



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

Maximum power point tracking of stand-alone photovoltaic system using fuzzy logic based on P&O method

อิชฐ์ รุ่งเจริญ¹ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง² จักรกริช ภักดีโต³ กองพัน อารีรักษ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

³ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Athit Rungjaroen¹ Koson Chaicharoenaudomrung² Jakkrit Pakdeeto³ Kongpan Areerak^{1*}
Kongpol Areerak¹

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

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

³ Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB, Bangkok 10800

* Corresponding author.

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

วันที่รับบทความ 16 มกราคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 31 พฤษภาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 9 สิงหาคม 2566

วันที่ตอบรับบทความ 6 กันยายน 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ระบบที่พิจารณาประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคและใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงาน ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยทั่วไปจะใช้วิธีการรบกวนและสังเกตเนื่องจากมีการควบคุมที่ง่าย ประสิทธิภาพของวิธีการรบกวนและสังเกตขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณควบคุม โดยใช้สูตรการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่ (ΔD) เป็นสัญญาณควบคุม ฟัซซีลอจิกสามารถนำมาใช้งานกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ซึ่งทำให้การนำไปใช้ได้กับระบบหลายระบบ ในบทความนี้อาศัยฟัซซีลอจิกกำหนดค่า ΔD ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม วิธีการที่นำเสนอจะยืนยันประสิทธิภาพโดยใช้ Simulink ในโปรแกรม MATLAB การทดสอบในห้องปฏิบัติการและชุดต้นแบบขนาด 2.4 kW ที่นำไปใช้กับโรงเรือนควบคุมระบบจ่ายน้ำ ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการจำลองและผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดได้เร็วกว่าและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต

คำสำคัญ

การตามรอยจุดกำลังสูงสุด ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการรบกวนและสังเกต วิธีฟัซซีลอจิก

Abstract

This paper presents a maximum power point tracking (MPPT) for stand-alone photovoltaic (PV) system. The considered system consists of a PV panel connected to a buck converter and a battery used as energy storage. The MPPT commonly used perturb and observe (P&O) method because the control is simple. The efficiency of the P&O MPPT method depends on the appropriate step size of control signal. The duty cycle rate of change (ΔD) was used as a step size of control

signal. Fuzzy logic control (FLC) can be used for non-linear tasks, resulting in a wide variety of applications. In this paper, FLC is used to determine the ΔD to optimize to increase the control efficiency. The proposed MPPT method performance is proven by using MATLAB/Simulink, Laboratory prototype and 2.4 kW prototype applied to water distribution control house of the university farm, Suranaree University of Technology. The simulation and experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed MPPT method. The proposed algorithm can provide the faster maximum power convergence and can reduce steady-state power fluctuations better than those of P&O method.

Keywords

maximum power point tracking; PV system; perturb and observe method; fuzzy logic method

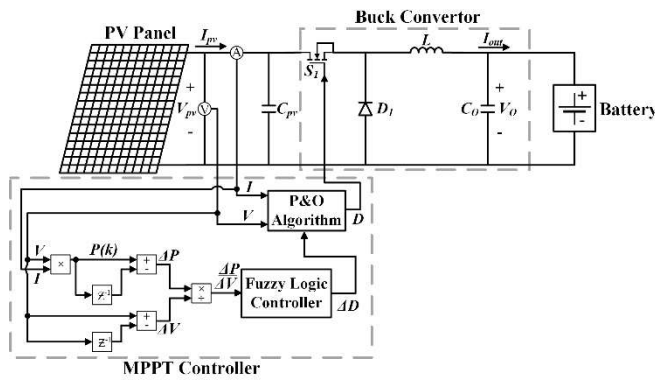
1. คำนำ

พลังงานทดแทนเป็นสิ่งที่ได้รับความนิยมและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน พลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกหนึ่งพลังงานทดแทนที่ผู้คนให้ความสนใจและนิยมนำมาใช้ เพราะเป็นพลังงานทดแทนที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์นั้นได้มีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ณ สภาพแวดล้อมนั้น ๆ ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานสูงสุดได้ในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ วิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายวิธีสามารถศึกษาได้จาก [1] วิธีที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธีการรบกวนและสังเกต [2-13] เนื่องจากวิธีนี้มีอัลกอริทึมที่ง่ายต่อการนำมาใช้งาน วิธีการเพิ่มค่าความนำ [7-10] และยังมีวิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์ อาทิ วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network : ANN) วิธีฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Control : FLC) [8,10,11,13-16] วิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะมีข้อดีในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีและมีผลการตอบสนองที่รวดเร็ว แต่วิธีเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยผู้ที่เชี่ยวชาญในการพัฒนาระบบหรือข้อมูลในการฝึกสอนที่เพียงพอระบบจึงจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี ดังนั้น ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกต [10,13] โดยวิธีการรบกวนและสังเกตจะเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว ภายใต้ความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะแวดล้อมนั้น ๆ ทำให้ไม่สามารถหาจุดจ่าย

กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง จึงต้องนำวิธีฟัซซีลอจิกเข้ามาใช้งานร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตเพื่อช่วยให้เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วขึ้นและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าวิธีฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ สภาวะอยู่ตัวและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยจะทำการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีดังกล่าวจากชุดอุปกรณ์ทดสอบที่สร้างขึ้นมาทั้งหมด 2 ชุด ชุดแรกจะเป็นชุดที่ใช้ทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W ในห้องปฏิบัติการ และชุดที่สองเป็นชุดที่ใช้ทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2,400 W ที่ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. ระบบที่พิจารณา

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (stand-alone system) ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกต วิธีดังกล่าวนำมาใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัค (buck converter) เพื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ความเข้มแสงขณะนั้น และมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำรอง



รูปที่ 1 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟuzzyลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตซึ่งในที่นี้คือแรงดันแผง PV (V_{pv}) และเอาต์พุต (V_o) ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เป็นดังสมการที่ (1)

$$V_o = DV_{pv} \quad (1)$$

เมื่อ D คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่

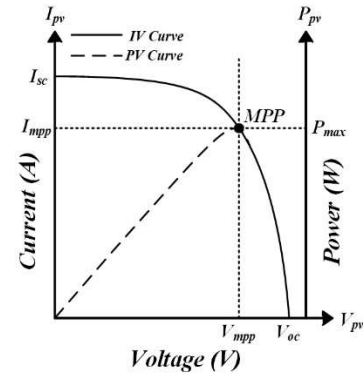
จากสมการที่ (1) พิจารณาให้แรงดันเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับแรงดันแบตเตอรี่ $V_o = V_{batt}$ สามารถกำหนดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เท่ากับแรงดันที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด $V_{pv} = V_{mpp}$ โดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

2.1 หลักการควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (MPPT)

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปต้องอาศัยระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในสภาวะความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ณ สภาวะนั้น ๆ ซึ่งการควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดนั้นมีด้วยกันอยู่หลายวิธี อาทิ วิธีการหาค่าความนำ (Incremental conductance : Inc Con) วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation Method: P&O) วิธีฟuzzyลอจิก (Fuzzy Logic Control : FLC) เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า เมื่อปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะมีผลทำให้กระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ถ้า

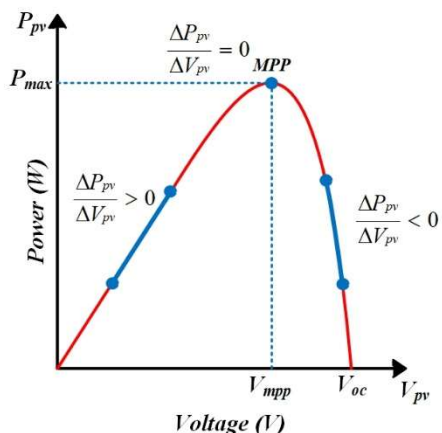
แสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิมีค่าคงที่สามารถสร้างกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2 กราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เป็นเชิงเส้น ค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ไม่สามารถถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ดังนั้นการนำระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมาใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ณ สภาวะแวดล้อมนั้น ๆ

กราฟลักษณะเฉพาะกำลังไฟฟ้าเทียบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V Curve) แสดงดังรูปที่ 3

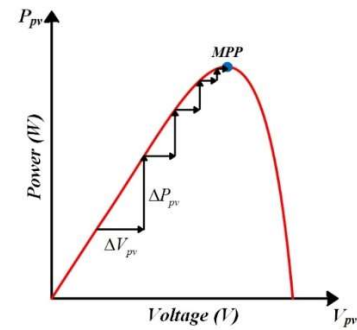


รูปที่ 3 กราฟลักษณะเฉพาะกำลังไฟฟ้าเทียบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V Curve)

จากกราฟรูปที่ 3 สามารถปรับเปลี่ยนแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและอธิบายจุดการทำงานได้ดังสมการที่ (2)

