



การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแปรผันขนาดก้าว



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแปรผันขนาดก้าว



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแปรผันขนาดก้ว"

ของ พีระเดช เล้าสุวรรณกุล

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

**คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์**

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนัส นัถฤทธิ์)

**อนุมัติ**

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแปรผันขนาด ก๊าว
ผู้วิจัย	พีระเดช เล้าสุวรรณกุล
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2561
คำสำคัญ	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การติดตามจุดกำลังสูงสุด วงจรทบทระดับแรงดัน การแปรผันขนาดก๊าว ความนำส่วนเพิ่ม

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบที่มีแบตเตอรี่เป็นโหลดโดยใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก๊าวซึ่งอาศัยการควบคุมค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรทบทระดับแรงดัน การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งส่งผลต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของแผงและทำให้จุดกำลังสูงสุดของแผงย้ายตำแหน่งถูกวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การสวิตชิงของวงจรทบทระดับแรงดันสามารถทำให้จุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดในแต่ละสภาพอากาศ คุณลักษณะการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีเฉลี่ยปริภูมิสเตตและการจำลองผลตอบสนองในวงจรโดยใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาร่วมกันในการกำหนดค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจร หลักการแปรผันขนาดก๊าวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ อาศัยการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันด้านออกของแผงที่ต้องการในแต่ละก๊าวแล้วคำนวณขนาดก๊าวที่สอดคล้องเพื่อกำหนดดิวิตีไซเคิลค่าใหม่ จากการจำลองผล พบว่า การใช้วิธีแปรผันขนาดก๊าวที่นำเสนอสามารถย้ายจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดได้สำเร็จในแต่ละสภาพอากาศโดยมีความเร็วในการติดตามสูงกว่าแบบตรึงขนาดก๊าวอย่างชัดเจน

<b>Title</b>	PHOTOVOLTAIC MODULE MAXIMUM-POWER-POINT TRACKING WITH STEP-SIZE VARIATION
<b>Author</b>	PEERADECH LOUSUWANKUN
<b>Advisor</b>	Assistant Professor Dr. NIPHAT JANTHARAMIN
<b>Academic Paper</b>	Thesis M.Eng. in Electrical Engineering, Naresuan University, 2018
<b>Keywords</b>	Photovoltaic module Maximum-Power-Point Tracking Step-Up converter Step-size variation Incremental conductance

### ABSTRACT

This dissertation presents photovoltaic (PV) module maximum-power-point tracking (MPPT) with a battery acted as a system load. The MPPT was achieved by means of incremental conductance technique with step-size variation, in which the duty cycle of a step-up converter was controlled. Fluctuations in irradiance and solar-cell temperature, which affect output electrical characteristics of the module and therefore relocate the maximum power point (MPP), were analyzed by using mathematical models. Switching behavior of the step-up converter can cause the module operating point to be at the MPP under each weather condition. The converter characteristic was analyzed by means of the state-space averaging technique. The converter response simulation based on Euler's method was also used for determining the converter inductance and capacitance. The proposed step-size variation for MPPT was based on calculation of a desired change in the module voltage in each step. Then a step size related to the desired voltage change was calculated, which determined the next duty cycle value. Simulation results showed that the proposed technique provided successful MPPT regardless of the weather fluctuations with the tracking speed superior to that of fixed step-size algorithm.

## ประกาศคุณูปการ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในการศึกษาระดับปริญญาโทและวิธีดำเนินงานวิจัย ตลอดจนตรวจทานวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งการดำเนินงานวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.นเรศวร ที่มอบทุนสนับสนุนการศึกษาระดับปริญญาโท และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่มอบทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา ทำให้ผู้เขียนสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และเหนือสิ่งอื่นใด ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรัก ความเมตตา และสติปัญญา รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์จวบจนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจจนกระทั่งผู้เขียนประสบความสำเร็จอย่างทุกวันนี้

พีระเดช เล้าสุวรรณกุล



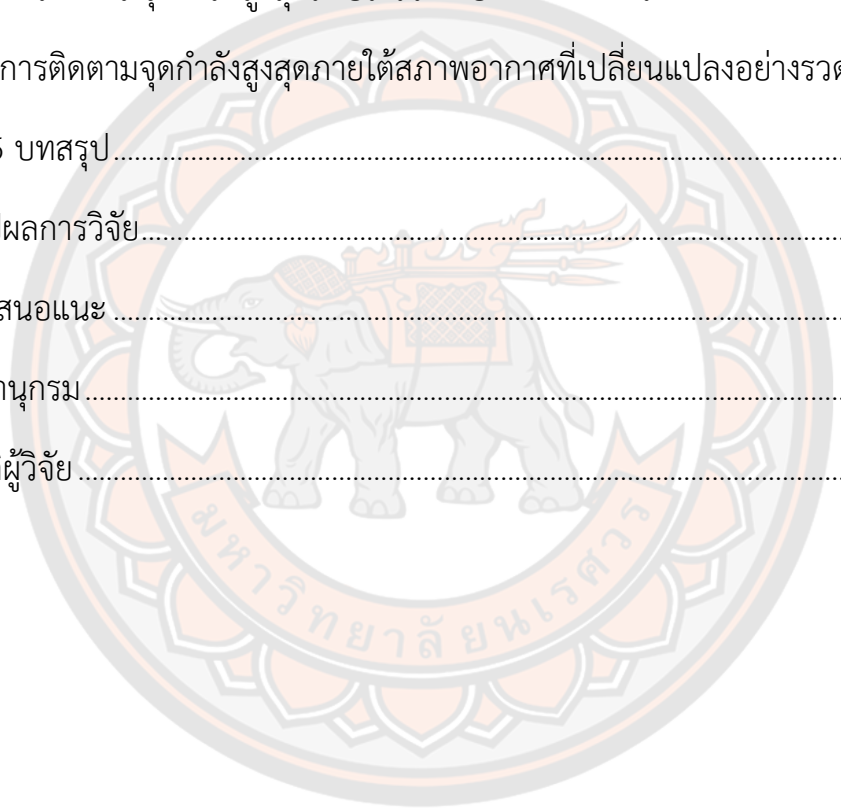
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
ประกาศคุณูปการ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
เซลล์แสงอาทิตย์.....	4
กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	13

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	14
กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่า .....	15
กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง.....	16
วงจรถบระดับแรงดัน.....	21
หลักการทํางานของวงจรถบระดับแรงดัน .....	22
ค่าความพลิวของแรงดันด้านออก .....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	27
วิธีดำเนินการวิจัย .....	27
การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	28
คุณลักษณะด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนด .....	28
คุณลักษณะด้านออกที่ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ .....	31
การวิเคราะห์ผลตอบสนองในวงจรถบระดับแรงดัน .....	34
การเฉลี่ยปริภูมิสเตตสำหรับตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงแบบสวิตชิง .....	34
การวิเคราะห์วงจรถบระดับแรงดันด้วยวิธีเฉลี่ยปริภูมิสเตต .....	37
การจำลองผลตอบสนองในวงจรถบระดับแรงดัน.....	41
การหาผลเฉลยโดยประมาณด้วยวิธีเชิงตัวเลข.....	41
การหาสมการเพื่อการจำลองผลตอบสนอง.....	43
การจำลองค่ากระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันด้านออก.....	46
การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม.....	51
การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว.....	51
หลักการแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอในงานวิจัย.....	54
ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้หลักการแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ.....	56

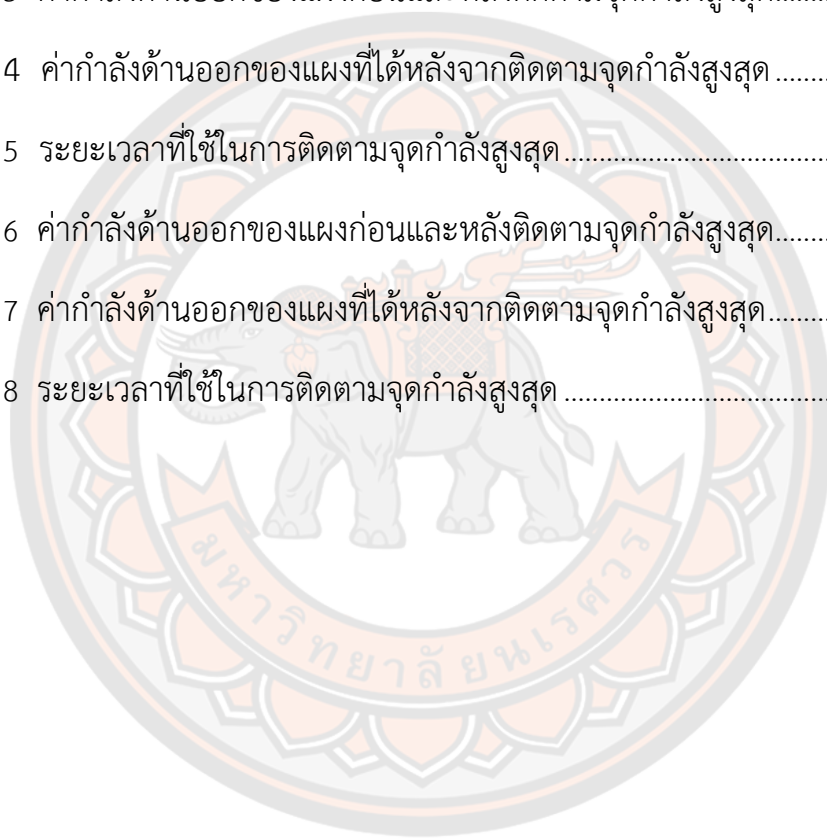


บทที่ 4 ผลการวิจัย .....	58
กรณีจุดทำงานเริ่มต้นของแมงอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด .....	59
การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด .....	61
การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว .....	63
กรณีเริ่มต้นจุดทำงานของแมงอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด .....	70
การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด .....	72
การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว .....	74
บทที่ 5 บทสรุป .....	81
สรุปผลการวิจัย .....	81
ข้อเสนอแนะ .....	82
บรรณานุกรม .....	83
ประวัติผู้วิจัย .....	85



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตารางสรุปอัลกอริทึมของวิธีป็นเนินและวิธีพีแอนด์ไอ [11].....	18
ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของแผนงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองผล.....	29
ตาราง 3 ค่ากำลังด้านออกของแผนงก่อนและหลังติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	68
ตาราง 4 ค่ากำลังด้านออกของแผนงที่ได้หลังจากติดตามจุดกำลังสูงสุด .....	68
ตาราง 5 ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	69
ตาราง 6 ค่ากำลังด้านออกของแผนงก่อนและหลังติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	79
ตาราง 7 ค่ากำลังด้านออกของแผนงที่ได้หลังจากติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	79
ตาราง 8 ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุด .....	80



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน [1] .....	5
ภาพ 2 หลักการทำงานโดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์ [1] .....	6
ภาพ 3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับโหลด [2] .....	7
ภาพ 4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ [2] .....	8
ภาพ 5 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4] .....	10
ภาพ 6 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4] .....	10
ภาพ 7 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [4] .....	12
ภาพ 8 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [4] .....	12
ภาพ 9 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [4] .....	13
ภาพ 10 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [4] .....	14
ภาพ 11 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป [11] .....	18
ภาพ 12 การลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของวิธีป็นเนินและวิธีพีแอนด์ไอ [11] .....	19
ภาพ 13 อัลกอริทึมของการหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม [12, 13] .....	20
ภาพ 14 แผนภาพวงจรทระดับแรงดัน [17] .....	21
ภาพ 15 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [17] .....	22
ภาพ 16 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [17] .....	22
ภาพ 17 สัญญาณไฟฟ้าในวงจรทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [17] .....	23
ภาพ 18 กราฟอัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดัน [17] .....	25
ภาพ 19 สัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [17] .....	26

ภาพ 20	กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุในวงจรทระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [17].....	26
ภาพ 21	แผนภาพวงจรเพื่อจำลองคุณลักษณะด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
ภาพ 22	คุณลักษณะของกระแส-แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้.....	30
ภาพ 23	คุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้.....	30
ภาพ 24	ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันด้านออก.....	31
ภาพ 25	ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออก.....	32
ภาพ 26	ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันด้านออก.....	33
ภาพ 27	ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออก.....	33
ภาพ 28	วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส.....	37
ภาพ 29	วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส.....	38
ภาพ 30	วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส.....	44
ภาพ 31	วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส.....	45
ภาพ 32	แผนภาพวงจรทระดับแรงดันที่ใช้ในการจำลองผลตอบสนอง.....	46
ภาพ 33	ผลการจำลองสัญญาณกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ $D = 0.3$ .....	47
ภาพ 34	ผลการจำลองสัญญาณแรงดันด้านออกที่ $D = 0.3$ .....	48
ภาพ 35	ผลการจำลองสัญญาณกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ $D = 0.7$ .....	49
ภาพ 36	ผลการจำลองสัญญาณแรงดันด้านออกที่ $D = 0.7$ .....	50
ภาพ 37	ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว.....	53
ภาพ 38	ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ.....	57
ภาพ 39	แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรทระดับแรงดัน.....	58
ภาพ 40	กระแสด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ $D = 0.55$ .....	59
ภาพ 41	แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ $D = 0.55$ .....	60

ภาพ 42	จุดทำงานและจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด.....	60
ภาพ 43	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว.....	61
ภาพ 44	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ.....	62
ภาพ 45	การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	63
ภาพ 46	การย้ายจุดทำงานภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว.....	64
ภาพ 47	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว.....	65
ภาพ 48	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ.....	66
ภาพ 49	การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	67
ภาพ 50	กระแสต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ $D = 0.3$ .....	70
ภาพ 51	แรงดันต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ $D = 0.3$ .....	71
ภาพ 52	จุดทำงานและจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด.....	71
ภาพ 53	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว.....	72
ภาพ 54	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าว.....	73
ภาพ 55	การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	74
ภาพ 56	การย้ายจุดทำงานภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว.....	75
ภาพ 57	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว.....	76
ภาพ 58	ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าว.....	77
ภาพ 59	การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

ในสถานการณ์ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ปริมาณพลังงานสำรองลดลงและวิกฤติด้านพลังงานมีแนวโน้มเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากพลังงานที่เราใช้ส่วนใหญ่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทนี้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเพราะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ เมื่อมีก๊าซชนิดนี้ในชั้นบรรยากาศสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าภาวะโลกร้อน (Global warming) การใช้พลังงานทางเลือก (Alternative energy) แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงได้รับความสนใจมากขึ้น ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น

พื้นที่ในประเทศไทยได้รับปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีในปริมาณสูง การแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงสามารถทำได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ แม้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์อาจมีต้นทุนสูง แต่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยเนื่องจากไม่มีส่วนเคลื่อนไหว และราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มถูกลงเรื่อยๆ และอายุการใช้งานไม่ต่ำกว่า 20 ปี โดยอาจแบ่งระบบดังกล่าวได้เป็นสองประเภทคือแบบอิสระ (Stand-alone photovoltaic systems) และแบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected photovoltaic systems) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์แบบอิสระได้เข้ามามีความสำคัญมากขึ้นในการจ่ายไฟฟ้าในพื้นที่ที่ห่างไกลจากการไฟฟ้า

กำลังด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ นั่นคือ ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลทำให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจไม่อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด (Maximum power point: MPP) ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังด้านออกได้มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขของสภาพอากาศขณะนั้น การควบคุมให้จุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งเรียกระบบการนี้ว่า “การติดตามจุดกำลังสูงสุด” (Maximum power point tracking: MPPT) นิยมใช้ตัวแปลงผันกำลังชนิดต่าง ๆ โดยควบคุมค่าตัวชี้เซลล์ของตัวแปลงผันกำลัง มีหลายวิธีในการติดตามจุดกำลังสูงสุดสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มของวิธีที่ติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงและกลุ่มของวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง

วิธีความนำส่วนเพิ่มอยู่ในกลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง ที่สามารถควบคุมจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้หยุดหรือแกว่งอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุดได้และมีทิศทางการติดตามที่ถูก

เสมอภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังรักษาระดับความแม่นยำในการติดตามโดยไม่ได้รับผลกระทบจากความเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากการใช้งาน จึงทำให้วิธีความนำส่วนเพิ่มเหนือกว่าวิธีในกลุ่มติดตามโดยการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง แต่วิธีความนำส่วนเพิ่มอาจติดตามจุดกำลังสูงสุดได้ช้ากว่ากลุ่มวิธีติดตามโดยประมาณค่าด้วยแบบจำลอง อย่างไรก็ตามเราสามารถเพิ่มความเร็วในการติดตามให้กับวิธีความนำส่วนเพิ่มได้โดยการกำหนดขนาดก้าวให้ยาว แต่ถ้ากำหนดขนาดก้าวยาวเกินไปจะทำให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แกว่งรอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด เพื่อหลีกเลี่ยงการแกว่งรอบ ๆ จุดกำลังสูงสุดจึงมีการพัฒนาการกำหนดขนาดก้าวแบบแปรผันได้ โดยกำหนดให้มีขนาดก้าวยาวเมื่อจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ไกลจุดกำลังสูงสุด และมีขนาดก้าวสั้นเมื่อเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการแปรผันขนาดก้าวของการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวในการควบคุมค่าตัวชี้ไขเคลของวงจรทระดับแรงดัน เพื่อให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขของแต่ละสภาพอากาศ

### สมมุติฐานของการวิจัย

วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวสามารถย้ายจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดได้เร็วกว่าวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าว

### ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตามจุดกำลังสูงสุดในระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ที่มีแบตเตอรี่เป็นโหลดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าว โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองผลและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าว

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวสามารถควบคุมค่าตัวชี้เวิลของวงจรทบระดับแรงดันเพื่อให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขของแต่ละสภาพอากาศได้เร็วขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสภาพอากาศ และลดกำลังสูญเสียในสถานะอยู่ตัวเนื่องจากไม่มีการแกว่งของจุดทำงานรอบจุดกำลังสูงสุด





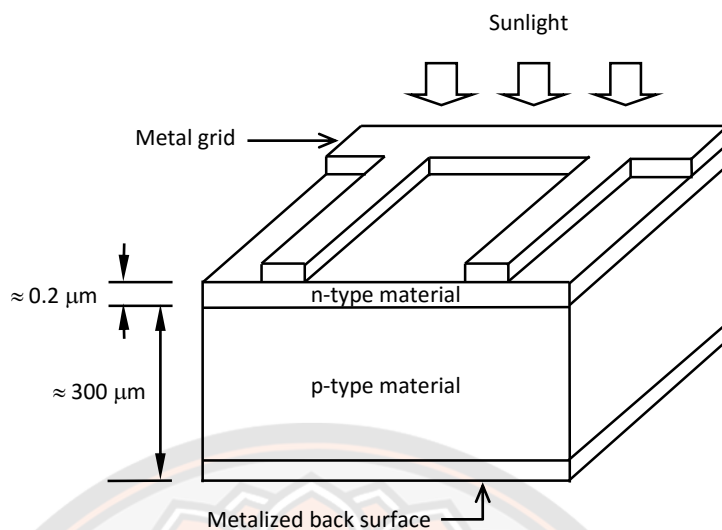
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผัน ขนาดก้าวในการตั้งค่ากำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในบทนี้เริ่มกล่าวถึงกระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ กราฟคุณลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดในแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบทบระดับแรงดันไฟฟ้า

#### เซลล์แสงอาทิตย์

การเปลี่ยนแปลงพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง สามารถเป็นจริงได้โดยปรากฏการณ์แรงดันไฟฟ้าพลังแสง (Photovoltaic effect) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) พลังงานการแผ่รังสีถูกส่งผ่านโดยตรงไปยังอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากการดูดกลืน เนื่องจากปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังแสง (Photovoltaic absorption) จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการดูดกลืนพลังงานที่มากกระตุ้นวัตถุดิบพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเกือบทั้งหมดที่ใช้กันในปัจจุบันคือซิลิกอน โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนถูกแสดงอย่างคร่าว ๆ ได้ดังภาพ 1 เวเฟอร์ซิลิกอนหนาประมาณ 300  $\mu\text{m}$  ประกอบด้วย 2 ชั้นที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งส่วนมากถูกเจือด้วยโบรอนและฟอสฟอรัส ผิวด้านหลังของเซลล์ทำจากโลหะทั้งหมดเพื่อรวบรวมประจุ ในขณะที่ด้านหน้าของเซลล์ใช้เพียงกริดโลหะ 1 ชั้น เพื่อให้แสงผ่านเข้าสู่เซลล์ได้มากที่สุด โดยปกติผิวของเซลล์จะถูกเคลือบด้วยสารกันการสะท้อน (Antireflection coating) เพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดจากการสะท้อนให้เหลือน้อยที่สุด



ภาพ 1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน [1]

กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์

ก) การดูดกลืนแสง (Optical absorption)

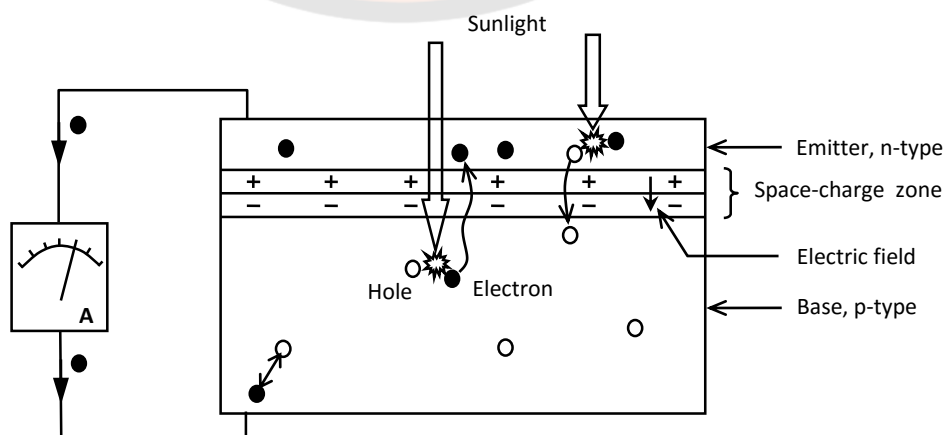
ในขณะที่แสงตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ แสงบางส่วนถูกสะท้อน บางส่วนถูกดูดกลืนส่วนที่เหลือสามารถผ่านเซลล์ไปได้ เนื่องจากซิลิกอนมีดัชนีการหักเห (Refractive Index) สูง (มากกว่า 3.5) ทำให้กว่า 30% ของแสงที่ตกกระทบถูกสะท้อน ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมักถูกเคลือบด้วยสารต้านการสะท้อน ซึ่งโดยปกตินิยมเคลือบเป็นชั้นบาง ๆ ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้ลดความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนเหลือประมาณ 10% โดยปกติโฟตอน (Photon) หรือควอนต้า (Quanta) ของแสงทำปฏิกิริยากับสารด้วยการกระตุ้นอิเล็กตรอน กระบวนการที่สำคัญทางด้านพลังงานที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า “การดูดกลืนทางไฟฟ้าพลังแสง (Photoelectric absorption)” ด้วยเหตุนี้ทำให้โฟตอนถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์แบบด้วยอิเล็กตรอนวงนอก อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทั้งหมดจากโฟตอนแล้วกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะสามารถถูกดูดกลืนก็ต่อเมื่อพลังงานของมันมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap) โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะผ่านทะลุสารกึ่งตัวนำและไม่สามารถก่อให้เกิดการแปลงผันพลังงาน อย่างไรก็ตามโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานก็จัดเป็นความสูญเสียในด้านการแปลงพลังงานเนื่องจากพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนในผลึกอย่างรวดเร็ว ในช่วงการทำปฏิกิริยาระหว่างสเปกตรัมโดยทั่วไปของรังสีแสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ในกระบวนการแปลงพลังงาน พลังงานจะสูญเสียประมาณ 60% เพราะมีโฟตอนจำนวนมากมีพลังงานทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

ข) การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination of charge carriers)

การดูดกลืนแสงก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pairs) ดังนั้นในช่วงที่มีแสง ปริมาณของประจุพาหะจึงมีค่ามากกว่าในช่วงเวลาที่มืด นั่นคือในขณะที่ไม่มีแสงปริมาณประจุพาหะ จะมีค่าเท่ากับในช่วงเวลาที่มืด กระบวนการย้อนกลับนี้เรียกว่า “การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination)” และเป็นกระบวนการย้อนกลับจากกระบวนการสร้างประจุพาหะด้วยการดูดกลืนแสง การรวมตัวของประจุพาหะเกิดตามธรรมชาติแม้กระทั่งในกระบวนการสร้างประจุพาหะ ปริมาณของประจุพาหะสุทธิในขณะที่มีแสงจึงเป็นผลที่เกิดจากทั้งสองกระบวนการดังกล่าวในช่วงอายุขัย (Lifetime) ของประจุพาหะ ประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ในผลึกได้ในระยะทางที่แน่นอน ก่อนที่จะเกิดการรวมตัวระยะทางเฉลี่ยที่ประจุพาหะจะสามารถเดินทางได้ระหว่างจุดกำเนิดของประจุ กับจุดที่เกิดการรวมตัว เรียกว่า “ระยะการแพร่ (Diffusion length)” ปริมาณนี้มีบทบาทสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ และมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสาร และอายุขัยของประจุพาหะ (ระยะเวลาที่ใช้จนกระทั่งประจุพาหะเกิดการรวมตัว)

ค) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงตกกระทบ

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแสดงไว้โดยสังเขปดังภาพ 2 อันได้แก่ อิมิตเตอร์ชนิดเอ็น (N-doped emitter) บริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) และ เบสชนิดพี (P-doped base) โฟตอนที่มีพลังงานเพียงพอตกลงบนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านทะล่อิมิตเตอร์ และบริเวณปลอดพาหะ แล้วถูกดูดกลืนในเบสชนิดพี ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อยภายในเบสชนิดพี จึงถูกเรียกว่า “ประจุพาหะส่วนน้อย” ซึ่งตรงกันข้ามกับโฮลที่เป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในบริเวณนี้ อิเล็กตรอนนี้แพร่เข้าไปในเบสชนิดพีจนกระทั่งถึงขอบของบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะจะเร่งอิเล็กตรอนและพาอิเล็กตรอนไปยังด้านอิมิตเตอร์ [1]

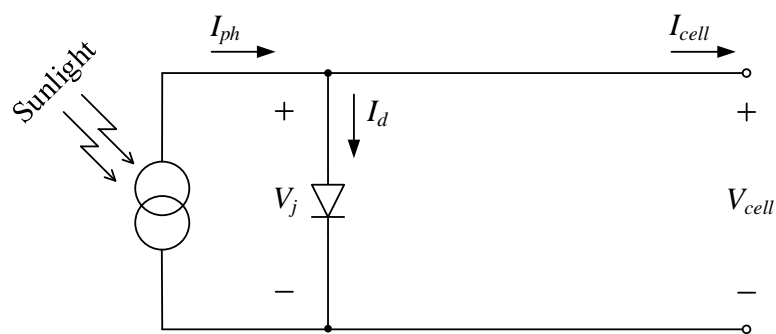


ภาพ 2 หลักการทำงานโดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การแยกออกจากกันของประจุพาหะจึงเกิดขึ้นโดยมีสนามไฟฟ้าเป็นตัวกลางในการแยก อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาแพร่ของอิเล็กตรอนจะต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีที่ระยะเวลาแพร่สั้นเกินไป การรวมตัวของประจุพาหะจะเกิดขึ้นก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน นอกจากนี้ การดูดกลืนควอนต้าของแสงในอิมิตเตอร์ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นกัน ถ้าหากระยะการแพร่ของโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยในบริเวณอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นมีค่ามากพอ จะทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปจนถึงบริเวณปลอดพาหะแล้วถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและถูกพาไปยังด้านเบสชนิดพี ถ้าการดูดกลืนควอนต้าของแสงเกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนและโฮลจะถูกแยกออกจากกันทันทีด้วยสนามไฟฟ้า ผลที่ได้จากการที่มีแสงตกกระทบเซลล์คือ เมื่ออิเล็กตรอนในอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นมีจำนวนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้โฮลทางด้านเบสชนิดพีมีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเซลล์ และหากนำตัวต้านทานมาต่อระหว่างอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นและเบสชนิดพี อิเล็กตรอนจากด้านอิมิตเตอร์จะไหลผ่านตัวต้านทานไปยังเบสแล้วรวมตัวกับโฮลในเบส การไหลของกระแสดังกล่าวบ่งบอกถึงการจ่ายกำลังด้านออก โดยกระแสดังกล่าวจะไหลอย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีแสงตกกระทบเซลล์ นั่นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ถูกเปลี่ยนทันทีเป็นพลังงานไฟฟ้า

#### วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดประจุพาหะอิสระขึ้นในเซลล์และเกิดกระแสไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่ ปริมาณประจุพาหะอิสระที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ (Irradiance) ก่อให้เกิดกระแสพลังแสง (Photocurrent) ขึ้นภายในเซลล์ เราอาจอธิบายเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายดังภาพ 3 ซึ่งประกอบขึ้นจากการต่อขนานกันของแหล่งจ่ายกระแสพลังแสงที่มีค่ากระแสขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสงอาทิตย์กับไดโอดที่ใช้อธิบายรอยต่อพีเอ็น



ภาพ 3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับโหลด [2]

