

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิก

The Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System Using Fuzzy Logic

กรกฎ คงสวัสดิ์* เทพพนม โสภะเพิ่ม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Korakod Kongsawat* Thappanom Sopapirm

Department of electrical power engineering, Mahanakorn university of technology

*Corresponding author Email: Winrunner45@gmail.com

(Received: December 25, 2020; Accepted: March 8, 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิก ที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบัค เพื่อพัฒนาให้ระบบมีการตอบสนองที่รวดเร็ว ดังนั้นจึงมีการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับวิธีการรบกวนและสังเกต พบว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีฟัซซีลอจิกนั้นมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีการรบกวนและสังเกตในช่วงสภาวะเริ่มต้นการทำงานของระบบและช่วงสภาวะความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลง ระบบจึงสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจึงได้มีการสร้างชุดทดสอบที่ได้ออกแบบขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต

คำสำคัญ: การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีการรบกวนและสังเกต วิธีฟัซซีลอจิก

Abstract

This paper presents the maximum power point tracking of stand-alone photovoltaic system using fuzzy logic method. That will be applied in buck converter circuit for developing system to faster convergence Therefore, computer simulations are simulated in order to compare performance characteristics of perturbation and observation methods found that fuzzy logic method faster convergence than the perturbation and observation method state during the system initialization and the irradiance condition changes, so the system can effectively the maximum power of the photovoltaic system and therefore creating equipment that was designed. The results reviewed that fuzzy logic method could track rapid maximum power and accurate than with perturbation and observation method.

Keyword: Maximum power point tracking, Perturbation and observation, Fuzzy logic.

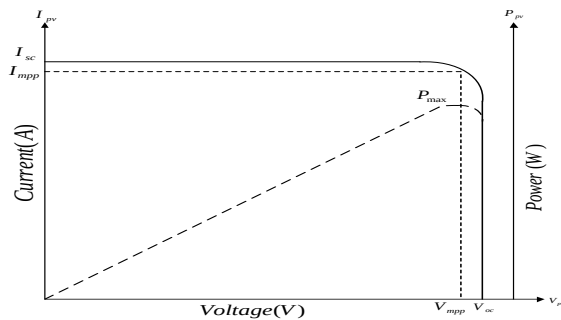
1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell หรือ Photovoltaic : PV) [1] ถือเป็นพลังงานที่มีความเป็นที่ยอมรับ เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีเสียงรบกวนในขณะผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยจะอาศัยปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ (W/m^2) ที่ตกกระทบกับแผงโซลาร์เซลล์ (PV Panel) ซึ่งส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) มีอยู่ 2 ระบบคือระบบอิสระ (Stand-alone system) และระบบเชื่อมต่องาน (Grid connection) แต่ในบทความนี้จะเลือกใช้งานระบบอิสระเพื่อลดความซับซ้อนของระบบ โดยจะมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบักคี่ที่มีโหมดเป็นแบบเตอร์ ในขณะที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติจะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในแต่ละสถานะความเข้มแสง (Maximum Power Point: MPP) จึงมีการพัฒนาระบบที่สามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทุกสถานะความเข้มแสง (Maximum Power Point Tracking: MPPT) จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน มีการพัฒนาอัลกอริทึมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดหลากหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น วิธีแรงดันเปิดวงจร (Fractional Open Circuit Voltage: V_{oc}) [2] วิธีกระแสลัดวงจร (Fractional Short Circuit Current: I_{sc}) [2] วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: IncCond) [2] วิธีรบกวนและสังเกต (Perturbation and observation [3-6] วิธีอ้างอิงกระแส (Current based Method) [7] และวิธีฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic Method) [8-12] เป็นต้น โดยวิธีรบกวนและสังเกตเป็นวิธีที่มีความนิยมในอดีตที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและอัลกอริทึมไม่มีความซับซ้อนในการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้าในสถานะเริ่มต้นการทำงานของ

ระบบและช่วงที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงอีกทั้งยังมีการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ จึงมีการพัฒนาวิธีฟัซซีลอจิกเพื่อที่จะปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของระบบ พบว่าระบบมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกต โดยวิธีฟัซซีลอจิกจะอาศัยการรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มาคำนวณหาค่าความผิดพลาดและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเข้าสู่ระบบโดยอาศัยการตัดสินใจผ่านค่าความเป็นสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีที่ได้กำหนดไว้ในตัวควบคุมและจะให้เอาต์พุตเป็นแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) โดยจะให้การอนุมานกฎด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย Takagi-Sugeno ที่จะสามารถจ่ายแรงดันอ้างอิงค่าสูง ๆ ได้ในกรณีระบบมีค่าความผิดพลาดมาก ๆ และในขณะเดียวกันในกรณีที่ระบบมีค่าความผิดพลาดน้อย ๆ ระบบก็จะสามารถจ่ายแรงดันอ้างอิงที่ค่าต่ำ ๆ ให้มีความเหมาะสมกับสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแตกต่างจากวิธีรบกวนและสังเกตที่จะส่งแรงดันอ้างอิงได้เพียงแค่ค่าเดียวตามที่ผู้ออกแบบได้กำหนด โดยแรงดันอ้างอิงดังกล่าวจะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟัซซีเพื่อทำการสร้างสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle : D) ของวงจรแปลงผันแบบบักคี่ให้ระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทุกสถานะความเข้มแสง โดยจะมีการจำลองสถานการณ์การบนคอมพิวเตอรืและนำผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีฟัซซีลอจิกไปเปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกตพบว่าวิธีที่นำเสนอมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตในทุกสถานะความเข้มแสง นอกจากนี้ได้มีการออกแบบสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบในสภาวะแวดล้อมเสมือนจริงโดยใช้แสงเทียม จากการทดสอบพบว่าวิธีฟัซซีลอจิกมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกต ในสถานะเริ่มต้นการทำงานของระบบ สภาวะที่มีการเพิ่มความเข้มแสงและสภาวะที่มีการลดความเข้มแสงส่งผลให้ระบบสามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. คุณสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ ซึ่งจะสามารถแสดงกราฟคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการกำหนดความเข้มแสงที่ค่ามาตรฐานที่ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) และอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ได้ดังรูปที่ 1



