



การควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ



พระเดช เถ้าสุวรรณกุล

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การควบคุมการสร้างกำลังไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การควบคุมการสร้างกำลังไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ"

ของ พีระเดช เล้าสุวรรณกุล

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จันทร์มินทร์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พนัส นัถฤทธิ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ดร.จิรรัตน์ เอี่ยมสอาด)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ดร.เศรษฐา ตั้งคำวานิช)

อนุมัติ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การควบคุมการสร้างกำลังไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสง ไม่สม่ำเสมอ
ผู้วิจัย	พีระเดช เล้าสุวรรณกุล
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ ปร.ด. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	แผงเซลล์แสงอาทิตย์, การติดตามจุดกำลังสูงสุด, การบังแสงบางส่วน, การจำกัดย่านการค้นหา, ความนำส่วนเพิ่ม

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงสุดในแต่ละสภาพอากาศรวมทั้งกรณีที่มีความเข้มแสงบนกลุ่มแผงมีค่าไม่สม่ำเสมอโดยย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด การวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่นำเสนอสามารถตรวจพบการบังแสงบางส่วนซึ่งทำให้ความเข้มแสงบนกลุ่มแผงมีค่าไม่สม่ำเสมอโดยอาศัยการแปรผันแบบเชิงเส้นของค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดกับค่ากระแสจรัลด์ของกลุ่มแผง และการแปรผันแบบเชิงเส้นของค่าความนำที่จุดกำลังสูงสุดกับค่าความนำอ้างอิงซึ่งหาจากอัตราส่วนของกระแสจรัลด์ต่อแรงดันวงจรมืดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศในขณะนั้น และรู้ผลตรวจหาการบังแสงบางส่วนได้ทันทีหลังจากติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรกด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังและกระแสด้านออกของกลุ่มแผง หากตรวจพบการบังแสงบางส่วนจะกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างภายในย่านแรงดันของกลุ่มแผงซึ่งถูกจำกัดเพื่อประหยัดเวลาการค้นหาด้วยค่ากำลังสูงสุดที่พบกับค่ากระแสจรัลด์และแรงดันวงจรมืดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศในขณะนั้น โดยย่านจะถูกปรับให้แคบลงอีกเมื่อพบค่ากำลังที่สูงกว่าค่ากำลังสูงสุดเดิม จากการจำลองผล พบว่า วิธีที่นำเสนอสามารถตรวจพบการบังแสงบางส่วนได้อย่างถูกต้อง และสามารถย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่คล้ายกันจากการทบทวนวรรณกรรม วิธีที่นำเสนอมีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างที่แคบกว่า มีช่วงแกว่งของค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแผงระหว่างค้นหาที่แคบกว่า และติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างได้เร็วกว่า นอกจากนี้ ผลการทดสอบด้วยชุดวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแสดงให้เห็นว่า การกำหนดช่วงก้าวแบบแปรผันที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของ



ค่ากำลังและกระแสต้านออกของแผงนั้นสามารถประยุกต์ใช้งานจริงได้



<b>Title</b>	CONTROL OF PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION UNDER UNEVEN IRRADIANCE
<b>Author</b>	PEERADECH LOUSUWANKUN
<b>Advisor</b>	Associate Professor Niphat Jantharamin, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	Ph.D. Dissertation in Electrical Engineering, Naresuan University, 2021
<b>Keywords</b>	Photovoltaic module, Maximum-Power-Point Tracking, Partial shading, Search area restriction, Incremental conductance

### ABSTRACT

In this dissertation, an approach to maximizing output power of photovoltaic (PV) arrays under each weather condition including uneven irradiance on the array is presented, by which the array operating point is moved to the array maximum power point (MPP). Analysis of output electrical characteristics of the array depended on mathematical models. The proposed maximum-power-point tracking (MPPT) technique detected partial shading, which caused uneven irradiance on the array, by using a linear relationship between the MPP current and the short-circuit current of the array, and a linear relationship between the MPP conductance and the reference conductance calculated from the ratio of short-circuit current to open-circuit voltage of the array under the present weather condition. Inspection of partial shading was evaluated right after the first MPP was found by means of the incremental conductance (IncCond) method with step-size adaptation which depended on the array output power and current variation. When the partial shading was detected, a range of array output voltage was scanned to search for a global maximum power point (GMPP). To save the tracking time, the search area was restricted by using the discovered maximum power, the short-circuit current, and the open-circuit voltage of the array under the present weather condition. The search area was further narrowed during the scan if the newly discovered array power value

was higher than the previously recorded one. Simulation results under partial-shading conditions indicated that the proposed MPPT technique performed the partial-shading detection accurately and moved the array operating point to the GMPP successfully. In comparison to the two previously published algorithms, the proposed technique gave the narrower area of GMPP search, the lower swing range of power during the scan, and the higher speed of tracking. In addition, experimental results from hardware implementation on MPPT for a PV module by using the IncCond algorithm showed that variable step-size determination based on the module power and current variation was viable in practice.



## ประกาศคุณูปการ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้  
คำแนะนำในการศึกษาระดับปริญญาเอกและวิธีดำเนินงานวิจัย ตลอดจนตรวจทานวิทยานิพนธ์  
จนกระทั่งการดำเนินงานวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.นเรศวร ที่มอบทุนสนับสนุนการศึกษาระดับปริญญาเอก  
ทำให้ผู้เขียนสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และเหนือสิ่งอื่นใด ขอกราบขอบพระคุณคุณยายสายหยุด เจนเขตรกิจ คุณพ่อจำลอง และคุณ  
แม่สุดใจ เล้าสุวรรณกุล ที่มอบความรัก ความเมตตา และคอยเป็นกำลังใจจนกระทั่งผู้เขียนประสบ  
ความสำเร็จอย่างทุกวันนี้

พีระเดช เล้าสุวรรณกุล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 คำสำคัญหรือคำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	4
2.1.1 กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.1.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1.3 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.1.4 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	10

2.1.5	ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	12
2.1.6	คุณลักษณะของกลุ่มแผงภายใต้สภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ .....	14
2.1.7	ผลของความเข้มแสงต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด .....	15
2.2	การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	17
2.2.1	วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงสม่ำเสมอ .....	18
2.2.2	วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างภายใต้การบังแสงบางส่วน .....	24
2.3	วงจรทบทวนระดับแรงดัน .....	29
2.3.1	หลักการทำงานของวงจรทบทวนระดับแรงดัน .....	29
2.3.2	ค่าความพลีวของสัญญาณแรงดันด้านออก .....	32
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	34
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย .....	34
3.2	การจำลองคุณลักษณะด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	35
3.3	ผลกระทบของการบังแสงบางส่วนต่อคุณลักษณะด้านออกของกลุ่มแผง .....	42
3.3.1	ระดับความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสง .....	42
3.3.2	จำนวนแผงที่ถูกบังแสง .....	44
3.3.3	จำนวนระดับความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ได้รับแสงแต่ละระดับ .....	46
3.3.4	จำนวนแผงที่ถูกบังแสงในแต่ละแถว .....	49
3.4	วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่นำเสนอ .....	51
3.4.1	การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง .....	52
3.4.2	การจำกัดย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง .....	56
3.4.3	การติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีที่นำเสนอ .....	58
3.5	การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด .....	63

3.5.1	การจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ .....	63
3.5.2	การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม .....	65
บทที่ 4	ผลการวิจัย .....	69
4.1	ผลการทดสอบวิธีที่นำเสนอด้วยการจำลองผล .....	69
4.1.1	การทดสอบการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง ....	69
4.1.2	การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอ .....	72
4.1.3	การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้การบังแสงบางส่วน .....	80
4.1.4	การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ...	94
4.2	ผลการทดสอบวิธีความนำส่วนเพิ่มด้วยชุดอุปกรณ์จริง .....	101
4.2.1	กรณีที่จุดทำงานเริ่มต้นอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด .....	102
4.2.2	กรณีที่จุดทำงานเริ่มต้นอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด .....	103
4.2.3	กรณีที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว .....	104
บทที่ 5	บทสรุป .....	110
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	110
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	111
บรรณานุกรม	.....	112
ประวัติผู้วิจัย	.....	117

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 อัลกอริทึมของวิธีป็นเนินและวิธีพีแอนด์โอ [28].....	21
ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองผล.....	36
ตาราง 3 ผลการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง.....	72
ตาราง 4 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก).....	73
ตาราง 5 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก).....	74
ตาราง 6 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข).....	77
ตาราง 7 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข).....	78
ตาราง 8 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก).....	82
ตาราง 9 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก).....	82
ตาราง 10 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข).....	85
ตาราง 11 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข).....	85
ตาราง 12 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค).....	89
ตาราง 13 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค).....	89
ตาราง 14 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง).....	92
ตาราง 15 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง).....	92
ตาราง 16 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 1.....	98
ตาราง 17 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 1.....	98
ตาราง 18 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 2.....	99
ตาราง 19 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 2.....	100



ตาราง 20 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 3 .....	100
ตาราง 21 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 3 .....	100



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน [3] .....	4
ภาพ 2 แผนภาพเค้าร่างแสดงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [3] .....	6
ภาพ 3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ [4] .....	7
ภาพ 4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในความเป็นจริง [4] .....	8
ภาพ 5 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [9] .....	9
ภาพ 6 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [9] .....	10
ภาพ 7 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [9] .....	11
ภาพ 8 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [9] .....	12
ภาพ 9 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [9] .....	13
ภาพ 10 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [9] .....	13
ภาพ 11 ตัวอย่างคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผงเมื่อถูกบังแสง [13] .....	14
ภาพ 12 ตัวอย่างคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงเมื่อถูกบังแสง [13] .....	15
ภาพ 13 ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [14] .....	16
ภาพ 14 ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [14] .....	16
ภาพ 15 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป [28] .....	20
ภาพ 16 การลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของวิธีป็นเนินและวิธีพีแอนด์โอ [28] .....	21
ภาพ 17 อัลกอริทึมของการหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม [29, 35] .....	23
ภาพ 18 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง [40] .....	26
ภาพ 19 แผนภาพวงจรทระดับแรงดัน [44] .....	29

ภาพ 20	วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [44] .....	29
ภาพ 21	วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [44] .....	30
ภาพ 22	สัญญาณไฟฟ้าในวงจรทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [44] .....	30
ภาพ 23	กราฟอัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดัน [44] .....	32
ภาพ 24	สัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [44] .....	33
ภาพ 25	กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุในวงจรทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [44] .....	33
ภาพ 26	แผนภาพการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นกลุ่มแผง .....	36
ภาพ 27	กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วย 2 แถว ๆ ละ 10 แผง .....	38
ภาพ 28	ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของกลุ่มแผง .....	38
ภาพ 29	ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผง .....	39
ภาพ 30	ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของกลุ่มแผง .....	40
ภาพ 31	ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผง .....	40
ภาพ 32	เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผงเมื่อ 6 แผงถูกบังแสง .....	41
ภาพ 33	เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงเมื่อ 6 แผงถูกบังแสง .....	41
ภาพ 34	การกำหนดความเข้มแสงบนแผงจำนวน 4 แผงที่ถูกบังแสง .....	43
ภาพ 35	ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน .....	43
ภาพ 36	ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน .....	44
ภาพ 37	การกำหนดจำนวนแผงที่ถูกบังแสงจนเหลือ $600 \text{ W/m}^2$ .....	45
ภาพ 38	ผลของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน .....	45
ภาพ 39	ผลของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน .....	46
ภาพ 40	การกำหนดความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ถูกบังแสง .....	47
ภาพ 41	ผลของความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน .....	48

ภาพ 42	ผลของความเข้มแสงและจำนวนแฉงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน .....	48
ภาพ 43	การกำหนดจำนวนแฉงในแต่ละกึ่งที่ถูกบังแสงจนเหลือ $600 \text{ W/m}^2$ .....	49
ภาพ 44	ผลของจำนวนแฉงในแต่ละแถวที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน .....	50
ภาพ 45	ผลของจำนวนแฉงในแต่ละแถวที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน .....	50
ภาพ 46	ตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน.....	53
ภาพ 47	ค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของแฉงเซลล์แสงอาทิตย์ในฐานข้อมูล.....	55
ภาพ 48	ค่า $k_i$ และ $k_p$ ของแฉงเซลล์แสงอาทิตย์ในฐานข้อมูล.....	55
ภาพ 49	การกำหนดและปรับขอบเขตเพื่อลดความกว้างของย่านการค้นห.....	58
ภาพ 50	ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีที่นำเสนอ .....	59
ภาพ 51	ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง.....	61
ภาพ 52	ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ที่ใช้จำลองผล .....	63
ภาพ 53	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด .....	66
ภาพ 54	วงจรทระดับแรงดันที่สร้างขึ้น.....	66
ภาพ 55	ภาพรวมของชุดทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด .....	67
ภาพ 56	ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม .....	68
ภาพ 57	ตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแฉงในแบบจำลองในแต่ละสภาพอากาศ.....	70
ภาพ 58	รูปแบบการบังแสงบางส่วนที่กำหนดขึ้นเพื่อทดสอบ .....	71
ภาพ 59	การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแฉงในแบบจำลอง .....	71
ภาพ 60	เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแฉงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก).....	74
ภาพ 61	ค่าดิฟฟิไซเคิลแบบแปรผันช่วงก้าวตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก) .....	75
ภาพ 62	แรงดันต้านออกของกลุ่มแฉงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก).....	75
ภาพ 63	กำลังต้านออกของกลุ่มแฉงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก).....	76

ภาพ 64	เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)	78
ภาพ 65	ค่าตัวตัดสี่เหลี่ยมแบบแปรผันช่วงก้ำวตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)	79
ภาพ 66	แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)	79
ภาพ 67	กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)	80
ภาพ 68	การกำหนดเงื่อนไขของสภาพอากาศในหัวข้อ 4.1.3 ก) และ ข)	81
ภาพ 69	เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)	83
ภาพ 70	แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)	83
ภาพ 71	กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)	84
ภาพ 72	เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)	86
ภาพ 73	แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)	86
ภาพ 74	กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)	87
ภาพ 75	การกำหนดเงื่อนไขของสภาพอากาศในหัวข้อ 4.1.3 ค) และ ง)	88
ภาพ 76	เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)	90
ภาพ 77	แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)	90
ภาพ 78	กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)	91
ภาพ 79	เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)	93
ภาพ 80	แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)	93
ภาพ 81	กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)	94
ภาพ 82	การกำหนดเงื่อนไขของสภาพอากาศในหัวข้อ 4.1.4	95
ภาพ 83	เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4	96
ภาพ 84	แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4	96
ภาพ 85	กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4	97

ภาพ 86	ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงที่ใช้	101
ภาพ 87	ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงที่ใช้	102
ภาพ 88	ผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.1	103
ภาพ 89	ผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.2	104
ภาพ 90	แรงดันด้านนอกของแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3	105
ภาพ 91	กระแสด้านนอกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3	106
ภาพ 92	กำลังด้านนอกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3	106
ภาพ 93	ค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของวงจรระดับแรงดันตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3	107





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในสถานการณ์ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ปริมาณพลังงานสำรองลดลงและวิกฤติด้านพลังงานมีแนวโน้มเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ผลิตมาจากถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ และกระบวนการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเหล่านี้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณก๊าซชนิดนี้ในชั้นบรรยากาศสูงขึ้นทุกปีจึงส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นจนเกิดภาวะโลกร้อน การใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น จึงได้รับความสนใจมากขึ้น พื้นที่ในประเทศไทยได้รับปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีในปริมาณสูง เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แม้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์อาจมีต้นทุนสูง แต่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยเนื่องจากไม่มีส่วนเคลื่อนไหว นอกจากนี้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานไม่ต่ำกว่า 20 ปี และราคามีแนวโน้มถูกลงเรื่อย ๆ ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในการจ่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลจากระบบของการไฟฟ้า

ค่ากำลังด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละขณะ นั่นคือ ความเข้มแสงที่กระทบแผงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้แผงจ่ายกำลังด้านออกได้มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขของสภาพอากาศขณะนั้นเรียกว่า จุดกำลังสูงสุด (Maximum power point, MPP) ซึ่งเป็นจุดยอดบนเส้นโค้งกำลัง-แรงดันของแผง การควบคุมให้จุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด เรียกว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุด (Maximum power point tracking, MPPT) ซึ่งนิยมใช้การควบคุมค่าตัวชี้เคลื่อนที่ของตัวแปลงผันกำลัง เมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสม่ำเสมอจะเกิดจุดกำลังสูงสุดเพียงจุดเดียวบนเส้นโค้งดังกล่าว โดยทั่วไประบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์มักใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าหนึ่งแผงมาต่อกันเป็นกลุ่มแผง (PV array) เพื่อเพิ่มค่ากำลังด้านออก ซึ่งการนำแผงมาต่ออนุกรมกันช่วยเพิ่มค่าแรงดันด้านออก และการนำแผงมาต่อขนานกันช่วยเพิ่มค่ากระแสด้านออก

การเคลื่อนที่ของก้อนเมฆ เงาจากต้นไม้ใหญ่ หรือคราบสกปรกบนแผง อาจทำให้แต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงไม่เท่ากัน ซึ่งเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การบังแสงบางส่วน (Partial shading) ส่งผลให้เกิดจุดยอดบนเส้นโค้งกำลัง-แรงดันมากกว่าหนึ่งจุด จุดยอดที่มีค่ากำลังสูงสุด เรียกว่า จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง (Global maximum power point, GMPP) ส่วนจุดยอดอื่น ๆ

เรียกว่า จุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่ (Local maximum power point, LMPP) วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่นิยมใช้ทั่วไปจะหยุดติดตามหลังจากพบจุดยอดจุดใดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งกำลัง-แรงดันซึ่งอาจไม่ใช่จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง ดังนั้นภายใต้การบังแสงบางส่วนจำเป็นต้องกราดตรวจ (Scan) ในย่านแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง นอกจากนี้ การเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดยังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบโดยเฉพาะในกรณีระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (Microgrid) ที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าในระบบมีกำลังด้านออกค่อนข้างต่ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถตรวจพบการบังแสงบางส่วนเมื่อความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงมีค่าไม่สม่ำเสมอ และค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างในย่านแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงซึ่งถูกปรับให้แคบลงได้ระหว่างการกราดตรวจ

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

เมื่อความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงมีค่าไม่สม่ำเสมอ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศในขณะนั้นสามารถช่วยให้ตรวจพบการบังแสงบางส่วน และจำกัดย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างในระหว่างการกราดตรวจได้

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาภายใต้สภาพอากาศและการบังแสงบางส่วนรูปแบบต่าง ๆ ทั้งนี้ การพัฒนาเงื่อนไขในการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต 450 รายในฐานะข้อมูลของโปรแกรมแมตแล็บ/ซิมูลิงก์ (MATLAB/Simulink) การติดตามจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงในสภาพอากาศต่าง ๆ ทั้งในกรณีที่ความเข้มแสงสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอทดสอบด้วยการจำลองผลในโปรแกรมแมตแล็บ โดยเปรียบเทียบผลกับวิธีที่คล้ายกันในแง่ของการจำกัดย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง รวมทั้งทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวและแบบตรึงช่วงก้าว โดยควบคุมตัวตั้งไขเคลของวงจรทระดับแรงดันที่สร้างขึ้น



### 1.5 คำสำคัญหรือคำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

แผงเซลล์แสงอาทิตย์, การติดตามจุดกำลังสูงสุด, การบังแสงบางส่วน, การจำกัดย่านการค้นห, ความนำส่วนเพิ่ม

Photovoltaic module, Maximum-Power-Point Tracking, Partial shading, Search area restriction, Incremental conductance

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์โดยย้ายจุดทำงานของของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขของแต่ละสภาพอากาศ ช่วยลดกำลังสูญเสียในสถานะอยู่ตัวเนื่องจากไม่มีการแกว่งของจุดทำงานรอบจุดกำลังสูงสุด นอกจากนี้ ภายใต้สภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอยังสามารถตรวจพบการบังแสงบางส่วนบนกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และจำกัดย่านการค้นหจุดกำลังสูงสุดวงกว้างซึ่งช่วยเพิ่มความเร็วและลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการย้ายจุดทำงานในระหว่างการค้นหา

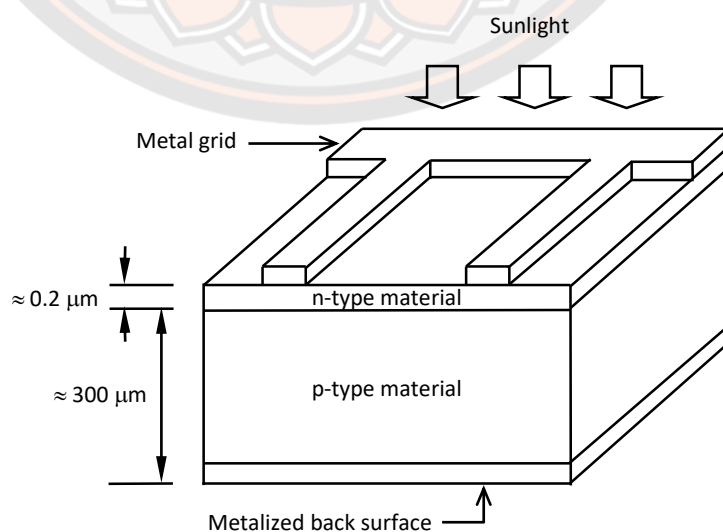
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมการสร้างกำลังไฟฟ้าของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้ความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ โดยที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดประยุกต์ใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวร่วมกับการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงและวิธีจำกัดย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง ในบทนี้เริ่มกล่าวถึงกระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดในแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้ ในปัจจุบันและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบทบระดับแรงดันไฟฟ้า

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงสามารถเป็นจริงได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) อิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับพลังงานโดยตรงจากแสงอาทิตย์โดยอาศัยการดูดกลืนทางไฟฟ้าพลังแสง (Photovoltaic absorption) และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นจากการดูดกลืนพลังงานที่มากกระตุ้นวัสดุตัวนำพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเกือบทั้งหมดที่ใช้งานกันในปัจจุบันคือซิลิกอนเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีปริมาณมากที่สุด ราคาถูกที่สุด และล้าหน้าทางเทคโนโลยีมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น [1, 2] โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน [3] แสดงได้ดังภาพ 1 แผ่นซิลิกอนหนาประมาณ 300  $\mu\text{m}$  ประกอบด้วย 2 ชั้นที่มี



ภาพ 1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน [3]

คุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งส่วนมากได้จากการเจือด้วยโบรอนและฟอสฟอรัส ผิวด้านหลังของเซลล์ทำจากโลหะทั้งหมดเพื่อรวบรวมประจุ ในขณะที่ด้านหน้าของเซลล์ใช้เพียงกริดโลหะ 1 ชั้น เพื่อให้แสงผ่านเข้าสู่เซลล์ได้มากที่สุด โดยปกติจะเคลือบผิวของเซลล์ด้วยสารกันการสะท้อน (Antireflection coating) เพื่อลดความสูญเสียจากการสะท้อนแสงให้เหลือน้อยที่สุด

### 2.1.1 กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์

#### ก) การดูดกลืนแสง (Optical absorption)

ในขณะที่แสงตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ แสงบางส่วนถูกสะท้อน บางส่วนถูกดูดกลืนส่วนที่เหลือสามารถผ่านเข้าไปเซลล์ได้ เนื่องจากซิลิกอนมีดัชนีการหักเห (Refractive index) สูง (มากกว่า 3.5) ทำให้กว่า 30% ของแสงที่ตกกระทบถูกสะท้อน ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมักถูกเคลือบด้วยสารกันการสะท้อนแสง ซึ่งโดยปกตินิยมเคลือบเป็นชั้นบาง ๆ ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งลดความสูญเสียจากการสะท้อนแสงเหลือประมาณ 10% โดยปกติโฟตอน (Photon) หรือควอนต้า (Quanta) ของแสงทำปฏิกิริยากับสารด้วยการกระตุ้นอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนวงนอกได้รับพลังงานทั้งหมดจากโฟตอนแล้วกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตาม โฟตอนที่ช่วยให้เกิดการแปลงผันพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าต้องมีพลังงานไม่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) ของสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ตาม โฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานก่อให้เกิดความสูญเสียในด้านการแปลงพลังงานเนื่องจากพลังงานส่วนที่เหลือถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนในผลึก ด้วยเหตุนี้ การแปลงพลังงานจากปฏิกิริยาระหว่างสเปกตรัมโดยทั่วไปของรังสีแสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนจึงเกิดการสูญเสียพลังงานประมาณ 60% เพราะมีโฟตอนจำนวนมากที่มีพลังงานต่ำกว่าหรือมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

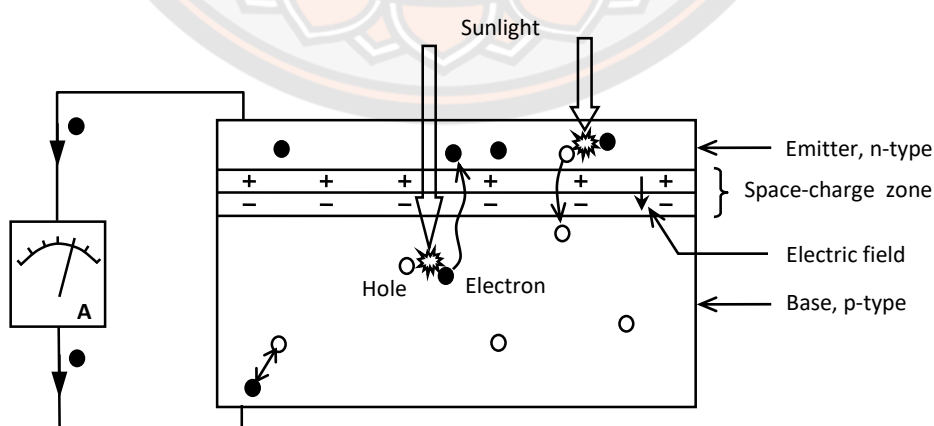
#### ข) การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination of charge carriers)

ในช่วงเวลาที่มีแสงกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ การดูดกลืนแสงก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pairs) ทำให้มีปริมาณของประจุพาหะมากกว่าในช่วงเวลาที่มีมืด และเมื่อแสงที่กระทบนั้นหายไป ปริมาณของประจุพาหะจะเหลือเท่ากับในช่วงเวลาที่มีมืดเนื่องจากการรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination) ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับจากการสร้างประจุพาหะด้วยการดูดกลืนแสง การรวมตัวของประจุพาหะเกิดตามธรรมชาติแม้กระทั่งในกระบวนการสร้างประจุพาหะ ปริมาณของประจุพาหะสุทธิในขณะที่มีแสงจึงเป็นผลที่เกิดจากทั้งสองกระบวนการดังกล่าวในช่วงอายุขัย (Lifetime) ของประจุพาหะซึ่งเป็นระยะเวลาที่ใช้จนกระทั่งประจุพาหะรวมตัว ระยะทางเฉลี่ยที่ประจุพาหะสามารถเดินทางได้ระหว่างจุดที่เกิดกับจุดที่รวมตัวของประจุพาหะเรียกว่า ระยะการแพร่ (Diffusion length) ซึ่งใช้อธิบายการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ค) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงตกกระทบ

ส่วนประกอบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ อิมิตเตอร์ชนิดเอ็น (N-doped emitter) บริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) และ เบสชนิดพี (P-doped base) ซึ่งแสดงเป็นแผนภาพเค้าร่างดังภาพ 2 เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานสูงพอตกลงบนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านทะลุอิมิตเตอร์ และบริเวณปลอดพาหะแล้วถูกดูดกลืนในเบสชนิดพีก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยอิเล็กตรอนถือว่าเป็นประจุพาหะส่วนน้อยภายในเบสชนิดพี ซึ่งตรงกันข้ามกับโฮลที่เป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในบริเวณนี้ ถ้าอิเล็กตรอนมีระยะเวลาแพร่มากพอจนเดินทางมาถึงบริเวณปลอดพาหะได้ สนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะจะเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนไปยังด้านอิมิตเตอร์ ถ้าระยะเวลาแพร่สั้นเกินไปจะทำให้เกิดการรวมตัวของประจุพาหะขึ้นก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน

การดูดกลืนควอนตัมของแสงในอิมิตเตอร์ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นกัน ถ้าระยะเวลาแพร่ของโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยในบริเวณนี้มีค่ามากพอ จะทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปจนถึงบริเวณปลอดพาหะแล้วถูกสนามไฟฟ้าเคลื่อนย้ายไปยังด้านเบสชนิดพี ถ้าการดูดกลืนควอนตัมของแสงเกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนและโฮลจะถูกแยกออกจากกันทันทีด้วยสนามไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนในอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นมีจำนวนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้โฮลทางด้านเบสชนิดพีมีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเซลล์ และหากนำตัวต้านทานมาต่อระหว่างอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นและเบสชนิดพี อิเล็กตรอนจากด้านอิมิตเตอร์จะเคลื่อนที่ผ่านตัวต้านทานไปยังเบสแล้วรวมตัวกับโฮลในเบส ก่อให้เกิดการไหลของกระแสซึ่งบ่งบอกถึงการจ่ายกำลังด้านออกของเซลล์ โดยกระแสดังกล่าวจะไหลอย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีแสงตกกระทบเซลล์ นั่นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ถูกเปลี่ยนทันทีเป็นพลังงานไฟฟ้า [3]



ภาพ 2 แผนภาพเค้าร่างแสดงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

### 2.1.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

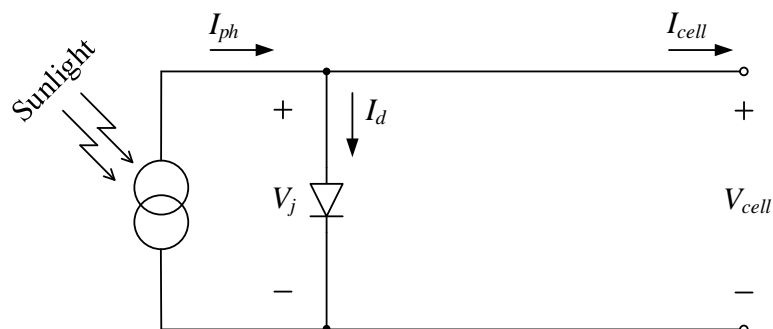
เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดประจุพาหะอิสระขึ้นในเซลล์และเกิดกระแสไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่ ปริมาณประจุพาหะอิสระที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ (Irradiance) [4] ก่อให้เกิดกระแสพลังแสง (Photocurrent) ขึ้นภายในเซลล์ ซึ่งสามารถอธิบายเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายดังภาพ 3 ที่ประกอบขึ้นจากการต่อขนานกันของแหล่งจ่ายกระแสพลังแสงที่มีค่ากระแสขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์กับไดโอดที่ใช้อธิบายรอยต่อพีเอ็น [1] กระแสที่ผ่านไดโอด [5] สามารถอธิบายด้วยสมการต่อไปนี้

$$I_d = I_o \left[ \exp\left(\frac{qV_j}{AkT_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

โดยที่  $I_d$  คือ กระแสไดโอด (A)  
 $I_o$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) (A)  
 $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)  
 $V_j$  คือ แรงดันไฟฟ้าคร่อมรอยต่อพีเอ็น (V)  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ ( $8.625 \times 10^{-5}$  eV/K)  
 $T_{cell}$  คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)  
 $A$  คือ ค่าความสมบูรณ์ของรอยต่อพีเอ็นซึ่งอธิบายความใกล้เคียงกับรอยต่อพีเอ็นในอุดมคติ [6] ดังนั้นกระแสต้านออกของเซลล์แสงอาทิตย์จึงคำนวณได้จาก

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_o \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_j}{AkT_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

โดยที่  $I_{cell}$  คือ กระแสต้านออกของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)  
 $I_{ph}$  คือ กระแสพลังแสง (A)



ภาพ 3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ [4]

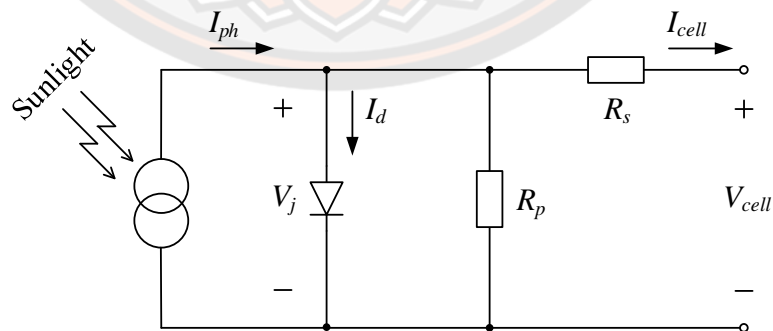
ในความเป็นจริง เนื้อสารกึ่งตัวนำ หน้าสัมผัสโลหะ และจุดเชื่อมต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อให้เกิดความสูญเสียซึ่งอธิบายด้วยความต้านทานอนุกรม (Parasitic series resistance,  $R_s$ ) ในขณะที่ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อพีเอ็นและสิ่งเจือปนหรือตำหนิในเนื้อสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดกระแสรั่วในเซลล์ซึ่งอธิบายด้วยความต้านทานขนาน (Parasitic parallel resistance,  $R_p$ ) ในวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [1, 4] ดังภาพ 4 จึงเขียนสมการของกระแสต้านออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left\{ \frac{q}{AkT_{cell}} (V_{cell} + R_s I_{cell}) \right\} - 1 \right] - \left( \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right) \quad (2.3)$$

อย่างไรก็ตาม การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ความสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์ที่อธิบายด้วยค่าความต้านทานทั้งสองมีค่าต่ำมากจนไม่ต้องนำมาพิจารณา ดังนั้นจึงกำหนดให้  $R_s$  มีค่าเป็นศูนย์ และ  $R_p$  มีค่าเป็นอนันต์ [7, 8] และเขียนสมการของกระแสต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$I_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_o \left\{ \exp \left( \frac{q}{AkT_{cell}} \cdot \frac{V_{pv}}{n_s} \right) - 1 \right\} \quad (2.4)$$

โดยที่  $I_{pv}$  คือ กระแสต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)  
 $V_{pv}$  คือ แรงดันต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)  
 $n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมในหนึ่งแถว  
 $n_p$  คือ จำนวนแถวของเซลล์

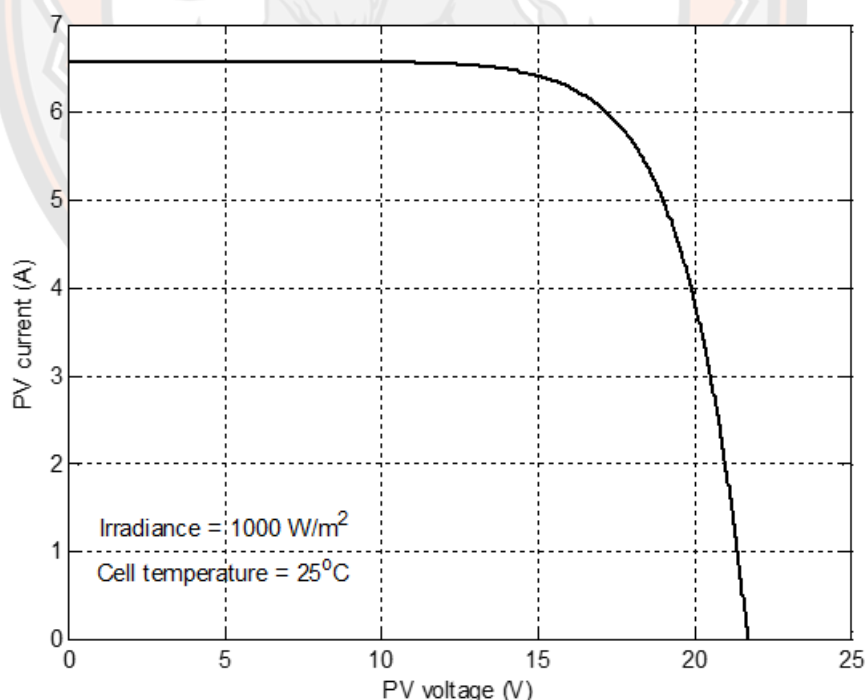


ภาพ 4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในความเป็นจริง [4]

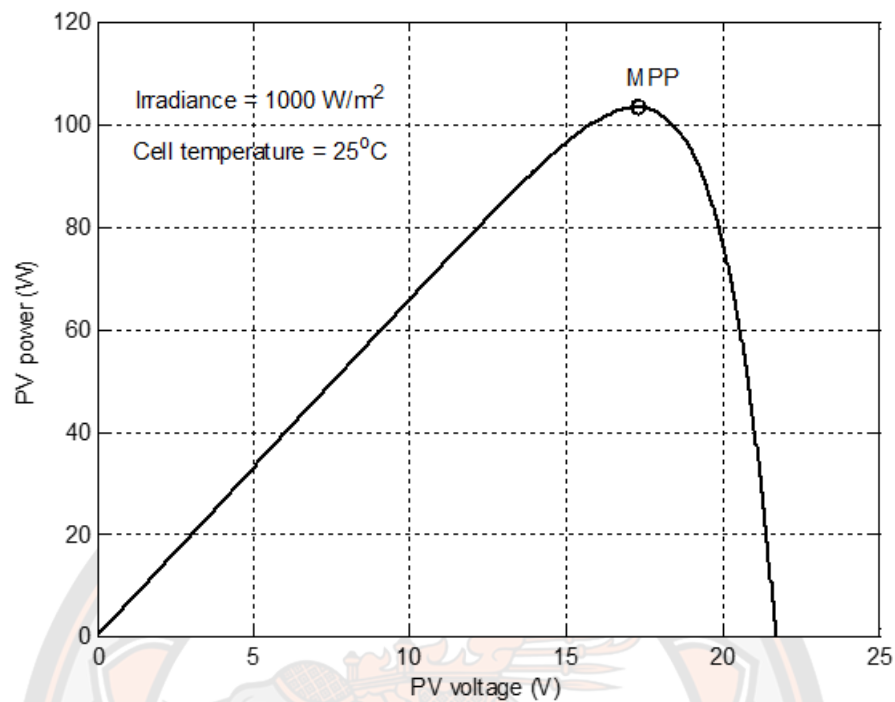


### 2.1.3 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง ๆ สามารถแสดงดังภาพ 5 ภายใต้สภาพอากาศหนึ่ง ๆ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังด้านออกสูงสุดเมื่อทำงานที่จุดกำลังสูงสุด โดยสามารถหาค่ากำลังของแผงได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันของแผงจากภาพ 5 และสร้างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงได้ดังภาพ 6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์สร้างกระแสสูงสุดเท่ากับค่ากระแสวงจรลัด (Short-circuit current,  $I_{sc}$ ) เมื่อแรงดันด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับศูนย์ จึงทำให้ค่ากำลังด้านออกเป็นศูนย์ ในทางกลับกัน ค่ากระแสด้านออกของแผงมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดันด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับแรงดันวงจรเปิด (Open-circuit voltage,  $V_{oc}$ ) ทำให้กำลังด้านออกมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ระหว่างจุดทั้งสองดังกล่าว กำลังด้านออกของแผงมีค่ามากกว่าศูนย์ จุดยอดบนเส้นโค้งกำลัง-แรงดันคือจุดทำงานของแผงที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด หรือ จุดกำลังสูงสุด ซึ่งแสดงด้วยวงกลมเล็กในภาพ 6 ทั้งนี้ยังสามารถเพิ่มกำลังด้านออกโดยนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรม แบบขนาน หรือแบบผสมระหว่างอนุกรมและขนานให้กลายเป็นกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพ 5 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [9]



ภาพ 6 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

#### 2.1.4 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่างกัน แสดงดังภาพ 7 ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสพลังแสง ความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นดังสมการที่ (2.5) จะเห็นว่ากระแสพลังแสงเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับค่าความเข้มแสงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ [10] ดังนั้นค่ากระแสจลัดจึงแปรผันโดยตรงกับค่าความเข้มแสง [10]

$$I_{ph} = \{I_{scr} + k_i(T_{cell} - T_r)\} \frac{S}{1000} \quad (2.5)$$

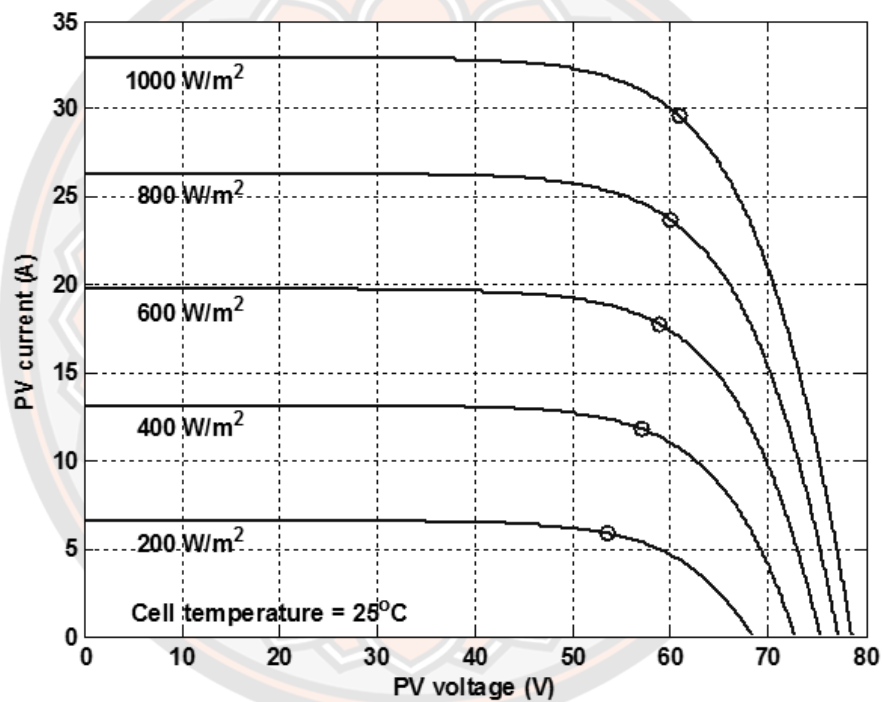
- โดยที่
- $I_{scr}$  คือ กระแสจลัดของแผงที่อุณหภูมิอ้างอิง (A)
  - $k_i$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสจลัด
  - $T_r$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 301.18 K
  - $S$  คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )



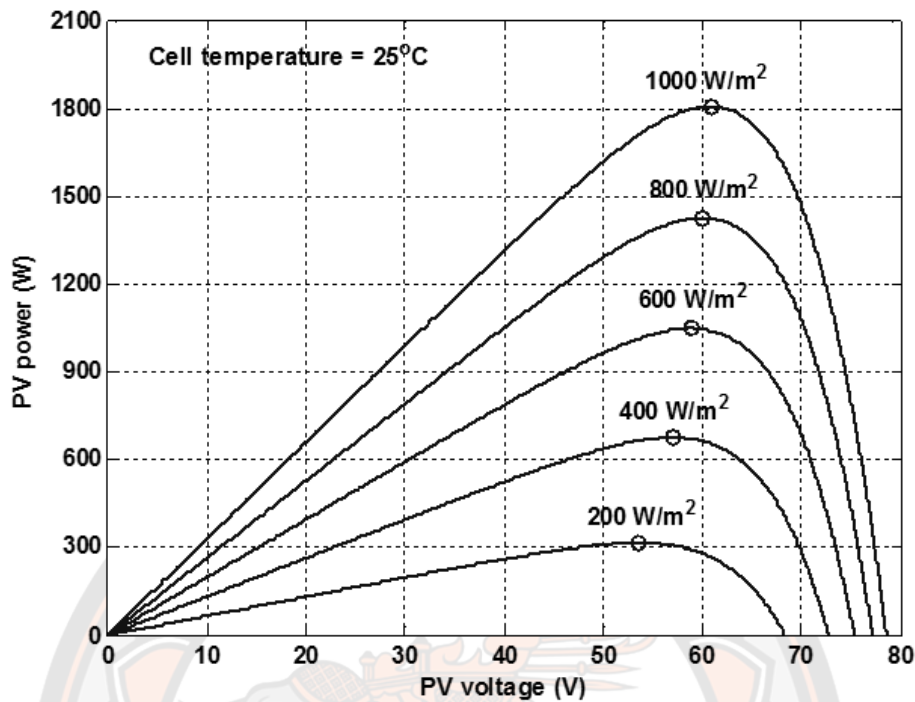
ภายใต้เงื่อนไขการเปิดวงจร เมื่อไม่พิจารณาค่าความต้านทานขนาน จะได้ว่า

$$V_{oc} = \frac{n_s AkT_{cell}}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (2.6)$$

โดยที่  $V_{oc}$  คือแรงดันวงจรเปิด และเนื่องจากกระแสพลังแสงมีค่าแปรผันโดยตรงกับความเข้มแสงที่กระทบแผง ดังนั้นจากสมการที่ (2.6) จะพบว่า การแปรผันของค่าแรงดันวงจรเปิดกับความเข้มแสงเป็นฟังก์ชันลอการิทึม เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันที่สัมพันธ์กับภาพ 7 เป็นดังภาพ 8 โดยจะเห็นได้ชัดว่ากำลังต้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงตามความเข้มแสง



ภาพ 7 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [9]



ภาพ 8 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [9]