กระแสที่ผ่านไดโอด [3] สามารถอธิบายด้วยสมการต่อไปนี้

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

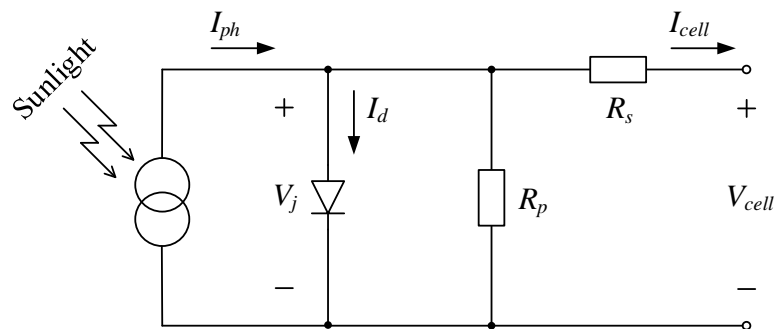
- โดยที่  $I_d$  คือ กระแสไดโอด (A)  
 $I_o$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) (A)  
 $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)  
 $V_j$  คือ แรงดันไฟฟ้าคร่อมรอยต่อพีเอ็น (V)  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ ( $8.65 \times 10^{-5}$  eV/K)  
 $T_{cell}$  คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)  
 $A$  คือ ค่าความสมบูรณ์ของรอยต่อพีเอ็น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 5

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)

ในสภาพความเป็นจริง เนื้อสารกึ่งตัวนำและหน้าสัมผัสโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์ก่อให้เกิดความต้านทานอนุกรม (Parasitic series resistance,  $R_s$ ) ในวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่กระแสรั่วรอบ ๆ ขอบของเซลล์ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในผิวของเซลล์และตำหนิที่เกิดจากการเชื่อมต่อหน้าสัมผัสก่อให้เกิดความต้านทานขนาน (Parasitic parallel resistance,  $R_p$ ) ดังภาพ 4



ภาพ 4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ [2]

เราจึงเขียนสมการของกระแสด้านออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น

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

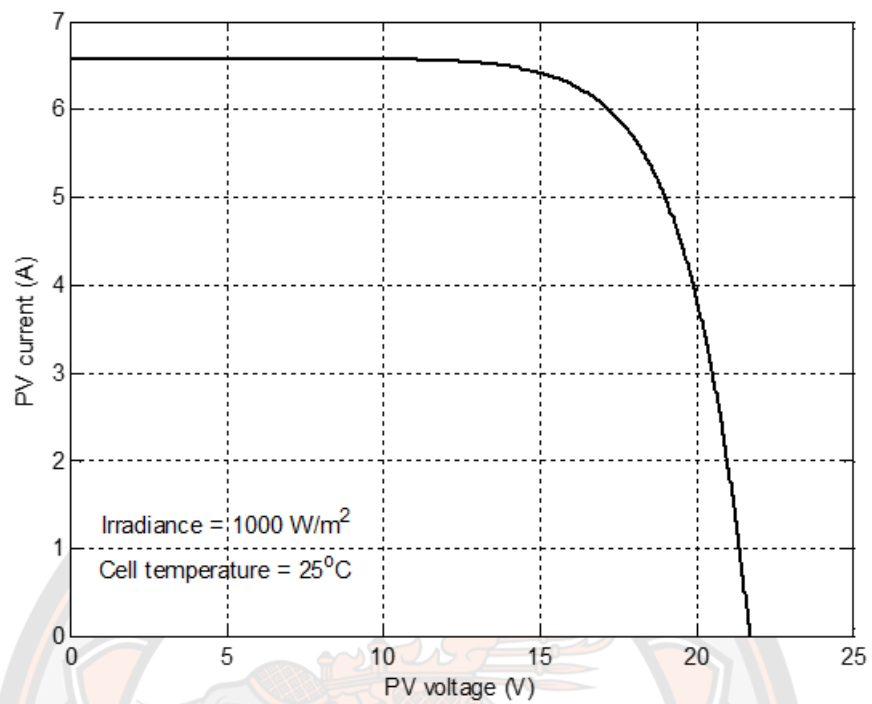
อย่างไรก็ตาม การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานทั้งสอง จึงกำหนดให้ความต้านทานอนุกรมมีค่าเท่ากับศูนย์และความต้านทานขนานมีค่าเป็นอนันต์ และเขียนสมการของกระแสด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

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

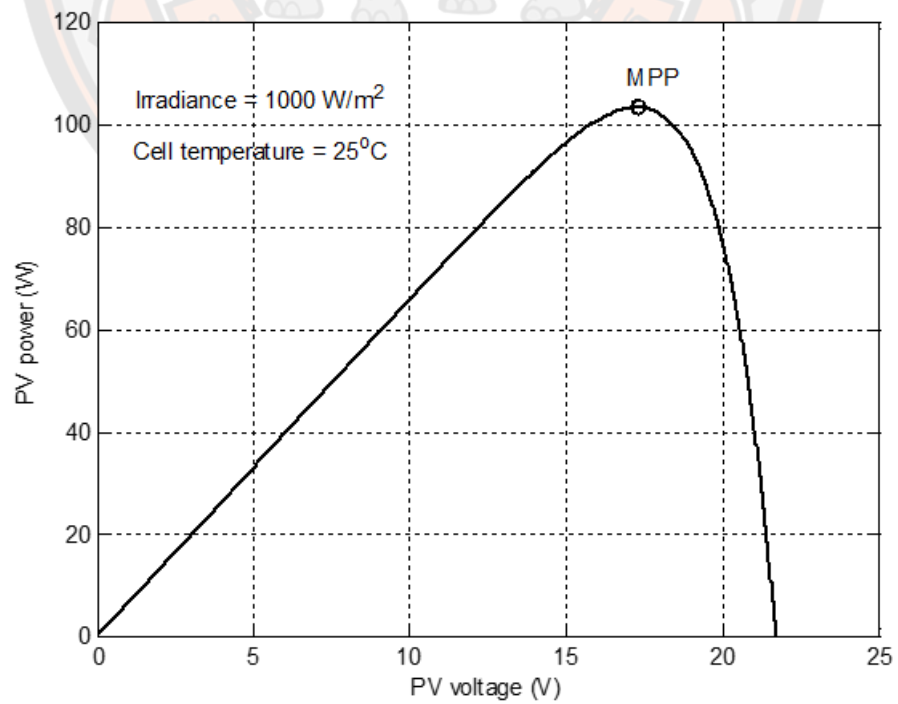
โดยที่  $I_{pv}$  คือ กระแสด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)  
 $V_{pv}$  คือ แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)  
 $n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมในหนึ่งแถว  
 $n_p$  คือ จำนวนแถวของเซลล์

เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง ๆ สามารถแสดงดังภาพ 5 ภายใต้สภาพอากาศหนึ่ง ๆ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังด้านออกสูงสุดเมื่อทำงานที่จุดกำลังสูงสุด โดยเราสามารถคำนวณหาค่ากำลังของแผงได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันของแผงจากภาพ 5 เราสามารถสร้างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงได้ดังภาพ 6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์สร้างกระแสสูงสุดเท่ากับค่ากระแสลัดวงจร (Short-circuit current,  $I_{sc}$ ) เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งที่จุดนี้จะไม่มีการจ่ายด้านออกเนื่องจากผลคูณของกระแสกับแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ในทางกลับกัน ค่ากระแสด้านออกของแผงมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage,  $V_{oc}$ ) ทำให้กำลังด้านออกมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ระหว่างจุดทั้งสองดังกล่าว กำลังด้านออกของแผงมีค่ามากกว่าศูนย์ จากภาพ 6 จุดกำลังสูงสุดแสดงด้วยวงกลมเล็ก ทั้งนี้ เราสามารถนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรม แบบขนาน หรือแบบผสมระหว่างอนุกรมและขนานให้กลายเป็นชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) เพื่อเพิ่มกำลังด้านออก



ภาพ 5 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4]



ภาพ 6 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4]

ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่างกัน แสดงได้ดังภาพ 7 ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสพลังแสง ความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังสมการที่ (2.5) จะเห็นว่ากระแสพลังแสงเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรจึงแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสง [5]

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

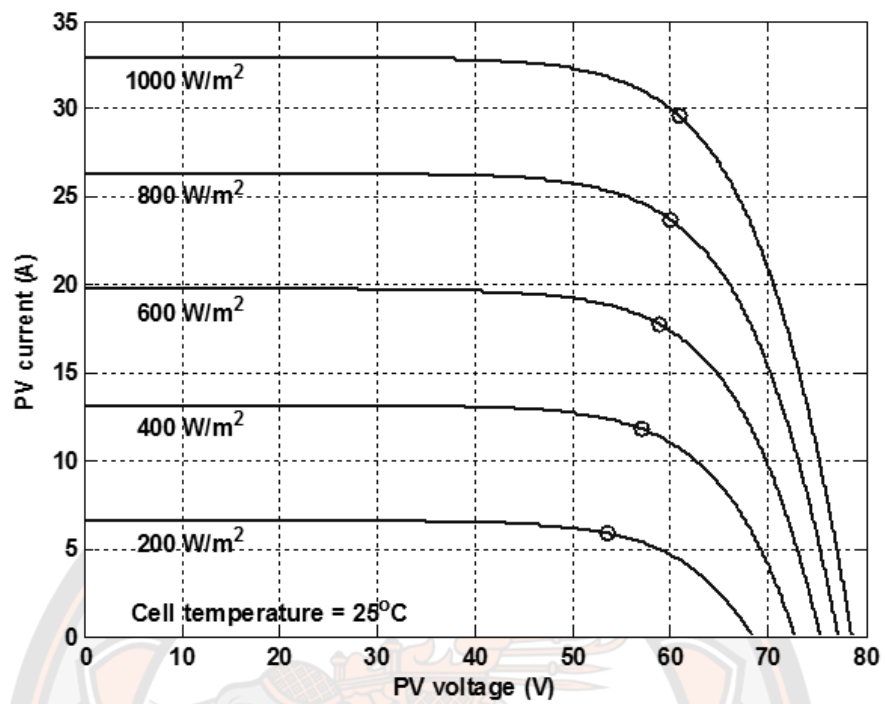
โดยที่  $T_r$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 301.18 K  
 $I_{scr}$  คือ กระแสลัดวงจรของแผงที่อุณหภูมิอ้างอิง (A)  
 $k_i$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร  
 $S$  คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

ภายใต้เงื่อนไขการเปิดวงจร (เมื่อไม่พิจารณาค่าความต้านทานขนาน)

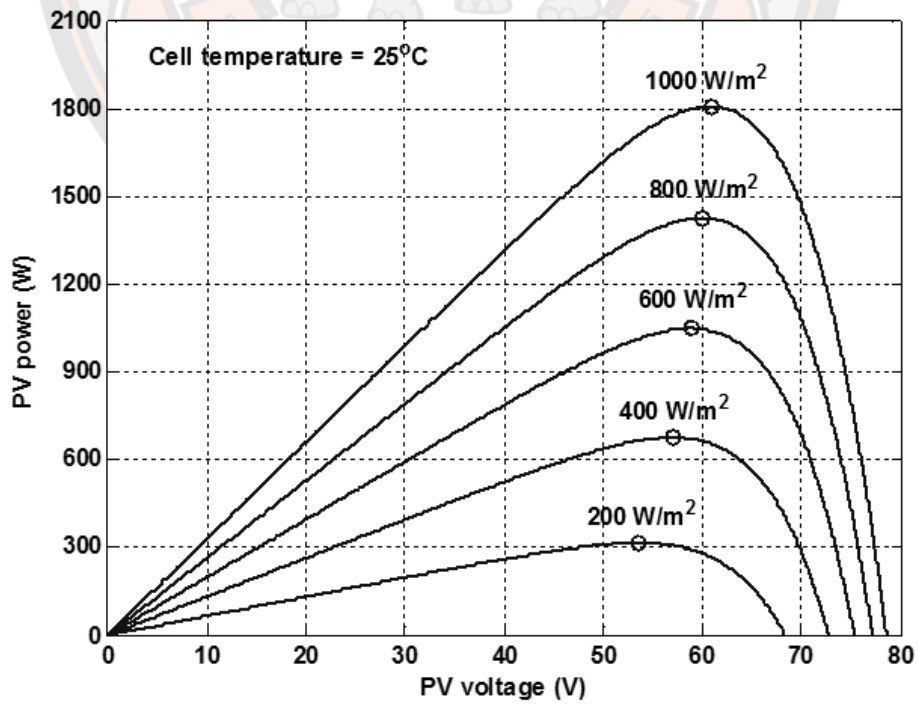
$$V_{oc} = \frac{n_s A k T_{cell}}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) เนื่องจากกระแสพลังแสงแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสง ดังนั้นแรงดันเปิดวงจรจะแปรผันเป็นฟังก์ชันลอการิทึม เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันที่สัมพันธ์กับภาพ 7 แสดงได้ดังภาพ 8 โดยจะเห็นได้ชัดว่ากำลังด้านออกของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงตามความเข้มแสง





ภาพ 7 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [4]



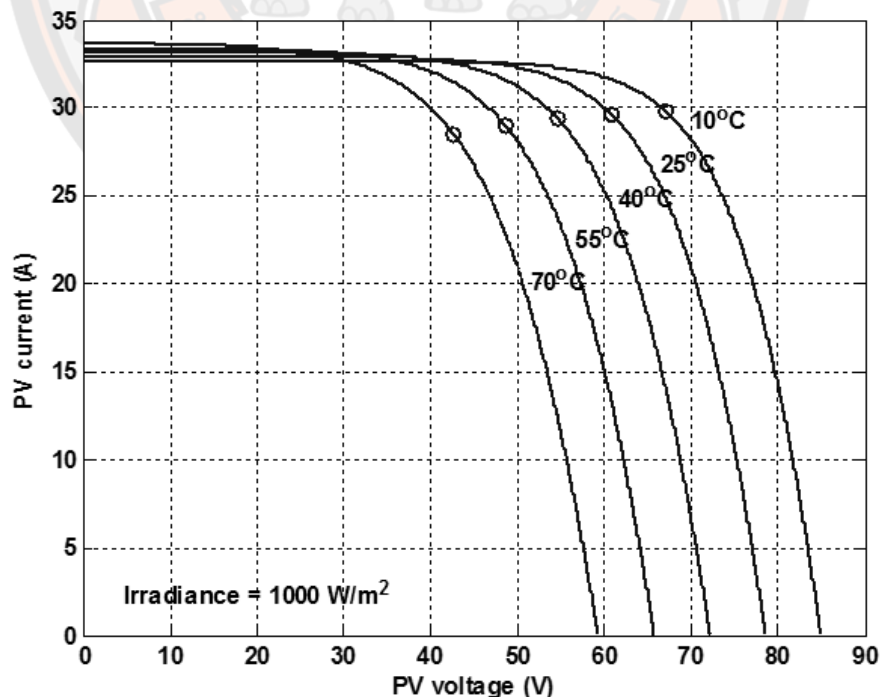
ภาพ 8 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [4]

ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

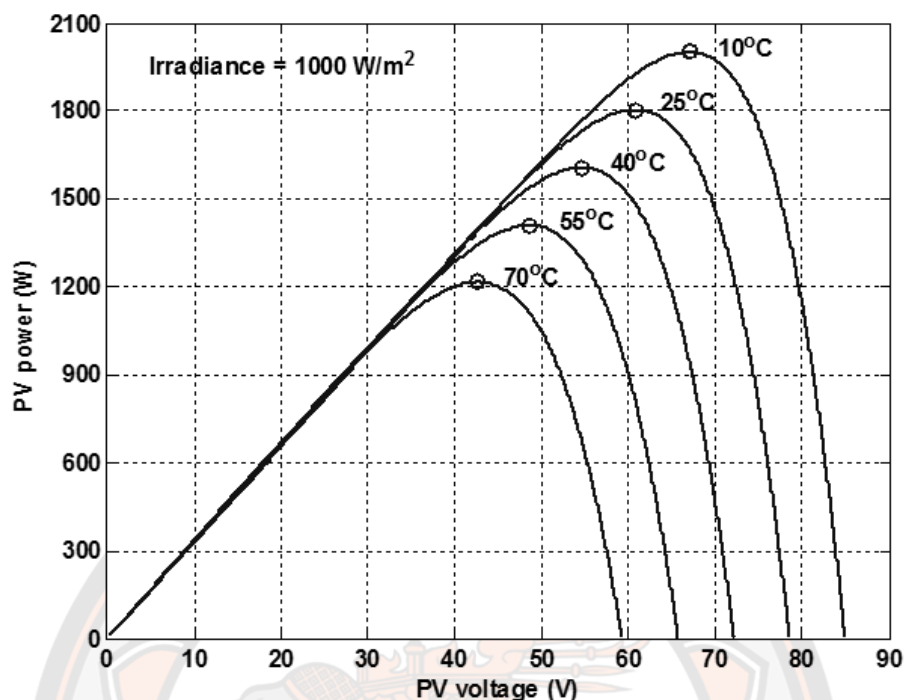
ภาพ 9 แสดงเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันสำหรับค่าอุณหภูมิของเซลล์ที่แตกต่างกัน กระแสพลังแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิดังสมการที่ (2.5) เนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานแคบลงและระยะแพร่ของประจุพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเซลล์ส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ประมาณ  $0.07\%/^{\circ}\text{C}$  สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน) ในทางตรงกันข้าม แรงดันเปิดวงจรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างมากดังสมการที่ (2.7) และช่องว่างแถบพลังงานแคบลง ส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลงตามอุณหภูมิในลักษณะค่อนข้างเชิงเส้นในอัตราประมาณ  $0.4\%/^{\circ}\text{C}$  สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันแสดงได้ดังภาพ 10 จะเห็นว่าอุณหภูมิมิผลอย่างมากต่อค่ากำลังด้านออกที่ระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด [5, 6]

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

โดยที่  $I_{or}$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่อุณหภูมิอ้างอิง มีค่าเท่ากับ  $19.9693 \times 10^{-6}$  A  
 $E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงานของซิลิกอน มีค่าเท่ากับ 1.3 eV



ภาพ 9 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน [4]



ภาพ 10 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน [4]

#### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Maximum power point tracking, MPPT) เป็นสิ่งจำเป็นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ (Photovoltaic systems) ด้วยเหตุนี้ วิธีหาจุดกำลังสูงสุดจำนวนมากจึงถูกพัฒนาขึ้นและนำไปใช้ แต่ละวิธีจะมีความแตกต่างในด้านต่าง ๆ ความซับซ้อน การใช้เซ็นเซอร์ ความเร็ว ราคา ยานการใช่งานที่มีประสิทธิภาพ การนำไปสร้างชิ้นงาน ความนิยมใช้ เป็นต้น ในความเป็นจริงวิธีต่าง ๆ ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมากจนยากที่จะบอกว่าวิธีใดเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ ปัญหาสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดคือการหาตำแหน่ง (ค่า) ของแรงดันหรือกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้ได้กำลังต้านออกสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงและอุณหภูมิที่กำหนด โดยส่วนใหญ่จะมีเพียงจุดเดียวที่เป็นจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง

วิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่าและกลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง ซึ่งทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างกันตรงที่กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่าง่ายต่อการนำไปใช้งาน การคำนวณไม่ซับซ้อนและมีความเร็วสูงในการติดตาม โดยทั่วไปกลุ่มวิธีดังกล่าวเพียงช่วยให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

อยู่ใกล้เคียงกับจุดกำลังสูงสุดเท่านั้น ในขณะที่กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงจะสามารถควบคุมให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุดกำลังสูงสุดหรือแกว่งอยู่รอบ ๆ แต่วิธีในกลุ่มนี้มีความซับซ้อนในด้านการคำนวณ ซึ่งบางวิธีต้องใช้ความชำนาญของผู้ออกแบบ หรือต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เป็นระยะ ๆ และอาจติดตามจุดกำลังสูงสุดได้ช้ากว่ากลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่า แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถเพิ่มความเร็วในการติดตามให้กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงได้ด้วยการเพิ่มขนาดก้าว แต่หากเพิ่มมากเกินไปจะทำให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการแกว่งรอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด เพื่อลดการแกว่งรอบ ๆ จุดกำลังสูงสุดจึงมีการพัฒนาเป็นแบบแปรผันขนาดก้าว

กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบประมาณค่า

ก) วิธีเศษส่วนแรงดันวงจรถัด

มีหลักการพื้นฐานมาจากความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างเชิงเส้นระหว่าง  $V_{MPP}$  กับ  $V_{oc}$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.8)

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

โดย  $k_v$  คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน

เนื่องจากค่า  $k_v$  ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง เราจึงคำนวณหา ค่า  $k_v$  ล่วงหน้าโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{MPP}$  กับ  $V_{oc}$  จากการทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนใจภายใต้เงื่อนไขที่ระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้ว  $k_v$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.71-0.78 หลังจากได้ค่า  $k_v$  แล้ว เราสามารถคำนวณหา ค่า  $V_{MPP}$  ได้จากผลคูณในสมการที่ (2.8) โดยมีการวัดค่า  $V_{oc}$  เป็นระยะ ๆ ด้วยการเปิดวงจรชั่วขณะที่ขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีแรงดันเปิดวงจรเป็นวิธีที่ง่ายและราคาถูกในการนำไปใช้งาน ซึ่งการประยุกต์กับงานบางประเภทอัลกอริทึมนี้ก็เพียงพอต่อการใช้งาน แม้ว่าจะไม่ใช่เป็นการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง อย่างไรก็ตามการเปิดวงจรชั่วขณะที่ขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในระหว่างที่เปิดวงจรเพื่อวัดค่า  $V_{oc}$  นอกจากนี้สมการที่ (2.8) เป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้นทำให้จริง ๆ แล้วจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทบจะไม่อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด [7, 8]

ข) วิธีเศษส่วนกระแสวงจรถัด

หลักการพื้นฐานมาจากความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างเชิงเส้นระหว่าง  $I_{MPP}$  กับ  $I_{sc}$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.9)

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

โดย  $k_i$  คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน

ทำนองเดียวกับวิธีเศษส่วนแรงดันวงจรเปิด ค่า  $k_i$  ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง เราจึงคำนวณหาค่า  $k_i$  ล่วงหน้าโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{MPP}$  กับ  $I_{sc}$  จากการทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนใจภายใต้เงื่อนไขที่ระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ โดยทั่วไป  $k_i$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.78-0.92 ซึ่งปกติการวัดค่า  $I_{sc}$  ในระหว่างที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานอยู่จะใช้สวิตช์ที่เพิ่มเข้าไปในตัวแปลงกำลังเพื่อลัดวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระยะ ๆ แล้วใช้เซ็นเซอร์กระแสวัดค่า  $I_{sc}$

วิธีเศษส่วนกระแสลัดวงจรเป็นวิธีที่ง่ายในการนำไปประยุกต์ใช้งาน แต่ในระหว่างที่วัดค่า  $I_{sc}$  จะทำให้กำลังด้านออกของแผงลดลงและยังไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงได้ ซึ่งสวิตช์ที่ใช้เพื่อลัดลัดวงจรเป็นการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์และราคารวมของระบบ ถึงแม้ว่าในกรณีของวงจรทบระดับแรงดันเราสามารถใส่สวิตช์ของวงจรเพื่อลัดวงจรแผงได้ [7, 8]

กลุ่มวิธีติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง

ก) วิธีการควบคุมฟัซซี่ลอจิก

การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้การควบคุมฟัซซี่ลอจิกเป็นที่นิยมในการหาจุดกำลังสูงสุดในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การควบคุมฟัซซี่ลอจิกมี 3 ขั้นตอน คือ การฟัซซี่ฟิเคชัน (Fuzzification) การเทียบตารางกฎ (Rule base table lookup) และการดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification) ในระหว่างการฟัซซี่ฟิเคชัน ตัวแปรด้านเข้าที่เป็นตัวเลข (Numerical input variables) จะถูกเปลี่ยนเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic variables) โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสมาชิกด้านเข้าของตัวควบคุม ฟัซซี่ลอจิกสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดมักจะเป็นค่าผิดพลาด (Error) และการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด ผู้ใช้สามารถเลือกวิธีการคำนวณหาค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดทันทีที่คำนวณค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดได้และถูกเปลี่ยนเป็นตัวแปรภาษา แล้ว ด้านออกของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกซึ่งมักจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าดิฟฟิเคชันของตัวแปลงผันกำลังจะถูกเทียบหาจากในตารางกฎ (Rule base table) ในขั้นตอนของการดีฟัซซี่ฟิเคชัน ด้านออกของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะถูกเปลี่ยนจากตัวแปรภาษาเป็นตัวแปรที่เป็นตัวเลขโดยยังคงใช้ฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งจะได้สัญญาณอนาล็อกไปควบคุมตัวแปลงกำลังเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุด

ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมีข้อดีคือสามารถทำงานได้กับด้านเข้าที่ไม่แม่นยำ และไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ รวมทั้งสามารถรับมือกับความไม่เป็นเชิงเส้นได้ อย่างไรก็ตาม ความมีประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะขึ้นอยู่กับความรู้ของผู้ใช้ในการออกแบบตารางกฎ (Rule base table) [9]

#### ข) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม

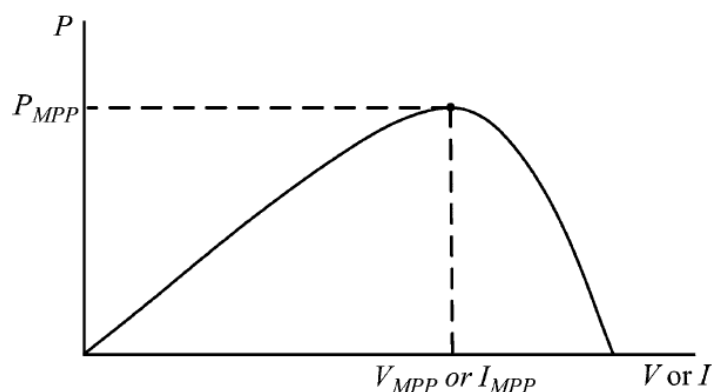
วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมจะใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 3 ชั้นคือ ชั้นด้านเข้า (Input layer) ชั้นที่ถูกซ่อน (Hidden layer) และ ชั้นด้านออก (Output layer) จำนวนโนดในแต่ละชั้นอาจแตกต่างกันและถูกกำหนดโดยผู้ใช้ การใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมติดตามจุดกำลังสูงสุด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

การที่จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะใกล้กับจุดกำลังสูงสุดมากเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้ในชั้นที่ถูกซ่อน และขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนมากมีคุณลักษณะแตกต่างกัน เราจึงให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของแผงตามอายุการใช้งาน โครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องเรียนรู้ข้อมูลใหม่เป็นระยะ ๆ เพื่อคงความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังสูงสุด [10]

#### ค) วิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ

ผลงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่วิธีปีนเนิน (Hill-climbing technique) และวิธีพีแอนด์โอ (Perturb and Observe technique, P&O) วิธีปีนเนินอาศัยการขยับค่าดิวตี้ไซเคิลของตัวแปลงกำลัง (Power converter) ในขณะที่วิธีพีแอนด์โออาศัยการขยับค่า (Perturbation) ของแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับตัวแปลงกำลัง การปรับค่าดิวตี้ไซเคิลจะส่งผลให้แรงดันของแผงเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงถือได้ว่าวิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอมีหลักการทำงานเดียวกัน

จากภาพ 11 ถ้าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด การเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ของแรงดันไฟฟ้าทำให้กำลังเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ในกรณีที่ถ้าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด การลดลง (หรือเพิ่มขึ้น) ของแรงดันไฟฟ้าทำให้กำลังเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ดังนั้นถ้ากำลังมีค่าเพิ่มขึ้น การขยับค่าแรงดันจะคงในทิศทางเดิมจนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุด แต่ถ้ากำลังลดลง การขยับค่าแรงดันจะกลับทิศทาง



ภาพ 11 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป [11]

อัลกอริทึมนี้แสดงในตาราง 1 โดยจะเห็นว่าอัลกอริทึมนี้ยังคงใช้งานได้ในกรณีที่ใช้ค่าขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous value) ของกระแสหรือแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (แทนที่จะเป็นค่าเฉลี่ย) ตราบใดที่การซีกตัวอย่าง (Sampling) เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวในแต่ละคาบสวิตซิง (Switching cycle)

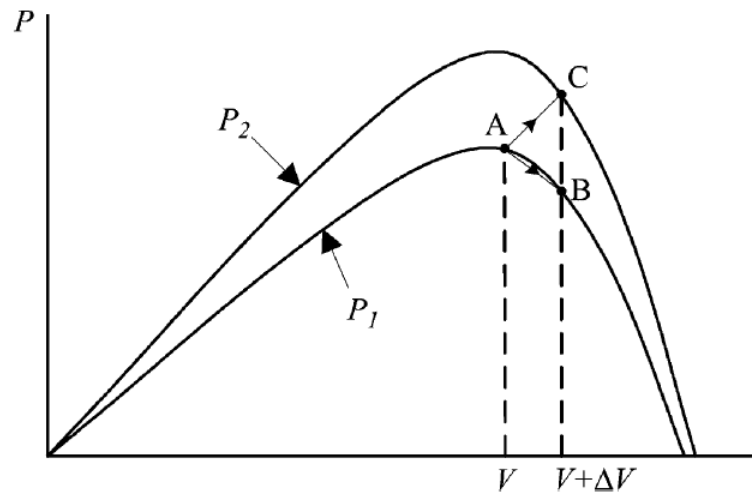
กระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำเป็นระยะ ๆ จนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุด หลังจากนั้นจุดทำงานจะแกว่งอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด เราสามารถทำให้การแกว่งลดลงได้โดยการลดขนาดในการขยับค่า (Perturbation step size) แต่จะลดความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วย