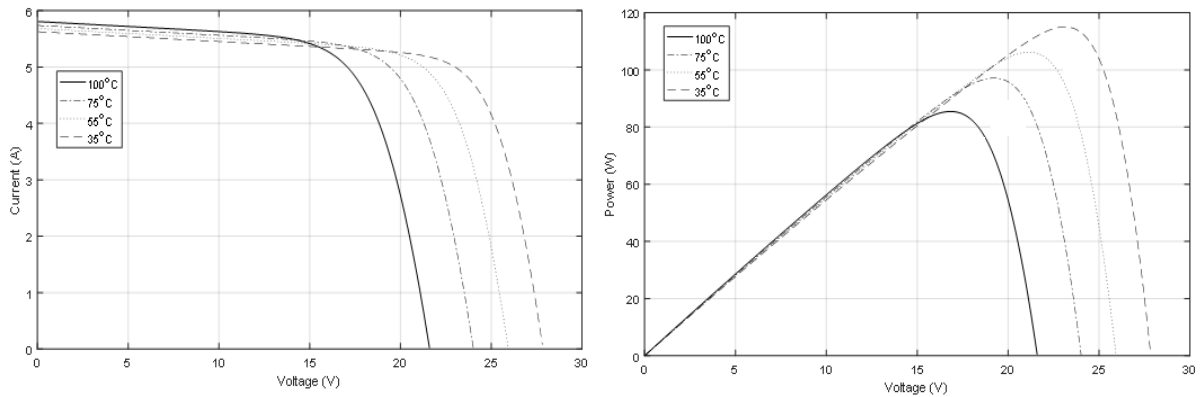
รูปที่ 1 กราฟคุณสมบัติเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 เมื่อมีการกำหนดค่าความเข้มแสงดังกล่าว เซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามสถานะความเข้มแสงที่ตกกระทบ (Maximum power point : MPP) ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญคือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp}) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp}) ซึ่งถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมในขณะนั้น จึงจำเป็นต้องมีการใช้ระบบที่สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยหลักการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังและตัวแปรสำคัญที่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าได้แตกต่างกันคือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจะส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ถ้าหากความเข้มแสงมีค่าน้อยเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้น้อยแต่ถ้าหากความเข้มแสงมีค่ามากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสามารถจ่าย

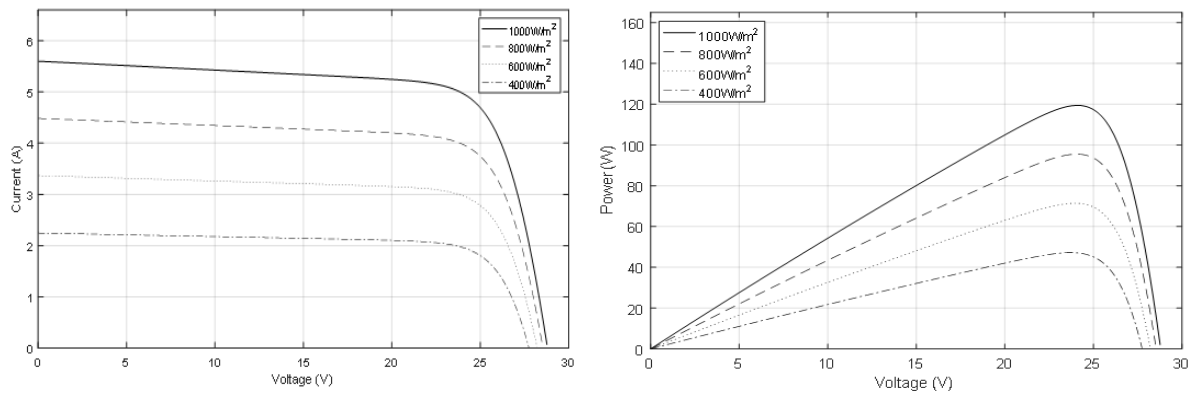
กำลังไฟฟ้าได้มากตามความเข้มแสงที่ตกกระทบได้ดังรูปที่ 2 และพิจารณาที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าหากอุณหภูมิสูงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะนั้นจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยลงดังรูปที่ 3

3. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าตามสถานะความเข้มแสงที่ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ระบบควบคุมทั่วไปจะไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมจึงจำเป็นต้องใช้ระบบที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทุกสถานะแวดล้อม โดยอัลกอริทึมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี วิธีที่มีความนิยมคือวิธีรบกวนและสังเกตซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานแต่มีการตอบสนองที่ช้าและมีการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ เนื่องจากมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้เพียงค่าเดียว แต่ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีพีซีแอลจิกซึ่งเป็นวิธีที่มีการตอบสนองที่รวดเร็วเพราะจะมีการกำหนดย่านแรงดันอ้างอิงได้หลายค่าตามที่ผู้ออกแบบกำหนดไว้ซึ่งสามารถทำให้ระบบจ่ายแรงดันอ้างอิงได้เหมาะสมกับค่าความผิดพลาดที่จะประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบัสคัทและใช้โหลดเป็นแบตเตอรี่ซึ่งเป็นระบบอิสระ การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดที่คำนวณจากแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวต้องการให้ระบบมีค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ โดยในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมค่าความผิดพลาดจะไม่เท่ากับศูนย์หรือระบบยังไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ จึงเป็นหน้าที่ของตัวควบคุมที่จะทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

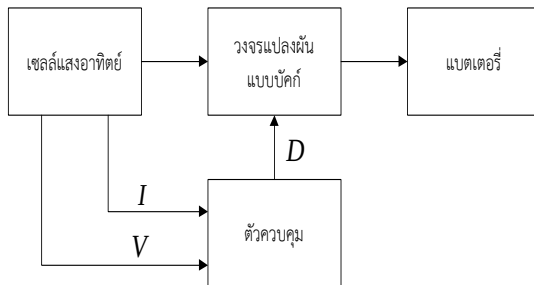


รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ



รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสง

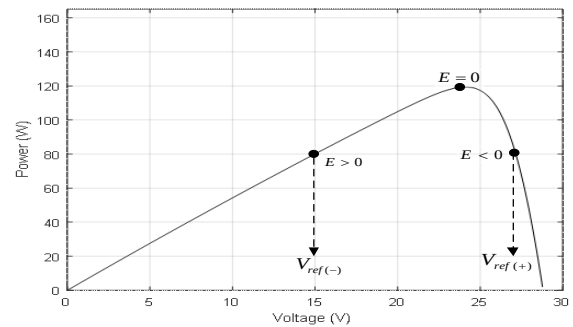
ในระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 4 ส่วนคือเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันแบบบักค์ ตัวควบคุมและแบตเตอรี่



รูปที่ 4 ระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบอิสระที่จะมีการเก็บพลังงานเข้าสู่

แบตเตอรี่โดยอาศัยการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีอัลกอริทึมเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสภาวะแวดล้อม ณ ขณะนั้นเพื่อทำให้ระบบสามารถค้นหาค่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ในส่วนของทฤษฎีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 5



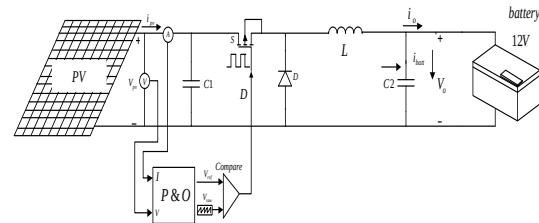
รูปที่ 5 กราฟทฤษฎีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 5 เมื่อตัวควบคุมรับค่าความผิดพลาดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถ้าหากค่าความผิดพลาดมากหมายถึงจุดการทำงานอยู่ห่างไกลจากจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยระบบจะทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดของระบบ ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่าศูนย์ $E > 0$ หรือ $\Delta P / \Delta V > 0$ ระบบจะทำการลดแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) หรือลดค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักเพื่อที่จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าหากค่าความผิดพลาดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ $E < 0$ หรือ $\Delta P / \Delta V < 0$ ระบบจะทำการเพิ่มแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) หรือเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักเพื่อที่จะลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์

