13(16), 1-40.
- [50] Chao, P. C. P., Chen, W.-D., & Chang, C.-K. (2012). Maximum power tracking of a generic photovoltaic system via a fuzzy controller and a two-stage DC–DC converter. Microsystem Technologies, 18(9-10), 1267-1281.
- [51] Dida, A., & Attous, D. B. (2015). Adaptive hill-climb searching method for MPPT algorithm based DFIG system using fuzzy logic controller. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 8(S1), 424-434.
- [52] Doubabi, H., Salhi, I., Chennani, M., & Essounbouli, N. (2021). High Performance MPPT based on TS Fuzzy-integral backstepping control for PV system under rapid varying irradiance-Experimental validation. ISA Transactions, 1-13.
- [53] Alhosaini, W., Wu, Y., & Zhao, Y. (2019). An Enhanced Model Predictive Control Using Virtual Space Vectors for Grid-Connected Three-Level Neutral-Point Clamped Inverters. IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(4), 1963-1972.

# บรรณานุกรม (ต่อ)

- [54] Li, X., Zhang, H., Shadmand, M. B., & Balog, R. S. (2017). Model Predictive Control of a Voltage-Source Inverter With Seamless Transition Between Islanded and Grid-Connected Operations. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(10), 7906-7918.
- [55] . Long, B., Cao, T., Fang, W., Chong, K. T., & Guerrero, J. M. (2021). Model Predictive Control of a Three-Phase Two-Level Four-Leg Grid-Connected Converter Based on Sphere Decoding Method. IEEE Transactions on Power Electronics, 36(2), 2283-2297.
- [56] Scoltock, J., Geyer, T., & Madawala, U. K. (2015). Model Predictive Direct Power Control for Grid-Connected NPC Converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(9), 5319-5328.







# ผลงานวิจัยตีพิมพ์

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "An Alternative Perturbation and Observation Modifier Maximum Power Point Tracking of PV Systems", Symmetry, 14, 2022, pp1-17.

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "A modified-simplified MPPT Technique for Three-Phase Single-State Grid-Connected PV Systems", CMC-Computers, Materials & Continua, 2022.

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "Analysis of a direct PV application for LED bulbs in daytime without DC to AC Converter and Battery", The 2017 International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, pp 49-52, 8-10 March 2017.

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "Review Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for PV system", IEET-International Electrical Engineering Transactions, 4, 2017, pp7-11.

อนุชิต อุไรรัตน์ บุญยัง ปลั่งกลาง และ เฉลิม จินาตุน "การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศทาง ที่ไม่สอดคล้องกับทิศทางการโคจรของดวงอาทิตย์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON) ครั้งที่ 43, ณ โรงแรมท็อปแลนด์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก, ไทย, หน้าที่ 516-519, 28-23 ตุลาคม 2563.





## an Open Access Journal by MDPI

**Editor-in-Chief** Prof. Dr. Sergei D. Odintsov

## Message from the Editor-in-Chief

*Symmetry* is ultimately the most important concept in natural sciences. It is not surprising then that very basic and fundamental research achievements are related to symmetry. For instance, the Nobel Prize in Physics 1979 (Glashow, Salam, Weinberg) was received for a unified symmetry description of electromagnetic and weak interactions, while the Nobel Prize in Physics 2008 (Nambu, Kobayashi, Maskawa) was received for the discovery of the mechanism of spontaneous breaking of symmetry, including CP symmetry. Our journal is named *Symmetry* and it manifests its fundamental role in nature.

## **Author Benefits**

- **Open Access** Unlimited and free access for readers
- C No Copyright Constraints Retain copyright of your work and free use of your article
- (IF) Impact Factor 2.713 (2020 Journal Citation Reports®)
- 😤 Thorough Peer-Review
- Coverage by Leading Indexing Services SCIE-Science Citation Index Expanded (Clarivate Analytics), INSPEC (IET), Scopus (Elsevier)
- ✓ No Space Constraints, No Extra Space or Color Charges No restriction on the length of the papers, number of figures or colors
- **\$ Discounts on Article Processing Charges (APC)** If you belong to an institute that participates with the MDPI Institutional Open Access Program
- **CiteScore 2020 (Scopus) 3.4** Q1 (General Mathematics), Q1 (Computer Science)



## Aims and Scope

*Symmetry* (ISSN 2073-8994) is an international and interdisciplinary scientific journal. Our goal is to publish high-impact articles in the field of symmetry. There is no restriction on the length of the papers. The journal publishes reviews, regular research papers, communic tions and short notes. All submitted manuscripts undergo rigorous peer review prior to publication.

Computer and Engineering Science and Symmetry/ Asymmetry,

Mathematics and Symmetry/Asymmetry,

Physics and Symmetry/Asymmetry,

Chemistry and Symmetry/Asymmetry,

Biology and Symmetry/Asymmetry

## **Editorial Office**

Symmetry Editorial Office symmetry@mdpi.com MDPI, St. Alban-Anlage 66 4052 Basel, Switzerland Tel: +41 61 683 77 34 Fax: +41 61 302 89 18 www.mdpi.com mdpi.com/journal/symmetry



## MDPI is a member of

See www.mdpi.com for a full list of offices and contact information. MDPI is a company registered in Basel, Switzerland, No. CH-270.3.014.334-3, whose registered office is at St. Alban-Anlage 66, CH-4052 Basel, Switzerland.

Basel, October 2021



Article



## An Alternative Perturbation and Observation Modifier Maximum Power Point Tracking of PV Systems

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang \*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Khlong Luang 12110, Pathum Thani, Thailand; anuchit\_a@mail.rmutt.ac.th \* Correspondence: boonyang,p@en.rmutt.ac.th; Tel.: +66-86-899-2996

Abstract: Under the current situation, it is necessary to harness solar energy to generate more electricity. However, the disadvantage of solar energy is that it takes a lot of space to install solar panels. An option to optimize PV systems is to improve the maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on symmetrical management has the advantage of being easy to use without updating the devices. The improved algorithm achieves symmetry between the maximum power point (MPP) and the output of the PV array, resulting in less power loss and increased system efficiency. This paper presents the MPPT of photovoltaic using the current control modifier perturbation and observation plus fuzzy logic control (CCMP&O-FLC MPPT). The algorithm of CCMP&O-FLC MPPT is applied to reduce the setting time and to reduce oscillation around the set-point at a steady state. This concept was experimented with using a boost converter with MATLAB/Simulink software package and implemented by STM32F4VGA microcontroller. The simulation and experiment results are obtained by comparison with traditional P&O under similar operating conditions. The CCMP&O-FLC MPPT can track MPP faster when the irradiation is rapidly changing and, therefore, can reduce the PV system losses. In addition, the advantages of this proposed method can also be applied to improve the performance of existing systems without modifying existing equipment, unlike modern methods that cannot be applied to older systems. The results showed that the MPPT time and the power output efficiency of the proposed algorithm were 146 milliseconds and 99.5%, respectively.

Keywords: maximum power point; modifier perturbation and observation; fuzzy logic control; boost converter

#### 1. Introduction

Solar energy is an energy that humans can use indefinitely, and in addition, we can find it easily. It appears and can be received everywhere and has high energy stability [1], although the problem is that the price for us to convert energy to use in a manner like fossil energy is still high. However, it is not the main problem because energy can change depending on market factors. We need to study and develop research to make solar energy use more stable and cost-effective. For this reason, currently, many countries around the world are developing and using more and more solar energy [2–4] because solar energy is clean energy with no fuel costs [5], and it is also very safe compared to fossil and nuclear power [6]. It is cost-effective, simple, clean, noise-free, and environmentally friendly to operate and maintain. Solar energy usage patterns are broadly divided into two forms, depending on the method of capturing light energy, transformation into another form of energy, and redistribution of that energy. The first form, known as active solar, is a photovoltaic method, or solar thermal, to capture and convert solar energy directly into electrical or thermal energy. Another form of passive solar is an indirect method of utilization included building designs in cold countries to maximize the sunlight or installing thermal mass-sensitive materials [7]. It can be applied to balance the indoor air, installing materials with light-diffusing properties, designing a space naturally circulating

# check for updates

Citation: Aurairat, A.; Plangklang, B. An Alternative Perturbation and Observation Modifier Maximum Power Point Tracking of PV Systems. Symmetry 2022, 14, 44. https:// doi.org/10.3390/sym14010044

Academic Editor: José Carlos R. Alcantud

Received: 3 December 2021 Accepted: 27 December 2021 Published: 30 December 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https:// creativecommons.org/licenses/by/

4.0/).

air. Solar photovoltaic is to convert solar energy into electrical energy [8,9]. The use of solar cells was first produced in 1883 by Charles Fritz and started using selenium in 1941 [10]. Monomolecular silicon solar panels relatively have high production costs. The use of solar panels in the early days focused on space applications such as satellites. After experiencing rising oil prices in 1973 and 1979, the developed countries turned their attention to solar energy improved more seriously. Photovoltaic (PV) is currently considered the most popular renewable energy [11–13] due to its many advantages. However, there are still some disadvantages compared to conventional power sources [14], particularly the high production costs, low power conversion [15–17], and nonlinear I-V and P-V characteristics, as shown in Figure 1. The equivalent circuit of photovoltaic cells is shown in Figure 2. Therefore, it is difficult to harvest energy from solar cells to achieve maximum efficiency. PV systems are now widely used in battery charging, water pumping, and grid-connected [18,19]. Various algorithms such as perturbation and observation (P&O) to optimize the PV system, increment conductance (INC), fuzzy logic (FL), particle swarm optimization (PSO), and hybrid are used [20].