ตาราง 1 ตารางสรุปอัลกอริทึมของวิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ [11]

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

วิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ อาจทำงานล้มเหลวในกรณีที่สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงฉับพลัน ดังภาพ 12 เริ่มจากจุดทำงาน A ถ้าสภาพอากาศค่อนข้างคงที่ (เปลี่ยนแปลงน้อยมาก) การขยับค่า  $\Delta V$  ของแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้ได้จุดทำงานใหม่คือจุด B และการขยับค่าจะกลับทิศเนื่องจากการลดลงของค่ากำลังด้านออก อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและเลื่อนเส้นโค้งกำลังจาก P1 ไปเป็น P2 ภายในหนึ่งคาบการซีกตัวอย่าง (Sampling) จุดทำงานจะย้ายจากจุด A ไปเป็นจุด C ซึ่งยังคงทำให้ได้กำลังด้านออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การขยับค่าแรงดันยังคงไปในทิศทาง

เดิม ผลที่ตามมาคือ ถ้าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จุดทำงานจะเคลื่อนที่ออกจากจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงไปเรื่อย ๆ



ภาพ 12 การลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของวิธีป็นเนินและวิธีพีแอนด์โอ [11]

ง) วิธีความนำส่วนเพิ่ม

วิธีนี้ใช้หลักการที่ว่า ความชันของเส้นโค้งกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดกำลังสูงสุด มีค่าเป็นบวกถ้าจุดทำงานอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด และมีค่าเป็นลบถ้าจุดทำงานอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด

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

เนื่องจาก

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

เราสามารถเขียนสมการที่ (2.10) ได้ว่า

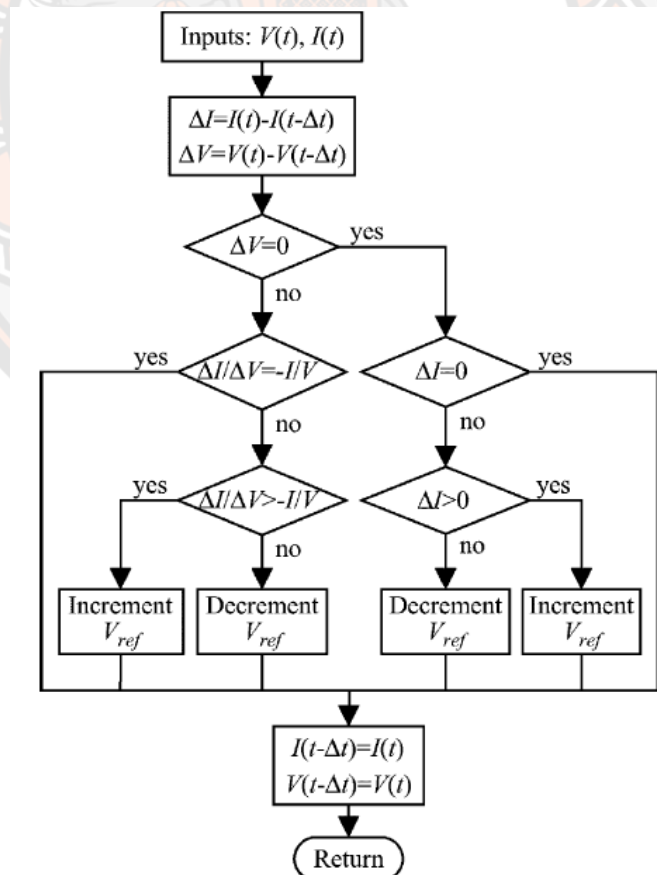
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} \begin{cases} = -\frac{I}{V}, & \text{at MPP} \\ > -\frac{I}{V}, & \text{left of MPP} \\ < -\frac{I}{V}, & \text{right of MPP} \end{cases}$$



หรือ

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

ด้วยอัลกอริทึมนี้ เราสามารถหาจุดกำลังสูงสุดโดยเปรียบเทียบค่าความนำขณะหนึ่ง  $I/V$  กับค่าความนำส่วนเพิ่ม  $\Delta I / \Delta V$  ดังแสดงในแผนภาพ 13 แรงดัน  $V_{ref}$  คือแรงดันอ้างอิงที่เราต้องการให้เป็นจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่จุดกำลังสูงสุด  $V_{ref}$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{MPP}$  หน้าที่ที่พบจุดกำลังสูงสุด การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกรักษาไว้ที่จุดนี้จนกว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแส  $\Delta I$  ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอัลกอริทึมจะลดหรือเพิ่มค่า  $V_{ref}$  เพื่อตามหาจุดกำลังสูงสุด ขนาดในการขยับค่าจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหาจุดกำลังสูงสุด ถ้าการขยับค่ามีขนาดใหญ่จะเพิ่มความเร็วในการหาจุดกำลังสูงสุด แต่ท้ายสุดแล้วจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจจะแกว่งอยู่รอบ ๆ แทนที่จะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด

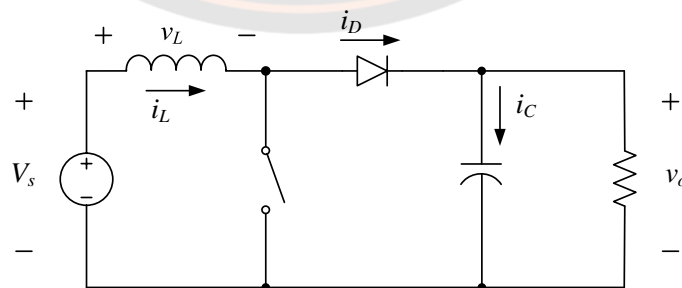


ภาพ 13 อัลกอริทึมของการหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม [12, 13]

การแปรผันขนาดก้าวสามารถเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุดและลดการแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุด การแปรผันขนาดก้าวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใน [14] ตัวคูณ 2 ตัว นั่นคือ 1 และ 2 ถูกนำมาคูณกับค่าขนาดก้าวที่คงที่ซึ่งเรียกว่า ขนาดก้าวตรึง (Fixed step size) ตัวคูณที่ถูกใช้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดทำงานเทียบกับจุดกำลังสูงสุดและทิศทางก้าว ในขณะก้าวเข้าหาจุดกำลังสูงสุด จะใช้รูปแบบตรึงขนาดก้าว (Fixed step-size scheme) นั่นคือ ใช้ตัวคูณเป็น 1 แต่หากจุดทำงานเคลื่อนออกจากจุดกำลังสูงสุด การก้าวจะกลับทิศด้วยขนาดก้าวที่เพิ่มเป็น 2 เท่า นั่นคือใช้ตัวคูณเป็น 2 นอกจากนี้ เรายังสามารถแปรผันขนาดก้าวได้โดยคูณค่าขนาดก้าวตรึงด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential function) [15] อย่างไรก็ตาม การหาค่าเหมาะที่สุดของขนาดก้าวตรึงและเลขชี้กำลังเป็นเรื่องยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลามาก ยิ่งกว่านั้น ผลคูณของตัวประกอบกับค่าความชันขณะหนึ่งของเส้นโค้งกำลัง-แรงดันถูกใช้เป็นขนาดก้าวแปรผัน (Varying step size) ใน [16] แต่ผลที่ตามมาคือ ความสามารถในการติดตามจุดกำลังสูงสุดจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่เลือกใช้อย่างมาก นั่นคือ ตัวประกอบที่มีค่าต่ำจะส่งผลต่อผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) ในขณะที่ตัวประกอบค่าสูงอาจทำให้กลายเป็นการติดตามแบบตรึงขนาดก้าว

### วงจรถะดับแรงดัน

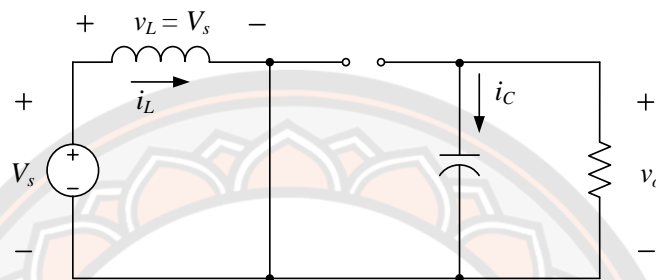
วงจรถะดับแรงดันเป็นตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงที่มีหน้าที่สร้างแรงดันด้านออกที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าแรงดันด้านเข้า แผนภาพวงจรถะดับแรงดันแสดงดังภาพ 14 โดยกำหนดให้  $V_s$  คือแรงดันจากแหล่งกำเนิด,  $v_L$  คือแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ,  $i_L$  คือ กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ,  $i_D$  คือ กระแสที่ผ่านไดโอด,  $i_C$  คือกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุ และ  $V_o$  คือค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออก ( $v_o$ ) และกำหนดให้ตัวเก็บประจุมีค่ามากพอที่จะทำให้  $v_o$  ค่อนข้างคงที่ในสถานะอยู่ตัว ( $v_o \approx V_o$ )



ภาพ 14 แผนภาพวงจรถะดับแรงดัน [17]

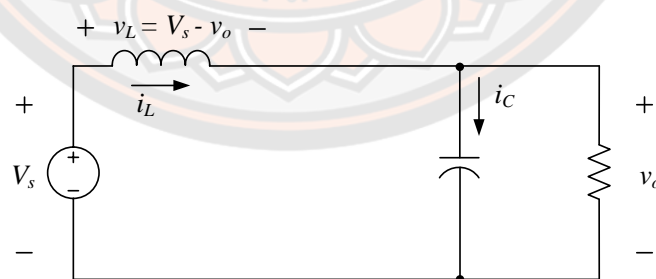
หลักการการทำงานของวงจรทระดับแรงดัน

เมื่อสวิตช์ปิด ไดโอดได้รับไบแอสย้อน ทำให้เกิดการแยกกันระหว่างด้านเข้าและด้านออกของวงจรตั้งวงจรสมมูลในภาพ 15 แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งกำเนิด (และมีค่าเป็นบวก) แหล่งกำเนิดจ่ายพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ กระแสของตัวเหนี่ยวนำจึงมีค่าสูงขึ้นและเกิดการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ ในขณะนี้โหลดได้รับพลังงานจากตัวเก็บประจุ

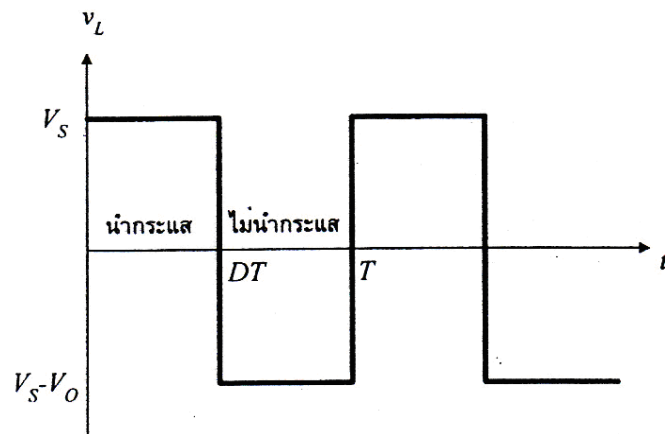


ภาพ 15 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [17]

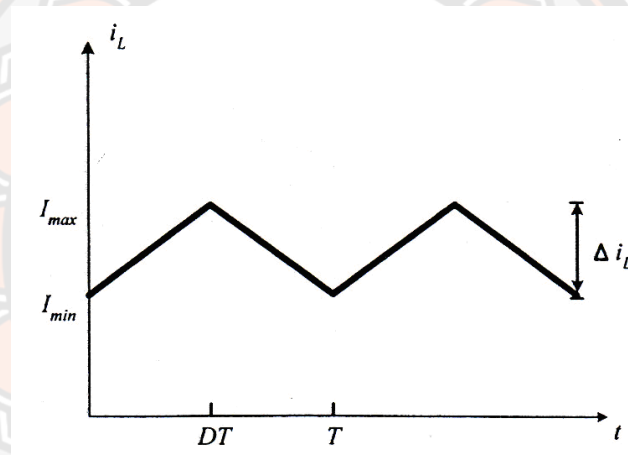
เมื่อสวิตช์เปิด ตัวเหนี่ยวนำคายพลังงานที่สะสมไว้ส่งผลให้ไดโอดนำกระแส โหลดและตัวเก็บประจุได้รับพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำและแหล่งกำเนิดดังภาพ 16 ในช่วงนี้แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างแรงดันด้านเข้ากับแรงดันด้านออก และเนื่องจากค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านเข้าแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำในช่วงนี้จึงมีค่าเป็นลบและกระแสของตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงดังภาพ 17



ภาพ 16 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [17]



(ก) แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



(ข) กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ภาพ 17 สัญญาณไฟฟ้าในวงจรระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [17]

อัตราส่วนของช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบสวิตซ์จึงถูกกำหนดให้เป็นดีวตี้ไซเคิล (Duty cycle,  $D$ ) นั่นคือ

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.13)$$

เนื่องจาก

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

ดังนั้น จะได้ว่า

$$t_{on} = DT$$

และ

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

โดยที่  $T$  คือ ช่วงเวลาหนึ่งคาบสวิตชิง

$t_{on}$  คือ ช่วงเวลาที่นำกระแส

$t_{off}$  คือ ช่วงเวลาที่ไม่นำกระแส

เราสามารถหาอัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า โดยใช้สมการแรงดันเฉลี่ยตกรวมตัวเหนี่ยวนำที่ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ในสถานะอยู่ตัวดังนี้

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

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

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

แทนค่า จะได้

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

หลังจากจัดรูปสมการ จะได้อัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.14)$$

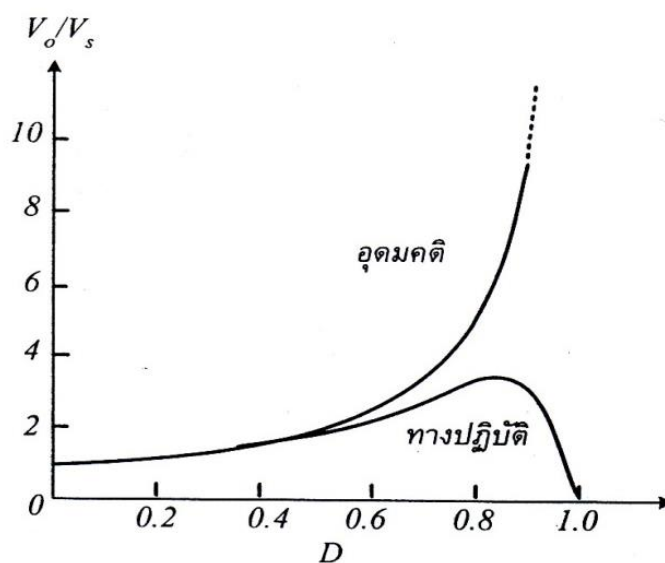
จากสมการที่ (2.14) จะเห็นว่า เราสามารถปรับค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกได้จากการเปลี่ยนค่า  $D$  ในอุดมคติ อัตราขยายแรงดันวงจรทระดับแรงดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าดีวีดีไซเคิลดังภาพ 18 แต่ในทางปฏิบัติ กำลังสูญเสียภายในตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ สวิตช์และไดโอด ส่งผลต่ออัตราขยายแรงดันของวงจร นั่นคือทำให้แรงดันด้านออกมีค่าต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็นโดยเฉพาะที่ค่า  $D$  สูง ๆ

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้ากับค่าเฉลี่ยของกระแสด้านออกของวงจรทระดับแรงดันสามารถหาได้โดยกำหนดให้กำลังสูญเสียในวงจรมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด ส่งผลให้ได้กำลังด้านเข้ามีค่าเท่ากับกำลังด้านออก

$$P_s = P_o$$

$$V_s I_s = V_o I_o$$

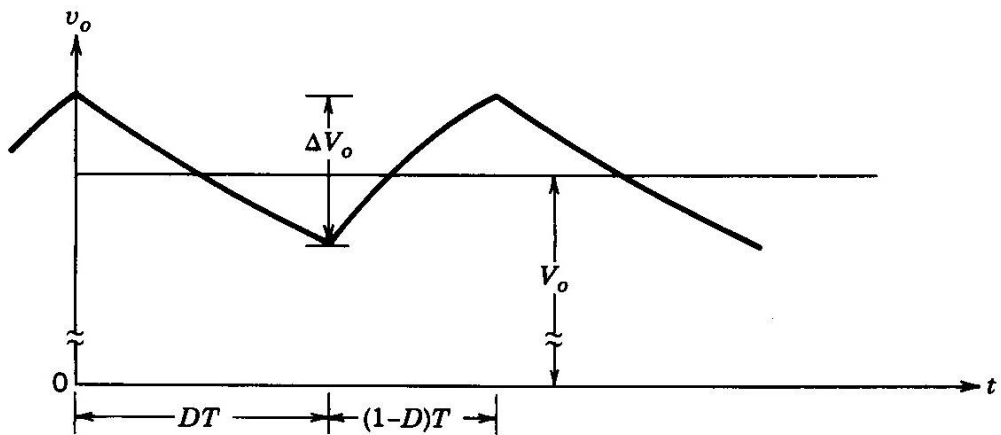
$$\frac{I_s}{I_o} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.15)$$



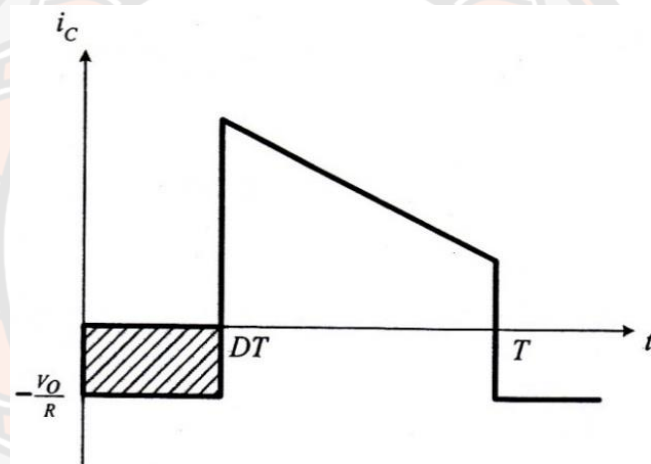
ภาพ 18 กราฟอัตราขยายแรงดันของวงจรระดับแรงดัน [17]

ค่าความพลีวของแรงดันด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถทำให้แรงดันด้านออกมีค่าคงที่ หรือสัญญาณมีความเรียบมากขึ้น แต่ในทางด้านปฏิบัติไม่ควรเลือกใช้เก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ได้เพราะมีขนาดใหญ่และราคาแพง จึงนิยมเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมที่ทำให้ความความพลีวของแรงดันด้านออกมีค่าไม่เกิน 3% [17] ในสถานะอยู่ตัวสัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรระดับแรงดันแสดงดังภาพ 19 จะเห็นว่า  $\Delta V_o$  บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงค่ายอดถึงยอด (Peak to peak) ของแรงดันด้านออก ในขณะที่เรานิยามกำหนดให้ความพลีวของแรงดันด้านออกหาได้จากอัตราส่วนของ  $\Delta V_o$  ต่อค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เนื่องจากค่าแรงดันของตัวเก็บประจุแปรผันโดยตรงกับปริมาณประจุในตัวเก็บประจุ ดังนั้น ค่าความพลีวของแรงดันด้านออกสามารถหาได้จากปริมาณประจุที่ไหลออกจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสโดยพิจารณากราฟกระแสของตัวเก็บประจุในวงจรระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัวดังภาพ 20



ภาพ 19 สัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรหม้อแปลงระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [17]



ภาพ 20 กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุในวงจรหม้อแปลงระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [17]

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดของตัวแปรในสมการ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta Q &= C\Delta V_o = I_o t_{on} \\ \Delta V_o &= \frac{I_o t_{on}}{C} = \frac{V_o DT}{RC} \\ \frac{\Delta V_o}{V_o} &= \frac{D}{RCf}\end{aligned}\quad (2.16)$$

โดยที่  $f$  คือค่าความถี่สวิตชิง (Switching frequency) ที่เลือกใช้งาน ดังนั้นจะเห็นว่าเราสามารถลดความพลีวของแรงดันด้านออกได้โดยลดค่าตัวตีไซเคิล หรือเพิ่มค่าความต้านทานของโหลด หรือเพิ่มค่าของความจุ หรือเพิ่มค่าความถี่สวิตชิง [17]

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าว โดยควบคุมค่าตัวชี้ไขเคลของวงจรทระดับแรงดันเพื่อให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด ในบทนี้จึงแสดงวิธีการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านนอกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การจำลองผลตอบสนองในวงจรทระดับแรงดัน และวิธีการแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุด

#### วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยของเรื่องการติดตามจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแปรผันขนาดก้าวเพื่อตั้งกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

- 1) ศึกษาผลกระทบของสภาพอากาศที่มีต่อจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ศึกษาการทำงานของวงจรทระดับแรงดันเพื่อใช้ติดตามจุดกำลังสูงสุด
- 3) ศึกษาการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าว
- 4) ทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าว โดยจำลองผลในโปรแกรม MATLAB
- 5) ศึกษาการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าว
- 6) ทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าว โดยจำลองผลในโปรแกรม MATLAB
- 7) รวบรวมและวิเคราะห์ผลการวิจัย
- 8) สรุปผลการวิจัย

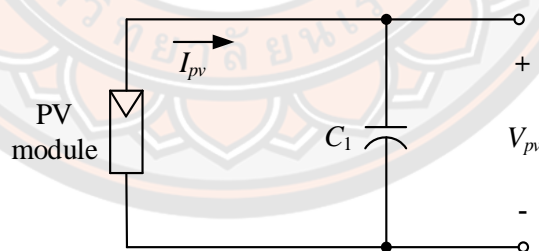


## การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้จำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของแผงที่กำหนดใช้ในงานวิจัยนี้และแสดงผลกระทบของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่มีต่อตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดของแผงก่อนนำไปเชื่อมต่อกับวงจรส่วนอื่น ๆ เพื่อจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงในลำดับต่อไป

คุณลักษณะด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนด

การจำลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอาศัยรูปแบบการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  เข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพ 21 โดยที่ตัวเก็บประจุถูกใช้เพื่อควบคุมแรงดันด้านออกของแผง ซึ่งส่งผลต่อปริมาณกระแสและกำลังด้านออกของแผงด้วย ถ้าเลือกใช้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่มีค่าต่ำจะช่วยแรงดันด้านออกของแผงเปลี่ยนแปลงได้เร็ว แต่อาจทำให้เกิดการผันผวนของแรงดันด้านออกและการแกว่งของจุดทำงานของแผงอย่างมากได้ ในขณะที่การเลือกใช้  $C_1$  ที่มีค่าสูงจะช่วยรักษาระดับแรงดันด้านออกของแผงให้ค่อนข้างคงที่ แต่อาจลดความเร็วของการติดตามจุดกำลังสูงสุด การเลือกค่าความจุของ  $C_1$  ในงานวิจัยนี้พิจารณาจากระดับแรงดันด้านออกของแผงและคาบสวิตชิงของวงจรระดับแรงดัน เพื่อให้การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลาอยู่ในย่านมิลลิวินาที จากการทดสอบด้วยการจำลองผลทำให้เลือกใช้ค่าความจุของ  $C_1$  เท่ากับ  $4700 \mu\text{F}$



ภาพ 21 แผนภาพวงจรเพื่อจำลองคุณลักษณะด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{pv}$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) นั่นคือ

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

โดยที่กระแสพลังแสง ( $I_{ph}$ ) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) นั่นคือ

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

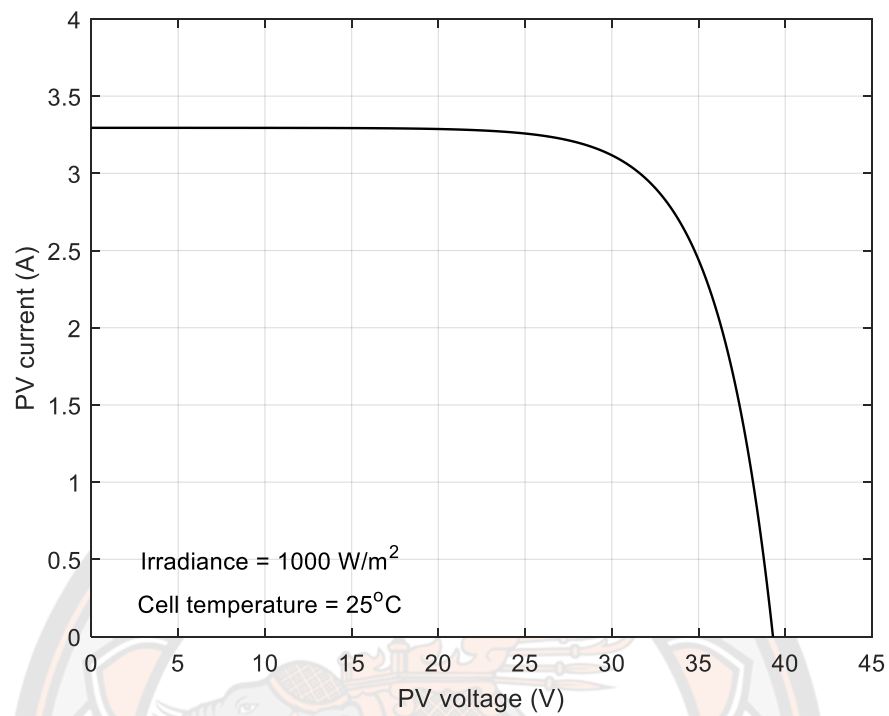
ในขณะที่กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_o$ ) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.7) นั่นคือ

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

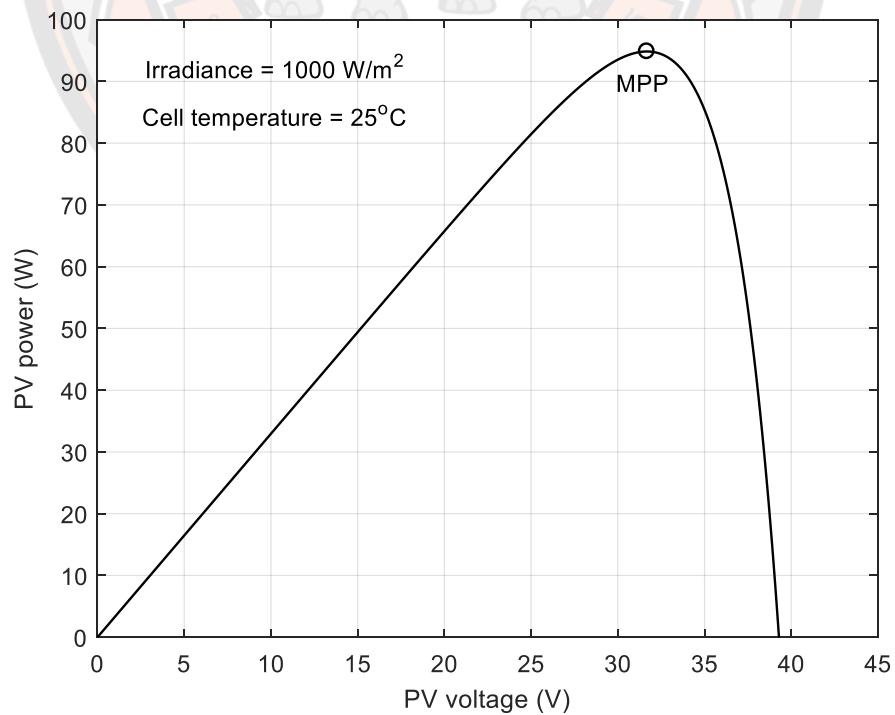
ในที่นี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังตาราง 2 แล้วใช้สมการที่ (3.1)-(3.3) จำลองผลที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  จึงแสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันด้านออกของแผงเป็นเส้นโค้งคุณลักษณะได้ดังภาพ 22 จะเห็นว่า ภายใต้สภาพอากาศดังกล่าวแผงสามารถจ่ายกระแสลัดวงจรเท่ากับ  $3.29 \text{ A}$  และแรงดันเปิดวงจรของแผงมีค่าเท่ากับ  $39.29 \text{ V}$  ในขณะที่ความสัมพันธ์ของกำลังกับแรงดันด้านออกของแผงสามารถแสดงเป็นเส้นโค้งคุณลักษณะได้ดังภาพ 23 จะเห็นว่า กำลังสูงสุดที่แผงจ่ายได้ภายใต้สภาพอากาศดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $94.84 \text{ W}$  เมื่อแรงดันด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ  $31.68 \text{ V}$

ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองผล

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการจำลองผล
$A$	1.72
$E_g$	1.3 eV
$T_r$	301.18 K
$I_{or}$	$19.9693 \times 10^{-6} \text{ A}$
$I_{scr}$	3.3 A
$k_i$	0.0017 A/K
$n_s$	72 เซลล์
$n_p$	1 แถว



