



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การจำลองสถานการณ์และผลทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่

Simulation and experimental results the maximum power point tracking of PV stand-alone system using fixed step size incremental conductance method

วีรภัทร คำพันธ์¹ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง² รัฐพล โพธิ์สังข์¹ กองพัน อารีรักษ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹
ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800

Weerapat Kamphan¹ Koson Chaicharoenudomrung² Ratapon Phosung¹ Kongpan Areerak^{1*}
Kongpol Areerak¹ Thipwan Fungsuwannarak¹

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

² Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB Bangkok 10800

* Corresponding author.

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

วันที่รับบทความ 21 พฤศจิกายน 2565 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 28 มกราคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 10 เมษายน 2566
วันที่ตอบรับบทความ 27 เมษายน 2566

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีการเพิ่มค่าความนำ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

Abstract

Tracking the maximum power point of a PV system is essential for both stand-alone and grid-connected PV systems to ensure that the solar cells can produce the highest power for different environmental conditions. This paper proposes the maximum power point tracking for a PV stand-alone system using incremental conductance method. The control

principle of the proposed method uses the duty cycle adjustment via the buck converter to obtain the maximum power output of stand-alone PV system. The control performance was confirmed by MATLAB/ Simulink simulation and experiment results. It has been demonstrated that the maximum power point tracking of stand-alone PV system by incremental conductance method can follow the peak power point in all environmental changes.

Keywords

The maximum power point tracking; Incremental conductance method; PV Stand-alone system

1. บทนำ

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

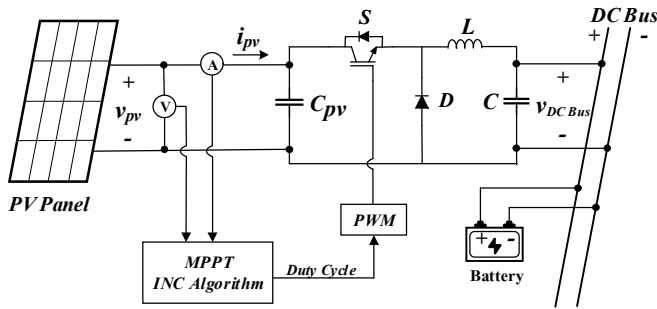
วิธีควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้นำเสนอในอดีตมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage: VOC) [7,8] วิธีเทียบสัดส่วนกระแสขณะลัดวงจร (Short Circuit Current: ISC) [9,10] วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation Method: P&O) [11] และวิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: INC) [12,13] เป็นต้น จากวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการที่ถูกนำมาใช้งานและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันคือวิธีเพิ่มค่าความนำ ซึ่ง

เป็นวิธีการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า แล้วคำนวณหาจุดการทำงานถัดไป วิธีนี้ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าดีกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน[14,15] บทความนี้จึงได้เลือกนำเสนอวิธีการเพิ่มค่าความนำ ผ่านผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power system block) ร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB รวมถึงการสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่

บทความนี้ประกอบไปด้วย 8 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบที่ทำการพิจารณาและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่นำมาใช้ในบทความนี้ ส่วนที่ 3 จะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยจะระบุฟังก์ชันที่นำมาใช้ในบทความ ส่วนที่ 4 จะเป็นหลักการการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำ รวมถึงการออกแบบเลือกค่าขนาดของการเปลี่ยนแปลง (step size) ที่เหมาะสมกับระบบ ส่วนที่ 5 จะเป็นขั้นตอนการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ส่วนที่ 6 จะเป็นขั้นตอนการออกแบบการสร้างชุดทดสอบ การนำเสนอผลการทดสอบ และส่วนสุดท้าย จะเป็นสรุปและอภิปรายผลการทดสอบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้

2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่ทำการพิจารณาในบทความนี้จะประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่ต่ออยู่กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ มีโหลดเป็นแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบที่ทำการพิจารณา

จากคุณสมบัติของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน พิจารณาให้แหล่งจ่ายเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ มีโหลดของวงจรเป็นแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าที่โหลดคงที่ ($V_{DC Bus}$) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{pv}) คูณอยู่กับค่าตัวจูนที่ (d) แสดงดังสมการที่ (1)

