

تاريخ الإستلام: 2026-05-02 | تاريخ القبول: 2026-06-07 | تاريخ النشر: 2026-06-30م

تحليل مقارن للأداء الديناميكي لخوارزميتي التحكم الضبابي والاضطراب والملاحظة في أنظمة الطاقة الكهروضوئية

عبدالباسط نورالدين¹، سالم الجريبي²، نوري المقرحي³، هشام المقرج⁴

¹كلية التقنية الهندسية – جنزور

²المعهد العالي للتقنيات الهندسية - بني وليد

³كلية تقنية الطيران المدني والأرصاد الجوية - اسبيعة

⁴المعهد العالي للعلوم والتقنية – الخمس

ababmonualla@gmail.com

المخلص

تُعد خوارزميات تتبع نقطة القدرة العظمى (Maximum power point tracking MPPT) عنصرًا أساسيًا لتحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية، خاصة تحت ظروف التشغيل الديناميكية الناتجة عن تغير الإشعاع الشمسي. على الرغم من الانتشار الواسع لخوارزمية الاضطراب والملاحظة (Perturb and Observe P&O)، إلا أن أداءها الديناميكي لا يزال محدودًا بسبب التذبذب وبطء الاستجابة. تهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل مقارن شامل بين خوارزمية (P&O) وخوارزمية التحكم المنطقي الضبابي (Fuzzy Logic Control FLC) باستخدام نموذج موحد في بيئة MATLAB/Simulink. تم تقييم الأداء اعتمادًا على مؤشرات كمية تشمل الكفاءة، زمن الاستقرار، التذبذب، وفقدان الطاقة ضمن نطاق إشعاع يتراوح بين 200 و1000 واط/م². أظهرت النتائج تفوقًا واضحًا لخوارزمية (FLC)، حيث حققت كفاءة تصل إلى 98% مع تقليل زمن الاستقرار بنسبة تجاوزت 60%، بالإضافة إلى انخفاض ملحوظ في التذبذب مقارنة بخوارزمية (P&O). تؤكد هذه النتائج أن التحكم الضبابي يوفر استجابة ديناميكية أكثر استقرارًا وكفاءة، مما يجعله خيارًا مناسبًا للتطبيقات العملية في أنظمة الطاقة الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الكهروضوئية، تتبع نقطة القدرة العظمى، الاضطراب والملاحظة، التحكم الضبابي، MATLAB/Simulink

Abstract

Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms attempt to maximize the output of photovoltaic cells. The effectiveness of an MPPT mechanism is important when the operating point changes considerably due to solar irradiance changes. Although the P&O algorithm is the most common MPPT algorithm, it has slow response and oscillations. In this paper, a detailed comparison between the P&O and FLC algorithms is made in a single MATLAB/Simulink environment. The performance was quantified in terms of efficiency, settling time, oscillation, and transient power loss at the different radiation levels of 200-1000 W/m². The FLC algorithm had an efficiency of 98% (much higher than the P&O algorithm) and had over 60% lower settling time and over 60% lower oscillation. The transient power loss was also considerably less than that of the P&O algorithm. This shows

the potential for a more stable and efficient dynamic response when applying fuzzy control methods for the control of photovoltaic (PV) systems.

1. المقدمة

شهدت أنظمة الطاقة الكهروضوئية اهتمامًا متزايدًا في خلال السنوات الأخيرة لكونها أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة، بسبب ما توفره من طاقة نظيفة ومستدامة. غير أن الأداء الفعلي لتلك الأنظمة يتأثر بشكل بالغ بالتغيرات المستمرة بالظروف البيئية، سيما شدة الإشعاع الشمسي مع درجة الحرارة، مما يفضي إلى تغيير مكان نقطة القدرة العظمى (MPP) بشكل ديناميكي. تُستخدم خوارزميات تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) لضمان التشغيل عند هذه النقطة. تهدف هذه الخوارزميات إلى تعظيم القدرة المستخرجة من النظام. تعتبر خوارزمية الاضطراب والملاحظة (P&O) من بين الخوارزميات الأكثر استعمالًا بالنظر لبساطتها، لكنها تعاني من تذبذب دائم حول نقطة القدرة القصوى، بجانب ضعف أدائها في ظل التغيرات المتسارعة في الإشعاع. بالمقابل، ظهرت في الأفق تقنيات التحكم الذكي، وعلى رأسها التحكم المنطقي الضبابي (FLC)، كبديل فعال قادر على التعامل مع الطبيعة غير الخطية للأنظمة الكهروضوئية دون الحاجة إلى نموذج رياضي دقيق. وقد أظهرت العديد من الدراسات الحديثة تفوقًا لهذه التقنية من حيث سرعة الاستجابة وتقليل التذبذب. على الرغم من التقدم الملحوظ في خوارزميات MPPT، فإن معظم الدراسات لا تزال تركز على تقييم الكفاءة في الحالة المستقرة. هذا يحدث مع إهمال التحليل الشامل للأداء الديناميكي، والذي يشمل زمن الاستقرار، والتذبذب، وفقدان الطاقة خلال الفترات الانتقالية. ظهرت خوارزميات التحكم الذكي لتجاوز هذه القيود؛ إضافة إلى ذلك، التحكم الضبابي (FLC) أظهر قدرة عالية للتعامل مع الطبيعة غير الخطية للأنظمة الكهروضوئية دون الحاجة لنموذج رياضي دقيق. حيث بينت دراسة لـ Patel وآخرون (2025) بين P&O و IC، موضحة تفوق الضبابي بتقليل التذبذب وتحسين الكفاءة تحت تغيرات الإشعاع [1]. كما أظهر Chebri وآخرون (2025) أن FLC أفضل من P&O و Sliding Mode Control في ظروف التظليل الجزئي [2]. وأكد Çakmak وآخرون (2025) أن دمج FLC مع Incremental Conductance يزيد من دقة التتبع ويقلل زمن الاستجابة [3]. وجد Sørensen وآخرون (2024) أن FLC يتفوق على P&O و IC وطرق تحسين مستوحاة من الطبيعة مثل PSO و GWO في سيناريوهات التظليل [4]. دراسة Imran وآخرون (2024) أظهرت كفاءة أعلى وتحسنًا في التكيف مع تغير الإشعاع باستخدام FLC مقارنة بالطرق التقليدية [5]. Khennoufa وآخرون (2024) أكدوا أن FLC يوفر استجابة أسرع وأكثر دقة [6]. في محاكاة Kiala وآخرون (2023) اقترحوا خوارزمية هجينة FLC-IC لتحسين معدل التقارب وتقليل التذبذب [7]. أما Masry وآخرون (2023) فطوروا خوارزمية هجينة تجمع الذكاء الاصطناعي مع الطرق التقليدية لتعقب GMPP في حالات التظليل الجزئي [8]. Melhaoui وآخرون (2025) قدموا نهجًا هجينًا يعتمد على FLC لتعزيز الأداء الكلي للنظام [9]. وأخيرًا، Ahmadi وآخرون (2025) طوروا Adaptive Gradient Descent MPPT مع تحسين زمن التتبع وتقليل التذبذب [10].