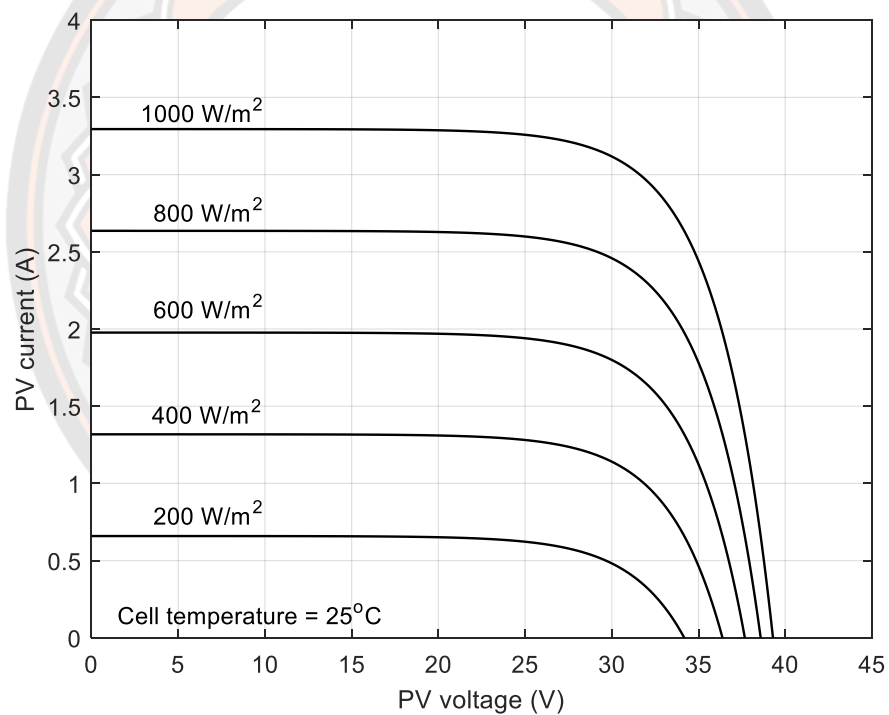
ภาพ 22 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้



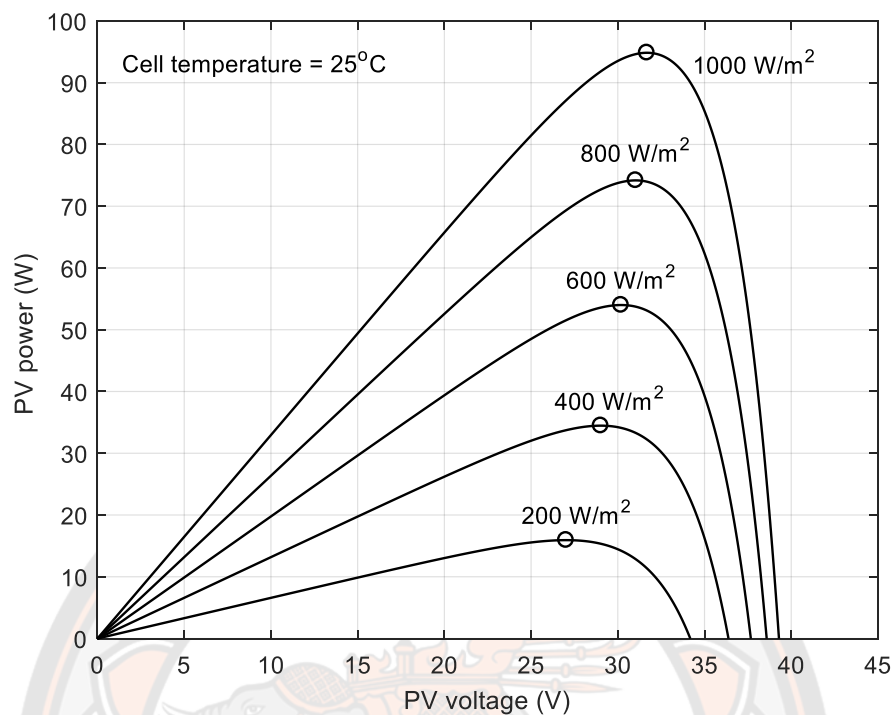
ภาพ 23 คุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้

คุณลักษณะด้านออกที่ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ

ในกรณีที่อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ  $25^{\circ}\text{C}$  การจำลองผลกระทบของค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีต่อค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดสามารถแสดงเป็นเส้นโค้งคุณลักษณะได้ดังภาพ 24 จะเห็นว่า เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น กระแสลัดวงจรของแผงจะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในลักษณะเป็นเชิงเส้น ในขณะที่แรงดันเปิดวงจรของแผงจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นและจุดกำลังสูงสุดของแผงมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งดังแสดงในภาพ 25 นั่นคือ เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น จุดกำลังสูงสุดจะย้ายไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่แรงดันด้านออกของแผงมีค่าสูงกว่าเดิม

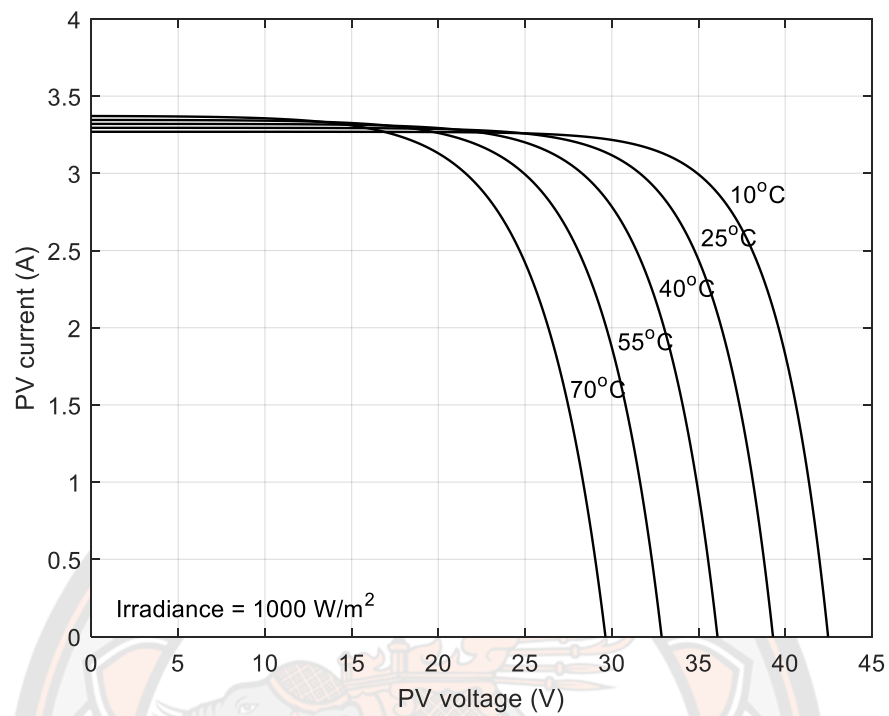


ภาพ 24 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันด้านออก

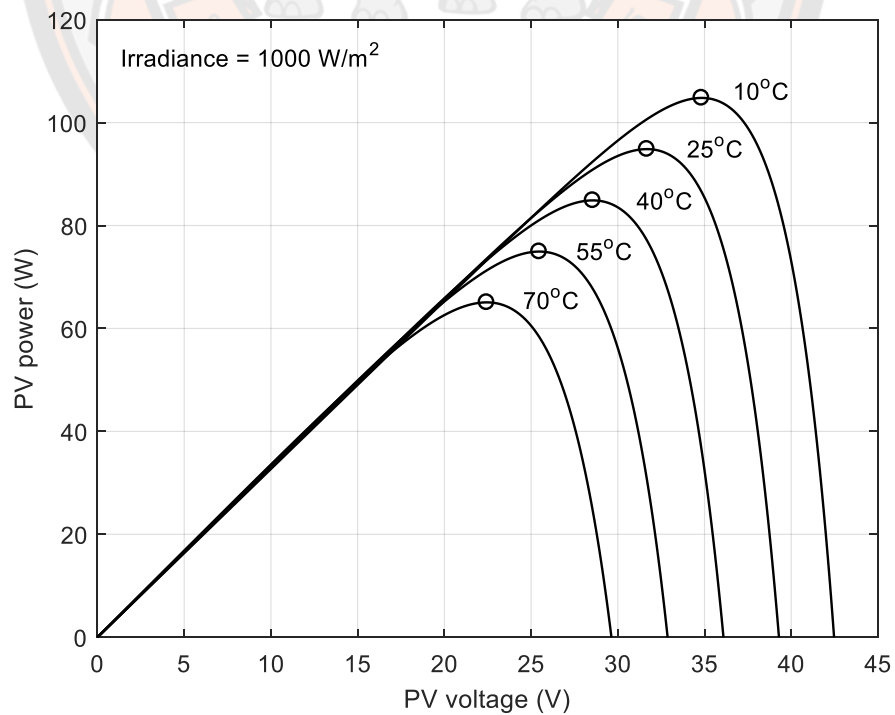


ภาพ 25 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออก

ในขณะที่ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงมีค่าคงที่เท่ากับ 1000 W/m<sup>2</sup> การจำลองผลกระทบของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต่อค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงที่กำหนดสามารถแสดงเป็นเส้นโค้งคุณลักษณะได้ดังภาพ 26 จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น กระแสลัดวงจรของแผงจะมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แรงดันเปิดวงจรของแผงจะมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดในลักษณะเป็นเชิงเส้น ส่งผลให้กำลังด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำลง และจุดกำลังสูงสุดของแผงมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งดังแสดงในภาพ 27 นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น จุดกำลังสูงสุดจะย้ายไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่แรงดันด้านออกของแผงมีค่าต่ำกว่าเดิม



ภาพ 26 ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันด้านออก



ภาพ 27 ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออก

การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  ด้วยการสวิตชิงของวงจรทระดับแรงดัน ดังนั้น พฤติกรรมการติดตามจุดกำลังสูงสุดย่อมได้รับผลจากการทำงานของวงจรทระดับแรงดันซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขนาดของอุปกรณ์ในวงจร

### การวิเคราะห์ผลตอบสนองในวงจรทระดับแรงดัน

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ผลตอบสนองของวงจรทระดับแรงดันด้วยวิธีเฉลี่ยปริภูมิสแตต (State-space averaging technique) [18] เพื่อนำไปสู่การกำหนดขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรทระดับแรงดันที่ใช้ในการจำลองผล เพื่อให้วงจรมีคุณลักษณะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุด

การเฉลี่ยปริภูมิสแตตสำหรับตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงแบบสวิตชิง

สำหรับตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงแบบสวิตชิงที่ทำงานในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous conduction mode, CCM) สามารถอธิบายด้วยสมการปริภูมิสแตต (State-space equations) สำหรับ 2 ช่วงของการสวิตชิง นั่นคือ ช่วงที่สวิตช์นำกระแส และช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส สมการปริภูมิสแตตสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

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

และ

$$y = cx$$

โดยที่  $x$  คือเวกเตอร์สแตต (State vector)

$y$  คือปริมาณด้านออก (Output)

$u$  คือปริมาณด้านเข้า (Input)

$A$  คือเมทริกซ์สแตต (State matrix)

$b$  คือเวกเตอร์ควบคุม (Control vector)

$c$  คือเวกเตอร์ทรานส์โพส (Transposed vector)

ในช่วงที่สวิตช์นำกระแส จะได้ว่า

$$\dot{x} = A_1x + b_1V_s \quad (3.4)$$

$$y = c_1x \quad (3.5)$$

และในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส จะได้ว่า

$$\dot{x} = A_2x + b_2V_s \quad (3.6)$$

$$y = c_2x \quad (3.7)$$

กำหนดฟังก์ชันสวิตชิง (Switching function,  $q$ ) ดังนี้

$$q = \begin{cases} 1 & \text{if the switch is on.} \\ 0 & \text{if the switch is off.} \end{cases}$$

และกำหนดให้

$$q' = 1 - q$$

เมื่อรวมฟังก์ชันสวิตชิง สามารถเขียนสมการปริภูมิสถานะได้ดังนี้

$$\dot{x} = (qA_1 + q'A_2)x + (qb_1 + q'b_2)V_s$$

$$y = (qc_1 + q'c_2)x$$

เราหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันสวิตชิงในคาบนั้น ๆ เพื่ออธิบายพฤติกรรมของวงจรตลอดช่วง 1 คาบสวิตชิง จะได้

$$d(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T_s} q(\tau) d\tau$$

โดยที่  $d(t)$  คือค่าตัวชี้เฉลี่ยในคาบที่สนใจ ดังนั้น จะได้สมการปริภูมิสถานะเฉลี่ยใน 1 คาบใด ๆ คือ

$$\dot{x} = (dA_1 + d'A_2)x + (db_1 + d'b_2)V_s = Ax + bV_s \quad (3.8)$$

$$y = (dc_1 + d'c_2)x = cx \quad (3.9)$$

โดยที่

$$A = dA_1 + d'A_2$$

$$b = db_1 + d'b_2$$

$$c = dc_1 + d'c_2$$

$$d' = 1 - d$$



ถ้าฟังก์ชัน  $q$  มีลักษณะซ้ำคาบ (Periodic) จะส่งผลให้  $d$  มีค่าคงที่ จะเรียกว่า “ค่าดิวตี้ไซเคิลในสถานะอยู่ตัว” (Steady-state duty cycle,  $D$ ) ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณขนาดเล็ก (Small-signal behavior) เราจะเพิ่มปริมาณที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (Perturbation) ในแรงดันด้านเข้าและดิวตี้ไซเคิล ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรสแตตและปริมาณด้านออกไปจากค่าในสถานะอยู่ตัว นั่นคือ

$$v_s = V_s + \tilde{v}_s \quad (3.10)$$

$$d = D + \tilde{d} \quad (3.11)$$

$$x = X + \tilde{x} \quad (3.12)$$

$$y = Y + \tilde{y} \quad (3.13)$$

ในสมการที่ (3.10)-(3.13) พจน์แรกทางด้านขวามือคือค่าในสถานะอยู่ตัว ส่วนพจน์ที่สองคือการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของแต่ละค่า หลังจากแทนสมการที่ (3.10)-(3.13) ในสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} = & AX + bV_s + A\tilde{x} + b\tilde{v}_s + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s]\tilde{d} \\ & + [(A_1 - A_2)\tilde{x} + (b_1 - b_2)\tilde{v}_s]\tilde{d} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$Y + \tilde{y} = cX + c\tilde{x} + (c_1 - c_2)X\tilde{d} + (c_1 - c_2)\tilde{x}\tilde{d} \quad (3.15)$$

จะเห็นว่า สมการที่ (3.14) และ (3.15) ไม่เป็นเชิงเส้นเพราะมีพจน์ที่เป็นอันดับที่สองของการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าในสถานะอยู่ตัว นั่นคือ  $\tilde{v}_s \ll V_s$ ,  $\tilde{d} \ll D$ , และ  $\tilde{x} \ll X$  ดังนั้นจึงสามารถตัดพจน์ที่เป็นอันดับที่สองทิ้งได้เพื่อทำให้ได้สมการปรีกวมิสเตตที่เป็นเชิงเส้นและมีพจน์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิล  $\tilde{d}$  รวมอยู่ด้วย ในที่สุดเราสามารถหาสมการในสถานะอยู่ตัว (Steady-state equation หรือ DC equation) ได้ นั่นคือ

$$X = -A^{-1}bV_s \quad (3.16)$$

และ 
$$Y = cX \quad (3.17)$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาสมการสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก (AC small-signal equation) คือ

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + b\tilde{v}_s + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s]\tilde{d} \quad (3.18)$$

และ 
$$\tilde{y} = c\tilde{x} + (c_1 - c_2)X\tilde{d} \quad (3.19)$$

เมื่อใช้ผลการแปลงลาปลาซ จะได้

$$\tilde{x}(s) = (sI - A)^{-1}[b\tilde{v}_s(s) + \{(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s\}\tilde{d}(s)] \quad (3.20)$$

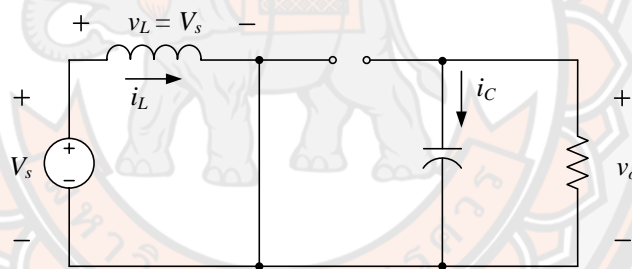
และ 
$$\tilde{y}(s) = c\tilde{x}(s) + (c_1 - c_2)X\tilde{d}(s) \quad (3.21)$$

โดยเราอาจใช้สมการในสถานะอยู่ตัว (สมการที่ (3.16) และ (3.17)) และใช้สมการสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก (สมการที่ (3.20) และ (3.21)) ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองในวงจรทระดับแรงดันซึ่งจัดเป็นตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงแบบสวิตชิงได้

การวิเคราะห์วงจรทระดับแรงดันด้วยวิธีเฉลี่ยปริภูมิสเตต

ผลตอบสนองในวงจรทระดับแรงดันที่เราสนใจคือ กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) และแรงดันด้านออก ( $v_o$ ) ซึ่งเป็นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ดังนั้น ในที่นี้เราจึงกำหนดให้ปริมาณทั้งสองเป็นตัวแปรสเตตในการวิเคราะห์ด้วยวิธีเฉลี่ยปริภูมิสเตต

พิจารณาแผนภาพวงจรในช่วงที่สวิตช์นำกระแสดังภาพ 28



ภาพ 28 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส

ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในวงรอบด้านซ้ายจะได้สมการของแรงดันดังนี้

$$-V_s + v_L = 0$$

$$-V_s + L \frac{di_L}{dt} = 0$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (3.22)$$

และใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนดบนของตัวเก็บประจุจะได้สมการของกระแสดังนี้

$$i_c + \frac{v_o}{R} = 0$$

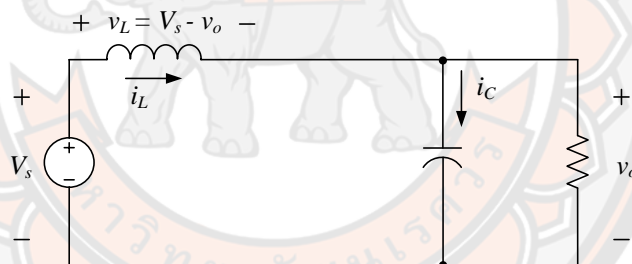
$$C \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R} = 0$$

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{RC} \quad (3.23)$$

ซึ่งเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_s \quad (3.24)$$

พิจารณาแผนภาพวงจรในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแสดังภาพ 29



ภาพ 29 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในวงรอบด้านซ้ายจะได้สมการของแรงดันดังนี้

$$-V_s + v_L + v_o = 0$$

$$-V_s + L \frac{di_L}{dt} + v_o = 0$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_o}{L} + \frac{V_s}{L} \quad (3.25)$$

และใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โนดบนของตัวเก็บประจุจะได้สมการของกระแสดังนี้

$$i_C + \frac{v_o}{R} - i_L = 0$$

$$C \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R} - i_L = 0$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC} \quad (3.26)$$

ซึ่งเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_s \quad (3.27)$$

ในขณะที่แรงดันด้านออกของทั้งสองช่วงคือ

$$v_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

หลังจากเปรียบเทียบสมการที่ (3.22)-(3.28) กับ (3.4)-(3.7) จะได้

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/RC \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix}$$

$$b_1 = b_2 = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$c_1 = c_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อใช้สมการที่ (3.16) จะได้สมการในสถานะอยู่ตัว คือ

$$\begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} = -\frac{1}{D^2/LC} \begin{bmatrix} -1/RC & D'/L \\ -D'/C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_s$$

$$\begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/D^2 R \\ 1/D' \end{bmatrix} V_s$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$I_L = \frac{V_s}{D'^2 R} \quad (3.29)$$

$$V_o = \frac{V_s}{D'} = \frac{1}{1-D} V_s \quad (3.30)$$

สมการที่ (3.30) แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านเข้า และมีค่าขึ้นอยู่กับดิวตีไซเคิล

เมื่อใช้สมการที่ (3.18) จะได้สมการสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_L \\ \dot{\tilde{v}}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -D'/L \\ D'/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{v}_g + \begin{bmatrix} V_o/L \\ -I_L/C \end{bmatrix} \tilde{d}$$

หลังจากใช้สมการที่ (3.20) จะได้

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_L(s) \\ \tilde{v}_o(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s^2 + s/RC + D'^2/LC} \begin{bmatrix} s+1/RC & -D'/L \\ D'/C & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{v}_g(s) + \frac{1}{s^2 + s/RC + D'^2/LC} \begin{bmatrix} s+1/RC & -D'/L \\ D'/C & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'/L \\ -1/RC \end{bmatrix} \frac{V_s}{D'^2} \tilde{d}(s) \quad (3.31)$$

ซึ่งทำให้เราเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ได้ดังนี้

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{v}_g(s)} = \frac{1}{D'} \cdot \frac{D'^2/LC}{s^2 + s/RC + D'^2/LC} \quad (3.32)$$

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_s}{D'^2} \cdot \frac{D'^2/LC}{s^2 + s/RC + D'^2/LC} \left(1 - s \frac{L}{RD'^2}\right) \quad (3.33)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (3.32) และ (3.33) กับรูปมาตรฐานของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับที่สองที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

จะได้ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency,  $\omega_n$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\omega_n = \frac{D'}{\sqrt{LC}} \quad (3.34)$$

และตัวประกอบการหน่วง (Damping factor,  $\zeta$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\zeta = \frac{1}{2D'R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.35)$$

จะเห็นได้ว่า นอกจากค่าตัวชี้โซเคิลและความต้านทานของโหลดแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำและความจุส่งผลต่อผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) ในวงจรทระดับแรงดัน ดังนั้น เราจึงใช้สมการความสัมพันธ์ข้างต้นในการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ที่เหมาะสมในวงจร

### การจำลองผลตอบสนองในวงจรทระดับแรงดัน

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันต้านออกของวงจรทระดับแรงดันถูกอธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ การจำลองผลตอบสนองในวงจรทระดับแรงดันในงานวิจัยนี้จึงอาศัยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) เพื่อคำนวณผลเฉลยโดยประมาณ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการหาสมการในแต่ละช่วงการทำงานของสวิตช์ในวงจรเพื่อนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับการจำลองผลตอบสนองของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันต้านออกของวงจร

การหาผลเฉลยโดยประมาณด้วยวิธีเชิงตัวเลข

เราสามารถหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equations) ได้โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีของออยเลอร์ (Euler's method) ระเบียบวิธีของฮวน (Heun's method) ระเบียบวิธีของออยเลอร์ที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Euler's method) เป็นต้น โดยแต่ละระเบียบวิธีดังกล่าวมีรายละเอียด [19] ดังนี้

ระเบียบวิธีของออยเลอร์จัดเป็นระเบียบวิธีที่ง่ายแก่การทำความเข้าใจมากที่สุด ซึ่งเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

เราจะหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ  $y_{i+1}$  ที่  $x_{i+1}$  จากผลลัพธ์  $y_i$  ซึ่งรู้ค่าที่  $x_i$  โดยใช้ค่าความชันที่  $x_i$  ดังนี้

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{h}$$

โดยที่  $h = x_{i+1} - x_i$  คือ ขนาดก้าว (Step size) ที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อแทนค่าของความชันที่  $x_i$  จะได้

$$y_{i+1} = y_i + f(x, y) \cdot h \quad (3.36)$$

นั่นคือ เราสามารถคำนวณโดยเริ่มจากเงื่อนไขเริ่มต้นของ  $y_i$  ที่  $x_i$  แล้วคำนวณค่า  $y_{i+1}$  ใหม่จากขนาดก้าว  $h$  ที่กำหนดให้

ความเที่ยงตรงของผลเฉลยโดยประมาณนั้นขึ้นอยู่กับค่า  $h$  ที่ใช้ กล่าวคือ ยิ่งใช้  $h$  ที่มีค่าน้อยเท่าใดก็จะได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้นเท่านั้น ค่าความผิดพลาดเกิดจากค่าความผิดพลาดในการหาผลเฉลยโดยประมาณโดยใช้สูตรของออยเลอร์และค่าความผิดพลาดสะสมซึ่งถูกนำมาใช้หาผลลัพธ์ใหม่อย่างต่อเนื่อง ค่าความผิดพลาดจะลดลงหากเราลดขนาดของขนาดก้าว  $h$

นอกจากการลดขนาดก้าว  $h$  แล้วเรายังพบว่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีของออยเลอร์จะมีความเที่ยงตรงมากขึ้นหากเราหาค่าความชัน ( $y' = dy/dx$ ) ที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น แนวคิดนี้เป็นที่มาของระเบียบวิธีของฮวนซึ่งดัดแปลงมาจากระเบียบวิธีของออยเลอร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น โดยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกเป็นการทำนายค่าโดยประมาณที่  $x_{i+1}$  ก่อให้เกิดผลลัพธ์  $y_{i+1}^0$  ซึ่งจะถูกใช้คำนวณค่าความชันที่  $x_{i+1}$  ค่าความชันที่ได้นี้จะนำไปใช้หาค่าความชันเฉลี่ยในขั้นตอนที่สองเพื่อใช้หาผลลัพธ์  $y_{i+1}$

การคำนวณค่าความชันในระเบียบวิธีของฮวนนั้นเริ่มจากการคำนวณค่าความชันที่จุดต้นของขนาดก้าวที่ตำแหน่ง  $x_i$  นั่นคือ

$$y' = f(x_i, y_i)$$

จากนั้นนำไปใช้คำนวณค่าผลเฉลยโดยประมาณที่  $x_{i+1}$  ดังนี้

$$y_{i+1}^0 = y_i + f(x_i, y_i) \cdot h$$

หากเรานำค่าที่ได้นี้ไปคำนวณค่าความชันที่จุดปลายของขนาดก้าวที่  $x_{i+1}$  จะได้

$$y'_{i+1} = f(x_{i+1}, y_{i+1}^0)$$

แล้วหาค่าเฉลี่ยของความชันที่จุดต้นกับจุดปลายของขนาดก้าวข้างต้น เราได้ว่า

$$\bar{y}' = \frac{y'_i + y'_{i+1}}{2} = \frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1}^0)}{2}$$

จากนั้นเราจึงนำค่าความชันเฉลี่ยนี้มาคำนวณที่จุดต้นเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดปลายของขนาดก้าวซึ่งจะมีความเที่ยงตรงมากขึ้น นั่นคือ

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1}^0)}{2} \cdot h \quad (3.37)$$

นอกจากนี้แนวคิดที่จะคำนวณค่าความชันที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้นยังก่อให้เกิดระเบียบวิธีของออยเลอร์ที่ปรับปรุงแล้ว โดยหาค่าความชันที่จุดกึ่งกลางของขนาดก้าว  $h$  แล้วใช้ค่าความชันนี้หาผลลัพธ์ที่จุดปลายของขนาดก้าวที่ต้องการ ทั้งนี้เริ่มจากการใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์เดิมเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดกึ่งกลางของขนาดก้าว นั่นคือ

$$y_{i+1/2} = y_i + f(x_i, y_i) \cdot \frac{h}{2}$$

จากนั้นคำนวณค่าความชันที่จุดกึ่งกลางของขนาดก้าว

$$y'_{i+1/2} = f(x_{i+1/2}, y_{i+1/2})$$

แล้วใช้ค่าความชันนี้หาผลลัพธ์ที่จุดปลายของขนาดก้าว จะได้ว่า

$$y_{i+1} = y_i + f(x_{i+1/2}, y_{i+1/2}) \cdot h \quad (3.38)$$

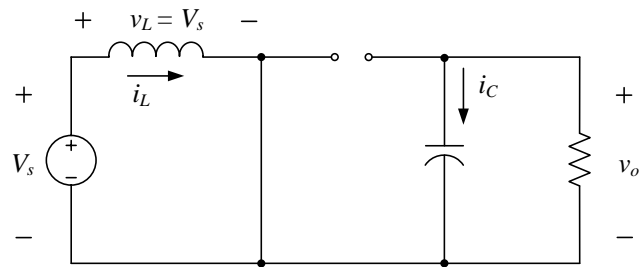
จากการศึกษารายละเอียดและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีทั้งสามดังกล่าวจะพบว่า เมื่อพิจารณาที่ค่าขนาดก้าวเท่ากันระเบียบวิธีของออยเลอร์ที่ปรับปรุงแล้วสามารถคำนวณผลเฉลยโดยประมาณที่มีความเที่ยงตรงที่สุด อย่างไรก็ตาม หากกำหนดให้ขนาดก้าวมีค่าน้อยเพียงพอผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีทั้งสามจะมีค่าใกล้เคียงกันและมีความเที่ยงตรงสูง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์เพื่อลดความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองผลตอบสนองในวงจรทระดับแรงดัน นั่นคือ กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันต้านออก และใช้การเปลี่ยนแปลงของเวลา ( $\Delta t$ ) เป็นขนาดก้าวสำหรับการประมาณค่ากระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันต้านออก โดยกำหนดให้มิต้านน้อยเพียงพอให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง

การหาสมการเพื่อการจำลองผลตอบสนอง

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทระดับแรงดันสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาตามสถานะของสวิตช์คือ ช่วงที่สวิตช์นำกระแสและช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส การเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองผลตอบสนองในวงจรจึงจำเป็นต้องใช้สมการที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันต้านออกในแต่ละช่วงเวลาตามสถานะของสวิตช์

เราหาสมการที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทั้งสองดังกล่าวในช่วงที่สวิตช์นำกระแสได้โดยพิจารณาจากภาพ 30





ภาพ 30 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส

ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในวงรอบด้านซ้ายจะได้สมการของแรงดันดังนี้