Figure 2. Equivalent circuit of photovoltaic cells.

Although these methods are effective in solving the problems of nonlinear I-V curves, detailed calculations are required, which limits the capabilities of these methods. Although, these methods are effective in solving the problems of nonlinear I–V curves. Detailed

calculations are required and limit the capabilities of these methods. Using a fixed iterative step size with conventional perturbation and observation (P&O), the incremental conductance (INC) method is simple to provide good performance. However, they have a disadvantage of the slow tracking of the maximum power point when irradiation and temperature change rapidly. This problem can be solved with a large step size allowing the fast maximized power tracking but causing PV energy oscillations around the MPP. The oscillation can be reduced by using a smaller step size. But it slows the speed of the maximum power point tracking. However, to solve the problem with the fixed step size method, the obtained maximum power point tracking speed is still slow. To overcome the drawbacks and fast response of the maximum power point tracking, therefore, an adapted algorithm with variable step size is proposed. The step size is automatically adjusted according to the power to voltage derivative of the PV array (dP/dV).

Juber Ahmed and Zainal Salam introduced enhanced adaptive perturbation and observation (EA-P&O) MPPT for tracking the MPPT under partial shading on PV panel so that it has a good tracking and high efficiency [9]. The soft-MPPT was introduced by Shamik Bhattacharyya et al. to track the MPPT under rapid changes in irradiance, which is fast-tracking [21]. John Macaulay and Zhongfu Zhou proposed a modified perturbation and observation of MPPT under changes in irradiance, where the algorithm has fast response and low steady-state oscillation around MPP [22]. Kamarn Ali et al. used a neuro-fuzzy for high MPPT performance under changing irradiance and temperature [23]. Hegazy Rezk et al. used adaptive fuzzy logic-based MPPT (AFL-MPPT) with high tracking efficiency and fast dynamics [24]. A comparison of the maximum power point tracking based on P&O and fuzzy logic algorithms discussed above is summarized in Table 1. In addition, many DC/DC boost converters are also used in PV array systems to track the maximum power point [21,25]. Due to its simple structure, the number of semiconductor switches can be reduced, resulting in low cost [26].

Table 1. Comparison of the maximum power point tracking based on P&O and FL algorithms.

MPPT Method	Converter	Equipment	Outcomes	Ref
EA-P&O	buck-boost	MATLAB/Simulink DS1104 DSP	Good tracking under partial shading High efficiency	[9]
SOFT-MPPT	boost	Arduino mega 2560 microcontroller	Fast-tracking under changing irradiance	[21]
MP&O-FLC	boost	MATLAB/Simulink dSPACE	Fast response under changing irradiance Low steady-state oscillation around MPPT	[22]
Neuro-Fuzzy	buck-boost	MATLAB/Simulink	High performance under changing irradiance	[23]
AFL-MPPT	boost	TMS320F28335 microcontroller	High tracking efficiency Fast dynamics	[24]

In this paper, the CCMP&O-FLC MPPT is proposed. The MATLAB/Simulink program is applied to test, validate and compare the results obtained from the proposed P&O and traditional P&O MPPT methods. An experimental prototype of the MPPT system using a DC/DC boost converter controlled by the STM32F4VGA microcontroller-based control circuit was developed. A comparative study between the proposed P&O and the traditional P&O method under similar operating conditions was presented. Many efficiency parameters such as PV array output power efficiency, response time, tracking accuracy, and ripple have been suggested.

#### 2. Maximum Power Point

From the experiment, the understanding of characteristic curves of a solar cell can be assumed like a curve as opposed to a diode property because of the power caused by current and voltage.

Therefore, the transmission curve of the solar cell can be afforded depending on the level of light received. According to the I-V property curve opposite the diode according to Figure 1, which has a maximum power called maximum power point (MPP). Even with a high current value at the short-circuit point, when the voltage is equal to zero. Therefore, the power value is also zero, where vice versa, at the opening of the circuit, the power at this point is also zero, while the effect of the combination of current and voltage causes the value of power to be close to the maximum value. We call the maximum power point (MPP) that is the point where the solar cells work by receiving the light intensity and transmitting the maximized power. When considering the I-V curves, the  $V_{mpp}$  and  $I_{mpp}$  values can be calculated from  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$ .

$$V_{mpp} \approx (0.75 - 0.9) V_{oc} \tag{1}$$

$$I_{mpp} \approx (0.85 - 0.95) I_{sc}$$
 (2)

The fill factor (FF) is the value considered properties of the solar cell with the following values.

$$FF = V_{mpp} * I_{mpp} / V_{oc} * I_{sc}$$
(3)

The fill factor value refers to the value that represents the quality of the solar cell. Typically, silicon cells are approximately 0.7-0.8, and the output power of the solar cell is shown in Equation (3).

$$P_{mpp} = V_{mpp} * I_{mpp} = V_{oc} * I_{oc} * FF$$
(4)

Therefore, the efficiency of the solar cell is the ratio of the output electric energy to the solar input (Pin), which has the following relationship.

$$\eta = V_{oc} * I_{sc} * FF / P_{in} \tag{5}$$

At present, the maximum efficiency of silicon solar cells at 1000 W/m<sup>2</sup> from laboratory tests is approximately 24%, and in general, use is 10-14%, although theoretically, the value is 26-27%

From Figure 1, it is observed that when the current is I1, the electric power is P1. The electric current is I2, the electric power is P2, which is the maximum power. Therefore, we have to harness the electricity to keep the solar cells at the maximized power all the time.

## 3. Conventional Perturbation and Observation Algorithm

Today, one of the most popular MPPT methods is the P&O method, which has operated for a long time. According to the characteristic curve, the perturbation and observation techniques are applied to adjust the voltage of the photovoltaic system in the direction of constantly increasing power. When the maximum power is reached, the voltage is constantly changing and fluctuating around the maximized power. This algorithm is suitable for slow changes in irradiation and temperature. The disadvantage is an output oscillation on the maximum power. Furthermore, the speed of convergence to a maximized power point depends on the step size (D: delta of duty cycle). The small step size has low oscillations on maximum power and big tracking time. The big step size has high oscillations on maximum power point and low tracking time. A diagram of the perturbation and observation maximized power point tracking (P&O MPPT) method is shown in Figure 3. The basic equations of P&O method are as follows:

 $P_{PV}(k) = V_{PV}(k) * I_{PV}(k)$ (6)

$$\Delta P = P_{-}PV(k) - P_{-}PV(k-1)$$
(7)

$$\Delta V = V_{PV}(k) - V_{PV}(k-1) \tag{8}$$

$$\Delta P = 0 \quad at \quad MPP \tag{9}$$

Symmetry 2022, 14, 44



5 of 17

Figure 3. Diagram of perturbation and observation MPPT method.

### 4. Modified Perturbation and Observation Algorithm

The advantages of the traditional perturbation and observation MPPT algorithm are simple and effective. However, the weakness of this algorithm is that its operation may fail under rapidly changing irradiation and temperature conditions, leading to MPP tracking in the wrong direction. Fast-tracking can be performed with larger step sizes. But excessive steady-state oscillation is inevitable, where the smaller the step size can reduce the slower dynamic shaking. Many solutions to these conflicts have been presented using variable and progressive step sizes that cannot be achieved where the algorithm automatically changes the step size based on the PV array style. Depending on the individual operating conditions, the size of the step should provide a satisfying exchange between the dynamics and oscillation. Therefore, based on the basic principles of MPPT, this article presents a modifier perturbation and observation MPPT algorithm, which has a more simple character, faster response time, and less oscillation. The chart of modifier perturbation and observation algorithm is shown in Figure 4. In solving the perturbation and observation problems, the CCMP&O-FLC MPPT methods are proposed based on Equation (17), where  $I_{ph}$  is related to solar radiation.

$$I_{pli} = \lambda \left( I_{sc} + k_i \left( T - T_{ref} \right) \right)$$
(18)

where

 $\lambda$  is the solar irradiation intensity; kW/m<sup>2</sup>,

 $I_{ph}$  is the electric current generated by solar irradiation; A,

 $I_{sc}$  is the shot-circuit current of the cell; A,

 $K_i$  is the temperature coefficient of the short-circuit current; A/°C,

 $\Delta P = 0$ 

*T* is the temperature at the cell junction; °K,

 $T_{ref}$  is the reference temperature of the cell.

M = al

The current control modifier perturbation and observation plus fuzzy logic control maximum power point tracking method proposed is given as follows:

 $P_{PV}(k) = V_{PV}(k) * I_{PV}(k)$  (19)

$$\Delta P = P_{PV}(k) - P_{PV}(k-1) \tag{20}$$

$$\Delta V = V_{PV}(k) - V_{PV}(k-1) \tag{21}$$

$$s(\Delta P_{PV}(k))$$
 variable step size (22)

$$\Delta P < 0$$
 and  $\Delta V < 0$  at left of MPP (24)

$$I_{ref}(k) = I_{ref}(k-1) - \left(M * \Delta I_{ref}(k)\right) \quad decrease \quad V_{out}$$
(25)

$$\Delta P < 0$$
 and  $\Delta V > 0$  at right of MPP (26)

$$I_{ref}(k) = I_{ref}(k-1) + \left(M * \Delta I_{ref}(k)\right) \quad increase \quad V_{out}$$
(27)

$$\Delta P > 0 \quad ana \quad \Delta V < 0 \quad at \quad right \quad of \quad MIPP \tag{28}$$

$$_{ef}(k) = I_{ref}(k-1) + \left(M * \Delta I_{ref}(k)\right) \quad increase \quad V_{out}$$
<sup>(29)</sup>

$$\Delta P > 0$$
 and  $\Delta V > 0$  at left of MPP (30)

$$I_{ref}(k) = I_{ref}(k-1) - \left(M * \Delta I_{ref}(k)\right) \quad decrease \quad V_{out} \tag{31}$$

where

 $P_{pv}(k)$ ,  $V_{pv}(k)$ , and  $I_{pv}(k)$  are the PV array output power, voltage, and current at the instant (k).