3.1 วิธีรับทวนและสังเกต

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีรับทวนและสังเกตจะอาศัยการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และคำนวณหาค่าความผิดพลาดเพื่อที่จะเพิ่มหรือลดแรงดันอ้างอิงที่ได้ถูกกำหนดไว้โดยผู้ออกแบบและนำแรงดันอ้างอิงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยในการสร้างค่าวัฏจักรหน้าที่และส่งไปยังวงจรแปลงผันแบบบักเพื่อที่จะควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงของวิธีดังกล่าวให้ค่าน้อยจะทำให้ระบบมีการตอบสนองที่ช้าและถ้าหากกำหนดให้น้อยจนเกินไประบบจะไม่สามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะขณะนั้น แต่ในทางกลับกันถ้าหากผู้ออกแบบมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงมากระบบก็จะมี การตอบสนองที่เร็วขึ้นแต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการกำหนดแรงดันอ้างอิงมากจนเกินไประบบจะมีการแกว่งของสัญญาณและจะไม่สามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในสภาวะขณะนั้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีฟัซซี่ลอจิกที่สามารถควบคุมการปรับค่าแรงดันอ้างอิงให้สามารถปรับขนาดแรงดันอ้างอิงได้ตามค่าความผิดพลาดของระบบโดยอาศัยการตัดสินใจของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่มีการกำหนดย่านของเอาต์พุตตามผู้ออกแบบและในส่วน

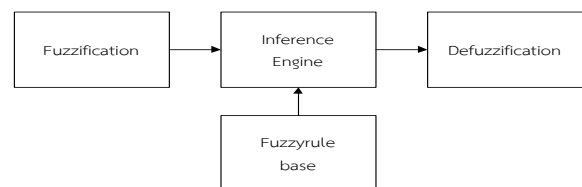
ของภาพรวมของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีรับทวนและสังเกตได้ดังรูปที่ 6



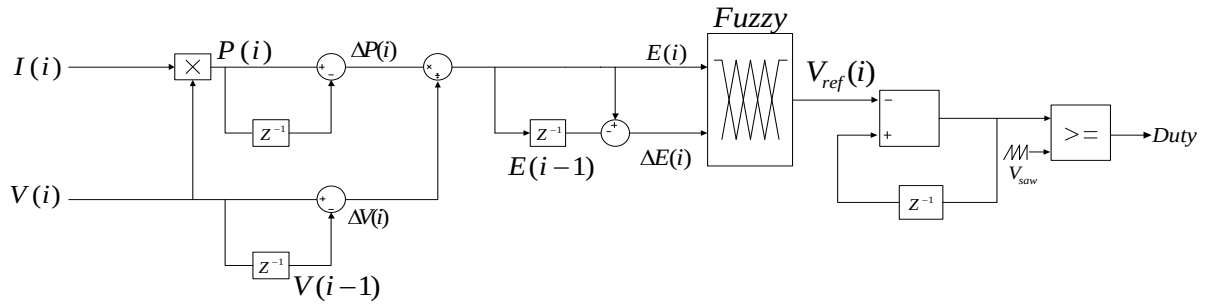
รูปที่ 6 ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีรับทวนและสังเกต

3.2 วิธีฟัซซี่ลอจิก

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีฟัซซี่ลอจิกจะอาศัยการรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งภาพรวมของระบบเหมือนกับวิธีรับทวนและสังเกตแต่จะมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันโดยตัวควบคุมฟัซซี่จะมีค่าอินพุตซึ่งถูกนำมาป้อนให้กับตัวควบคุมฟัซซี่ทั้งหมดสองอินพุตคือค่าความผิดพลาด (E) และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (ΔE) โดยนำค่าอินพุตทั้งสองเข้าสู่กระบวนการฟัซซี่ (Fuzzification) และนำค่าที่ได้เข้าสู่กระบวนการประเมินกฎ (Linguistic rules) เมื่อได้ผลลัพธ์จะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นการอนุมานกฎ (Defuzzification) ด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย Takagi-Sugeno ที่สามารถเลือกย่านการทำงานตามค่าความผิดพลาดโดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่ามาก ๆ ระบบจะทำการเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิงให้มาก ๆ และเมื่อระบบเข้าสู่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวระบบจะจ่ายแรงดันอ้างอิงใกล้เคียงกับศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ ชุดบล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมฟัซซี่และระบบภายในของตัวควบคุมฟัซซี่ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก



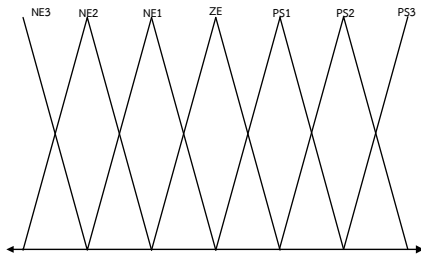
รูปที่ 8 ระบบภายในของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

จากรูปที่ 8 เมื่อระบบรับค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดและให้เอาต์พุตเป็นแรงดันอ้างอิงเพื่อนำสัญญาณที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟัซซีเพื่อให้ระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำ สมการคำนวณค่าความผิดพลาด (E) ที่ประกอบไปด้วยค่ากำลังไฟฟ้า (P) แรงดันไฟฟ้า (V) และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (ΔE) ที่ประกอบไปด้วยค่าความผิดพลาดปัจจุบัน (E) และค่าความผิดพลาดก่อนหน้า (E_{i-1}) เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2)

$$E(i) = \frac{P(i) - P(i-1)}{V(i) - V(i-1)} \quad (1)$$

$$\Delta E(i) = E(i) - E(i-1) \quad (2)$$

ในส่วนของค่าตัวแปรทางภาษาทางด้านของอินพุตทั้งสองอินพุตกำหนดให้เป็นฟังก์ชันสามเหลี่ยม เนื่องจากทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานที่จะมีการกำหนดค่าตัวแปรเชิงภาษาทั้งหมด 7 ภาษาเพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 9