จะได้

$$-V_s + v_L = 0$$

จาก

$$v_L = V_s$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}$$

แทนค่า  $v_L$  และจัดรูป จะได้

$$\Delta i_L = \frac{V_s}{L} \cdot \Delta t$$

$$i_{L,new} - i_{L,old} = \frac{V_s}{L} \cdot \Delta t$$

$$i_{L,new} = i_{L,old} + \frac{V_s}{L} \cdot \Delta t \quad (3.39)$$

และใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนดบนของตัวเก็บประจุจะได้สมการของกระแสดังนี้

$$i_C + \frac{v_o}{R} = 0$$

จาก

$$i_C = C \frac{dv_o}{dt} = C \frac{\Delta v_o}{\Delta t}$$

แทนในสมการข้างต้น จะได้

$$C \frac{\Delta v_o}{\Delta t} + \frac{v_o}{R} = 0$$

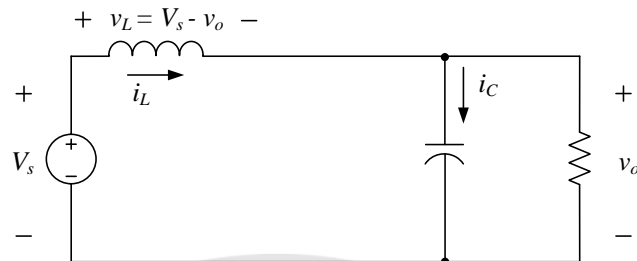
จัดรูป เราได้ว่า

$$\Delta v_o = -\frac{v_o}{RC} \cdot \Delta t$$

$$v_{o,new} - v_{o,old} = -\frac{v_o}{RC} \cdot \Delta t$$

$$v_{o,new} = v_{o,old} - \frac{v_o}{RC} \cdot \Delta t \quad (3.40)$$

เราหาสมการที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันด้านออก ในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแสได้โดยพิจารณาจากภาพ 31



ภาพ 31 วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในวงรอบด้านซ้ายจะได้สมการของแรงดันดังนี้

$$-V_s + v_L + v_o = 0$$

จะได้

$$v_L = V_s - v_o$$

จาก

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}$$

แทนค่า  $v_L$  และจัดรูป จะได้

$$\Delta i_L = \frac{(V_s - v_o)}{L} \cdot \Delta t$$

$$i_{L,new} - i_{L,old} = \frac{(V_s - v_{o,old})}{L} \cdot \Delta t$$

$$i_{L,new} = i_{L,old} + \frac{(V_s - v_{o,old})}{L} \cdot \Delta t \quad (3.41)$$

และใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนดบนของตัวเก็บประจุจะได้สมการของกระแสดังนี้

$$i_C + \frac{v_o}{R} - i_L = 0$$

จาก

$$i_C = C \frac{dv_o}{dt} = C \frac{\Delta v_o}{\Delta t}$$

แทนในสมการข้างต้น จะได้

$$C \frac{\Delta v_o}{\Delta t} + \frac{v_o}{R} - i_L = 0$$

จัดรูป จะได้

$$\Delta v_o = \left[ \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC} \right] \cdot \Delta t$$

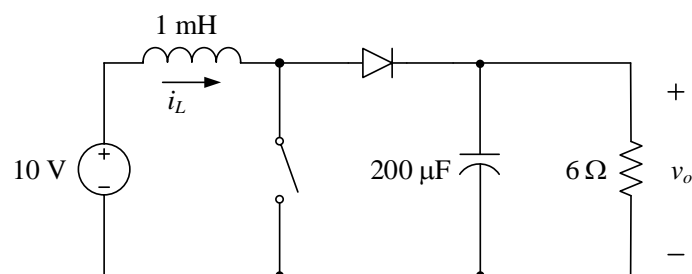
$$v_{o,new} - v_{o,old} = \left[ \frac{i_L}{C} - \frac{v_{o,old}}{RC} \right] \cdot \Delta t$$

$$v_{o,new} = v_{o,old} + \left[ \frac{i_L}{C} - \frac{v_{o,old}}{RC} \right] \cdot \Delta t \quad (3.42)$$

การจำลองค่ากระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันด้านออก

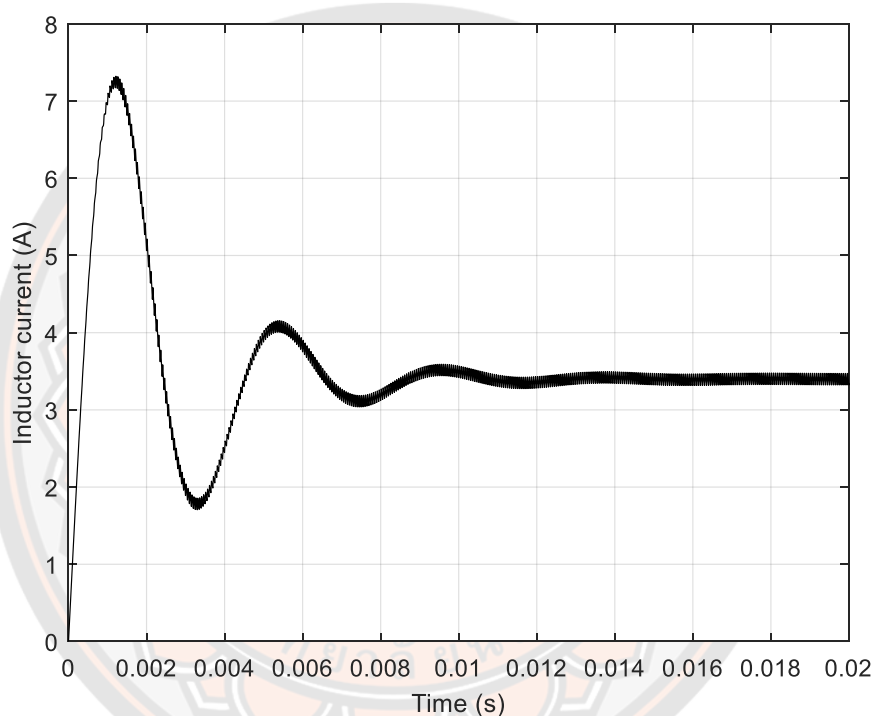
การเปลี่ยนแปลงกระแสของตัวเหนี่ยวนำและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับแรงดันเมื่อทำงานที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่ำและที่ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงจะถูกวิเคราะห์ด้วยการจำลองผลเพื่อไม่ให้มีค่าพุ่งเกิน (Overshoot) สูงเกินจนทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจรเกิดความเสียหาย และให้มีช่วงเวลาขึ้น (Rise time) และช่วงเวลาเข้าที่ (Setting time) ของสัญญาณไม่นานเกินไปเพื่อให้วงจรสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ รวมทั้งความพลัวของสัญญาณในสถานะอยู่ตัวมีค่าไม่มากเกินไปเพื่อให้โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าค่อนข้างคงที่

การจำลองผลในโปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองในวงจรทบทระดับแรงดัน อยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีของออยเลอร์โดยใช้สมการที่ (3.39)-(3.42) โดยกำหนดให้วงจรทำงานที่ความถี่สวิตชิ่ง 20 kHz ในการเลือกขนาดของอุปกรณ์ในวงจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาร่วมกับสมการที่ (2.16) (3.34) และ (3.35) ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ 1 mH ตัวเก็บประจุด้านออก 200  $\mu$ F โดยที่วงจรจ่ายโหลดตัวต้านทาน 6  $\Omega$  ดังแสดงในภาพ 32 โดยแสดงผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันด้านออกของวงจรที่ค่าดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.3 และ 0.7 เพื่อแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวงจรเมื่อทำงานที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่ำและที่ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงตามลำดับ

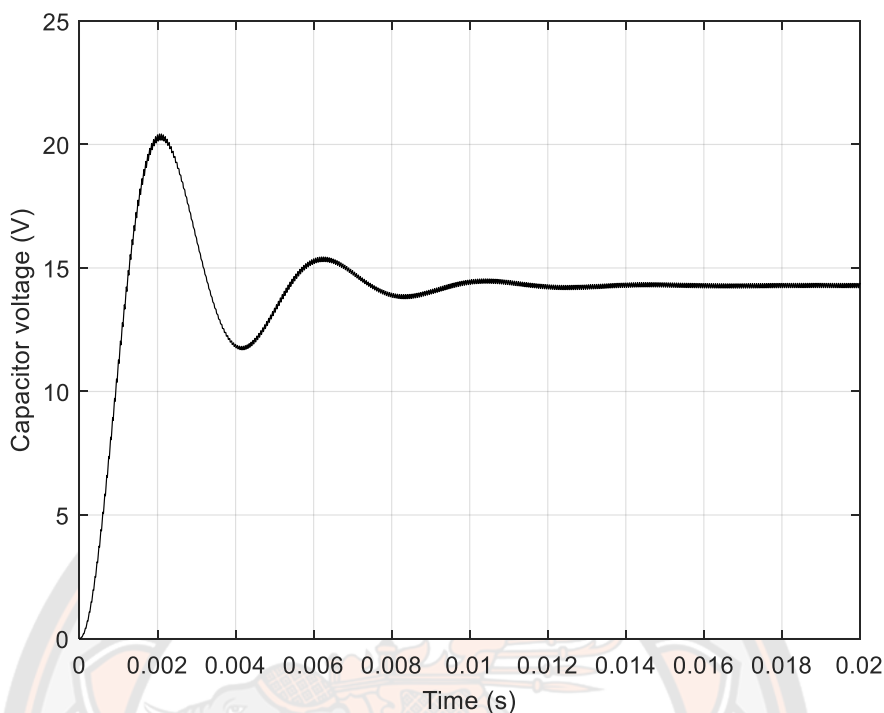


ภาพ 32 แผนภาพวงจรทบทระดับแรงดันที่ใช้ในการจำลองผลตอบสนอง

สำหรับการจำลองผลที่ค่าตัวตั้งไซเคิลเท่ากับ 0.3 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังภาพ 33 ซึ่งมีค่าพุ่งเกินเท่ากับ 114.7% มีช่วงเวลาดำเนินเท่ากับ 0.3 ms มีช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 15.5 ms โดยในสถานะอยู่ตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 A และมีความพลัวเท่ากับ 3.97% ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันด้านออกแสดงดังภาพ 34 ซึ่งมีค่าพุ่งเกินเท่ากับ 42.8% มีช่วงเวลาดำเนินเท่ากับ 1.225 ms มีช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 11 ms โดยในสถานะอยู่ตัว แรงดันด้านออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.29 V และมีค่าความพลัวเท่ากับ 1.25%



ภาพ 33 ผลการจำลองสัญญาณกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่  $D = 0.3$



ภาพ 34 ผลการจำลองสัญญาณแรงดันด้านออกที่  $D = 0.3$

หากต้องการนำผลที่ได้จากการคำนวณตามหลักการและทฤษฎีของวงจรทระดับแรงดันที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 มาเปรียบเทียบกับค่าต่าง ๆ ชำ้ต้นที่ได้จากการจำลองผล จะได้ว่า เราคำนวณค่าแรงดันด้านออกได้เป็น

$$V_o = \frac{1}{1-D} \cdot V_s = \frac{1}{1-0.3} \times 10 = 14.29 \text{ V}$$

ซึ่งเท่ากับค่าที่ได้จากการจำลองที่แสดงในภาพ 34 และเราหาค่ากระแสด้านออกได้ว่า

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{14.29}{6} = 2.38 \text{ A}$$

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้า จึงได้

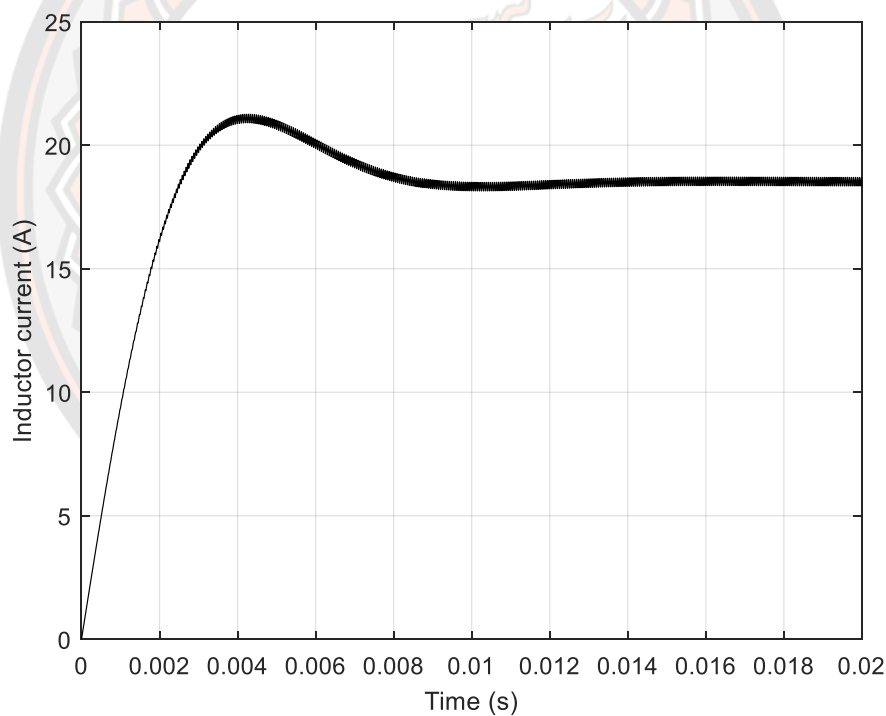
$$I_L = I_s = \frac{V_o I_o}{V_s} = \frac{14.29 \times 2.38}{10} = 3.4 \text{ A}$$

ซึ่งเท่ากับค่าที่ได้จากการจำลองที่แสดงในภาพ 33 และหาค่าความพลีวของแรงดันด้านออกได้ว่า

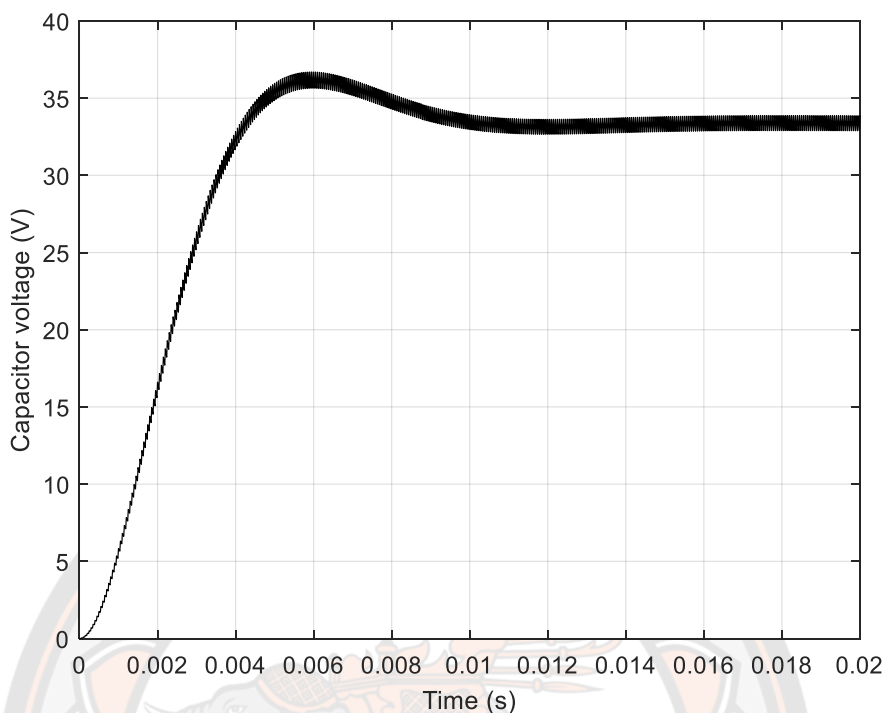
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} = \frac{0.3}{6 \times 200 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^3} = 1.25\%$$

ซึ่งเท่ากับค่าที่ได้จากผลการจำลองที่แสดงในภาพ 34 แสดงว่า การจำลองผลโดยใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์ในงานวิจัยนี้มีความเที่ยงตรง

สำหรับการจำลองผลที่ค่าตัวดีไซเคิลเท่ากับ 0.7 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังภาพ 35 ซึ่งมีค่าพุ่งเกินเท่ากับ 14.56% มีช่วงเวลายื่นเท่ากับ 2.55 ms มีช่วงเวลายื่นที่เท่ากับ 11.5 ms โดยในสถานะอยู่ตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.53 A และมีความพลัวเท่ากับ 1.89% ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันด้านออกแสดงดังภาพ 36 ซึ่งมีค่าพุ่งเกินเท่ากับ 9.88% มีช่วงเวลายื่นเท่ากับ 4.15 ms มีช่วงเวลายื่นที่เท่ากับ 13 ms โดยในสถานะอยู่ตัว แรงดันด้านออกมีเฉลี่ยเท่ากับ 33.33 V และมีความพลัวเท่ากับ 2.88%



ภาพ 35 ผลการจำลองสัญญาณกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่  $D = 0.7$



ภาพ 36 ผลการจำลองสัญญาณแรงดันด้านออกที่  $D = 0.7$

หากนำผลที่ได้จากการคำนวณตามหลักการและทฤษฎีของวงจรระดับแรงดันที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 มาเปรียบเทียบกับค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองผลข้างต้น จะได้ว่า เราคำนวณค่าแรงดันด้านออกได้เป็น

$$V_o = \frac{1}{1-D} \cdot V_s = \frac{1}{1-0.7} \times 10 = 33.33 \text{ V}$$

ซึ่งเท่ากับค่าที่ได้จากการจำลองที่แสดงในภาพ 36 และเราหาค่ากระแสด้านออกได้ว่า

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{33.33}{6} = 5.56 \text{ A}$$

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้า จึงได้

$$I_L = I_s = \frac{V_o I_o}{V_s} = \frac{33.33 \times 5.56}{10} = 18.53 \text{ A}$$

ซึ่งเท่ากับค่าที่ได้จากการจำลองที่แสดงในภาพ 35 ในขณะที่คำนวณค่าความพลีวของแรงดันด้านออกได้ว่า

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} = \frac{0.7}{6 \times 200 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^3} = 2.92\%$$

เราพบว่า ค่าความพลิวที่อ่านได้จากผลการจำลองในภาพ 36 มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการคำนวณเพียง 1.37% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การจำลองผลโดยใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์ในงานวิจัยนี้มีความเที่ยงตรง

### การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่ม

วิธีความนำส่วนเพิ่มถูกนำมาใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง ในวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มทั้งแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าว โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อจำลองผลทั้งแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าว และนำเสนอหลักการแปรผันขนาดก้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งอาศัยการควบคุมค่าดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Delta V_{pv}$ ) ตามที่ต้องการ โดยเราจะตรวจสอบตำแหน่งปัจจุบันของจุดทำงานของแผงเทียบกับจุดกำลังสูงสุดเสียก่อน เมื่อพิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะพบว่า ตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดจะเยื้องไปทางด้านขวาของเส้นโค้งเสมอ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จุดทำงานเริ่มต้นน่าจะอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด ในที่นี้เราจึงเขียนโปรแกรมให้ลดค่าดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อเพิ่มแรงดันด้านออกของแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางขวา และถ้าตรวจพบว่าขณะนี้จุดทำงานอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด โปรแกรมจะลดค่าดิฟเฟอเรนเชียลต่อไปเพื่อขยับจุดทำงานเข้าหาจุดกำลังสูงสุด แต่ถ้าตรวจพบว่าจุดทำงานอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่ากำลังขยับออกห่างจากจุดกำลังสูงสุด ค่าดิฟเฟอเรนเชียลจะถูกเพิ่มให้สูงขึ้นเพื่อลดแรงดันด้านออกแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางซ้าย ทั้งนี้ เรากำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันด้านออกของแผงที่ต้องการในแต่ละก้าว ( $\Delta V_{pv}^*$ ) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.01 V สำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าวเพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งของจุดทำงานรอบจุดกำลังสูงสุด และกำหนดใช้ค่า 0.01 V เป็นค่าต่ำสุดของ  $\Delta V_{pv}^*$  ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าว

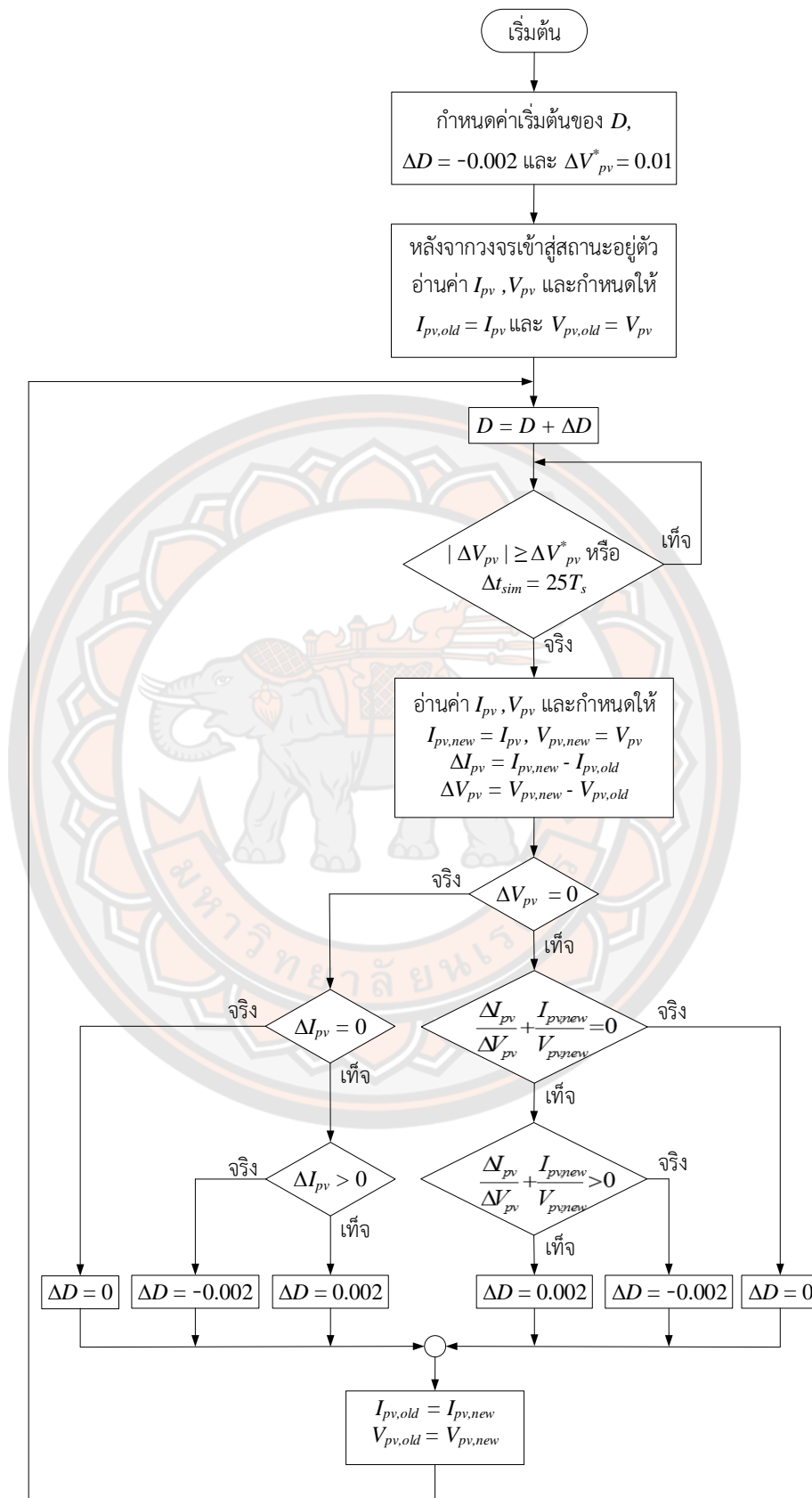
### การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว

การทำงานของโปรแกรมจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนดังแสดงในภาพ 37 โดยเริ่มจากกำหนดค่า



ดิวิตซ์ไฮเคิลเริ่มต้นสำหรับวงจรทระดับแรงดัน และใช้การเปลี่ยนแปลงค่าดิวิตซ์ไฮเคิล ( $\Delta D$ ) เป็นขนาดก้าวสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.002 หลังจากวงจรทระดับแรงดันทำงานที่ค่าดิวิตซ์ไฮเคิลเริ่มต้นจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้วจึงบันทึกค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ จากนั้นให้ปรับลดค่าดิวิตซ์ไฮเคิลเพื่อเริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุดหลังจากที่วงจรทระดับแรงดันทำงานที่ดิวิตซ์ไฮเคิลค่าใหม่จนกระทั่งแรงดันด้านออกของแผงมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่น้อยกว่า 0.01 V จึงอ่านค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงแล้วนำมาคำนวณตามหลักการของวิธีความนำส่วนเพิ่ม นั่นคือ ถ้าแรงดันด้านออกมีค่าเปลี่ยนแปลง และพบว่าจุดทำงานปัจจุบันอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดแล้ว เราจะไม่เปลี่ยนค่าดิวิตซ์ไฮเคิลเพราะไม่ต้องการย้ายจุดทำงาน แต่ถ้าจุดทำงานปัจจุบันอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด เราจะลดค่าดิวิตซ์ไฮเคิลเพื่อเพิ่มค่าแรงดันด้านออกของแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางขวา แต่ถ้าจุดทำงานปัจจุบันอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด เราจะเพิ่มค่าดิวิตซ์ไฮเคิลเพื่อลดแรงดันด้านออกของแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางซ้าย อย่างไรก็ตามภายในระยะเวลา 25 คาบสวิตชิงซึ่งนานเพียงพอที่จะทำให้แรงดันด้านออกของแผงเปลี่ยนแปลงไม่น้อยกว่า 0.01 V ถ้า  $\Delta V_{pv}$  ยังมีค่าน้อยกว่า 0.01 V เราจะอ่านค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงแล้วดำเนินการตามหลักการของวิธีความนำส่วนเพิ่มต่อไปทันทีเพื่อไม่ให้จุดทำงานค้างอยู่กับที่จนกว่าจะพบจุดกำลังสูงสุด แต่เนื่องจากขนาดก้าว  $\Delta D$  อาจทำให้เกิดการแกว่งของจุดทำงานรอบจุดกำลังสูงสุดเป็นเวลานานก่อนพบจุดกำลังสูงสุด เพราะการติดตามจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อคำนวณผลบวกของค่าความนำส่วนเพิ่มกับค่าความนำขณะหนึ่งได้เท่ากับศูนย์ตามสมการที่ (2.12) เท่านั้น แม้การเลือกใช้ขนาดก้าวที่เล็กลงจะช่วยลดการแกว่งดังกล่าวของจุดทำงาน แต่ค่า  $\Delta D$  ที่ต่ำเกินไปอาจไม่มีผลทำให้ค่าของแรงดันด้านออกของแผงเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปจึงยอมให้การติดตามสิ้นสุดลงเมื่อผลบวกของค่าความนำส่วนเพิ่มกับค่าความนำขณะหนึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ตัวค่าต่ำ ๆ ค่าหนึ่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเลข 0.002

หลังจากที่จุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดแล้ว จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดิวิตซ์ไฮเคิลจนกว่าจะตรวจพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง โดยตรวจวัดจากค่ากระแสด้านออกของแผงนั่นเอง กล่าวคือ ในขณะที่แรงดันด้านออกของแผงมีค่าคงที่ ถ้ากระแสด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้นแสดงว่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้จุดกำลังสูงสุดย้ายไปทางขวา เราจะลดค่าดิวิตซ์ไฮเคิลเพื่อเพิ่มค่าแรงดันด้านออกของแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางขวา แต่ถ้ากระแสด้านออกของแผงมีค่าลดลงแสดงว่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าลดลงซึ่งทำให้จุดกำลังสูงสุดย้ายไปทางซ้าย เราจะเพิ่มค่าดิวิตซ์ไฮเคิลเพื่อลดแรงดันด้านออกของแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางซ้าย



ภาพ 37 ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว

หลักการแปรผันขนาดก๊าวที่นำเสนอในงานวิจัย

ถึงแม้การแปรผันขนาดก๊าวเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำตัวประกอบที่มีค่าต่างกันมาคูณกับขนาดก๊าวที่ตรงไว้ หรือการนำตัวประกอบค่าหนึ่งมาคูณกับค่าความชันของเส้นโค้งกำลัง-แรงดัน แต่การหาค่าที่เหมาะสมของตัวประกอบในวิธีดังกล่าวทำได้ยากเพราะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง งานวิจัยนี้นำเสนอหลักการแปรผันขนาดก๊าวที่ไม่ต้องใช้ตัวประกอบมาคูณและไม่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังและกระแสด้านออกของแผงเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันด้านออกของแผงที่ต้องการในแต่ละก๊าว ( $\Delta V_{pv}^*$ ) แล้วคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าดิฟเฟอเรนเชียล ( $\Delta D$ ) ที่สอดคล้องกับ  $\Delta V_{pv}^*$  เพื่อย้ายจุดทำงานของแผงให้ไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด โดยเริ่มการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า นั่นคือ

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv}$$

หาอนุพันธ์เทียบ  $V_{pv}$  ทั้งสมการ จะได้

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv}$$

จัดรูปสมการ จะได้

$$dV_{pv} = \frac{dP_{pv}}{V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv}}$$

ซึ่งเราอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta V_{pv}^* = \frac{|\Delta P_{pv}|}{V_{pv} \left| \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv, \max}} \right| + I_{pv}} \quad (3.43)$$