$$V_{DC Bus} = d \cdot V_{pv} \quad (1)$$

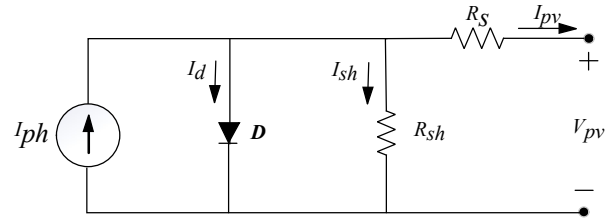
จากสมการที่ (1) พิจารณาแรงดันแบตเตอรี่ให้มีค่าคงที่เมื่อเราทำการปรับค่าตัวจูนที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันเปลี่ยนไป แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วยแสดงดังสมการที่ (2) หากต้องการให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนไปที่จุดแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องปรับค่าตัวจูนที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันให้ได้ค่าตัวจูนที่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังสมการที่ (3)

$$V_{pv} = \frac{V_{DC Bus}}{d} \quad (2)$$

$$V_{pv, mpp} = \frac{V_{DC Bus}}{d_{mpp}} \quad (3)$$

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะถูกผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำและวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดกระแสด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{ph}) ต่อขนานกับไดโอด ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และความต้านทานอนุกรม (R_s) กระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแบ่งไปที่ไดโอด (I_d) และไหลผ่านตัวต้านทานขนาน (I_{sh}) กระแสไฟฟ้าขาออก (I_{pv}) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

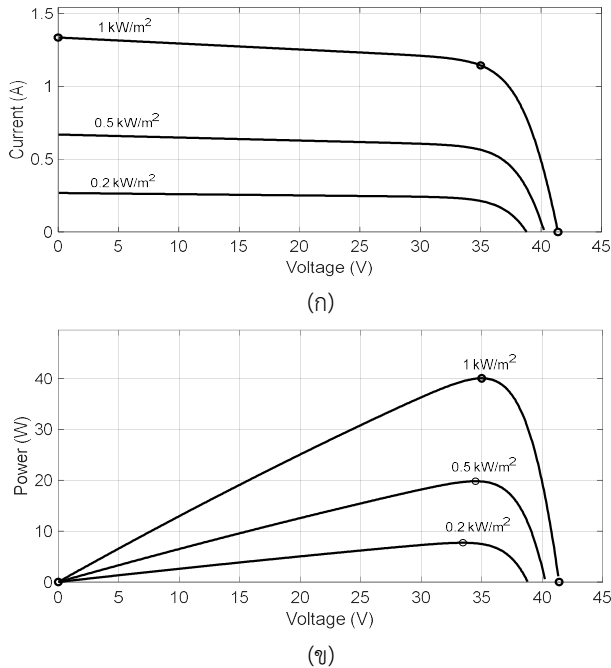
จากวงจรสมมูลเซลล์ของแสงอาทิตย์ในรูปที่ 2 สามารถอธิบาย I_{pv} ได้ในสมการ

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

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

เมื่อ V_{pv} คือแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์, I_{mpp} คือกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์, I_0 คือกระแสไบอัสย้อนกลับของไดโอด, $I_{s.c.}$ คือกระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ $25^\circ C$, A คือ แฟกเตอร์ในอุดมคติ, k คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/Kevin, T คือ อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์, T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงที่ $25^\circ C$, q คือประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C, K_i คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร มีค่าเท่ากับ $6.167 \times 10^{-4} ^\circ C$, I_{rr} คือ ความเข้มแสงมีหน่วยเป็น W/m^2 และ $I_{rr, ref}$ คือ ความเข้มแสงอ้างอิงที่ $1000 W/m^2$ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้แสดงดังตารางที่ 1 เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

เซลล์แสงอาทิตย์โมเดล Geape Solar GS-P-40-PDX บนโปรแกรม MATLAB/Simulink และกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า

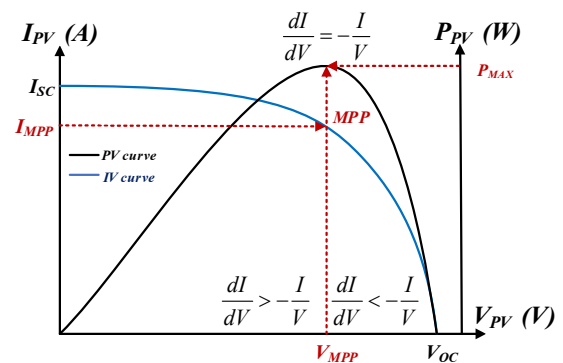
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

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

จากกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์รูปที่ 3 (ก) จะเห็นว่าเมื่อความเข้มของแสงอาทิตย์ต่างกันที่ความเข้มแสง 1 kW/m², 0.5 kW/m² และ 0.2 kW/m² จะสังเกตได้ว่าเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้ามีความแตกต่างกัน รวมถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข)

4. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวิถีการทำงานคงที่

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการเพิ่มค่าความนำหลักการนี้จะทำงานเป็นคาบเวลาโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการปรับที่ค่าวิถีการหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน จากรูปที่ 1 ระบบที่พิจารณา จะเห็นได้ว่าในระบบจะมีการใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยผ่านอัลกอริทึมการเพิ่มค่าความนำจากนั้นทำการจ่ายสัญญาณค่าวิถีการหน้าที่ให้กับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน โดยอัลกอริทึมจะทำการเปรียบเทียบว่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดควรอยู่ที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่าไร จากนั้นอัลกอริทึมจะทำการปรับเพิ่ม หรือลดแรงดันไฟฟ้า ให้เข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ให้ได้มากที่สุด



รูปที่ 4 การตามรอยจุดกำลังสูงสุดของอัลกอริทึมวิธีการเพิ่มค่าความนำ

อัลกอริทึมของการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วิธีการเพิ่มค่าความนำจะอาศัยหลักการที่ว่า จากรูปที่ 4 ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าความชันของรูปกราฟมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น เราสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จาก การหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการกำลังไฟฟ้า (P) ที่มีแรงดันไฟฟ้า (V) คูณกับกระแสไฟฟ้า (I) ดังสมการที่ (4)

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

จากนั้นทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งโดยเทียบกับเวลา จะได้ดังสมการที่ (5)

$$dP = V \cdot dI + I \cdot dV \quad (5)$$

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

$$\frac{dP}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \quad (6)$$

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

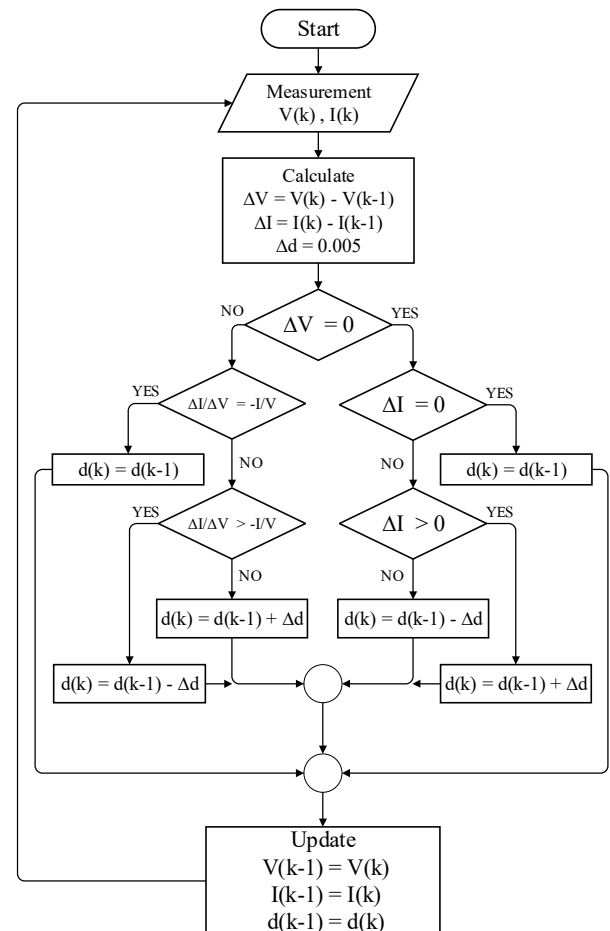
$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (7)$$

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไฟฟ้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด อัลกอริทึมจะทำการคงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน เพื่อให้ได้แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ถ้าหากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรูปกราฟ อัลกอริทึมจะทำการปรับลดค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และหากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรูปกราฟ อัลกอริทึมจะทำการปรับเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อเป็นการลดแรงดันไฟฟ้า จนได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังสมการที่ (8), (9) และสมการที่ (10) นอกจากนี้อัลกอริทึมยังต้องทำการตรวจสอบค่าที่ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอ่านได้ มาตรวจสอบอีกว่าหากขนาดของแรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจะทำการตรวจสอบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง จะทำการคงค่าวัฏจักรหน้าที่ หากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่าศูนย์ จะทำการเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ หากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าศูนย์ จะทำการลดค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกรณีขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทำให้อัลกอริทึมทำงานในรอบต่อไปได้ สามารถเขียนเป็นแผนผังการทำงานของอัลกอริทึมได้ดังรูปที่ 5 โดย step size (Δd) ที่เลือกใช้ในบทความนี้จะเริ่มทดสอบจากค่าน้อยก่อน