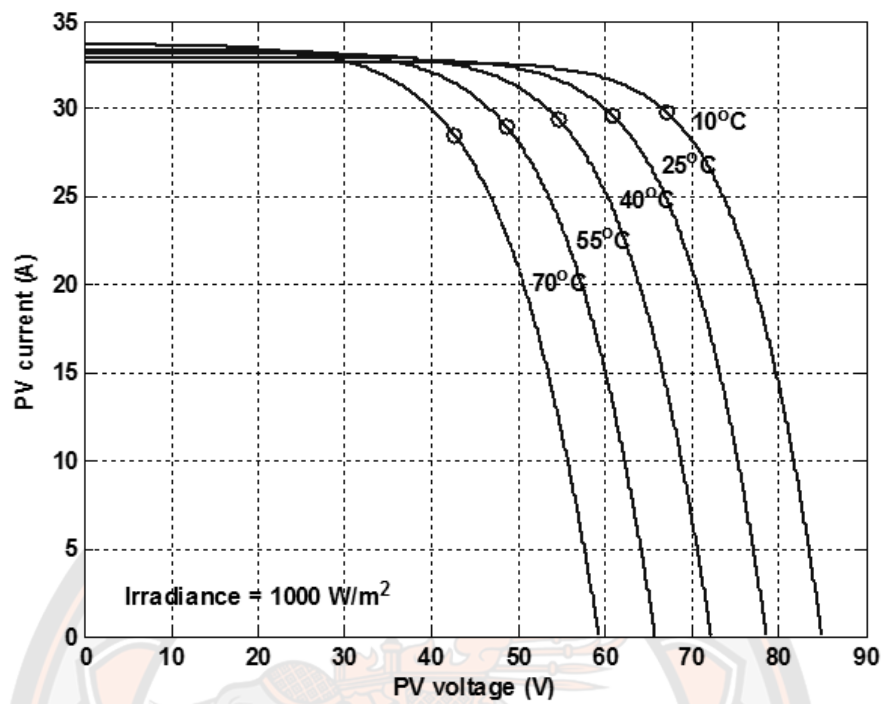
#### 2.1.5 ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันสำหรับค่าอุณหภูมิของเซลล์ที่แตกต่างกันแสดงดังภาพ 9 กระแสพลังแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิดังสมการที่ (2.5) เนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานแคบลงและระยะแพร่ของประจุพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเซลล์ส่งผลให้กระแสวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นั่นคือประมาณ 0.07%/°C สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน [3] ในทางตรงกันข้าม แรงดันวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ช่องว่างแถบพลังงานแคบลง [11] และทำให้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างมาก [10] ดังสมการที่ (2.7) ส่งผลให้แรงดันวงจรมีค่าลดลงอัตราประมาณ 0.4%/°C สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน [3] และประสิทธิภาพในการแปลงผันพลังงานของแผงลดลงประมาณ 0.04-0.06%/°C [12] ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันแสดงดังภาพ 10 จะเห็นว่าอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อค่ากำลังด้านออกที่ระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด [10, 11]

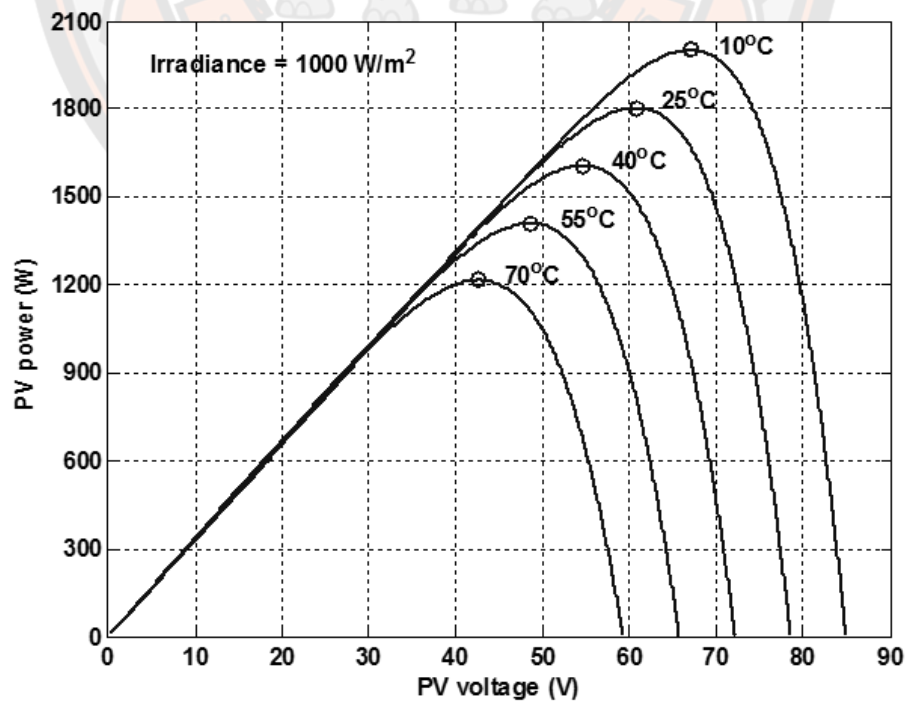
$$I_o = I_{or} \cdot \left( \frac{T_{cell}}{T_r} \right)^3 \cdot \exp \left( \left( \frac{qE_g}{kA} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{cell}} \right) \right) \quad (2.7)$$

โดยที่  $I_{or}$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่อุณหภูมิอ้างอิง มีค่าเท่ากับ  $19.9693 \times 10^{-6}$  A

$E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงานของซิลิกอน มีค่าเท่ากับ 1 eV



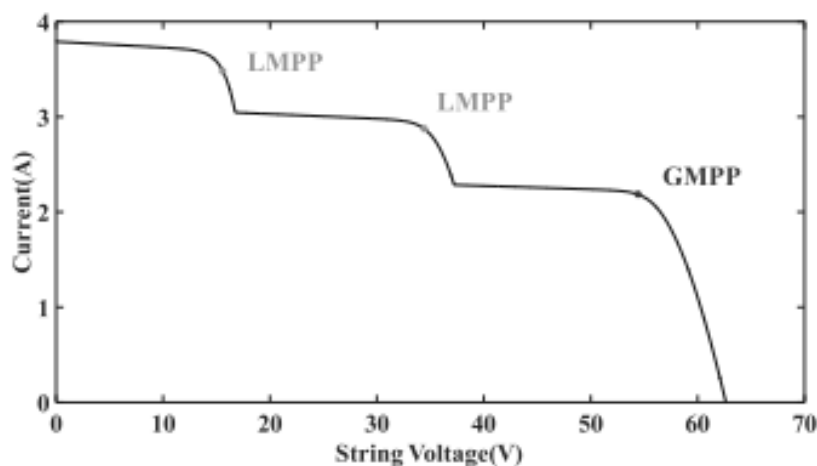
ภาพ 9 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [9]



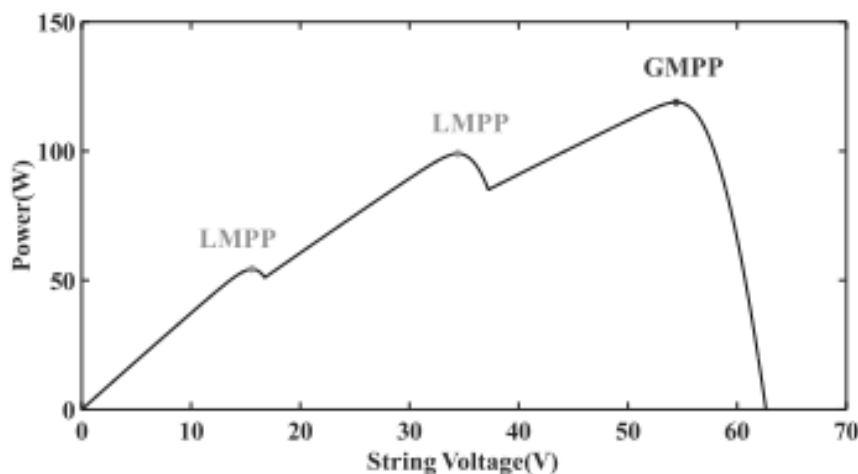
ภาพ 10 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [9]

### 2.1.6 คุณสมบัติของกรุปแผงภายใต้สภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ

เมื่อความเข้มแสงที่กระทบกรุปแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมอแสดงว่าเกิดการบังแสงบางส่วน (Partial shading) ทำให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกรุปแผงแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ความเข้มแสงสม่ำเสมอ ตัวอย่างผลการศึกษาใน [13] ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 แผงต่อกันแบบอนุกรม โดยที่ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ (Standard test condition, STC) คือค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  แต่ละแผงมีค่ากระแสจลัดและแรงดันวงจรเปิดเท่ากับ  $3.8 \text{ A}$  และ  $21.1 \text{ V}$  ตามลำดับ และมีกำลังด้านออกสูงสุดเท่ากับ  $60 \text{ W}$  ที่ระดับแรงดัน  $17.1 \text{ V}$  เมื่อแต่ละแผงได้รับความเข้มแสงไม่เท่ากัน กล่าวคือ  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$ , และ  $600 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ จะได้เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกรุปแผงดังกล่าวดังภาพ 11 และเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกรุปแผงดังภาพ 12 ซึ่งพบว่าเกิดจุดยอดหลายจุดบนเส้นโค้ง โดยมีเพียงจุดยอดเดียวที่ให้ค่ากำลังสูงกว่าจุดอื่น เรียกว่า จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง และเรียกจุดยอดจุดอื่น ๆ ว่า จุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่ การติดตามจุดกำลังสูงสุดจึงต้องพัฒนาให้สามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างได้ในแต่ละสภาพอากาศที่เกิดการบังแสงบางส่วน



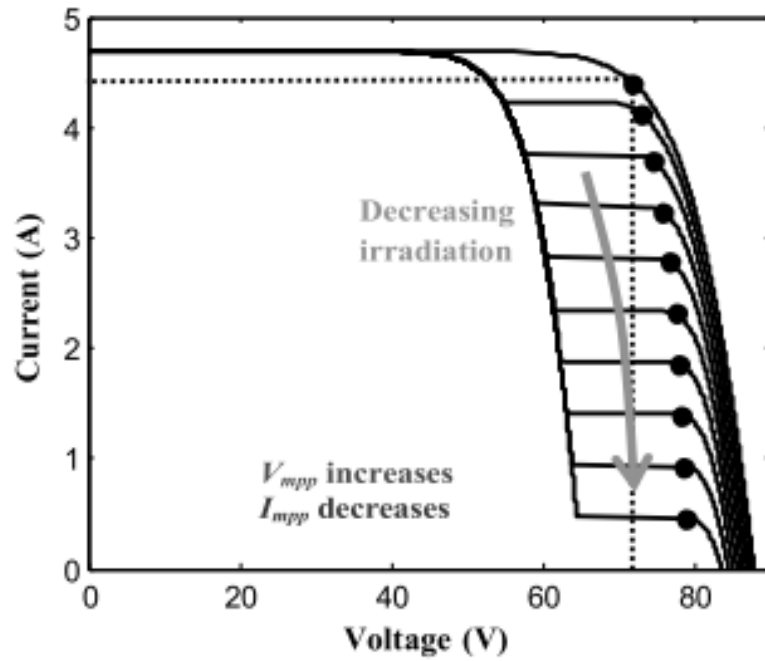
ภาพ 11 ตัวอย่างคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกรุปแผงเมื่อถูกบังแสง [13]



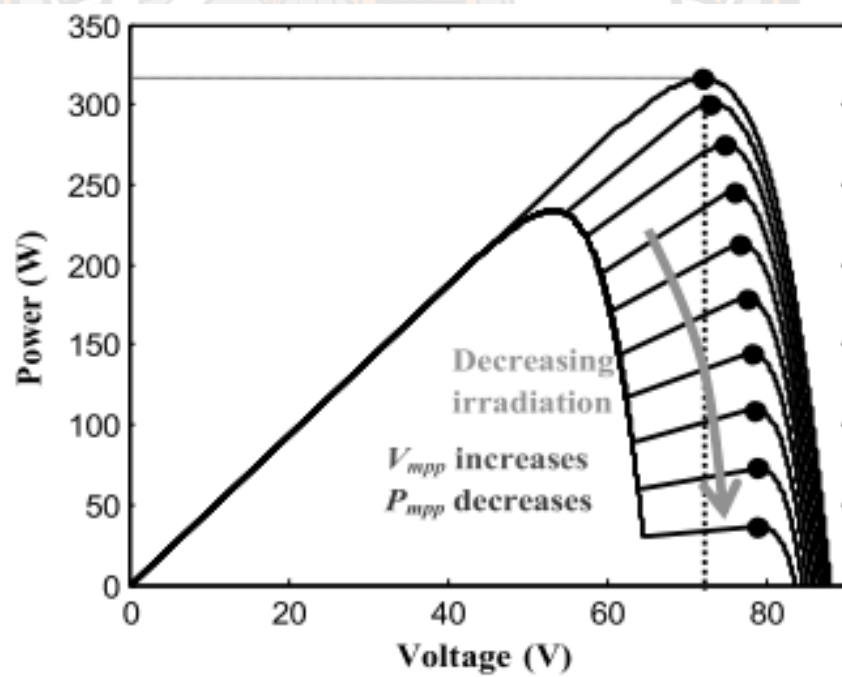
ภาพ 12 ตัวอย่างคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงเมื่อถูกบังแสง [13]

#### 2.1.7 ผลของความเข้มแสงต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด

ในกรณีที่ความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมอ การศึกษาผลกระทบของความเข้มแสงที่มีต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดใน [14] ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 แผงต่อแบบอนุกรม โดยที่ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบแต่ละแผงมีค่ากระแสวงจรลัดและแรงดันวงจรเปิดเท่ากับ 4.7 A และ 22 V ตามลำดับ และมีกำลังด้านออกสูงสุดเท่ากับ 80 W ที่ระดับแรงดัน 18 V เมื่อพิจารณาภายใต้สภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอโดยกำหนดให้ 3 แผงได้รับความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  และอีก 1 แผงได้รับความเข้มแสงซึ่งแปรผันค่าตั้งแต่  $1000 \text{ W/m}^2$  แล้วลดค่าลงทีละ  $100 \text{ W/m}^2$  จนเหลือค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $100 \text{ W/m}^2$  จึงได้เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผงข้างต้นดังภาพ 13 เมื่อความเข้มแสงที่ลดลง กระแสด้านออกแผงย่อมลดลง ทำให้กำลังด้านออกของแผงและกลุ่มแผงมีค่าต่ำลงตามไปด้วยดังภาพ 14 ซึ่งมี 2 ยอดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันแต่ละเส้น (แต่ละระดับความเข้มแสง) นอกจากนี้ในกรณีศึกษานี้ ยังพบว่าที่ระดับความเข้มแสงไม่ต่ำกว่า  $700 \text{ W/m}^2$  จะพบว่าจุดยอดด้านขวาบนเส้นโค้งกำลัง-แรงดันเป็นจุดกำลังสูงสุดวงกว้างซึ่งย้ายตำแหน่งเมื่อระดับความเข้มแสงเปลี่ยนไป แต่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำกว่า  $700 \text{ W/m}^2$  จุดยอดด้านซ้ายบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันจะกลายเป็นจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง



ภาพ 13 ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [14]



ภาพ 14 ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [14]

## 2.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งจำเป็นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแต่ละวิธีมีความแตกต่างในด้านต่าง ๆ เช่น ความซับซ้อนของวงจรและอัลกอริทึม ความแม่นยำในการติดตาม ความเร็วในการติดตาม ราคาของตัวควบคุม ข้อมูลที่มีอยู่ และความชำนาญของผู้ใช้ [15-17] ปัญหาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดคือการหาตำแหน่งของจุดทำงาน ซึ่งหมายถึงค่าของแรงดันหรือกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้ได้กำลังด้านออกสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงและอุณหภูมิในขณะนั้น ภายใต้สภาวะความเข้มแสงสม่ำเสมอจะมีจุดยอดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงจุดเดียวเท่านั้น

วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่าและวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง แม้ว่าวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่ามีความง่ายต่อการใช้งาน การคำนวณไม่ซับซ้อนและมีความเร็วสูงในการติดตาม แต่ช่วยเพียงแคให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ใกล้กับจุดกำลังสูงสุดเท่านั้น ในขณะที่วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงสามารถควบคุมให้จุดทำงานอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดหรือขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุดได้ แต่มีความซับซ้อนด้านการคำนวณ ซึ่งบางวิธีต้องใช้ความชำนาญของผู้ออกแบบ หรือต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เป็นระยะ และอาจติดตามจุดกำลังสูงสุดได้ช้ากว่าวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่า อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการติดตามของกลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการขยายช่วงก้าวในการขยับจุดทำงาน แต่หากขยายมากเกินไปจะทำให้จุดทำงานแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุด ทำให้เกิดการพัฒนาวิธีขยับจุดทำงานแบบแปรผันช่วงก้าวซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามและเลี่ยงการแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุดได้

ภายใต้สภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอบนกลุ่มแผงจะปรากฏจุดยอดมากกว่าหนึ่งจุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดทั่วไปที่นิยมใช้จะหยุดติดตามหลังจากพบจุดกำลังสูงสุดจุดใดจุดหนึ่งซึ่งอาจไม่ใช่จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง ดังนั้นการติดตามจุดกำลังสูงสุดเมื่อเกิดการบังแสงบางส่วนจึงมักใช้หลักการอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น การสังเกตจุดกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผง หรือใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปอยู่บริเวณใกล้ ๆ กับจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง หรือใช้การจำกัดย่านค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง นอกจากนี้การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงก่อนค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างจะช่วยลดการกราดตรวจในย่านแรงดันของกลุ่มแผงเพราะมีจุดกำลังสูงสุดเพียงจุดเดียวเท่านั้นถ้าความเข้มแสงบนกลุ่มแผงมีค่าสม่ำเสมอ



### 2.2.1 วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงสม่ำเสมอ

วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่า

ก) วิธีเศษส่วนแรงดันวงจรเปิด

ความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างเชิงเส้นระหว่าง  $V_{mpp}$  กับ  $V_{oc}$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ [18, 19] สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{mpp} \cong k_v \cdot V_{oc} \quad (2.8)$$

โดยที่  $k_v$  คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน เนื่องจากค่า  $k_v$  ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ละแผงจึงหาค่า  $k_v$  ได้ล่วงหน้าโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{mpp}$  กับ  $V_{oc}$  จากการทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนใจภายใต้เงื่อนไขที่ระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้ว  $k_v$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.73-0.80 [15, 17] หลังจากได้ค่า  $k_v$  แล้วสามารถหาค่า  $V_{mpp}$  ได้จากผลคูณในสมการที่ (2.8) โดยมีการวัดค่า  $V_{oc}$  เป็นระยะ ๆ ด้วยการเปิดวงจรชั่วขณะที่ขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แม้วิธีเศษส่วนแรงดันวงจรเปิดเป็นวิธีที่ง่ายและราคาถูกในการนำไปใช้งาน ซึ่งเพียงพอต่อการใช้กับงานบางประเภท แต่การเปิดวงจรชั่วขณะที่ขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อวัดค่า  $V_{oc}$  ทำให้สูญเสียกำลังด้านนอก นอกจากนี้ สมการที่ (2.8) เป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้นจึงทำให้จุดทำงานของแผงอาจไม่อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด [20, 21]

ข) วิธีเศษส่วนกระแสวงจรลัด

ความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างเชิงเส้นระหว่าง  $I_{mpp}$  กับ  $I_{sc}$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ [22, 23] สามารถเขียนได้ดังนี้

$$I_{mpp} \cong k_i \cdot I_{sc} \quad (2.9)$$

โดยที่  $k_i$  คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน ทำนองเดียวกับวิธีเศษส่วนแรงดันวงจรเปิด ค่า  $k_i$  ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงจึงหาค่า  $k_i$  ล่วงหน้าโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{mpp}$  กับ  $I_{sc}$  จากการทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนใจภายใต้เงื่อนไขที่ระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ โดยทั่วไป  $k_i$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.78-0.92 [16] ซึ่งปกติการวัดค่า  $I_{sc}$  ในระหว่างที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานอยู่จะใช้สวิตช์ที่เพิ่มเข้าไปในตัวแปลงผันกำลังเพื่อลัดวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระยะ ๆ แล้ววัดค่า  $I_{sc}$  โดยใช้ตัวรับรู้กระแส แม้วิธีเศษส่วนกระแสลัดวงจรเป็นวิธีที่ง่ายต่อการใช้งาน แต่ไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงได้ และยังทำให้กำลังด้านนอกของแผงลดลงในขณะที่วัดค่า  $I_{sc}$  [20, 21]



วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง

ก) วิธีการควบคุมฟuzzyลอจิก

การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้การควบคุมฟuzzyลอจิกเป็นที่นิยมในการหาจุดกำลังสูงสุด ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การควบคุมฟuzzyลอจิกมี 3 ขั้นตอน คือ การฟuzzyฟิเคชัน (Fuzzification) การเทียบตารางกฎ (Rule base table lookup) และการดีฟuzzyฟิเคชัน (Defuzzification) ในการฟuzzyฟิเคชัน ตัวแปรด้านเข้าที่เป็นตัวเลข (Numerical input variables) จะถูกเปลี่ยนเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic variables) โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสมาชิกด้านเข้าของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก ทั้งนี้ สำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดมักจะเป็นค่าผิดพลาด (Error) และการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด ผู้ใช้สามารถเลือกวิธีการคำนวณค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด ทั้งนี้ที่คำนวณค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดได้และถูกเปลี่ยนเป็นตัวแปรภาษาแล้ว ด้านออกของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกซึ่งมักจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวตั้งไขเคลิลของตัวแปลงผันกำลังจะถูกเทียบหาจากในตารางกฎ (Rule base table) ในขั้นตอนของการดีฟuzzyฟิเคชัน ด้านออกของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกจะถูกเปลี่ยนจากตัวแปรภาษาเป็นตัวแปรที่เป็นตัวเลขโดยยังคงใช้ฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งจะได้สัญญาณแอนะล็อกไปควบคุมตัวแปลงผันกำลังเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุด ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกมีข้อดีคือสามารถทำงานได้กับด้านเข้าที่ไม่แม่นยำ และไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ รวมทั้งสามารถรับมือกับความไม่เป็นเชิงเส้นได้ [24, 25] อย่างไรก็ตาม ความมีประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกจะขึ้นอยู่กับความรู้ของผู้ใช้ในการออกแบบตารางกฎ (Rule base table) [16]

ข) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม

วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมจะใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 3 ชั้นคือ ชั้นด้านเข้า (Input layer) ชั้นที่ถูกซ่อน (Hidden layer) และ ชั้นด้านออก (Output layer) จำนวนโนดในแต่ละชั้นอาจแตกต่างกันและถูกกำหนดโดยผู้ใช้ การใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมติดตามจุดกำลังสูงสุด ตัวแปรด้านเข้าอาจเป็นพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น  $V_{oc}$  และ  $I_{sc}$  ข้อมูลของสภาพอากาศ เช่น ความเข้มแสง และอุณหภูมิ ในขณะที่ด้านออกมักจะเป็นสัญญาณอ้างอิง (หนึ่งตัวหรือหลายตัว) เช่น ตัวตั้งไขเคลิล ซึ่งใช้ขับตัวแปลงกำลังเพื่อให้ทำงานที่ (หรือใกล้เคียงกับ) จุดกำลังสูงสุด

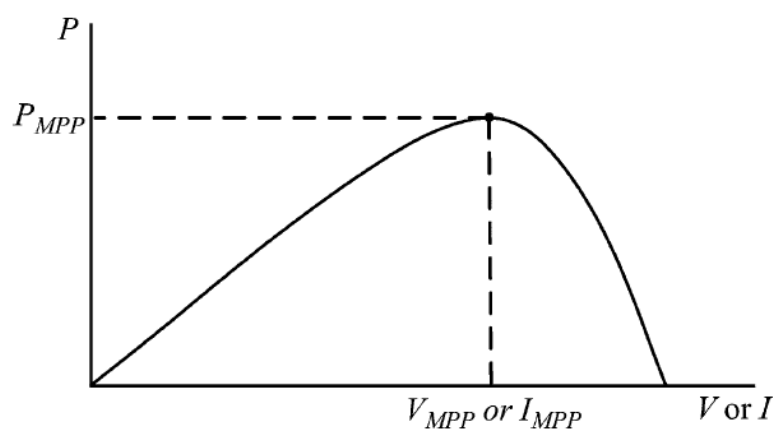
จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ใกล้กับจุดกำลังสูงสุดมากเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้ในชั้นที่ถูกซ่อน และขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ เนื่องจากโดยทั่วไปแต่ละแผงมีคุณลักษณะแตกต่างกันทำให้โครงข่ายประสาทเทียมจำเป็นต้องเรียนรู้ข้อมูลของแต่ละแผง และเนื่องจากการเปลี่ยนสภาพของแผงตามอายุการใช้งานทำให้โครงข่ายประสาทเทียมต้องเรียนรู้ข้อมูลใหม่เป็นระยะ ๆ เพื่อคงความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังสูงสุด [26, 27]

ค) วิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ

ผลงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่วิธีปีนเนิน (Hill-climbing technique) และวิธีพีแอนด์โอ (Perturb and Observe technique, P&O) วิธีปีนเนินอาศัยการขยับค่าตัวชี้เซลล์ของตัวแปลงผันกำลัง [28] ส่วนวิธีพีแอนด์โออาศัยการขยับค่า (Perturbation) ของแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับตัวแปลงผันกำลัง การปรับค่าตัวชี้เซลล์จะส่งผลให้แรงดันของแผงเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงถือได้ว่าวิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอมีหลักการทำงานเดียวกัน

พิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปในภาพ 15 ถ้าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด การเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ของแรงดันจะทำให้กำลังมีค่าเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ในขณะที่ถ้าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด การลดลง (หรือเพิ่มขึ้น) ของแรงดันทำให้กำลังมีค่าเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ดังนั้นถ้ากำลังมีค่าเพิ่มขึ้น การขยับค่าแรงดันจะยังคงอยู่ในทิศทางเดิมจนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุด แต่ถ้ากำลังมีค่าลดลง การขยับค่าแรงดันจะกลับทิศทาง [27, 28]

อัลกอริทึมของวิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอแสดงในตาราง 1 โดยจะเห็นว่าอัลกอริทึมนี้ยังคงใช้งานได้ในกรณีที่ใช้ค่าขณะหนึ่ง (Instantaneous value) ของกระแสหรือแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (แทนที่จะเป็นค่าเฉลี่ย) ตรวจจับการชักตัวอย่าง (Sampling) เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวในแต่ละคาบสวิตซิง (Switching cycle) กระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำเป็นระยะ ๆ จนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุด หลังจากนั้นจุดทำงานจะแกว่งอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด ทั้งนี้ สามารถลดการแกว่งของจุดทำงานได้โดยการลดช่วงก้าวในการขยับค่า (Perturbation step size) แต่จะลดความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วย

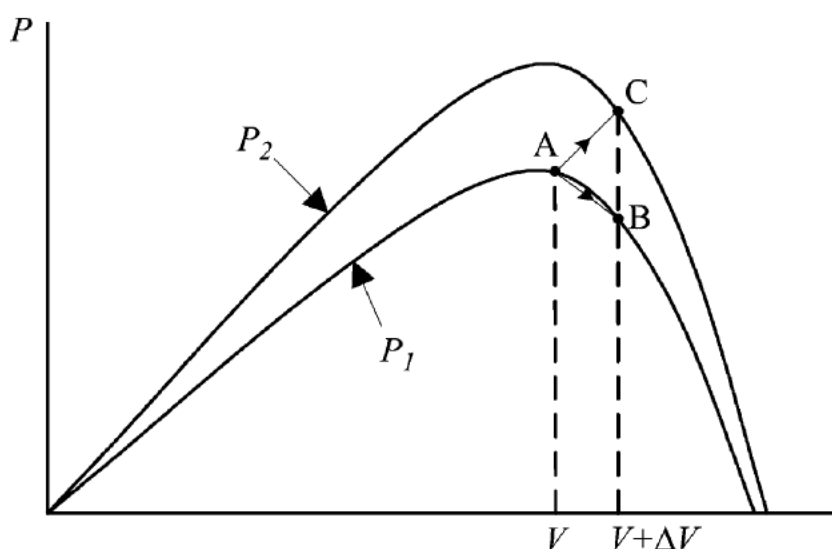


ภาพ 15 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป [28]

ตาราง 1 อัลกอริทึมของวิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ [28]

การขยับค่า	การเปลี่ยนแปลงกำลัง	การขยับค่าถัดไป
บวก	บวก	บวก
บวก	ลบ	ลบ
ลบ	บวก	ลบ
ลบ	ลบ	บวก

วิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในทางปฏิบัติเพราะอัลกอริทึมง่ายและไม่จำเป็นต้องรู้ข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนใช้งาน [15, 17] แต่อาจทำงานล้มเหลวในกรณีที่สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงฉับพลัน ดังแสดงในภาพ 16 เริ่มจากจุดทำงาน A ถ้าสภาพอากาศค่อนข้างคงที่ (เปลี่ยนแปลงน้อยมาก) การขยับค่า  $\Delta V$  ของแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะได้จุดทำงานใหม่คือจุด B และการขยับค่าจะกลับทิศเนื่องจากการลดลงของค่ากำลังด้านออก อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและเส้นโค้งกำลังเปลี่ยนจากเส้น  $P_1$  เป็นเส้น  $P_2$  ภายในหนึ่งคาบการชักตัวอย่าง (Sampling) จุดทำงานจะย้ายจากจุด A ไปอยู่ที่จุด C ซึ่งยังคงทำให้ได้กำลังด้านออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การขยับค่าแรงดันยังคงไปในทิศทางเดิม ผลที่ตามมาคือ ถ้าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จุดทำงานจะเคลื่อนที่ออกห่างจากจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงไปเรื่อย ๆ [29, 30]



ภาพ 16 การรุดเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของวิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ [28]

ง) วิธีความนำส่วนเพิ่ม

วิธีที่นิยมใช้เพื่อแก้ปัญหาค่าความล้มเหลวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอย่างรวดเร็วคือ วิธีความนำส่วนเพิ่ม (Incremental conductance) ซึ่งพัฒนามาจากการพิจารณาค่าความชันของเส้นโค้งกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นศูนย์ที่จุดกำลังสูงสุด มีค่าเป็นบวกถ้าจุดทำงานอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด และมีค่าเป็นลบถ้าจุดทำงานอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด [30] นั่นคือ

$$\frac{dP}{dV} \begin{cases} = 0, & \text{at MPP} \\ > 0, & \text{left of MPP} \\ < 0, & \text{right of MPP} \end{cases} \quad (2.10)$$

เนื่องจาก

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2.11)$$

จึงสามารถเขียนสมการที่ (2.10) ได้ว่า

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} \begin{cases} = -\frac{I}{V}, & \text{at MPP} \\ > -\frac{I}{V}, & \text{left of MPP} \\ < -\frac{I}{V}, & \text{right of MPP} \end{cases}$$

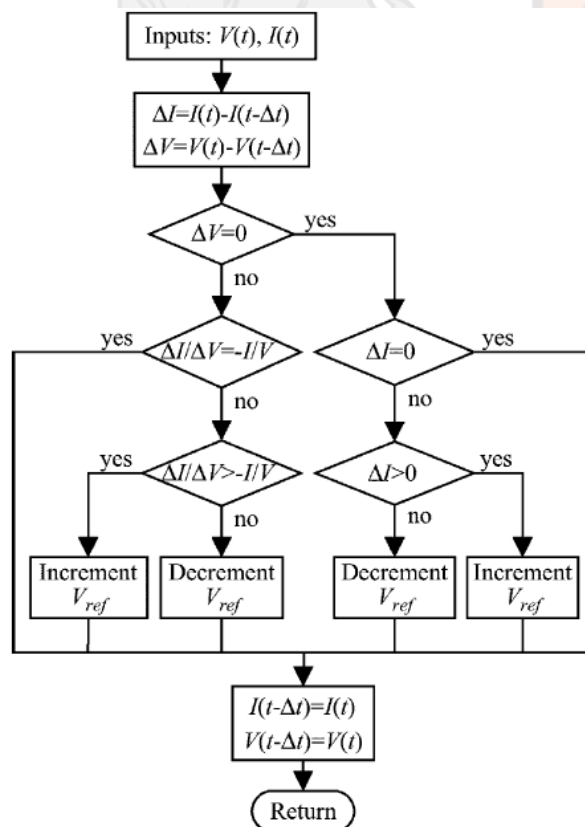
หรือ

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} \begin{cases} = 0, & \text{at MPP} \\ > 0, & \text{left of MPP} \\ < 0, & \text{right of MPP} \end{cases} \quad (2.12)$$

การหาจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริทึมนี้อาศัยการเปรียบเทียบค่าความนำขณะหนึ่ง  $I/V$  กับค่าความนำส่วนเพิ่ม  $\Delta I/\Delta V$  ในแผนภาพ 17 แรงดัน  $V_{ref}$  คือแรงดันเป้าหมายที่ต้องการให้เป็นจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดย  $V_{ref}$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{mpp}$  ที่จุดกำลังสูงสุด และทันทีที่พบจุดกำลังสูงสุดจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกรักษาไว้ที่ตำแหน่งนี้จนกว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแส  $\Delta I$  ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ จากนั้นจึงลดหรือเพิ่มค่า  $V_{ref}$  เพื่อตามหาจุดกำลังสูงสุด [29] อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบกับวิธีปีนเนินหรือวิธีพีแอนด์โอแล้ว วิธีความนำส่วนเพิ่มมีอัลกอริทึมซับซ้อนกว่าและใช้หน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์มากกว่า [15, 17]

นอกจากนี้ ขนาดในการขยับค่า (ช่วงก้าว) ยังเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหาจุดกำลังสูงสุด ถ้าช่วงก้าวมีขนาดใหญ่จะเพิ่มความเร็วในการหาจุดกำลังสูงสุด แต่ท้ายสุดแล้วจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจจะแกว่งอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด

การแปรผันช่วงก้าวสามารถเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดและลดการแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุด [31] ทั้งนี้ การแปรผันช่วงก้าวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใน [32] นำตัวคูณ 2 ตัว นั่นคือ 1 และ 2 มาคูณกับค่าช่วงก้าวที่คงที่ซึ่งเรียกว่า ช่วงก้าวตรึง (Fixed step size) ตัวคูณที่ถูกใช้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดทำงานเทียบกับจุดกำลังสูงสุดและทิศทางของการก้าว ในขณะที่ก้าวเข้าหาจุดกำลังสูงสุด จะใช้รูปแบบตรึงช่วงก้าว (Fixed step-size scheme) นั่นคือ ใช้ตัวคูณเป็น 1 แต่หากจุดทำงานเคลื่อนออกห่างจากจุดกำลังสูงสุด การก้าวจะกลับทิศทางด้วยช่วงก้าวที่เพิ่มเป็น 2 เท่า นั่นคือใช้ตัวคูณเป็น 2 นอกจากนี้ การแปรผันช่วงก้าวอาจได้จากการคูณค่าช่วงก้าวตรึงด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential function) [33] อย่างไรก็ตาม การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของช่วงก้าวตรึงและเลขชี้กำลังเป็นเรื่องยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลามาก ยิ่งกว่านั้น ผลคูณของตัวประกอบกับค่าความชันขณะหนึ่งของเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันถูกใช้เป็นช่วงก้าวแปรผัน (Varying step size) ใน [34] แต่ผลที่ตามมาคือ ความสามารถในการติดตามจุดกำลังสูงสุดจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่เลือกใช้



ภาพ 17 อัลกอริทึมของการหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม [29, 35]



นั่นคือ ตัวประกอบที่มีค่าต่ำจะส่งผลต่อผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) ในขณะที่ตัวประกอบค่าสูงอาจทำให้กลายเป็นการติดตามแบบตรึงช่วงก้าว การเลือกค่าตัวประกอบที่เหมาะสมจึงต้องอาศัยข้อมูลของแอมพลิจูดของแสงอาทิตย์ที่ใช้งานและการทดสอบกับแอมป์เพื่อให้ได้คุณลักษณะการติดตามที่ดีที่สุดในการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันช่วงก้าวที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังและกระแสต้านออกของแผงเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันต้านออกของแผงที่ต้องการในแต่ละช่วงก้าว [36] จะช่วยให้ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องหาตัวประกอบมาคูณกับช่วงก้าวตรึง และการใช้งานวิธีดังกล่าวไม่ขึ้นอยู่กับการคุณลักษณะทางไฟฟ้าต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะใช้

### 2.2.2 วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างภายใต้การบังแสงบางส่วน

#### ก) การเชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สองรูปแบบ

การเชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นกลุ่มแผงและออกแบบให้สามารถเปลี่ยนการเชื่อมต่อได้สองรูปแบบโดยรูปแบบแรกกำหนดให้จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมในแต่ละแถวเป็นเลขคู่ และมีจำนวนแถวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนานกันได้ตามต้องการ ในขณะที่รูปแบบที่สองกำหนดให้จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมในแต่ละแถวเป็นครึ่งหนึ่งของรูปแบบแรกและมีจำนวนแถวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนานกันเป็นสองเท่าของรูปแบบแรกด้วยการติดตั้งสวิทช์ไว้ตรงกึ่งกลางของแต่ละแถวเพื่อเปลี่ยนรูปแบบของการเชื่อมต่อ การติดตามจุดกำลังสูงสุดอาศัยการกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดในแต่ละสภาพอากาศจากการเชื่อมต่อทั้งสองรูปแบบและกำหนดใช้รูปแบบที่ให้ค่ากำลังต้านออกสูงสุด ทั้งนี้ ตัวแปลงผันกำลังที่ใช้เพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุดต้องสามารถทนต่อพิกัดกระแสต้านออกของแผงเป็น 2 เท่าของรูปแบบแรกและพิกัดแรงดันเป็น 2 เท่าของรูปแบบที่สอง อย่างไรก็ตาม การกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดจากการเชื่อมต่อทั้งสองรูปแบบทำให้การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลานานขึ้น หรือลดความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดนั่นเอง และการเพิ่มจำนวนแถวในกลุ่มแผงทำให้ต้องเพิ่มจำนวนสวิทช์ในการเปลี่ยนรูปแบบการเชื่อมต่อ [37]

#### ข) การประมาณเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผง

การประมาณลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันต้านออกของกลุ่มแผงเพื่อหาบริเวณที่จะพบจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเริ่มจากการวัดค่ากระแสและแรงดันต้านออกของกลุ่มแผง 3 จุด คือ ตำแหน่งแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผง ตำแหน่งจุดทำงานปัจจุบัน และตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของหนึ่งแผงซึ่งเป็นเพียงจุดเดียวที่ต้องย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผง เมื่อได้ข้อมูลจากทั้ง 3 จุดแล้วจึงประมาณลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันและเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันต้านออกของกลุ่มแผง หลังจากนั้นจึงสุ่มวัดค่ากระแสและแรงดันต้านออกของกลุ่มแผงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง ถึงแม้ในการประมาณลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันและกำลัง-แรงดันต้านออกของกลุ่มแผงจะไม่ต้องกราดตรวจ แต่การย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังตำแหน่งที่

ต้องการสู่มัดค่าก็ทำให้จุดทำงานของกลุ่มแผงถูกย้ายไปเกือบทั้งย่านแรงดันของกลุ่มแผง นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ใช้ประมาณค่าลักษณะเส้นโค้งดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งาน [38]

ค) การสังเกตค่ากำลังสูงสุด

แม้ว่าบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงภายใต้สภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอจะมีจุดยอดมากกว่าหนึ่งจุด แต่มีเพียงจุดเดียวที่เป็นจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง ส่วนจุดยอดอื่น ๆ จะเป็นจุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่ จากการสังเกตเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงโดย [39] พบว่า จุดกำลังสูงสุดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนกันในแต่ละสภาพอากาศ นั่นคือ ค่ากำลังที่จุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่แต่ละจุดที่อยู่ติดกันจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับจนถึงจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง หลังจากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่จะลดลงอย่างเป็นลำดับเสมอ ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดจะใช้หลักการสังเกตดังกล่าวร่วมกับวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่นิยมใช้กันทั่วไป เช่น วิธีพีแอนด์ไอ วิธีความนำส่วนเพิ่ม โดยติดตามจุดกำลังสูงสุดสามจุดแล้วเปรียบเทียบค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแผงจนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง หลังจากนั้นจึงรอนจนกว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศหรือจนถึงเวลาที่กำหนดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้จุดทำงานอยู่ห่างจากจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างนานเกินไป การติดตามจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างด้วยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องกราดตรวจเกือบทั้งย่านของแรงดันด้านออกของกลุ่มแผง จึงทำให้ทราบตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ลักษณะการบังแสงบางกรณีอาจทำให้การเรียงลำดับของจุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่และจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างไม่เป็นไปตามรูปแบบที่สังเกตโดย [39] จึงเกิดความผิดพลาดในการติดตาม ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเพราะจุดทำงานของกลุ่มแผงไม่อยู่ที่จุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง

ง) การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมอ จุดกำลังสูงสุดดวงกว้างอาจเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดก็ได้ในย่านของแรงดันด้านออกของกลุ่มแผง ซึ่งคาดเดาได้ยาก อย่างไรก็ตามการย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปอยู่ในบริเวณใกล้ ๆ จุดกำลังสูงสุดดวงกว้างสามารถทำได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่นำเสนอโดย [40] นั่นคือ

$$V_{pv}^* = \left( \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \right) \cdot I_{pv} \quad (2.13)$$

โดยที่

$V_{pv}^*$	คือ แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงที่กำหนด
$V_{oc}$	คือ แรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศขณะนั้น
$I_{sc}$	คือ กระแสวงจรรัดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศขณะนั้น
$I_{pv}$	คือ กระแสด้านออกของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศขณะนั้น

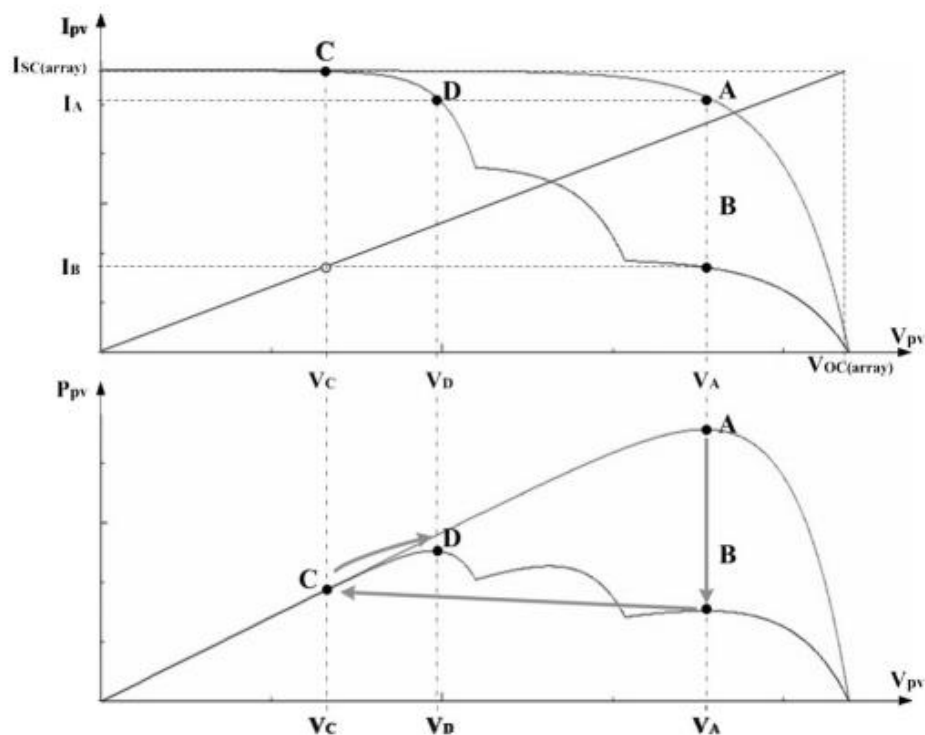


และใช้ร่วมกับวิธีความนำส่วนเพิ่ม เช่น ในขณะที่กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอภายใต้สภาพอากาศหนึ่งโดยมีเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันดังภาพ 18 และจุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ที่จุด A ต่อมาความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงมีค่าไม่สม่ำเสมอทำให้จุดทำงานย้ายไปอยู่ที่จุด B เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.13) โดยใช้ค่ากระแสต้านออกของกลุ่มแผงที่จุด B ทำให้จุดทำงานย้ายไปอยู่ที่จุด C แล้วใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มในการติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเพื่อย้ายจุดทำงานไปอยู่ที่จุด D

เนื่องจากสมการที่ (2.13) เป็นสมการเส้นตรงจึงง่ายต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ในสมการดังกล่าวยังต้องใช้ค่ากระแสวงจรลัดและแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศขณะนั้น ทำให้ต้องเพิ่มอุปกรณ์หรือขั้นตอนในการวัดค่า นอกจากนี้ การใช้สมการที่ (2.13) ในบางกรณีของการบังแสงบางกรณีไม่สามารถย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปใกล้จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการติดตามซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้า

จ) การจำกัดย่านการค้นหาค่ากำลังสูงสุดวงกว้าง

ย่านการค้นหาค่ากำลังสูงสุดวงกว้างกำหนดขึ้นจากขอบเขตของค่าแรงดันต้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่การจำกัดย่านการค้นหานั้นอาศัยค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดและแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบร่วมกับค่ากำลังสูงสุดที่พบภายใต้สภาพ



ภาพ 18 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง [40]

อากาศขณะนั้น [41, 42] ขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหานั้นกำหนดขึ้นจากค่าแรงดันต่ำสุดซึ่งหาจากอัตราส่วนของค่ากำลังสูงสุดที่พบภายใต้สภาพอากาศขณะนั้นกับค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงดังสมการที่ (2.14) ทั้งนี้เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าของแผงที่ได้จากผลคูณของแรงดันที่มีค่าต่ำกว่านี้กับค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบจะต่ำกว่าค่ากำลังสูงสุดที่พบนี้อย่างแน่นอน ขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหาก็จะถูกปรับให้เป็นปัจจุบันเมื่อพบว่ากำลังไฟฟ้าของกลุ่มแผงมีค่าเพิ่มขึ้นภายใต้สภาพอากาศขณะนั้น ในกรณีของ [41] ขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหาก็ถูกกำหนดที่แรงดันคงที่เท่ากับ 90% ของแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบดังสมการที่ (2.15) แต่ในกรณีของ [42] ขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหาก็จะถูกปรับให้เป็นปัจจุบันเมื่อพบว่ากำลังไฟฟ้าของกลุ่มแผงมีค่าเพิ่มขึ้นภายใต้สภาพอากาศขณะนั้นโดยใช้ค่ากระแสต่ำสุดแทนค่าแรงดันดังสมการที่ (2.16) โดยที่ค่ากระแสต่ำสุดดังกล่าวหาจากอัตราส่วนของค่ากำลังสูงสุดที่พบกับค่าที่ 90% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ ทั้งนี้ ในระหว่างการค้นหาในย่านที่จำกัดดังกล่าวจะบันทึกค่ากำลังสูงสุดและค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดไว้ เมื่อสำรวจจนทั่วทั้งย่านแล้วจะทราบตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง จึงย้ายจุดทำงานไปยังจุดดังกล่าวทันทีแล้วใช้วิธีพีแอนด์ไอเพื่อควบคุมให้จุดทำงานขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุดดวงกว้างจนกว่าจะตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ การเปลี่ยนแปลงลักษณะการบังแสง หรือถึงเวลาที่กำหนดไว้จึงติดตามจุดกำลังสูงสุดอีกครั้งเพื่อไม่ให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ห่างจากจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างมากเกินไป

$$V_{\min} = \frac{P_{\max}}{I_{mpp@STC}} \quad (2.14)$$

$$V_{\max} = 0.9V_{oc@STC} \quad (2.15)$$

$$I_{\min} = \frac{P_{\max}}{0.9V_{oc@STC}} \quad (2.16)$$

โดยที่	$V_{\min}$	คือ ค่าแรงดันขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหา
	$V_{\max}$	คือ ค่าแรงดันขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหา
	$I_{mpp@STC}$	คือ ค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ
	$V_{oc@STC}$	คือ ค่าแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ
	$P_{\max}$	คือ ค่ากำลังสูงสุดที่พบภายใต้สภาพอากาศขณะนั้น
	$I_{\min}$	คือ ค่ากระแสขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหา

การจำกัดย่านการค้นหาค่ากำลังสูงสุดช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามและลดกำลังสูญเสียระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่ากลุ่มแผงอยู่ภายใต้สภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอหรือไม่ จึงต้องค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างให้ทั่วทั้งย่านที่กำหนด ส่งผลให้เสียเวลาในการติดตามและสูญเสียกำลังไฟฟ้าของกลุ่มแผงในกรณีที่ความเข้มแสงสม่ำเสมอ นอกจากนี้ ความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงในสภาพอากาศโดยทั่วไปมักมีค่าต่ำกว่าค่าในเงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบทำให้กระแสต้านออกของกลุ่มแผงมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบด้วย ดังนั้น การใช้ค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบมากำหนดขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหาจึงทำให้ใช้เวลาในการค้นหานานเกินความจำเป็น นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิของแผงสูงขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงต่ำกว่าค่าที่ระบุภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ ดังนั้นการใช้ค่าที่ 90% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบมากำหนดขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหาจึงทำให้ใช้เวลาในการค้นหานานเกินความจำเป็น

#### ฉ) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง

เนื่องจากกระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{sc}$ ) มีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ( $S$ ) ในลักษณะที่ค่อนข้างเป็นเชิงเส้น จึงสามารถใช้ความสัมพันธ์ของค่ากระแสวงจรลัดของกลุ่มแผง ( $I_{sc@STC}$ ) และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ( $S_{STC}$ ) ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าความเข้มแสงในแต่ละสภาพอากาศด้วยสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{I_{sc}}{I_{sc@STC}} \cdot S_{STC} \quad (2.17)$$

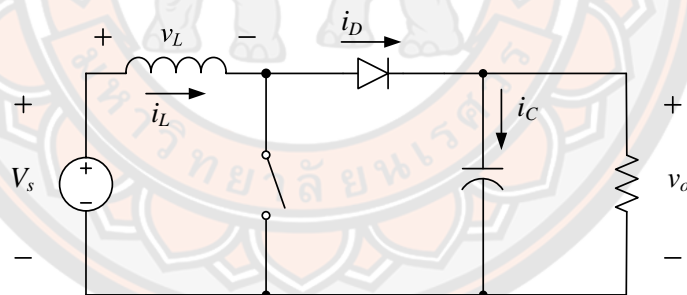
การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงพิจารณาจากค่าความเข้มแสงที่คำนวณได้จากสมการ (2.17) โดยเปรียบเทียบค่าจากจุดทำงาน 2 จุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผง นั่นคือ จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผง ( $0.8V_{oc\_mod}$ ) และจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $0.8V_{oc\_array}$ ) โดยหากผลต่างของความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้จากจุดทำงานทั้งสองมีค่าน้อยกว่า  $40 \text{ W/m}^2$  แสดงว่ากลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ ในทางกลับกันหากผลต่างดังกล่าวมีค่ามากกว่า  $40 \text{ W/m}^2$  แสดงว่าเกิดการบังแสงบางส่วน ทั้งนี้ ตัวเลข  $40 \text{ W/m}^2$  เป็นผลจากการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต 20 ราย [43] อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบด้วยวิธีทำให้จุดทำงานของกลุ่มแผงถูกย้ายระหว่างตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผงกับตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งครอบคลุมเกือบทั้งย่านแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงจึงทำให้ใช้เวลานานกว่าจะรู้ผลการตรวจสอบ และทำให้ความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง

## 2.3 วงจรทระดับแรงดัน

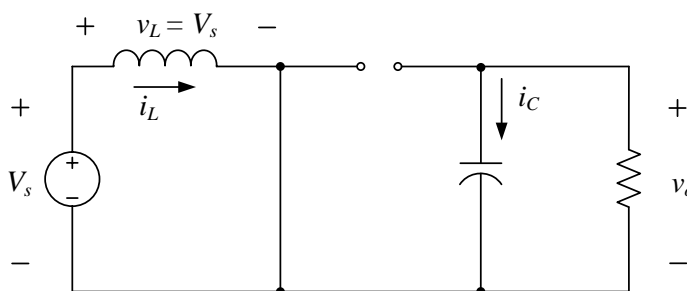
โดยทั่วไป ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ตัวแปลงผันกำลังซึ่งอาศัยการสวิตซิง (Switching) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น มอสเฟต หรือ ไอจีบีที เพื่อย้ายจุดทำงานของแผงไปที่จุดกำลังสูงสุด โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรทระดับแรงดันซึ่งเป็นตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงที่สร้างแรงดันด้านออกที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าแรงดันด้านเข้า แผนภาพวงจรทระดับแรงดันแสดงดังภาพ 19 โดยที่  $V_s$  คือแรงดันจากแหล่งกำเนิด,  $v_L$  คือแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ,  $i_L$  คือ กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ,  $i_D$  คือ กระแสที่ผ่านไดโอด,  $i_C$  คือกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุ และ  $V_o$  คือค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออก ( $v_o$ ) และกำหนดให้ตัวเก็บประจุมีค่ามากพอที่จะทำให้  $v_o$  ค่อนข้างคงที่ในสถานะอยู่ตัว ( $v_o \approx V_o$ )

### 2.3.1 หลักการทำงานของวงจรทระดับแรงดัน

เมื่อสวิตช์ปิด ไดโอดได้รับไบแอสย้อน ทำให้เกิดการแยกกันระหว่างด้านเข้าและด้านออกของวงจรดังวงจรสมมูลในภาพ 20 แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวกโดยมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งกำเนิด กระแสของตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น ตัวเหนี่ยวนำสะสมพลังงานที่ได้รับจากแหล่งกำเนิด โดยในขณะนี้โหลดได้รับพลังงานจากตัวเก็บประจุ

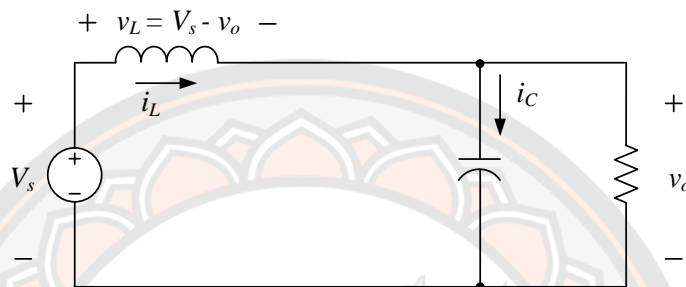


ภาพ 19 แผนภาพวงจรทระดับแรงดัน [44]

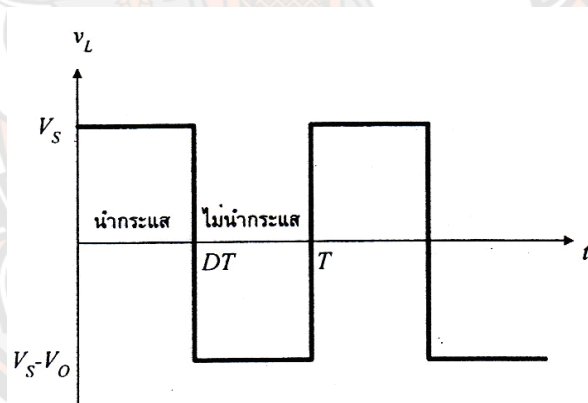


ภาพ 20 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [44]

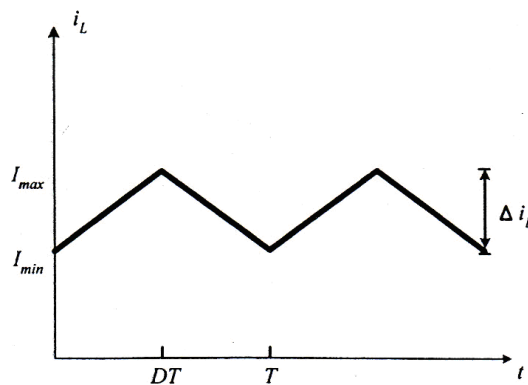
เมื่อสวิตช์เปิด ตัวเหนี่ยวนำคายพลังงานที่สะสมไว้ทำให้ไดโอดนำกระแส โหลดและตัวเก็บประจุได้รับพลังงานจากทั้งแหล่งกำเนิดและตัวเหนี่ยวนำ ในช่วงนี้แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างแรงดันด้านเข้ากับแรงดันด้านออกดังแสดงในภาพ 21 และเนื่องจากค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านเข้า แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำในช่วงนี้จึงมีค่าเป็นลบและกระแสของตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าของสัญญาณแรงดันและกระแสของตัวเหนี่ยวนำแสดงในภาพ 22



ภาพ 21 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [44]



(ก) แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



(ข) กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ภาพ 22 สัญญาณไฟฟ้าในวงจรทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [44]

อัตราส่วนของช่วงเวลาที่มีสวิตช์นำกระแสต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบสวิตซิงเป็นนิยามของดีวตี้ไซเคิล (Duty cycle,  $D$ ) นั่นคือ

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.18)$$

เนื่องจาก

$$T = t_{on} + t_{off}$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$t_{on} = DT$$

และ

$$t_{off} = (1 - D)T$$

โดยที่  $T$  คือ ช่วงเวลาหนึ่งคาบสวิตซิง

$t_{on}$  คือ ช่วงเวลาที่นำกระแส

$t_{off}$  คือ ช่วงเวลาที่ไม่นำกระแส

อัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันหาได้จากอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกต่อค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านเข้า เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำซึ่งต้องเท่ากับศูนย์ในสถานะอยู่ตัว จะได้

$$\frac{1}{T} \int_0^T v_L dt = 0$$

แทนค่า จะได้

$$\int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_{t_{on}}^T v_L dt = 0$$

$$v_{L,on} \cdot t_{on} + v_{L,off} \cdot t_{off} = 0$$

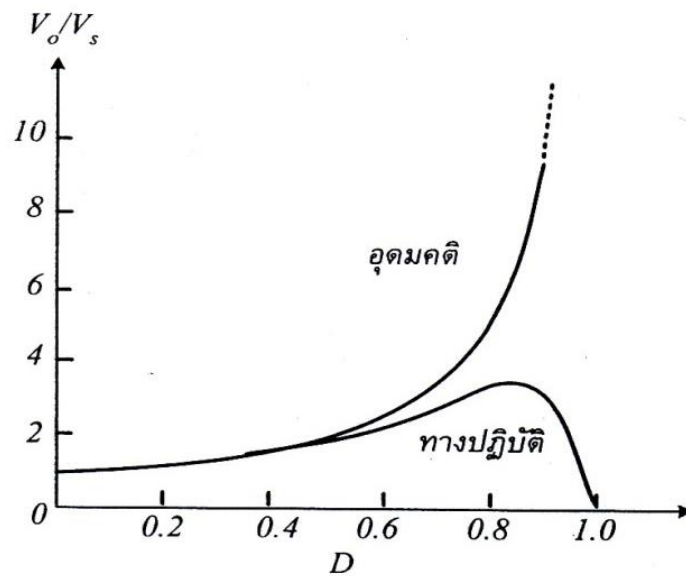
$$(V_s)(DT) + (V_s - V_o)(1 - D)T = 0$$

หลังจากจัดรูปสมการจะได้อัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.19)$$

โดยจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า  $D$  ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออก ทั้งนี้ ในอุดมคติอัตราขยายแรงดันวงจรทระดับแรงดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าดีวตี้ไซเคิลดังภาพ 23 แต่ในทางปฏิบัติกำลังสูญเสียภายในตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ สวิตช์และไดโอด ส่งผลต่ออัตราขยายแรงดันของวงจร นั่นคือทำให้แรงดันด้านออกมีค่าต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็นโดยเฉพาะที่ค่า  $D$  สูง ๆ





ภาพ 23 กราฟอัตราขยายแรงดันของวงจรระดับแรงดัน [44]

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้ากับค่าเฉลี่ยของกระแสด้านออกของวงจรระดับแรงดันสามารถหาได้โดยกำหนดให้กำลังสูญเสียในวงจรมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด ส่งผลให้ได้กำลังด้านเข้ามีค่าเท่ากับกำลังด้านออก นั่นคือ

$$P_s = P_o$$

แทนค่า จะได้

$$V_s I_s = V_o I_o$$

จัดรูป จะได้

$$\frac{I_s}{I_o} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.20)$$

### 2.3.2 ค่าความพลีวของสัญญาณแรงดันด้านออก

การใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงช่วยทำให้แรงดันด้านออกมีค่าคงที่ แต่ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงมากอาจมีขนาดใหญ่และราคาแพง ในทางด้านปฏิบัติจึงนิยมเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมที่ทำให้ความพลีว (Ripple) ของสัญญาณแรงดันด้านออกมีค่าไม่เกิน 3% [44] ในสถานะอยู่ตัวสัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรระดับแรงดันแสดงดังภาพ 24 โดยที่  $\Delta V_o$  บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงค่ายอดถึงยอด (Peak to peak) ของแรงดันด้านออก แต่โดยทั่วไปนิยมกำหนดให้ความพลีวของแรงดันด้านออกหาได้จากอัตราส่วนของ  $\Delta V_o$  ต่อค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เนื่องจากค่าแรงดันของตัวเก็บประจุแปรผันโดยตรงกับปริมาณประจุในตัวเก็บประจุ ดังนั้น ค่าความพลีวของแรงดันด้านออก



หาได้จากปริมาณประจุที่ไหลออกจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดพื้นที่ที่แรเงาในกราฟกระแสของตัวเก็บประจุในวงจรทบทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัวดังภาพ 25

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดของตัวแปรในสมการ จะได้

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C}$$

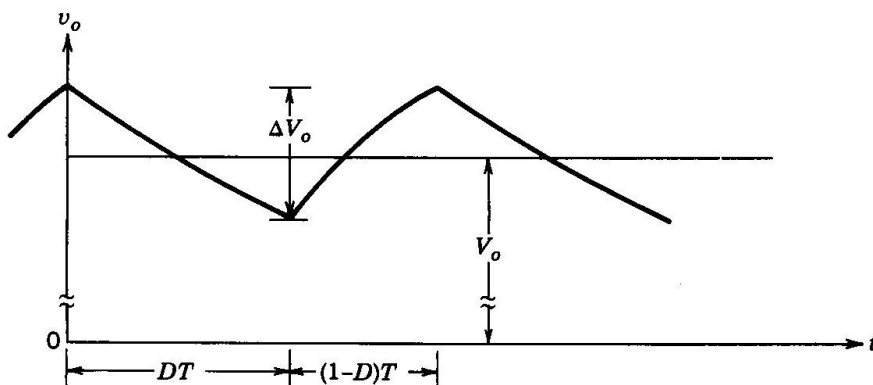
แทนค่า  $\Delta Q$  จะได้

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \left( \frac{V_o}{R} \times DT \right)$$

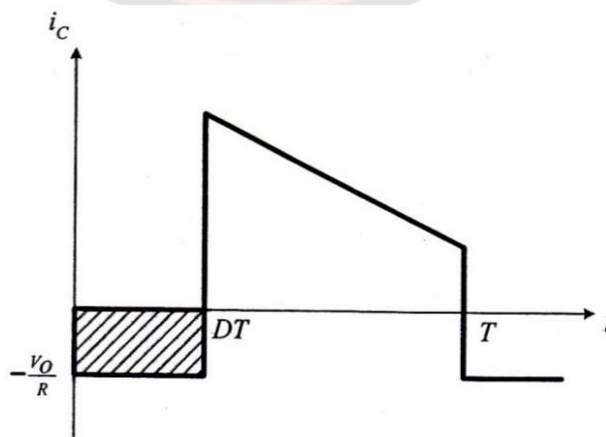
จัดรูปสมการ จะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (2.21)$$

โดยที่  $f$  คือค่าความถี่สวิตซิง (Switching frequency) ที่เลือกใช้งาน ดังนั้นจะเห็นว่าสามารถทำให้ความพลัวของสัญญาณแรงดันด้านออกลดลงได้โดยการลดค่าตัวดีไซเคิล หรือเพิ่มค่าความต้านทานของโหลด หรือเพิ่มค่าของความจุ หรือเพิ่มค่าความถี่สวิตซิง [44]



ภาพ 24 สัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [44]



ภาพ 25 กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุในวงจรทบทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [44]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยของเรื่องการควบคุมการสร้างกำลังไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอซึ่งนำเสนอวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่สามารถตรวจพบการบังแสงบางส่วนของความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงและประยุกต์ใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวร่วมกับการจำกัดย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างดังนี้

- 1) ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์และวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงเมื่อเกิดการบังแสงบางส่วน
- 2) จำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงบางส่วนโดยใช้โปรแกรมแมตแล็บและศึกษาผลกระทบของการบังแสงบางส่วนต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผง
- 3) พัฒนารีวิวตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงและวิธีจำกัดย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง เพื่อนำมาใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดร่วมกับวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังและกระแสด้านออกของกลุ่มแผง
- 4) ทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอโดยจำลองผลในโปรแกรมแมตแล็บภายใต้สภาพอากาศคงที่และเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องซึ่งประกอบด้วยสภาวะความเข้มแสงสม่ำเสมอและการบังแสงบางส่วน
- 5) สร้างชุดอุปกรณ์เพื่อทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวเทียบกับแบบตรึงช่วงก้าว
- 6) รวบรวม วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

### 3.2 การจำลองคุณลักษณะด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งกรณีที่ได้รับ ความเข้มแสงสม่ำเสมอและกรณีที่เกิดการบังแสงบางส่วน จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผง เซลล์แสงอาทิตย์มาใช้จำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงที่กำหนดใช้ในงานวิจัยนี้โดย แสดงผลกระทบของความเข้มแสง อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และการบังแสงบางส่วน ที่มีต่อ ตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผง

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อธิบายความสัมพันธ์ของค่ากระแส และแรงดันด้านออกของแผงที่ได้รับผลจากความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์โดย ค่ากระแสด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) หาได้จากสมการที่ (2.4) นั่นคือ

$$I_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_o \left\{ \exp\left(\frac{q}{AkT_{cell}} \cdot \frac{V_{pv}}{n_s}\right) - 1 \right\} \quad (3.1)$$

ทั้งนี้ ค่ากระแสพลังแสง ( $I_{ph}$ ) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่ง คำนวณได้จากสมการที่ (2.5) นั่นคือ

$$I_{ph} = \{I_{scr} + k_i(T_{cell} - T_r)\} \frac{S}{1000} \quad (3.2)$$

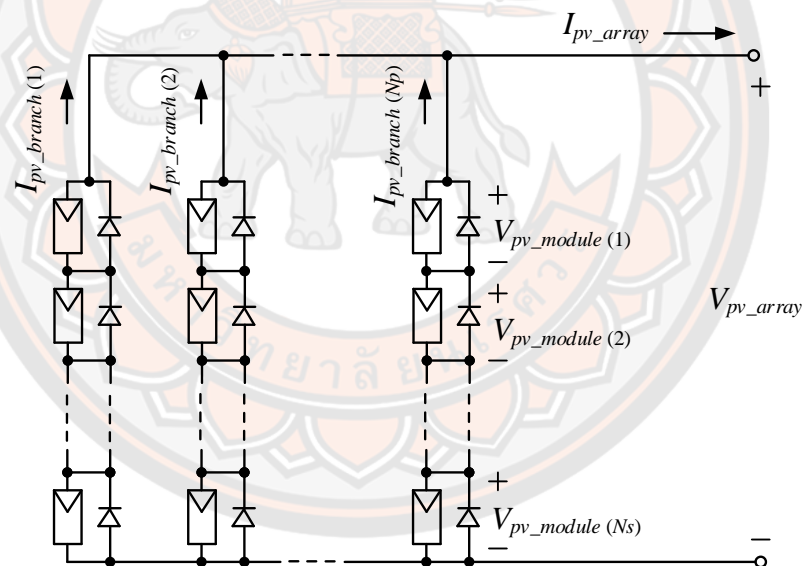
ในขณะที่ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_o$ ) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้ จากสมการที่ (2.7) นั่นคือ

$$I_o = I_{or} \cdot \left(\frac{T_{cell}}{T_r}\right)^3 \cdot \exp\left(\left(\frac{qE_g}{kA}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right) \quad (3.3)$$

สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดใช้ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ แผงที่ใช้จำลองผลดังตาราง 2 หลังจากนั้นจึงพิจารณาการจำลองผลคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออก ของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อของแผงแบบอนุกรมกันเป็นแถวและนำแต่ละแถวมา เชื่อมต่อแบบขนานกันจนกลายเป็นกลุ่มแผงดังภาพ 26 โดยมีไดโอดลัดผ่าน (Bypass diode) ต่อ แบบขนานกับแต่ละแผงเพื่อป้องกันความเสียหายของแผงเมื่อถูกบังแสงบางส่วน ในบทความวิจัย [45] อธิบายหลักการการจำลองผลคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่ง สรุปได้ว่า ค่าแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงหาได้จากผลรวมของค่าแรงดันด้านออกของแต่ละแผงที่ต่อ อนุกรมกัน โดยที่ค่าแรงดันด้านออกของแต่ละแผงสัมพันธ์กับค่ากระแสด้านออกที่ไหลในแต่ละแถว

ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองผล

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการจำลองผล
$A$	1.72
$E_g$	1 eV
$T_r$	301.18 K
$I_{or}$	$19.9693 \times 10^{-6}$ A
$I_{scr}$	3.3 A
$k_i$	0.0017 A/K
$n_s$	36 เซลล์
$n_p$	1 แถว



ภาพ 26 แผนภาพการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นกลุ่มแผง

ทั้งนี้ แผงที่ถูกบังแสงจนไม่สามารถจ่ายกระแสเท่ากับค่ากระแสด้านนอกของแถวได้จะถูกกำหนดให้มีค่าแรงดันเป็นศูนย์เนื่องจากไดโอดได้รับการไบแอสไปข้างหน้า ในขณะที่ค่ากระแสด้านนอกของกลุ่มแผงหาได้จากผลรวมของค่ากระแสในแต่ละแถว และบทความวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถกำหนดจำนวนแผงที่ได้รับความเข้มแสงในแต่ละระดับเพื่อใช้จำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านนอกของกลุ่มแผง แต่การกำหนดระดับความเข้มแสงที่กระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าแผงใดบ้างที่ถูกบังแสงและแต่ละ

แผงได้รับความเข้มแสงที่ระดับใด ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงปรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลุ่มแผงให้สามารถระบุตำแหน่งของแผงที่ถูกบังแสงและระดับความเข้มแสงที่แต่ละแผงได้รับเพื่อความสะดวกในการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการบังแสงต่อตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

$$V_{pv\_array} = \sum_{n=1}^{N_s} \frac{AkT_{module(n)}}{q} \ln \left( \frac{I_{ph\_module(n)} - I_{pv\_branch}}{I_{o\_module(n)}} + 1 \right) \quad (3.4)$$

โดยที่  $V_{pv\_array}$  คือ แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

$I_{pv\_branch}$  คือ กระแสด้านออกของแต่ละแถว (A)

$N_s$  คือ จำนวนแผงที่ต่ออนุกรมกันในแต่ละแถว

ในขณะที่ ค่ากระแสด้านออกของกลุ่มแผงหาได้จากผลรวมของค่ากระแสในแต่ละแถวดังนี้

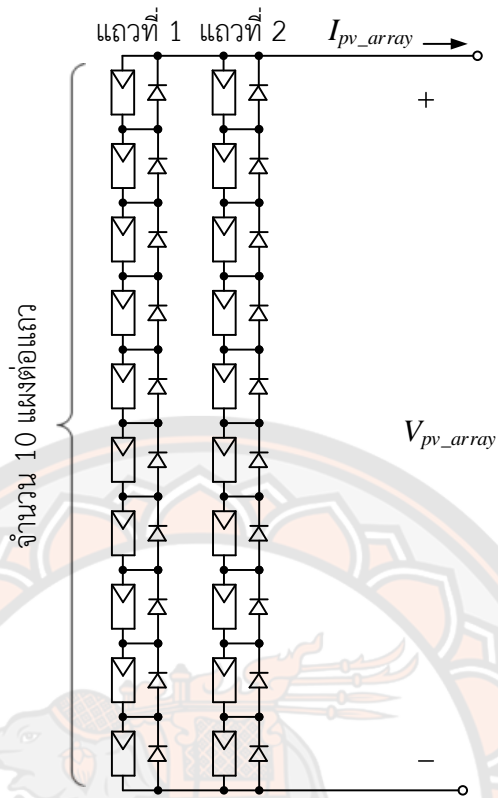
$$I_{pv\_array} = \sum_{n=1}^{N_p} I_{pv\_branch(n)} \quad (3.5)$$

โดยที่  $I_{pv\_array}$  คือ กระแสด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

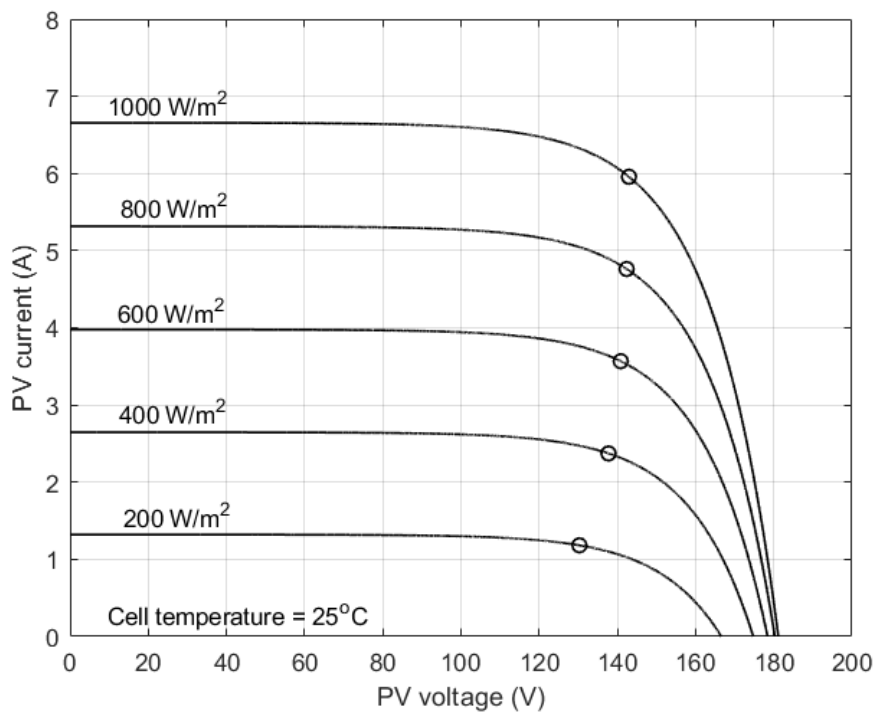
$I_{pv\_branch}$  คือ กระแสด้านออกของแต่ละแถว (A)

$N_p$  คือ จำนวนแถวที่ต่อขนานกันของแผง

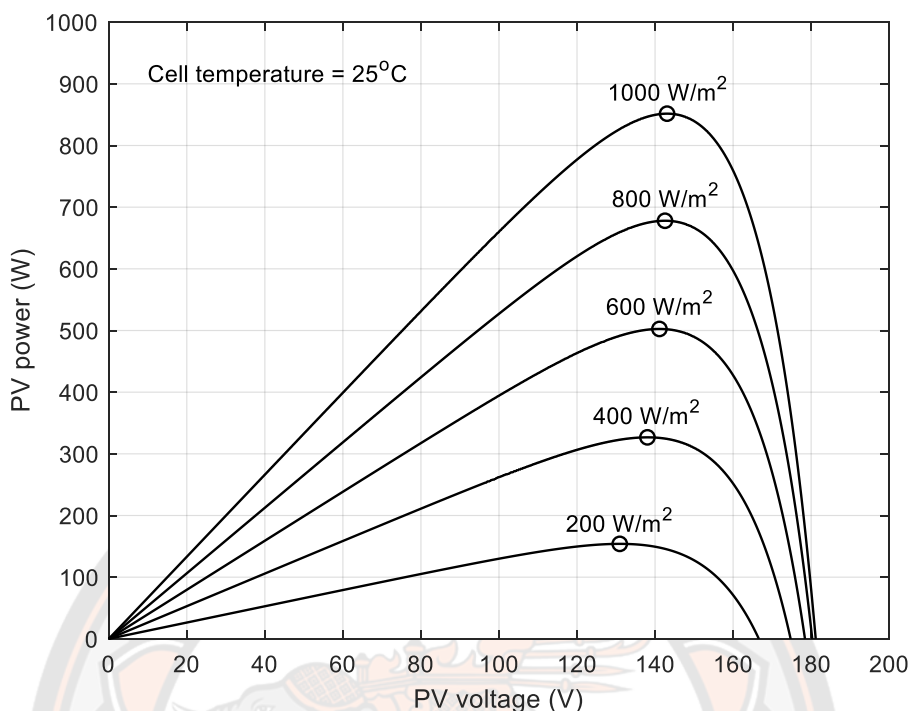
เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยกำหนดใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 20 แผงนำมาต่อขนานกันเป็น 2 แถว โดยที่แต่ละแถวเกิดจากการต่ออนุกรมกันของ 10 แผงดังภาพ 27 จึงได้คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเมื่อได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  พบว่ากลุ่มแผงสามารถจ่ายกระแสวงจรลัดเท่ากับ 6.66 A และแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงมีค่าเท่ากับ 181.1 V โดยกำลังด้านออกสูงสุดที่กลุ่มแผงจ่ายได้ภายใต้สภาพอากาศดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 851.6 W ที่ระดับแรงดันเท่ากับ 143.1 V และเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  ผลกระทบของค่าความเข้มแสงที่มีต่อค่ากระแสและแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงที่กำหนดสามารถแสดงดังภาพ 28 จะเห็นว่า เมื่อความเข้มแสงที่กระทบแผงมีค่าสูงขึ้น กระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงจะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในลักษณะเป็นเชิงเส้น ขณะที่แรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นและจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงมีการเปลี่ยนตำแหน่งดังภาพ 29 นั่นคือ เมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้น จุดกำลังสูงสุดจะย้ายไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าสูงกว่าเดิม



ภาพ 27 กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วย 2 แถว ๆ ละ 10 แผง



ภาพ 28 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของกลุ่มแผง

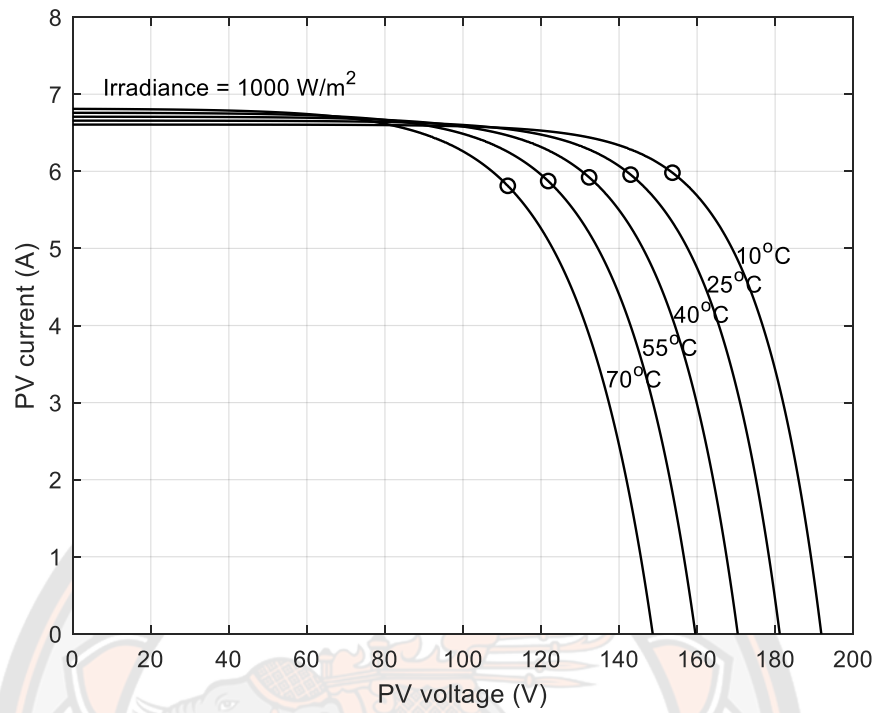


ภาพ 29 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผง

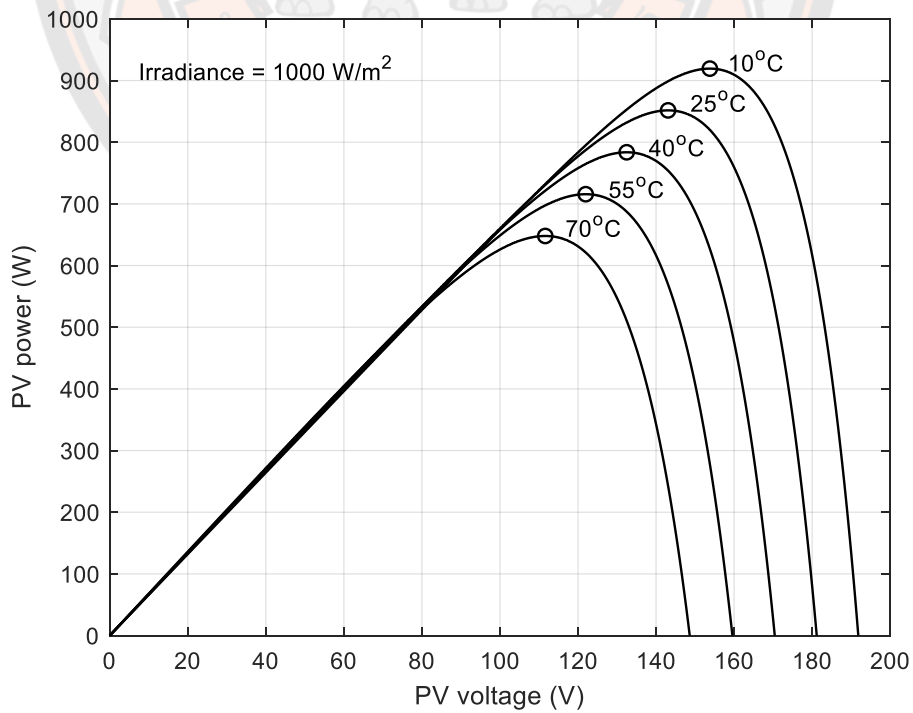
ผลกระทบจากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อค่ากระแสและแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงที่กำหนดสามารถแสดงดังภาพ 30 โดยความเข้มแสงมีค่าคงที่เท่ากับ 1000 W/m<sup>2</sup> จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของเซลล์มีค่าสูงขึ้น กระแสวงจรลัดของกลุ่มมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แรงดันวงจรเปิดจะมีค่าต่ำลงในลักษณะเป็นเชิงเส้น ส่งผลให้กำลังด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าต่ำลงและจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงมีการเปลี่ยนตำแหน่งดังภาพ 31 นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น จุดกำลังสูงสุดจะย้ายไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าต่ำกว่าเดิม

อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่เกิดการบังแสงบางส่วนโดยมีจำนวน 6 แผงที่ได้รับความเข้มแสง 500 W/m<sup>2</sup> แบ่งเป็นแถวละ 3 แผง ในขณะที่อีก 14 แผงที่เหลือยังคงได้รับความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup> ซึ่งทุกแผงมีอุณหภูมิของเซลล์เท่ากับ 25°C เมื่อเทียบกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงกรณีที่ได้รับ ความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอเท่ากับ 1000 W/m<sup>2</sup> และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 25°C จากการจำลองผลซึ่งมีเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันดังภาพ 32 และเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันดังภาพ 33 จะเห็นว่าเมื่อเกิดการบังแสงบางส่วนจะมีจุดยอดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมากกว่าหนึ่งจุดและตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมที่กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ

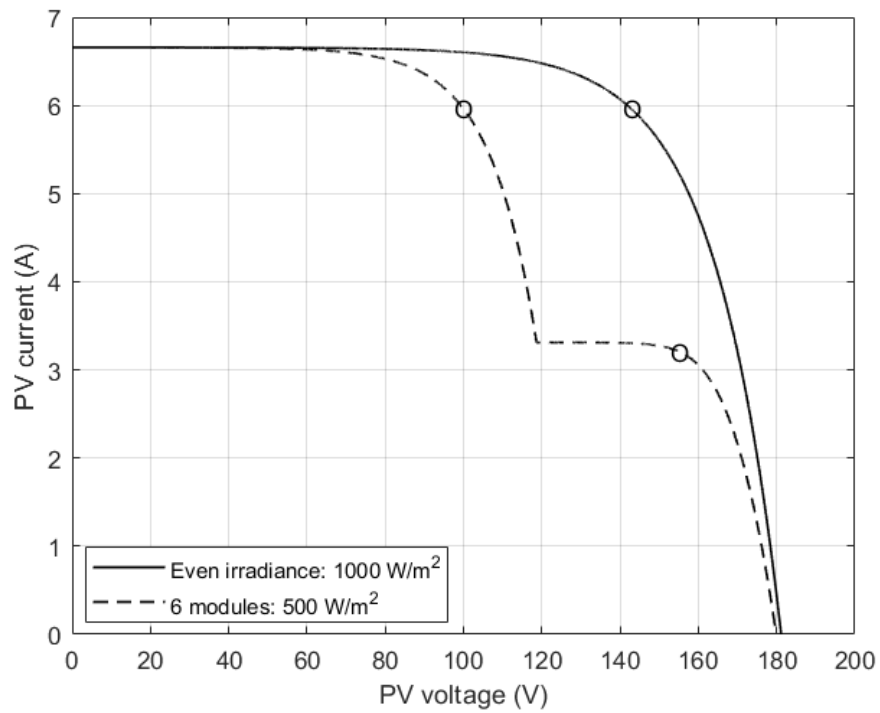




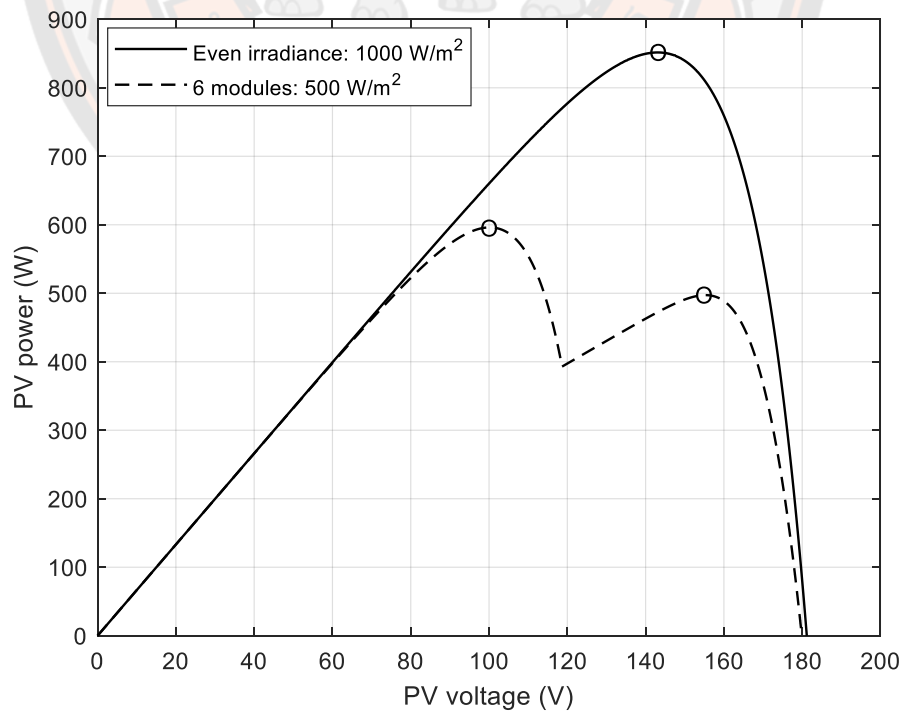
ภาพ 30 ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของกลุ่มแผง



ภาพ 31 ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผง



ภาพ 32 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผงเมื่อ 6 แผงถูกบังแสง



ภาพ 33 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงเมื่อ 6 แผงถูกบังแสง

### 3.3 ผลกระทบของการบังแสงบางส่วนต่อคุณลักษณะด้านออกของกลุ่มแผง

ตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงได้รับผลกระทบจากรูปแบบของการบังแสงบางส่วนที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสง จำนวนแผงที่ถูกบังแสง จำนวนระดับความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ได้รับแสงแต่ละระดับ รวมทั้งจำนวนแผงที่ถูกบังแสงในแต่ละแถว ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการบังแสงบางส่วนต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงจากเส้นโค้งกระแส-แรงดันและเส้นโค้งกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงที่กำหนดใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งได้จากการจำลองผลด้วยสมการในหัวข้อที่ 3.2 โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ  $25^{\circ}\text{C}$

#### 3.3.1 ระดับความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสง

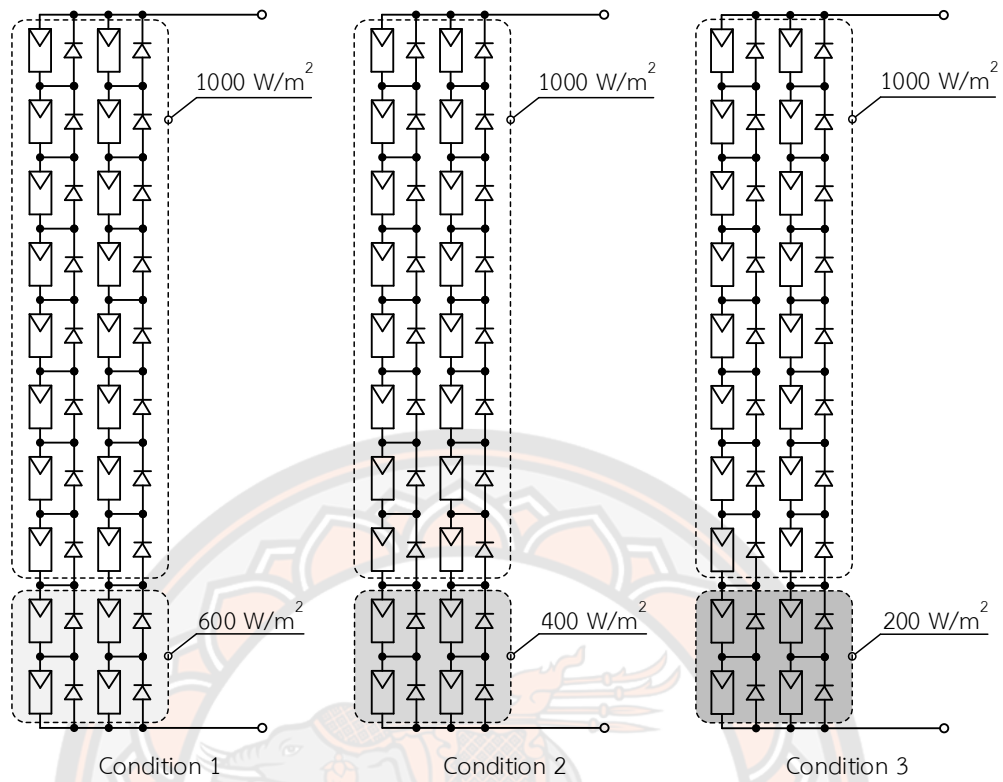
เมื่อพิจารณากลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดขึ้นและกำหนดค่าความเข้มแสงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 แผง (แถวละ 2 แผง) ที่ถูกบังแสงดังภาพ 34 ผลกระทบของระดับความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสงต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันและเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงแสดงดังภาพ 35 และภาพ 36 ตามลำดับ เส้นจุดแสดงผลการจำลองในกรณีที่ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอเท่ากับ  $1000\text{ W/m}^2$  ในขณะที่เส้นประแสดงผลการจำลองในกรณีที่แผงจำนวน 4 แผง ถูกบังแสง โดยที่

กรณีที่ 1 (Partial shading condition 1) ทั้ง 4 แผงได้รับความเข้มแสง  $600\text{ W/m}^2$

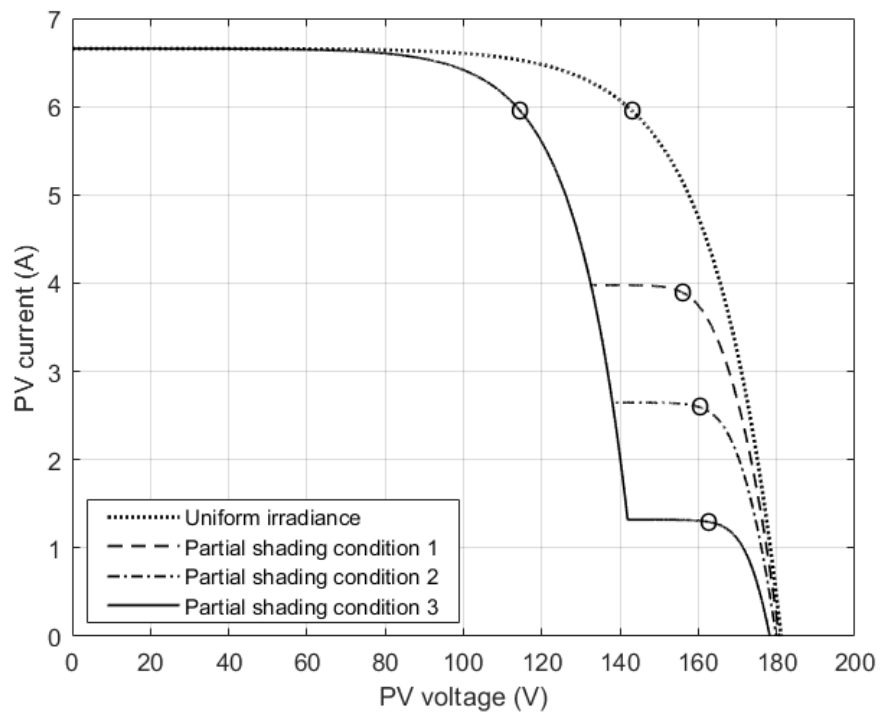
กรณีที่ 2 (Partial shading condition 2) ทั้ง 4 แผงได้รับความเข้มแสง  $400\text{ W/m}^2$  และ