โดยที่  $\Delta V_{pv}^*$  คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของแผงที่ต้องการ และ  $\Delta V_{pv, \max}$  คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของแผงสูงสุด และจะเห็นได้ว่าเราสามารถเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันด้านออกของแผงเซลล์อาทิตย์โดยอาศัยการสวิตชิงของวงจรระดับแรงดัน และการควบคุมค่าดิฟเฟอเรนเชียลของวงจรส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมแรงดันด้านออกของแผง เราจึงกำหนดใช้การเปลี่ยนแปลงของค่าดิฟเฟอเรนเชียล ( $\Delta D$ ) เป็นขนาดก๊าวสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่สัมพันธ์กับ  $\Delta V_{pv}^*$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.43)

ในที่นี้ เราพัฒนาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta D$  กับ  $\Delta V_{pv}^*$  โดยพิจารณาจาก อัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันดังนี้

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

จัดรูป จะได้  $V_s = (1-D)V_o$

หาอนุพันธ์เทียบ  $D$  ทั้งสมการ จะได้ว่า

$$\frac{dV_s}{dD} = (1-D) \frac{dV_o}{dD} - V_o$$

$$dV_s = (1-D)dV_o - V_o dD$$

$$dD = \frac{(1-D)dV_o - dV_s}{V_o}$$

ซึ่งเราอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta D = \frac{(1-D)\Delta V_o - \Delta V_{pv}^*}{V_o} \quad (3.44)$$

โดยที่  $\Delta D$  คือขนาดก้าวของการติดตามจุดกำลังสูงสุด และจะเห็นได้ว่า ในการควบคุมให้แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามต้องการนั้นจำเป็นต้องรู้การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันด้านออกของวงจรทระดับแรงดันด้วย

ในกรณีที่แรงดันด้านออกของวงจรทระดับแรงดันมีค่าคงที่หรือมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับความถี่สวิตชิง ดังเช่นในงานวิจัยนี้ที่มีแบตเตอรี่เป็นโหลด เราสามารถลดความยุ่งยากในการคำนวณค่า  $\Delta D$  ในสมการที่ (3.44) โดยเขียนเป็น

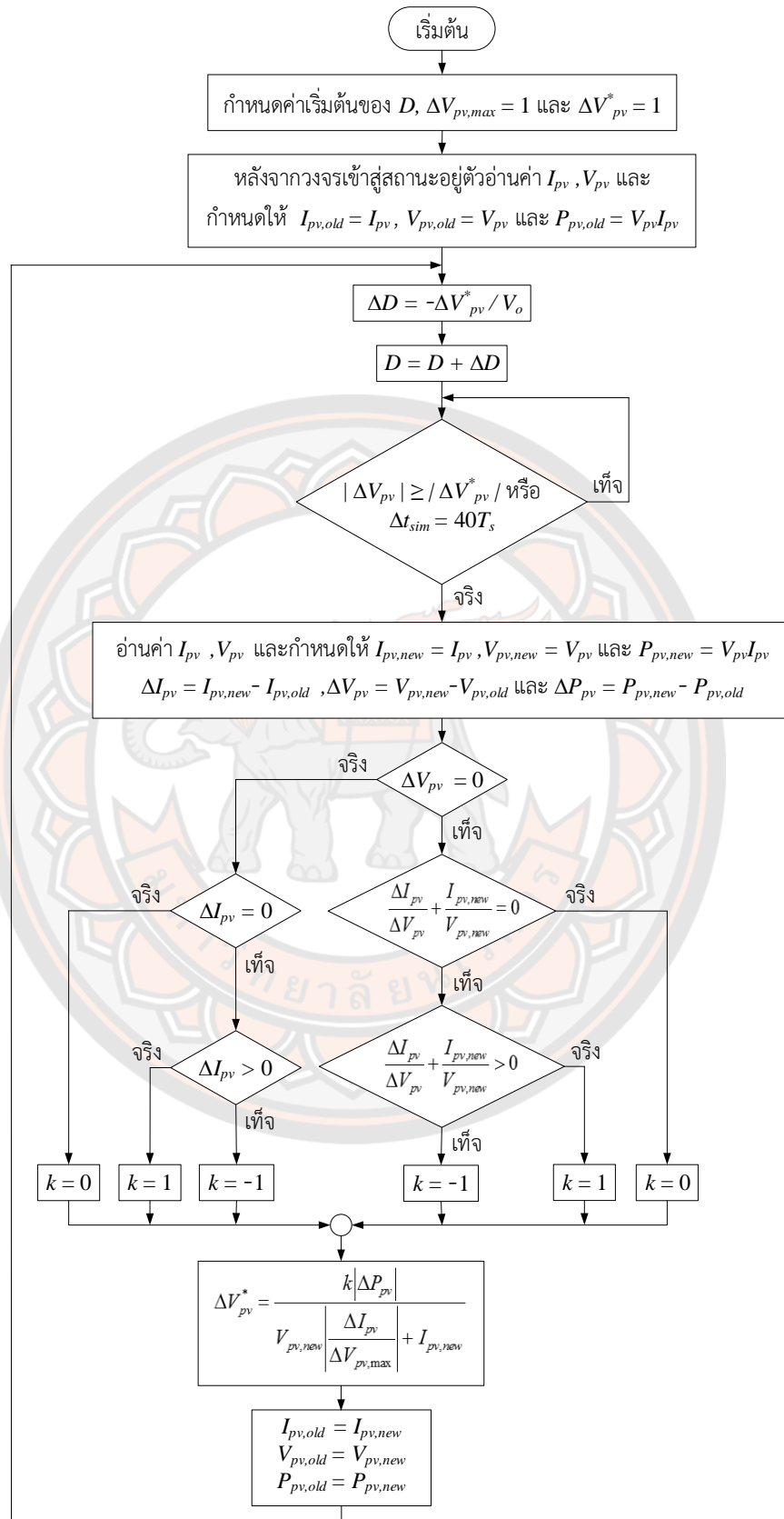
$$\Delta D = -\frac{\Delta V_{pv}^*}{V_o} \quad (3.45)$$

จะเห็นได้ว่า การสวิตชิงของวงจรทระดับแรงดันช่วยให้เกิดการติดตามจุดกำลังสูงสุดได้โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นั่นคือ เมื่อพิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกของแผง ถ้าจุดทำงานอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด ดิวตี้ไซเคิลจะถูกลดค่าให้ต่ำลงเพื่อเพิ่มแรงดันด้านออกของแผง ซึ่งทำให้จุดทำงานขยับไปทางขวา ในทางกลับกัน ถ้าจุดทำงานอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด ดิวตี้ไซเคิลจะถูกเพิ่มค่าให้สูงขึ้นเพื่อลดแรงดันด้านออกของแผง ซึ่งทำให้จุดทำงานขยับไปทางซ้าย

ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้หลักการแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ

การทำงานของโปรแกรมจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มโดยใช้หลักการแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนดังภาพ 38 โดยเริ่มจากการกำหนดค่าตัวตั้งสี่เหลี่ยมเริ่มต้นของวงจรทระดับแรงดัน และใช้  $\Delta D$  เป็นขนาดก้าวซึ่งแปรผันได้สำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุด หลังจากวงจรทระดับแรงดันทำงานที่ค่าตัวตั้งสี่เหลี่ยมเริ่มต้นจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้วจึงบันทึกค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ จากนั้นปรับค่าตัวตั้งสี่เหลี่ยมเพื่อเริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุด หลังจากที่วงจรทระดับแรงดันทำงานที่ตัวตั้งสี่เหลี่ยมใหม่จนกระทั่งแรงดันด้านออกของแผงมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่น้อยกว่า  $\Delta V_{pv}^*$  จึงอ่านค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงแล้วนำมาคำนวณตามหลักการของวิธีความนำส่วนเพิ่ม โดยใช้ค่าคงตัว  $k$  ในการกำหนดทิศทางการขยับตำแหน่งของจุดทำงาน นั่นคือ ถ้าแรงดันด้านออกมีค่าเปลี่ยนแปลง และพบว่าจุดทำงานปัจจุบันอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดแล้ว เราจะให้  $k = 0$  ซึ่งหมายถึง จะไม่มีการย้ายจุดทำงาน แต่ถ้าจุดทำงานปัจจุบันอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด เราจะให้  $k = 1$  ซึ่งหมายถึง จะต้องเพิ่มแรงดันด้านออกของแผงเพื่อขยับจุดทำงานไปทางขวา แต่ถ้าจุดทำงานปัจจุบันอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด เราจะให้  $k = -1$  ซึ่งหมายถึง จะต้องลดแรงดันด้านออกของแผงเพื่อขยับจุดทำงานไปทางซ้าย จากนั้นจึงใช้ค่า  $k$  ร่วมกับสมการที่ (3.43) เพื่อหาค่าใหม่ของ  $\Delta V_{pv}^*$  ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณค่าใหม่ของ  $\Delta D$  ตามสมการที่ (3.45) เพื่อกำหนดค่าใหม่ของตัวตั้งสี่เหลี่ยมต่อไป อย่างไรก็ตาม ภายในระยะเวลา 40 คาบสวิตชิงซึ่งนานเพียงพอที่จะทำให้แรงดันด้านออกของแผงเปลี่ยนแปลงไม่น้อยกว่า 1 V (กำหนดให้เป็น  $\Delta V_{pv,max}$ ) ถ้าแรงดันด้านออกของแผงยังมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า  $\Delta V_{pv}^*$  เราจะอ่านค่ากระแสและแรงดันด้านออกของแผงแล้วดำเนินการตามหลักการของวิธีความนำส่วนเพิ่มต่อไปทันทีเพื่อไม่ให้จุดทำงานค้างอยู่กับที่จนกว่าจะพบจุดกำลังสูงสุด โดยอาศัยเงื่อนไขที่ว่า ผลบวกของค่าความนำส่วนเพิ่มกับค่าความนำขณะหนึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.002 ซึ่งเป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในการติดตามแบบตรึงขนาดก้าว

หลังจากที่จุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดแล้ว จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวตั้งสี่เหลี่ยม เราจะให้  $k = 0$  จนกว่าจะตรวจพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง โดยตรวจวัดจากค่ากระแสด้านออกของแผงนั่นเอง กล่าวคือ ในขณะที่แรงดันด้านออกของแผงมีค่าคงที่ ถ้ากระแสด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้นแสดงว่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้จุดกำลังสูงสุดย้ายไปทางขวา เราจะให้  $k = 1$  เพื่อเพิ่มค่าแรงดันด้านออกของแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางขวา แต่ถ้ากระแสด้านออกของแผงมีค่าลดลงแสดงว่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าลดลงซึ่งทำให้จุดกำลังสูงสุดย้ายไปทางซ้าย เราจะให้  $k = -1$  เพื่อลดแรงดันด้านออกของแผงซึ่งจะทำให้จุดทำงานขยับไปทางซ้าย

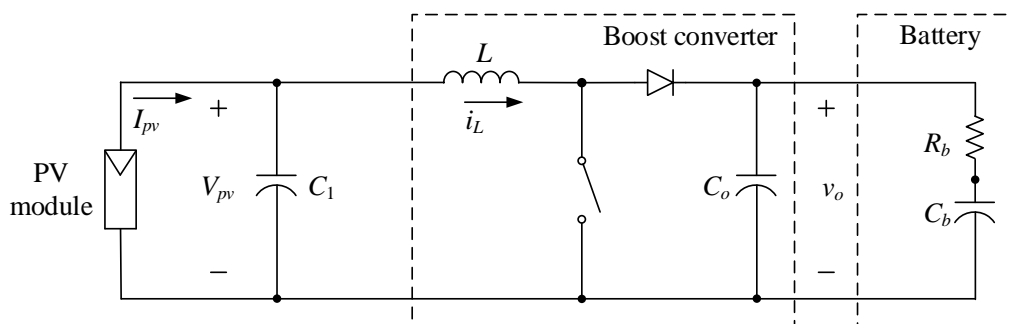


ภาพ 38 ขั้นตอนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพ 39 ในการจำลองผลจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3 ซึ่งมีตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) 4700  $\mu\text{F}$  ต่อคร่อมด้านออกของแผงเพื่อกำหนดค่าแรงดันด้านออกของแผง ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันคร่อม  $C_1$  จะสัมพันธ์กับการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดและขึ้นอยู่กับความเร็วของวงจรถบระดับแรงดันที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) 1 mH และตัวเก็บประจุ ( $C_o$ ) 200  $\mu\text{F}$  และวงจรถบทำงานที่ความถี่สวิตซิงเท่ากับ 20 kHz ในงานวิจัยนี้ใช้แบตเตอรี่เป็นโหลดซึ่งแทนด้วยวงจรถบอย่างง่ายที่ประกอบด้วยตัวต้านทานซึ่งอธิบายค่าความสูญเสียภายในแบตเตอรี่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงเพื่ออธิบายความจุของแบตเตอรี่และเพื่อให้แรงดันของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงช้ามากเมื่อเทียบกับความถี่สวิตซิง โดยในที่นี้เลือกใช้ค่า  $R_b$  เท่ากับ 0.5  $\Omega$  และ  $C_b$  เท่ากับ 47 F

การสวิตซิงของวงจรถบระดับแรงดันช่วยในการติดตามจุดกำลังสูงสุดได้โดยการย้ายตำแหน่งของจุดทำงานของแผง เมื่อพิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกของแผง การลดค่าตัวตีไซเคิลจะทำให้  $C_1$  คายประจุน้อยลงในแต่ละคาบสวิตซิง แรงดันด้านออกของแผงจึงมีค่าสูงขึ้น นั่นคือ จุดทำงานขยับไปทางขวา ในทางกลับกัน การเพิ่มค่าตัวตีไซเคิลจะทำให้  $C_1$  คายประจุมากขึ้นในแต่ละคาบสวิตซิง แรงดันด้านออกของแผงจึงมีค่าต่ำลง นั่นคือ จุดทำงานขยับไปทางซ้าย ในบทนี้จะแสดงการจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอในงานวิจัยภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด รวมทั้งสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการติดตามแบบตรึงขนาดก้าว

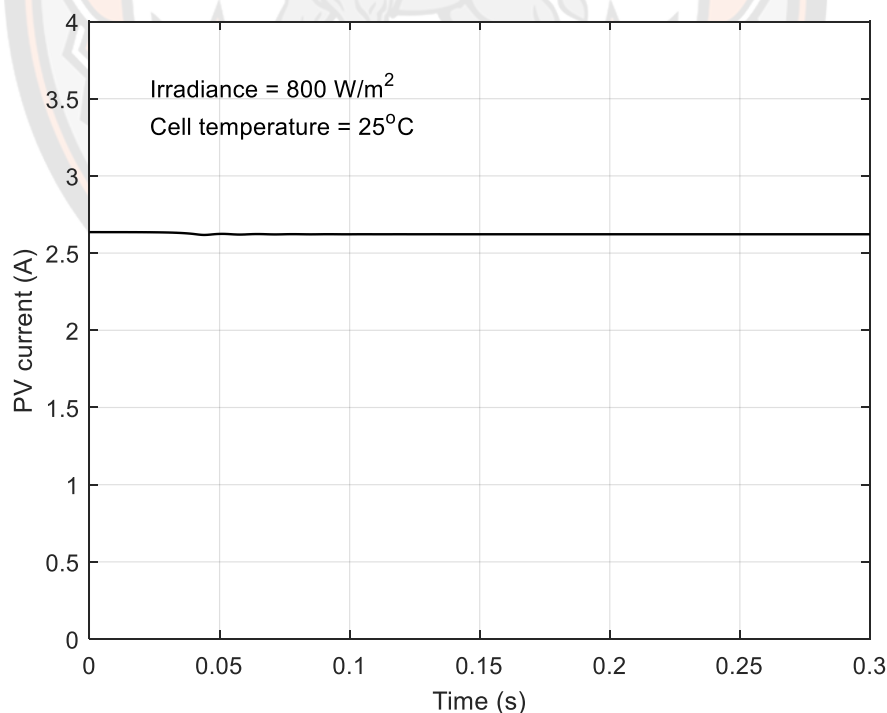


ภาพ 39 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรถบระดับแรงดัน

### กรณีจุดทำงานเริ่มต้นของแผงอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด

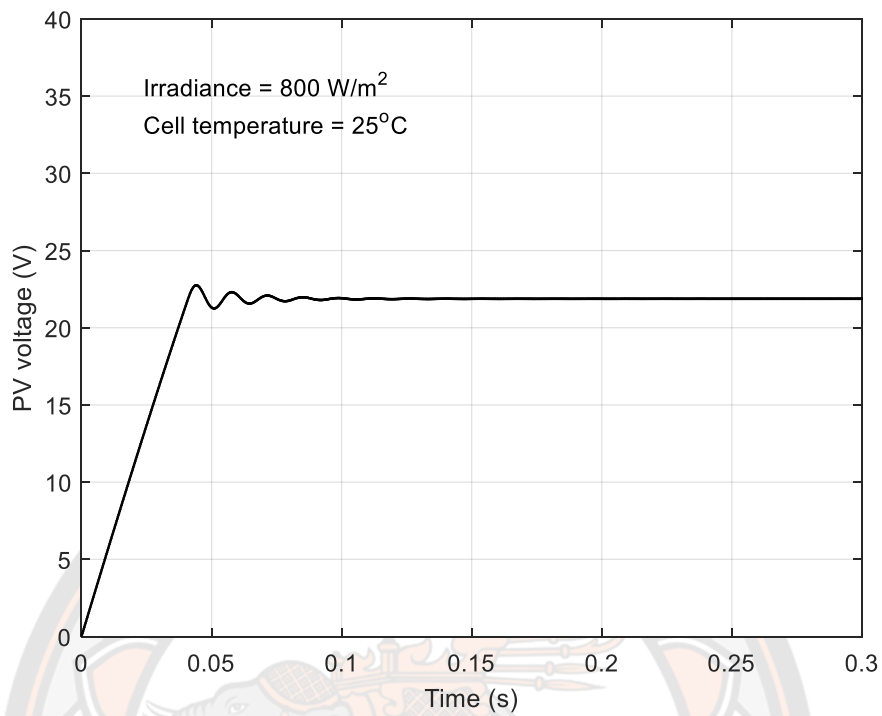
การจำลองผลเริ่มจากกำหนดให้ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $800 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  และวงจรทบระดับแรงดันทำงานที่ค่าดิวิตีไซเคิลเริ่มต้นเท่ากับ 0.55 การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังภาพ 40 จะพบว่าในสถานะอยู่ตัว กระแสต้านออกของแผงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.6 A ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันต้านออกของแผงแสดงดังภาพ 41 จะเห็นว่าในสถานะอยู่ตัว แรงดันต้านออกของแผงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.9 V แสดงว่าในขณะนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังด้านออกมีค่าเท่ากับ 57 W

เมื่อพิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์  $800 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์  $25^\circ\text{C}$  ซึ่งแสดงดังภาพ 42 จะเห็นว่าจุดทำงานของแผงในขณะนี้อยู่ที่จุด P1 ในขณะที่จุดกำลังสูงสุดของแผงอยู่ที่จุด P2 แสดงว่าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศขณะนี้ หากเราสามารถเพิ่มแรงดันต้านออกของแผงเพื่อให้จุดทำงานย้ายไปอยู่ที่จุด P2 ซึ่งมีค่ากำลังด้านออกเท่ากับ 74 W จะส่งผลให้แผงจ่ายกำลังได้เพิ่มขึ้น 17 W หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 30%

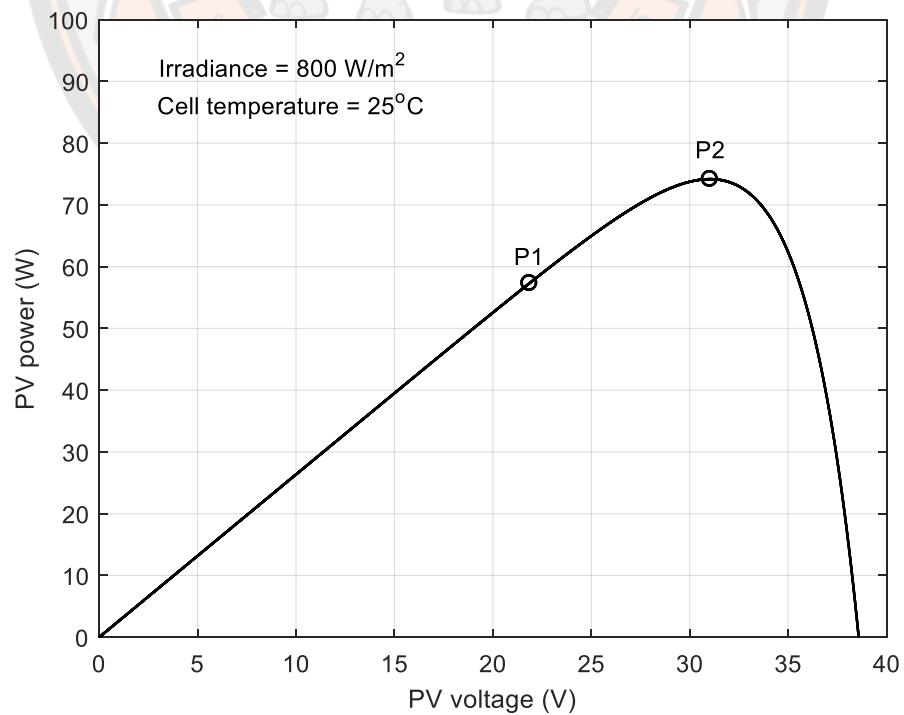


ภาพ 40 กระแสต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่  $D = 0.55$





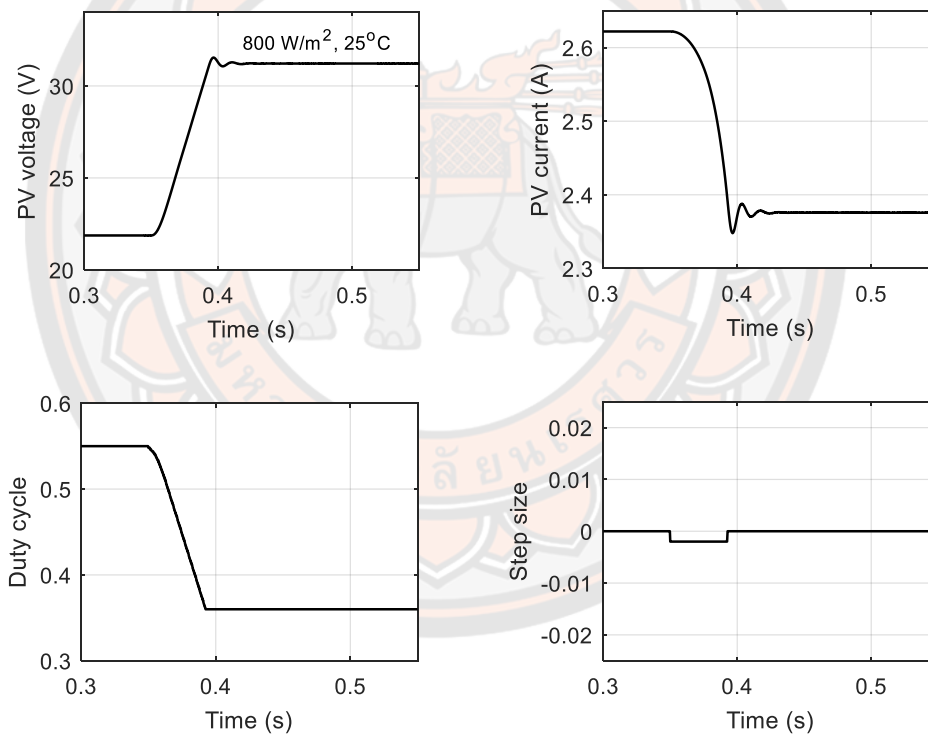
ภาพ 41 แรงแต้นด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่  $D = 0.55$



ภาพ 42 จุดทำงานและจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด

การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด

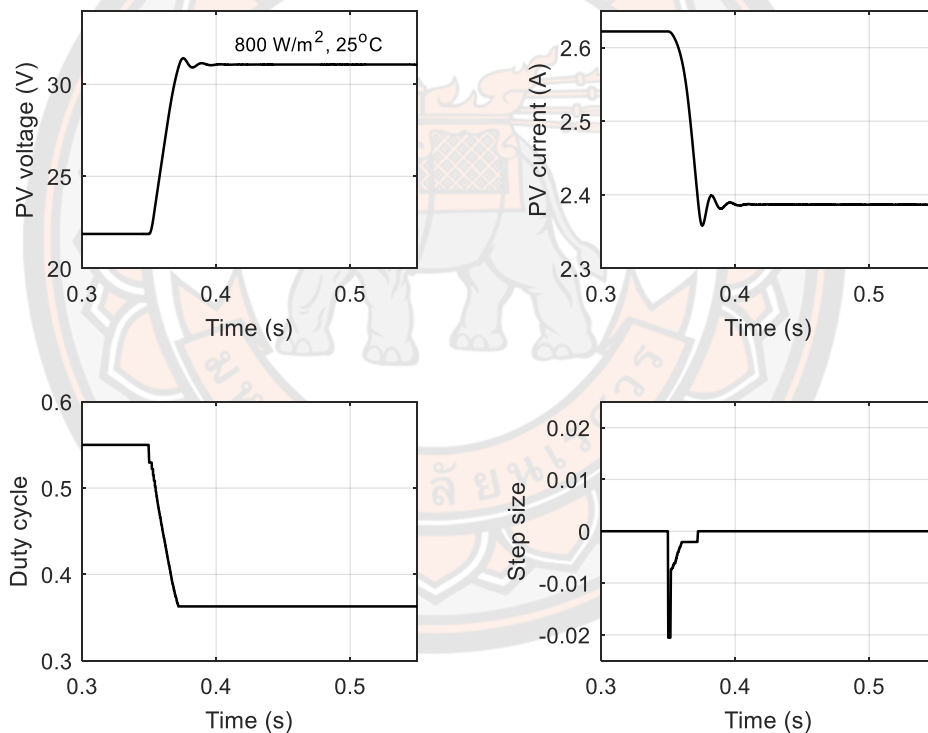
ภายใต้สภาพอากาศที่ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $800 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  การติดตามจุดกำลังสูงสุดถูกกำหนดให้เริ่มที่เวลา  $t = 350 \text{ ms}$  โดยการลดค่าดิวตี้ไซเคิลของวงจรทอร์คแรงดันเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวแสดงดังภาพ 43 เราพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา  $43.68 \text{ ms}$  โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าลดลงเหลือ  $0.360$  แรงดันด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้นเป็น  $31.22 \text{ V}$  และกระแสด้านออกของแผงมีค่าลดลงเหลือ  $2.37 \text{ A}$  กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จึงมีค่าเท่ากับ  $73.99 \text{ W}$  ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $0.01\%$  ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P2



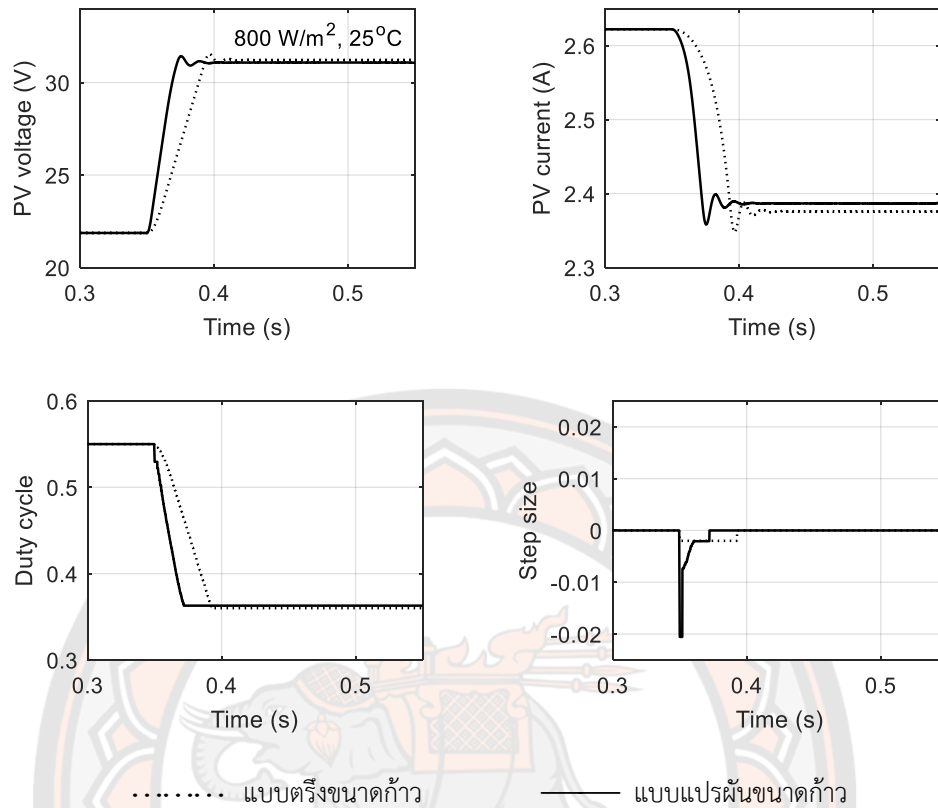
ภาพ 43 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว

ในขณะที่ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพ 44 เราพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 22.45 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าลดลงเหลือ 0.363 แรงดันด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้นเป็น 31.07 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าลดลงเหลือ 2.38 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จึงมีค่าเท่ากับ 73.95 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.06% จากค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P2

การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอแสดงดังภาพ 45 เราพบว่าภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอใช้เวลาน้อยกว่าแบบตรึงขนาดก้าว 21.23 ms หรือช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามได้ 48.60%