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

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

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



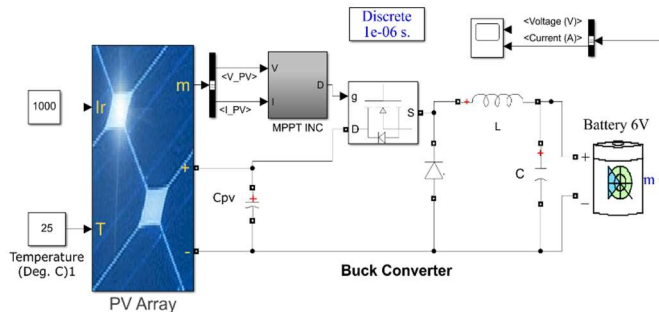
รูปที่ 5 แผนผังหลักการทำงานของอัลกอริทึมวิธีการเพิ่มค่าความนำ

5. การจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB/Simulink

การจำลองสถานการณ์ในบทความนี้จะทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จะแสดงดังตารางที่ 2

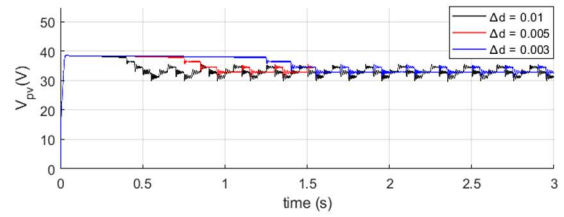
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบ

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

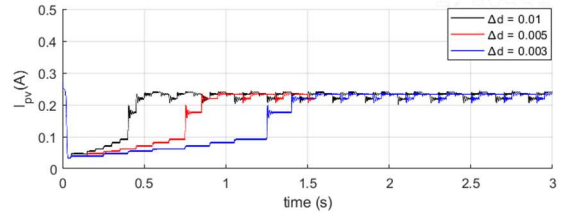


รูปที่ 6 การจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการเพิ่มค่าความนำในโปรแกรม MATLAB/Simulink

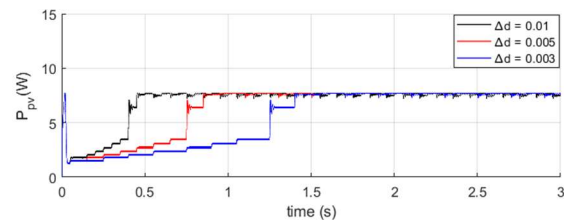
การจำลองสถานการณ์ดำเนินการภายใต้ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน และสังเกตการณ์ตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าในความเข้มแสงนั้นๆ โดยความเข้มแสงที่พิจารณา คือ 200 W/m^2 , 500 W/m^2 , 1000 W/m^2 และกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ 25°C เพื่อให้เห็นว่าอัลกอริทึมการเพิ่มค่าความนำ สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้สอดคล้องกับความเข้มแสงต่างๆ การจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงผลของค่า step size (Δd) ที่ต่างกันจะทำให้การตอบสนองความรวดเร็วในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและการสั่นไหวของกำลังไฟฟ้าที่ต่างกัน บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หลักการพิจารณาจะทำการทดสอบค่า Δd เป็นแต่ละกรณี เริ่มจากค่า Δd น้อยก่อน พิจารณาจากค่าที่สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เกิดการสั่นไหวของกำลังไฟฟ้าน้อย มีระยะเวลาในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ช้าจนเกินไป ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9 อ้างอิงกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่ละความเข้มแสงอ้างอิงจากกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ตามที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3



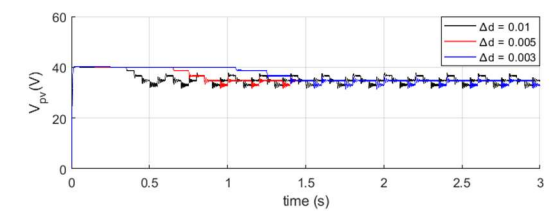
(ก)



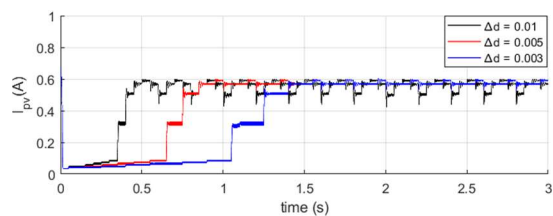
(ข)



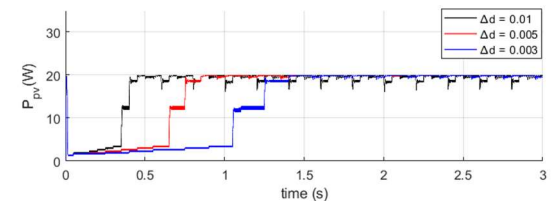
(ค)