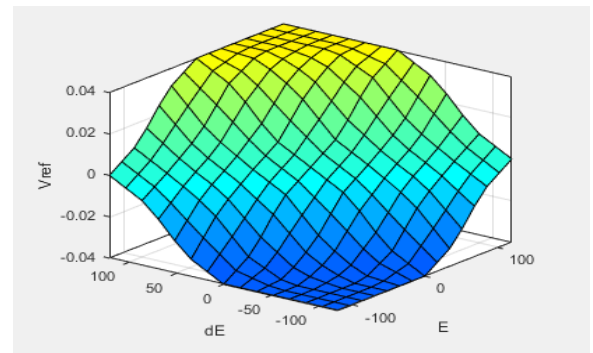


รูปที่ 9 ค่าตัวแปรเชิงภาษาทางด้านอินพุตของตัวควบคุม

จากรูปที่ 9 ค่าตัวแปรทางภาษาที่กำหนดมีทั้งหมด 7 ตัวแปร ดังนี้ NE3 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นลบมาก ๆ), NE2 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นลบปานกลาง), NE1 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นลบน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์), ZE1 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นศูนย์หรืออยู่ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด), PS3 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นบวกมาก ๆ), PS2 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นบวกปานกลาง), PS1 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นบวกน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์) ค่าตัวแปรเชิงภาษาทางด้านอินพุตดังกล่าวจึงได้ถูกรวมทั้งหมด 49 กฎ และภาพพื้นผิวสามมิติได้ดัง ตารางที่ 1 และรูปที่ 10 ตามลำดับ

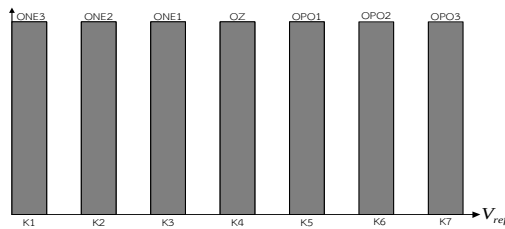
ตารางที่ 1 แสดงกฎระหว่างอินพุตและเอาต์พุต

Input Fuzzy	ΔE						
	NE3	NE2	NE1	ZE	PO1	PO2	PO3
E	NE3	ONE3	ONE3	ONE3	ONE3	ONE2	ONE1
	NE2	ONE3	ONE3	ONE3	ONE2	ONE1	OZ
	NE1	ONE3	ONE3	ONE2	ONE1	OZ	OPO1
	ZE	ONE3	ONE2	ONE1	OZ	OPO1	OPO2
	PS1	ONE2	ONE1	OZ	OPO1	OPO2	OPO3
	PS2	ONE1	OZ	OPO1	OPO2	OPO3	OPO3
	PS3	OZ	OPO1	OPO2	OPO3	OPO3	OPO3



รูปที่ 10 พื้นผิว 3 มิติ ทางด้านอินพุตและเอาต์พุต

จากตารางที่ 1 จะได้กฎทั้งหมด 49 กฎซึ่งจะมีการกำหนดเอาต์พุตด้วยการอนุมานโดยการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ยที่มีลักษณะเป็นแท่งตรงโหนดดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ทางด้านการเอาต์พุต

จากรูปที่ 11 ค่าตัวแปรทางภาษาทางด้านเอาต์พุตจะกำหนดทั้งหมด 7 ตัวแปร ดังนี้ ONE3 (หมายถึงระบบต้องการลดแรงดันอ้างอิงมาก ๆ), ONE2 (หมายถึงระบบต้องการลดแรงดันอ้างอิงปานกลาง), ONE1 (หมายถึงระบบต้องการลดแรงดันอ้างอิงน้อยมาก ๆ), OZ (หมายถึงระบบไม่มีการเพิ่มหรือลดแรงดันอ้างอิง), OPO3 (หมายถึงระบบต้องการบวกแรงดันอ้างอิงมาก ๆ), OPO2 (หมายถึงระบบต้องการบวกแรงดันอ้างอิงปานกลาง), OPO1 (หมายถึงระบบต้องการบวกแรงดันอ้างอิงน้อยมาก ๆ) จากนั้นจะคำนวณหาค่าเอาต์พุตด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ยประกอบไปด้วย ค่าความสัมพันธ์สมาชิกเอาต์พุต $\mu(k_m)$ และค่าคงที่เอาต์พุตที่เป็นแท่งตรงโหนด (k_m) ดังสมการที่ (3)

$$x_{WA} = \frac{\sum_{m=1}^m \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^m \mu(k_m)} \quad (3)$$

4. การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จะมีการจำลองสถานการณ์เพื่อทำการเปรียบเทียบระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหมด 2 วิธี คือวิธีรบกวนและสังเกตกับวิธีฟัซซีลอจิกและในส่วนของการพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

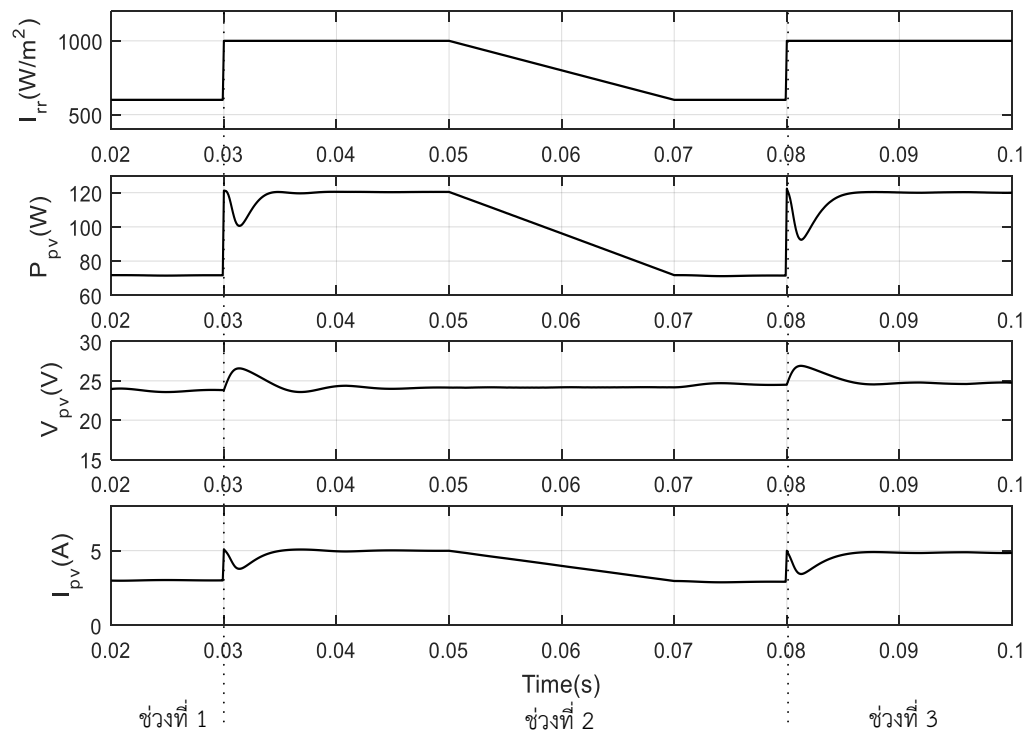
เซลล์แสงอาทิตย์	ค่า
V_{mpp}	24.1 V
I_{mpp}	4.98 A
V_{oc}	28.8 V
I_{sc}	5.56 A
P_{max}	120 W
วงจรแปลงผันแบบบัสค์	ค่า
C_1	500 μ F
C_2	100 μ F
L	1 mH
f_{sw}	10 kHz
V_{batt}	12 V