 $P_{pv}(k-1)$ ,  $V_{pv}(k-1)$  are the PV array output power and voltage at the instant (k-1). *M* is the absolute value of the  $\Delta P_{pv}(k)$ .

 $I_{ref}(k)$  is the initial current at the instant (k).

 $I_r$ 

 $I_{ref}(k-1)$  is the initial current at the instant (k-1).

To control the duty cycle of the boost converter, fuzzy logic control (FLC) is used. The nine rule of FLC is illustrated in Table 2.





Err	ดโอโอส	dErr	Z	Р
	No 66 O	Z	Z	Z
	Z	Z	Z	S
	P	S	М	L

Where Z, S, M, and L are zero, small, medium, and large size of duty cycle, respectively. N, Z, and P are negative, zero, and positive, respectively.

By using the symmetry fuzzy rule, the input and output membership function of fuzzy logic are shown in Figure 5. In order to reduce the oscillations around the MPP, therefore,



the regions of the  $I_{ref}$ ,  $dI_{ref}$  and duty cycle are defined as -20 to 20, -1 to 1, and 0 to 100, respectively.

Figure 5. Input and output membership function of fuzzy logic; (a) Iref, (b) dIref, (c) Duty.

8 of 17

### 5. Simulation Results

To illustrate the MPPT, response time, ripple, and efficiency of the CCMP & O–FLC MPPT method. A comparative study between P&O and CCMP & O–FLC MPPT methods have been demonstrated. Therefore, MATLAB/Simulink was applied to simulate the system at the beginning of this research. To track the maximum power, the DC/DC boost converter was applied to transfer the electrical power from the PV array to the load. The 1Soltech 1STH–215P was used in the simulation. The PV module specifications and the DC/DC boost converter parameter of the simulation system are illustrated in Tables 3 and 4, respectively.

Table 3. PV module specifications.

Emulated PV Source Specifications	Value
Voltage at MPP $(V_{mpp})$	29 V
Current at MPP $(I_{mpp})$	7.35 A
Short circuit current $(I_{sc})$	7.84 A
Open circuit voltage $(V_{sc})$	36.3 V
Maximum power at standard temperature condition	213.15 W
Parallel strings	1
Series-connected modules per string	8

Table 4. DC/DC Boost converter parameter of the simulation system.

Converter Parameter	Value	
Switching frequency $(f_{sw})$	20 kHz	
Input filter capacitor $(C_{in})$	100 µF	
Output filter capacitor ( $C_0$ )	280 µF	
Input filter inductor (L <sub>in</sub> )	420 mH	

### 5.1. Maximum Power Point Tracking

The perturbation and observation maximum power point tracking (P&O MPPT) method and current control modifier perturbation and observation plus fuzzy logic control maximized power point tracking (CCMP&O–FLC MPPT) was tested by simulation the rapid change irradiation levels as follow 600, 1000, and 900 W/m<sup>2</sup>. The simulation results showed that the MPPT algorithm mentioned in this article is very accurate. The energy values determined by both methods converge to the theoretical values corresponding to the rapid change irradiation level, as shown in Figure 6.





#### Symmetry 2022, 14, 44

10 of 17

## 5.2. Comparison of Response Time

A comparison of the maximum power point tracking between proposed and traditional P&O MPPT methods is shown in Figure 7. The proposed CCMP&O-FLC MPPT method can reduce energy loss more than traditional P&O methods due to less maximum power tracking time.



Figure 7. A comparison of the PV array output power response time between proposed and P&O MPPT methods.

Figures 8 and 9 show the output power of the PV array due to the sudden rise and fall of irradiation. It can be noted that the response time with the proposed MPPT algorithm is significantly better when using the traditional P&O MPPT algorithm, especially around the MPPT point.



Figure 8. A comparison of the PV array output power due to sudden increase in irradiation between proposed and P&O MPPT methods.

#### 5.3. Comparison of Ripple

Figure 10 shows a noticeable decrease in the electrical power ripple of the proposed system compared to traditional P&O methods.

#### 5.4. Comparison of Efficiency

From Figure 11, it can be observed that the efficiency of the PV output of the proposed algorithms is greater than the traditional P&O algorithms. Since there is no oscillation around the maximum power point, the efficiency of the proposed method is higher than that of the traditional method. The power output efficiency of the proposed algorithm is 99.5%.



Figure 9. A comparison of the PV array output power due to sudden decrease in irradiation between proposed and P&O MPPT methods.







Figure 11. A comparison of the PV array output power efficiency between proposed and P&O MPPT methods.

## 6. PV MPPT System Experiment Results

The experimental methods are performed to evaluate and verify the effectiveness of the CCMP&O-FLC MPPT. The prototype circuit used in the experiment and the experiment diagram of the system is shown in Figures 12 and 13, respectively. The specifications are listed in Tables 5 and 6, respectively. The STM32F4VGA is used to provide the control signal for the boost converter, resistance as load, emulated PV source SM300–10D PV simulator, and SM300–20 programming power supply have been used as a source instead

11 of 17

## Symmetry 2022, 14, 44

of a PV. The results of the proposed algorithm were then compared with the results of the traditional P&O algorithm. Figures 14 and 15 show the PV output voltage, PV output current, and PV output power obtained by traditional P&O methods corresponding to 600 and 1000 W/m2. Figures 16 and 17 show the PV array output performance of the CCMP&O-FLC method with irradiation 600 and 1000 W/m<sup>2</sup>. From the experimental results in Figures 14-17, we can see that the two MPPT algorithms mentioned in this article are highly accurate. The energy, voltage, and current values obtained by the proposed methods and traditional P&O methods are consistent with radiation levels and theoretically correct. Comparison of the response time of the proposed algorithm with the traditional algorithm showed that the proposed algorithm is approximately 146 milliseconds, the traditional P&O method is around 216 milliseconds, indicating that the proposed method tracks maximum power faster than the traditional one. Figures 15 and 17 show the PV output power of the traditional algorithm and the proposed algorithm at 1000 W/m<sup>2</sup>. The PV output power of the traditional algorithm and the proposed algorithm are  $606.567 \, W/m^2$ and 690.67 W/m<sup>2</sup>, respectively. Since there is a little bit of oscillation around the maximum power point, the efficiency of the proposed method is higher than that of the traditional method. The experimental results of the proposed method are very accurate compared to the traditional method because it has a faster convergence speed and less response time. There is no static vibration around the MPP, which is suitable for real-world conditions.



Figure 12. Prototype laboratory experiments of the MPPT system.

Table 5. PV source specifications.

<b>Emulated PV Source Specifications</b>	Value
Voltage at MPP $(V_{mpp})$	230 V
Current at MPP $(I_{nupp})$	3 A
Short circuit current $(I_{sc})$	4 A
Open circuit voltage $(V_{sc})$	245 V
Temperature coefficient $(T_k)$	-1000 °C





Figure 14. The PV output voltage, current, and power of experiments with traditional P&O methods.



Figure 15. The experiments of the PV MPPT tracking with traditional P&O methods.



Figure 16. The PV output voltage, current, and power of experiments with proposed P&O methods.

14 of 17



Figure 17. The experiments result of the PV MPPT tracking with proposed P&O methods.

#### 7. Conclusions

In this paper, the CCMP&O-FLC is laid out, the proposed schemes are discussed in detail, and simplified design rules are proposed. Comparative studies have been shown between the proposed method and traditional method under the same operating and environmental conditions. The simulation and experimentation results show a significant contribution to steady-state performance and dynamic response. The response time of the maximum power point tracking cannot be reduced by a traditional method. The CCMP&O-FLC is confirmed, in which the energy loss of the converter is reduced. Additionally, the improvements of the traditional MPPT to approach ripple and overload are undeniable. The experimental results of the proposed MPPT algorithm showed high accuracy, rapid convergence, a little bit of oscillation around MPP, less noise, and no difference from MPP points. The proposed algorithm achieves symmetry between the MPP and the output of the PV array resulting in less power loss and increased system efficiency. Compared to the other methods, as shown in Table 1, the MPP tracking of the proposed method is good as others. In comparison, in terms of complexity, the proposed method is much less complicated. Compared to modern methods such as neuro-fuzzy, it is clear that the proposed method is applicable to conventional microcontrollers, unlike most modern methods that are not compatible with conventional microcontrollers. Hence the CCMP&O-FLC presented as the result of the proposed method is very effective.