ภาพ 44 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ

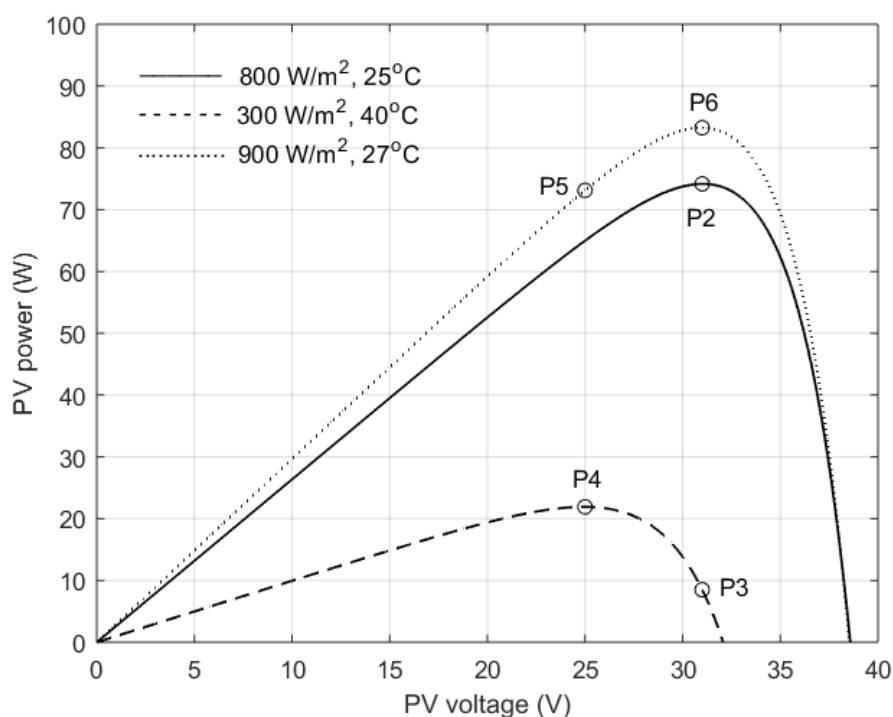


ภาพ 45 การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด

การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

สืบเนื่องจากการจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $800 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  ในหัวข้อที่ผ่านมา ขณะนี้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุด P2 บนเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกดังภาพ 46 ต่อมาสภาพอากาศจะถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าลดลงเหลือ  $300 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นเป็น  $40^\circ\text{C}$  การลดลงอย่างฉับพลันของความเข้มแสงอาทิตย์จะทำให้กระแสด้านออกของแผงลดลงทันที ส่งผลให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P2 ไปที่จุด P3 ซึ่งมีค่ากำลังด้านออกเท่ากับ  $8.5 \text{ W}$  อย่างไรก็ตาม จุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศขณะนี้อยู่ที่จุด P4 ดังนั้น ถ้าเราย้ายจุดทำงานของแผงไปยังจุด P4 ซึ่งมีค่ากำลังด้านออกเท่ากับ  $21.91 \text{ W}$  ได้ก็จะทำให้กำลังด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น  $13.41 \text{ W}$  หรือสูงขึ้น  $157.76\%$

หลังจากนั้นสภาพอากาศจะถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกครั้ง โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นเป็น  $900 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลงเป็น  $27^\circ\text{C}$  การเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเข้มแสงอาทิตย์จะทำให้กระแสต้านออกของแผงเพิ่มขึ้นทันที ส่งผลให้จุดงานของแผงย้ายจากจุด P4 ไปที่จุด P5 ซึ่งมีกำลังต้านออกเท่ากับ  $73.12 \text{ W}$  อย่างไรก็ตาม จุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศขณะนี้อยู่ที่จุด P6 ดังนั้น ถ้าเราย้ายจุดทำงานของแผงไปยังจุด P6 ซึ่งมีความกำลังต้านออกเท่ากับ  $83.22 \text{ W}$  ได้ก็จะทำให้กำลังต้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น  $10.1 \text{ W}$  หรือเพิ่มขึ้น  $13.81\%$

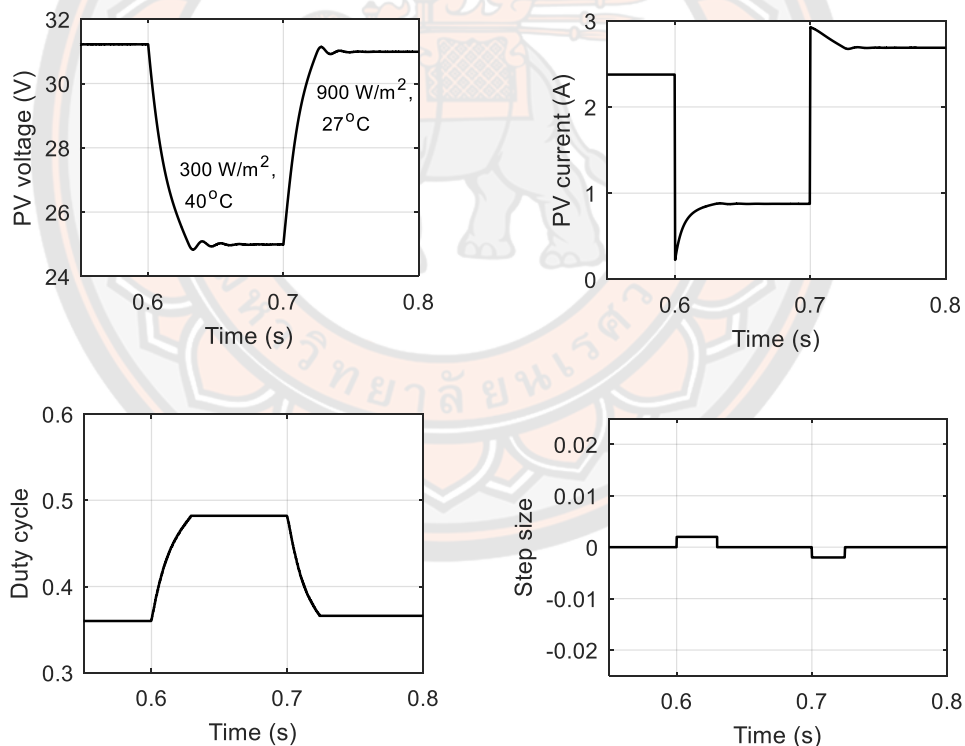


ภาพ 46 การย้ายจุดทำงานภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

หลังจากที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดได้เริ่มต้นที่เวลา  $t = 350 \text{ ms}$  แล้ว ในการเขียนโปรแกรมจำลองผลได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่เวลา  $t = 600 \text{ ms}$  โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $800 \text{ W/m}^2$  และ  $25^\circ\text{C}$  เป็น  $300 \text{ W/m}^2$  และ  $40^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P2 ไปที่จุด P3 ซึ่งอยู่ด้านขวาของจุด P4 ดังนั้น ดิวิดีเซอร์ของวงจรบรรทัดแรงดันจึงถูกเพิ่มค่าให้สูงขึ้นเพื่อทำให้แรงต้านด้านออกของแผงมีค่าต่ำลง ซึ่งผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวแสดงดังภาพ 47 เราพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา  $30.12 \text{ ms}$  โดยหลังจากการติดตาม

สิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.482 แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือเท่ากับ 25.15 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 0.87 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนั้นจึงมีค่าเท่ากับ 21.88 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.13% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P4

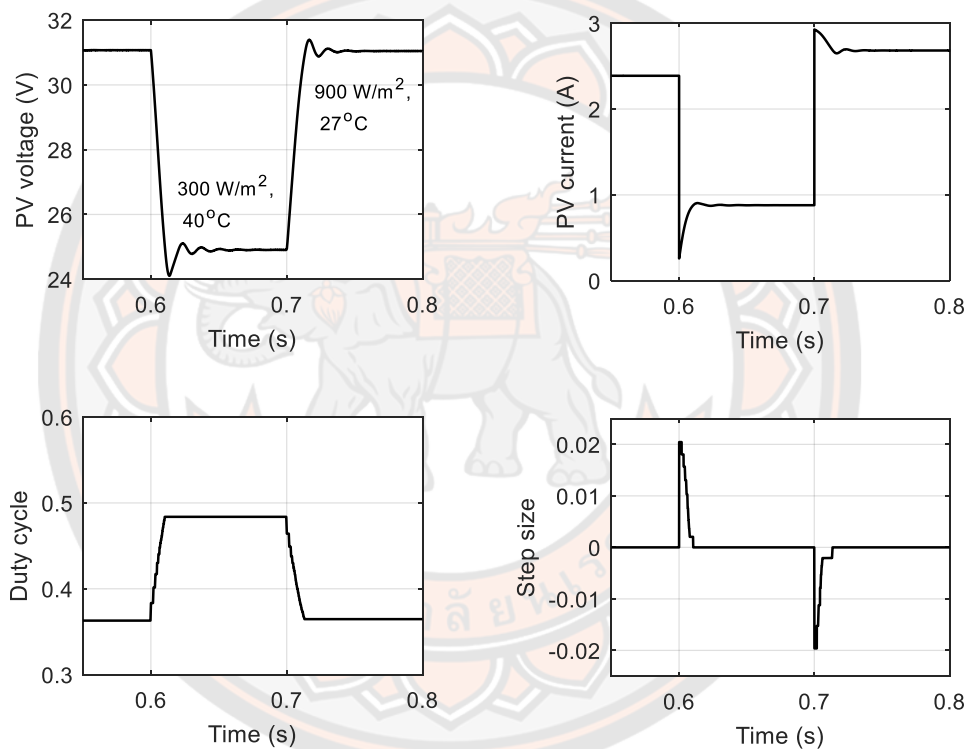
หลังจากนั้นที่เวลา  $t = 700$  ms ได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งโดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $300 \text{ W/m}^2$  และ  $40^\circ\text{C}$  เป็น  $900 \text{ W/m}^2$  และ  $27^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P4 ไปที่จุด P5 ซึ่งอยู่ด้านซ้ายของจุด P6 ดังนั้น ดิวตี้ไซเคิลของวงจรทบระดับแรงดันจึงถูกลดค่าให้ต่ำลงเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น จะเห็นว่าการติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 25.05 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าต่ำลงเหลือ 0.366 แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น 31.04 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 2.68 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนั้นจึงมีค่าเท่ากับ 83.19 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.03% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P6



ภาพ 47 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว

หลังจากที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดได้เริ่มต้นที่เวลา  $t = 350$  ms แล้ว ในการเขียนโปรแกรมจำลองผลได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่เวลา  $t = 600$  ms โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $800 \text{ W/m}^2$  และ  $25^\circ\text{C}$  เป็น

300 W/m<sup>2</sup> และ 40°C ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P2 ไปที่จุด P3 ซึ่งอยู่ด้านขวาของจุด P4 ดังนั้น ดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันจึงถูกเพิ่มค่าให้สูงขึ้นเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าต่ำลง ซึ่งผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวแสดงดังภาพ 48 เราพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 10.34 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.484 แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือเท่ากับ 24.90 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 0.88 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนั้นจึงมีค่าเท่ากับ 21.91 W ซึ่งเท่ากับค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P4

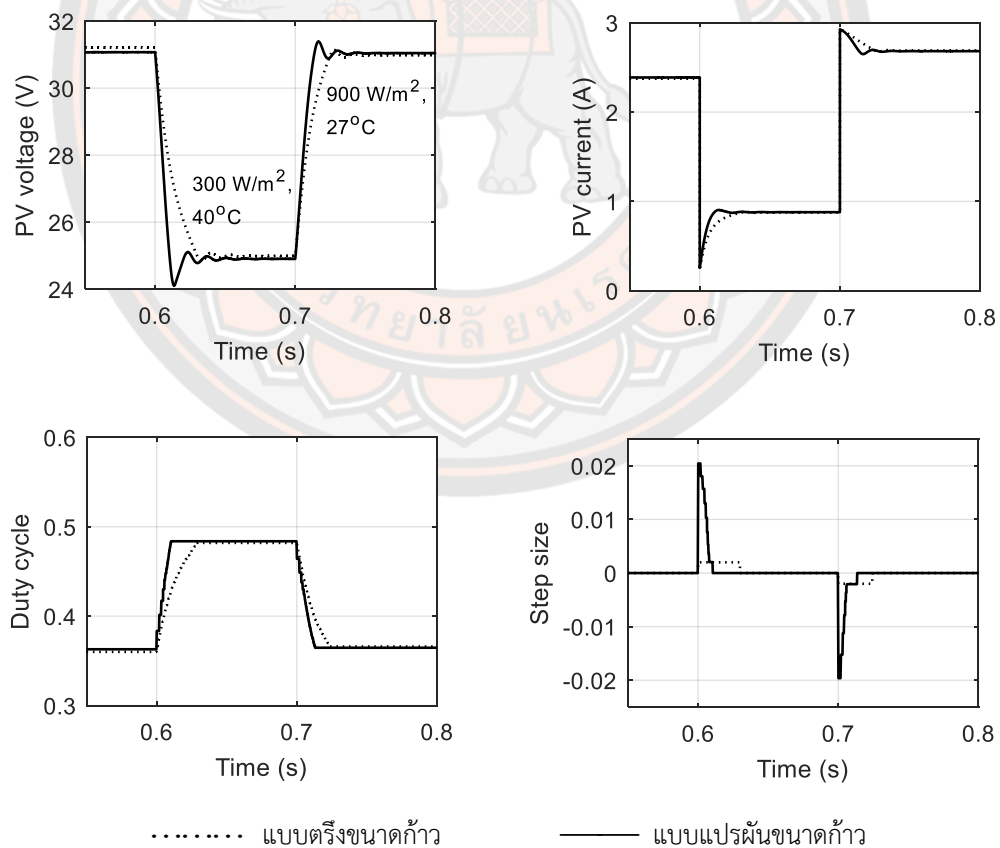


ภาพ 48 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอ

หลังจากนั้นที่เวลา  $t = 700$  ms ได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งโดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก 300 W/m<sup>2</sup> และ 40°C เป็น 900 W/m<sup>2</sup> และ 27°C ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P4 ไปที่จุด P5 ซึ่งอยู่ด้านซ้ายของจุด P6 ดังนั้น ดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันจึงถูกลดค่าให้ต่ำลงเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น จะเห็นว่าการติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 13.70 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าต่ำลงเหลือ 0.366 แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็น

31.05 V และกระแสต้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 2.68 A กำลังต้านออกของแผงในขณะนี้จึงมีค่าเท่ากับ 83.21 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.01% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P6

การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสภาพอากาศโดยใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอแสดงดังภาพ 49 เราพบว่า สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่เวลา  $t = 600$  ms โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $800 \text{ W/m}^2$  และ  $25^\circ\text{C}$  เป็น  $300 \text{ W/m}^2$  และ  $40^\circ\text{C}$  ตามลำดับ การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอใช้เวลาน้อยกว่าแบบตรึงขนาดก้าว 19.78 ms หรือช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามได้ 65.67% สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่เวลา  $t = 700$  ms โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $300 \text{ W/m}^2$  และ  $40^\circ\text{C}$  เป็น  $900 \text{ W/m}^2$  และ  $27^\circ\text{C}$  ตามลำดับ การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอใช้เวลาน้อยกว่าแบบตรึงขนาดก้าว 11.35 ms หรือช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามได้ 45.31%



ภาพ 49 การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด



การเปรียบเทียบค่ากำลังด้านออกของแผงภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่กำหนดขึ้นสำหรับการจำลองผลในงานวิจัยนี้สรุปได้ดังตาราง 3 โดยที่  $S$  คือความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง และ  $T_{cell}$  คืออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่ค่ากำลังด้านออกที่ได้จากการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนออยู่นั้นถูกนำมาสรุปไว้ในตาราง 4 โดยเปรียบเทียบกับค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริงสำหรับแต่ละสภาพอากาศ จะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการติดตามทั้งสองแบบเป็นผลมาจากการยอมให้การติดตามสิ้นสุดลงเมื่อผลบวกของค่าความนำส่วนเพิ่มกับค่าความนำขณะหนึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.002 (ซึ่งไม่ใช่ศูนย์ตามทฤษฎี) จึงทำให้จุดทำงานสุดท้ายที่ได้จากการติดตามทั้งสองแบบอาจเป็นคนละจุด อย่างไรก็ตาม ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำมาก แสดงว่าจุดทำงานสุดท้ายที่ได้นั้นอยู่ใกล้กับจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงอย่างมาก นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแต่ละวิธีภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่กำหนดขึ้น รวมทั้งความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้วิธีแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอถูกนำมาสรุปไว้ในตาราง 5

ตาราง 3 ค่ากำลังด้านออกของแผงก่อนและหลังติดตามจุดกำลังสูงสุด

$S$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{cell}$ (°C)	กำลังด้านออก (W)		กำลังที่เพิ่มขึ้น (%)
		ก่อนติดตาม	หลังติดตาม	
800	25	(P1) 57	(P2) 74.00	29.82
300	40	(P3) 8.5	(P4) 21.91	157.76
900	27	(P5) 73.1	(P6) 83.22	13.84

ตาราง 4 ค่ากำลังด้านออกของแผงที่ได้หลังจากติดตามจุดกำลังสูงสุด

$S$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{cell}$ (°C)	กำลังสูงสุด (W)	กำลังที่ได้หลังติดตาม (W)		ค่าคลาดเคลื่อน (%)	
			แบบตรึง	แบบแปรผัน	แบบตรึง	แบบแปรผัน
800	25	(P2) 74.00	73.99	73.95	0.01	0.06
300	40	(P4) 21.91	21.88	21.91	0.13	0.00
900	27	(P6) 83.22	83.19	83.21	0.03	0.01

ตาราง 5 ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุด

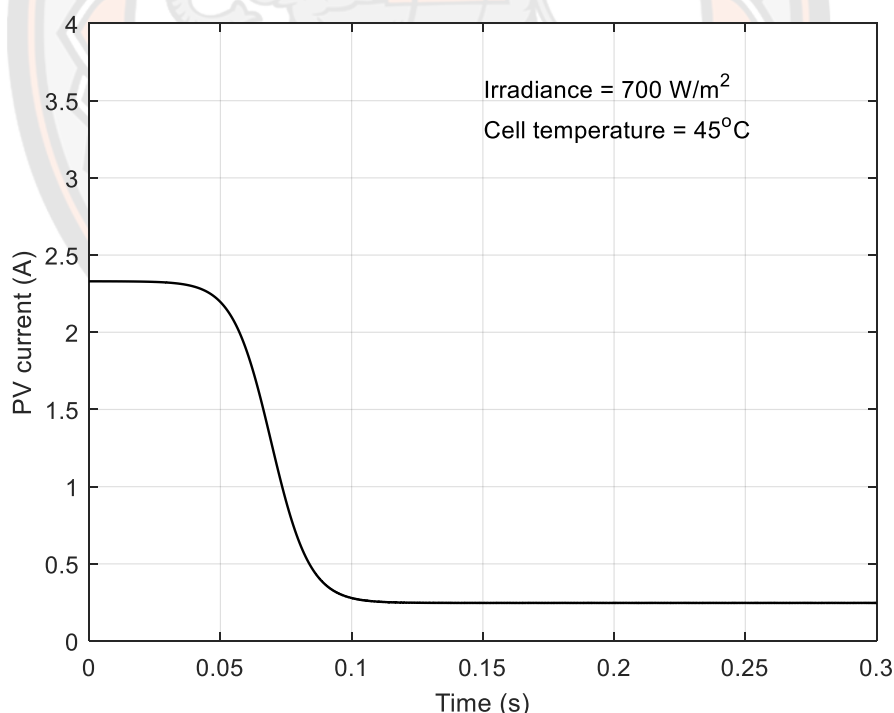
$S$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{cell}$ (°C)	ระยะเวลาที่ใช้ติดตาม (ms)		ความเร็วเพิ่มขึ้น (%)
		แบบตรึงขนาดก้ำว	แบบแปรผันขนาดก้ำว	
800	25	43.68	22.45	48.60
300	40	30.12	10.34	65.67
900	27	25.05	13.70	45.31



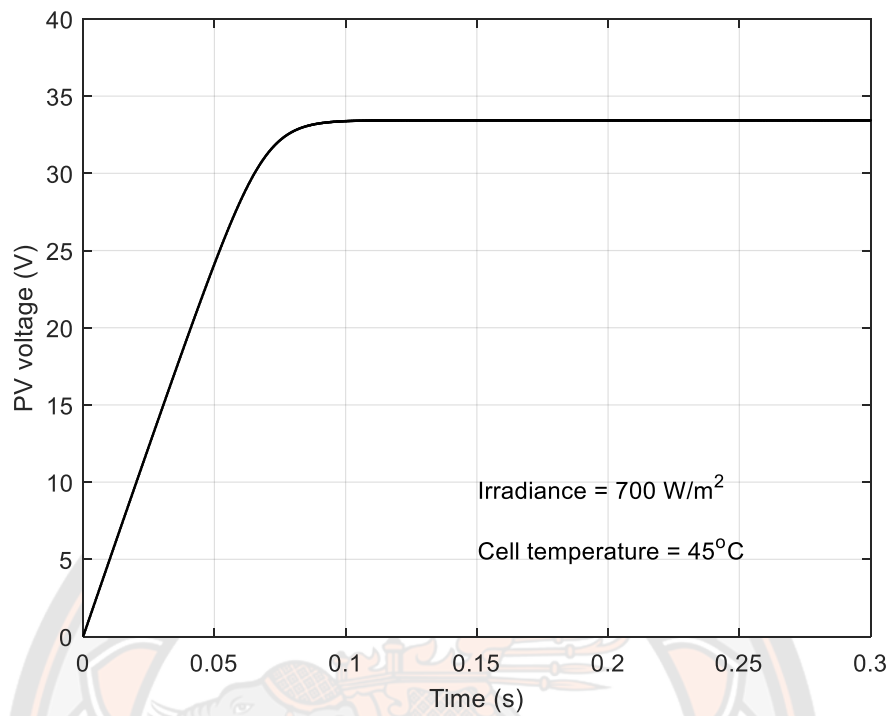
### กรณีเริ่มต้นจุดทำงานของแผงอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด

การจำลองผลเริ่มจากกำหนดให้ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $700 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $45^\circ\text{C}$  และวงจรทบระดับแรงดันทำงานที่ค่าตัวใช้เซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 0.3 การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังภาพ 50 จะพบว่าในสถานะอยู่ตัว กระแสต้านออกของแผงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.25 A ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันต้านออกของแผงแสดงดังภาพ 51 จะเห็นว่าในสถานะอยู่ตัว แรงดันต้านออกของแผงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33.42 V แสดงว่าในขณะนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังต้านออกมีค่าเท่ากับ 8.36 W

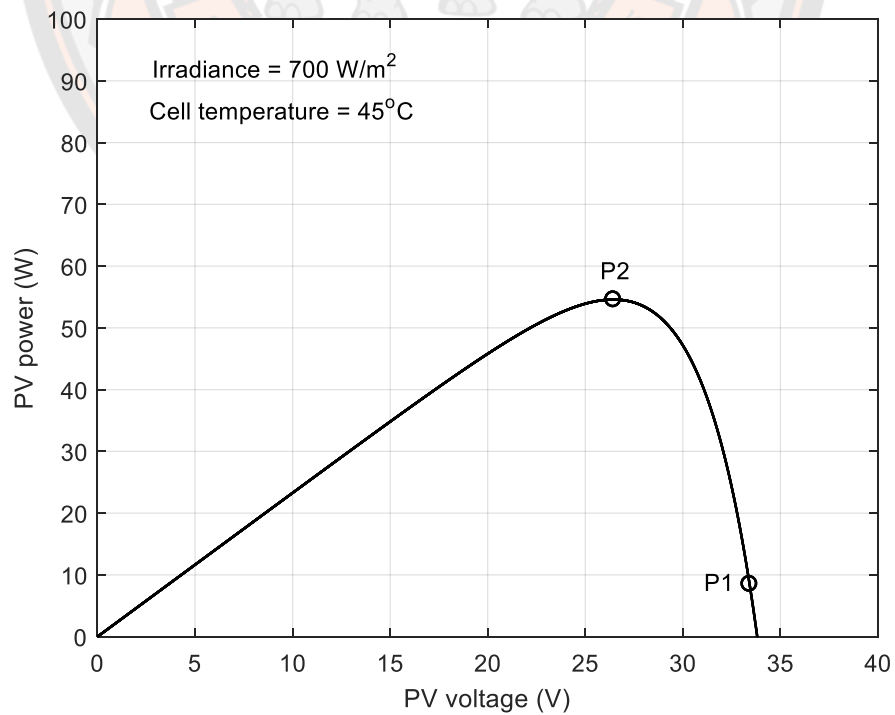
เมื่อพิจารณาเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์  $700 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์  $45^\circ\text{C}$  ซึ่งแสดงดังภาพ 52 จะเห็นว่าจุดทำงานของแผงในขณะนี้อยู่ที่จุด P1 ในขณะที่จุดกำลังสูงสุดของแผงอยู่ที่จุด P2 แสดงว่าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศขณะนี้ หากเราสามารถลดแรงดันต้านออกของแผงเพื่อทำให้จุดทำงานย้ายไปอยู่ที่จุด P2 ซึ่งมีค่ากำลังต้านออกเท่ากับ 54.59 W จะส่งผลให้แผงจ่ายกำลังได้เพิ่มขึ้น 46.23 W หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 552.99%



ภาพ 50 กระแสต้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่  $D = 0.3$



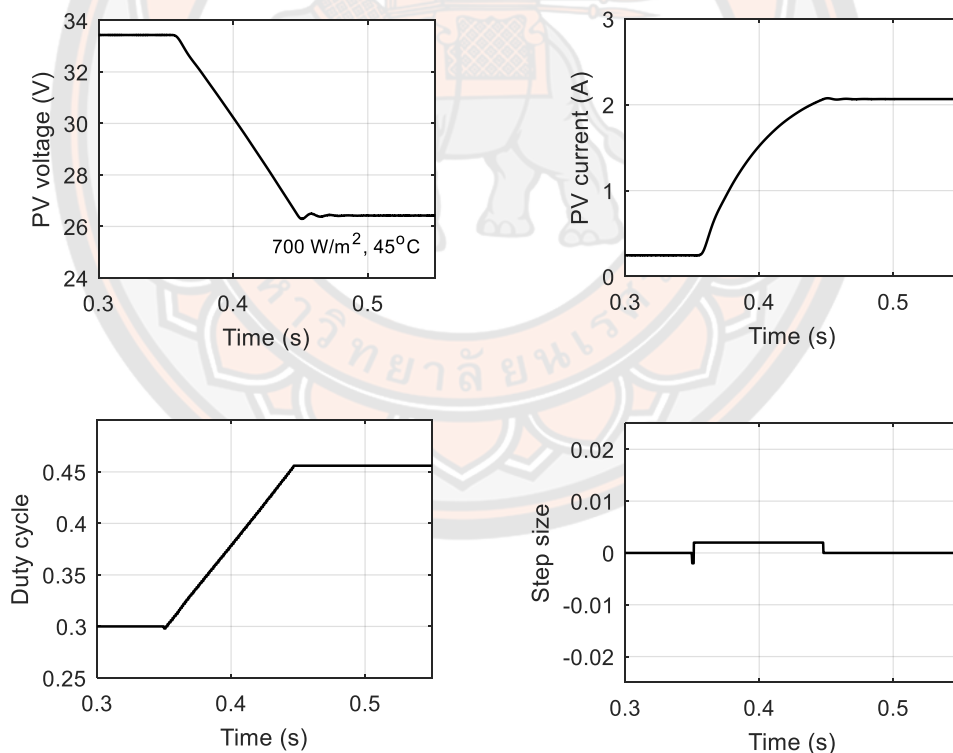
ภาพ 51 แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่  $D = 0.3$



ภาพ 52 จุดทำงานและจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด

การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่กำหนด

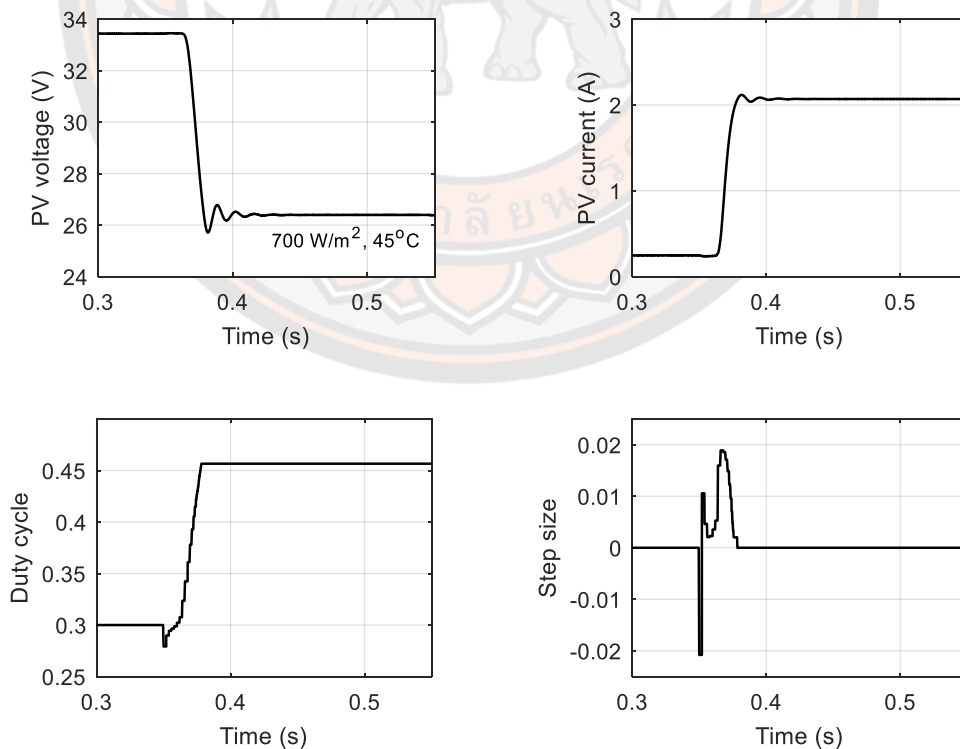
ภายใต้สภาพอากาศที่ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $700 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $45^\circ\text{C}$  การติดตามจุดกำลังสูงสุดถูกกำหนดให้เริ่มที่เวลา  $t = 350 \text{ ms}$  โดยจะต้องเพิ่มค่าดิวตี้ไซเคิลของวงจรถบระดับแรงดันเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าต่ำลง แม้โปรแกรมจะถูกเขียนให้ลดค่าดิวตี้ไซเคิลเมื่อเริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุด แต่เมื่อตรวจพบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านขวาและกำลังขยับออกห่างจากจุดกำลังสูงสุด โปรแกรมจึงเพิ่มค่าดิวตี้ไซเคิลเพื่อขยับจุดทำงานของแผงไปทางซ้ายและเคลื่อนเข้าหาจุดกำลังสูงสุดได้ในที่สุด ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวแสดงดังภาพ 53 โดยใช้ระยะเวลา  $98.10 \text{ ms}$  หลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $0.456$  แรงดันด้านออกของแผงมีค่าลดลงเหลือ  $26.48 \text{ V}$  และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $2.06 \text{ A}$  กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จึงมีค่าเท่ากับ  $54.55 \text{ W}$  ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $0.07\%$  ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P2