4.1 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีฟัซซีลอจิก

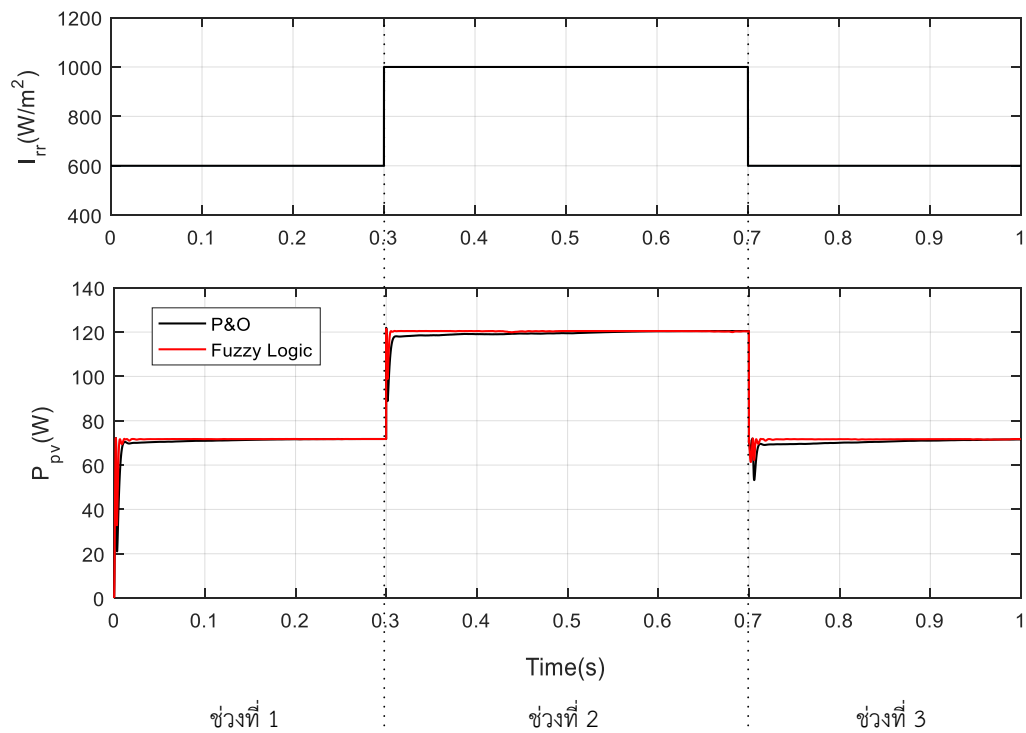
ในการจำลองสถานการณ์จะมีทั้งหมด 3 ช่วงที่อุณหภูมิ 25 °C ช่วงที่ 1 จะป้อนความเข้มแสงที่ 600 W/m² และเพิ่มเป็น 1000 W/m² (ที่เวลา 0.03วินาที) ในช่วงที่ 2 จะลดความเข้มแสงแบบลาดเอียงจากความเข้มแสง 1000 W/m² ลงมาที่ความเข้มแสง 600 W/m² (ที่เวลา 0.05วินาที) และในช่วงที่ 3 จะเพิ่มความเข้มแสงจาก 600 W/m² กลับไปที่ 1000 W/m² พบว่าระบบสามารถตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วที่ได้ดังรูปที่ 12

4.2 ผลการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์จะมีทั้งหมด 3 ช่วงที่อุณหภูมิ 25 °C ช่วงที่ 1 จากความเข้มแสง 0 W/m² เพิ่มเป็น 600 W/m² และช่วงที่ 2 จะเพิ่มความเข้มแสงจาก 600 W/m² เป็น 1000 W/m² (ที่เวลา 0.3 วินาที) และในช่วงที่ 3 จะลดความเข้มแสงจาก 1000 W/m² เป็น 600 W/m² เนื่องจากเป็นค่าความเข้มแสงที่นิยมใช้ในการจำลองสถานการณ์เพราะเป็นค่าความเข้มแสงค่ากลางและค่าสูงสุดดังรูปที่ 13



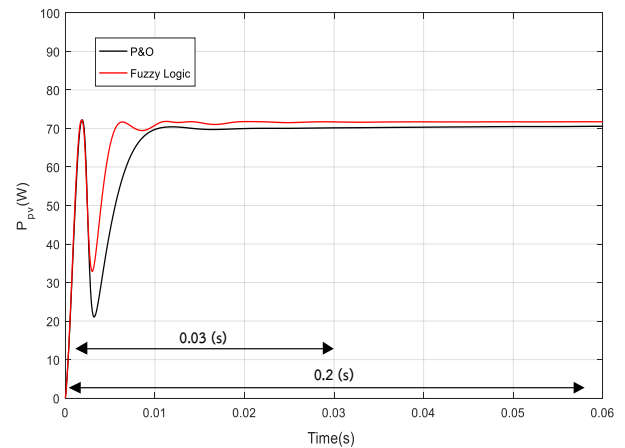
รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีฟัซซีลอจิกที่มีการเปลี่ยนสถานะความเข้มแสง



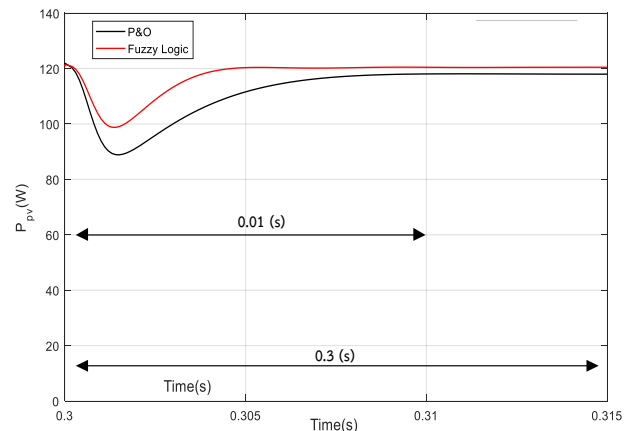
รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่มีการเปรียบเทียบวิธีฟัซซีลอจิกกับวิธีรบกวนและสังเกต

จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งหมด 3 ช่วงที่มีการเปรียบเทียบวิธีฟัซซีลอจิกกับวิธีรบกวนและสังเกตพบว่าวิธีรบกวนและสังเกตมีการตอบสนองที่ช้ากว่าวิธีฟัซซีลอจิกเนื่องจากวิธีรบกวนและสังเกตเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวจะเกิดการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ ดังนั้นการลดการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการจึงต้องกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงให้มีค่าน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อตอบสนองของระบบที่ช้าลง พิจารณาในช่วงที่ 1 ที่ความเข้มแสง $0-600 \text{ W/m}^2$ ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.03 วินาที แต่วิธีรบกวนและสังเกตสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.2 วินาที และพิจารณาในช่วงที่ 2 ที่มีการเพิ่มความเข้มแสง 600 W/m^2 ถึง 1000 W/m^2 พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.01 วินาทีแต่วิธีรบกวนและสังเกตสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.3 วินาที พิจารณาในช่วงที่ 3 ที่จะมีการลดความเข้มแสงจาก 1000 W/m^2 ลดลงเหลือ 600 W/m^2 พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกมีการตอบสนองที่รวดเร็วและยังมีการเกิดสภาวะชั่วคราวที่น้อยกว่าวิธีรบกวนและสังเกตที่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.03 วินาที แต่วิธีรบกวนและสังเกตมีการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว 0.3 วินาที และยังมีการแกว่งของสัญญาณมากกว่าวิธีฟัซซีลอจิกซึ่งเกิดจากการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้เพียงค่าเดียวในสภาวะสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาวิธีรบกวนและสังเกตจึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน ซึ่งแตกต่างจากวิธีฟัซซีลอจิกที่จะมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้หลายย่านตามสภาวะแวดล้อมในขณะนั้นที่จะอาศัยการประเมินของตัวควบคุมฟัซซีที่จะตัดสินใจจากจุดการทำงานอยู่ไกลจากจุดปฏิบัติการที่จะเพิ่มแรงดันอ้างอิงที่มีขนาดที่มาก ๆ และเมื่อระบบเริ่มเข้าใกล้จุดปฏิบัติการระบบจะตัดสินใจให้ปรับแรงดันอ้างอิงให้น้อยมาก ๆ หรือเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งส่งผลให้ระบบมีการแกว่งของสัญญาณน้อยในขณะที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวและยังมีการตอบสนองที่รวดเร็วและแม่นยำทั้ง

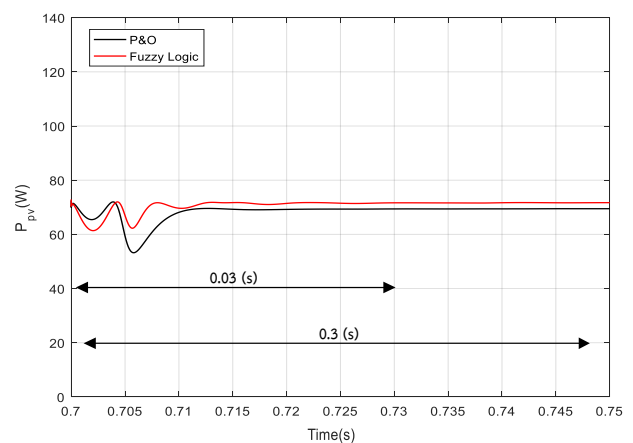
ในสภาวะเริ่มต้นของระบบและสภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 3 ช่วง ดังรูปที่ 14 รูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ



รูปที่ 14 ช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ



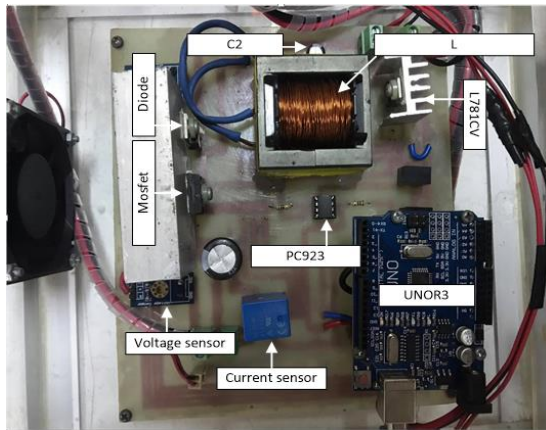
รูปที่ 15 ช่วงเพิ่มความเข้มแสง



รูปที่ 16 ช่วงลดความเข้มแสง

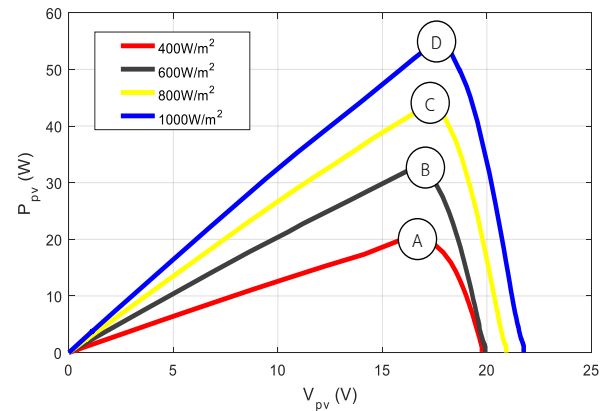
5. การสร้างชุดทดสอบ

การสร้างชุดทดสอบเพื่อใช้ในการยืนยันว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีพีชชีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริงและยังมีการตอบสนองที่รวดเร็วโดยการสร้างชุดทดสอบจะประกอบไปด้วยเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณหาค่าความผิดพลาดและสร้างสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่และเข้าสู่ตัวไอซี PC923L เพื่อนำสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ได้ไปขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังรูปที่ 17

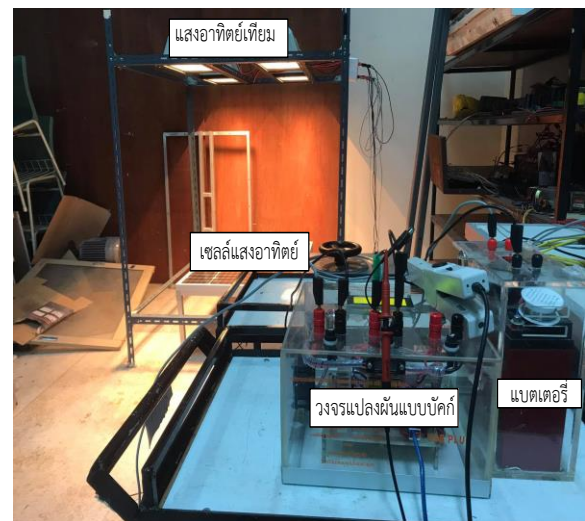


รูปที่ 17 ภาพรวมชุดฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น

ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการจำลองโดยใช้แสงเทียมเนื่องจากในการเขียนอัลกอริทึมมีความจำเป็นต้องใช้ความเข้มแสงที่มีความคงที่ ซึ่งในบทความนี้จะเลือกการนำเสนอความเข้มแสงที่ 400 W/m^2 600 W/m^2 800 W/m^2 และ 1000 W/m^2 โดยการใช้มิเตอร์วัดค่าความเข้มแสงรุ่น SM206-SOLAR ที่จะวัดค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละเซลล์และจะทำการพล็อตกราฟคุณลักษณะเฉพาะของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่อง Power Meter WT500 เป็นไปตามรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ตามลำดับ