Author Contributions: A.A.: conceptualization, methodology, software, writing original draft preparation, formal analysis; A.A.: investigation, validation, writing review; B.P.: conceptualization, editing, visualization, supervision. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

#### Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would like to thank the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Thanyaburi, for its strong support of the laboratory instruments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

#### References

- Özbay, H. PDM-MPPT based solar powered induction heating system. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2020, 23, 1397–1414. [CrossRef]
   Ebrahim, M.A.; Osama, A.; Kotb, K.M.; Bendary, F. Whale inspired algorithm based MPPT controllers for grid-connected solar
- photovoltaic system. Energy Procedia 2019, 162, 77–86. [CrossRef]
- Bielskis, E.; Baskys, A.; Valiulis, G. Controller for the Grid-Connected Microinverter Output Current Tracking. Symmetry 2020, 12, 112. [CrossRef]
- Prabpal, P.; Kongjeen, Y.; Bhumkittipich, K. Optimal Battery Energy Storage System Based on VAR Control Strategies Using Particle Swarm Optimization for Power Distribution System. Symmetry 2021, 13, 1692. [CrossRef]
- Mao, M.; Cui, L.; Zhang, Q.; Guo, K.; Zhou, L.; Huang, H. Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Rep.* 2020, 6, 1312–1327. [CrossRef]
- Yap, K.Y.; Sarimuthu, C.R.; Lim, J.M.Y. Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review. J. Mod. Power Syst. Clean Energy 2020, 8, 1043–1059.
- Benhadouga, S.; Meddad, M.; Eddiai, A.; Boukhetala, D.; Khenfer, R. Sliding Mode Control for MPPT of a Thermogenerator. J. Electron. Mater. 2019, 48, 2103–2111. [CrossRef]
- Abdullah, M.A.; Al-Hadhrami, T.; Tan, C.W.; Yatim, A.H. Towards Green Energy for Smart Cities: Particle Swarm Optimization Based MPPT Approach. *IEEE Access* 2018, 6, 58427–58438. [CrossRef]
- Ahmed, J.; Salam, Z. An Enhanced Adaptive P&O MPPT for Fast and Efficient Tracking under Varying Environmental Conditions. IEEE Trans. Sustain. Energy 2018, 9, 1487–1496.
- Zhou, C.G.; Huang, L.; Ling, Z.X.; Cui, Y.B. Research on MPPT control strategy of photovoltaic cells under multi-peak. *Energy Rep.* 2021, 7, 283–292. [CrossRef]
- Jately, V.; Azzopardi, B.; Joshi, J.; Venkateswaran, V.B.; Sharma, A.; Arora, S. Experimental Analysis of hill-climbing MPPT algorithms under low irradiance levels. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 150, 111467. [CrossRef]
- Javed, K.; Ashfaq, H.; Singh, R. An improved MPPT algorithm to minimize transient and steady state oscillation conditions for small SPV systems. Int. J. Renew. Energy Dev. 2018, 7, 191–197. [CrossRef]
- Li, X.; Wen, H.; Hu, Y.; Jiang, L. A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application. *Renew. Energy* 2018, 130, 416–427. [CrossRef]
- Verma, P.; Garg, R.; Mahajan, P. Asymmetrical interval type-2 fuzzy logic control based MPPT tuning for PV system under partial shading condition. ISA Trans. 2020, 100, 251–263. [CrossRef] [PubMed]
- Chihaia, R.A.; Vasile, I.; Cîrciumaru, G.; Nicolaie, S.; Tudor, E.; Dumitru, C. Improving the Energy Conversion Efficiency for Hydrokinetic Turbines Using MPPT Controller. *Appl. Sci.* 2020, *10*, 7560. [CrossRef]
- Li, S. A variable-weather-parameter MPPT control strategy based on MPPT constraint conditions of PV system with inverter. Energy Convers. Manag. 2019, 197, 111873. [CrossRef]
- Zhao, Z.; Cheng, R.; Yan, B.; Zhang, J.; Zhang, Z.; Zhang, M.; Lai, L.L. A dynamic particles MPPT method for photovoltaic systems under partial shading conditions. *Energy Convers. Manag.* 2020, 220, 113070. [CrossRef]
- De Brito, M.A.G.; Alves, M.G.; Canesin, C.A. Hybrid MPPT Solution for Double-Stage Photovoltaic Inverter. J. Control Autom. Electr. Syst. 2019, 30, 253–265. [CrossRef]
   Ge, X.; Ahmed, F.W.; Rezvani, A.; Aljojo, N.; Samad, S.; Foong, L.K. Implementation of a novel hybrid BAT-Fuzzy controller
- based MPPT for grid-connected PV-battery system. Control Eng. Pract. 2020, 98, 104380. [CrossRef]
- Jiang, M.; Ghahremani, M.; Dadfar, S.; Chi, H.; Abdallah, Y.N.; Furukawa, N. A novel combinatorial hybrid SFL–PS algorithm based neural network with perturb and observe for the MPPT controller of a hybrid PV-storage system. *Control Eng. Pract.* 2021, 114, 104880. [CrossRef]
- Bhattacharyya, S.; Kumar, P.D.S.; Samanta, S.; Mishra, S. Steady Output and Fast Tracking MPPT (SOFT-MPPT) for P&O and InC Algorithms. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2021, 12, 293–302.
- Macaulay, J.; Zhou, Z. A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System. Energy 2018, 11, 1340.
- Ali, K.; Khan, L.; Khan, Q.; Ullah, S.; Ali, N. Neurofuzzy robust backstepping based MPPT control for photovoltaic system. Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci. 2021, 29, 421–436. [CrossRef]
- Rezk, H.; Aly, M.; Al-Dhaifallah, M.; Shoyama, M. Design and Hardware Implementation of New Adaptive Fuzzy Logic-Based MPPT Control Method for Photovoltaic Applications. *IEEE Access* 2019, 7, 106427–106438. [CrossRef]

 Priyadarshi, N.; Padmanaban, S.; Holm-Nielsen, J.B.; Blaabjerg, F.; Bhaskar, M.S. An Experimental Estimation of Hybrid ANFIS–PSO-Based MPPT for PV Grid Integration under Fluctuating Sun Irradiance. *IEEE Syst. J.* 2020, 14, 1218–1229. [CrossRef]
 Zhang, L.; Wang, Z.; Cao, P.; Zhang, S. A Maximum Power Point Tracking Algorithm of Load Current Maximization-Perturbation and Observation Method with Variable Step Size. *Symmetry* 2020, 12, 244. [CrossRef]



## **Tech Science Press**

## Q Login | Register

ome Academic Journals	Books & Monographs Conferences News & Announcements About	Submit
Computers, Materials &	Editorial Board	
Continua	Computers Materials & Continua	
If Make Submissions	ISSN: 1546 2226 (Online)	
○ Propose a Special Issue	Editors-in-Chief:	
Journal Menu	<ul> <li>Dr. Ankit Agrawal, Northwestem University, USA</li> <li>Dr. Timon Rabczak, Bauhaus University Weimar, GERMANY</li> </ul>	
CMC Homepage	n Dr. Guoren Wang, Beijing Institute of Technology, CHINA	
Indexing & Abstracting	Executive Editors-in-Chief:	
About Editors Editorial Board	#Dr. Xingming Sun, Nanjing University of Information Science & Technology, CHINA	
Instructions for Authors	Founding and Honorary Editor-in-Chief:	
Article Processing Charge Editorial Workflow	# Prof. Satya N. Atluri, Texas Tech University, Lubbock, USA	
Publication Ethics	Associate Editors-in-Chief:	
Contact Information	= Prof. Suzanne K. McIntosh, New York University, USA	
Special Issues Menu	LT. Znangjie Fu, Nanjing University of Information Science & Technology, CHINA	
Shaam TOOPS MIRIN	I DT. Ajay Mood, CISCO, USA	
All Special Issues	Editorial Board:	
Open Special Issues	Dr. Pinar Acar, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA	
Closed Special Issues	Prof. Brent Adams, Brigham Young University, USA	
All Issues	= Prof. Sondipon Adhikari, Swansea University, UK	
2022	Dr. Afrand Agah, West Chester University, USA	
2022	Dr. Thangarajah Akilan, Lakehead University, CANADA	
2020	Prof. Olivier Allix, ENS-Cachan, FRANCE  Def Dadeo Associate Externa University DOPTLCAL	
2019	Dr. Anasse Bari, New York University, FORI OGAL	
2018	Prof David M Barnett Stanford University USA	
2017	Prof. Ayech Benjeddou, Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA), FRANCE	
2016	= Prof. Stephane Bordas, Cardiff University (UK) and University of Luxembourg, UK	
2015	= Prof. Rene de Borst, Eindhoven University of Technology, NETHERLANDS	
2014	Dr. Ramin Bostanabad, University of California, Irvine, USA	
2013	Dr. Venkatesh Botu, Corning Incorporated, USA	
2012	# Prof. Roberto Brighenti, University of Parma, ITALY	
2011	Dr. Curt Bronkhorst, Los Alamos National Laboratory, USA	
2010	Prof. Pedro Camanho, University of Porto, PORTUGAL	
2009	m Prof. Stelvio Cimato, University of Milan, ITALY	
2008	Prof. Suvranu De, Rensselaer Polytechnic Institute, USA	
2007	Prof. Vikram Despinance, University of Camoriage, UK     Dr. A shutash Kumar Dubor. Chitkara University, IND14	
2006	Dr. Astratos Efstathiadis New York University USA	
2005	= Prof. Manuel A. Femández, University of Malaga, MALAGA	
2004	Dr. Ian Foster, University of Chicago, USA	
	Prof. Hamid Garmestani, Georgia Institute of Technology, USA	
	Dr. Walter Herbert Gerstle, University of New Mexico, USA	
	# Prof. Raju Gottumukkala, University of Louisiana at Lafayette, USA	
	# Dr. B. B. Gupta, National Institute of Technology, INDIA	
PORTICO	w Dr. Bingsheng He, National University of Singapore, SINGAPORE	
	Dr. Katherine Herbert, Montclair State University, USA	
is archived in Portico	Dr. Kedar Huppalgaonkar, Nanyang Technological University (MSE), SINGAPORE	
	Prof. Ning Hu, Chida University, JAPAN	
	Dr Saiful Islam, Griffith University, AUSTRALIA	
	Prof. Julian Jano-Jaecard. Massey University NEW ZEALAND	
	Dr. Rakesh M. Jha, National Aerospace Labs, BANGALORE	
	Dr. Moe A. Khaleel, Pacific Northwest National Laboratory, USA	
	■ Prof. Fitratullah Khan, University of Texas Rio Grande Valley, USA	
	EDr. Jukka Kortelainen, University of Oulu, FINLAND	
	■ Dr. SAKURAI Kouichi, Kyushu University, JAPAN	
	■ Prof. Ellen Kuhl, Stanford University, USA	
	EDr. Jianxin Li, Deakin University, AUSTRALIA	
	■ Prof. Shaofan Li, Berkeley University, USA	
	Prof. Kim-Meow Liew, City University Hongkong, CHINA	
	TOL ZI-KUI LIU, PEHNSY IVANIA STATE UNIVERSITY, USA  Drof Windram Lin Northwastern University USA	
	= Frot. Hugean Lin, Rolarwestan Oniversity, OSA	6
	E TO A DAMES SE DOMERS, ON WASHY OF DISAMSONWERS, ODAVIATA I	