กรณีที่ 3 (Partial shading condition 3) ทั้ง 4 แผงได้รับความเข้มแสง  $200\text{ W/m}^2$

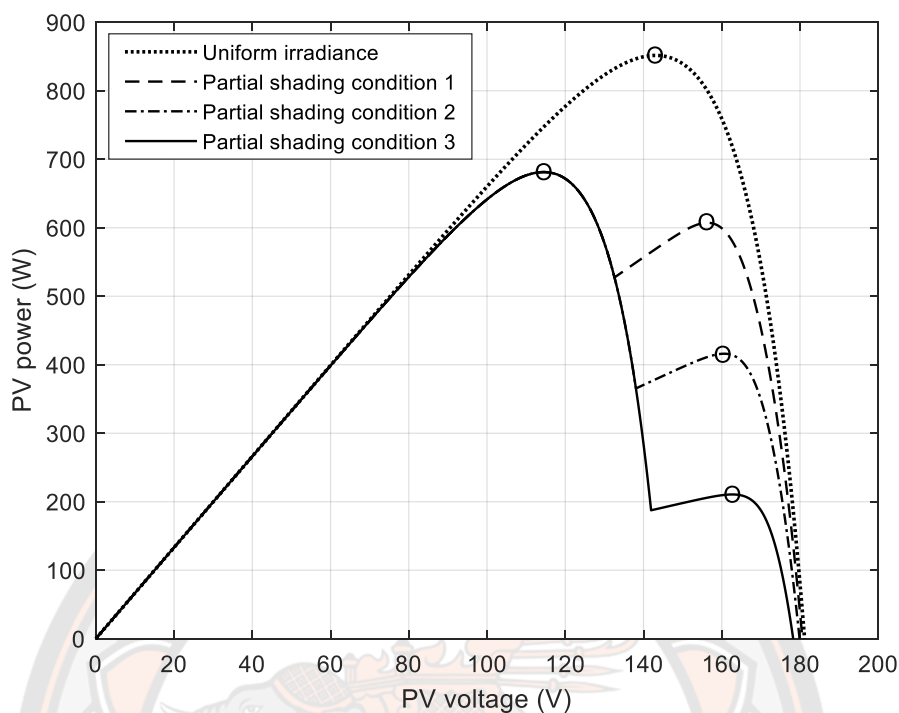
เมื่อพิจารณาภาพ 35 และภาพ 36 จะเห็นว่า ในแต่ละระดับความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสงจะปรากฏจุดยอดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน (อาจเป็นจุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่หรือจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง) ที่มีค่ากระแสเท่ากับค่าที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงที่ได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ และสูงกว่าค่ากระแสที่จุดยอดอื่น โดยจุดยอดดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันประมาณเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของหนึ่งแผงกับตัวเลขที่น้อยที่สุดของจำนวนแผงที่ไม่ถูกบังแสงเมื่อเทียบกับในแต่ละแถว



ภาพ 34 การกำหนดความเข้มแสงบนแผงจำนวน 4 แผงที่ถูกบังแสง



ภาพ 35 ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน



ภาพ 36 ผลของความเข้มแสงบนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

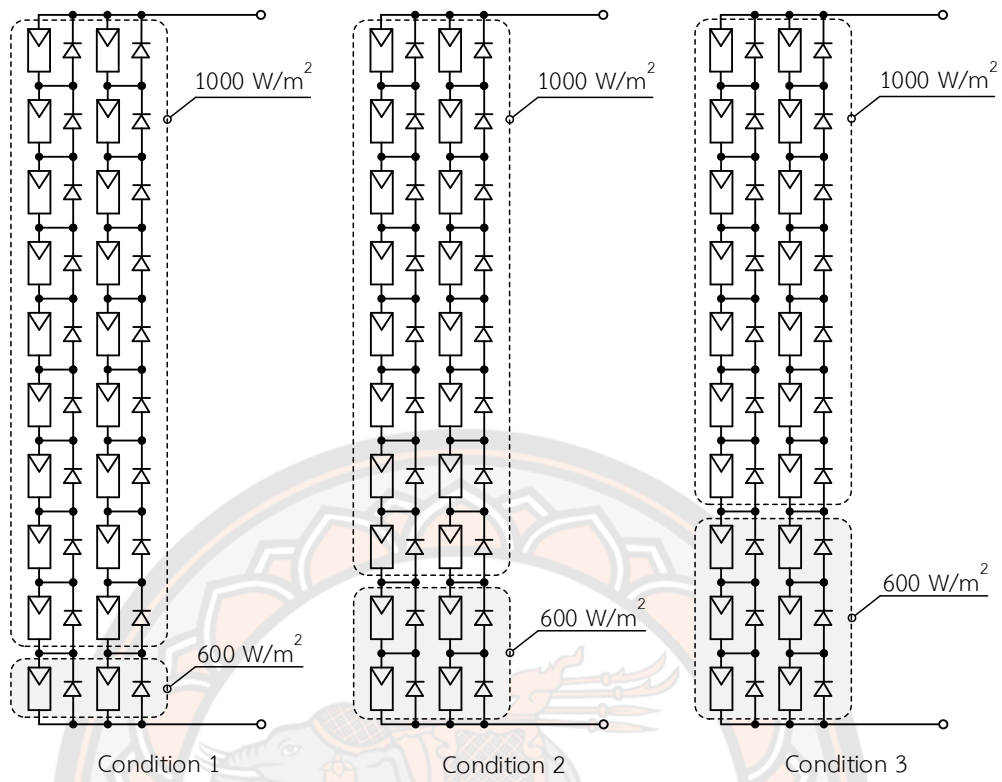
### 3.3.2 จำนวนแผงที่ถูกบังแสง

ในการศึกษาผลของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันและกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงนั้นได้กำหนดให้แผงที่ถูกบังแสงในแต่ละแถวมีจำนวนเท่ากันโดยได้รับความเข้มแสงลดลงเหลือ  $600 \text{ W/m}^2$  การกำหนดจำนวนแผงที่ถูกบังแสงดังกล่าวแสดงในภาพ 37 ผลกระทบของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะเป็นดังภาพ 38 และภาพ 39 เส้นจุดแสดงผลการจำลองในกรณีที่ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอที่  $1000 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่เส้นประ เส้นประผสมจุด และเส้นทึบ แสดงผลการจำลองในกรณีที่ถูกบังแสงจนได้รับความเข้มแสงลดลงเหลือ  $600 \text{ W/m}^2$  และแผงที่ถูกบังแสงมีจำนวนเท่ากันในแต่ละแถว โดยที่

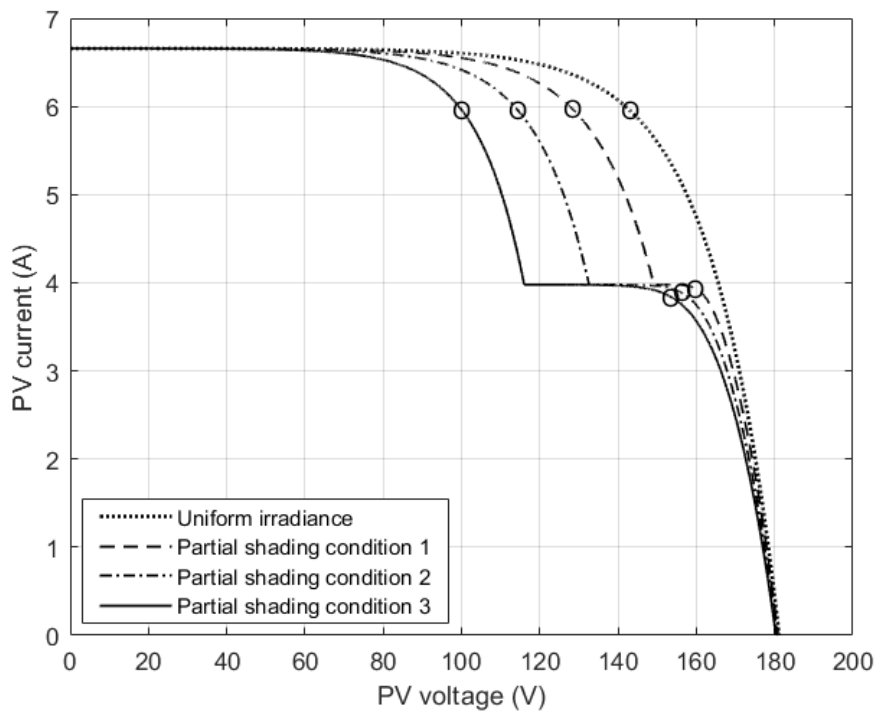
กรณีที่ 1 (Partial shading condition 1) แผงที่ถูกบังแสงมีจำนวน 2 แผง

กรณีที่ 2 (Partial shading condition 2) แผงที่ถูกบังแสงมีจำนวน 4 แผง และ

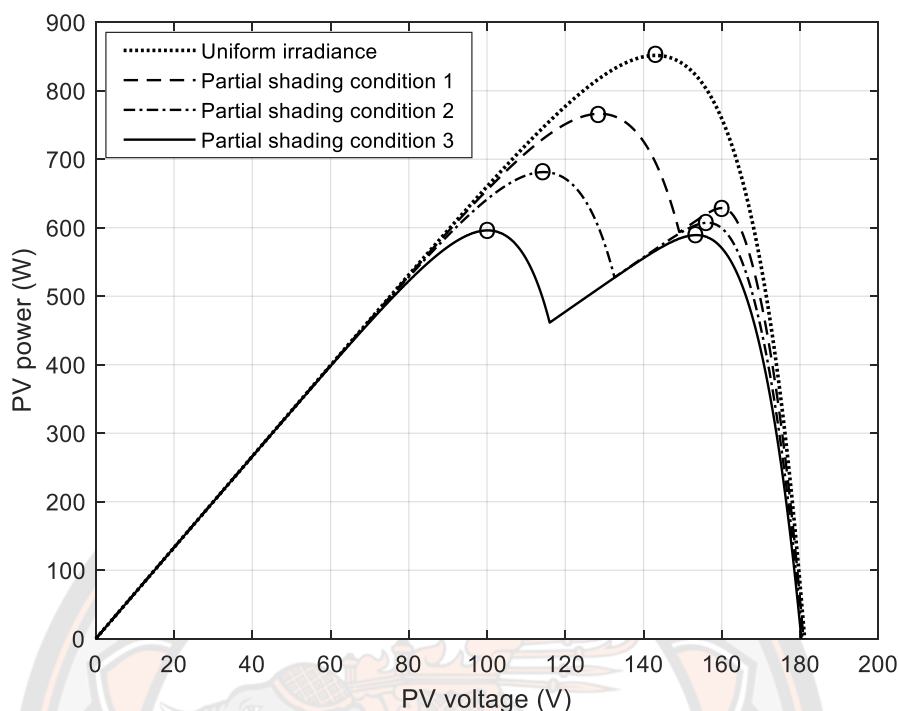
กรณีที่ 3 (Partial shading condition 3) แผงที่ถูกบังแสงมีจำนวน 6 แผง



ภาพ 37 การกำหนดจำนวนแผงที่ถูกบังแสงจนเหลือ 600 W/m<sup>2</sup>



ภาพ 38 ผลของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน



ภาพ 39 ผลของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

เมื่อพิจารณาภาพ 38 และภาพ 39 จะเห็นว่า ในแต่ละจำนวนของแผงที่ถูกบังแสงจะปรากฏจุดยอดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน (อาจเป็นจุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่หรือจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง) ที่มีค่ากระแสเท่ากับค่าที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงในขณะที่ได้รับแสงอย่างสม่ำเสมอ และสูงกว่าค่ากระแสที่จุดยอดอื่น โดยจุดยอดดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันประมาณเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของหนึ่งแผงกับตัวเลขที่น้อยที่สุดของจำนวนแผงที่ไม่ถูกบังแสงเมื่อเทียบกับในแต่ละแถว

### 3.3.3 จำนวนระดับความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ได้รับแสงแต่ละระดับ

ในการศึกษาผลของจำนวนระดับความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ได้รับแสงแต่ละระดับต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันและเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงได้กำหนดให้แผงที่ถูกบังแสงมีจำนวน 6 แผง (แถวละ 3 แผง) โดยแผงในแต่ละแถวที่ได้รับแสงแต่ละระดับมีจำนวนเท่ากัน การกำหนดความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ได้รับแสงแต่ละระดับแสดงดังภาพ 40 ผลของจำนวนระดับความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ได้รับแสงแต่ละระดับต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะแสดงดังภาพ 41 และภาพ 42 เส้นจุดแสดงผลการจำลองในกรณีที่ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอที่  $1000 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่เส้นประ เส้นประผสมจุด และ



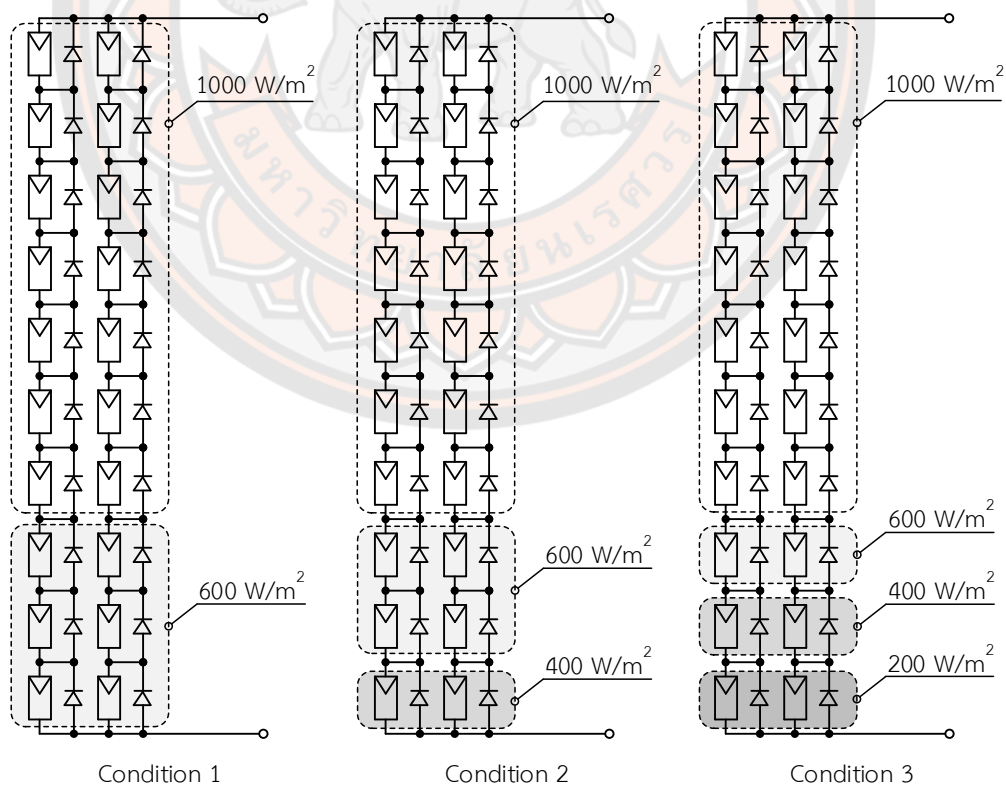
เส้นทึบ แสดงผลการจำลองในสภาวะความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ ซึ่งกำหนดให้แผงที่ถูกบังแสงมีจำนวน 6 แผง (แถวละ 3 แผง) โดยที่

กรณีที่ 1 (Partial shading condition 1) ทั้ง 6 แผงได้รับความเข้มแสง  $600 \text{ W/m}^2$

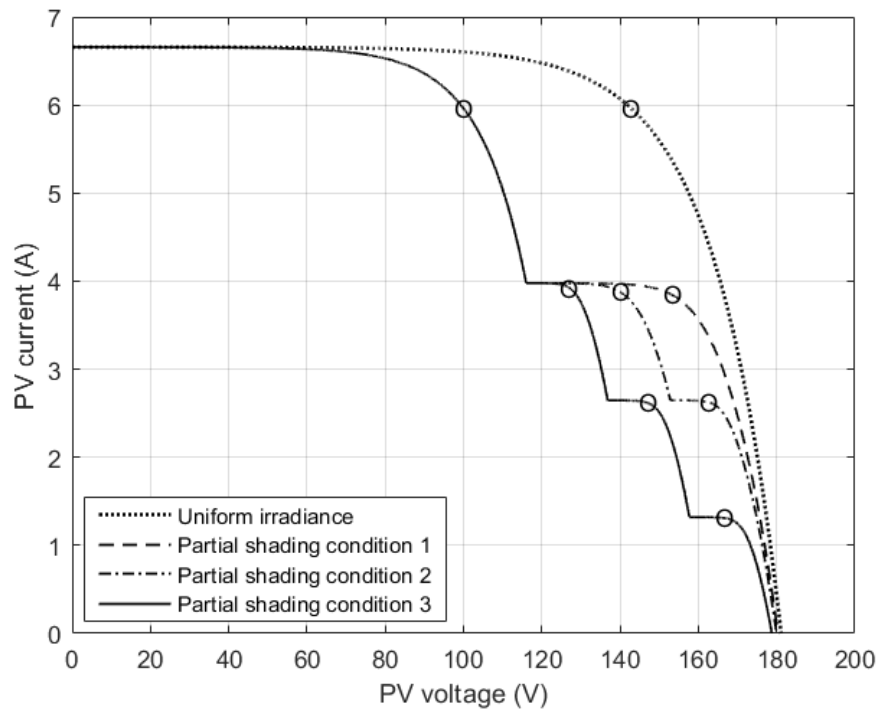
กรณีที่ 2 (Partial shading condition 2) 4 แผง (แถวละ 2 แผง) ได้รับความเข้มแสง  $600 \text{ W/m}^2$  และอีก 2 แผง (อยู่ในแถวละ 1 แผง) ได้รับความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$

กรณีที่ 3 (Partial shading condition 3) 2 แผง (แถวละ 1 แผง) ได้รับความเข้มแสง  $600 \text{ W/m}^2$  อีก 2 แผง (แถวละ 1 แผง) ได้รับความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  และอีก 2 แผง (แถวละ 1 แผง) ได้รับความเข้มแสง  $200 \text{ W/m}^2$

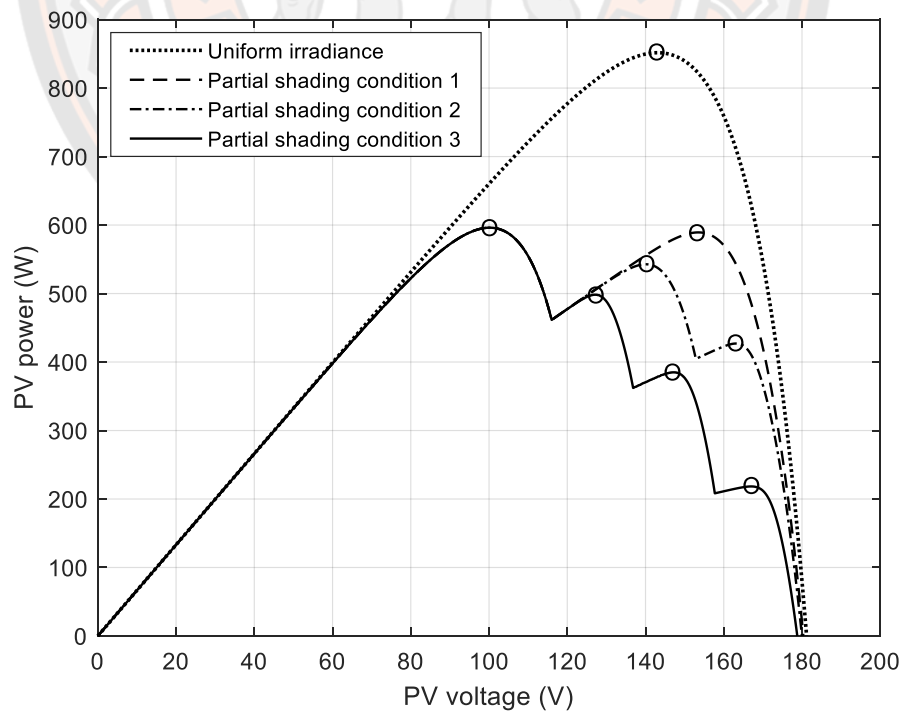
เมื่อพิจารณาภาพ 41 และภาพ 42 จะเห็นว่า ในแต่ละจำนวนของระดับความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ได้รับแสงแต่ละระดับจะปรากฏจุดยอดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน (อาจเป็นจุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่หรือจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง) ที่มีค่ากระแสเท่ากับค่าที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงในขณะที่ได้รับแสงอย่างสม่ำเสมอ และสูงกว่าค่ากระแสที่จุดยอดอื่น โดยจุดยอดดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันประมาณเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของหนึ่งแผงกับตัวเลขที่น้อยที่สุดของจำนวนแผงที่ไม่ถูกบังแสงเมื่อเทียบกับในแต่ละแถว



ภาพ 40 การกำหนดความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ถูกบังแสง



ภาพ 41 ผลของความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน



ภาพ 42 ผลของความเข้มแสงและจำนวนแผงที่ถูกบังต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

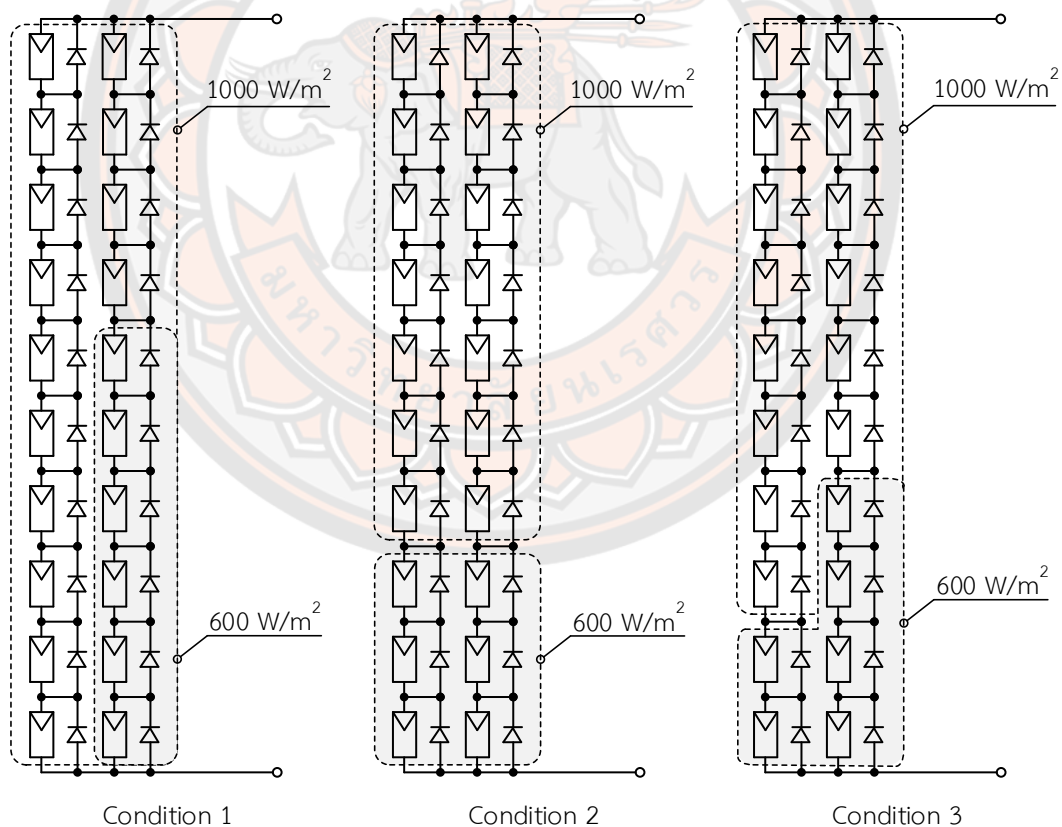
### 3.3.4 จำนวนแผงที่ถูกบังแสงในแต่ละแถว

ในการศึกษาผลของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงในแต่ละแถวที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันและเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงได้กำหนดให้เกิดการบังแสงกับแผงจำนวนทั้งสิ้น 6 แผง ซึ่งได้รับความเข้มแสงลดลงเหลือ  $600 \text{ W/m}^2$  โดยกำหนดจำนวนแผงที่ถูกบังแสงในแต่ละแถวดังภาพ 43 ผลของจำนวนแผงที่ถูกบังแสงในแต่ละแถวต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะแสดงดังภาพ 44 และภาพ 45 ตามลำดับ เส้นจุดแสดงผลการจำลองในกรณีที่ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอที่  $1000 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่เส้นประ เส้นประผสมจุด และเส้นทึบ แสดงผลการจำลองเมื่อเกิดการบังแสงบางส่วน โดยที่

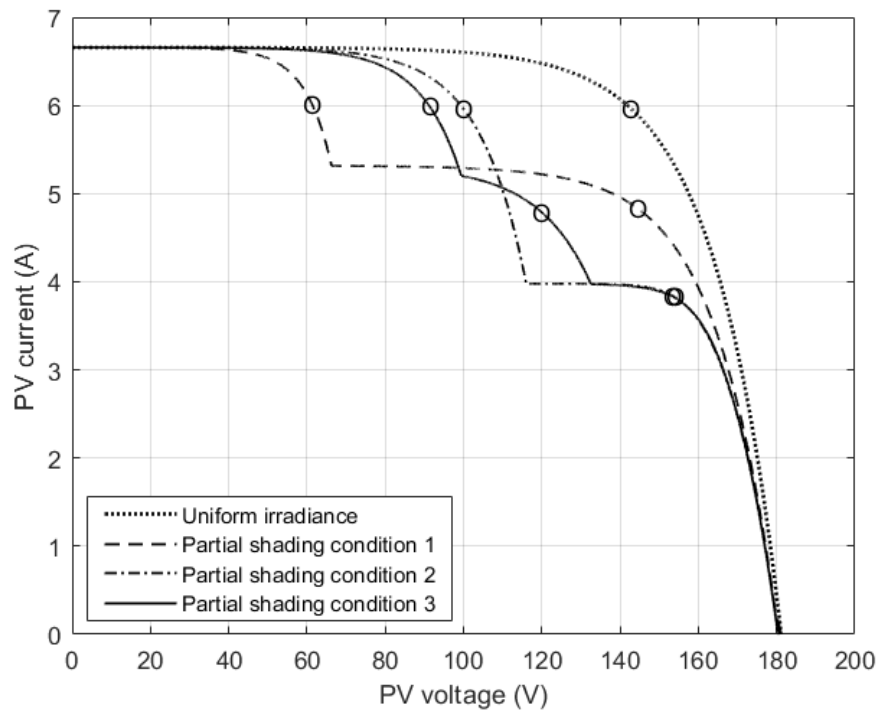
กรณีที่ 1 (Partial shading condition 1) ทั้ง 6 แผงอยู่ในแถวที่ 2

กรณีที่ 2 (Partial shading condition 2) 3 แผงอยู่ในแถวที่ 1 และแถวที่ 2

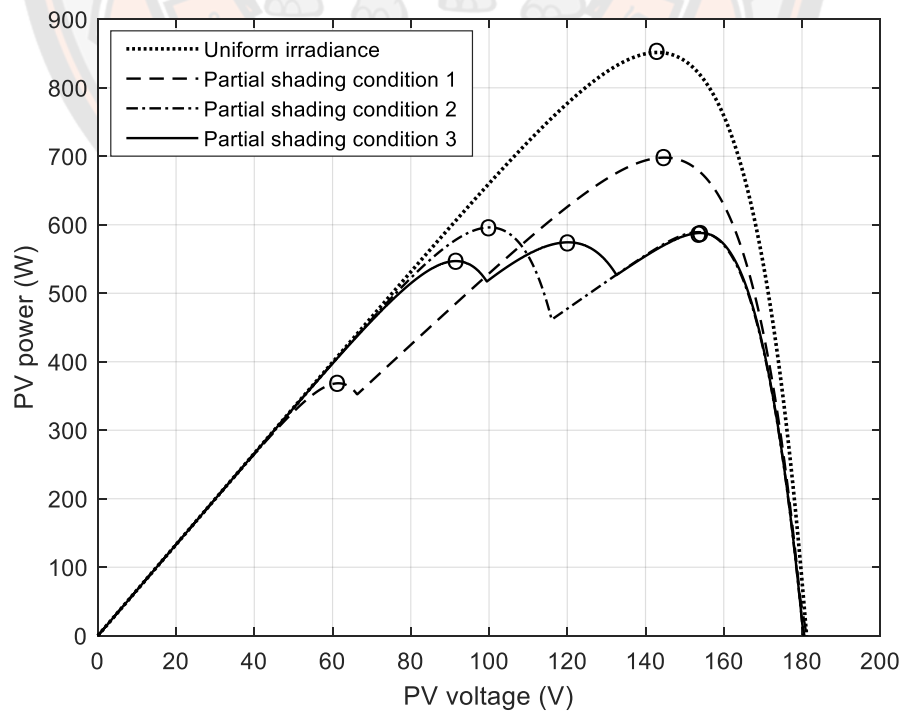
กรณีที่ 3 (Partial shading condition 3) 2 แผงอยู่ในแถวที่ 1 และอีก 4 แผงอยู่ในแถวที่ 2



ภาพ 43 การกำหนดจำนวนแผงในแต่ละกึ่งที่ถูกบังแสงจนเหลือ  $600 \text{ W/m}^2$



ภาพ 44 ผลของจำนวนแผงในแต่ละแถวที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน



ภาพ 45 ผลของจำนวนแผงในแต่ละแถวที่ถูกบังแสงต่อคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

เมื่อพิจารณาภาพ 44 และภาพ 45 จะเห็นว่า ในแต่ละจำนวนของแฉงที่ถูกบังแสงในแต่ละแฉงจะปรากฏจุดยอดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน (อาจเป็นจุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่หรือจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง) ที่มีค่ากระแสเท่ากับค่าที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแฉงในขณะที่ได้รับ ความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ และสูงกว่าค่ากระแสที่จุดยอดอื่น โดยจุดยอดดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันประมาณเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของหนึ่งแฉงกับตัวเลขที่น้อยที่สุดของจำนวนแฉงที่ไม่ถูกบังแสงเมื่อเทียบกับในแต่ละแฉง

จากการศึกษาผลของรูปแบบการบังแสงบางส่วนต่อเส้นโค้งคุณลักษณะและตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดวงกว้างข้างต้นนี้พบว่า รูปแบบของการบังแสงบางส่วนส่งผลให้ตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเปลี่ยนไปจนยากที่จะคาดเดาได้ ทำให้การติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างจำเป็นต้องกราดตรวจเพื่อค้นหาภายในย่านแรงดันด้านนอกของกลุ่มแฉงจนถึงระดับแรงดันวงจรเปิดซึ่งทำให้เกิดการแกว่งของจุดทำงาน ในทางตรงกันข้าม ถ้าความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแฉงมีค่าสม่ำเสมอก็ไม่จำเป็นต้องกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเพราะมีจุดกำลังสูงสุดเพียงจุดเดียว ดังนั้น การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแฉงก่อนเริ่มการกราดตรวจย่อมช่วยลดการแกว่งของจุดทำงานโดยไม่จำเป็น นอกจากนี้ การศึกษาดังกล่าวยังทำให้พบว่า เมื่อเกิดการบังแสงบางส่วนจะมีจุดกำลังสูงสุดเพียงจุดเดียว (อาจเป็นจุดกำลังสูงสุดเฉพาะที่หรือจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง) ที่มีค่ากระแสเท่ากับค่าที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแฉงที่ได้รับ ความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ และสูงกว่าค่ากระแสที่จุดยอดอื่น โดยตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันประมาณเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของหนึ่งแฉงกับตัวเลขที่น้อยที่สุดของจำนวนแฉงที่ไม่ถูกบังแสงเมื่อเทียบกับในแต่ละแฉงโดยไม่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการบังแสงบางส่วน และประเด็นที่ได้จากการศึกษานี้จะใช้เพื่อพัฒนาวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป

### 3.4 วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่น่าเสนอ

การศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า รูปแบบที่แตกต่างกันของการบังแสงบางส่วนทำให้ตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเปลี่ยนไปจนยากจะคาดเดาได้จึงจำเป็นต้องอาศัยการกราดตรวจภายในย่านแรงดันของกลุ่มแฉง ในขณะที่ภายใต้สภาวะความเข้มแสงสม่ำเสมอจะปรากฏจุดกำลังสูงสุดเพียงจุดเดียวจึงไม่จำเป็นต้องกราดตรวจ วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกพัฒนาให้สามารถตรวจหาการบังแสงบางส่วน ซึ่งถ้าตรวจไม่พบการบังแสงบางส่วน นั่นคือ ในกรณีความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแฉงมีค่าสม่ำเสมอ การติดตามจุดกำลังสูงสุดจะอาศัยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวโดยไม่มีกราดตรวจ แต่ถ้าตรวจพบการบังแสงบางส่วน การกราดตรวจจะเริ่มขึ้นและในระหว่างนั้นย่านการค้นหาจะถูกจำกัดให้แคบลงเรื่อย ๆ วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่น่าเสนอ

ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง การค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเมื่อเกิดการบังแสงบางส่วน และวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงกว้าง

### 3.4.1 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง

การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงสามารถรู้ผลได้หลังจากพบจุดกำลังสูงสุดเพียงหนึ่งจุด (จุดใดก็ได้บนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผง) โดยมีเงื่อนไขที่พัฒนาจากความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นโดยประมาณของค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุด ( $I_{mpp}$ ) กับค่ากระแสวงจรถัด ( $I_{sc}$ ) และของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด ( $V_{mpp}$ ) กับค่าแรงดันวงจรถัด ( $V_{oc}$ ) ของกลุ่มแผงที่ได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอ นั่นคือ

$$I_{mpp} \cong k_i \cdot I_{sc} \quad (3.6)$$

$$V_{mpp} \cong k_v \cdot V_{oc} \quad (3.7)$$

โดยที่  $k_i$  และ  $k_v$  เป็นค่าคงตัวของการแปรผัน เมื่อพิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันแต่ละเส้นของกลุ่มแผงในภาพ 46 โดยวงกลมเล็กบนแต่ละเส้นโค้งแทนตำแหน่งจุดกำลังสูงสุด ถ้าความเข้มแสงสม่ำเสมอจะเกิดจุดกำลังสูงสุดเพียงจุดเดียว (เส้นขวาสุด) แต่ถ้าเกิดการบังแสงบางส่วนจะปรากฏจุดกำลังสูงสุดขึ้นมากกว่าหนึ่งจุด โดยจำนวนจุดกำลังสูงสุดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการบังแสง จากภาพจะเห็นว่า บนเส้นโค้งของสภาวะการบังแสงบางส่วนแต่ละเส้นจะมีจุดกำลังสูงสุดหนึ่งจุดที่ให้ค่ากระแสสูงสุดเพราะเกิดจากแผงที่ไม่ถูกบังแสง และเป็นค่ากระแสที่สอดคล้องกับสมการที่ (3.6) ดังนั้น ถ้าวัดค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดจุดหนึ่งได้น้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.6) จึงสรุปได้ทันทีว่าเกิดการบังแสงบางส่วน นอกจากค่ากระแส ณ จุดกำลังสูงสุดที่พบแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาอีกเงื่อนไขที่ใช้ตรวจหาการบังแสงบางส่วน ซึ่งได้จากการนำสมการที่ (3.6) มาหารด้วยสมการที่ (3.7) นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำที่คำนวณจากอัตราส่วนของค่ากระแสต่อแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด ( $G_{mpp}$ ) กับค่าความนำที่หาจากอัตราส่วนของค่ากระแสวงจรถัดต่อแรงดันวงจรถัดของกลุ่มแผง ( $G_{ref}$ ) จะได้

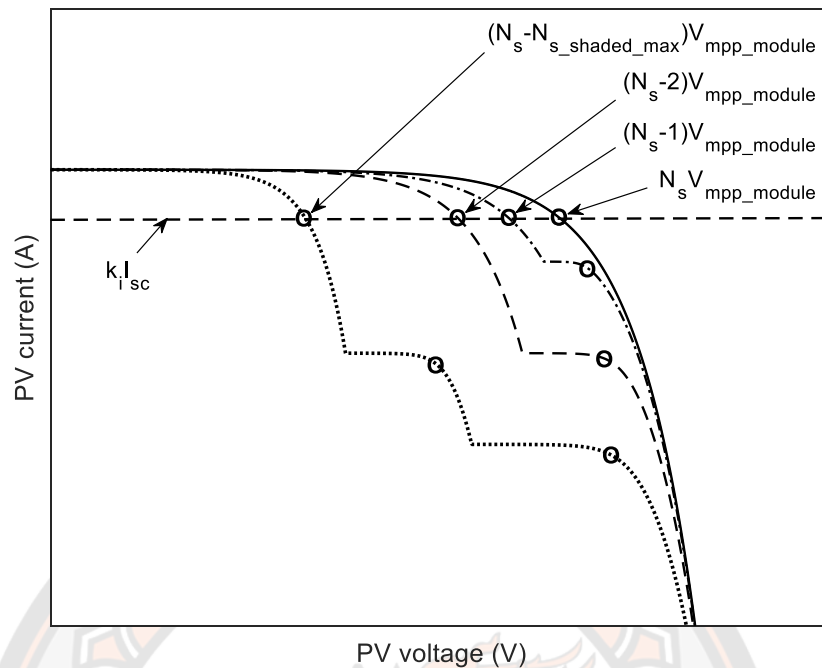
$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \cong \frac{k_i \cdot I_{sc}}{k_v \cdot V_{oc}}$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_{mpp} \cong k_G \cdot G_{ref} \quad (3.8)$$

โดยที่  $k_G = k_i / k_v$  และเป็นค่าคงตัวของการแปรผัน





ภาพ 46 ตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน

ในกรณีที่ความเข้มแสงสม่ำเสมอ จุดกำลังสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันประมาณเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของแผง ( $V_{mpp\_module}$ ) กับจำนวนแผงที่ต่ออนุกรมกันในแต่ละแถว ( $N_s$ ) เมื่อพิจารณาภาพ 46 ค่าความนำที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงที่ได้รับ ความเข้มแสงสม่ำเสมอ ( $G_{mpp\_unshaded}$ ) สามารถหาได้จาก

$$G_{mpp\_unshaded} = \frac{I_{mpp}}{N_s V_{mpp\_module}} \quad (3.9)$$

เนื่องจากในกรณีการบังแสงบางส่วน จุดกำลังสูงสุดที่มีค่ากระแสสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันประมาณเท่ากับผลคูณของค่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของแผงกับตัวเลขที่น้อยที่สุดของจำนวนแผงที่ไม่ถูกบังแสงเมื่อเทียบกับในแถว ( $N_{s\_unshaded\_min}$ ) ดังภาพ 46 ดังนั้นค่าความนำที่จุดกำลังสูงสุดที่มีค่ากระแสสูงสุดของแต่ละเส้นโค้งในกรณีการบังแสงบางส่วน ( $G_{mpp\_shaded}$ ) หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} G_{mpp\_shaded} &= \frac{I_{mpp}}{N_{s\_unshaded\_min} V_{mpp\_module}} \\ &= \frac{I_{mpp}}{N_{s\_unshaded\_min} V_{mpp\_module}} \cdot \frac{N_s}{N_s} \\ &= \frac{N_s}{N_{s\_unshaded\_min}} \cdot \frac{I_{mpp}}{N_s V_{mpp\_module}} \end{aligned}$$

จัดรูปโดยพิจารณาสมการที่ (3.9) จะได้

$$G_{mpp\_shaded} = \frac{N_s}{N_{s\_unshaded\_min}} \cdot G_{mpp\_unshaded} \quad (3.10)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าจุดกำลังสูงสุดที่มีค่ากระแสสูงสุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผงที่ถูกบังแสงบางส่วนจะมีค่าความนำมากกว่าค่าความนำที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงที่ได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอในแต่ละสภาพอากาศ ดังนั้น หลักการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงของกลุ่มแผงในแต่ละสภาพอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงประกอบด้วยเงื่อนไข 2 ข้อ ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1:  $I_{mpp} < k_i \cdot I_{sc}$  หรือ

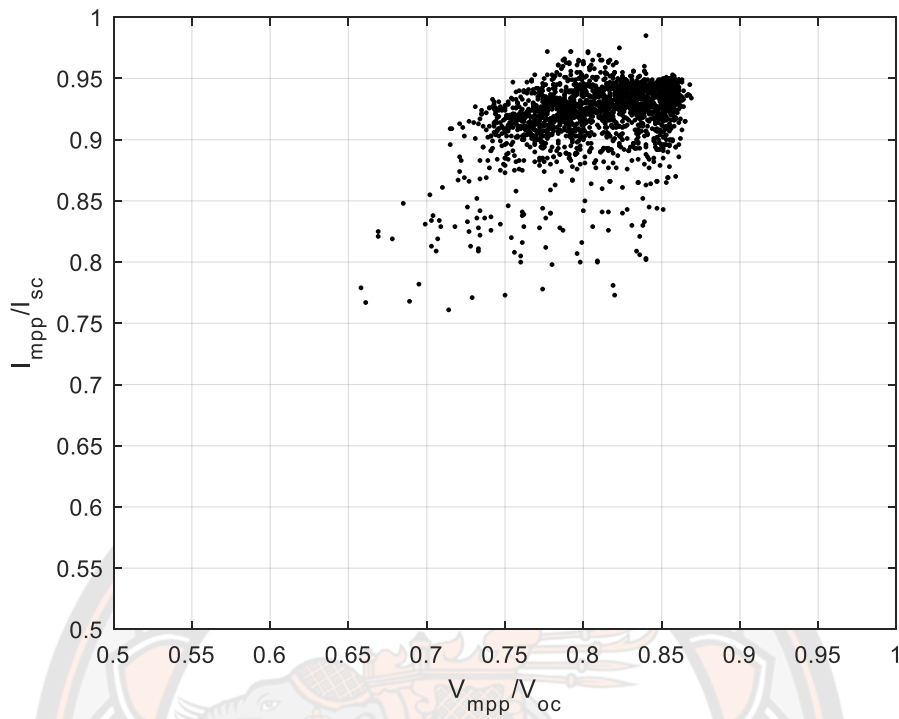
เงื่อนไขที่ 2:  $G_{mpp} > k_G \cdot G_{ref}$

ทั้งนี้ หลังจากที่ได้ควบคุมย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดหนึ่ง (จุดใดก็ได้บนเส้นโค้ง) จะวัดค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดนั้นรวมทั้งค่ากระแสจลัดและแรงดันวงจรเปิดเพื่อใช้คำนวณและเปรียบเทียบตามเงื่อนไขทั้งสอง หากตรวจสอบพบว่าเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งหรือทั้งสองข้อดังกล่าวเป็นจริง แสดงว่ากลุ่มแผงถูกบังแสงบางส่วน (ได้รับความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ) แต่ถ้าเงื่อนไขทั้งสองข้อเป็นเท็จ แสดงว่าไม่เกิดการบังแสงบางส่วน (ได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอ)

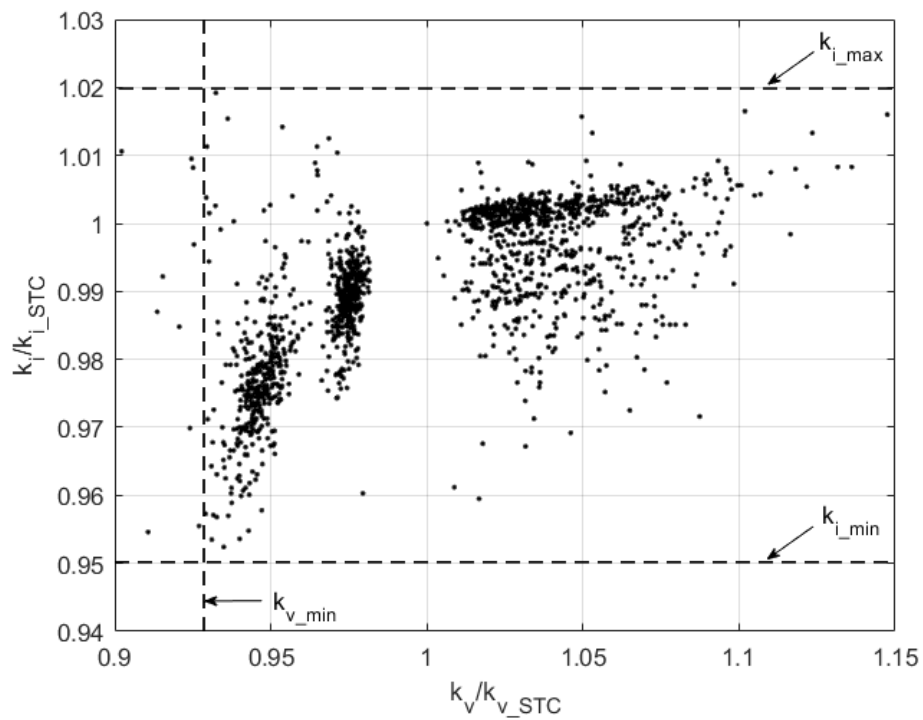
ค่า  $k_i$  ควรทำให้เงื่อนไขข้อแรกเป็นเท็จสำหรับจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงที่ได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอเท่านั้น นั่นคือ ควรเลือกใช้ค่า  $k_i$  ต่ำสุดของกลุ่มแผง ( $k_{i\_min}$ ) ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงที่ได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอในแต่ละสภาพอากาศที่รวบรวมจากแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของผู้ผลิตจำนวน 450 รายในฐานข้อมูลของโปรแกรมแมตแล็บ/ซิมูลิงก์ โดยพิจารณาค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดแสดงดังภาพ 47 รวมทั้งค่า  $k_i$  และ  $k_v$  แสดงดังภาพ 48 จะเห็นว่าแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า  $k_{i\_min}$  ประมาณ 0.95 เท่าของค่า  $k_{i\_STC}$  และ  $k_{i\_max}$  ประมาณ 1.02 เท่าของค่า  $k_{i\_STC}$  ในขณะที่ 95% ของแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า  $k_{v\_min}$  ประมาณ 0.93 เท่าของค่า  $k_{v\_STC}$  ดังนั้นจึงเลือกค่า  $k_i$  และ  $k_G$  เพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงดังนี้

$$k_{i\_min} = 0.95 \cdot k_{i\_STC} \quad (3.11)$$

$$k_G = \frac{k_{i\_min}}{k_{v\_min}} = \frac{0.95 \cdot k_{i\_STC}}{0.93 \cdot k_{v\_STC}} \quad (3.12)$$



ภาพ 47 ค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในฐานข้อมูล



ภาพ 48 ค่า  $k_i$  และ  $k_v$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในฐานข้อมูล