รูปที่ 7 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 200 W/m^2 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

(ก)

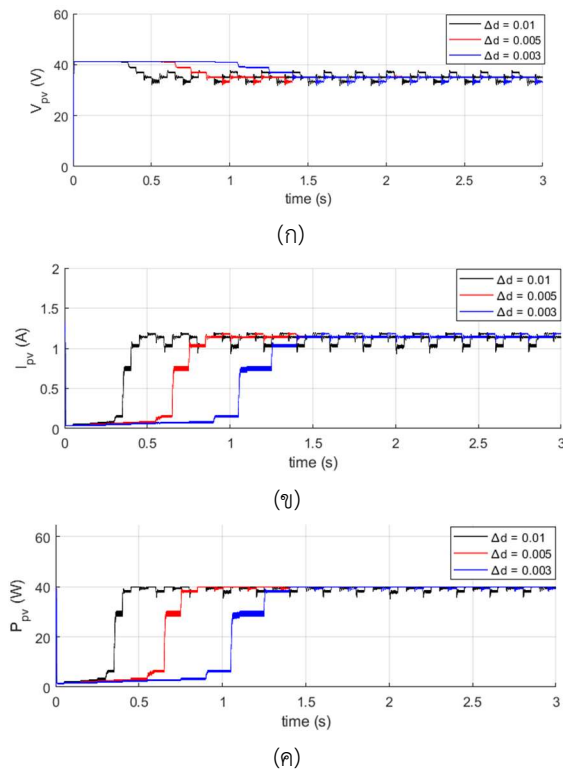


(ข)



(ค)

รูปที่ 8 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า



รูปที่ 9 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 25°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

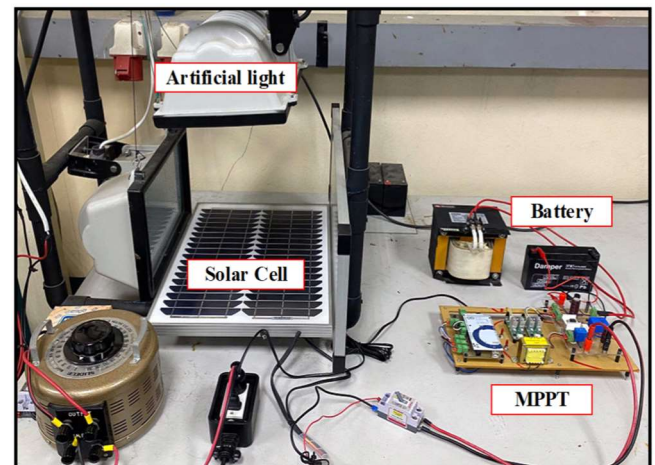
จากผลการจำลองสถานการณ์ที่ความเข้มแสง 200 W/m^2 , 500 W/m^2 และ 1000 W/m^2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเริ่มต้นการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอัลกอริทึมการเพิ่มค่าความนำแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าที่ลดลงจากพิกัดแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์มาที่แรงดันจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 7, 8 และ 9 (ก) กระแสไฟฟ้ามีการไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังแบตเตอรี่ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังรูปที่ 7, 8 และ 9 (ข) ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด นั่นก็คือ 8 W ที่ความเข้มแสง 200 W/m^2 , 20 W ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 และ 40 W ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 ดังรูปที่ 7, 8 และ 9(ค) ผลของการลู่เข้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละความเข้มแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับค่า Δd หากปรับกว้างจะทำให้ลู่เข้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็ว แต่จะเกิดการสั่นของกำลังไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัว ถ้าหากปรับแคบจะทำให้ลู่เข้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้า แต่ที่สถานะอยู่ตัวจะได้กำลังไฟฟ้าที่แกว่งไกวน้อย ในบทความนี้จะเลือกใช้ค่า Δd ที่ 0.005 สำหรับการนำไปใช้เป็นค่าตั้งต้นของชุดทดสอบ จะต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่า Δd ที่เหมาะสม

ใหม่ โดยพิจารณาจากการเพื่อให้การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

6. ผลการทดสอบ

จากระบบที่พิจารณา สามารถออกแบบชุดทดสอบที่ประกอบไปด้วย แสงอาทิตย์เทียม เซลล์แสงอาทิตย์ ชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด และแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 10