BDr. Xiaosong Ma, Qatar Computing Research Institute, USA Dr. Rajiv Kumar Mandal, Banaras Hindu University, INDIA = Prof. Indranil Manna, I.I.T. Kharagpur, INDIA Dr. Tom Masino, TradeWeb LLC, USA Dr. Peter Middendorf, EADS Innovation Works Germany, GERMANY Dr. Rai Kumar Mishra, Banaras Hindu University, India = Dr. Sabah Mohammed, Lakehead University, CANADA Dr. Misbah Mubarak, Amazon, USA = Prof. Krishnaiyengar Narasimhan, Indian Institute of Technology Bombay, INDIA Dr. Elie Naufal, Applied Deep Learning LLC, USA Dr. Linh Ngo, West Chester University, USA # Prof. Hung Nguyen-Xuan, Ho Chi Minh City University of Technology (Hutech), VIETNAM EDr. Kottakkaran Sooppy Nisar, Prince Sattam bin Abdulaziz University, SAUDI ARABIA Prof. Marco Paggi, IMT School for Advanced Studies Lucca, ITALY ■ Prof. Harold Park, Boston University, USA Dr. Cesare Pautasso, USI Lugano, SWITZERLAND ■ Prof. Mario Pavone, University of Catania, ITALY Dr. Abena Primo, Huston-Tillotson University, USA Prof. Alessandro Reali, University of Pavia, ITALY Prof. Anthony Rollett, Carnegie Mellon University, USA Dr. Alex Rudniy, University of Scranton, USA Prof. Jose Cesar de Sa, University of Porto, PORTUGAL Dr. Cristophe Sabourin, University Paris Est-Creteil, FRANCE Dr. Srinivas Sampalli, Dalhousie University, CANADA Dr. Cesar Sanin, The University of Newcastle, AUSTRALIA = Prof. Bozidar Sarler, University of Nova Gorica, SLOVENIA Prof. Roger Sauer, RWTH Aachen, GERMANY Prof. Dominik Schillinger, University of Minnesota, USA Prof. Bernhard A. Schrefler, Universita' degli Studi di Padova, ITALY Prof. Syed Imran Shafiq, Aligarh Muslim University, INDIA Prof. Dein Shaw, National Tsing Hua University, TAIWAN
 Dr. Shengping Shen, Xi'an Jiaotong University, CHINA Prof. Victor Sheng, Texas Tech University, USA Dr. Guoqin Shi, National Research Council, CANADA Prof. Akbar Siami-Namin, Texas Tech University, USA Prof. Vadim V. Silberschmidt, Loughborough University, UK Dr. Siuly Siuly, University of Southern Queensland, AUSTRALIA Dr. Adam Slowik, Koszalin University of Technology, POLAND Prof. Jeonghoon Song, University of Colorado Boulder, USA Prof. Paul Steinmann, University of Erlangen-Nuremberg, GERMANY Dr. Sudha Subramani, Victoria University, Melbourne, AUSTRALIA Dr. Anandh Subramaniam, Regional Research Laboratory, INDIA Dr. Veera Sundararaghavan, University of Michigan Ann Arbor, USA Dr. Ata Taghipour, Ryerson University, CANADA Prof. Kazunori Takashio, Keio University, JAPAN Prof. Kang-Hai Tan, Nanyang Technological University, SINGAPORE = Prof. Thanh Tran-Cong, University of Southern Queensland, AUSTRALIA Prof. Moneesh Upmanyu, Colorado School of Mines, USA Prof. Priya Vashishta, University of Southern California, USA
 Prof. Nguyen Vinh-Phu, Monash University, AUSTRALIA Dr. Nhat Vo, University of Oulu, FINLAND Prof. Haim Waisman, Columbia University, USA
 Prof. Yunzhi Wang, Ohio State University, USA Prof. Sławomir T. Wierzchoń, Polish Academy of Sciences, POLAND Prof. Peter Wriggers, Leibniz Universität Hannover, GERMANY Prof. Jian-Ying Wu, South China University of Technology, CHINA Dr. Hongyi Xu, University of Connecticut, USA = Dr. Ye Yuan, Northeastern University, CHINA Prof. Jessica Zhang, Camegie Mellon University, USA Prof. Luwen Zhang, Shanghai Jiao Tong University, CHINA Prof. Hong Zheng, Beijing University of Technology, CHINA Prof. Xiaoying Zhuang, Leibniz Universität Hannover, GERMANY Emeritus Editor-in-Chief: Prof. Xiaojing Zheng, Lanzhou University, CHINA

#### Emeritus Board Members:

Dr. Vinod Tewary, National Institute of Standards & Technology, USA

(Sorting in alphabetical order by last name)

#### Further Information

About Tech Science Press Open Access Policy Artide Processing Charges Terms and Conditions Privacy Policy

#### Guidelines For Editors For Reviewers

For Authors For Conference Organizers For Subscribers

#### Contact Us

871 Coronado Center Drive, Suite 200, Henderson Nevada, 80052, USA General Contact Email: office@techscience.com Office Locations

 $(\mathbf{\hat{n}})$ 

**CTech Science Press** 

Computers, Materials & Continua DOI:10.32604/cmc.2022.025122 Article

## A Modified-Simplified MPPT Technique for Three-Phase Single-State Grid-Connected PV Systems

## Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang\*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, 12110, Thailand

\*Corresponding Author: Boonyang Plangklang. Email: boonyang.p@en.rmutt.ac.th Received: 12 November 2021; Accepted: 24 January 2022

Abstract: Nowadays, the single state inverter for the grid-connected photovoltaic (PV) systems is becoming more and more popular as they can reduce circuit complexity resulting in less power losses of the inverter. This paper focuses on the use of model predictive control (MPC) to control a 3-phase and 2-level single-state grid-connected inverter in order to regulate the PV maximum power point (MPP). The algorithm of MPC scheme was done to measure the simultaneous current signal including predicting the next sampling current flow. The reference current (Id\*) was used to control the distribution of electrical power from the solar cell to the grid. To be able to control the maximum power point tracking (MPPT) when the sunlight suddenly changes, so that a developing MPPT based on estimation current perturbation and observation (ECP&O-MPPT) technique was used to control the reference current. This concept was experimented by using MATLAB/Simulink software package. The proposed technique was tested and compared with the old technique. The simulation results showed that the developed MPPT technique can track the MPP faster when the light changes rapidly under 1,000 W/m<sup>2</sup>, 25°C standard elimatic conditions. The MPPT time was 0.015 s. The total harmonic distortion (THD) was 2.17% and the power factor was 1.

Keywords: Single-state grid-connected, model predictive control; maximum power point; estimation perturbation and observation

### 1 Introduction

Today, renewable energy technologies are developing rapidly. Solar cells are a rapidly evolving renewable energy source and play an important role in clean energy use [1-3]. Because the energy that comes from sunlight alone is endless. It is also environmentally friendly. No carbon dioxide is released into the atmosphere. This is in line with the agreement to reduce carbon dioxide emissions to reduce global warming [4]. Currently, many countries have tariffs on imported goods based on their carbon dioxide emission rates [5,6]. For this reason, we focus on cleanliness and the environment to avoid



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

fossils and other sources that are harmful to the environment. Solar energy is one of the most widely used sources of natural energy [7,8]. It stems from the rapid development of photovoltaic technology in recent years that has improved efficiency and reliability. However, commercial PV panels require a large area. Therefore, it has an impact on the environment and agricultural areas. So, another solution is to install it on the rooftop (solar rooftop), on the dam and on the lake (floating solar). The problem with PV systems is that the rapid change in radiation, temperature and partial shading of the panels. Another problem is the installation of PV panels on the rooftop in a position that does not correspond to the sun's orbit.