### 3.4.2 การจำกัดย่านการค้นหาค่ากำลังสูงสุดวงกว้าง

หลังจากตรวจพบว่าเกิดการบังแสงบางส่วนวิธีที่นำเสนอจะกราดตรวจเพื่อค้นหาค่ากำลังสูงสุดวงกว้างภายในย่านการค้นหาที่จำกัดและจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าบทความวิจัยที่ค้นหาค่ากำลังสูงสุดวงกว้างโดยจำกัดย่านการค้นหาค้นหาด้วยแรงดันเพียงอย่างเดียวและจำกัดย่านการค้นหาค้นหาด้วยแรงดันกับกระแส ทั้งสองบทความกำหนดขอบเขตด้านซ้ายของย่านด้วยค่าแรงดันต่ำสุด ( $V_{min}$ ) ที่คำนวณจากอัตราส่วนของค่ากำลังสูงสุดที่พบ ( $P_{max}$ ) ต่อค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ ( $I_{mpp\_STC}$ ) เพราะค่ากำลังไฟฟ้าของกลุ่มแผงที่ได้จากผลคูณของค่าแรงดันที่ต่ำกว่านี้กับกระแสที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่าค่า  $P_{max}$  เสมอ อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มแสงในสภาพอากาศทั่ว ๆ ไปมักต่ำกว่าค่าความเข้มแสงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบส่งผลให้กระแสที่จุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงมีค่าต่ำตามไปด้วยเนื่องจากแปรผันตามค่าความเข้มแสงจึงทำให้การใช้ค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบกำหนดขอบเขตทางด้านซ้ายของย่านการค้นหาค้นหาที่กว้างเกินไป ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงอาศัยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดกับค่ากระแสวงจรลัดในสมการที่ (3.6) มากำหนดขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหาค้นหาจึงได้ค่าแรงดันต่ำสุด ( $V_{min}$ ) ที่คำนวณจากอัตราส่วนของค่ากำลังสูงสุดที่พบ ( $P_{max}$ ) ต่อผลคูณของค่า  $k_{i\_max}$  กับค่ากระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงในสภาพอากาศขณะนั้นและเพื่อให้จุดกำลังสูงสุดทั้งหมดอยู่ภายในย่านการค้นหาค้นหาจึงเลือกใช้ค่า  $k_i$  สูงสุดของกลุ่มแผง ( $k_{i\_max}$ ) ดังนี้

$$V_{min} = \frac{P_{max}}{k_{i\_max} I_{sc}} \quad (3.13)$$

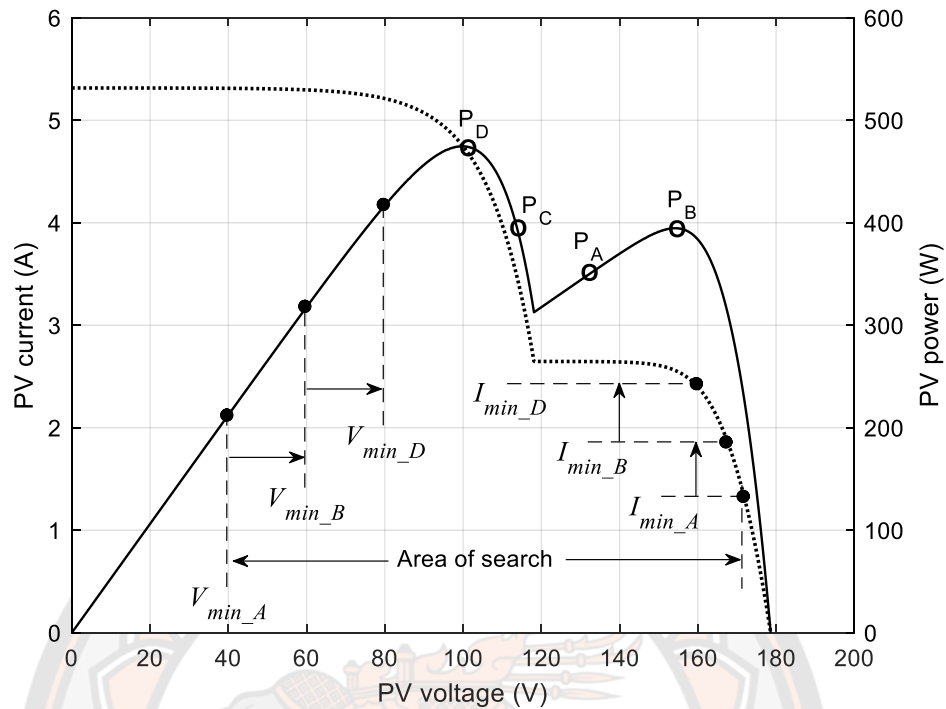
ในขณะที่ขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหาค้นหาของบทความวิจัยที่ค้นหาค่ากำลังสูงสุดวงกว้างโดยจำกัดย่านการค้นหาค้นหาด้วยแรงดันเพียงอย่างเดียวกำหนดด้วยค่าแรงดันสูงสุด ( $V_{max}$ ) เท่ากับ 0.9 เท่าของค่าแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ ( $V_{oc\_STC}$ ) และบทความวิจัยที่ค้นหาค่ากำลังสูงสุดวงกว้างโดยจำกัดย่านการค้นหาค้นหาด้วยแรงดันกับกระแสกำหนดด้วยค่ากระแสต่ำสุด ( $I_{min}$ ) ที่คำนวณจากอัตราส่วนของค่ากำลังสูงสุดที่พบต่อ 0.9 เท่าของค่าแรงดันวงจรเปิดภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ แต่เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพอากาศทั่ว ๆ ไปมักสูงกว่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบซึ่งส่งผลให้แรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงมีค่าต่ำลงจึงทำให้การใช้แรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบกำหนดขอบเขตด้านขวาเกิดย่านการค้นหาค้นหาที่กว้างเกินไป ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำค่าแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศขณะนั้นมาใช้กำหนดขอบเขตด้านขวาของย่านด้วยค่ากระแสต่ำสุด ( $I_{min}$ ) ที่คำนวณจากอัตราส่วนของค่ากำลังสูงสุดที่พบ ( $P_{max}$ ) ต่อ 0.9 เท่าของค่า

แรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนั้น เพราะค่ากำลังไฟฟ้าของกลุ่มแผงที่ได้จากผลคูณของค่ากระแสที่ต่ำกว่านี้กับแรงดันวงจรเปิดจะมีค่าต่ำกว่าค่า  $P_{max}$  เสมอ จึงหาค่ากระแสต่ำสุดได้ดังนี้

$$I_{min} = \frac{P_{max}}{0.9V_{oc}} \quad (3.14)$$

ทั้งนี้ ในขณะที่ค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างเมื่อพบว่าค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแผงมากกว่ากำลังสูงสุดเดิมค่า  $V_{min}$  และ  $I_{min}$  จะถูกปรับใหม่ซึ่งทำให้ย่านการค้นหาแคบลง รวมทั้งบันทึกค่ากำลังและค่าแรงดันที่จุดทำงานดังกล่าว

แนวทางการกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างและการปรับค่า  $V_{min}$  และ  $I_{min}$  พิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันและเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงเมื่อเกิดการบังแสงบางส่วนดังภาพ 49 ทั้งนี้ตัวควบคุมจะไม่รับรู้ข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าวแต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น ในที่นี้สมมติให้จุดทำงานปัจจุบันอยู่ที่ตำแหน่ง  $P_A$  จึงกำหนดขอบเขตของย่านการค้นหาได้เป็น  $V_{min\_A}$  และ  $I_{min\_A}$  แล้วเริ่มค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างโดยการย้ายจุดทำงานไปยังขอบเขตด้านขวา ( $I_{min\_A}$ ) จะพบว่า กำลังด้านออกของกลุ่มแผงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ค่ากำลังและแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงถูกบันทึกและขอบเขตของย่านการค้นหาถูกปรับใหม่อย่างต่อเนื่องเช่นกันจนได้ค่า ณ จุดทำงานปัจจุบันคือ  $V_{min\_B}$  และ  $I_{min\_B}$  นั่นคือ การย้ายจุดทำงานไปยังขอบเขตด้านขวาในขณะนี้เปลี่ยนเป็น  $I_{min\_B}$  โดยหลังจากผ่านตำแหน่ง  $P_B$  ไปทางขวากำลังด้านออกของกลุ่มแผงน้อยกว่ากำลังที่ตำแหน่ง  $P_B$  จึงไม่มีการปรับขอบเขตของย่านการค้นหา เมื่อจุดทำงานอยู่ที่ขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหาแล้ว (ตำแหน่งที่กระแสด้านออกของกลุ่มแผงเท่ากับ  $I_{min\_B}$ ) การค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างดำเนินต่อไปด้วยการย้ายจุดทำงานไปยังขอบเขตด้านซ้าย (ขณะนี้คือ  $V_{min\_B}$ ) จะพบว่า กำลังด้านออกของกลุ่มแผงมีค่ามากกว่ากำลังสูงสุดเดิมที่ตำแหน่ง  $P_B$  หลังจากย้ายจุดทำงานจนถึงตำแหน่ง  $P_C$  และสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ค่ากำลังและแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงถูกบันทึกไว้และขอบเขตของย่านการค้นหาถูกปรับใหม่อย่างต่อเนื่องเช่นกันจนได้ค่า ณ จุดทำงานปัจจุบันคือ  $V_{min\_D}$  และ  $I_{min\_D}$  นั่นคือ การย้ายจุดทำงานไปยังขอบเขตด้านซ้ายในขณะนี้เปลี่ยนเป็น  $V_{min\_D}$  โดยหลังจากผ่านตำแหน่ง  $P_D$  ไปทางซ้ายกำลังด้านออกของกลุ่มแผงน้อยกว่ากำลังที่ตำแหน่ง  $P_D$  จึงไม่มีการปรับขอบเขตของย่านการค้นหา เมื่อจุดทำงานอยู่ที่ขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหาแล้ว (ตำแหน่งที่แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงเท่ากับ  $V_{min\_D}$ ) จะทำให้พบจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างทันทีในที่นี้คือ จุดทำงานที่ตำแหน่ง  $P_D$



ภาพ 49 การกำหนดและปรับขอบเขตเพื่อลดความกว้างของย่านการค้นหา

### 3.4.3 การติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีที่นำเสนอ

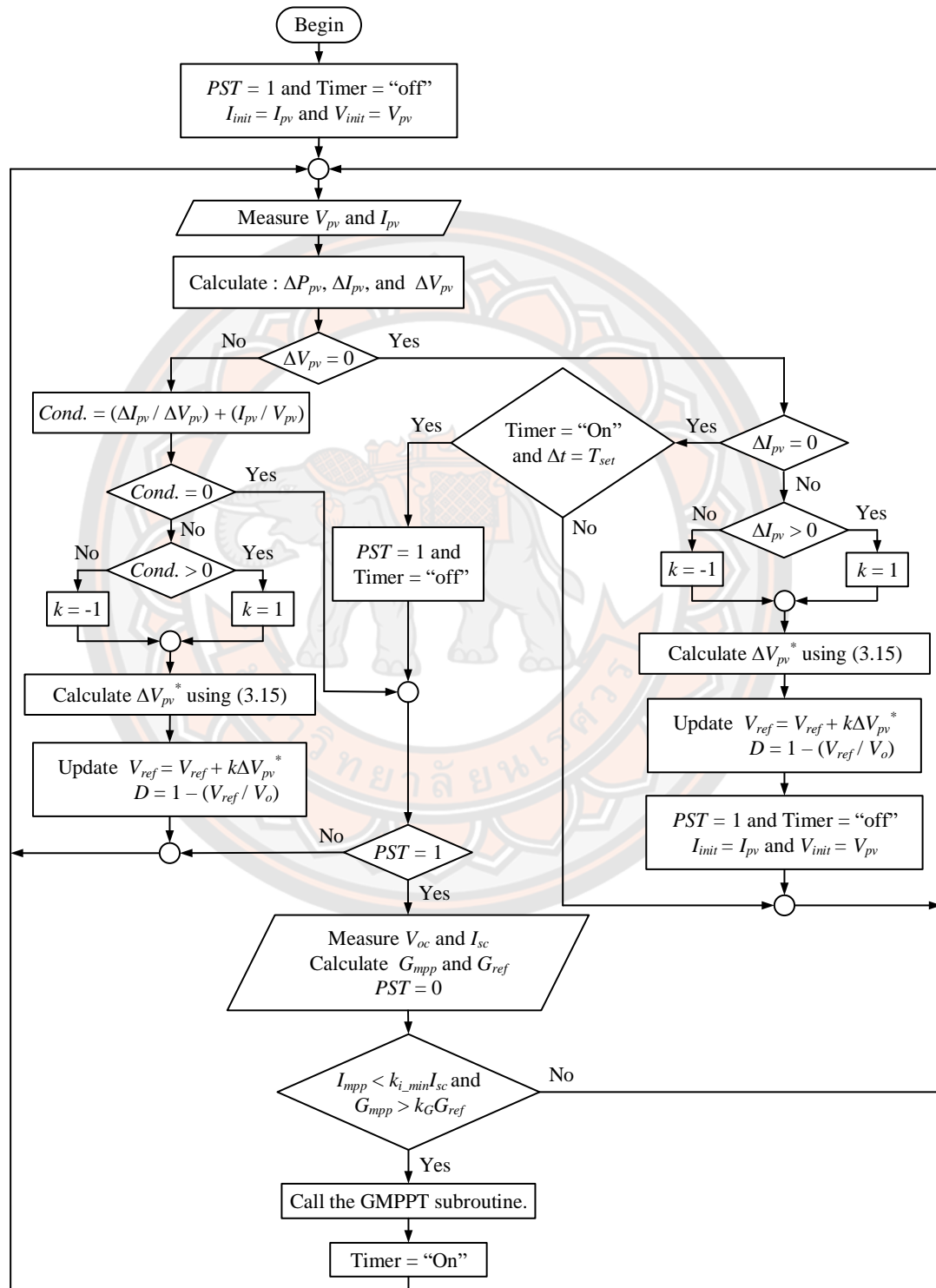
ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีที่นำเสนอแสดงดังภาพ 50 เริ่มจากการบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันไว้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นคือ  $I_{init}$  และ  $V_{init}$  ตามลำดับ แล้วย้ายจุดทำงานเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุดจุดใดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศในขณะนั้นด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้ำวที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังและกระแสด้านออกของกลุ่มแผงเพื่อกำหนดขนาดของช่วงก้ำวตั้งสมการต่อไปนี้

$$\Delta V_{pv}^* = \frac{|\Delta P_{pv}|}{V_{pv} \left| \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv\_max}} \right| + I_{pv}} \quad (3.15)$$

โดยที่  $\Delta V_{pv}^*$  คือขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงถูกกำหนดเป็นช่วงก้ำวและ  $\Delta V_{pv\_max}$  คือ ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกสูงสุดของกลุ่มแผงถูกกำหนดเป็นช่วงก้ำวสูงสุด หลังจากพบจุดกำลังสูงสุดจุดหนึ่งแล้ว ค่ากระแส ค่าแรงดันและค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแผงที่จุดกำลังสูงสุดนี้จะถูกบันทึกไว้ และวัดค่าแรงดันวงจรเปิดกับค่ากระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงเพื่อนำข้อมูลมาคำนวณแล้วเปรียบเทียบตามเงื่อนไขทั้งสองข้อของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสง



บนกลุ่มแผง หากพบว่าเงื่อนไขทั้งสองข้อเป็นเท็จจะสรุปว่ากลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ  
ในทางกลับกันหากพบว่ามีเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งหรือทั้งสองข้อเป็นจริงจะสรุปว่าเกิดการบังแสง  
บางส่วน



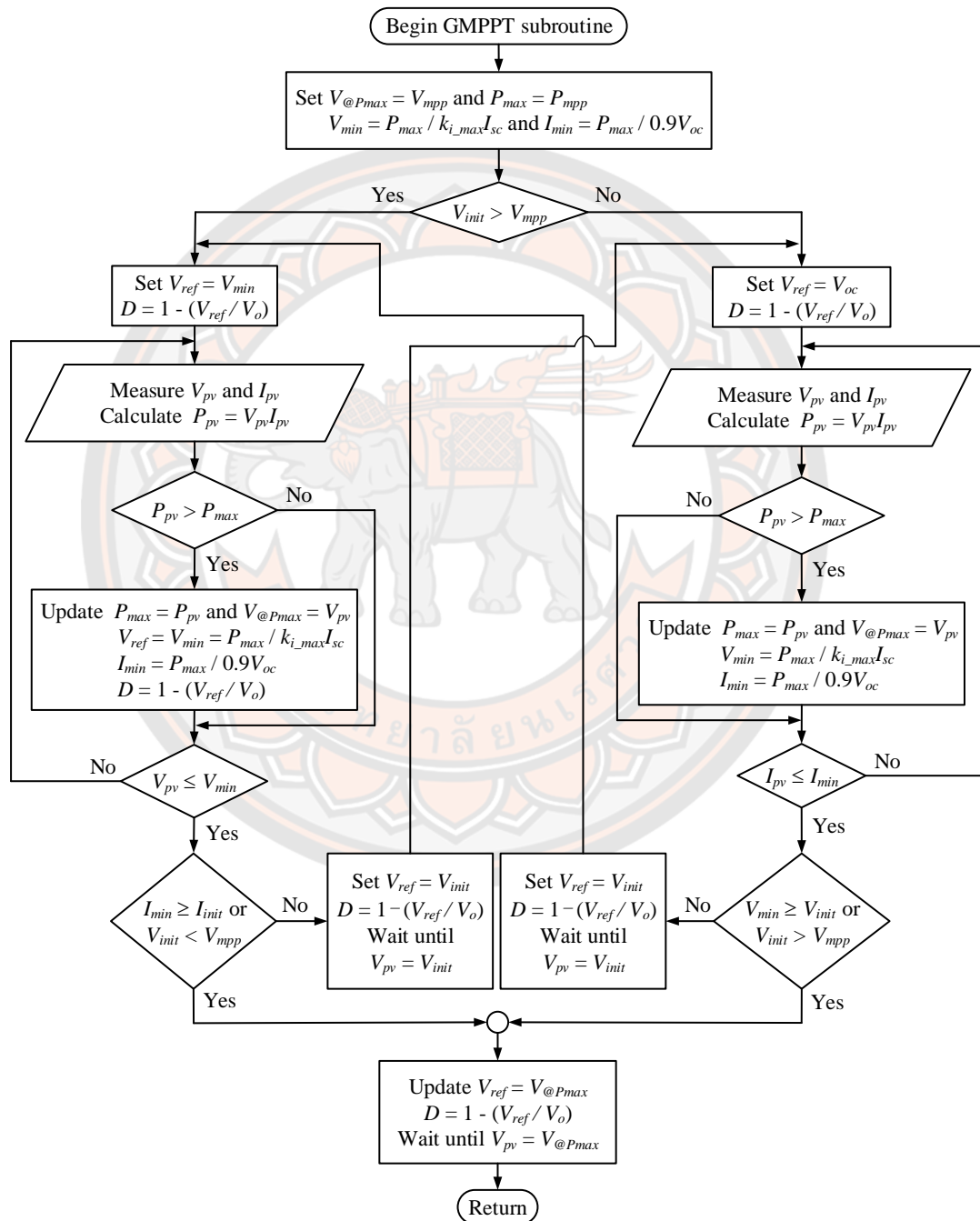
ภาพ 50 ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีที่นำเสนอ

กรณีที่เราพบว่ากลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ ตัวควบคุมจะรักษาจุดทำงานของกลุ่มแผงให้อยู่ที่ตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดดังกล่าวข้างต้นและเฝ้าตรวจการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสด้านออกของกลุ่มแผงซึ่งมีความแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผง นั่นคือ เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการบังแสงบางส่วนกระแสด้านออกของกลุ่มแผงจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงเป็นสัญญาณให้เริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุดอีกครั้ง โดยกลับไปที่ยุทธศาสตร์เริ่มต้นของการติดตามจุดกำลังสูงสุด ในทางกลับกัน กรณีที่เราพบว่าการบังแสงบางส่วน ตัวควบคุมจะกราดตรวจเพื่อหาตำแหน่งที่คาดว่าจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างแล้วจึงย้ายจุดทำงานไปที่จุดดังกล่าวและขยับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าว การติดตามจุดกำลังสูงสุดจะเริ่มต้นอีกครั้งเมื่อตัวควบคุมตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของกระแสด้านออกของกลุ่มแผง แต่เนื่องจากมีบางกรณีที่รูปแบบการบังแสงบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปจนทำให้จุดกำลังสูงสุดดวงกว้างย้ายตำแหน่งแต่ค่ากระแสเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนตัวควบคุมไม่สามารถตรวจจับได้ จึงอาศัยการตั้งเวลาเป็นอีกหนึ่งเงื่อนไขในการเริ่มติดตามอีกครั้งเพื่อป้องกันไม่ให้งานอยู่ห่างจากจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างเป็นเวลานาน

ขั้นตอนการกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างหลังตรวจพบการบังแสงบางส่วนแสดงดังภาพ 51 ซึ่งเริ่มจากการบันทึกค่ากำลังสูงสุดที่พบ ( $P_{max}$ ) และแรงดันของจุดทำงานที่เกิดค่า  $P_{max}$  ( $V@P_{max}$ ) พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตของย่านการค้นหาด้วยสมการที่ (3.13) และ (3.14) โดยทิศทางเริ่มต้นของการกราดตรวจจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดจุดแรกที่พบเทียบกับตำแหน่งของจุดทำงานเริ่มต้น หากตรวจพบว่าจุดกำลังสูงสุดจุดแรกที่พบอยู่ด้านขวาของจุดทำงานเริ่มต้น ตัวควบคุมจะเริ่มกราดตรวจโดยขยับจุดทำงานต่อไปทางขวา ในทางกลับกัน หากตรวจพบว่าจุดกำลังสูงสุดจุดแรกอยู่ด้านซ้ายของจุดทำงานเริ่มต้น ตัวควบคุมจะเริ่มกราดตรวจโดยขยับจุดทำงานต่อไปทางซ้าย

กรณีที่เริ่มกราดตรวจไปทางขวา ตัวควบคุมจะกำหนดค่าแรงดันเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) ไว้ที่ค่าแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศขณะนั้นเนื่องจากยังไม่สามารถระบุค่าแรงดันของกลุ่มแผงที่สอดคล้องกับค่า  $I_{min}$  ที่เป็นขอบเขตด้านขวาได้ และปรับค่าตัวชี้เวิลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผง โดยตัวควบคุมจะเฝ้าตรวจค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแผง หากพบค่ากำลังที่สูงกว่า  $P_{max}$  จะบันทึกค่ากำลังและแรงดันที่จุดทำงานนั้นแทนค่าเดิม พร้อมทั้งปรับขอบเขตทั้งสองด้านของย่านการค้นหาให้แคบลงด้วยสมการที่ (3.13) และ (3.14) จนกระทั่งจุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ที่ขอบเขตด้านขวา นั่นคือ กระแสด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าเท่ากับ  $I_{min}$  ที่เป็นขอบเขตของย่านการค้นหา หลังจากนั้นตัวควบคุมจะตรวจสอบความจำเป็นของการกราดตรวจไปยังขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหาโดยพิจารณาจากตำแหน่งของจุดทำงานเริ่มต้นเปรียบเทียบกับ  $V_{min}$  ปัจจุบัน หากพบว่า  $V_{init} \leq V_{min}$  แสดงว่าการกราดตรวจเกิดขึ้นทั่วทั้งย่านการค้นหาแล้วจึงย้าย

จุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังตำแหน่งที่พบค่า  $P_{max}$  ได้ทันที โดยการกำหนดค่า  $V_{ref}$  ไว้ที่ค่า  $V_{@Pmax}$  และปรับค่าตัวคูณไฮเกิลของวงจรทบระดับแรงดัน รोजนกระทั่งจุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ที่ตำแหน่งที่พบ  $P_{max}$  นั่นคือ แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าเท่ากับ  $V_{@Pmax}$  จึงสิ้นสุดการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง



ภาพ 51 ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง

ในทางกลับกัน หากพบว่า  $V_{init} > V_{min}$  แสดงว่าการกราดตรวจยังไม่ครอบคลุมทั้งย่านการ ค้นหาตัวควบคุมจึงย้ายจุดทำงานไปยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยการปรับค่า  $V_{ref}$  ไว้ที่ค่า  $V_{init}$  และปรับค่าตัวดีไซเคลิลของวงจรทระดับแรงดัน รอจนกระทั่งจุดทำงานของกลุ่มแมงอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นจึงเริ่มกราดตรวจไปทางซ้ายของย่านการค้นหาโดยตัวควบคุมจะกำหนดค่าแรงดันเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) ไว้ที่ค่า  $V_{min}$  และปรับค่าตัวดีไซเคลิลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อย้ายจุดทำงานของกลุ่มแมง แล้วตัวควบคุมจะเฝ้าตรวจค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแมง หากพบค่ากำลังที่สูงกว่า  $P_{max}$  จะบันทึกค่ากำลังและแรงดันที่จุดทำงานนั้นไว้แทนค่าเดิม พร้อมทั้งปรับขอบเขตของย่านการค้นหาให้แคบลงด้วยสมการที่ (3.13) และ (3.14) แล้วปรับค่า  $V_{ref}$  ไว้ที่ค่า  $V_{min}$  ปัจจุบันและปรับค่าตัวดีไซเคลิลของวงจรทระดับแรงดัน จนกระทั่งจุดทำงานของกลุ่มแมงอยู่ที่ขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหา นั่นคือ แรงดันด้านออกของกลุ่มแมงมีค่าเท่ากับ  $V_{min}$  ที่เป็นขอบเขตของย่านการค้นหา แสดงว่าการกราดตรวจเกิดขึ้นทั่วทั้งย่านแล้วจึงย้ายจุดทำงานของกลุ่มแมงไปยังตำแหน่งที่พบค่า  $P_{max}$  ได้ทันที โดยการกำหนดค่า  $V_{ref}$  ไว้ที่ค่า  $V_{@P_{max}}$  และปรับค่าตัวดีไซเคลิลของวงจรทระดับแรงดัน รอจนกระทั่งจุดทำงานของกลุ่มแมงอยู่ที่ตำแหน่งที่พบ  $P_{max}$  นั่นคือ แรงดันด้านออกของกลุ่มแมงมีค่าเท่ากับ  $V_{@P_{max}}$  จึงสิ้นสุดการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง

กรณีที่เริ่มกราดตรวจไปทางซ้ายของย่านการค้นหา ตัวควบคุมจะเฝ้าตรวจค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแมง หากพบค่ากำลังที่สูงกว่า  $P_{max}$  จะบันทึกค่ากำลังและแรงดันที่จุดทำงานนั้นไว้แทนค่าเดิม พร้อมทั้งปรับขอบเขตของย่านการค้นหาให้แคบลงด้วยสมการที่ (3.13) และ (3.14) จนกระทั่งจุดทำงานของกลุ่มแมงอยู่ที่ขอบเขตด้านซ้ายของย่านการค้นหา นั่นคือ แรงดันด้านออกของกลุ่มแมงมีค่าเท่ากับ  $V_{min}$  ที่เป็นขอบเขตของย่านการค้นหา ตัวควบคุมจะตรวจสอบความจำเป็นของการกราดตรวจไปยังขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหาโดยพิจารณาจากตำแหน่งของจุดทำงานเริ่มต้นเปรียบเทียบกับ  $I_{min}$  ปัจจุบัน หากพบว่า  $I_{init} \leq I_{min}$  แสดงว่าการกราดตรวจเกิดขึ้นทั่วทั้งย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างแล้วจึงย้ายจุดทำงานของกลุ่มแมงไปยังตำแหน่งที่พบค่า  $P_{max}$  ทันที และรอจนกระทั่งแรงดันด้านออกของกลุ่มแมงมีค่าเท่ากับ  $V_{@P_{max}}$  จึงถือว่าสิ้นสุดการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง ในทางกลับกัน หากพบว่า  $I_{init} > I_{min}$  แสดงว่าการกราดตรวจยังไม่ครอบคลุมทั้งย่านการค้นหาจึงย้ายจุดทำงานไปยังตำแหน่งเริ่มต้น หลังจากนั้นจึงกราดตรวจไปทางขวาของย่านการค้นหา ตัวควบคุมจะเฝ้าตรวจค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแมง หากพบค่ากำลังที่สูงกว่า  $P_{max}$  จะบันทึกค่ากำลังและแรงดันที่จุดทำงานนั้นไว้แทนค่าเดิม พร้อมทั้งปรับขอบเขตของย่านการค้นหาให้แคบลงด้วยสมการที่ (3.13) และ (3.14) จนกระทั่งจุดทำงานของกลุ่มแมงอยู่ที่ขอบเขตด้านขวาของย่านการค้นหา นั่นคือ กระแสด้านออกของกลุ่มแมงมีค่าเท่ากับ  $I_{min}$  ที่เป็นขอบเขตของย่านการค้นหา แสดงว่าการกราดตรวจเกิดขึ้นทั่วทั้งย่านแล้วจึงย้ายจุดทำงานของกลุ่มแมงไปยังตำแหน่งที่พบค่า

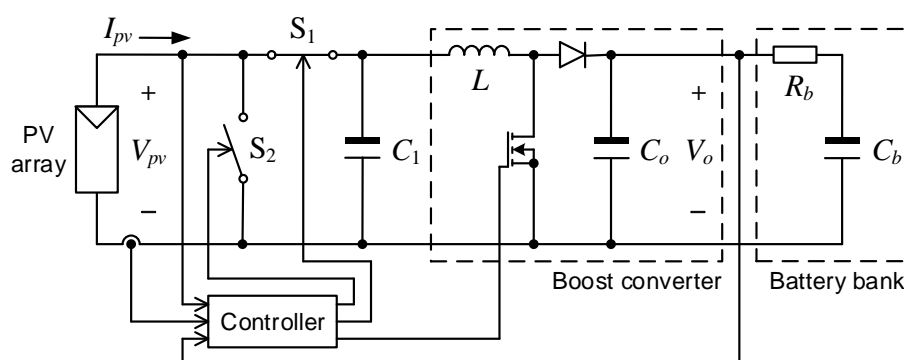
$P_{max}$  วัตต์และรอนจกระทั้งแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าเท่ากับ  $V_{@P_{max}}$  จึงสิ้นสุดการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง

### 3.5 การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของการจำลองผลด้วยโปรแกรมแมตแล็บ รวมทั้งสร้างวงจรทระดับแรงดันและเขียนชุดรหัสคำสั่งในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

#### 3.5.1 การจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ

วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดเมื่อเกิดการบังแสงบางส่วน โดยเปรียบเทียบผลกับวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดจากการทบทวนวรรณกรรมที่มีหลักการใกล้เคียงกัน ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการจำลองผลทั้งในกรณีที่กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอและในกรณีที่เกิดการบังแสงบางส่วน โดยแผนภาพการเชื่อมต่อในระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองผลทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดแสดงดังภาพ 52 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์เป็นกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 20 แผงซึ่งเชื่อมต่อกันดังภาพ 27 และมีตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) 4700  $\mu\text{F}$  ต่อคร่อมแบบขนานกับกลุ่มแผงเพื่อกำหนดค่าแรงดันด้านออกของกลุ่มแผง การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันคร่อม  $C_1$  จะสัมพันธ์กับการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนดและขึ้นอยู่กับสวิตชิงของวงจรทระดับแรงดันที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) 1 mH ตัวเก็บประจุ ( $C_o$ ) 1000  $\mu\text{F}$  และวงจรทำงานที่ความถี่สวิตชิงเท่ากับ 20 kHz แบตเตอรี่ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหลดถูกแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่ประกอบด้วยความต้านทาน ( $R_b$ ) 0.5  $\Omega$  และตัวเก็บประจุ ( $C_b$ ) 47 F



ภาพ 52 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ที่ใช้จำลองผล



สวิตช์ตัวที่ 1 ( $S_1$ ) และสวิตช์ตัวที่ 2 ( $S_2$ ) ถูกต่อระหว่างกลุ่มแผงกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อใช้ตัดต่อวงจรสำหรับการวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและกระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงในแต่ละสภาพอากาศ โดยในสภาวะการทำงานทั่วไปสวิตช์ตัวที่ 1 นำกระแสและสวิตช์ตัวที่ 2 หยุดนำกระแส เมื่อต้องการวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและกระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงในขณะนั้นตัวควบคุมจะสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 1 หยุดนำกระแสและสามารถวัดค่าแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงได้ทันทีหลังจากนั้นตัวควบคุมจะสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 2 นำกระแสและสามารถวัดค่ากระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงได้ ทั้งนี้ ขณะที่วัดค่าแรงดันวงจรเปิดและกระแสวงจรลัดของกลุ่มแผงตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรและแรงดันของตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะลดลง จนกระทั่งกระบวนการวัดค่าสิ้นสุดลงตัวควบคุมจะสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 2 หยุดนำกระแสแล้วสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 1 กลับมานำกระแสอีกครั้งส่งผลให้แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงเท่ากับแรงดันของตัวเก็บประจุ  $C_1$  นั่นคือจุดทำงานของกลุ่มแผงจะอยู่ไม่ไกลจากตำแหน่งเดิมก่อนเกิดการวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและกระแสวงจรลัด

การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงอาศัยการปรับค่าดิวิตซ์ไอเซลล์ของวงจรทบทระดับแรงดัน การเพิ่มค่าดิวิตซ์ไอเซลล์ของวงจรทบทระดับแรงดันจะส่งผลให้แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าลดลง นั่นคือ จุดทำงานของกลุ่มแผงขยับไปทางซ้าย ในขณะที่การลดค่าดิวิตซ์ไอเซลล์ของวงจรทบทระดับแรงดันจะส่งผลให้แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ จุดทำงานของกลุ่มแผงขยับไปทางขวา ค่าดิวิตซ์ไอเซลล์ที่ต้องการของวงจรทบทระดับแรงดันขึ้นอยู่กับค่าแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการซึ่งกำหนดเป็นค่าแรงดันเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันของวงจรทบทระดับแรงดันในสมการที่ (2.18) ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D}$$

เนื่องจาก  $V_s$  เป็นค่าแรงดันด้านเข้าของวงจรทบทระดับแรงดัน ในที่นี้คือ ค่าแรงดันด้านออกของกลุ่มแผง ( $V_{pv}$ ) และถูกแทนด้วยแรงดันเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) เพื่อใช้คำนวณค่าดิวิตซ์ไอเซลล์ที่ต้องการของวงจรทบทระดับแรงดัน ทั้งนี้ ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวหรือการลาดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างของวิธีที่นำเสนอ ตัวควบคุมจะกำหนดค่าแรงดันเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) และปรับค่าดิวิตซ์ไอเซลล์ของวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อย้ายจุดทำงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการดังนี้

$$D = 1 - \frac{V_{ref}}{V_o} \quad (3.16)$$

นอกจากการจำลองผลในโปรแกรมแมตแล็บแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้สร้างชุดทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และดำเนินการทดสอบภายใต้สภาพอากาศจริง



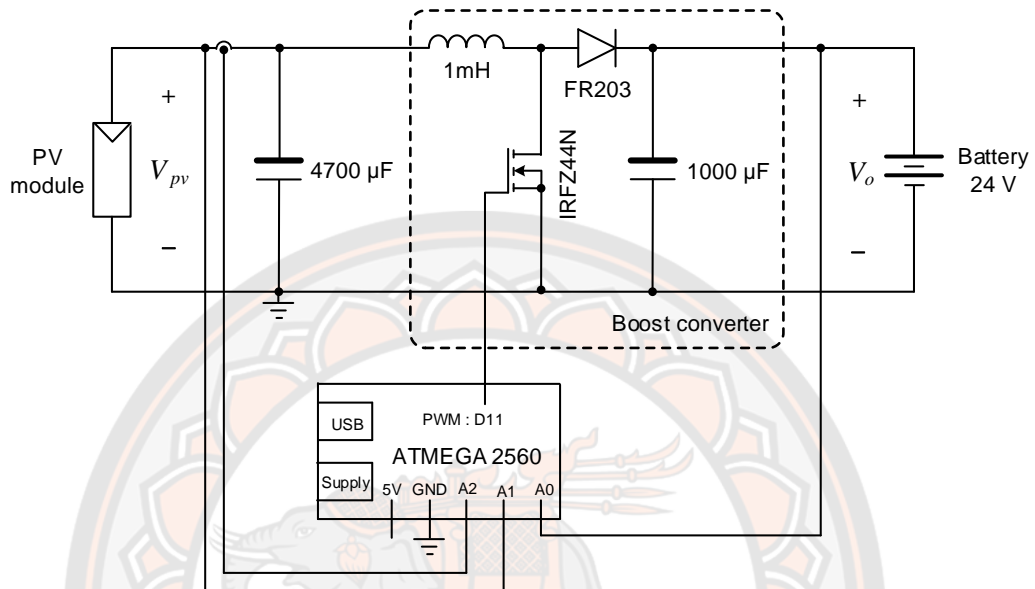
ภายนอกอาคาร สภาพอากาศในแต่ละช่วงเวลาจึงเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดระดับความความเข้มแสงที่กระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่ากระแสและแรงดัน นั่นคือค่ากำลังด้านออกของแผง นอกจากนี้ การทดสอบกับอุปกรณ์จริงในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับกรณีการบังแสงบางส่วน และเปรียบเทียบผลกับวิธีอื่นที่มีหลักการใกล้เคียงกันภายใต้สภาพอากาศที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดในโปรแกรมจำลองผลได้นั้นจะมีค่าใช้จ่ายสูงเกี่ยวกับจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ที่ใช้ รวมทั้งมีความยุ่งยากในการสร้างรูปแบบการบังแสงบางส่วนบนกลุ่มแผง และมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเวลาการเริ่มทดสอบเพื่อใช้เปรียบเทียบผลของแต่ละวิธี อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้สร้างชุดทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวภายใต้สภาพอากาศที่ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพื่อเป็นแนวทางของการประยุกต์ใช้งานต่อไป

### 3.5.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม

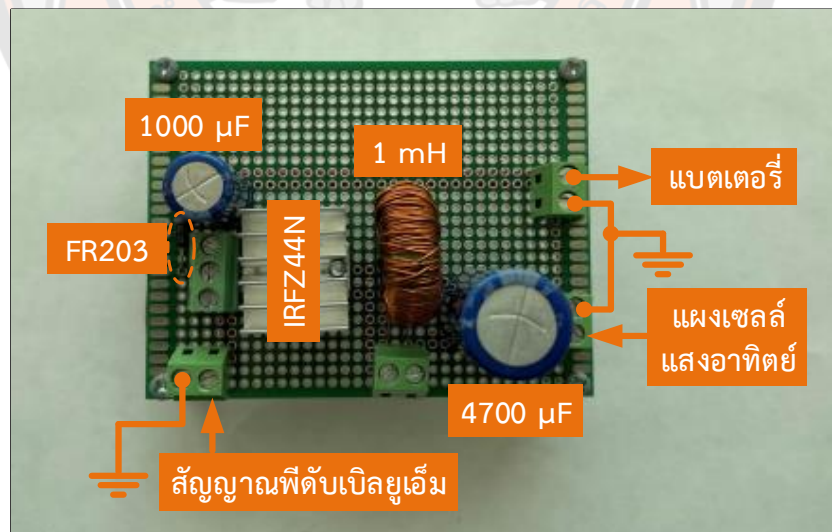
การสร้างชุดทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงแบบอิสระที่ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรทบทระดับแรงดัน แบตเตอรี่ และส่วนประมวลผล โดยแผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์แสดงดังภาพ 53 และวงจรทบทระดับแรงดันที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพ 54 โดยพิจารณาเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำจากความถี่สวิตชิง และค่าความพลั่วของกระแส จึงใช้ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core) ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่มีความถี่สูง และมีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า 1 mH และเลือกตัวเก็บประจุจากค่าพิกัดแรงดันและความพลั่วของแรงดันด้านออก จึงใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic capacitor) มีพิกัดแรงดัน 50 V และมีค่าความจุ 1000  $\mu\text{F}$  ในขณะที่เลือกใช้ไดโอดหมายเลข FR203 เป็นไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว (Fast recovery diode) ซึ่งเหมาะกับการสวิตชิงที่ความถี่สูง และสวิตซ์ของวงจรใช้มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) ชนิด n-channel หมายเลข IRFZ44N ซึ่งมีพิกัดกระแส 49 A และพิกัดแรงดัน 55 V และมีกำลังสูญเสียภายในต่ำ

ภาพรวมของชุดทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดแสดงดังภาพ 55 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ผลิตโดยบริษัท Solarland รุ่น SLP100-12 จ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 100 W ที่ระดับแรงดัน 17.2 V และกระแส 5.81 A ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ โดยสร้างแรงดันวงจรเปิดได้ 21.6 V และกระแวงจรลัดเท่ากับ 6.46 A โดยมีตัวเก็บประจุขนาด 4700  $\mu\text{F}$  พิกัดแรงดัน 50 V ต่อขนานกับแผงทำหน้าที่ควบคุมความผันผวนของแรงดันด้านออกและเชื่อมต่อกับวงจรทบทระดับแรงดันที่มีโหลดเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุ 1.3 Ah แรงดัน 12 V จำนวน 2 ลูกต่ออนุกรมกัน ซึ่งผลิตโดยบริษัท NEW POWER รุ่น NS12-1.3 และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ในการประมวลผลโดยรับค่ากระแสด้านออกของแผงจากตัวรับรู้กระแสเข้าพอร์ต A2 และรับค่าแรงดันด้านออกของแผงจาก

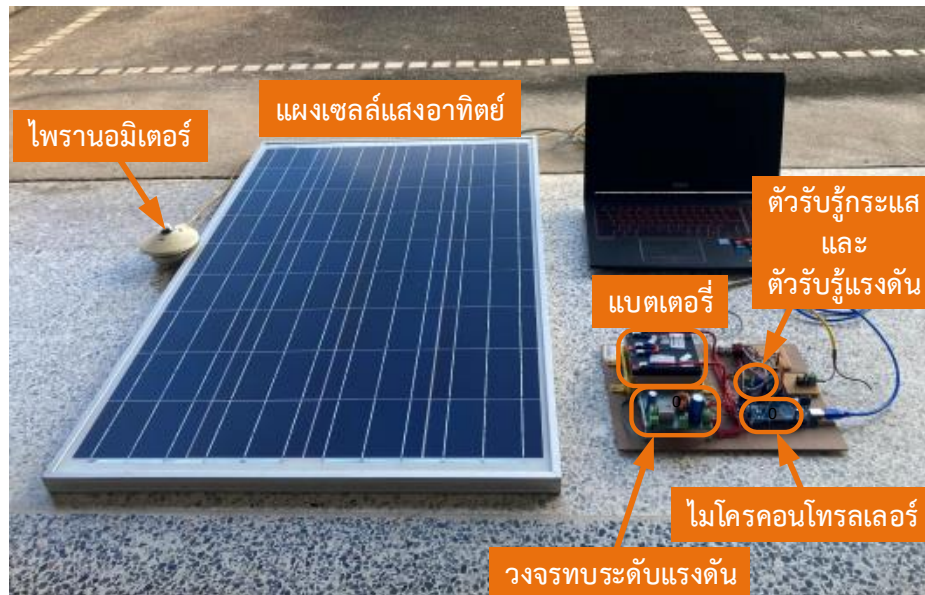
ตัวรับรู้แรงดันเข้าพอร์ต A1 รวมทั้งรับค่าแรงดันด้านออกของวงจรระดับแรงดันจากตัวรับรู้แรงดันเข้าพอร์ต A0 แล้วประมวลผลเพื่อกำหนดค่าความถี่ไซเคิลของสัญญาณพัลส์เบิลูเอ็่มที่ความถี่ 31 kHz ออกทางพอร์ต D11 เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตซ์ในวงจรระดับแรงดัน



ภาพ 53 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด



ภาพ 54 วงจรทระดับแรงดันที่สร้างขึ้น



ภาพ 55 ภาพรวมของชุดทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด

การปรับค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันที่ใช้การทดลองต่างจากการจำลองผลเนื่องจากในทางปฏิบัติจะมีกำลังสูญเสียภายในของวงจรทระดับแรงดันจึงส่งผลให้การกำหนดค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันด้วยสมการที่ (3.16) ทำให้ค่าแรงดันด้านออกของแผงไม่ตรงกับค่าแรงดันเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) ดังนั้น ในการทดลองจึงอาศัยความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดัน ( $\Delta D$ ) กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของแผง ( $\Delta V_{pv}$ ) ดังนี้ [36]