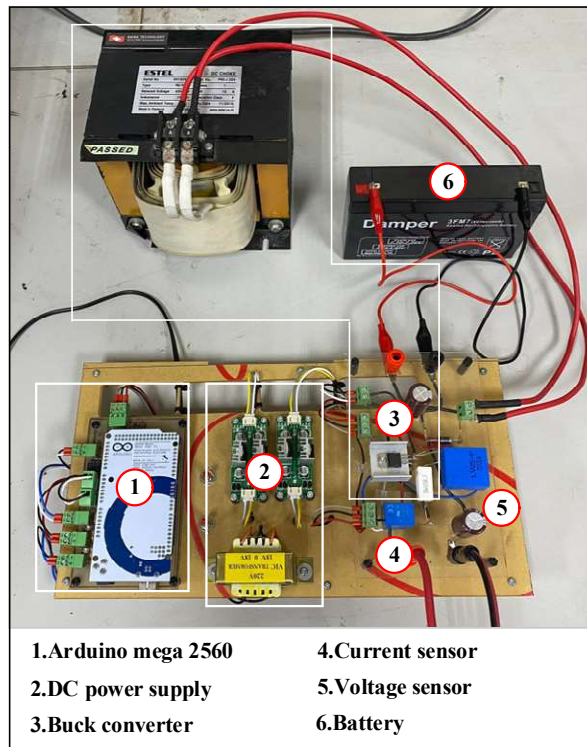
และจากรูปที่ 10 ชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะประกอบไปด้วย Arduino mega 2560 , แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน, วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า รูปที่ 11 แสดงรายละเอียดส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ พารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดทดสอบแสดงในตารางที่ 3 โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น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



รูปที่ 10 ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ 40W

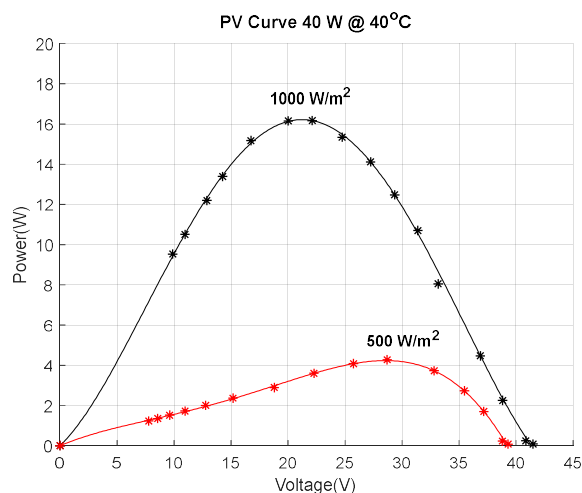
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในชุดทดสอบ

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



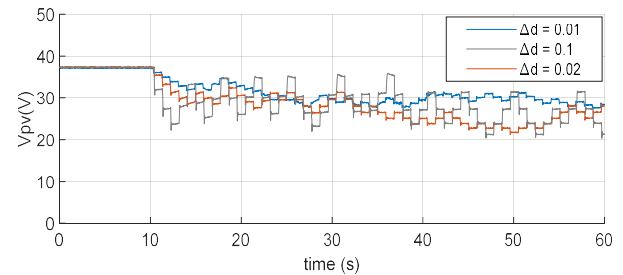
รูปที่ 11 ชุดตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)

จากระบบของชุดทดสอบสามารถหากราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในชุดทดสอบได้ด้วยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0% ถึง 100% เพื่อหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมาได้ ณ อุณหภูมิหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทดสอบ 40°C ที่ความเข้มแสง 500 W/m² ได้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 4.3 W และที่ความเข้มแสง 1000 W/m² ได้กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 16.2 W แสดงได้ดังรูปที่ 12

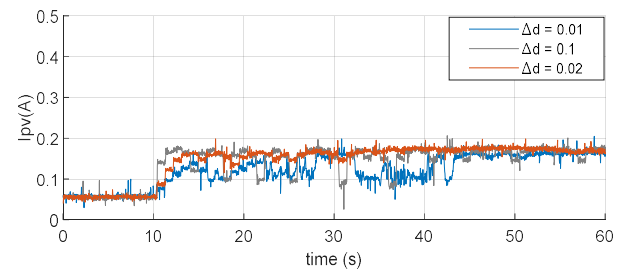


รูปที่ 12 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชุดทดสอบ 40W 40°C

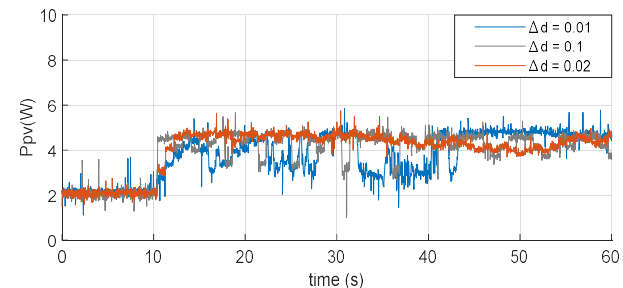
จากระบบของชุดทดสอบ จำเป็นต้องทดสอบค่า Δd ใหม่ เนื่องจากไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แท้จริงได้รวมถึงปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เช่น อุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ผลจากการจำลองสถานการณ์ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่าตั้งต้น และการวิเคราะห์สำหรับการสร้างชุดทดสอบ การทดสอบชุดทดสอบในบทความนี้ได้เพิ่มระยะเวลาการทำงาน (T_s) ของชุดทดสอบเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า