Therefore, MPPT is used to solve all the problems mentioned above. It is also used to optimize photovoltaic systems. There are several ways to track the MPP, such as perturbation and observation (P&O), increment conductance (INC), fuzzy logic (FL), particle swarm optimization (PSO) and the hybrid. The P&O and INC are traditional methods. This method is good at tracking MPP in stable environments [9–12]. The FL method can reduce oscillations around the MPP. The downside is the difficult design [13,14]. The PSO is the best suitable algorithm under partial shading. The disadvantage of this approach is the delay in tracking the MPP [15,16]. The hybrid MPPT technique offers accurate and efficient tracking under rapidly changing environmental conditions. However, this method is complex [17].

So that the PV system produces the MPP. It must be connected to a direct current to direct current (DC-DC) or direct current to alternative current (DC-AC) converter using the aforementioned algorithm to track and control the MPP. Other parts of the photovoltaic system include inverters, controllers, and sensors, which play a key role in harnessing electrical power to the grid. The basic functions for all grid-connected inverters e.g., THD, grid voltage disturbances, grid voltage variations, MPPT and partial shading detection, operation at unity power factor as required by standards, fast voltage detection and fast frequency detection. The THD is limited and imposed by the standard. The MPPT must have very high efficiency in steady-state, fast-tracking during rapid irradiation changes and stable operation at very low irradiation levels. Currently, PV applications can be divided into two main categories, stand-alone systems and grid connected systems. The stand-alone systems are typically used in low power systems such as residential applications. Therefore, battery banks are needed to store the energy produced by PV panels. Grid-connected systems are ideal for injecting maximum power drawn from the PV system to the grid, even when temperatures and radiation levels change. The grid-connected inverter is divided into single-stage and two-stage. The single-stage system connects directly between the array sides and the inverter side as shown in Fig. 1a. The two-stage system requires a DC-DC converter to connect the PV array into the inverter side as shown in Fig. 1b. Two systems configuration plays an important role in converting from DC-AC.



Figure 1: Continued



Figure 1: PV grid-connected system (a) single stage and (b) two stages

An important component of a PV system is the grid-connected system. The grid-connected systems are ideal for injecting maximum power drawn from the PV system to the grid. There are several ways to control the current of grid-connected inverters, such as proportional-integral controller (PI), proportional-resonance controller (PR). PI-based current control implemented in a synchronous frame is commonly used in three-phase converters [18]. In single-phase converters, the PI controller capability to track a sinusoidal reference is limited and PR can offer better performances [19].

The basic functions for all grid-connected inverters are THD [20], grid voltage disturbances, grid voltage variations, maximum power point tracking, partial shading detection, operation at unity power factor as required by standards, fast voltage detection and fast frequency detection. The THD is limited and imposed by the standard. The MPPT must have very high efficiency in steady-state, fast-tracking during rapid irradiation changes and stable operation at very low irradiation levels.

In the literature review, various models are used for designing a controller to control voltage, current, MPP, THD and power factor (p.f.) to meet standards as shown in Tab. 1.

MPPT/Inverter method	Grid-connected	Equipment	Outcome	Ref
Perturb and observe (P&O)/Proportional integral (PI)	Single-stage	MATLAB/Simulink	Good MPPT Unity PF Low THD	[21]
Model predictive control (MPC)	Single-stage	MATLAB/Simulink dSpace	Reduced switching losses Reduced THD	[22]
Continuous-time model predictive control (CTMPC)	Two-stage	MATLAB/Simulink dSpace	Good tracking performance	[23]

## Table 1: PV grid-connected method

(Continued)

Table 1: Continued				
MPPT/Inverter method	Grid-connected	Equipment	Outcome	Ref
Perturb and observe (P&O)/Highly efficient and reliable inverter concept (HERIC)	Transformer less/Two-state	MATLAB/Simulink	High MPPT efficiency	[24]
Perturb and observe (P&O)/Adaptive reference proportional integral (ARPI)	Two-state	Simulation	Good tracking performance Low voltage fluctuation	[25]

4

Several papers were proposed on P&O/PI, MPC, CTMPT, P&O/HERIC and P&O/AERPI. The purpose is to enable the system to rapidly track MPP when irradiation levels and temperatures change rapidly. The P&O method is still popular for MPPT. However, all of the above methods have been able to keep track of MPP very well. The THD and voltage fluctuation are low.

Today, the MPC are widely used such as motor drives and grid-connected inverter. Because it is a simple method, robustness and fast-dynamic response. Unlike classic linear controls such as PI, PR, this approach can be used to isolate the dependent control loop and ultimately improve the dynamic response. The MPC method is a control system that can control the injection of current into the grid. The grid current is measured to calculate pre-time current. Subsequently, the current at time t + 1 is calculated. The values are then estimated from the output voltage vector of the 3-phase and 2-levels inverter. After each vector with all different output voltages is computed. The correct gate-drive signal is then generated. Therefore, the MPC is suitable for use under non-linear system conditions.

This paper proposes a suitable control method for single-state grid-connected inverters. Additionally, the ECP&O-MPPT algorithm has been optimized to track the MPP faster. The MPP can be tracked immediately when the irradiation changes suddenly. Where, the ECP&O is used to generate the PV output current reference corresponding to the MPPT. Then, the MPC is used to maintain the PV output current corresponding to the referent current and provide the inverter control signal. As a result, the reliability and efficiency of this system are increased. In addition, this study also included a contribution to the literatures related to reducing the number of power semiconductors. The developed system effectively controls the voltage, current, MPPT, THD and power factors.

This paper is organized as follows. Section 2 described the grid-connected inverter modeling and configuration. Section 3 devoted to maximize power point tracking and inverter design. The simulation results and conclusion were discussed in Sections 4 and 5, respectively.

Power (W)

## 2 Grid-connected Inverter Modeling and Configuration

The SPR-315E-WHT-D PV were used in this simulation. Eleven series modules and two parallel strings were used. The parameters of PV panel are illustrated in Tab. 2. The IV and PV characteristics under various irradiations at 25°C are shown in Fig. 2.

Parameter	Value
Maximum power at standard temperature condition (STC) (W)	315.072
Cell series modules (Cells)	11
Cell parallel (Cells)	2
Open circuit voltage (V)	64.6
Voltage at MPPT (V)	54.7
Short circuit current (A)	6.14
Current at MPPT (A)	5.76
Temperature coefficient of open circuit vo $(2^{0}/2^{\circ}C)$	oltage -0.27269
Temperature coefficient of short circuit $ci$ (%/°C)	nrrent 0.061694
TCS.	Past
1 kW/m <sup>2</sup>	
1 kW/m <sup>2</sup>	
1 kW/m <sup>2</sup> 0.5 kW/m <sup>2</sup> 0.2 kW/m <sup>2</sup>	
1 kW/m <sup>2</sup> 0.5 kW/m <sup>2</sup> 0.2 kW/m <sup>2</sup> 100 208 200 400 Vgtage	500 609 700
1 kW/m <sup>2</sup> 0.5 kW/m <sup>2</sup> 0.2 kW/m <sup>2</sup> 100 200 300 400 Voltage	500 600 700 11Wm <sup>2</sup>
1 kW/m <sup>2</sup> 0.5 kW/m <sup>2</sup> 0.2 kW/m <sup>2</sup> 100 208 300 400 Voltage	500 600 700 1 kW/m <sup>2</sup> 0,5 kW/m <sup>2</sup>
1 kW/m <sup>2</sup> 0.5 kW/m <sup>2</sup> 0.2 kW/m <sup>2</sup> 100 200 260 400 Voltage	500 600 700 1 kW/m <sup>2</sup> 0,5 kW/m <sup>2</sup> 0,2 kW/m <sup>2</sup>

Figure 2: IV and PV characteristics of PV panel at 25°C and vary irradiations

The simple structure of three phase grid-connected inverter is shown in Fig. 3. The system consists of PV panel, 3-phase inverter, grid impedance ( $R_g$  and  $L_g$ ) and 3-phase grid. The parameters of the system are illustrated in Tab. 3.



(1)



Figure 3: Basic three phase grid-connected inverter schematic diagram

Table 3: Grid-connected system parameters

Subsystem	Symbol	Value
Grid voltage	Vg Co	57 380 V
Grid frequency	(fg	50 Hz
Grid resistance	$R_{g}$	0.5 \Omega
Grid inductance		15 mH
Input capacitor	C <sub>i</sub> Ož	50 µF

### 3 MPPT and Inverter Design

To track the MPP with a simple and faster than the P&O method, Eq. (1) thus gives rise to a new method known as the ECP&O method. It is shown in Fig. 4. The ECP&O method works as a period. By compare of photovoltaic power at the current time with the previous period. If the rate of change in power is positive, the system will adjust the command current in the same direction. If the rate of change in power is negative, the system will adjust the command current in the opposite direction. The advantages are simple and uncomplicated. Therefore, ECP&O was used to control the  $I_d^*$  of the inverter.

 $I_{\text{dinit}}{=}I_{\text{mpp}}{*}(I_{\text{rr}}/1000)$ 

where

6

 $I_{dinit} = initial command current$ 

 $I_{mpp} = current at maximum power$ 

 $I_{rr}$  = measurement of irradiation

The MPC was used in the control of inverter. It was a theoretical approach to apply for grid connected inverters. The theory was presented by referring to the control of the electric drive system to study and easy to understand the application as shown in Fig. 5.