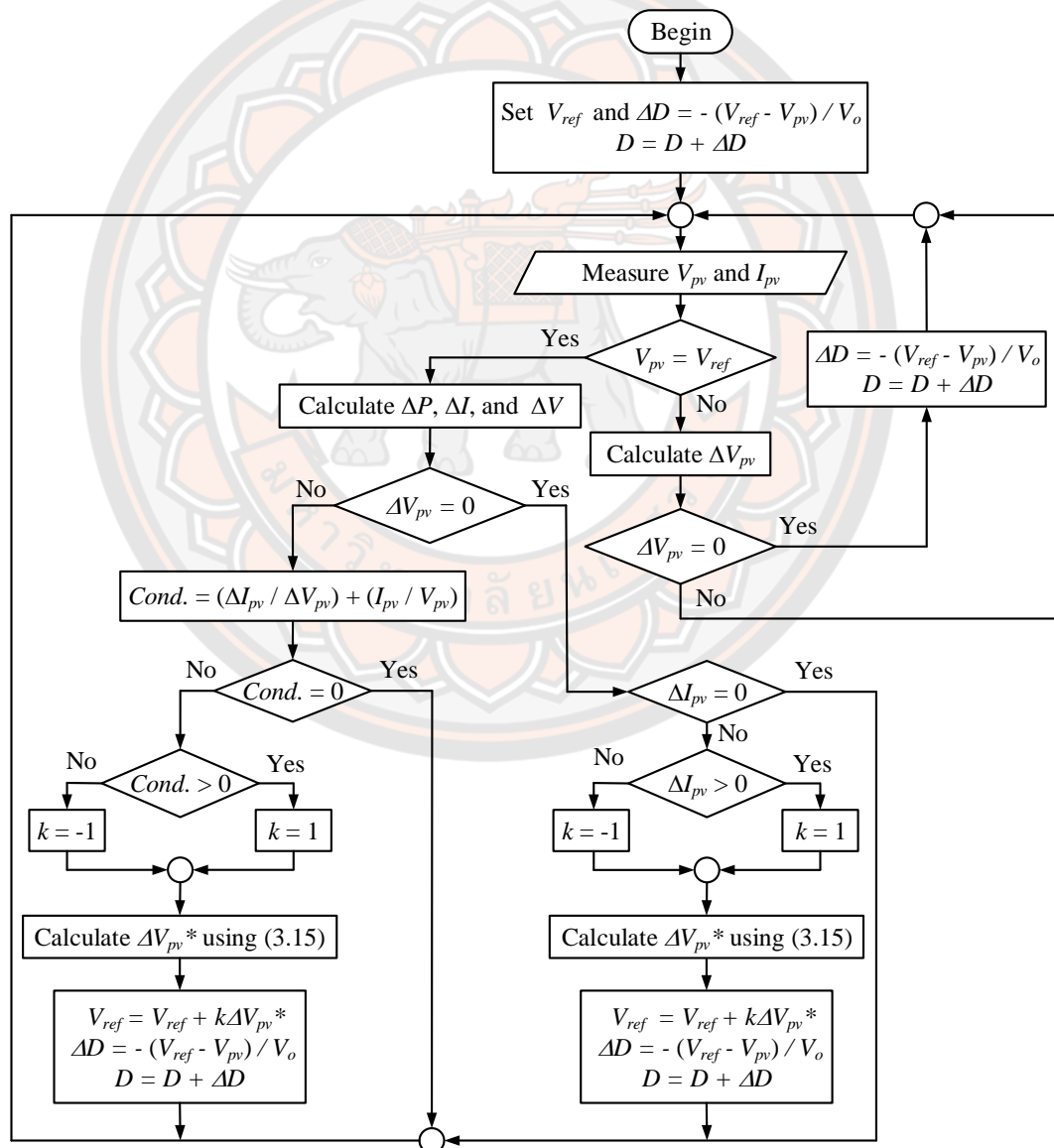
$$\Delta D = -\frac{\Delta V_{pv}}{V_o} \quad \text{หรือ}$$

$$\Delta D = -\left(\frac{V_{ref} - V_{pv}}{V_o}\right) \quad (3.17)$$

อย่างไรก็ตาม การปรับค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันในการทดลองนี้อาจย้ายจุดทำงานของแผงให้อยู่ที่ค่าแรงดันเป้าหมายไม่สำเร็จด้วยการปรับค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพียงรอบเดียวจึงมีการปรับค่าตัวตีไซเคิลอีกครั้งหลังพบว่าค่าแรงดันด้านออกของแผงไม่เปลี่ยนแปลงและจุดทำงานยังไม่อยู่ที่ค่าแรงดันเป้าหมาย ค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันจะถูกปรับใหม่จนกว่าแรงดันด้านออกของแผงจะอยู่ที่ค่าแรงดันเป้าหมาย

การทำงานของชุดทดสอบเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มมีขั้นตอนดังภาพ 56 เริ่มจากกำหนดค่าแรงดันเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) และปรับค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อย้ายจุดทำงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการ หลังจากนั้นคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน กระแส

และกำลังด้านออกของแผงเพื่อกำหนดทิศทางในการย้ายจุดทำงานเข้าหาจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขของวิธีความนำส่วนเพิ่ม ทั้งนี้ หากเป็นแบบแปรผันช่วงก้าวจะคำนวณขนาดของช่วงก้าวด้วยสมการที่ (3.15) ในขณะที่แบบตรึงช่วงก้าวกำหนดให้มีช่วงก้าวตรึงเท่ากับ 0.1 V โดยช่วงก้าวที่ได้ถูกนำไปใช้ปรับค่าแรงดันเป้าหมายและรอให้ตัวควบคุมปรับค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันจนค่าแรงดันด้านออกของแผงเท่ากับค่าแรงดันเป้าหมายจึงคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน กระแสและกำลังด้านออกของแผงอีกครั้งเพื่อทำตามเงื่อนไขของวิธีความนำส่วนเพิ่มจนกระทั่งจุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด หลังจากนั้นตัวควบคุมเฝ้าตรวจการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสด้านออกของแผงซึ่งแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสงเพื่อเริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุดอีกครั้ง



ภาพ 56 ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้นำเสนอการทดสอบการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอและวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างภายในย่านที่จำกัดคือ วิธีจำกัดย่านด้วยแรงดันของ [41] และวิธีจำกัดย่านด้วยการควบคุมกระแสของ [42] โดยใช้การจำลองผลด้วยโปรแกรมแมตแล็บทั้งกรณีที่กลุ่มแผงได้รับความเข้มอย่างสม่ำเสมอและกรณีที่เกิดการบังแสงบางส่วน รวมทั้งนำเสนอการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวกับแบบตรึงช่วงก้าวด้วยการสร้างชุดอุปกรณ์

### 4.1 ผลการทดสอบวิธีที่นำเสนอด้วยการจำลองผล

การจำลองผลเพื่อทดสอบวิธีที่นำเสนอและวิธีที่ใช้เปรียบเทียบจากการทบทวนวรรณกรรมคือวิธีของ [41] และวิธีของ [42] กับแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ดังภาพ 52 โดยกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจาก 20 แผงที่เชื่อมต่อกันดังภาพ 27 โดยการทดสอบแบ่งเป็น การทดสอบการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงและการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดดังต่อไปนี้

#### 4.1.1 การทดสอบการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง

การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงที่พัฒนาขึ้นถูกนำมาทดสอบกับแบบจำลองของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดใช้ดังภาพ 27 โดยภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบแต่ละแผงมีค่ากระแสจลัดเท่ากับ 3.33 A ค่าแรงดันวงจรเปิดเท่ากับ 18.12 V มีค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 2.97 A และ 14.30 V ตามลำดับ จึงหาค่า  $k_{i\_STC}$  ได้เท่ากับ 0.89 และค่า  $k_{v\_STC}$  ได้เท่ากับ 0.79 ดังนั้น ค่า  $k_{i\_min}$  และ  $k_G$  ของกลุ่มแผงสามารถคำนวณได้ดังนี้

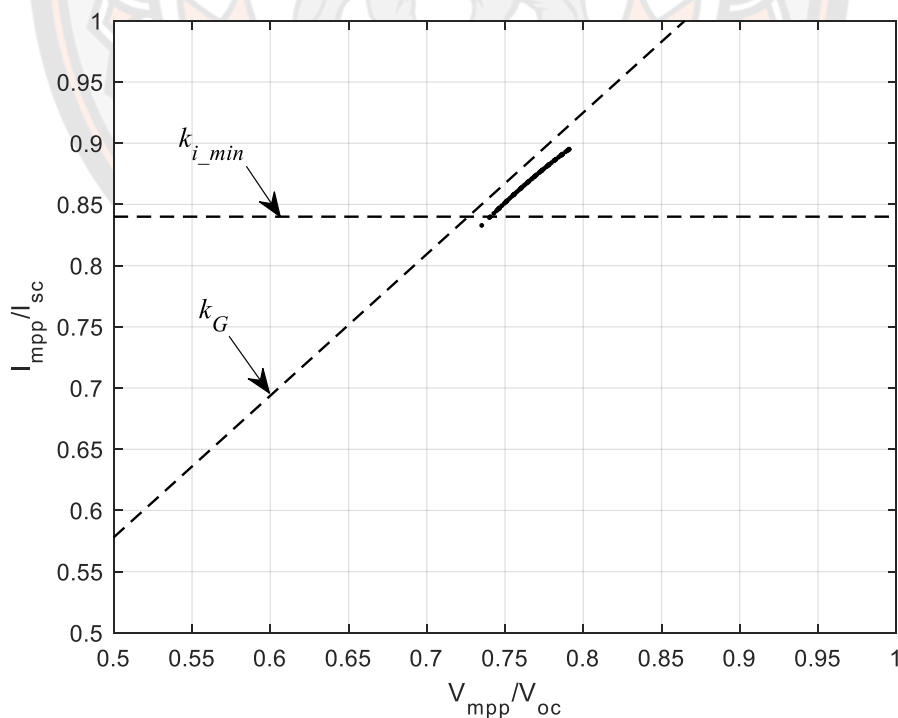
$$k_{i\_min} = 0.95 \cdot k_{i\_STC} = 0.95 \times 0.89 = 0.84$$

$$k_G = \frac{0.95 \cdot k_{i\_STC}}{0.93 \cdot k_{v\_STC}} = \frac{0.95 \times 0.89}{0.93 \times 0.78} = 1.15$$

การจำลองผลกำหนดให้กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอในแต่ละสภาพอากาศดังภาพ 57 จะเห็นว่า จุดกำลังสูงสุดเกือบทั้งหมดทำให้เงื่อนไขทั้งสองข้อเป็นเท็จซึ่งหมายความว่า ตัวควบคุมจะไม่เสียเวลากับการกราดตรวจในย่านแรงดัน และถึงแม้ว่ามีจุดกำลังสูงสุดในบางสภาพ

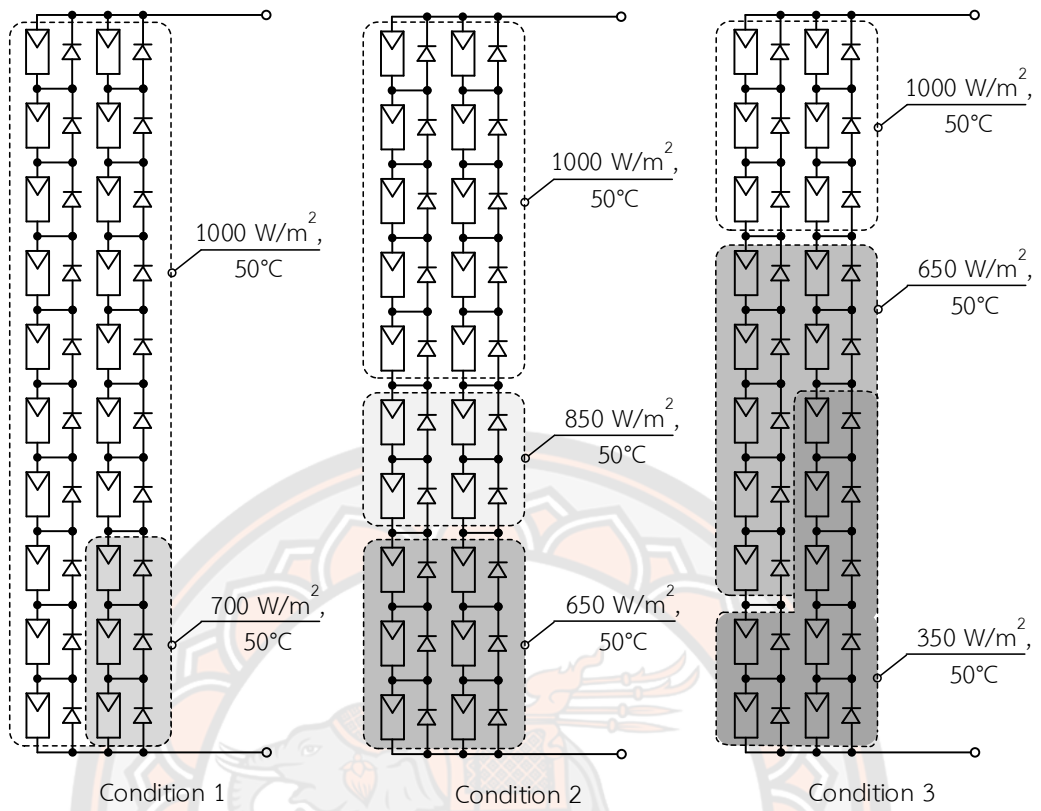


อากาศที่ทำให้เงื่อนไขข้อแรกเป็นจริง แต่มีจำนวนน้อยมาก (3%) นอกจากนี้ การจำลองผลการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงของกลุ่มแผงที่กำหนดให้กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสง 4 กรณี คือ ได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอ 1 กรณีและถูกบังแสงบางส่วน 3 กรณี ซึ่งรูปแบบการบังแสงบางส่วนแสดงดังภาพ 58 และส่งผลให้ได้เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของกลุ่มแผงในแต่ละกรณีเป็นดังภาพ 59 โดยวงกลมเล็กแสดงตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ ในระหว่างที่ย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผง ตัวควบคุมจะไม่รู้ลักษณะของเส้นโค้งดังกล่าว แต่รู้เพียงแค่ว่ากระแสและแรงดันที่วัดได้ ณ จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น ในแต่ละสภาพอากาศ (เส้นโค้งแต่ละเส้น) หลังจากพบจุดกำลังสูงสุดเพียงหนึ่งจุด ตัวควบคุมก็สามารถวินิจฉัยได้ว่ากลุ่มแผงถูกบังแสงบางส่วนหรือไม่ด้วยการวัดค่ากระแสและแรงดันต่าง ๆ แล้วคำนวณและเปรียบเทียบตามเงื่อนไขทั้งสอง ในกรณีที่แต่ละจุดถูกตัวควบคุมพบเป็นจุดแรก ผลการตรวจสอบของตัวควบคุมจะเป็นดังตาราง 3 ซึ่งผลการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงทั้ง 10 จุดมีความถูกต้อง จึงกล่าวได้ว่าการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงที่นำเสนอมีความแม่นยำสูงและเหมาะสมที่จะนำไปใช้ร่วมกับการติดตามจุดกำลังสูงสุด ในหัวข้อถัดไปจะทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42]

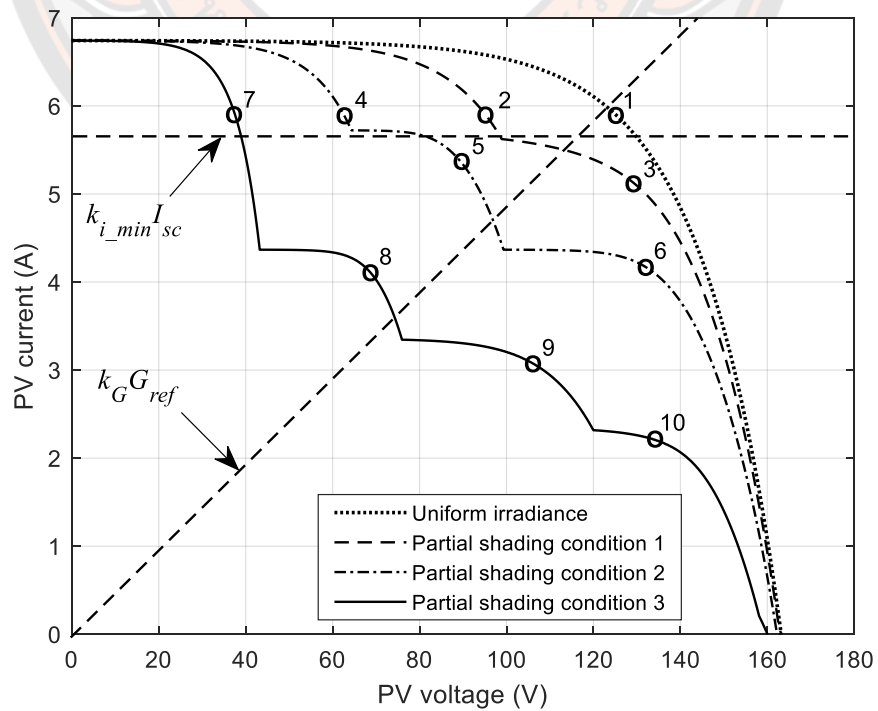


ภาพ 57 ตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงในแบบจำลองในแต่ละสภาพอากาศ





ภาพ 58 รูปแบบการบังแสงบางส่วนที่กำหนดขึ้นเพื่อทดสอบ



ภาพ 59 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงในแบบจำลอง

ตาราง 3 ผลการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง

ตำแหน่ง จุดกำลังสูงสุด	เงื่อนไขที่ 1: $I_{mpp} < k_{i\_min} I_{sc}$	เงื่อนไขที่ 2: $G_{mpp} > k_G G_{ref}$	ผลการตรวจสอบ
1	เท็จ	เท็จ	ความเข้มแสงสม่ำเสมอ
2	เท็จ	จริง	เกิดการบังแสงบางส่วน
3	จริง	เท็จ	เกิดการบังแสงบางส่วน
4	เท็จ	จริง	เกิดการบังแสงบางส่วน
5	จริง	จริง	เกิดการบังแสงบางส่วน
6	จริง	เท็จ	เกิดการบังแสงบางส่วน
7	เท็จ	จริง	เกิดการบังแสงบางส่วน
8	จริง	จริง	เกิดการบังแสงบางส่วน
9	จริง	เท็จ	เกิดการบังแสงบางส่วน
10	จริง	เท็จ	เกิดการบังแสงบางส่วน

#### 4.1.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอ

การจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอกำหนดให้กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $700 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $30^\circ\text{C}$  ผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบ่งเป็น 2 แบบคือ

##### ก) จุดทำงานเริ่มต้นอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด

จากความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดข้างต้นจะได้เส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์และตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด (ตำแหน่งที่ 2) ดังภาพ 60 โดยการติดตามจุดกำลังสูงสุดตัวควบคุมจะไม่มีข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าวแต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น ค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันที่กำหนดส่งผลให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ในตำแหน่งที่ 1 และการปรับค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงให้ไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันช่วงก้าวของวิธีที่นำเสนอเป็นดังภาพ 61 โดยการติดตามจุดกำลังสูงสุดเริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป  $50 \text{ ms}$  จะเห็นได้ว่า การปรับค่าดิวิตีไซเคิลมีค่ามากในช่วงแรกเพราะจุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ไกลจากจุดกำลังสูงสุดและการปรับค่าดิวิตีไซเคิลจะมีค่าลดลงเพราะจุดทำงานของกลุ่มแผงขยับเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุด การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกำลังด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการติดตามจุดกำลังสูงสุด

เป็นดังภาพ 62 และภาพ 63 ตามลำดับ ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 4 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มีย่านการค้นหาลูกกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 63.76 V และ 80.42 V หรือคิดเป็น 36.26% และ 45.73% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (175.85 V) โดยใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.17 s และ 0.13 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 140.90 W และ 241.30 W หรือคิดเป็น 36.26% และ 45.73% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (574.20 W) ตามลำดับ

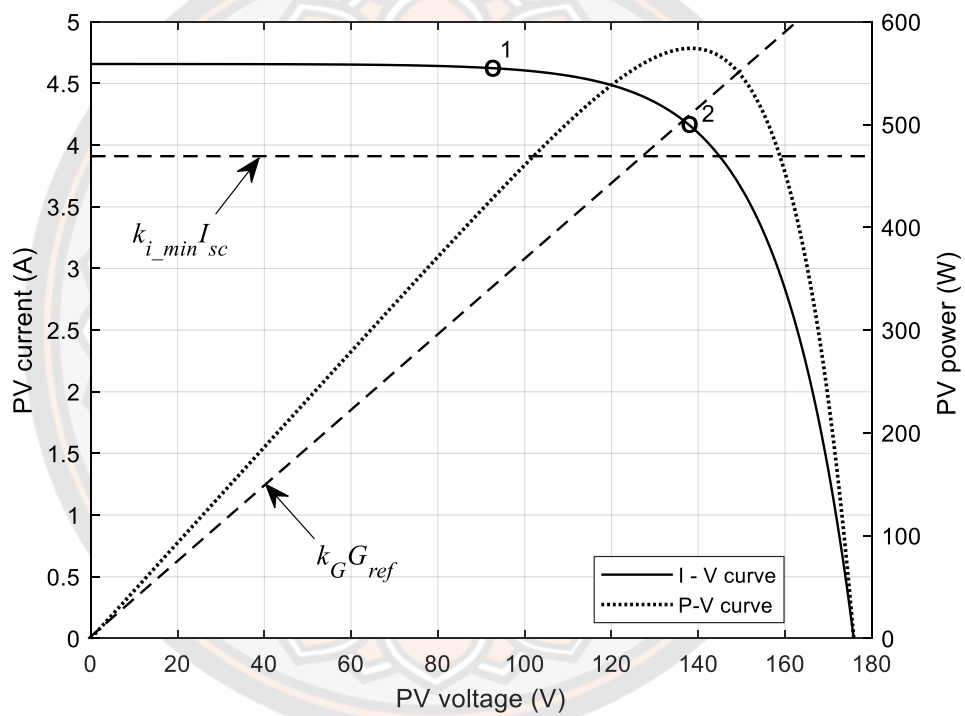
ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรก (ตำแหน่งที่ 2) แล้วบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดนี้ ซึ่งได้เท่ากับ 4.14 A และ 138.72 V ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากระแสวงจรลัดได้เท่ากับ 175.85 V และ 4.66 A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขแรกของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $I_{mpp} < k_{i\_min} \cdot I_{sc}$  โดยที่  $I_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 4.14 A และผลคูณของ  $k_{i\_min}$  กับ  $I_{sc}$  มีค่าเท่ากับ 3.91 A ซึ่งทำให้เงื่อนไขแรกเป็นเท็จ จึงพิจารณาเงื่อนไขที่สองของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $G_{mpp} > k_G \cdot G_{ref}$  โดยที่  $G_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 0.0298 A/V และผลคูณของ  $k_G$  กับ  $G_{ref}$  มีค่าเท่ากับ 0.0304 A/V ซึ่งทำให้เงื่อนไขที่สองเป็นเท็จเช่นกัน เมื่อเงื่อนไขทั้งสองข้อเป็นเท็จก็แสดงว่ากลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ จึงไม่ต้องเสียเวลาในการกราดตรวจที่ใช้ค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก โดยใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด 0.08 s และได้ค่ากำลังสูงสุดเท่ากับ 574.20 W เมื่อเปรียบเทียบผลกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 5 จะพบว่า เวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 52.94% และ 38.46% ตามลำดับ

ตาราง 4 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก)

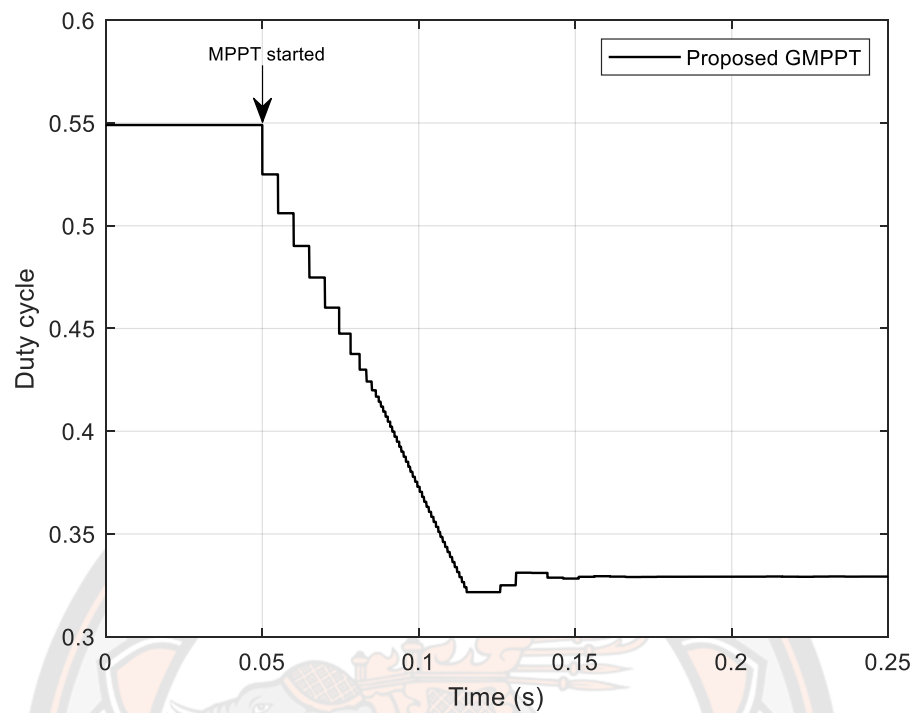
วิธีติดตาม จุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหา จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลัง ขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	63.76	36.26	0.17	140.90	24.54
วิธีของ [42]	80.42	45.73	0.13	241.30	42.02
วิธีที่นำเสนอ	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00

ตาราง 5 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก)

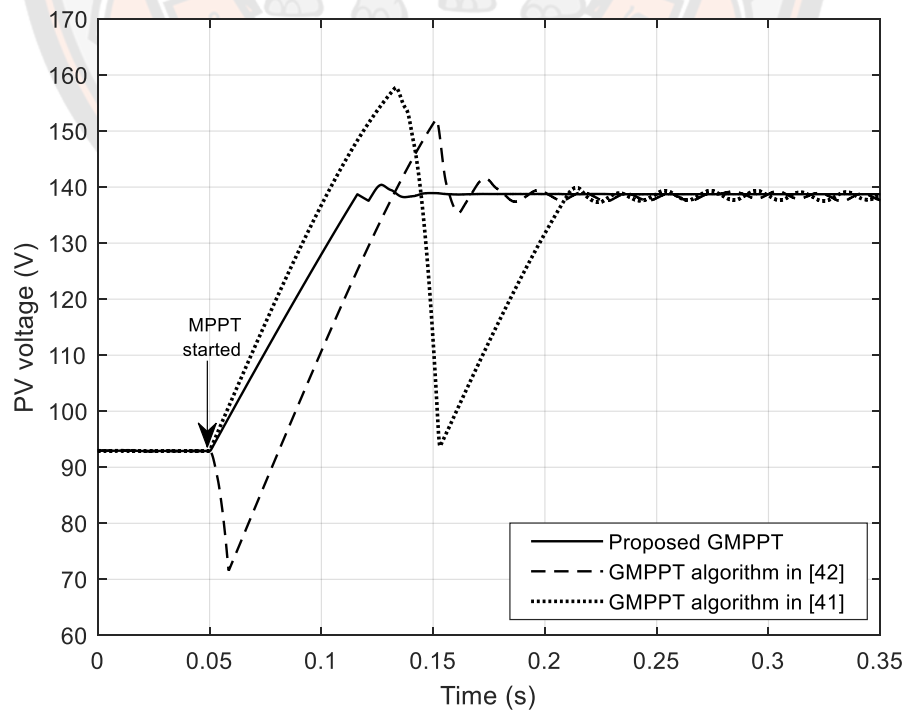
ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ไม่มีการกำหนดย่าน	ไม่มีการกำหนดย่าน
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 52.94%	ลดลง 38.46%
ช่วงแกว่งของค่ากำลัง	ไม่เกิดการแกว่ง	ไม่เกิดการแกว่ง



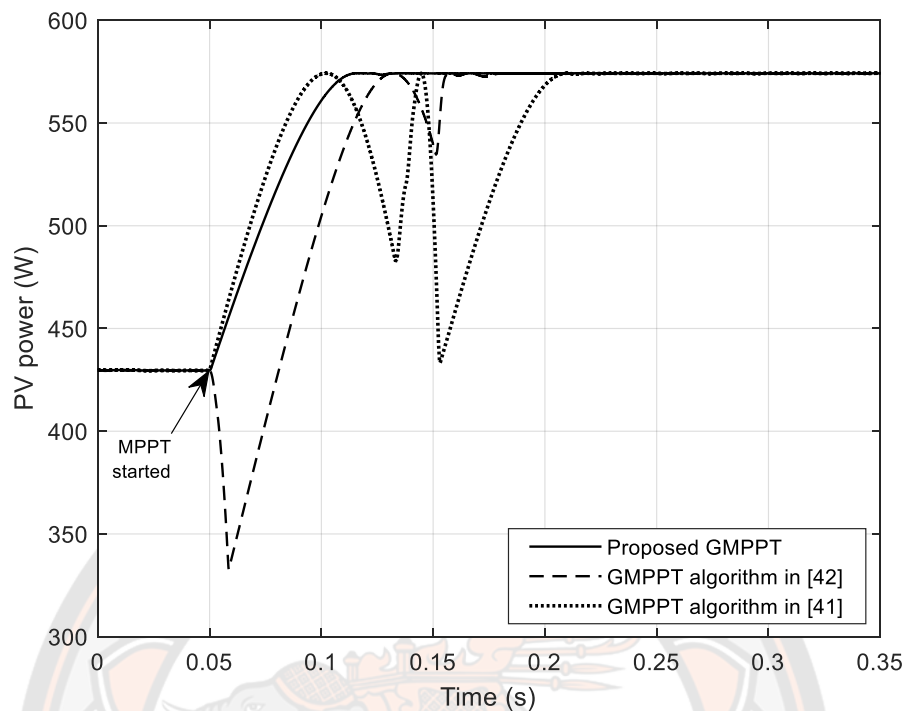
ภาพ 60 เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก)



ภาพ 61 ค่าตัวชี้เซลล์แบบแปรผันช่วงก้าวตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก)



ภาพ 62 แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก)



ภาพ 63 กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ก)

ข) จุดทำงานเริ่มต้นอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด

จากความสัมพันธ์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดข้างต้นจะได้เส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์และตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด (ตำแหน่งที่ 2) ดังภาพ 64 โดยการติดตามจุดกำลังสูงสุดตัวควบคุมจะไม่มีข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าวแต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น ค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันที่กำหนดส่งผลให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ในตำแหน่งที่ 1 และการปรับค่าตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงให้ไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันช่วงก้าวของวิธีที่นำเสนอเป็นดังภาพ 65 โดยการติดตามจุดกำลังสูงสุดเริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป 50 ms จะเห็นได้ว่า การปรับค่าตัวตีไซเคิลครั้งแรกทำให้จุดทำงานของกลุ่มแผงขยับออกจากจุดกำลังสูงสุดเนื่องจากการปรับค่าตัวตีไซเคิลครั้งแรกถูกบังคับให้ย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปทางขวาเสมอแต่หลังจากนั้นการปรับค่าตัวตีไซเคิลจะทำให้จุดทำงานของกลุ่มแผงขยับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดและมีค่ามากในช่วงแรกเพราะจุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ไกลจากจุดกำลังสูงสุดและการปรับค่าตัวตีไซเคิลจะมีค่าลดลงเพราะจุดทำงานของกลุ่มแผงขยับเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุด การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกำลังด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการติดตามจุดกำลังสูงสุดเป็นดังภาพ 66 และภาพ 67 ตามลำดับ ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] เป็นดังตาราง 6 พบว่า พบว่า



วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 63.69 V และ 57.54 V หรือ 36.22% และ 32.72% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (175.85 V) และใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.10 s และ 0.12 s โดยพบค่ากำลังสูงสุดเท่ากับ 574.20 W ซึ่งระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดมีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกเท่ากับ 140.80 W และ 138.10 W หรือ 24.52% และ 24.05% ของค่ากำลังสูงสุด

ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรก (ตำแหน่งที่ 2) แล้วบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดนี้ ซึ่งได้เท่ากับ 4.14 A และ 138.72 V ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากระแสวงจรลัดได้เท่ากับ 175.85 V และ 4.66 A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขแรกของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสง นั่นคือ  $I_{mpp} < k_{i\_min} \cdot I_{sc}$  โดยที่  $I_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 4.14 A และผลคูณของ  $k_{i\_min}$  กับ  $I_{sc}$  มีค่าเท่ากับ 3.91 A ซึ่งทำให้เงื่อนไขแรกเป็นเท็จ จึงพิจารณาเงื่อนไขที่สองของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $G_{mpp} > k_G \cdot G_{ref}$  โดยที่  $G_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 0.0298 A/V และผลคูณของ  $k_G$  กับ  $G_{ref}$  มีค่าเท่ากับ 0.0304 A/V ซึ่งทำให้เงื่อนไขที่สองเป็นเท็จเช่นกัน เมื่อเงื่อนไขทั้งสองข้อเป็นเท็จก็แสดงว่ากลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ จึงไม่ต้องเสียเวลาในการกราดตรวจที่ใช้ค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก โดยใช้เวลารวดตามจุดกำลังสูงสุด 0.06 s และได้ค่ากำลังสูงสุดเท่ากับ 574.20 W เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 7 จะพบว่า เวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 40.00% และ 50.00% ตามลำดับ

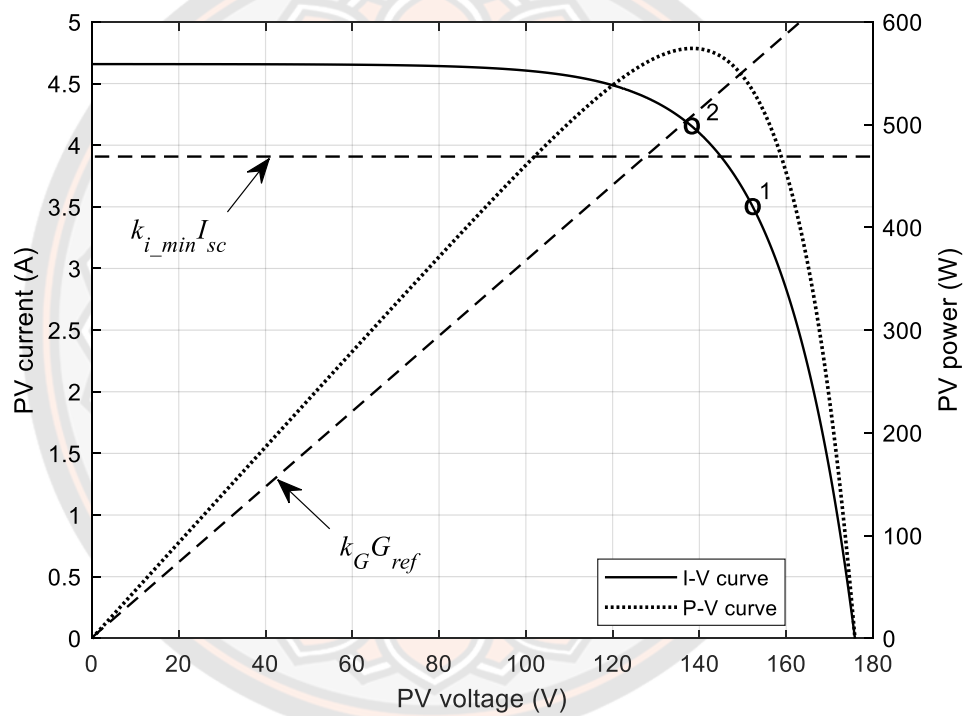
จากผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงมีค่าสม่ำเสมอแสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงก่อนกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างของวิธีที่นำเสนอช่วยให้สามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดได้เร็วขึ้นและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงได้

ตาราง 6 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)

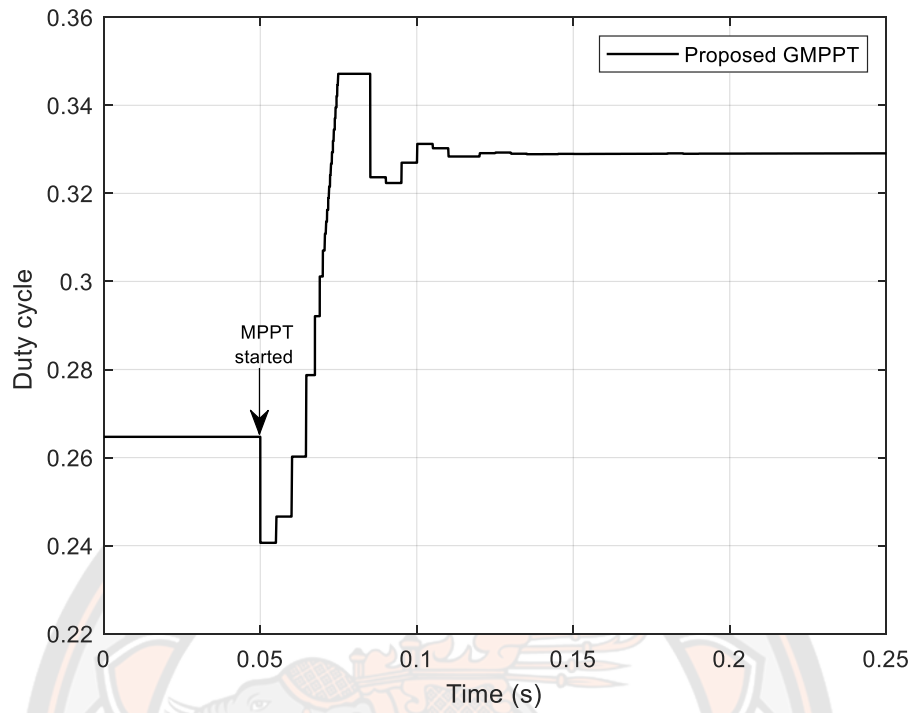
วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลังขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	63.69	36.22	0.10	140.80	24.52
วิธีของ [42]	57.54	32.72	0.12	138.10	24.05
วิธีที่นำเสนอ	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00

ตาราง 7 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)

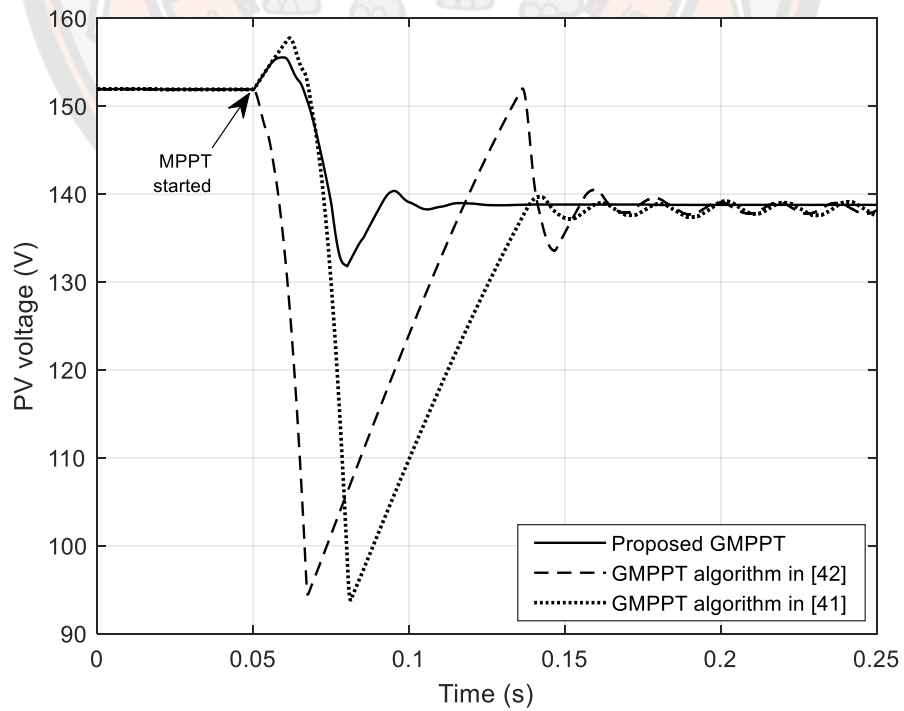
ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ไม่มีการกำหนดย่าน	ไม่มีการกำหนดย่าน
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 40.00%	ลดลง 50.00%
ช่วงแกว่งของค่ากำลัง	ไม่เกิดการแกว่ง	ไม่เกิดการแกว่ง



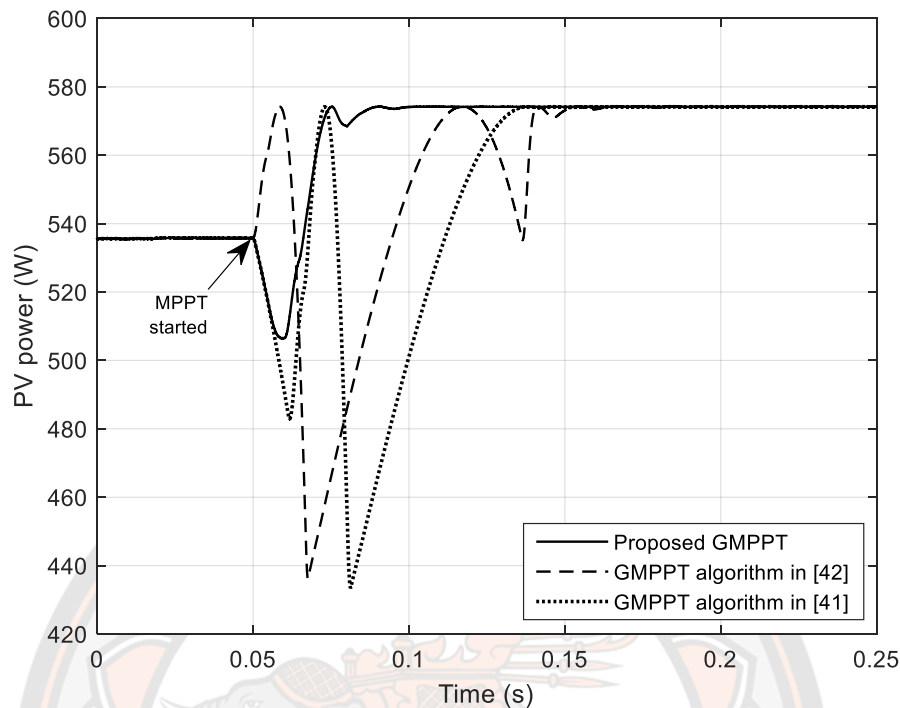
ภาพ 64 เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)



ภาพ 65 ค่าตัวใช้เซลล์แบบแปรผันช่วงก้าวตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)



ภาพ 66 แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)

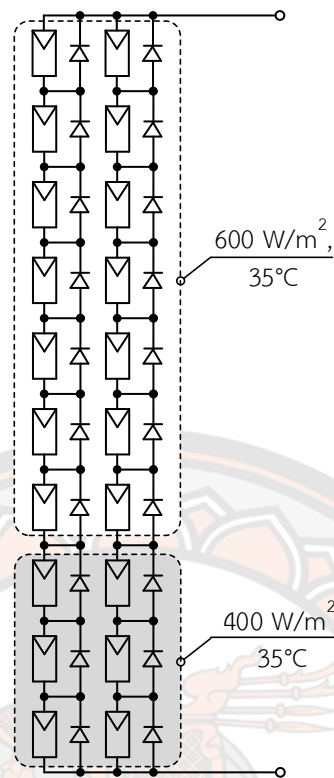


ภาพ 67 กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.2 ข)

#### 4.1.3 การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้การบังแสงบางส่วน

การติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีที่นำเสนอหากตรวจพบว่ากลุ่มแผงอยู่ภายใต้การบังแสงบางส่วนจะกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างโดยทิศทางของการกราดตรวจจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดทำงานเริ่มต้นเทียบกับตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดจุดแรกที่พบและการกราดตรวจอาจไม่จำเป็นต้องย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังขอบเขตทั้งสองด้านของย่านการค้นหาเพราะในบางกรณีการย้ายจุดทำงานไปยังขอบเขตด้านใดด้านหนึ่งก็ครอบคลุมทั่วทั้งย่านการค้นหาที่ถูกปรับใหม่จนเป็นค่าปัจจุบันแล้ว ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยกำหนดสภาพอากาศและจุดทำงานเริ่มต้นของกลุ่มแผงให้เกิดการกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างดังนี้

กรณีที่กำหนดจุดทำงานเริ่มต้นให้วิธีที่เสนอการกราดตรวจด้านใดด้านหนึ่งของย่านการค้นหาครอบคลุมทั่วทั้งย่านการค้นหาที่ถูกปรับใหม่จนเป็นค่าปัจจุบัน หลังจากนั้นจึงย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังตำแหน่งที่พบ  $P_{max}$  ทันที ความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดเป็นดังภาพ 68 โดยมี 14 แผงที่ได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $600 \text{ W/m}^2$  และมี 6 แผงที่ถูกบังแสงจนได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $400 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $35^\circ\text{C}$  ผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบ่งเป็น 2 แบบคือ



ภาพ 68 การกำหนดเงื่อนไขของสภาพอากาศในหัวข้อ 4.1.3 ก) และ ข)

ก) กราตรตรวจไปทางขวาเพียงด้านเดียว

จากความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดดังภาพ 68 จะได้เส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงและตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด (ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3) ดังภาพ 69 ทั้งนี้การติดตามจุดกำลังสูงสุดตัวควบคุมจะไม่มีข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าว แต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น โดยค่าตัวตั้งไฮเคิลเริ่มต้นของวงจรปรับระดับแรงดันส่งผลให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ในตำแหน่งที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกำลังด้านออกของกลุ่มแผงจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดเป็นดังภาพ 70 และภาพ 71 ตามลำดับ การติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป 50 ms จุดทำงานของกลุ่มแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง (ตำแหน่งที่ 3) ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 8 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 99.27 V และ 97.87 V หรือคิดเป็น 58.46% และ 57.64% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (169.86 V) โดยใช้เวลาดูตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.35 s และ 0.21 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 129.60 W และ 148.90 W หรือคิดเป็น 35.89% และ 41.24% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (361.10 W) ตามลำดับ

ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรก (ตำแหน่งที่ 2) แล้วบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดนี้ ซึ่งได้เท่ากับ 3.55 A และ 93.66 V ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากระแสวงจรลัดได้เท่ากับ 169.86 V และ 4.00 A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขแรกของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $I_{mpp} < k_{i\_min} \cdot I_{sc}$  โดยที่  $I_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 3.55 A และผลคูณของ  $k_{i\_min}$  กับ  $I_{sc}$  มีค่าเท่ากับ 3.36 A ซึ่งทำให้เงื่อนไขแรกเป็นเท็จ จึงพิจารณาเงื่อนไขที่สองของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $G_{mpp} > k_G \cdot G_{ref}$  โดยที่  $G_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 0.038 A/V และผลคูณของ  $k_G$  กับ  $G_{ref}$  มีค่าเท่ากับ 0.027 A/V ซึ่งทำให้เงื่อนไขที่สองเป็นจริงก็แสดงว่าเกิดการบังแสงบางส่วน จึงมีขั้นตอนการค้นหาลูกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 63.00 V หรือคิดเป็น 37.10% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 0.14 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 77.40 W หรือคิดเป็น 21.43% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (361.10 W) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 9 จะพบว่า มีขั้นตอนการค้นหาลูกำลังสูงสุดวงกว้างลดลง 36.54% และ 35.63% โดยเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 60.00% และ 33.33% และเกิดช่วงแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกลดลง 40.28% และ 48.02% ตามลำดับ