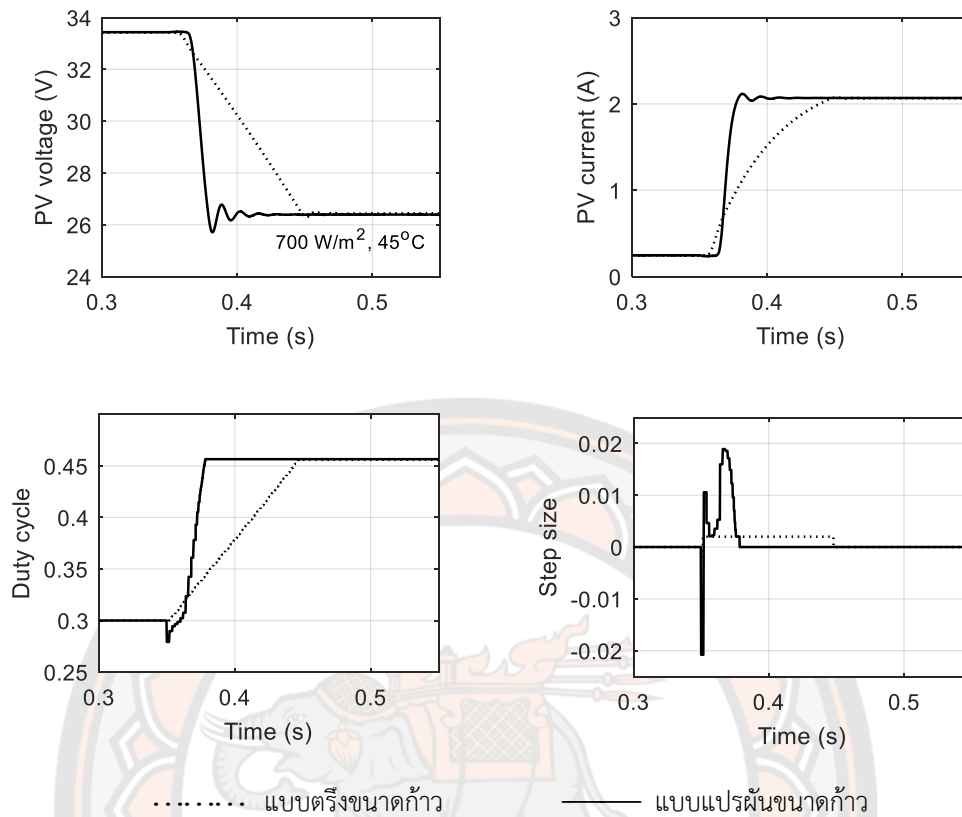
ภาพ 53 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว

ในขณะที่ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพ 54 เราพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 28.67 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.456 แรงดันด้านออกของแผงมีค่าต่ำลงเหลือ 26.37 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.07 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จึงมีค่าเท่ากับ 54.58 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.01% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P2

การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอแสดงดังภาพ 55 ในกรณีนี้ จุดทำงานเริ่มต้นอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด การลดแรงดันด้านออกของแผงทำให้กระแสด้านออกของแผงสูงขึ้นอย่างชัดเจน และมีบางส่วนไหลเข้าตัวเก็บประจุ  $C_1$  เนื่องจากระดับแรงดันด้านออกของแผงแปรผันโดยตรงกับปริมาณประจุใน  $C_1$  การติดตามแบบตรึงขนาดก้าวจึงทำให้แรงดันด้านออกของแผงลดลงค่อนข้างช้า ในขณะที่การแปรผันขนาดก้าวช่วยเร่งการคายประจุของ  $C_1$  จึงลดแรงดันด้านออกของแผงลงได้เร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด เราพบว่าภายใต้สภาพอากาศในขณะนี้การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอใช้เวลาน้อยกว่าแบบตรึงขนาดก้าว 69.43 ms หรือช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามได้ 70.77%



ภาพ 54 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าว

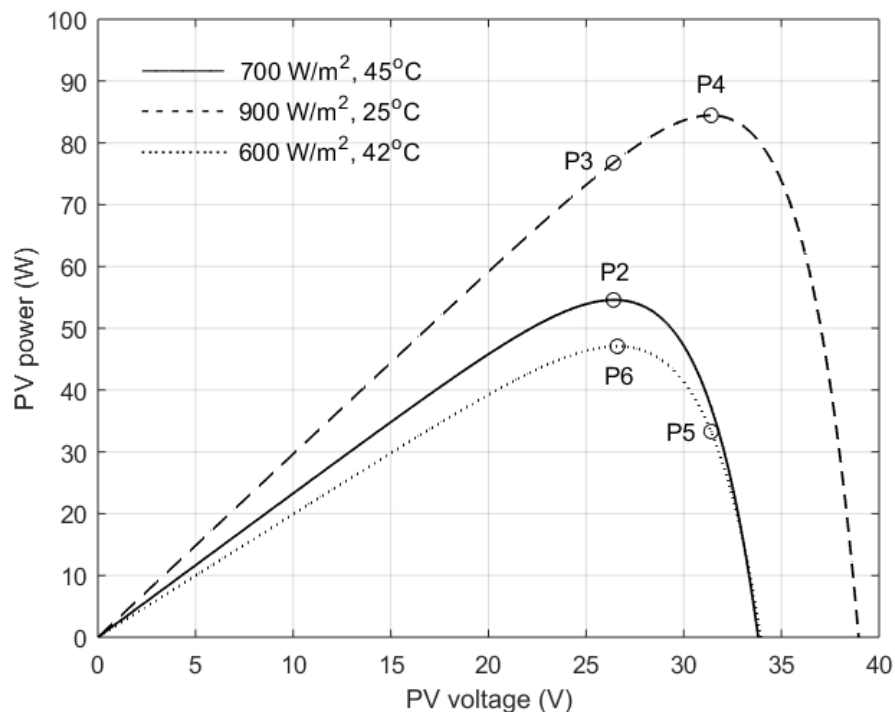


ภาพ 55 การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด

การติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

สืบเนื่องจากการจำลองผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $700 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ  $45^\circ\text{C}$  ในหัวข้อที่ผ่านมา ขณะนี้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุด P2 บนเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกดังภาพ 56 ต่อมาสภาพอากาศจะถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $900 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเหลือ  $25^\circ\text{C}$  การเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเข้มแสงอาทิตย์จะทำให้กระแสด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นทันที ส่งผลให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P2 ไปที่จุด P3 ซึ่งมีค่ากำลังด้านออกเท่ากับ  $76.77 \text{ W}$  อย่างไรก็ตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศขณะนี้อยู่ที่จุด P4 ดังนั้น ถ้าเราย้ายจุดทำงานของแผงไปยังจุด P4 ซึ่งมีค่ากำลังด้านออกเท่ากับ  $84.46 \text{ W}$  ได้ก็จะทำให้กำลังด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น  $7.69 \text{ W}$  หรือสูงขึ้น  $10.02\%$

หลังจากนั้นสภาพอากาศจะถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกครั้ง โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าต่ำลงเหลือ  $600 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นเป็น  $42^\circ\text{C}$  การลดลงอย่างฉับพลันของความเข้มแสงอาทิตย์จะทำให้กระแสต้านออกของแผงลดลงทันที ส่งผลให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P4 ไปที่จุด P5 ซึ่งมีกำลังต้านออกเท่ากับ  $33.29 \text{ W}$  อย่างไรก็ตาม จุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศขณะนี้อยู่ที่จุด P6 ดังนั้น ถ้าเราย้ายจุดทำงานของแผงไปยังจุด P6 ซึ่งมีกำลังต้านออกเท่ากับ  $47.09 \text{ W}$  ได้ก็จะทำให้กำลังต้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น  $13.8 \text{ W}$  หรือเพิ่มขึ้น  $43.45\%$



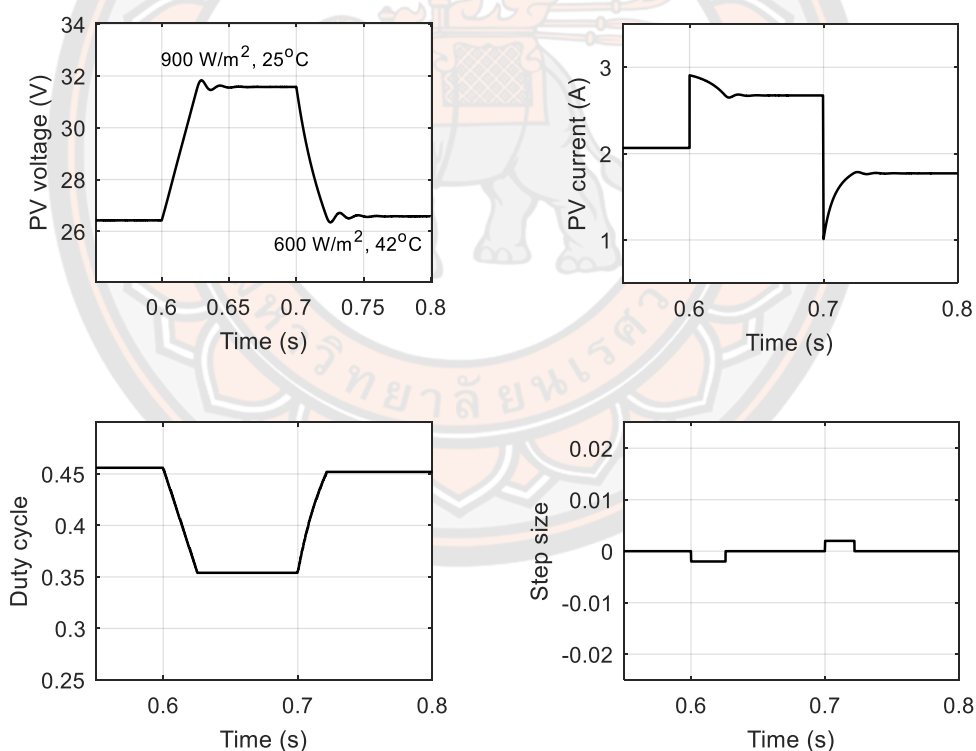
ภาพ 56 การย้ายจุดทำงานภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

หลังจากที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดได้เริ่มต้นที่เวลา  $t = 350 \text{ ms}$  แล้ว ในการเขียนโปรแกรมจำลองผลได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่เวลา  $t = 600 \text{ ms}$  โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $700 \text{ W/m}^2$  และ  $45^\circ\text{C}$  เป็น  $900 \text{ W/m}^2$  และ  $25^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P2 ไปที่จุด P3 ซึ่งอยู่ด้านซ้ายของจุด P4 ดังนั้น ตัวตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันจึงถูกลดค่าให้ต่ำลงเพื่อให้แรงดันต้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวแสดงดังภาพ 57 เราพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา  $26.65 \text{ ms}$  โดยหลังจากการติดตาม



สิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าต่ำลงเหลือ 0.354 แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 31.63 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 2.67 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จะจึงมีค่าเท่ากับ 84.45 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.01% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P4

หลังจากนั้นที่เวลา  $t = 700$  ms ได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งโดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $900 \text{ W/m}^2$  และ  $25^\circ\text{C}$  เป็น  $600 \text{ W/m}^2$  และ  $42^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P4 ไปที่จุด P5 ซึ่งอยู่ด้านขวาของจุด P6 ดังนั้น ดิวตี้ไซเคิลของวงจรระดับแรงดันจึงถูกเพิ่มค่าให้สูงขึ้นเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าต่ำลง จะเห็นว่าการติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 22.35 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.452 แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือ 26.59 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 1.77 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จะจึงมีค่าเท่ากับ 47.06 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.06% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P6

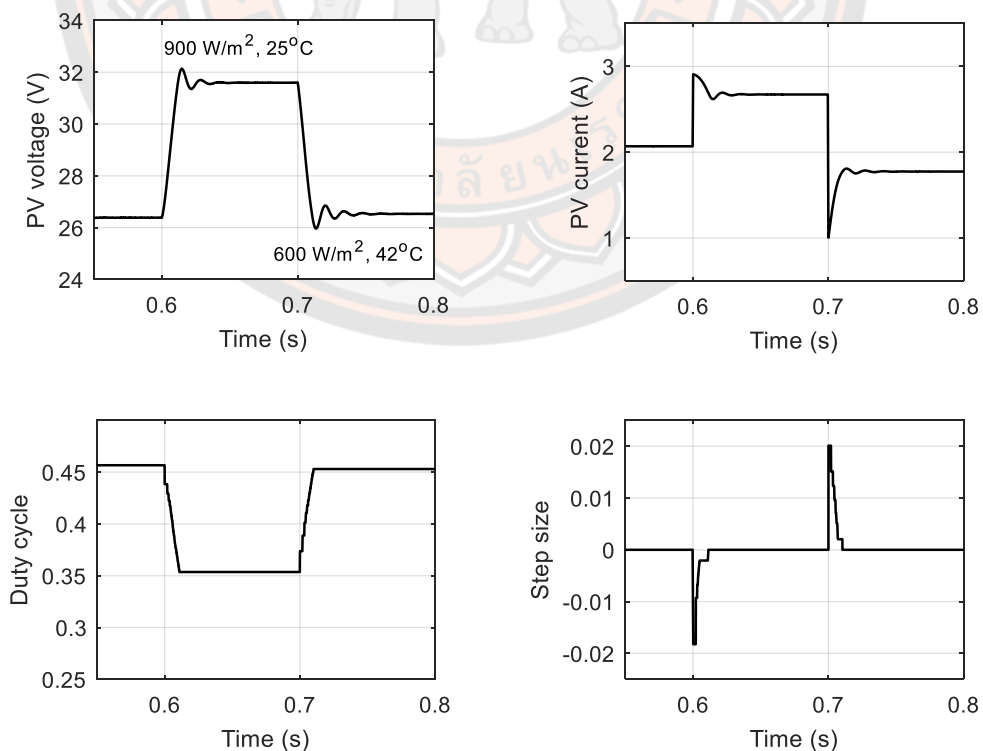


ภาพ 57 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบตรึงขนาดก้าว

หลังจากที่การติดตามจุดกำลังสูงสุดได้เริ่มต้นที่เวลา  $t = 350$  ms แล้ว ในการเขียนโปรแกรมจำลองผลได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่เวลา  $t = 600$  ms โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $700 \text{ W/m}^2$  และ  $45^\circ\text{C}$  เป็น

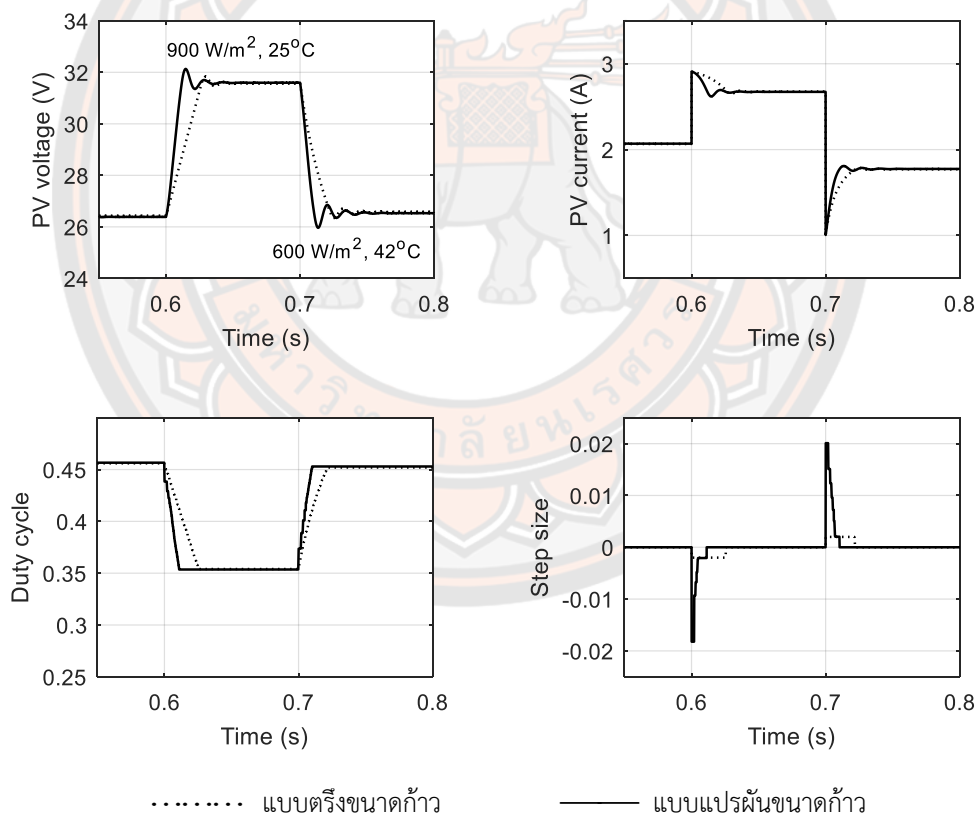
900 W/m<sup>2</sup> และ 25°C ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P2 ไปที่จุด P3 ซึ่งอยู่ด้านซ้ายของจุด P4 ดังนั้น ดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันจึงถูกลดค่าให้ต่ำลงเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวแสดงดังภาพ 58 เราพบว่า การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 11.83 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าต่ำลงเหลือ 0.354 แรงดันด้านออกของแผงเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 31.63 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 2.67 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จึงมีค่าเท่ากับ 84.45 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.01% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P4

หลังจากนั้นที่เวลา  $t = 700$  ms ได้กำหนดให้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งโดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก 900 W/m<sup>2</sup> และ 25°C เป็น 600 W/m<sup>2</sup> และ 42°C ตามลำดับ ซึ่งทำให้จุดทำงานของแผงย้ายจากจุด P4 ไปที่จุด P5 ซึ่งอยู่ด้านขวาของจุด P6 ดังนั้น ดิวตี้ไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันจึงถูกเพิ่มค่าให้สูงขึ้นเพื่อให้แรงดันด้านออกของแผงมีค่าต่ำลง จะเห็นว่าการติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลา 10.47 ms โดยหลังจากการติดตามสิ้นสุดลง ดิวตี้ไซเคิลมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.453 แรงดันด้านออกของแผงลดลงเหลือ 26.59 V และกระแสด้านออกของแผงมีค่าเท่ากับ 1.77 A กำลังด้านออกของแผงในขณะนี้จึงมีค่าเท่ากับ 47.06 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.06% ของค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริง ณ จุด P6



ภาพ 58 ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าว

การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสภาพอากาศโดยใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอแสดงดังภาพ 59 เราพบว่า สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่เวลา  $t = 600$  ms โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $700 \text{ W/m}^2$  และ  $45^\circ\text{C}$  เป็น  $900 \text{ W/m}^2$  และ  $25^\circ\text{C}$  ตามลำดับ การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอใช้เวลาน้อยกว่าแบบตรึงขนาดก้าว  $14.82$  ms หรือช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามได้  $55.60\%$  สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่เวลา  $t = 700$  ms โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนค่าจาก  $900 \text{ W/m}^2$  และ  $25^\circ\text{C}$  เป็น  $600 \text{ W/m}^2$  และ  $42^\circ\text{C}$  ตามลำดับ การติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอใช้เวลาน้อยกว่าแบบตรึงขนาดก้าว  $11.88$  ms หรือช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตามได้  $53.15\%$



ภาพ 59 การเปรียบเทียบผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุด

การเปรียบเทียบค่ากำลังด้านออกของแผงภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่กำหนดขึ้นสำหรับการจำลองผลในงานวิจัยนี้สรุปได้ดังตาราง 6 โดยที่  $S$  คือความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง และ  $T_{cell}$  คืออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่ค่ากำลังด้านออกที่ได้จากการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบตรึงขนาดก้าวและแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนออยู่นั้นถูกนำมาสรุปไว้ในตาราง 7 โดยเปรียบเทียบกับค่ากำลังสูงสุดที่แท้จริงสำหรับแต่ละสภาพอากาศ จะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการติดตามทั้งสองแบบเป็นผลมาจากการยอมให้การติดตามสิ้นสุดลงเมื่อผลบวกของค่าความนำส่วนเพิ่มกับค่าความนำขณะหนึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.002 (ซึ่งไม่ใช่ศูนย์ตามทฤษฎี) จึงทำให้จุดทำงานสุดท้ายที่ได้จากการติดตามทั้งสองแบบอาจเป็นคนละจุด อย่างไรก็ตาม ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำมาก แสดงว่าจุดทำงานสุดท้ายที่ได้นั้นอยู่ใกล้กับจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงอย่างมาก นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแต่ละวิธีภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่กำหนดขึ้น รวมทั้งความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้วิธีแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอถูกนำมาสรุปไว้ในตาราง 8

ตาราง 6 ค่ากำลังด้านออกของแผงก่อนและหลังติดตามจุดกำลังสูงสุด

$S$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{cell}$ (°C)	กำลังด้านออก (W)		กำลังที่เพิ่มขึ้น (%)
		ก่อนติดตาม	หลังติดตาม	
700	45	(P1) 8.36	(P2) 54.59	552.99
900	25	(P3) 76.77	(P4) 84.46	10.02
600	42	(P5) 33.29	(P6) 47.09	41.45

ตาราง 7 ค่ากำลังด้านออกของแผงที่ได้หลังจากติดตามจุดกำลังสูงสุด

$S$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{cell}$ (°C)	กำลังสูงสุด (W)	กำลังที่ได้หลังติดตาม (W)		ค่าคลาดเคลื่อน (%)	
			แบบตรึง	แบบแปรผัน	แบบตรึง	แบบแปรผัน
700	45	(P2) 54.59	54.55	54.58	0.07	0.01
900	25	(P4) 84.46	84.45	84.45	0.01	0.01
600	42	(P6) 47.09	47.06	47.06	0.06	0.06

ตาราง 8 ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามจุดกำลังสูงสุด

$S$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{cell}$ (°C)	ระยะเวลาที่ใช้ติดตาม (ms)		ความเร็วเพิ่มขึ้น (%)
		แบบตรงขนาดก้าว	แบบแปรผันขนาดก้าว	
700	45	98.10	28.67	70.77
900	25	26.65	11.83	55.61
600	42	22.35	10.47	53.15



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบที่มีแบตเตอรี่เป็นโหลดโดยใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวซึ่งอาศัยการควบคุมค่าดิวิตซ์ไซเคิลของวงจรทบทระดับแรงดัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศมีผลต่อความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณลักษณะไฟฟ้าด้านออกของแผงและทำให้จุดกำลังสูงสุดของแผงย้ายตำแหน่ง การวิเคราะห์คุณลักษณะดังกล่าวของแผงถูกแสดงด้วยการจำลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การสวิตชิงของวงจรทบทระดับแรงดันสามารถทำให้จุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดในแต่ละสภาพอากาศซึ่งเป็นการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างเต็มสมรรถภาพ คุณลักษณะการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีเฉลี่ยปริภูมิสเตตเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน รวมทั้งการจำลองผลตอบสนองในวงจรซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการประมาณค่าโดยใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์ถูกนำมาใช้พิจารณาาร่วมกันในการกำหนดขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อให้วงจรมีคุณลักษณะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุด

หลักการแปรผันขนาดก้าวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้อาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังและกระแสด้านออกของแผงเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันด้านออกของแผงที่ต้องการในแต่ละก้าวแล้วคำนวณขนาดก้าวที่สอดคล้องซึ่งใช้กำหนดดิวิตซ์ไซเคิลค่าใหม่ จึงไม่ต้องใช้ตัวประกอบมาคูณกับขนาดก้าวจริงและไม่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ดังเช่นวิธีอื่นที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาพอากาศที่คงที่และสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นว่า หลักการแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอสามารถย้ายจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ไปอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดได้ไม่ว่าจุดทำงานเดิมจะอยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด โดยใช้ระยะเวลาสั้นกว่าแบบตรึงขนาดก้าวอย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าตำแหน่งของจุดทำงานที่ได้หลังการติดตามอาจคลาดเคลื่อนไปจากจุดสูงสุดที่แท้จริงอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการกำหนดขนาดก้าวที่เล็กที่สุด แต่ความคลาดเคลื่อนของกำลังสูงสุดของแผงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในการจำลองผลมีค่าต่ำมาก (ไม่ถึง 0.1%) จึงถือได้ว่าผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดมีความเที่ยงตรง

## ข้อเสนอแนะ

การนำหลักการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำส่วนเพิ่มแบบแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปปฏิบัติกับอุปกรณ์จริงจะช่วยพิสูจน์การใช้งานได้จริงของหลักการที่นำเสนอ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการใช้วิธีความนำส่วนเพิ่มจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตัวรับรู้กระแสและตัวรับรู้แรงดันเพื่อนำค่ากระแสและแรงดันมาคำนวณตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังนั้นในทางปฏิบัติความคลาดเคลื่อนของค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้ย่อมเพิ่มการแกว่งของจุดทำงานรอบจุดกำลังสูงสุด นั่นคือทำให้การติดตามจุดกำลังสูงสุดใช้เวลานานขึ้น ในขณะที่ขนาดก้าวต่ำสุดที่ใช้ในการจำลองผลอาจมีค่าน้อยเกินไปในทางปฏิบัติจนไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านออกของแผง ดังนั้นขนาดก้าวต่ำสุดจำเป็นต้องถูกกำหนดในระหว่างการทดสอบการเปลี่ยนแปลงต่ำสุดของค่าตัวชี้เซลล์ของวงจรทระดับแรงดัน

นอกจากนี้ยังอาจนำผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ไปเปรียบเทียบกับการใช้วิธีแปรผันขนาดก้าวที่นำเสนอในงานวิจัยอื่นที่ได้ศึกษา เช่น การนำตัวประกอบที่มีค่าต่างกันมาคูณกับขนาดก้าวที่ตรึงไว้ หรือการนำตัวประกอบค่าหนึ่งมาคูณกับค่าความชันของเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันด้านออกของแผง ทั้งนี้ การหาค่าตัวประกอบที่เหมาะสมต้องพิจารณาจากความชันของเส้นโค้งดังกล่าวของแผงที่ใช้และขนาดก้าวสูงสุดที่กำหนด นั่นคือ ผลคูณของค่าตัวประกอบกับค่าความชันดังกล่าวต้องมีค่าไม่เกินขนาดก้าวสูงสุด เพราะถึงแม้ตัวประกอบที่มีค่ามากจะช่วยเพิ่มความเร็วในการติดตาม แต่ก็จะทำให้เกิดการแกว่งของจุดทำงานรอบจุดกำลังสูงสุด

## บรรณานุกรม

1. G. Hille, W. Roth, and H. Schmidt, *Course book for the seminar Photovoltaic Systems*. 1995, Freiburg, Germany: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
2. J. Nelson, *The physics of solar cells*. 2003, London: Imperial College Press.
3. W. Shockley, *Electrons and holes in semiconductors : with applications to transistor electronics*. 1950, New York: D. Van Nostrand Co., Inc.
4. N. Jantharamin, "Maximum-Power-Point Approximation for Photovoltaic Arrays". Naresuan University Engineering Journal (NUEJ), January-June 2012. **vol.7**(no.1): p. 37-42.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. R. Benkercha, S. Moulahoum, and I. Colak. "Modelling of Fuzzy Logic Controller of a Maximum Power Point Tracker Based on Artificial Neural Network". in 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). 2017.
10. H. S. Agha, Z. Koreshi, and M.B. Khan. "Artificial neural network based maximum power point tracking for solar photovoltaics". in 2017 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT). 2017.



11. 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.
12. 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.
13. M. H. Uddin, M. A. Baig, and M. Ali. "Comparison 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิมพล ธาราธิรเศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" (พิมพ์ครั้งที่ 10 ). 2553, กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง.
18. Middlebrook, R.D. and S. Cuk. A general unified approach to modelling switching-converter power stages. in 1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1976.
19. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม =: *Numerical Methods in Engineering* พิมพ์ครั้งที่ 8. 2555, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.