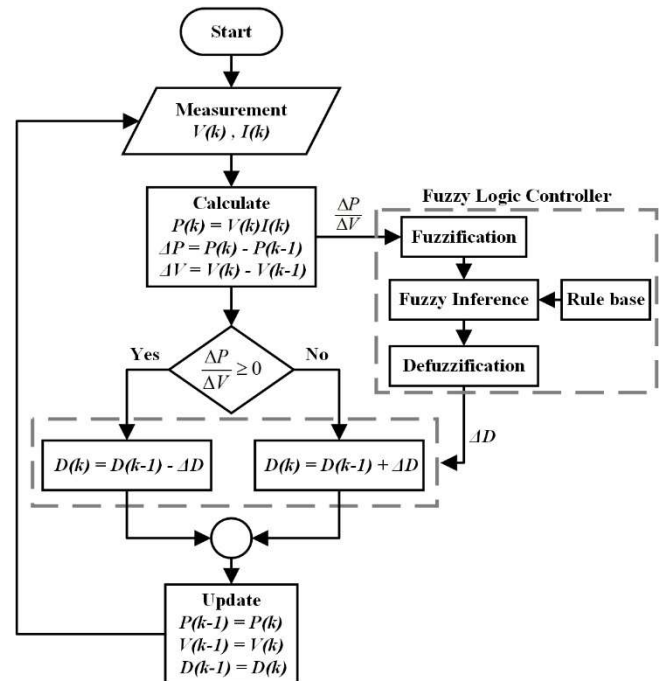
$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} &> 0 && \text{Left of MPP} \\ \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} &= 0 && \text{at MPP} \\ \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} &< 0 && \text{Right of MPP} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยฟัชชีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ วิธีนี้จะทำงานเป็นคาบเวลาโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และจะวัดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แล้วนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้านี้เพื่อพิจารณาการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ เพื่อให้จุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าใกล้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ สภาวะความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะนั้น ๆ ดังนั้นจึงนำฟัชชีลอจิกเข้ามาช่วยในการกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ ΔD โดยพิจารณาจากอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ($\Delta P / \Delta V$) ถ้า $\Delta P / \Delta V$ มีค่าห่างจากศูนย์มาก แสดงว่าจุดการทำงานอยู่ห่างจากจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาก จึงกำหนดให้การปรับค่าการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีขนาดกว้าง และถ้า $\Delta P / \Delta V$ มีค่าห่างจากศูนย์น้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่าจุดการทำงานอยู่ห่างจากจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อย จึงกำหนดให้การปรับค่าการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีขนาดเล็กเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะอยู่ตัว โดยแสดงการเปลี่ยนจุดการทำงานดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การลู่เข้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การควบคุมของอัลกอริทึมจะเริ่มจากการวัดค่าแรงดันและกระแสอินพุตเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อพิจารณาจุดการทำงานของอัลกอริทึมตามรูปที่ 4 และจะทำการเพิ่มหรือลดแรงดันอิงจากสมการที่ (1) โดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ เมื่อจุดการทำงานอยู่ห่างจากจุด MPP ฟัชชีลอจิกจะทำการปรับ ΔD ให้มีขนาดกว้างซึ่งจะส่งผลให้แรงดัน V_{pv} มีการเปลี่ยนแปลงมาก และเมื่อจุดการทำงานเข้าใกล้จุด MPP จะทำการปรับ ΔD ให้มีขนาดน้อยจนเข้าสู่จุด MPP รูปที่ 5 แสดงแผนผังการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยฟัชชีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

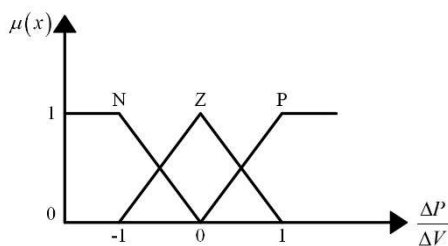


รูปที่ 5 แผนภาพอัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ

2.2 การควบคุมฟัซซี

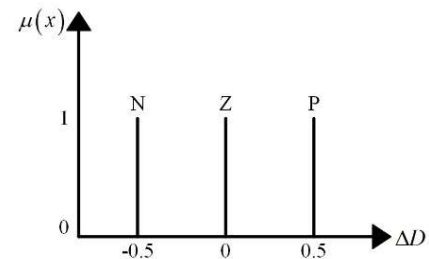
จากรูปที่ 1 การควบคุมฟัซซีที่ออกแบบสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ อินพุตของระบบควบคุมคือค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีคือค่าการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ (ΔD) กระบวนการของฟัซซีลอจิกจะแบ่งออกเป็นดังนี้