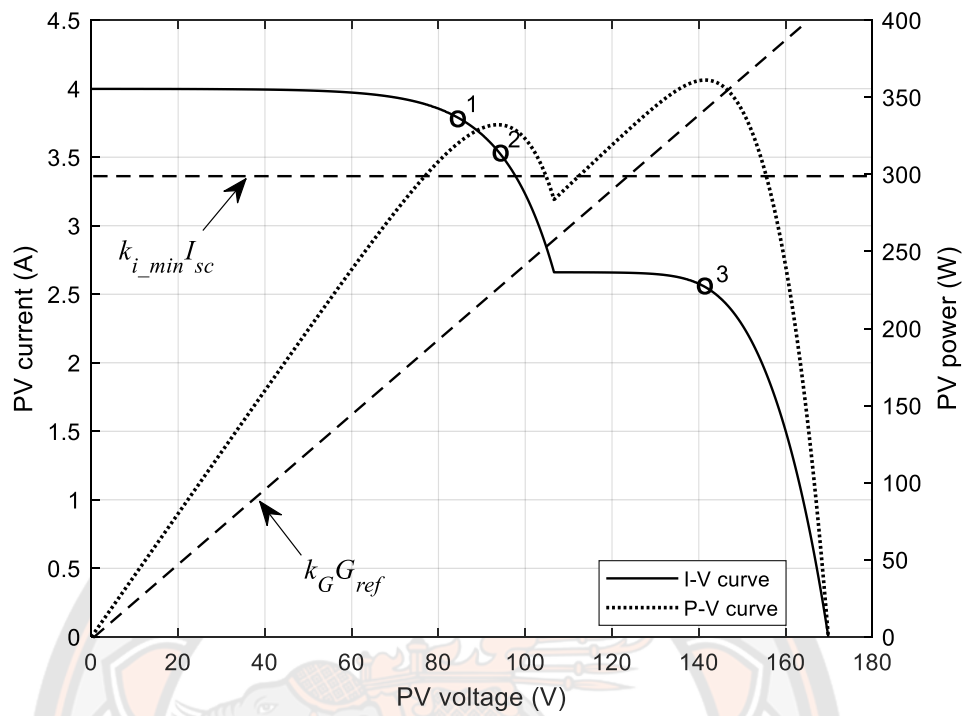
ตาราง 8 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)

วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลังขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	99.27	58.46	0.35	129.60	35.89
วิธีของ [42]	97.87	57.64	0.21	148.90	41.24
วิธีที่นำเสนอ	63.00	37.10	0.14	77.40	21.43

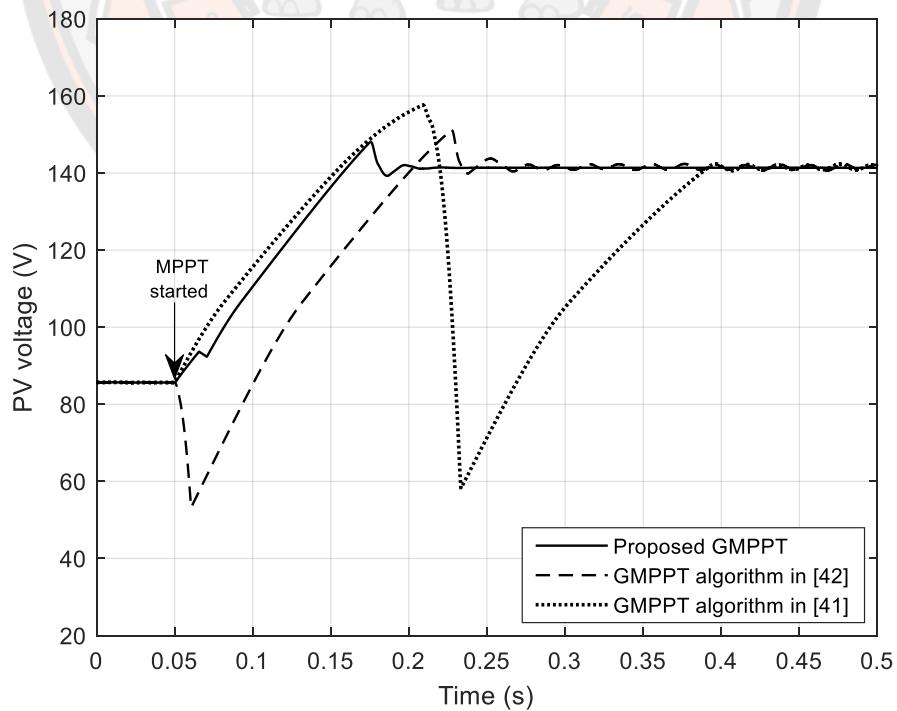
ตาราง 9 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)

ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ลดลง 36.54%	ลดลง 35.63%
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 60.00%	ลดลง 33.33%
ช่วงแกว่งของค่ากำลัง	ลดลง 40.28%	ลดลง 48.02%

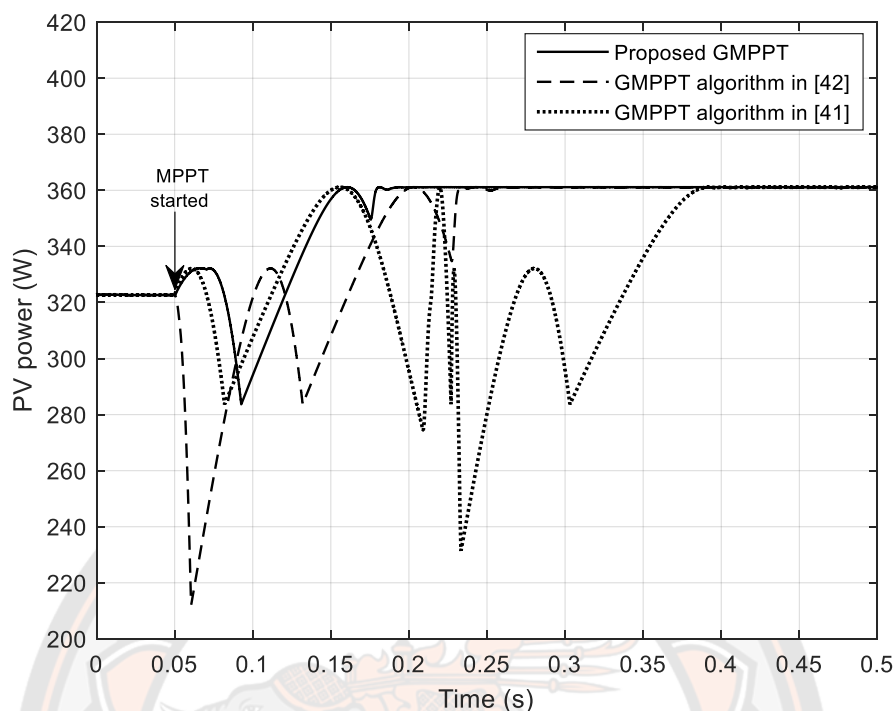




ภาพ 69 เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)



ภาพ 70 แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)



ภาพ 71 กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ก)

ข) กราฟตรวจไปทางซ้ายเพียงด้านเดียว

จากความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดดังภาพ 68 จะได้เส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงและตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด (ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3) ดังภาพ 72 ทั้งนี้การติดตามจุดกำลังสูงสุดตัวควบคุมจะไม่มีข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าว แต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น โดยค่าตัวตั้งไซเคิลเริ่มต้นของวงจรทบทวนระดับแรงดันส่งผลให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ในตำแหน่งที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกำลังด้านออกของกลุ่มแผงจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดเป็นดังภาพ 73 และภาพ 74 ตามลำดับ การติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป 50 ms จุดทำงานของกลุ่มแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง (ตำแหน่งที่ 2) ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 10 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มียานการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 99.56 V และ 92.97 V หรือคิดเป็น 58.63% และ 54.75% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (169.86 V) โดยใช้เวลาดำเนินการติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.23 s และ 0.19 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 130.40 W และ 129.60 W หรือคิดเป็น 36.11% และ 35.89% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (361.10 W) ตามลำดับ

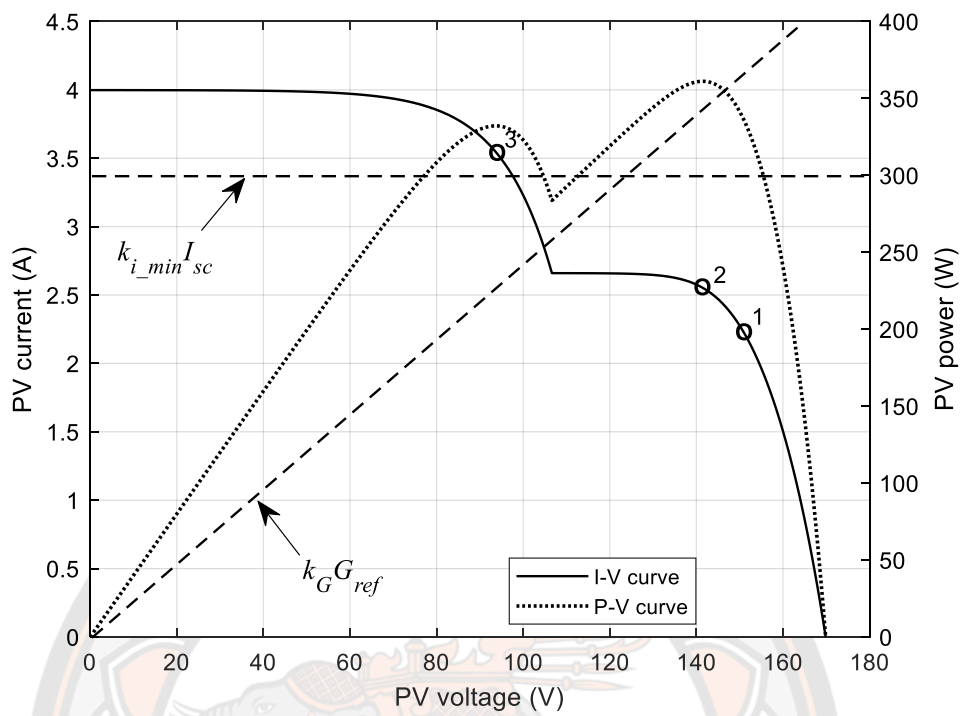
ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรก (ตำแหน่งที่ 2) แล้วบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดนี้ ซึ่งได้เท่ากับ 2.55 A และ 141.43 V ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากระแสวงจรถัดได้เท่ากับ 169.86 V และ 4.00 A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขแรกของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $I_{mpp} < k_{i\_min} \cdot I_{sc}$  โดยที่  $I_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 2.55 A และผลคูณของ  $k_{i\_min}$  กับ  $I_{sc}$  มีค่าเท่ากับ 3.36 A ซึ่งทำให้เงื่อนไขแรกเป็นจริงก็แสดงว่าเกิดการบังแสงบางส่วน จึงมีขั้นตอนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 63.33 V หรือคิดเป็น 35.53% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 0.17 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 77.40 W หรือคิดเป็น 21.43% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (361.10 W) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 11 จะพบว่า มีขั้นตอนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างลดลง 39.40% และ 35.11% โดยเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 26.09% และ 10.53% และเกิดช่วงแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกลดลง 40.64% และ 40.28% ตามลำดับ

ตาราง 10 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)

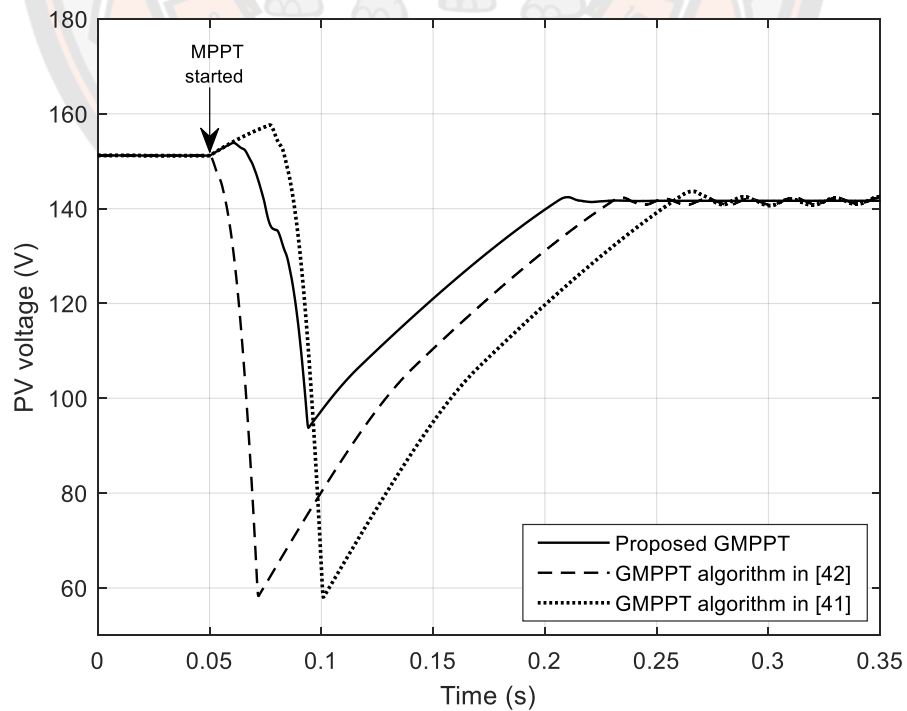
วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลังขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	99.56	58.63	0.23	130.40	36.11
วิธีของ [42]	92.97	54.75	0.19	129.60	35.89
วิธีที่นำเสนอ	60.33	35.53	0.17	77.40	21.43

ตาราง 11 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)

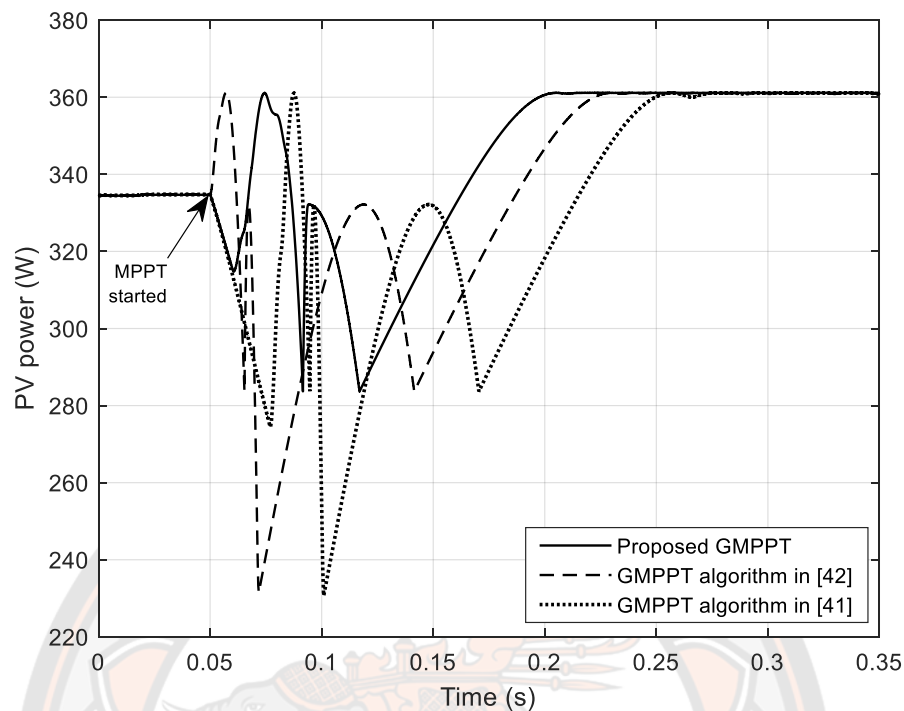
ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ลดลง 39.40%	ลดลง 35.11%
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 26.09%	ลดลง 10.53%
ช่วงแกว่งของค่ากำลัง	ลดลง 40.64%	ลดลง 40.28%



ภาพ 72 เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)



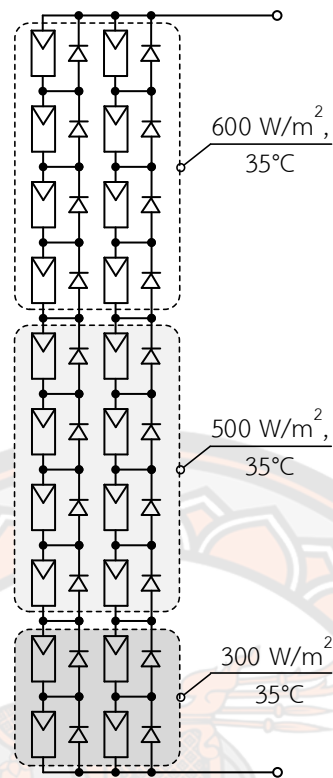
ภาพ 73 แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)



ภาพ 74 กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ข)

จากผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้การบังแสงบางส่วนที่กำหนดจุดทำงานเริ่มต้นให้วิธีที่นำเสนอกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างไปด้านใดด้านหนึ่งของย่านการค้นหาแล้วย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังตำแหน่งที่พบ  $P_{max}$  ทันทที ภายใต้ความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดนี้ แสดงให้เห็นว่า ย่านการค้ำหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างของวิธีที่นำเสนอแคบลงซึ่งช่วยลดเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อเทียบกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42]

กรณีที่กำหนดจุดทำงานเริ่มต้นให้วิธีที่นำเสนอการกราดตรวจโดยย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปทั้งสองด้านของย่านการค้นหาแล้วจึงย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังตำแหน่งที่พบ  $P_{max}$  ทันทที ความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดเป็นดังภาพ 75 มี 8 แผงที่ได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $600 \text{ W/m}^2$  โดยมี 8 แผงถูกบังแสงจนได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $500 \text{ W/m}^2$  และอีก 4 แผงถูกบังแสงจนได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $300 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $35^\circ\text{C}$  ผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบ่งเป็น 2 แบบคือ



ภาพ 75 การกำหนดเงื่อนไขของสภาพอากาศในหัวข้อ 4.1.3 ค) และ ง)

ค) กราฟตรวจไปทางขวา ก่อนซ้าย

จากความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดดังภาพ 75 จะได้เส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงและตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด (ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 4) ดังภาพ 76 ทั้งนี้การติดตามจุดกำลังสูงสุดตัวควบคุมจะไม่มีข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าวแต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น โดยค่าตัวตั้งไชเคิลเริ่มต้นของวงจรทระดับแรงดันส่งผลให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ในตำแหน่งที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกำลังด้านออกของกลุ่มแผงจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดเป็นดังภาพ 77 และภาพ 78 ตามลำดับ การติดตามจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างเริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป 50 ms จุดทำงานของกลุ่มแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดดวงกว้าง (ตำแหน่งที่ 2) ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 12 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างเท่ากับ 105.56 V และ 74.02 V หรือคิดเป็น 62.50% และ 43.82% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (168.94 V) โดยใช้เวลาดูตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.33 s และ 0.17 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 147 W และ 147 W หรือคิดเป็น 44% และ 44% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (334.10 W) ตามลำดับ



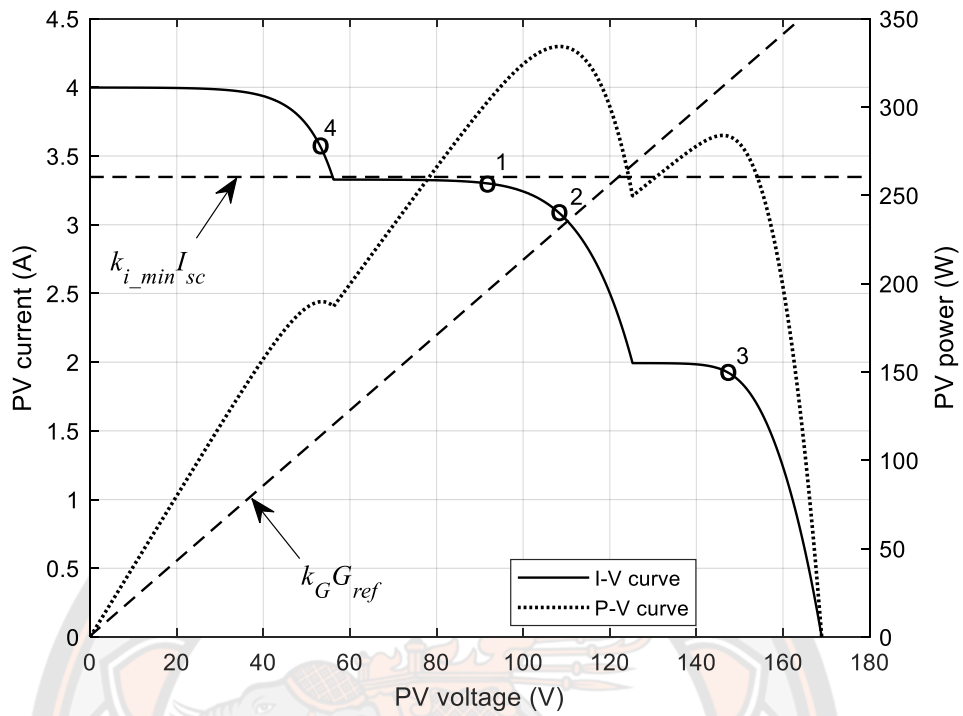
ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรก (ตำแหน่งที่ 2) แล้วบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดนี้ ซึ่งได้เท่ากับ 3.09 A และ 108.31 V ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากระแสวงจรถัดได้เท่ากับ 168.94 V และ 4.00 A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขแรกของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $I_{mpp} < k_{i\_min} \cdot I_{sc}$  โดยที่  $I_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 3.09 A และผลคูณของ  $k_{i\_min}$  กับ  $I_{sc}$  มีค่าเท่ากับ 3.36 A ซึ่งทำให้เงื่อนไขแรกเป็นจริงก็แสดงว่าเกิดการบังแสงบางส่วน จึงมีขั้นตอนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 37.64 V หรือคิดเป็น 22.29% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 0.14 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 62.20 W หรือคิดเป็น 18.62% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (334.10 W) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 13 จะพบว่า มีขั้นตอนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างลดลง 64.34% และ 49.15% โดยเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 57.58% และ 17.65% และเกิดช่วงแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกลดลง 57.69% และ 57.69% ตามลำดับ

ตาราง 12 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)

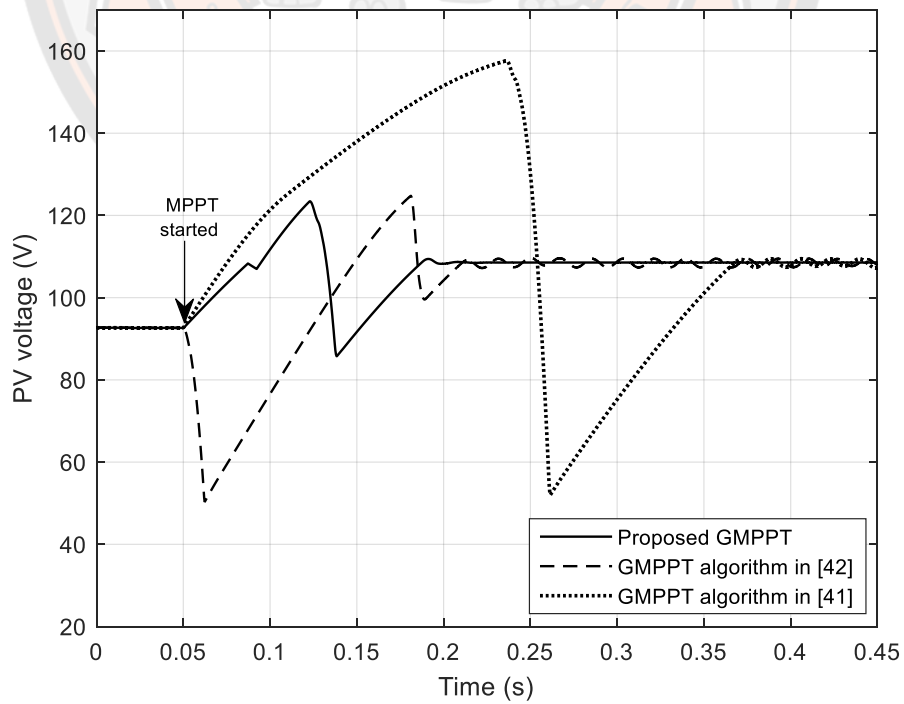
วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลังขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	105.56	62.50	0.33	147.00	44.00
วิธีของ [42]	74.02	43.82	0.17	147.00	44.00
วิธีที่นำเสนอ	37.64	22.29	0.14	62.20	18.62

ตาราง 13 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)

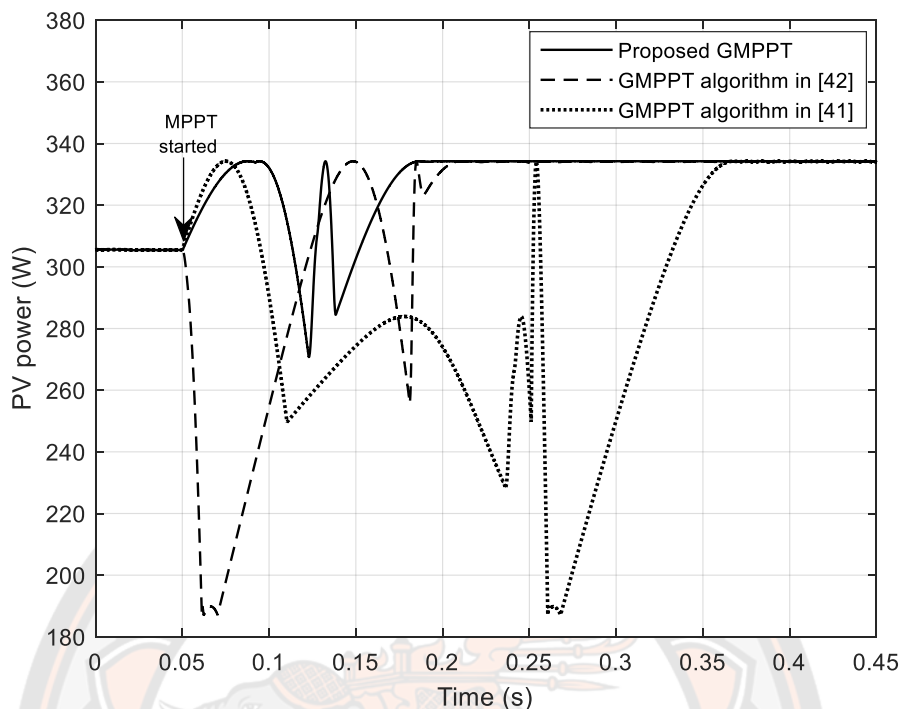
ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ลดลง 64.34%	ลดลง 49.15%
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 57.58%	ลดลง 17.65%
ช่วงแกว่งของค่ากำลัง	ลดลง 57.69%	ลดลง 57.69%



ภาพ 76 เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)



ภาพ 77 แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)



ภาพ 78 กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ค)

ง) กราฟตรวจไปทางซ้ายก่อนขวา

จากความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดดังภาพ 75 จะได้เส้นโค้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงและตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุด (ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 4) ดังภาพ 79 ทั้งนี้การติดตามจุดกำลังสูงสุดตัวควบคุมจะไม่มีข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าวแต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น โดยค่าตัวตั้งไซเคิลเริ่มต้นของวงจรทระดับแรงดันส่งผลให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ในตำแหน่งที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกำลังด้านออกของกลุ่มแผงจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดเป็นดังภาพ 80 และภาพ 81 ตามลำดับ โดยการติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป 50 ms จุดทำงานของกลุ่มแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง (ตำแหน่งที่ 2) ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 14 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มียานการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 105.53 V และ 70.01 V หรือคิดเป็น 62.48% และ 41.45% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (168.94 V) โดยใช้เวลาดูตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.30 s และ 0.17 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 147 W และ 147 W หรือคิดเป็น 44% และ 44% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (334.10 W) ตามลำดับ

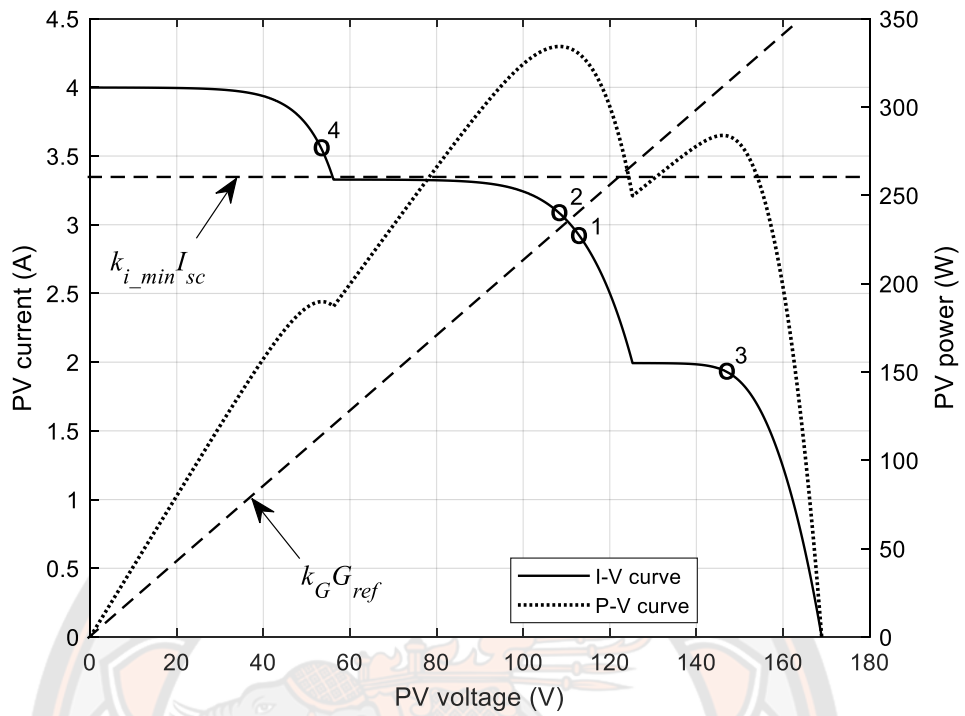
ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรก (ตำแหน่งที่ 2) แล้วบันทึกค่ากระแสและแรงดันที่จุดกำลังสูงสุดนี้ ซึ่งได้เท่ากับ 3.09 A และ 108.31 V ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากระแสวงจรลัดได้เท่ากับ 168.94 V และ 4.00 A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเงื่อนไขแรกของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผง นั่นคือ  $I_{mpp} < k_{i\_min} \cdot I_{sc}$  โดยที่  $I_{mpp}$  มีค่าเท่ากับ 3.09 A และผลคูณของ  $k_{i\_min}$  กับ  $I_{sc}$  มีค่าเท่ากับ 3.36 A ซึ่งทำให้เงื่อนไขแรกเป็นจริงก็แสดงว่าเกิดการบังแสงบางส่วน จึงมีงานการค้นหาลูกำลังสูงสุดดวงกว้างเท่ากับ 45.25 V หรือคิดเป็น 26.79% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดดวงกว้างเท่ากับ 0.14 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านนอกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 63.10 W หรือคิดเป็น 18.89% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (334.10 W) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 15 จะพบว่า มีงานการค้นหาลูกำลังสูงสุดดวงกว้างลดลง 51.12% และ 35.37% โดยเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 53.33% และ 17.65% และเกิดช่วงแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านนอกลดลง 57.07% และ 57.07% ตามลำดับ

ตาราง 14 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)

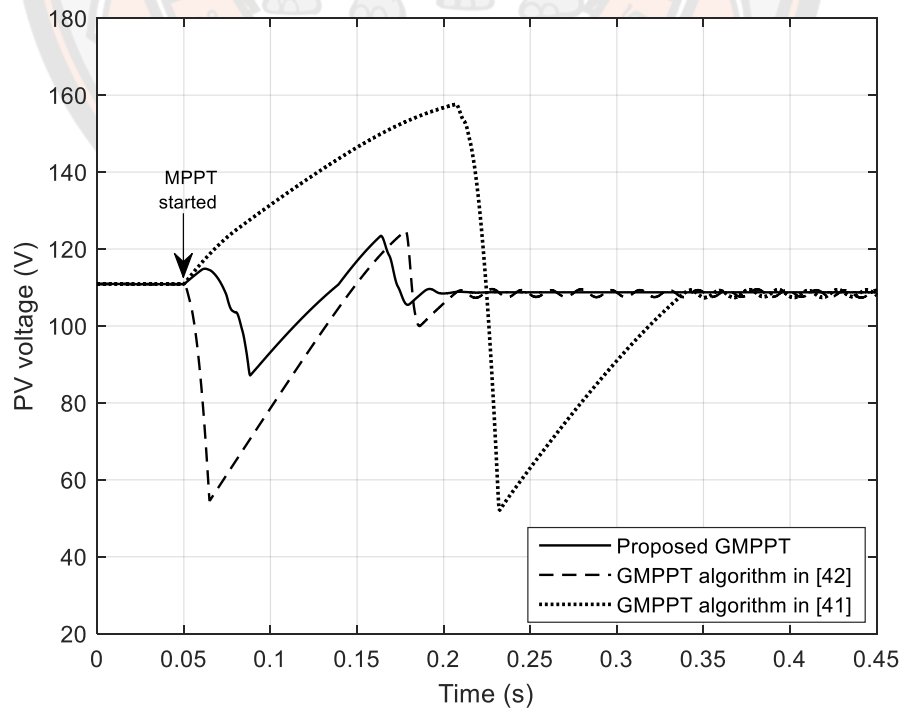
วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหาลูกำลังสูงสุดดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลังขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	105.53	62.48	0.30	147.00	44.00
วิธีของ [42]	70.01	41.45	0.17	147.00	44.00
วิธีที่นำเสนอ	45.25	26.79	0.14	63.10	18.89

ตาราง 15 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)

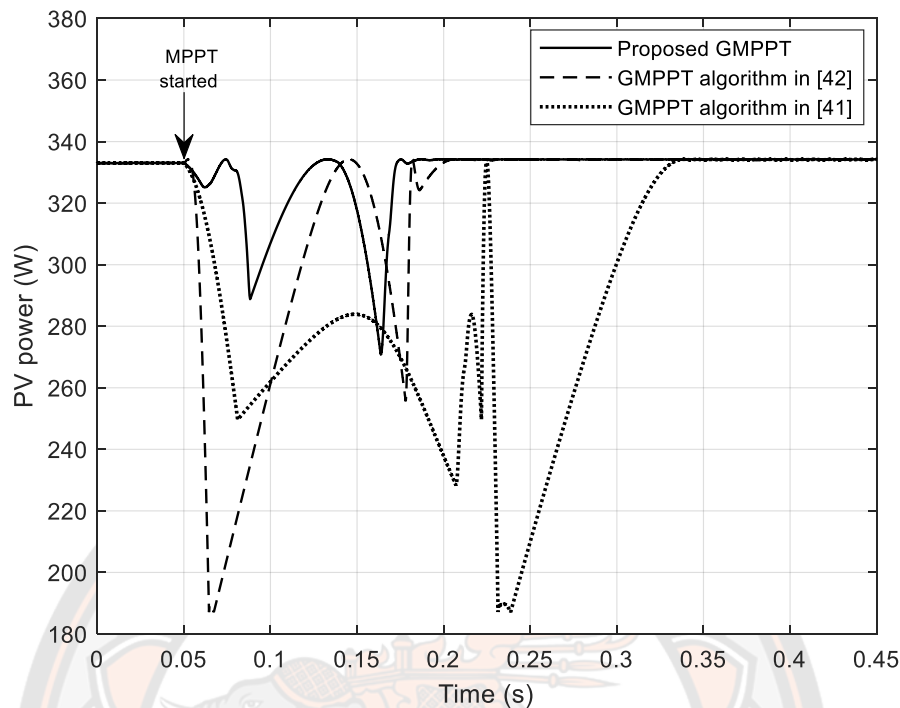
ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหาลูกำลังสูงสุดดวงกว้าง	ลดลง 57.12%	ลดลง 35.37%
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 53.33%	ลดลง 17.65%
ช่วงแกว่งของค่ากำลัง	ลดลง 57.07%	ลดลง 57.07%



ภาพ 79 เส้นโค้งคุณลักษณะของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)



ภาพ 80 แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)



ภาพ 81 กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.3 ง)

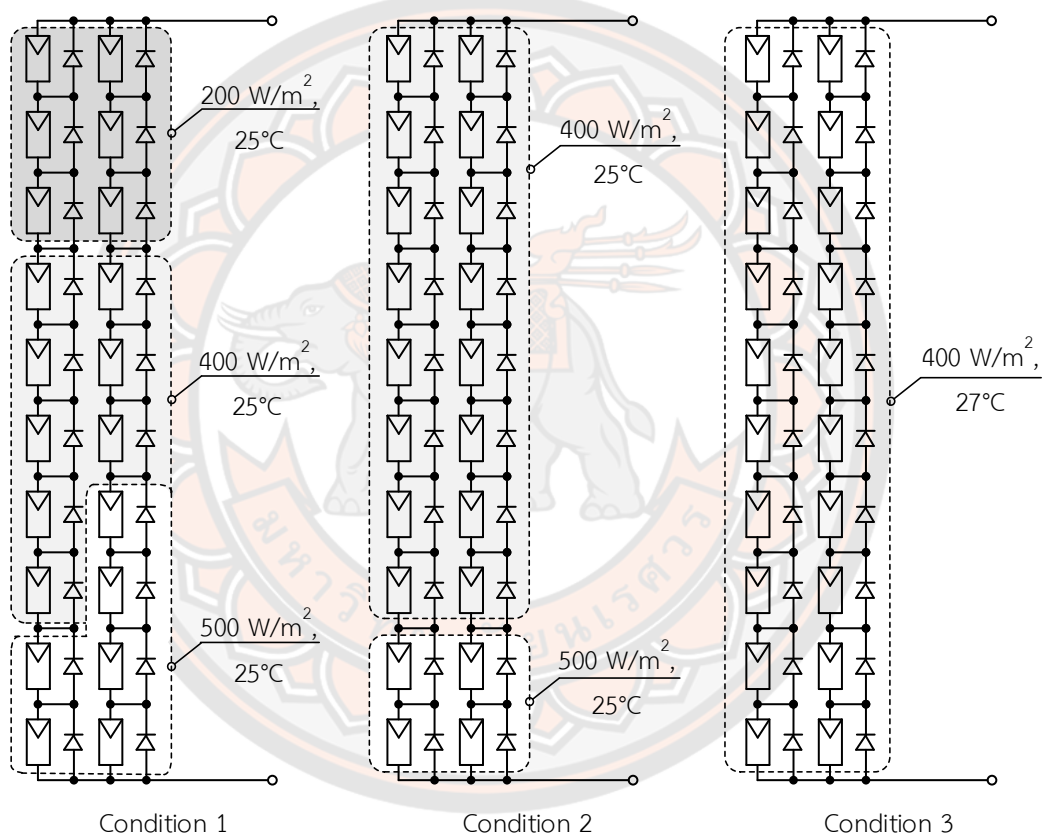
จากผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้การบังแสงบางส่วนที่กำหนดจุดทำงานเริ่มต้นให้วิธีที่นำเสนอกราดตรวจเพื่อค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างไปทั้งสองด้านของย่านการค้นหาแล้วย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงไปยังตำแหน่งที่พบ  $P_{max}$  ทันที ภายใต้ความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดนี้ แสดงให้เห็นว่า ย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างของวิธีที่นำเสนอแคบลงซึ่งช่วยลดเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อเทียบกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42]

#### 4.1.4 การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

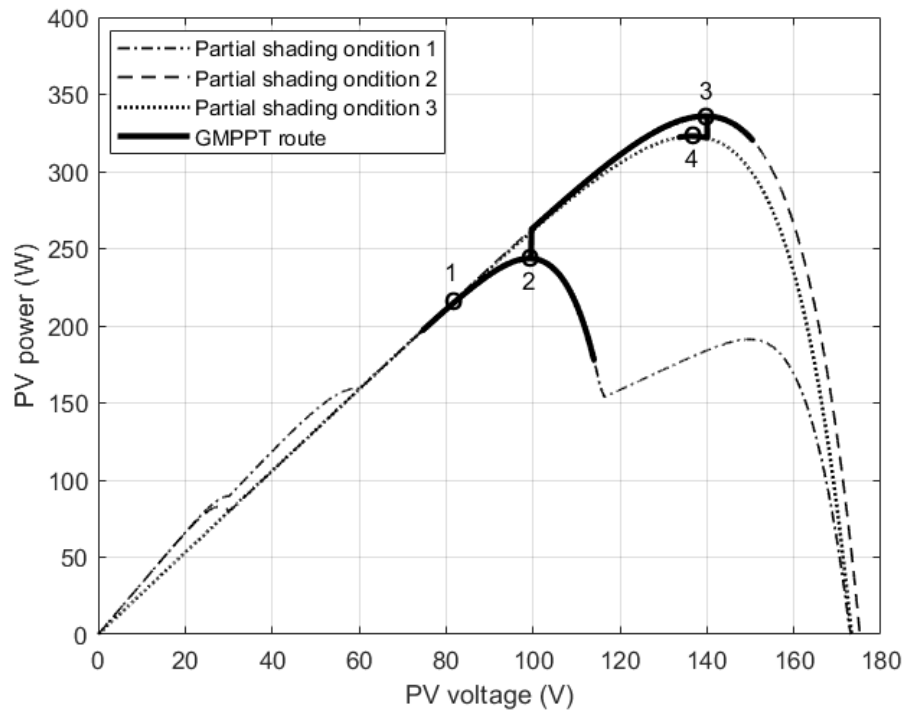
การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดกำหนดให้ความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กลุ่มแผงได้รับมี 3 กรณี แบ่งเป็นบังแสงบางส่วน 2 กรณีและได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอ 1 กรณี ตามลำดับ ดังภาพ 82 ภายใต้สภาพอากาศแรกอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $25^{\circ}\text{C}$  และมี 6 แผงที่ได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $500 \text{ W/m}^2$  โดยมี 8 แผงถูกบังแสงจนได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $400 \text{ W/m}^2$  และอีก 6 แผงถูกบังแสงจนได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $200 \text{ W/m}^2$  หลังจากนั้นสภาพอากาศเปลี่ยนเป็นกรณีที่ 2 ซึ่งมี 4 แผงที่ได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $500 \text{ W/m}^2$  และอีก 16 แผงที่เหลือถูกบังแสงจนได้รับความเข้มแสงเท่ากับ  $400 \text{ W/m}^2$  โดยอุณหภูมิของเซลล์



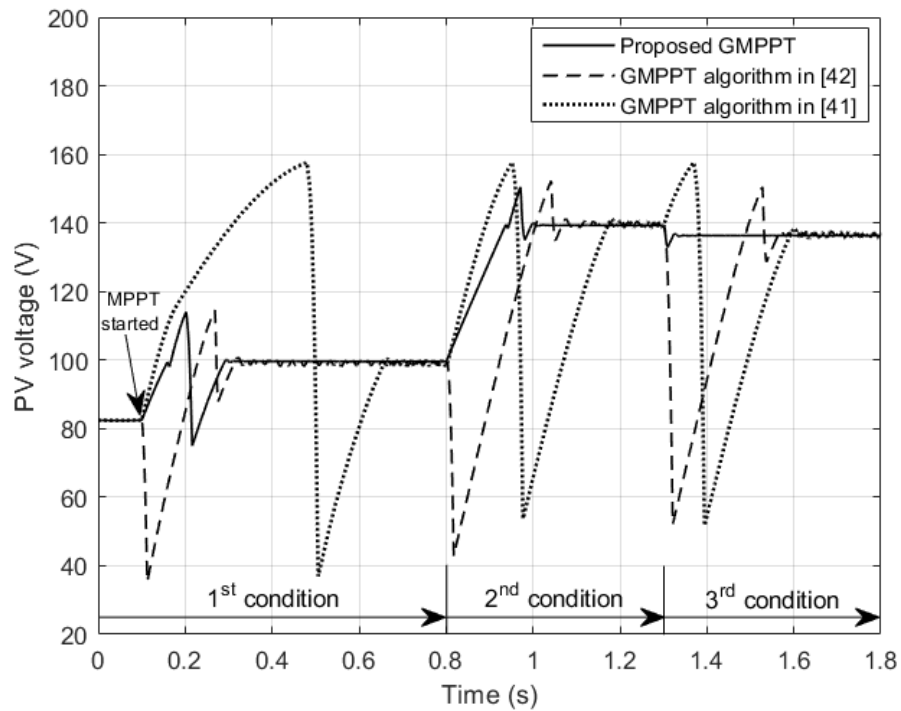
แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $25^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งสภาพอากาศเปลี่ยนเป็นกรณีที่ 3 กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอเท่ากับ  $400\text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $27^{\circ}\text{C}$  เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงและเส้นทางการย้ายจุดทำงานไปยังจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงในแต่ละสภาพอากาศแสดงดังภาพ 83 ทั้งนี้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดตัวควบคุมจะไม่มีข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าวแต่จะรับรู้เพียงค่ากระแสและแรงดันที่จุดทำงานปัจจุบันเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกำลังด้านออกของกลุ่มแผงจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดเป็นดังภาพ 84 และภาพ 85 ตามลำดับ



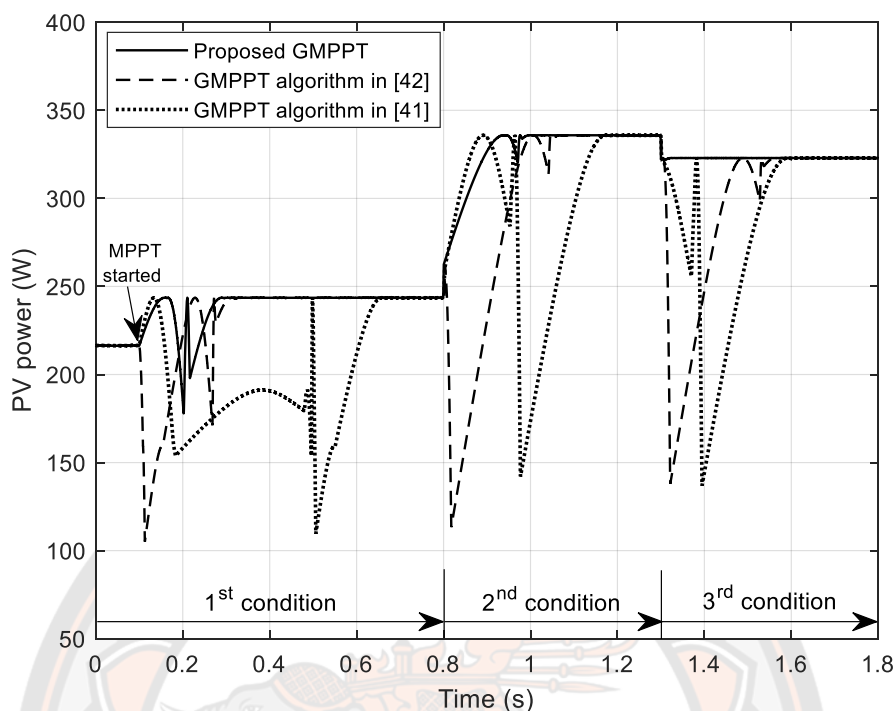
ภาพ 82 การกำหนดเงื่อนไขของสภาพอากาศในหัวข้อ 4.1.4