รูปที่ 18 กราฟคุณลักษณะแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า

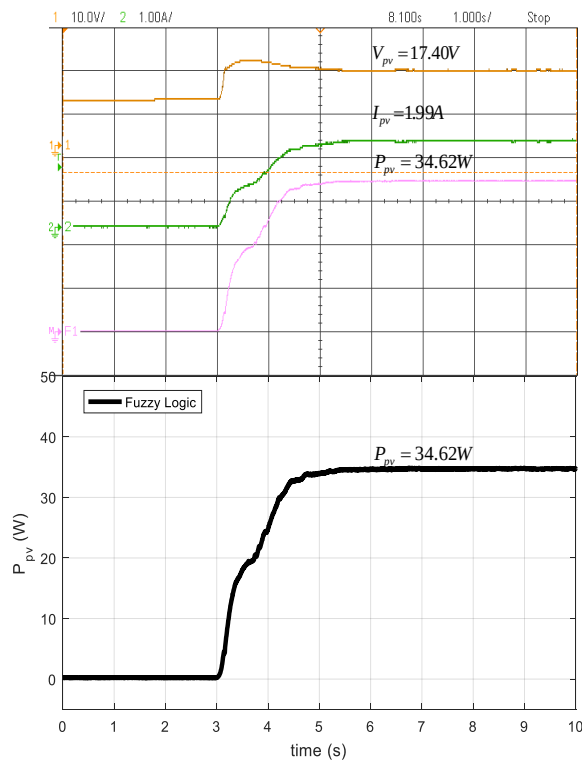
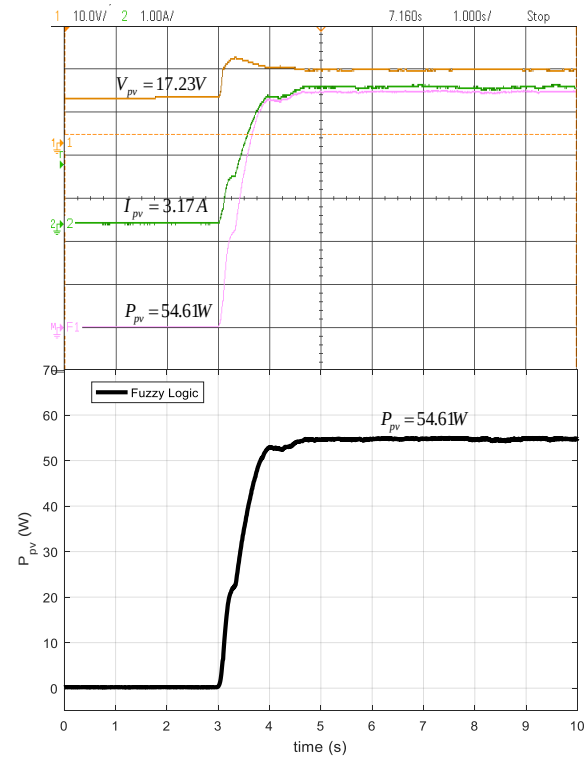
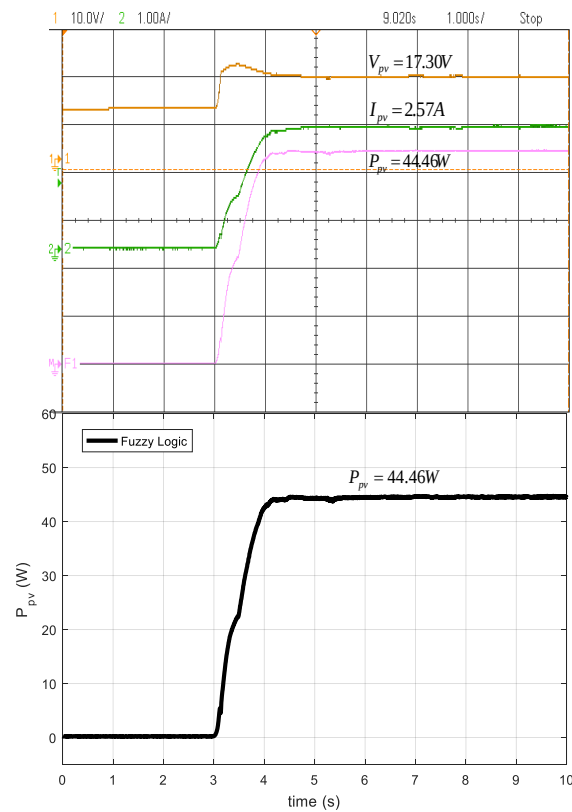


รูปที่ 19 การทดสอบโดยใช้แสงเทียมในห้องปฏิบัติการ

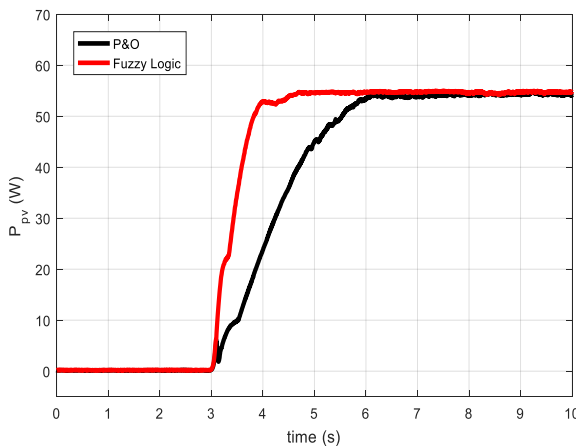
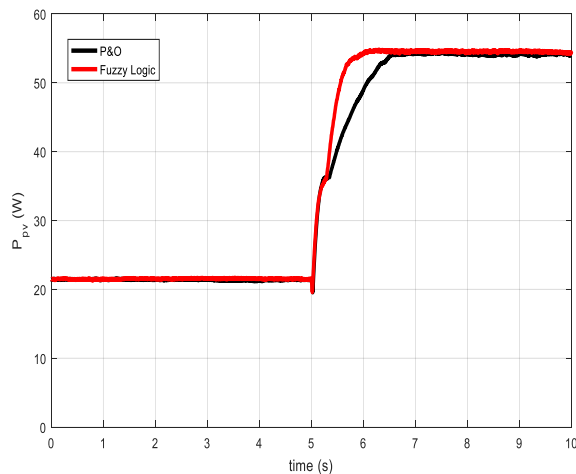
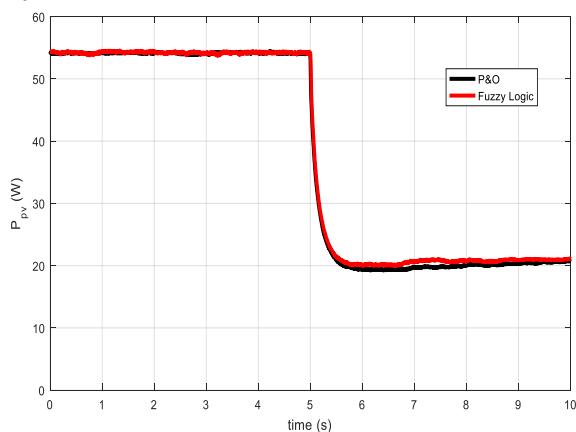
6. ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากการทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีพีชชีลอจิกที่มีการเปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกตโดยจะมีการแสดงการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีพีชชีลอจิกในช่วงเริ่มต้นของระบบพร้อมกับแสดงภาพจากกล้องวิดีโอเพื่อยืนยันว่ามีการทดสอบจริงที่มีการจ่ายความเข้มแสงที่ $0-600 \text{ W/m}^2$ $0-800 \text{ W/m}^2$ และ $0-1000 \text{ W/m}^2$ ตามลำดับ โดยจะอาศัยหม้อแปลงแบบปรับค่าได้ที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามย่านความเข้มแสงที่กำหนดที่ได้มีการวัดค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ตกกระทบกับแผงโซลาร์เซลล์ผลการทดสอบทั้งหมด 3 ความเข้มแสงดังรูปที่ 20 รูปที่ 21 และรูปที่ 22 ตามลำดับ