กระบวนการ Fuzzification หรือการกำหนดค่าฟังก์ชันเซตรวมถึงการกำหนดค่าตัวแปรทางภาษาสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุด มีค่าตัวแปรภาษา 1 ตัวคือ ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยกำหนดฟังก์ชันสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากฟังก์ชันสมาชิกในรูปแบบดังกล่าวเป็นฟังก์ชันสมาชิกที่ให้ผลตอบแทนได้ดีกว่าฟังก์ชันสมาชิกในรูปแบบอื่น ๆ เมื่อนำมาใช้ในระบบที่พิจารณา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 มีตัวแปรทางภาษาสำหรับแต่ละฟัซซีเซตแทนด้วย N (Negative), Z (Zero) และ P (Positive) เพื่อให้การควบคุมฟัซซีนี้สามารถนำไปใช้กับระบบอื่น ๆ ได้ ดังนั้นจึงต้องทำให้เป็นรูปแบบทั่วไปเพื่อที่จะไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันสมาชิกเมื่อนำไปใช้งานกับระบบอื่น ๆ



รูปที่ 6 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต

เอาต์พุตคือค่าการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ กำหนดค่าเชิงภาษาเป็นรูปแบบเส้นตรงโทน 3 เส้น ได้แก่ N, Z, P โดยจะทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ และสั่งการให้ตัวควบคุมฟัซซีทำการเพิ่มหรือลดค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อให้ได้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตของฟัซซีแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต

กฎฟัซซี เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการตัดสินใจการทำงานของ การควบคุมฟัซซี โดยพิจารณาจากการทำงานของวงจร รูปแบบกฎจะใช้รูปแบบ IF-THEN ดังนั้นการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ได้ออกแบบกฎการทำงานของระบบไว้ 3 กฎ เพื่อกำหนดค่าเอาต์พุต (ΔD) ดังนี้

กฎฟัซซีสำหรับควบคุมค่าเอาต์พุต ΔD

กฎข้อที่ 1 IF $(\Delta P / \Delta V) = N$ THEN $\Delta D = P$

กฎข้อที่ 2 IF $(\Delta P / \Delta V) = Z$ THEN $\Delta D = Z$

กฎข้อที่ 3 IF $(\Delta P / \Delta V) = P$ THEN $\Delta D = N$

การอนุมานและการรวมกฎคือการตรวจสอบข้อเท็จจริง การใช้กฎและการรวมกฎของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟัซซีลอจิกร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระใช้การอนุมานแบบ Sugeno

กระบวนการ Defuzzification เป็นกระบวนการสุดท้ายในการแปลงเอาต์พุตที่ได้จากการรวมกฎในรูปแบบค่าเชิงภาษาให้เป็นค่าเชิงตัวเลข โดยใช้สมการที่ (3) การควบคุมฟัซซีจะหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสมของระบบทำให้ระบบสามารถทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว

$$\Delta D_n = \frac{\sum x_n y_n}{\sum x_n} \quad (3)$$

เมื่อ ΔD_n คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรหน้าที่ของตัวควบคุม ฟัซซีที่ตำแหน่ง n

x_n คือ ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเอาต์พุต

y_n คือ เอาต์พุตที่ได้จากแต่ละกฎ

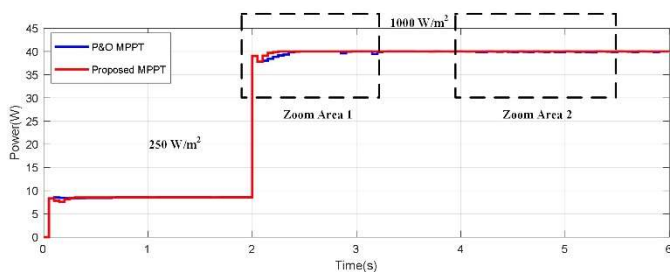
3. ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบชุดอุปกรณ์

ผลการจำลองสถานการณ์ในบทความอาศัยโปรแกรม MATLAB การจำลองสถานการณ์จะแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W และระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2400 W โดยระบบแรกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W ตารางที่ 1 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W