Basically, the number is limited by the number of possible states of the constant power supply, that from the status of the power converter operation, in which the above process allows to predict the next time status [26]. The predicted values calculated the state of the correct switching action and was selected by the cost function [27]. The control technique can be summarized as follows:

- 1. Set the equation cost function.
- Set the equation cost function.
   Create inverter model and switch design of switch equipment.
   Create models for prediction.



Figure 5: Block diagram of model predictive control

The purpose of MPC is to limit the error between the measured current and the reference current. A cost function can be written in the form of a perpendicular axis [28]. A measurement of the error between reference and measured values is shown in Eq. (2).

 $g = |i_{\alpha}^{*}(k+1) - i_{\alpha}^{p}(k+1)| + |i_{\beta}^{*}(k+1) - i_{\beta}^{p}(k+1)|$ 

(2)

8

where

 $i^{p}_{\alpha}(k+1) = \text{Real part}$ 

 $i^{p}_{\beta}(k+1) =$ Imaginary part

 $i^{p}(k+1) = Value ext{ of the load vector}$ 

 $i_{\alpha}^{*}(k+1) = \text{Real part of the reference current}$ 

 $i_{\beta}^{*}(k+1) =$ Imaginary part of the reference current

The value of the load vector was used to determine the voltage vector. This predicted current was used for the load model. The principles of predicting the current of an inverter, it can be determined by the voltage drop and the grid voltage, as shown in Fig. 6. The filter (L-filter) can be determined by solving Eqs. (5) and (6). However, the L-filter can be adjusted. Because the variations in the L-filter values can affect the performance of MPC in terms of the root mean square of grid-currents. The fast dynamic response is not affected.



Figure 6: Equivalent circuit of inverter connection

The prediction of the load current in the discrete model of the model can be explained by Eq. (3).

 $v = Ri + L\frac{d_i}{d_t} + e$ (3)

where V is the inverter output voltage vector, i is the load current vector and e is the back-emf voltage vector.

Eq. (3) can be represented by a discrete-time estimation function.  $T_s$  is the sampling time. It is shown in Eq. (4).

 $\frac{d_i}{d_t} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s}$ (4)

By substitute Eq. (4) into Eq. (3), then Eqs. (5) and (6) are obtained as follow:

$$v_{k} = Ri(k) + L \frac{i(k+1) - i(k)}{Ts} + e(k)$$

$$i(k+1) = \frac{T_{s}}{L} (v(k) - e(k) + i(k) \left(1 - \frac{RT_{s}}{L}\right)$$
(6)

 $\mathbf{R} + \mathbf{I} = \frac{1}{L} (\mathbf{r}(\mathbf{k}) - \mathbf{c}(\mathbf{k}) + \mathbf{R}\mathbf{s}) (\mathbf{r} - \mathbf{L})$ Eq. (6) was used to predict the load current that will occur in the next order by comparing with the reference current i\*(k) of the system. To analyzing the output voltage of a 3-phase inverter, it is a complex method that can be expressed by the voltage vector of a 3-phase and 2-level. The inverters module is represented by the state of the two-state switch: on and off (S<sub>11</sub>, S<sub>12</sub>, S<sub>13</sub>=a, b, c).

When a, b, c is the phase voltage. The 3-phase system can be used to determine the gate drive signal by Eq. (7).

 $S = 2/3(S_a + aS_b + a2S_c)$ 

In order to generate the 3-phase inverter output signal from the control signals  $S_a$ ,  $S_b$  and  $S_c$ . It can be seen that the conversion of the direct current (DC) to the alternative current (AC) with a simple mathematical equation. It can be summarized as the Eq. (8). The flowchart of model predictive control algorithm is shown in Fig. 7. The state of the signal generator is shown in Tab. 4.



9

(7)

(8)
Vector	Output voltage equation	Gate drive			
		S <sub>1</sub>	$S_2$	$S_3$	
0	0	on	off	off	
1	(2/3)V <sub>d</sub>	on	off	off	
2	$((1/3)V_{dc}) + (j(3)^{1/2}/3)V_{dc})$	on	on	off	
3	$((-1/3)V_{de}) + (j(3)^{1/2}/3)V_{de})$	off	on	off	
4	$-(2/3)V_{dc}$	off	on	on	
5	$-((1/3)V_{dc}) - (j(3)^{1/2}V_{dc})$	off	off	on	
6	$((1/3)V_{dc} - (j(3)^{1/2}/3)V_{dc})$	on	off	on	
7	0	on	on	on	

Table 4: Inverter output voltage and gate drive signal

#### **4** Simulation Results

In order to test the performance of the maximum power point tracking of the proposed algorithms, the tests were compared with the increment conductance and the traditional perturbation and observation. The simulation system and controllers schematic diagram of the grid-connected inverter is shown in Fig. 8. The system consists of PV panel, 3-phase inverter, 3-phase grid, controller and sensor.



Figure 8: Simulation system and controllers schematic diagram of the grid-connected inverter

Fig. 9 shows the simulation diagram of the ECP&O MPPT and MPC grid-connected. The solar irradiation sensor converts the light intensity to the referent initial current  $(I_{dint})$ . The PV voltage  $(V_{pv})$ , PV current  $(I_{pv})$  and  $I_{dint}$  are processed by the MPPT controller. The reference current  $(I_{dref})$  is forwarded to the MPPT controller. to the MPC. The MPC grid-connected consists of four signal input sources. The reference current input and the grid current input are used to calculate and predict the current to generate the  $S_a$ ,  $S_b$  and  $S_c$  gate drive signals. Both of these variables are required to convert from a 3-phase system into a 2-phase reference ( $\alpha\beta$ ). Fig. 10 shows a simulation diagram of a 3-phase system to a 2-phase reference ( $\alpha\beta$ ).

 $V_g$  and  $V_{dc}$  are the reference grid voltage and reference PV voltage. The MPC is in the form of an S-Function. The principle of MPC is shown in Fig. 11. The diagram shows the position of the current vector  $(i_e)$ . This consists of reference current (i') or  $i_{ref}$ , actual current (i) or  $i_k$  and predictive current  $(i_p)$  or i(k + 1), then predicts the current value at the operating state of the gate drive signal to control the 3-phase inverter. Thus, the MPC operates in the correct position and corresponds to the voltage vector V(k).



Figure 9: Simulation diagram of the MPPT and MPC grid-connected



Figure 10: Simulation diagram of a 3-phase system to a 2-phase reference  $(\alpha\beta)$ 



Figure 11: Principle of electric current prediction from current vector

Two following operating conditions were used to check the algorithm performances in the gridconnected system:

1. 1,000 W/m<sup>2</sup>, 25°C standard climatic conditions,

2. Rapidly changes in solar irradiation.

To demonstrate the performance of the proposed method. The MPPT under standard climate is tested. Fig. 12 shows the comparison of PV output power. The MPPT time of the proposed is 0.015 s. The proposed method tracks the MPP fastest. Fig. 13 shows the comparison of the I<sub>dref</sub>. The oscillation of the proposed method is minimal. Fig. 14 shows the comparison of the grid current waveforms. Obviously, the proposed method allows the system to track the peak current as quickly as possible. Fig. 15 shows the comparison of the proposed method allows the system to track the peak current as quickly as possible. Fig. 15 shows the comparison of the proposed method is the lowest. In comparison, the proposed method is best suited for the MPC grid-connected.



Figure 12: Comparatives of PV array power under standard climatic condition

To verify the performance of the proposed PV grid-connected system. The system was tested under rapid changes in solar radiation. The comparison result is shown in Fig. 16. By comparison, it is clearly seen that initially at the 1000 W/m<sup>2</sup> radiation level. The proposed algorithm tracks the maximum power point the fastest. The second is the INC algorithm. The last order is the P&O algorithms. While the irradiation is rapidly dropped to 200 W/m<sup>2</sup>. The MPPT of all algorithms was also able to track the MPP. This demonstrates the performance of the MPC grid-connected algorithm. However, the proposed algorithm has the least oscillation around the maximum power point. Where the irradiation

is rapidly increased from 200 to 500 W/m<sup>2</sup>. The most performance MPPT algorithm is the proposed algorithm.



Figure 13: Comparatives of  $I_{dref}$  under standard climatic condition

Fig. 17 shows the comparatives of grid current under rapid changes in solar irradiation. The simulation results show that the proposed algorithm is capable of tracking current at MPPT quickly. The grid current waveform under the rapid change in solar radiation of the P&O, INC and ECP&O algorithms is shown in Fig. 18. It has been shown that under rapid changes in radiation. The ECP&O algorithm has the best performance due to its most sinusoidal signal characteristics. As a result, the THD is the lowest as shown in Fig. 19. The THD of ECP&O algorithm is 2.17%. Fig. 20 shows a comparison between  $V_g$  and  $I_g$  of all MPPT algorithms that the system has a unity power factor.