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

รูปที่ 20 ความเข้มแสง 600 W/m^2 รูปที่ 22 ความเข้มแสง 1000 W/m^2 รูปที่ 21 ความเข้มแสง 800 W/m^2

จากการทดสอบทั้งหมด 3 ความเข้มแสงเพื่อที่จะยืนยันว่าชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริงโดยอาศัยกราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 18 และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสง 0-600 W/m^2 ในรูปที่ 20 จะได้ $I_{pv} = 1.99 A$ และ $P_{pv} = 34.62 W$ และพิจารณาที่ความเข้มแสง 0-800 W/m^2 ในรูปที่ 21 $I_{pv} = 2.57 A$ และ $P_{pv} = 44.46W$ และพิจารณาที่ความเข้มแสง 0-1000 W/m^2 รูปที่ 22 $I_{pv} = 3.17 A$ และ $P_{pv} = 54.61 W$ พบว่าระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำ ในรูปที่ 23 รูปที่ 24 และรูปที่ 25 จะมีการนำเสนอผลการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งในช่วงเพิ่มความเข้มแสงและลดความเข้มแสงเพื่อที่จะยืนยันว่าวิธีฟัซซีลอจิกที่สร้างขึ้นสามารถเข้าสู่จุดสภาวะคงตัวได้รวดเร็วกว่าวิธีบวกลบและสังเกต

รูปที่ 23 ช่วงเริ่มต้นของระบบ 0-1000 W/m²รูปที่ 24 ช่วงเพิ่มความเข้มแสง 400 W/m²- 1000 W/m²รูปที่ 25 ช่วงลดความเข้มแสง 1000 W/m²-400 W/m²

จากรูปที่ 23 พิจารณาช่วงความเข้มแสงจาก 0-1000 W/m² พบว่าวิธีฟัซซีลอจิก (เส้นสีแดง) มีการเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดีและเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกต (เส้นสีดำ) เนื่องจาก

วิธีรบกวนและสังเกตในสภาวะเริ่มต้นการทำงานของระบบมีการตอบสนองที่ช้าและเมื่อพิจารณาช่วงความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 24 โดยการเพิ่มความเข้มแสงจาก 400 W/m²- 1000 W/m² พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตและเมื่อพิจารณาลดความเข้มแสงดังรูปที่ 25 จากความเข้มแสง 1000 W/m²-400 W/m² พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทันทีเมื่อมีการลดความเข้มแสงแต่วิธีรบกวนและสังเกตยังใช้เวลาในการค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้ากว่าวิธีรบกวนและสังเกต

7. สรุป

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิกที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบักค์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์บนโปรแกรม MATLAB และได้มีการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าวิธีฟัซซีลอจิกมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตในสภาวะเริ่มต้นการทำงานของระบบและช่วงสภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในช่วงเพิ่มความเข้มแสงและช่วงลดความเข้มแสง ซึ่งวิธีรบกวนและสังเกตมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้เพียงค่าเดียวจึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอยู่ตลอดเวลาแต่ในทางกลับกันวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วในสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยการอาศัยการตัดสินใจของตัวควบคุมฟัซซีและให้อาตรูปเป็นแรงดันอ้างอิงที่มีเกณฑ์กำหนดหลายค่าเพื่อให้เหมาะสมกับทุกสภาวะแวดล้อมโดยในแต่ละค่านั้นมีการออกแบบให้มีการเพิ่มแรงดันมากหรือเพิ่มแรงดันอ้างอิงน้อยในกรณีที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมระบบจะจ่ายแรงดันอ้างอิงมากและลดค่าแรงดันอ้างอิงลงเมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีฟัซซีลอจิกจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.J. Deceglie, M.G. Deceglie, I. Subedi, N.J. Podraza and I.M. Slauch, "Reducing operating temperature in photovoltaic modules," *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 8, pp. 532-540, Oct. 2018.
- [2] P. Gaur, Y.P. Verma and P. Singh, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic applications A comparative study," in *2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences*, Chandigarh, India, 2015, pp. 1-5.
- [3] P. Wongyai, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic," in *The 37th Electrical Engineering Conference*, Khon Kaen, Thailand, 2014, pp. 545-548.
- [4] A. Mohapatra, B. Nayak and C. Saiprakash, "Adaptive perturb & observe MPPT for PV system with experimental validation," in *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and systems*, Bhubaneswar, India, 2019, pp. 257- 261.
- [5] M. Gunasekaran, V. Krishnamy, S. Selvam, D.J. Almakhlles and N. Anglani, "An adaptive resistance perturbation based MPPT algorithm for photovoltaic application," *IEEE Access*, Vol 8, pp. 196890-196901, Oct. 2020.
- [6] P. Premkumar and U. Subramaniam, "Improved perturb and observation maximum power point tracking technique for solar photovoltaic power generation systems," *IEEE Syst. J.*, pp.1-13, Jul. 2020.
- [7] C. Thueanpangthaim, P. Wongyai, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "The maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based approach," in *5th International Electrical Engineering Congress*, Pattaya, Thailand, 2017, pp. 1-4.
- [8] A. Al Nabulsi and R. Dhaouadi, "Efficiency optimization of a DSP-based standalone PV system using fuzzy logic and dual-MPPT control," *IEEE Tran. Ind. Informat.*, Vol.8, pp. 573-584, Aug. 2012.
- [9] C. Panpean, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "The control of para rubber rolling machine via fuzzy logic controller," in *The 39th Electrical Engineering Conference*, Phetchaburi, Thailand, 2016, pp. 501-504.
- [10] H. Ying and F. Lin, "Online self-learning fuzzy discrete event systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol. 28, pp. 2185-2194, Sep. 2020.
- [11] L. Farah, A. Hussain, A. Kerrouche, C. Ieracitano, J. Ahmad and M. Mahmud, "A high-efficient fuzzy-based controller with high reduction input and membership functions for a grid-connected photovoltaic system," *IEEE Access*, Vol. 8 pp. 163225-163237, Aug. 2020.
- [12] M. Aly and H. Rezk, "A differential evolution - based optimized fuzzy logic MPPT method for enhancing the maximum power extraction of proton exchange membrane fuel cell," *IEEE Access*, Vol.8 pp. 172219-172232, Sep. 2020.