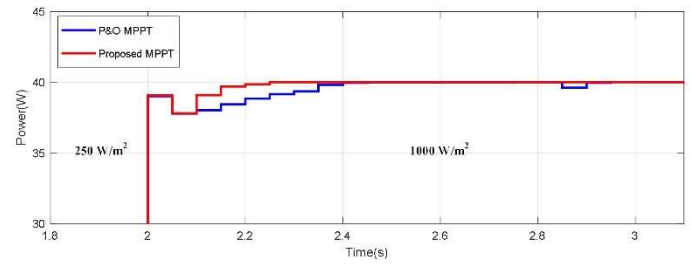
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W

พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์	ค่าพารามิเตอร์
P_{max}	40 W
V_{mpp}	38.73 V
I_{mpp}	1.033 A
V_{oc}	43.125 V
I_{sc}	1.1 A

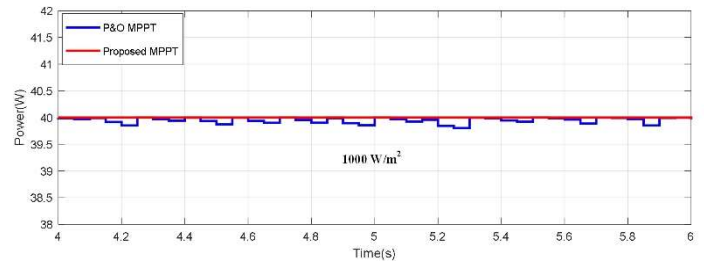
รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 250 W/m^2 ไปเป็น 1000 W/m^2 ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่วินาทีที่ 2 และรูปที่ 10 แสดงสถานะอยู่ตัวของกำลังไฟฟ้าในระบบที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีที่นำเสนอ (เส้นสีแดง) จะมีการเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่าและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต (เส้นสีน้ำเงิน)



รูปที่ 8 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W

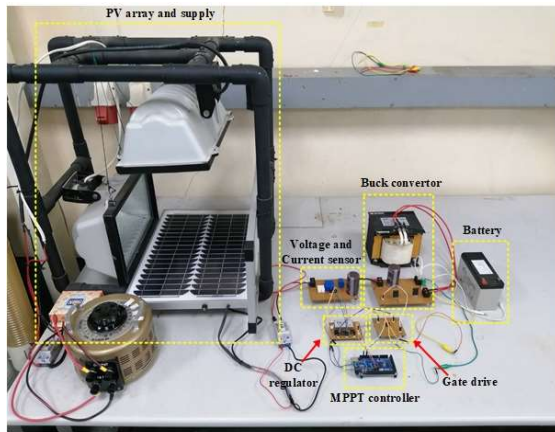


รูปที่ 9 ภาพขยายพื้นที่ 1 ของรูปที่ 8

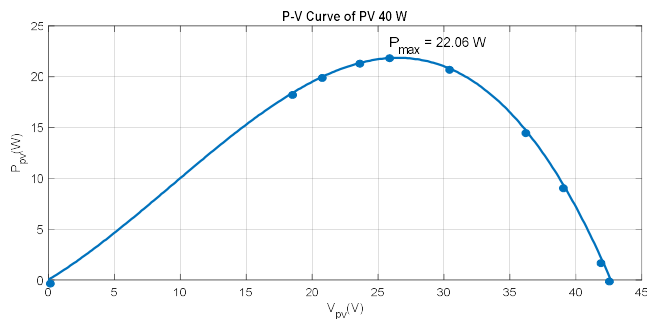


รูปที่ 10 ภาพขยายพื้นที่ 2 ของรูปที่ 8

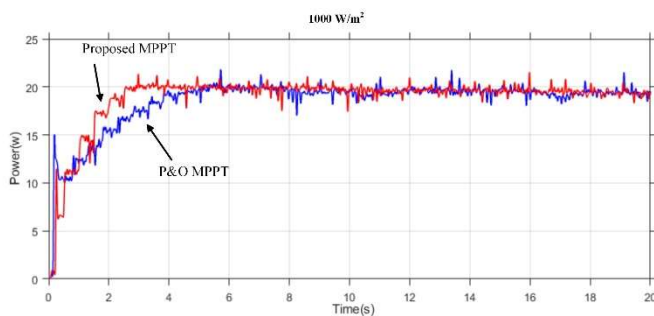
การยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดทดสอบต้นแบบขนาดพิกัด 40 W ซึ่งประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัด 40 W, แหล่งกำเนิดแสงเทียมจำลองด้วยไฟสปอร์ตไลท์, Buck converter, Voltage and Current sensor, DC regulator, Gate drive, MPPT controller (Arduino board), and Battery โดยทำการทดลองที่ความเข้มแสงจำลอง $1,000 \text{ W/m}^2$ ในห้องปฏิบัติการ ภาพรวมชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 11 ผลการทดสอบ P-V Curve แสดงในรูปที่ 12 จากกราฟแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.06 W โดยจะใช้ข้อมูลนี้เป็นค่าอ้างอิงของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลการทดสอบต้นแบบ แสดงในรูปที่ 13 จากรูปแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอ (เส้นสีแดง) มีการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็วกว่าวิธี P&O (เส้นสีน้ำเงิน) รวมถึงสามารถช่วยในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ สถานะอยู่ตัวและสามารถทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 11 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระขนาด 40 W