ภาพ 83 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4



ภาพ 84 แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4



ภาพ 85 กำลังต้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4

การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] เริ่มจากกลุ่มแผงอยู่ภายใต้สภาพอากาศในกรณีแรกของภาพ 82 โดยค่าตัวที่ใช้เคลิเริ่มต้นของวงจรทระดับแรงดันส่งผลให้จุดทำงานของกลุ่มแผงอยู่ในตำแหน่งที่ 1 ในภาพ 83 การติดตามจุดกำลังสูงสุดเริ่มต้นหลังจากเวลาผ่านไป 100 ms จุดทำงานของกลุ่มแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง (ตำแหน่งที่ 2) ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 16 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มี्यानการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 120.02 V และ 79.22 V หรือคิดเป็น 69.30% และ 45.74% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (173.2 V) โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.59 s และ 0.25 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าต้านออกในระหว่างดิตตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 133.90 W และ 138.10 W หรือคิดเป็น 54.99% และ 56.71% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (243.50 W) ตามลำดับ

ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรกและตรวจพบการบังแสงบางส่วน จึงมี्यानการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 37.85 V หรือคิดเป็น 21.85% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 0.20 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าต้านออกในระหว่างดิตตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 65.50 W หรือคิดเป็น 26.90% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (243.50 W) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีของ [41]

และวิธีของ [42] ดังตาราง 17 จะพบว่า มีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างลดลง 68.48% และ 52.22% โดยเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 66.10% และ 20.00% และเกิดช่วงแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกลดลง 51.08% และ 52.57% ตามลำดับ

หลังจากเวลาผ่านไป 0.8 s รูปแบบการบังแสงบางส่วนมีการเปลี่ยนแปลงเป็นกรณีที่ 2 จุดทำงานของกลุ่มแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง (ตำแหน่งที่ 3) ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 18 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 103.98 V และ 109.47 V หรือคิดเป็น 59.35% และ 62.48% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (175.2 V) โดยใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.41 s และ 0.30 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 199.60 W และ 222.40 W หรือคิดเป็น 57.65% และ 66.23% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (335.80 W) ตามลำดับ

ตาราง 16 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 1

วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลังขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	120.02	69.30	0.59	133.90	54.99
วิธีของ [42]	79.22	45.74	0.25	138.10	56.71
วิธีที่นำเสนอ	37.85	21.85	0.20	65.50	26.90

ตาราง 17 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 1

ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ลดลง 68.46%	ลดลง 52.22%
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 66.10%	ลดลง 20.00%
ช่วงแกว่งของค่ากำลัง	ลดลง 51.08%	ลดลง 52.57%

ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรกและตรวจพบการบังแสงบางส่วน จึงมีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 50.83 V หรือคิดเป็น 29.01% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 0.21 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 14.80 W หรือคิดเป็น 4.41% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (335.80 W) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดัง

ตาราง 19 จะพบว่า มีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างลดลง 51.12% และ 53.57% โดยเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 48.78% และ 30.00% และเกิดช่วงแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกลดลง 92.36% และ 93.35% ตามลำดับ

หลังจากเวลาผ่านไป 1.3 s รูปแบบการบังแสงบางส่วนมีการเปลี่ยนแปลงเป็นกรณีที่ 3 จุดทำงานของกลุ่มแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุด (ตำแหน่งที่ 4) ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ วิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 20 พบว่า วิธีของ [41] และวิธีของ [42] มีย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างเท่ากับ 105.88 V และ 98.52 V หรือคิดเป็น 61.13% และ 56.88% ของแรงดันวงจรเปิดภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้ (173.2 V) โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.33 s และ 0.30 s รวมทั้งเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าด้านออกในระหว่างติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 186.00 W และ 184.90 W หรือคิดเป็น 57.60% และ 56.26% ของค่ากำลังสูงสุดที่พบ (322.90 W) ตามลำดับ

ในขณะเดียวกัน วิธีที่นำเสนอจะเริ่มติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรกและตรวจไม่พบการบังแสงบางส่วน จึงไม่ต้องเสียเวลาในการกราดตรวจที่ใช้ค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้างซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก โดยใช้เวลาดิตตามจุดกำลังสูงสุด 0.03 s และได้ค่ากำลังสูงสุดเท่ากับ 322.90 W เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีของ [41] และวิธีของ [42] ดังตาราง 21 จะพบว่า เวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลง 90.91% และ 90.00% ตามลำดับ

ตาราง 18 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 2

วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแกว่งของค่ากำลังขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแกว่ง (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	103.98	59.35	0.41	193.60	57.65
วิธีของ [42]	109.47	62.48	0.30	222.40	66.23
วิธีที่นำเสนอ	50.83	29.01	0.21	14.80	4.41

ตาราง 19 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 2

ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ลดลง 51.12%	ลดลง 53.57%
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 48.79%	ลดลง 30.00%
ช่วงแวกของค่ากำลัง	ลดลง 92.36%	ลดลง 93.35%

ตาราง 20 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 3

วิธีติดตาม จุดกำลังสูงสุด	ความกว้างของย่านการค้นหา จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง		เวลาที่ใช้ (s)	ช่วงแวกของค่ากำลัง ขณะกราดตรวจ	
	ความกว้าง (V)	เทียบกับ $V_{oc}$ (%)		ช่วงแวก (W)	เทียบกับ $P_{max}$ (%)
วิธีของ [41]	105.88	61.13	0.33	186.00	57.60
วิธีของ [42]	98.52	56.88	0.30	184.90	57.26
วิธีที่นำเสนอ	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00

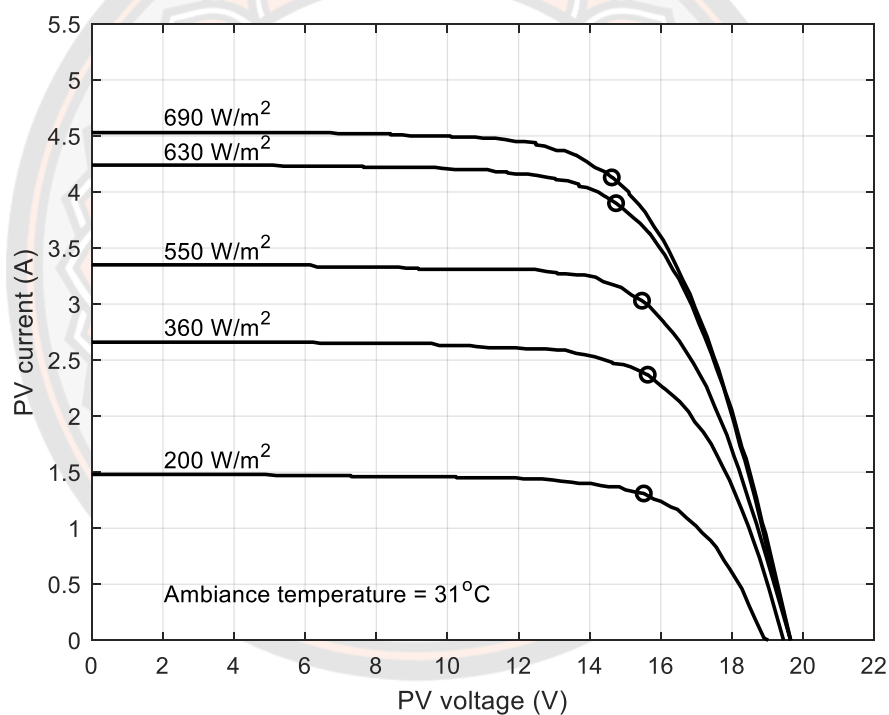
ตาราง 21 การเปรียบเทียบผลตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1.4 กรณีที่ 3

ประเด็นที่เปรียบเทียบ	ผลของวิธีที่นำเสนอ	
	เทียบกับวิธีของ [41]	เทียบกับวิธีของ [42]
ความกว้างของย่านการค้นหา	ไม่มีการกำหนดย่าน	ไม่มีการกำหนดย่าน
เวลาที่ใช้ในการติดตาม	ลดลง 90.91%	ลดลง 90.00%
ช่วงแวกของค่ากำลัง	ไม่เกิดการแวก	ไม่เกิดการแวก

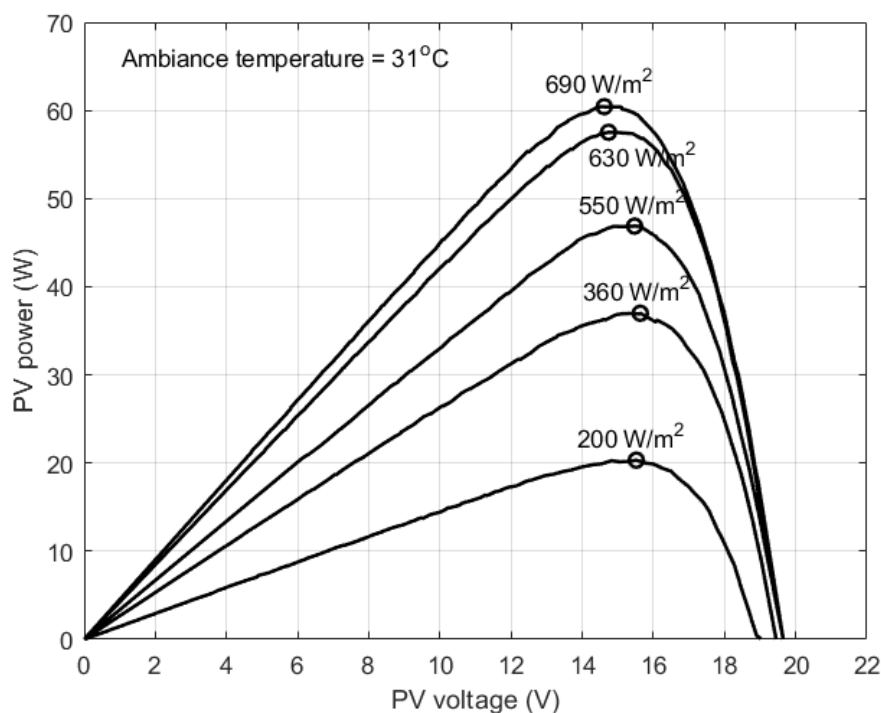


## 4.2 ผลการทดสอบวิธีความนำส่วนเพิ่มด้วยชุดอุปกรณ์จริง

ผลกระทบของค่าความเข้มแสงที่มีต่อค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงเป็นเส้นโค้งคุณลักษณะได้ดังภาพ 86 จะเห็นว่า เมื่อความเข้มแสงที่กระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น กระแสวงจรลัดของแผงจะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในลักษณะเป็นเชิงเส้น ในขณะที่แรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังด้านออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นและจุดกำลังสูงสุดของแผงมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งดังภาพ 87 นั่นคือ เมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้น จุดกำลังสูงสุดจะย้ายไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่แรงดันด้านออกของกลุ่มแผงมีค่าต่ำกว่าเดิม



ภาพ 86 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงที่ใช้

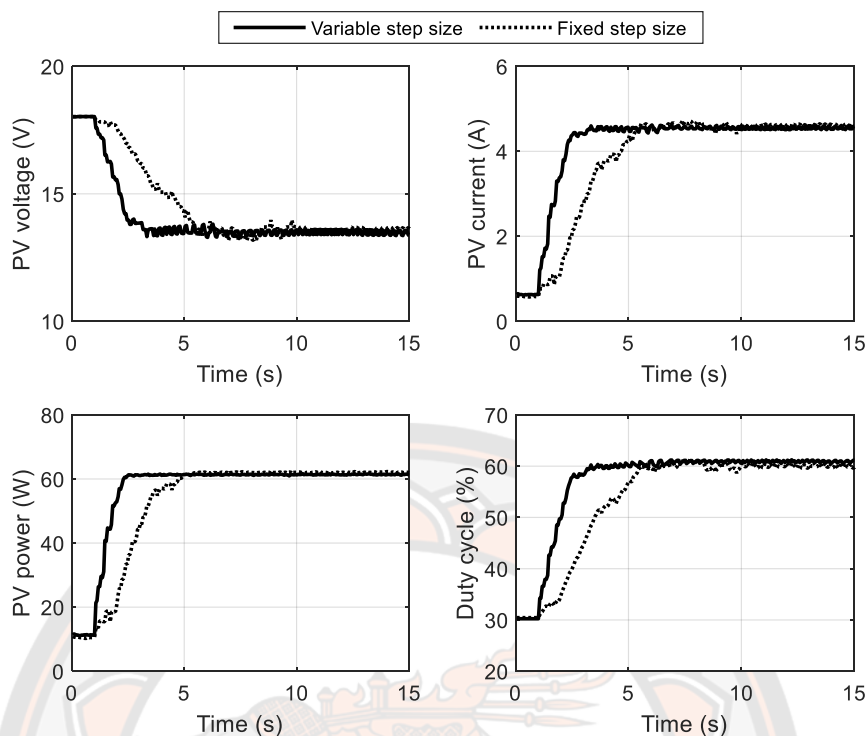


ภาพ 87 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงที่ใช้

#### 4.2.1 กรณีที่จุดทำงานเริ่มต้นอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด

การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงเท่ากับ  $820 W/m^2$  และอุณหภูมิรอบข้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $39^{\circ}C$  ค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันถูกกำหนดเพื่อให้จุดทำงานของแผงอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด นั่นคือ แรงดันด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ  $18 V$  ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้าวและแบบแปรผันช่วงก้าวเป็นดังภาพ 88 โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน กระแสและกำลังด้านออกของแผง รวมทั้งการปรับค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดัน ทั้งนี้การติดตามจุดกำลังสูงสุดเริ่มขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป  $1 s$  จุดทำงานของแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดโดยการเพิ่มค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าลดลง

หลังจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดสิ้นสุดลง พบว่า วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ  $4.56 s$  โดยค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น  $60.04\%$  ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือ  $13.34 V$  และกระแสด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น  $4.65 A$  จึงได้กำลังด้านออกของแผงเท่ากับ  $62.03 W$  ในขณะที่วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด  $2.17 s$  โดยค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น  $59.52\%$  ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือ  $13.32 V$  และกระแสด้านออกของแผงเพิ่มขึ้น

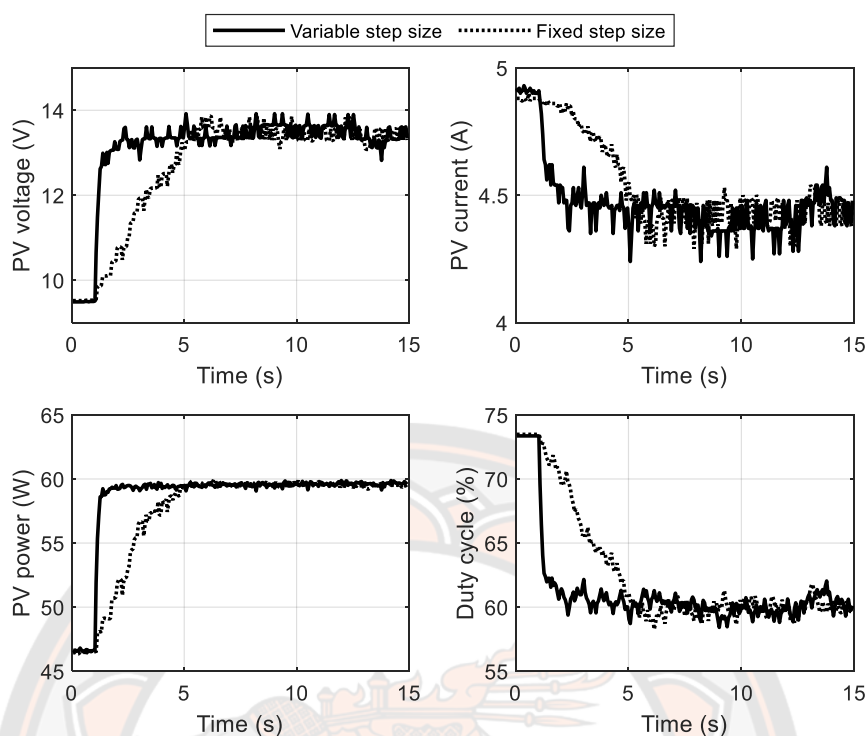


ภาพ 88 ผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.1

เป็น 4.50 A จึงได้กำลังด้านออกของแผงเท่ากับ 59.52 W เมื่อเปรียบเทียบกับแบบตรึงช่วงก้ำวจะได้ว่า แบบแปรผันช่วงก้ำวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลงเท่ากับ 2.48 s หรือ 52.41%

#### 4.2.2 กรณีที่จุดทำงานเริ่มต้นอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด

การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสง  $820 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิรอบข้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $39^\circ\text{C}$  ค่าดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันถูกกำหนดเพื่อให้จุดทำงานของแผงอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด นั่นคือ แรงดันด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 9.5 V ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้ำวและแบบแปรผันช่วงก้ำวเป็นดังภาพ 89 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน กระแสและกำลังด้านออกของแผง รวมทั้งการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดัน โดยการติดตามจุดกำลังสูงสุดเริ่มขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป 1 s จุดทำงานของแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดโดยการลดค่าดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดสิ้นสุดลง พบว่า วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้ำวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 4.31 s โดยค่าดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันลดลงเหลือ 59.85% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 13.54 V และกระแสด้านออกของแผงลดลงเหลือ 4.45 A จึงได้กำลังด้านออกของแผงเท่ากับ 60.19 W ในขณะที่



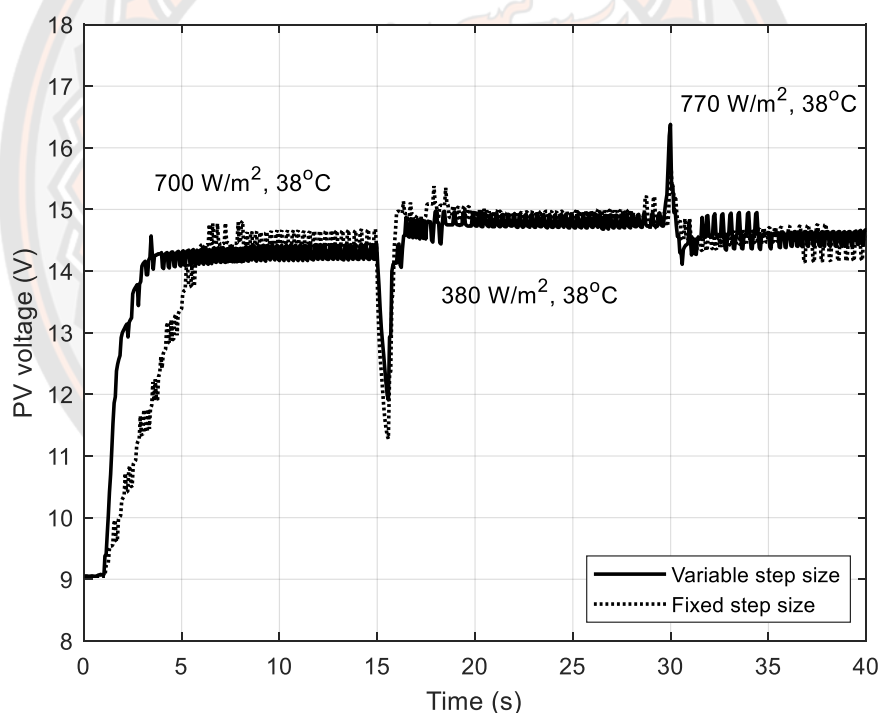
ภาพ 89 ผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.2

วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดเท่ากับ 0.91 s โดยค่าตัวดีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันลดลงเหลือ 60.62% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 13.26 V และกระแสด้านออกของแผงลดลงเหลือ 4.47 A จึงได้กำลังด้านออกของแผงเท่ากับ 59.27 W เมื่อเปรียบเทียบกับแบบตรึงช่วงก้าวจะได้ว่า แบบแปรผันช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลงเท่ากับ 3.4 s หรือ 78.89%

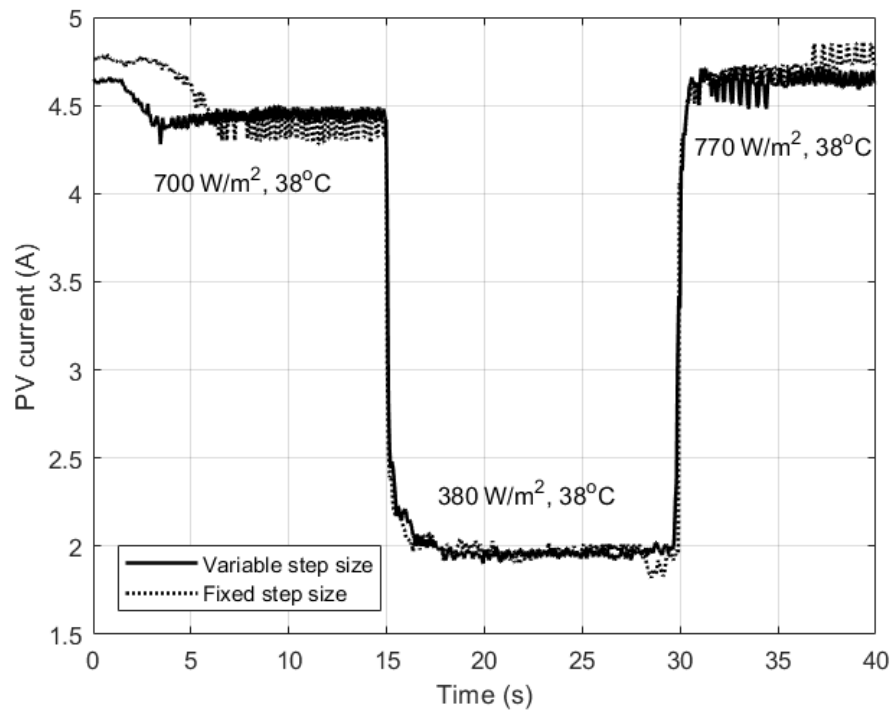
#### 4.2.3 กรณีที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างอย่างรวดเร็ว

การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดกรณีที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากความเข้มแสง  $700 \text{ W/m}^2$  ลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง  $380 \text{ W/m}^2$  หลังจากนั้นความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น  $770 \text{ W/m}^2$  โดยที่อุณหภูมิรอบข้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ  $38^\circ\text{C}$  ค่าตัวดีไซเคิลเริ่มต้นของวงจรทระดับแรงดันในการทดสอบนี้ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 9 V และผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้าวและแบบแปรผันช่วงก้าวเป็นดังภาพ 90 ถึงภาพ 92 โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันค่ากระแสและกำลังด้านออกของแผง ตามลำดับและการเปลี่ยนแปลงค่าตัวดีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเป็นดังภาพ 93 การติดตามจุดกำลังสูงสุดเริ่มขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป 1 s จุดทำงานของแผงจึงถูกย้ายไปยัง

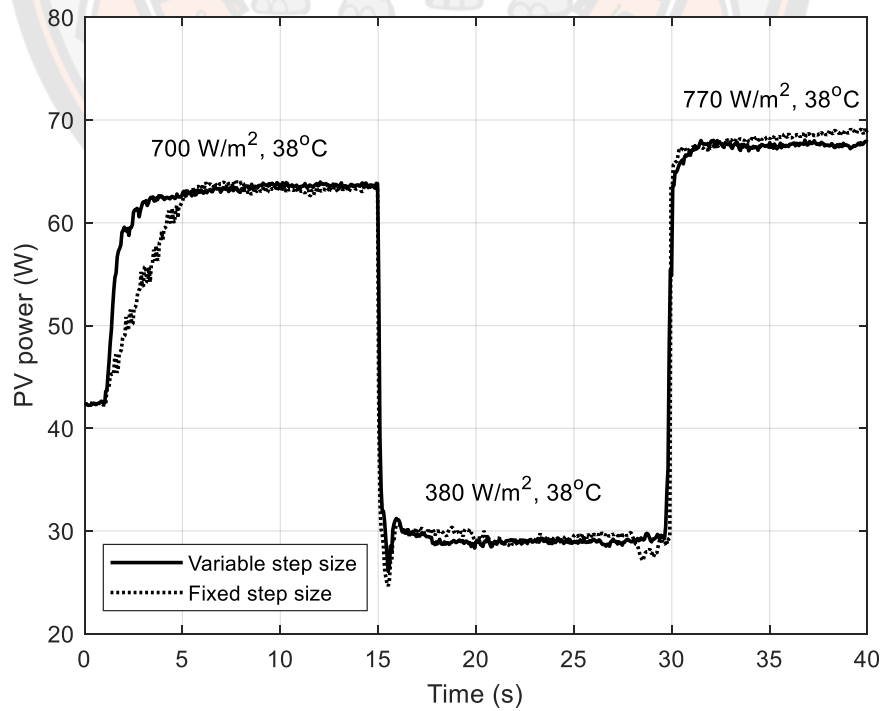
จุดกำลังสูงสุดโดยการลดค่าตัวที่ใช้เคลือบของวงจรทระดับแรงดันเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดสิ้นสุดลงพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด 4.94 s โดยมีค่าตัวที่ใช้เคลือบของวงจรทระดับแรงดันลดลงเหลือ 64.74% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 14.39 V และกระแสต้านออกของแผงลดลงเหลือ 4.42 A จึงได้กำลังไฟฟ้าด้านออกของแผงเท่ากับ 63.60 W ในขณะที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด 2.14 s โดยมีค่าตัวที่ใช้เคลือบของวงจรทระดับแรงดันลดลงเหลือ 64.96% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 14.16 V และกระแสต้านออกของแผงลดลงเหลือ 4.39 A จึงได้กำลังไฟฟ้าด้านออกของแผงเท่ากับ 62.16 W เมื่อเปรียบเทียบกับแบบตรึงช่วงก้าวจะได้ว่าแบบแปรผันช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลงเท่ากับ 2.8 s หรือ 56.68%



ภาพ 90 แรงดันด้านออกของแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3

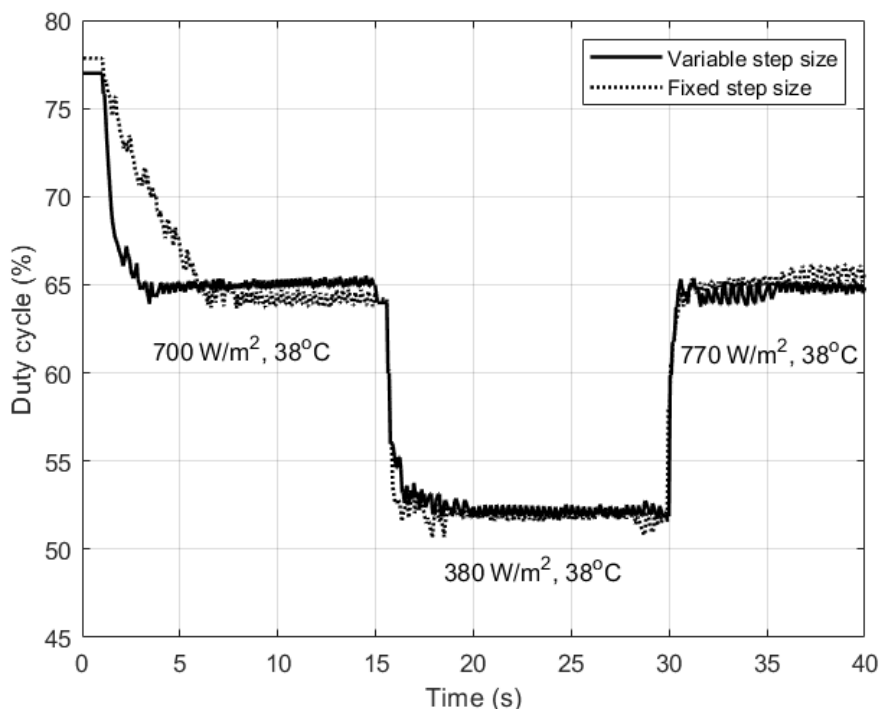


ภาพ 91 กระแสด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3



ภาพ 92 กำลังด้านออกของกลุ่มแผงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3





ภาพ 93 ค่าตัวชี้เเคิลของวงจรถะดับแรงดันตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.2.3

หลังจากเวลาผ่านไป 15 s จึงนำวัสดุบังแสงทำให้ความเข้มแสงที่กระทบแผงลดลง จุดทำงานของแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดโดยการลดค่าตัวชี้เเคิลของวงจรถะดับแรงดันเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดสิ้นสุดลงพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้าวกวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด 1.53 s โดยมีค่าตัวชี้เเคิลของวงจรถะดับแรงดันลดลงเหลือ 52.68% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 14.93 V และกระแสด้านออกของแผงลดลงเหลือ 2.02 A จึงได้กำลังไฟฟ้าด้านออกของแผงเท่ากับ 30.11 W ในขณะที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวกวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด 1.47 s โดยมีค่าตัวชี้เเคิลของวงจรถะดับแรงดันลดลงเหลือ 52.64% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 14.87 V และกระแสด้านออกของแผงลดลงเหลือ 2.00 A จึงได้กำลังไฟฟ้าด้านออกของแผงเท่ากับ 29.77 W เมื่อเปรียบเทียบกับแบบตรึงช่วงก้าวกวจะได้ว่าแบบแปรผันช่วงก้าวกวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลงเท่ากับ 0.06 s หรือ 3.9%

เมื่อเวลาผ่านไป 29.8 s จึงนำวัสดุบังแสงออกทำให้ความเข้มแสงที่กระทบแผงเพิ่มขึ้น จุดทำงานของแผงจึงถูกย้ายไปยังจุดกำลังสูงสุดโดยการเพิ่มค่าตัวชี้เเคิลของวงจรถะดับแรงดันเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าลดลง หลังจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดสิ้นสุดลงพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงช่วงก้าวกวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด 1.21 s โดยมี

ค่าดิวิตตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 64.93% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือ 14.55 V และกระแสด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 4.63 A จึงได้กำลังไฟฟ้าด้านออกของแผงเท่ากับ 67.43 W ในขณะที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุด 1.17 s โดยมีค่าดิวิตตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 64.65% ส่งผลให้แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือ 14.53 V และกระแสด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 4.68 A จึงได้กำลังไฟฟ้าด้านออกของแผงเท่ากับ 68.01 W เมื่อเปรียบเทียบกับแบบตรึงช่วงก้าวจะพบว่าแบบแปรผันช่วงก้าวใช้เวลาติดตามจุดกำลังสูงสุดลดลงเท่ากับ 0.04 s หรือ 3.31%

จากผลการทดสอบจะเห็นว่ากรณีที่มีความเข้มแสงลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันด้านออกของแผงจะลดลงชั่วคราวและไม่สัมพันธ์กับค่าดิวิตตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเนื่องจากกระแสด้านออกของแผงลดลงอย่างรวดเร็วเพราะแปรผันตามค่าความเข้มแสงที่ได้รับ จากภาพ 90 หลังจากการติดตามจุดกำลังสูงสุดสิ้นสุดลงกระแสด้านออกของแผงมีค่าประมาณ 4.4 A และแรงดันด้านออกของแผงมีค่าประมาณ 14 V โดยมีการแกว่งของแรงดันประมาณ 0.1 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ 4700  $\mu\text{F}$  ด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงแรงดันของตัวเก็บประจุนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสที่ไหลเข้าและออกจากตัวเก็บประจุ ดังนั้น ในขณะที่กระแสที่ไหลเข้าและออกจากตัวเก็บประจุในแต่ละคาบของการสวิตชิงมีค่าน้อยมากจึงทำให้กระแสด้านออกของแผงเกือบทั้งหมดไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L \approx 4.4 \text{ A}$ ) และทันทีที่ความเข้มแสงลดลงอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้กระแสด้านออกของแผงลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 2.0 A ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้ทำให้ตัวเก็บประจุต้องทำหน้าที่จ่ายกระแสที่เหลือ ( $\approx 2.4 \text{ A}$ ) ให้กับตัวเหนี่ยวนำและแรงดันของตัวเก็บประจุลดลงซึ่งก็คือแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง ซึ่งจะเป็นเช่นนี้จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำลดลงจนอยู่ในย่านกระแสที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสร้างได้

ในทางกลับกันกรณีที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันด้านออกของแผงจะเพิ่มขึ้นชั่วคราวและไม่สัมพันธ์กับค่าดิวิตตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันเนื่องจากกระแสด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะแปรผันตามค่าความเข้มแสงที่ได้รับ จากภาพ 90 หลังการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงเท่ากับ 380  $\text{W}/\text{m}^2$  และอุณหภูมิรอบข้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 38°C สิ้นสุดลงกระแสด้านออกของแผงมีค่าประมาณ 2.0 A และแรงดันด้านออกของแผงมีค่าประมาณ 14.9 V โดยมีการแกว่งของแรงดันประมาณ 0.1 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ 4700  $\mu\text{F}$  ด้วยเช่นกัน ดังนั้น ขณะนี้กระแสที่ไหลเข้าและออกจากตัวเก็บประจุในแต่ละคาบของการสวิตชิงจึงมีค่าน้อยมากทำให้กระแสด้านออกของแผงเกือบทั้งหมดไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L \approx 2.0 \text{ A}$ ) และทันทีที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้กระแสด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 4.65 A ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้ทำให้

ตัวเก็บประจุต้องทำหน้าที่รับกระแสที่เหลือ ( $\approx 2.65$  A) จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงทำให้แรงดันของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเองและจะเป็นเช่นนี้จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจนอยู่ในย่านกระแสที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสร้างได้

นอกจากนี้ การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้ำวและแบบตรึงช่วงก้ำวมีความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเพราะแรงดันด้านออกของแผงมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยไม่สอดคล้องกับการปรับค่าตัวตีไซเคิลของวงจรระดับแรงดันและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดห่างกันประมาณ 1 V ในแต่ละสภาพอากาศที่ทดสอบส่งผลให้การย้ายจุดทำงานไปยังจุดกำลังสูงสุดเกิดจากการขยับจุดทำงานเพียง 2-3 ครั้งสำหรับแบบแปรผันช่วงก้ำวและแบบตรึงช่วงก้ำวขยับจุดทำงานประมาณ 8-10 ครั้งจึงทำให้ความเร็วในการขยับจุดทำงานเข้าหาจุดกำลังสูงสุดด้วยการแปรผันช่วงก้ำวกับแบบตรึงช่วงก้ำวไม่ต่างกันในการทดสอบนี้



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีควบคุมการทำงานของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้จ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดในแต่ละสภาพอากาศโดยสามารถตรวจพบการบังแสงบางส่วนเมื่อความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงมีค่าไม่สม่ำเสมอซึ่งทำให้เกิดจุดยอดมากกว่าหนึ่งจุดบนเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันด้านออกของกลุ่มแผง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศและการบังแสงบางส่วนรูปแบบต่าง ๆ และพัฒนาเงื่อนไขในการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงโดยวิเคราะห์จากข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต 450 รายในฐานข้อมูลของโปรแกรมแมตแล็บ/ซิมูลิงก์

การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนกลุ่มแผงอาศัยการแปรผันแบบเชิงเส้นของค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดกับค่ากระแสจรรยาจัดของกลุ่มแผงและค่าความนำที่จุดกำลังสูงสุดกับค่าความนำอ้างอิงซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของกระแสจรรยาจัดต่อแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศในขณะนั้น โดยสามารถรู้ผลการตรวจสอบได้ทันทีหลังจากติดตามจนพบจุดกำลังสูงสุดจุดแรกด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังและกระแสด้านออกของกลุ่มแผง

เมื่อตรวจพบการบังแสงบางส่วน ตัวควบคุมจะกราดตรวจเพื่อค้นหาตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดวงกว้างโดยขยับจุดทำงานภายในย่านแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงซึ่งถูกจำกัดพื้นที่โดยอาศัยค่ากำลังสูงสุดที่พบกับค่ากระแสจรรยาจัดและแรงดันวงจรเปิดของกลุ่มแผงภายใต้สภาพอากาศในขณะนั้น ทั้งนี้ ในระหว่างกราดตรวจ อาจปรับย่านการค้นหาดังกล่าวก้าวให้แคบลงอีกได้ถ้าพบค่ากำลังที่มากกว่าค่ากำลังสูงสุดเดิม นอกจากนี้ ทิศทางเริ่มต้นของการกราดตรวจยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดจุดแรกที่พบเทียบกับจุดทำงานเริ่มต้นของกลุ่มแผงเพื่อเลี่ยงการกราดตรวจซ้ำซ้อนในย่านการค้นหา หลังสิ้นสุดการกราดตรวจ ตัวควบคุมจึงย้ายจุดทำงานไปที่จุดกำลังสูงสุดวงกว้างที่พบ

การทดสอบวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนออาศัยการจำลองผลในโปรแกรมแมตแล็บภายใต้เงื่อนไขสภาพอากาศต่าง ๆ ทั้งในกรณีที่ความเข้มแสงสม่ำเสมอและกรณีการบังแสงบางส่วน โดยเปรียบเทียบผลกับวิธีที่คล้ายกันในแง่ของการจำกัดย่านการค้นหาจุดกำลังสูงสุดวงกว้าง ผลการจำลองภายใต้สภาพอากาศคงที่และสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นว่า วิธีที่นำเสนอสามารถตรวจพบการบังแสงบางส่วนได้อย่างแม่นยำ และกราดตรวจเพื่อ

ค้นหาตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดวงกว้างโดยมีย่านการค้นหาแคบกว่าและการแกว่งของค่ากำลังด้านออกของกลุ่มแผงน้อยกว่า ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการติดตามสั้นกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่กลุ่มแผงได้รับความเข้มแสงสม่ำเสมอเนื่องจากวิธีที่นำเสนอสามารถตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงที่กระทบกลุ่มแผงได้ จึงไม่ต้องกราดตรวจให้เสียเวลา

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังได้ดำเนินการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันช่วงก้าวและแบบตรึงช่วงก้าวโดยควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลของวงจรทระดับแรงดันที่สร้างขึ้น ผลการทดสอบภายใต้สภาพอากาศจริงแสดงให้เห็นว่า วิธีการแปรผันช่วงก้าวที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังและกระแสด้านออกของแผงเพื่อกำหนดเป็นช่วงก้าวที่ต้องการสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานจริงได้ซึ่งช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดเมื่อเทียบกับแบบตรึงช่วงก้าว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การนำวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปปฏิบัติกับอุปกรณ์จริงจะช่วยพิสูจน์การใช้งานได้จริงของหลักการที่นำเสนอ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตัวรับรู้กระแสและตัวรับรู้แรงดันเพื่อนำค่ากระแสและแรงดันมาคำนวณตามเงื่อนไขที่กำหนด นอกจากนี้ ถึงแม้วิธีปรับค่าดิฟเฟอเรนเชียลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงจะใช้งานได้ดีในการจำลองผล แต่ในทางปฏิบัติกำลังสูญเสียในวงจรทระดับแรงดันอาจส่งผลให้วิธีปรับค่าดิฟเฟอเรนเชียลดังกล่าวไม่สามารถย้ายจุดทำงานของกลุ่มแผงให้ไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ จึงอาจจำเป็นต้องปรับค่าดิฟเฟอเรนเชียลด้วยวิธีอื่น เช่น การควบคุมแบบพีไอดี (PID control) หรือการควบคุมแบบหลายวงรอบ (Multiloop control) ที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันด้านออกของกลุ่มแผงในแต่ละช่วงก้าวสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้



## บรรณานุกรม

1. H. J. Hovel, *Semiconductors and semimetals: solar cells*. Vol. 11. 1975, New York: Academic Press, Inc.
2. S. S. Hegedus and A. Luque, "Status, trends, challenges and the bright future of solar electricity from photovoltaics" in *Handbook of photovoltaic science and engineering*, A. Luque, S. Hegedus, and Eds. Chichester, Editors. 2003, John Wiley & Sons Ltd.: UK. p. 1-43.
3. G. Hille, W. Roth, and H. Schmidt, *Course book for the seminar Photovoltaic Systems*. 1995, Freiburg, Germany: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
4. J. Nelson, *The physics of solar cells*. 2003, London: Imperial College Press.
5. W. Shockley, *Electrons and holes in semiconductors : with applications to transistor electronics*. 1950, New York: D. Van Nostrand Co., Inc.
6. M. A. Khallat and S. Rahman, "A probabilistic approach to photovoltaic generator performance prediction". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, September 1986. **vol. EC-1**(no. 3): p. 34-40.
7. A. Garrigos, et al., "Real time estimation of photovoltaic modules characteristics and its application to maximum power point operation". *Renewable Energy*, May 2007. **vol. 32**(no. 6): p. 1059-1076.
8. J. Appelbaum, "Starting and steady-state characteristics of DC motors powered by solar cell generators". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, March 1986. **vol. EC-1**(no. 1): p. 17-25.
9. N. Jantharamin, "Maximum-Power-Point Approximation for Photovoltaic Arrays". *Naresuan University Engineering Journal (NUEJ)*, January-June 2012. **vol.7**(no.1): p. 37-42.
10. G. Vachtsevanos and K. Kalaitzakis, "A Hybrid Photovoltaic Simulator for Utility Interactive Studies". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, June 1987. **vol. EC-2**(no. 2): p. 227-231.
11. J. L. Gray, "The physics of the solar cell", in *Handbook of photovoltaic science and engineering*, A. Luque and S. Hegedus, Editors. 2003, John Wiley & Sons



- Ltd.: Chichester, England. p. 61-112.
12. M. A. Green, *High efficiency silicon solar cells*. 1987, Switzerland: Trans Tech Publications.
  13. X. Li, et al., "Modified Beta Algorithm for GMPPT and Partial Shading Detection in Photovoltaic Systems". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018. **vol.** 33(no. 3): p. 2172-2186.
  14. C. Manickam, et al., "Fireworks Enriched P&O Algorithm for GMPPT and Detection of Partial Shading in PV Systems". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017. **vol.** 32(no. 6): p. 4432-4443.
  15. D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, January 2003. **vol.** 11(no. 1): p. 47-62.
  16. T. Esmam and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, June 2007. **vol.** 22(no. 2): p. 439-449.
  17. V. Salas, et al., "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, July 2006. **vol.** 90(no. 11): p. 1555-1578.
  18. D. J. Patterson, "Electrical system design for a solar powered vehicle", in *21st Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 1990, PESC '90 Record. p. 618-622.
  19. D.-Y. Lee, et al., "An improved MPPT converter using current compensation method for small scaled PV-applications", in *Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2003, APEC '03. p. 540-545.
  20. H. Trabelsi, et al. "MPPT controllers for PV array panel connected to Grid". in *2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*. 2017.
  21. S. Hadji, J. Gaubert, and F. Krim. "Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic systems using open circuit voltage and short circuit current". in *3rd International Conference on Systems and Control*. 2013.
  22. S. M. Alghuwainem, "Matching of a DC motor to a photovoltaic generator using

- a step-up converter with a current-locked loop*". IEEE Transactions on Energy Conversion, March 1994. **vol.** 9(no. 1): p. 192-198.
23. S. Yuvarajan and X. Shanguang, "*Photo-voltaic power converter with a simple maximum-power-point-tracker*", in *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems*. 2003, ISCAS '03. p. III-399-III-402.
  24. A. El-Shafy, et al., "*Maximum-power operation of a stand-alone PV system using fuzzy logic control*". International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2002. **vol.** 15: p. 385–398.
  25. M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, "*Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost-converter-supplied PV system using fuzzy controller*". IEEE Transactions on Industrial Electronics, August 2003. **vol.** 50(no. 4): p. 749-758.
  26. A. Al-Amoudi and L. Zhang, "*Optimal control of a grid-connected PV system for maximum power point tracking and unity power factor*", in *Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*. 1998. p. 80-85.
  27. L. Zhang, A. Al-Amoudi, and Y. Bai, "*Real-time maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems*", in *Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*. 2000. p. 124-129.
  28. N. Kasa, T. Iida, and L. Chen, "*Flyback inverter controlled by sensorless current MPPT for photovoltaic power system*". IEEE Transactions on Industrial Electronics, August 2005. **vol.** 52(no. 4): p. 1145-1152.
  29. K. H. Hussein, et al., "*Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions*". IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, January 1995. **vol.** 142(no. 1): p. 59-64.
  30. O. Wasynczuk, "*Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, September 1983. **vol.** PAS-102(no. 9): p. 3031-3037.
  31. S. Jain and V. Agarwal, "*A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems*". IEEE Power Electronics Letters, March 2004. **vol.** 2(no. 1): p. 16-19.

32. A. Belkaid, J. Gaubert, and A. Gherbi, "Design and implementation of a high-performance technique for tracking PV peak power". IET Renewable Power Generation, April 2017. **vol.** 11(iss. 1): p. 92-99.
33. M. J. Hossain, B. Tiwari, and I. Bhattacharya. "An adaptive step size incremental conductance method for faster maximum power point tracking". in 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 2016.
34. A. Thangavelu, S. Vairakannu, and D. Parvathyshankar, "Linear open circuit voltage-variable step-size-incremental conductance strategy-based hybrid MPPT controller for remote power applications". IET Power Electronics, September 2017. **vol.**10(iss.11): p. 1363-1376.
35. M. H. Uddin, M. A. Baig, and M. Ali. "Comparision of 'perturb & observe' and 'incremental conductance', maximum power point tracking algorithms on real environmental conditions". in 2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube). 2016.
36. P. Lousuwankun and N. Jantharamin. "Photovoltaic Module Maximum-Power-Point Tracking with Step-Size Variation". in 2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST). 2018.
37. A. A. Elserougi, et al., "A Switched PV Approach for Extracted Maximum Power Enhancement of PV Arrays During Partial Shading". IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015. **vol.** 6(no. 3): p. 767-772.
38. M. A. Ghasemi, A. Ramyar, and H. Iman-Eini, "MPPT Method for PV Systems Under Partially Shaded Conditions by Approximating I-V Curve". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018. **vol.** 65(no. 5): p. 3966-3975.
39. H. Patel and V. Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008. **vol.** 55(no. 4): p. 1689-1698.
40. Y. Ji, et al., "A Real Maximum Power Point Tracking Method for Mismatching Compensation in PV Array Under Partially Shaded Conditions". IEEE Transactions on Power Electronics, 2011. **vol.** 26(no. 4): p. 1001-1009.
41. A. M. S. Furtado, et al., "A Reduced Voltage Range Global Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems Under Partial Shading

- Conditions*". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018. **vol.** 65(no. 4): p. 3252-3262.
42. V. V. Ramana, et al., "*Global Peak Tracking of Photovoltaic Array Under Mismatching Conditions Using Current Control*". IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019. **vol.** 34(no. 1): p. 313-320.
43. J. Ahmed and Z. Salam, "*An Accurate Method for MPPT to Detect the Partial Shading Occurrence in a PV System*". IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017. **vol.** 13(no. 5): p. 2151-2161.
44. วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" (พิมพ์ครั้งที่ 10 ). 2553, กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง.
45. B. N. Alajmi, et al., "*A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids*". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013. **vol.** 60(no. 4): p. 1596-1606.