Figure 14: Comparatives of grid current under standard climatic condition (a) P&O (b) INC (c) ECP&O (d) overall comparatives





Figure 15: Comparatives of THD under standard climatic condition





Figure 16: Comparatives of PV array power under rapidly changes in solar irradiation (a) overall comparatives (b) 1000 W/m<sup>2</sup> (c) 200 W/m<sup>2</sup> (d) 500 W/m<sup>2</sup>







CMC, 2022











19



#### 5 Conclusion

This study examines the efficiency and characteristics of a single-state grid-connected inverter. The ECP&OMPPT algorithm is proposed to control the current injected into the grid. The efficiency of the inverter was determined with the ECP&O and MPC algorithms. The simulation results show that the system efficiency corresponds to injected currents into the grid. The THD was standardized and unity power factor. This paper attempts to improve the grid-connected inverter to simplify control, reduce power loss in converters, fast-tracking maximum power point when irradiation changes rapidly, and maintain THD levels within standards. By comparing all the reference current control algorithms, it was found that ECP&O is the most suitable for the MPC algorithm as it provides the best tracking for MPPT. From the simulation results, it can be concluded that the MPC algorithm is suitable for the PV system grid-connected inverters. As can be seen from the grid currents are usually sinusoidal, unity power factor and minimal THD. By compassion with the MPC method as shown in Tab. 1, in comparison, the proposed method has lower total harmonic distortion. It also has a lower oscillation of the power around the MPP. However, the MPC method is suitable only for a simple MPPT method. If it was used with complex MPPT methods, the power oscillations around the MPP and the THD might be too high.

Acknowledgement: This research is supported by the MATLAB/Simulink, Rajamangala University of Technology Rattanakosin. The authors would like to thank Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi for strong support on the laboratory instruments.

Funding Statement: The authors received no specific funding for this study.

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no conflicts of interest to report regarding the present study.

### References

- M. Usman Khan, K. M. Hasan, A. Faisal Murtaza, H. M. Usman and H. A. Sher, "A robust MPPT [1] control based on double ended forward converter architecture," Computers, Materials & Continua, vol. 70, no. 1, pp. 135-150, 2022.
- M. Y. Ali Khan, H. Liu, Z. Yang and X. Yuan, "A comprehensive review on grid connected photovoltaic inverters, their modulation techniques, and control strategies," *Energies*, vol. 13, no. 16, pp. 4185, 2020. M. A. Ebrahim, A. Osama, K. M. Kotb and F. Bendary, "Whale inspired algorithm based MPPT
- [3] controllers for grid-connected solar photovoltaic system," Energy Procedia, vol. 162, pp. 77-86, 2019.
- K. -Y. Lo and Y. -M. Chen, "Design of a seamless grid-connected inverter for microgrid applications," [4] IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 1, pp. 194-202, 2020.
- D. Pilakkat and S. Kanthalakshmi, "Single phase PV system operating under partially shaded conditions [5] with ABC-PO as MPPT algorithm for grid connected applications," Energy Reports, vol. 6, pp. 1910-1921, 2020
- A. Rizqiawan, P. Hadi and G. Fujita, "Development of grid-connected inverter experiment modules for [6] Rizerawan, T. Hart and G. Fujita, Deterophicit of grid connected interfer experiment of grid connected power converters
   L. Guo, N. Jin, Y. Li and K. Luo, "A model predictive control method for grid-connected power converters
- [7] without AC voltage sensors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 2, pp. 1299-1310, 2021
- M. M. Samy, M. I. Mosaad, M. F. El-Naggar and S. Barakat, "Reliability support of undependable grid using green energy systems: Economic study," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 14528–14539, 2021.
   M. Mokhlis, M. Ferfra and R. Idrissi, "High gain observer-based control for grid-connected PV system [8]
- [9] under partial shading effect," International Journal of Intelligent Engineering and Systems, vol. 13, no. 2, pp. 161-172, 2020.
- M. Farhat, O. Barambones and L. Sbita, "A real-time implementation of novel and stable variable step size [10] MPPT," Energies, vol. 13, no. 18, pp. 4668, 2020.
- [11] J. Macaulay and Z. Zhou, "A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic
- J. Macamay and Z. Zhou, A Huzzy logical obset variable step size Feed with Fr algorithm for photostolate system," *Energies*, vol. 11, no. 6, pp. 1340, 2018.
   F. A. Banakhr and M. I. Mosaad, "High performance adaptive maximum power point tracking technique for off-grid photovoltaic systems," *Scientific Reports*, vol. 11, pp. 20400, 2021.
   S. Bhattacharyya, D. S. Kumar P, S. Samanta and S. Mishra, "Steady output and fast tracking MPPT" and the set of the processing of the set of the processing of the set.
- (SOFT-MPPT) for P&O and Inc algorithms," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 12, no. 1, pp. 293-302, 2021.
- [14] X. Ge, F. W. Ahmed, A. Rezvani, N. Aljojo, S. Samad et al., "Implementation of a novel hybrid BAT-fuzzy controller based MPPT for grid-connected PV-battery system," Control Engineering Practice, vol. 98, pp. 104380, 2020
- [104360, 2020.
  [15] M. A. Abdullah, T. Al-Hadhrami, C. W. Tan and A. H. Yatim, "Towards green energy for smart cities: Particle swarm optimization based MPPT approach," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 58427–58438, 2018.
  [16] J. Ahmed and Z. Salam, "An enhanced adaptive P&O MPPT for fast and efficient tracking under varying
- environmental conditions," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 3, pp. 1487-1496, 2018.
- M. Jiang, M. Ghahremani, S. Dadfar, H. Chi, Y. N. Abdallah et al., "A novel combinatorial hybrid SFL-PS algorithm based neural network with perturb and observe for the MPPT controller of a hybrid PV-storage system," Control Engineering Practice, vol. 114, pp. 104880, 2021.
- [18] H. Liao, X. Zhang and Z. Ma, "Robust dichotomy solution-based model predictive control for the gridconnected inverters with disturbance observer," CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 5, no. 2, pp. 81-89, 2021
- [19] S. Barcellona, M. Barresi and L. Piegari, "MMC-based PV single-phase system with distributed MPPT," Energies, vol. 13, no. 15, pp. 3964, 2020.
- [20] X. Chen, X. Ruan, D. Yang, W. Zhao and L. Jia, "Injected grid current quality improvement for a voltagecontrolled grid-connected inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 2, pp. 1247-1258, 2018.

- [21] M. Aourir, A. Abouloifa, I. Lachkar, C. Aouadi, F. Giri et al., "Nonlinear control and stability analysis of single stage grid-connected photovoltaic systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 115, pp. 105439, 2020.
- [22] W. Alhosaini, Y. Wu and Y. Zhao, "An enhanced model predictive control using virtual space vectors for grid-connected three-level neutral-point clamped inverters," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, no. 4, pp. 1963-1972, 2019.
- [23] R. Errouissi, A. Al-Durra and S. M. Muyeen, "A robust continuous-time MPC of a DC-DC boost converter interfaced with a grid-connected photovoltaic system," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, p. 1610–1620, 2010.

- no. 6, pp. 1619–1629, 2016.
  [24] A. Yüksel and E. Özkop, "Control of single phase grid connected transformerless PV inverter system," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 25, no. 2, pp. 143–150, 2019.
  [25] A. Alhejji and M. I. Mosaad, "Performance enhancement of grid-connected PV systems using adaptive reference PI controller," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, pp. 541–554, 2021.
  [26] C. S. Lim, S. S. Lee, I. U. Nutkani, X. Kong and H. H. Goh, "Near-optimal MPC algorithm for actively damped grid-connected PWM-VSCs with LCL filters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 6, pp. 4578–4580, 2020.
- [27] Y. Guo, H. Sun, Y. Zhang, Y. Liu, X. Li *et al.*, "Duty-cycle predictive control of quasi-z-source modular cascaded converter based photovoltaic power system," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 172734–172746, 2020.
  [28] P. Kakosimos and H. Abu-Rub, "Predictive control of a grid-tied cascaded full-bridge NPC inverter for reducing high-frequency common-mode voltage components," *IEEE Transactions on Industrial Informativation*, 2018. ics, vol. 14, no. 6, pp. 2385-2394, 2018.



# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายอนุชิต อุไรรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	<b>9</b> กรกฎาคม 2516
ที่อยู่	703 หมู่ 2 ต.วังก์พง อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า
	สาขาไฟฟ้ากำลัง จากศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อ พ.ศ. 2544
	สำเร็จการศึกษาระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า
	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ
	นครเหนือ เมื่อ พ.ศ. 2549
ความชำนาญเฉพาะทาง	อิเล็กทรอนิกส์กำลังและพลังงานทดแทน

## ผลงานวิจัย

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "An Alternative Perturbation and Observation Modifier Maximum Power Point Tracking of PV Systems", Symmetry, 14, 2522, pp1-17.

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "A modified-simplified MPPT Technique for Three-Phase Single-State Grid-Connected PV Systems", CMC-Computers, Materials & Continua, 2021.

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "Analysis of a direct PV application for LED bulbs in daytime without DC to AC Converter and Battery", The 2017 International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, pp 161-164, 8-10 March 2017, 2021.

Anuchit Aurairat and Boonyang Plangklang "Review Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for PV system", IEET-International Electrical Engineering Transactions, 4, 2017, pp7-11.

อนุชิต อุไรรัตน์ บุญยัง ปลั่งกลาง และ เฉลิม จินาตุน "การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศทาง ที่ไม่สอดคล้องกับทิศทางการโคจรของดวงอาทิตย์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON) ครั้งที่ 43, ณ โรงแรมท็อปแลนด์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก, ไทย, หน้าที่ 516-519, 28-23 ตุลาคม 2563.