รูปที่ 12 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W



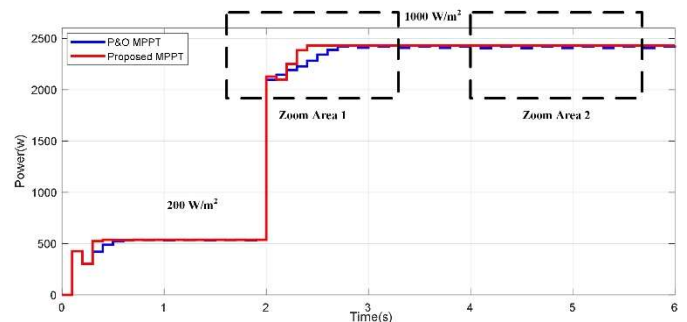
รูปที่ 13 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W

ระบบที่ 2 เป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2,400 W โดยระบบที่ 2 จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 300 W จำนวน 8 แผงโดยจะทำการต่ออนุกรมกัน 4 แผง และนำมาต่อขนานกันทั้งหมด 2 ชุด รวมกันได้เป็นระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2,400 W ตารางที่ 2 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 300 W

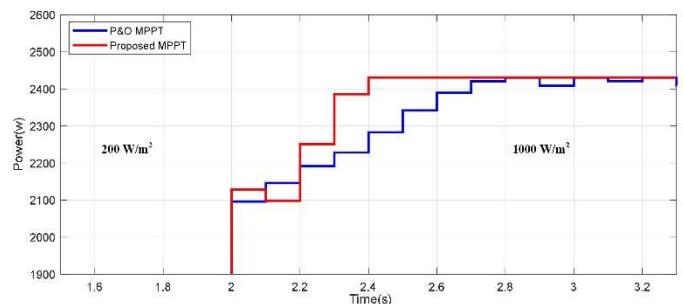
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 300 W

พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์	ค่าพารามิเตอร์
P_{max}	300 W
V_{mpp}	37.5 V
I_{mpp}	8.25 A
V_{oc}	46.3 V
I_{sc}	8.87 A

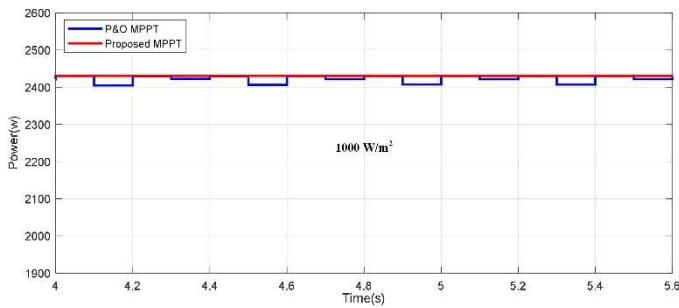
รูปที่ 14 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง รูปที่ 15 แสดงการเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 200 W/m² ไปเป็น 1000 W/m² ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่วินาทีที่ 2 และรูปที่ 16 แสดงสถานะอยู่ตัวของกำลังไฟฟ้าในระบบที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีที่นำเสนอ (เส้นสีแดง) จะเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่าและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ณ สถานะอยู่ตัวได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการบวกลบและสังเกต (เส้นสีน้ำเงิน)



รูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2,400 W



รูปที่ 15 ภาพขยายพื้นที่ 1 ของรูปที่ 14



รูปที่ 16 ภาพขยายพื้นที่ 2 ของรูปที่ 14

จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่สามารถยืนยันสมรรถนะการควบคุมของวิธีที่นำเสนอในเบื้องต้นได้แล้ว จากนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบต้นแบบขนาดพิกัด 2,400 W เพื่อนำไปทดสอบกับระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในรูปที่ 17 แสดงโรงเรือนควบคุมระบบจ่ายน้ำสำหรับแปลงเกษตรซึ่งมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2,400 W ชุดทดสอบต้นแบบแบตเตอรี่ขนาด 12 V 125 Ah จำนวน 8 ลูก โดยทำการต่ออนุกรมกัน 4 ลูกและนำมาขนานกัน 2 ชุดมีค่าแรงดันเท่ากับ 48 V และตัวเหนี่ยวนำของวงจร แปลงผันแบบบักค์ แสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 โรงเรือนควบคุมระบบจ่ายน้ำ ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