(ก)



(ข)

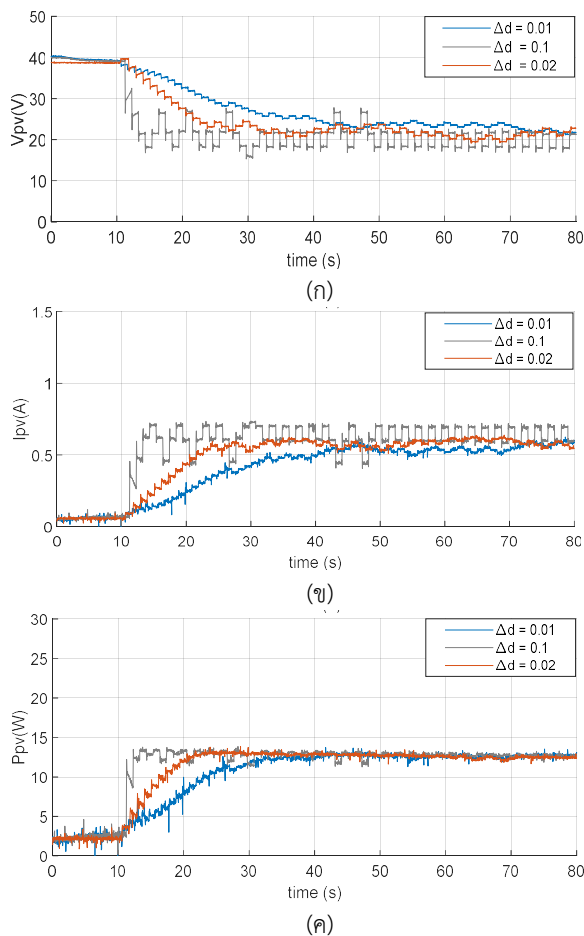


(ค)

รูปที่ 13 ผลการทดสอบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 500 W/m² 40°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

จากผลการทดสอบรูปที่ 13 การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 500 W/m² อุณหภูมิที่ 40°C จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเริ่มการทำงานการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่ ที่วินาทีที่ 10 อัลกอริทึมจะทำการลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลงมาให้อยู่ในจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดดังรูปที่ 13 (ก) ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังแบตเตอรี่ดังรูปที่

13 (ข) ได้กำลังไฟสูงสุดอยู่ที่ 4.32 W ดังรูปที่ 13 (ค) เมื่อเปรียบเทียบความไวในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวของกำลังไฟระหว่างค่าการปรับค่า Δd ต่างกัน ค่า Δd ที่ลู่วเข้าไวที่สุดก็คือ $\Delta d = 0.1$ และช้าที่สุดก็คือ $\Delta d = 0.01$ ส่วนค่า $\Delta d = 0.02$ จะลู่วเข้าช้ากว่า $\Delta d = 0.1$ แต่จะมีความคงตัวที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ค่าข้างต้น



รูปที่ 14 ผลทดสอบการตามรอยกำลังไฟสูงสุดที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 40°C (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า (ค) กำลังไฟฟ้า

จากผลการทดสอบรูปที่ 14 การตามรอยกำลังไฟสูงสุดที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิที่ 40°C เมื่อมีการเริ่มการทำงานของอัลกอริทึม ที่วินาทีที่ 10 อัลกอริทึมจะทำการลดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลงมาให้อยู่ในจุดที่ได้กำลังไฟสูงสุดดังรูปที่ 14 (ก) ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังแบตเตอรี่ดังรูปที่ 14 (ข) ได้กำลังไฟสูงสุดอยู่ที่ 14.2 W ดังรูปที่ 14 (ค) เมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างการปรับค่า Δd ต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่า $\Delta d = 0.1$ จะมีผลการตอบสนองลู่วเข้าสภาวะอยู่ตัวไวที่สุดแต่จะมี

การสั่นของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟเกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาจะเป็นค่า $\Delta d = 0.02$ และ $\Delta d = 0.01$ จะมีการสั่นของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟที่น้อยที่สุดแต่ให้ผลตอบสนองที่ช้าที่สุด

จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของการตามรอยกำลังไฟสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่ที่ความเข้มแสงทั้ง 2 ค่า มีค่า Δd ที่เหมาะสมที่จะเลือกใช้สำหรับชุดทดสอบในบทความนี้นั้นก็คือ $\Delta d = 0.02$ ซึ่งให้ผลการตอบสนองที่ดีในสภาวะอยู่ตัว และมีความไวที่เหมาะสมกับการเลือกไปใช้งานกับชุดทดสอบ

7. สรุป

การตามรอยกำลังไฟสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำแบบเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานคงที่ที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ไปยังแบตเตอรี่ได้ การติดตามจุดกำลังไฟสูงสุดสามารถติดตามที่ความเข้มของแสงอาทิตย์ต่างกัน ส่วนความเร็วในการติดตามจุดกำลังไฟสูงสุดและการสั่นไหวของกำลังไฟที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่า Δd ให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบมีความสอดคล้องและสามารถยืนยันประสิทธิภาพของการควบคุมการตามรอยจุดกำลังไฟสูงสุดได้

วิธีการตามรอยจุดกำลังไฟสูงสุดที่นำเสนอในบทความนี้สามารถนำไปปรับใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ได้ แต่มีข้อจำกัดในการเลือกค่า Δd ให้เหมาะสมกับระบบ หากปรับค่า Δd น้อยเกินไปจะทำให้ระบบติดตามจุดกำลังไฟสูงสุดได้ช้า หากปรับค่า Δd มากเกินไปจะทำให้เกิดกำลังไฟมีการสั่นไหวสูงและอาจส่งผลให้ชุดทดสอบเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นในอนาคตจะเป็นการพัฒนาให้ค่าของ Δd สามารถปรับตัวเพื่อที่จะเป็นการปรับปรุงสมรรถภาพของการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (TSRI) และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการ

ทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์
อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alrikabi N. Renewable energy types. *Journal of Clean Energy Technologies*. 2014; 2(1): 61-64.
- [2] Shiau JK., Wei YC, Chen BC. A Study on the fuzzy-logic-based solar power MPPT algorithms using different fuzzy input variables. *Algorithms*. 2015; 8(2): 100-127.
- [3] Podder AK, Roy NK, Pota HR. MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature. *IET Renewable Power Generation*. 2019; 13(10): 1615-1632.
- [4] Esum T, Chapman PL. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007;22(2): 439-449.
- [5] Strunz K, Abbasi E, Huu DN. DC microgrid for wind and solar power integration. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2014; 2(1): 115-126.
- [6] Ngan MS, Tan CW. A study of maximum power point tracking algorithms for stand- alone photovoltaic systems. *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*. Johor Bahru, Malaysia, 2011, pp. 22-27.
- [7] Ahmad J. A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays. *2010 2nd International Conference on Software Technology and Engineering*, San Juan, PR, USA, 2010, pp. V1-247-V1-250.
- [8] Alli SS, Jovanović S, Poure P, Jamshidpour E. MPPT and output voltage control of photovoltaic systems using a single-switch DC-DC converter. *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Leuven, Belgium, 2016. pp. 1-6.
- [9] Diaz N, Luna A. Duarte O. Improved MPPT short-circuit current method by a fuzzy short- circuit current estimator. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Phoenix, AZ, USA, 2011*. pp. 211-218.
- [10] Thueanpangthaim C, Wongyai P, Areerak K, Areerak K. The maximum power point tracking for stand- alone photovoltaic system using current based approach. *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Pattaya, Thailand, 2017. pp. 1-4.
- [11] Boukenoui R, Bradai R, Mellit A, Ghanes M. Salhi H. Comparative analysis of P&O, modified hill climbing-FLC, and adaptive P&O-FLC MPPTs for microgrid standalone PV system. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Palermo, Italy, 2015. pp. 1095-1099.
- [12] Halder T. A maximum power point tracker (MPPT) using the incremental conductance (INC) technique. *7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Patiala, India, 2016. pp.1-6.
- [13] Abdourraziq MA, Maaroufi M, Ouassaid M. A new variable step size INC MPPT method for PV systems. *International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. 14-16 April 2014.
- [14] Jain K., Gupta M, Bohre AK. Implementation and comparative analysis of P&O and INC MPPT method for PV system. *8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. 13-15 Dec 2018. pp 1-6.
- [15] Sera D, Mathe L, Kerekes T, Spataru SV, Teodorescu R. On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2013; 3(3): pp. 1070-1078.