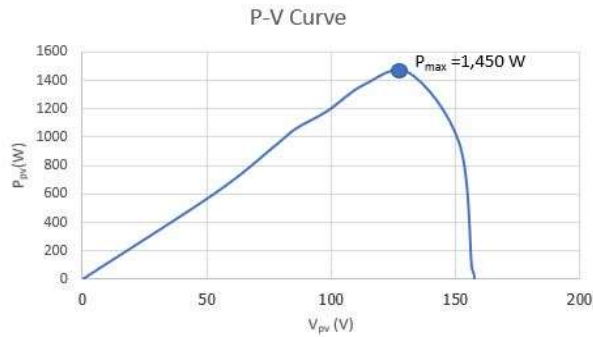


รูปที่ 18 ระบบการตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2,400 W ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัย

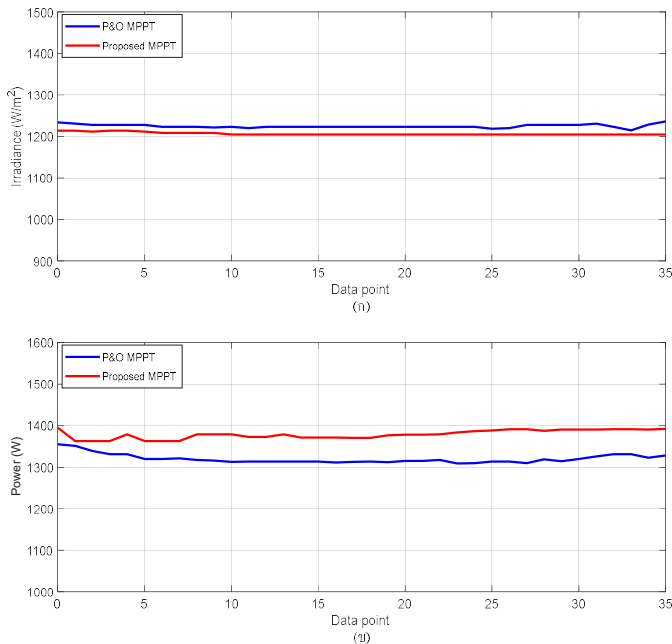


รูปที่ 19 ชุดทดสอบต้นแบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระขนาด 2,400 W

ภายในชุดทดสอบต้นแบบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้ Switch PV, Switch battery, Fuse, Buck convertor, Voltage and Current sensor, Gate drive, DC regulator, MPPT controller, Terminal block ซึ่งแสดงดังรูปที่ 19 โดยทำการทดลอง ณ วันที่ 6 ตุลาคม 2565 เวลา 13.00 น. ถึงเวลา 15.00 น. ผลการทดสอบ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความเข้มแสงขณะทดสอบมีค่าเท่ากับ $1,232 \text{ W/m}^2$ ณ อุณหภูมิ 34°C ผลการทดสอบ P-V Curve แสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของแรงดันและกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ฟาร์มมหาวิทยาลัย



รูปที่ 21 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าชุดทดสอบต้นแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2,400 W

จากรูปที่ 20 กราฟ P-V Curve แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,450 W ณ ความเข้มแสง 1,232 W/m² ซึ่งค่าความเข้มแสงจะทำการวัดมาจากตัวเซนเซอร์วัดค่าความเข้มแสงที่ได้ทำการติดตั้งอยู่ ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยและอ่านค่าผ่านชุดข้อมูลที่อยู่ในระบบคลาวด์ ผลการทดสอบที่ได้จากการควบคุม P&O กับวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 21 ในรูปที่ 21 (ก) คือกราฟของค่าความเข้มแสงขณะทดสอบด้วยวิธี P&O (เส้นสีน้ำเงิน) และวิธีที่นำเสนอ (เส้นสีแดง) สังเกตได้

ว่าค่าความเข้มแสงมีความใกล้เคียงกันในแต่ละจุด รูปที่ 21 (ข) คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำการทดสอบของวิธี P&O (เส้นสีน้ำเงิน) และวิธีที่นำเสนอ (เส้นสีแดง) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มแสงขณะทดสอบด้วยวิธีที่นำเสนอน้อยกว่าผลการทดสอบขณะทดสอบด้วยวิธี P&O อยู่เล็กน้อยในแต่ละจุดการทดสอบแต่กำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมาจะมีค่ามากกว่าวิธี P&O ทุกจุดการทดสอบ ผลทดสอบชุดทดสอบต้นแบบแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแผง PV ได้มากกว่าวิธี P&O

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยฟuzzy logic ร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ โดยได้นำเอาฟuzzy logic เข้ามาช่วยในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ สภาวะอยู่ตัวและการลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวให้เร็วขึ้น จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลทดสอบชุดอุปกรณ์ของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับชุดเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2.4 kW ของฟาร์มมหาวิทยาลัย แสดงให้เห็นว่าวิธีที่ได้นำเสนอสามารถช่วยในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ สภาวะอยู่ตัวและมีการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่าวิธี P&O การดำเนินงานวิจัยในอนาคตคาดว่าจะนำชุดทดสอบต้นแบบไปประยุกต์ใช้กับระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่ต่าง ๆ ในมหาวิทยาลัยที่อยู่ในการควบคุมดูแลของอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ร่วมวิจัยรวมถึงดำเนินการเก็บผลทดสอบจริงระบบ 2,400 W ให้มากขึ้นเพื่อนำมาวิเคราะห์ประกอบการพัฒนาอัลกอริทึม ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดหรือฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzy logic เพื่อให้การตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อ กริดได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่เครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Esham T, Chapman PL. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007; 22(2): 439-449.
- [2] Sharma DK, Purohit G. Advanced perturbation and observation (P&O) based maximum power point tracking (MPPT) of a solar photo-voltaic system. *2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Delhi, India*. 2012, pp. 1-5.
- [3] Ashique RH, Salam Z, Ahmed J. An adaptive P&O MPPT using a sectionalized piece-wise linear P-V curve. *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Johor Bahru, Malaysia*. 2015, pp. 474-479.
- [4] Farhat M, Barambones O, Sbita L. A real-time implementation of MPPT- based on P&O method. *2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), Ras Al Khaimah, United Arab Emirates*. 2016, pp. 1-5.
- [5] Hayder W, Abid A, Hamed BM. Steps of duty cycle effects in P&O MPPT algorithm for PV system. *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), Hammamet, Tunisia*. IEEE. 2017.
- [6] Azad ML, Das S, Sadhu PK, Satpati B, Gupta A, Arvind P. P&O algorithm based MPPT technique for solar PV System under different weather conditions. *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Kollam, India*. 2017, pp. 1-5
- [7] Ramani SU, Kollimalla SK, Arundhati B. Comparative study of P&O and incremental conductance method for PV system. *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*. 2017, pp. 1-7.
- [8] Djalab A, Teta A, Rezaoui MM, Boudiaf M. Analysis of MPPT methods: P & O, INC and Fuzzy Logic (CLF) for a PV System. *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT) , Istanbul, Turkey*. 2018, pp. 1-6.
- [9] Jain K, Gupta M, Bohre AK. Implementation and comparative analysis of P&O and inc MPPT method for PV system. *2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), Jaipur, India*. 2018, pp. 1-6
- [10] Zerouali M, Zouirech S, Ougli AE, Tidhaf B, Zrouri H. Improvement of conventional MPPT techniques P&O and INC by integration of Fuzzy Logic. *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) .* 2019, pp.1-6.
- [11] Nath D, Boruah D. P&O and fuzzy based MPPT for PV system. *International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE), Bengaluru, India*. 2020, pp. 569-574,
- [12] Szemes PT, Melhem M. Analyzing and modeling PV with " P&O" MPPT Algorithm by MATLAB/SIMULINK. *3rd International Symposium on Small- scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS), Gjovik, Norway*. 2020
- [13] Baraskar S, Jain SK, Padhy PK. Fuzzy logic assisted P&O based improved MPPT for photovoltaic systems. *2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES)*. 2016, pp. 250-255.
- [14] Ganthia BP, Pradhan R, Das S, Ganthia S. Analytical study of MPPT based PV system using fuzzy logic controller. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*. 2017, pp. 3266-3269.

- [15] Haji D, Genc N. Fuzzy and P&O based MPPT controllers under different conditions. *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) , Paris, France.* 2018. pp. 649-655.
- [16] Kumar JP, Rathor B, Bahrani P. Fuzzy and P&O MPPT techniques for stabilized the efficiency of solar PV system. *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) , Greater Noida, UP, India.* 2018, pp. 259-264.