وفي ضوء ما سبق، تقدم هذه الدراسة الإسهامات التالية:

1- تطوير نموذج محاكاة دقيق لنظام كهروضوئي متكامل باستخدام MATLAB/Simulink يتضمن وحدة PV ومحول رفع وتقنيات MPPT.

2- إجراء مقارنة منهجية وعادلة بين خوارزميتي (P&O) و (FLC) تحت نفس ظروف التشغيل .

- 3- تقديم تحليل كمي شامل للأداء الديناميكي باستخدام مؤشرات متعددة تشمل الكفاءة، زمن الاستقرار، والتذبذب .
- 4- إثبات تفوق خوارزمية التحكم الضبابي في تحسين الاستجابة الديناميكية وتقليل فقد الطاقة مقارنة بالخوارزميات التقليدية .
- 5- توفير إطار تحليلي يمكن الاعتماد عليه في تطوير خوارزميات MPPT المستقبلية.

2. مكونات النظام الكهروضوئي وتقنية تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT)

1.2 مكونات النظام الكهروضوئي

يتشكل النظام الكهروضوئي قيد الدراسة من جملة مكونات أساسية تعمل بتكامل لغرض استخلاص اعلي قدرة كهربائية في ظل ظروف تشغيل متبدلة. يعتمد النظام على وحدة كهروضوئية من صنف SunPower SPR-250NX-BLK-D، حيث تقوم بتحويل الإشعاع الشمسي إلى شكل طاقة كهربائية مستمرة. تتأثر الخصائص الكهربائية لهذه الوحدة بشكل مباشر بشدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا. يؤدي ازدياد الإشعاع إلى رفع القدرة الخارجة، و يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى انخفاض الجهد وبالتالي تقليل الكفاءة الكلية للنظام. يبين الجدول رقم (1) الخصائص الكهربائية الاسمية للوحدة الكهروضوئية في ظل شروط الاختبار القياسية. (STC)

الجدول 1: الخصائص الكهربائية للوحدة الكهروضوئية Sun Power SPR-250NX-BLK-D

Maximum Power (W)	213.15
Cells per module (Ncell)	60
Open Circuit Voltage Voc (V)	36.3
Short-circuit current Isc (A)	7.84
Voltage at maximum power point Vmp (V)	29
Current at maximum power point Imp (A)	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/°C)	-0.36099
Temperature coefficient of Isc (%/°C)	0.102

لضمان تشغيل اللوح عند نقطة القدرة العظمى (MPP)، تم توصيله بمحول تيار مستمر، تيار مستمر من نوع محول الرفع (DC, DC Boost Converter)، مع مفتاح قدرة من نوع MOSFET يتم التحكم فيه بواسطة إشارة عرض النبضة (PWM) الصادرة عن وحدة تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT). يؤدي هذا المحول وظيفة فصل جهد اللوح الكهروضوئي عن ظروف الحمل، وهذا يسمح بالتحكم في نقطة التشغيل مع تحقيق أقصى استخلاص للطاقة، ويتم ذلك تحديداً من خلال ضبط معامل التشغيل D الذي يغير المعاوقة المكافئة التي يراها اللوح، وبالتالي دفع نقطة التشغيل في اتجاه نقطة القدرة العظمى، وأيضاً تحسين استقرار جهد الخرج. في حالة التشغيل المستمر، تُوصف العلاقة بين جهود الدخل والخرج لمحول الرفع بالمعادلات التالية. كذلك تصف المعادلات تيارات الدخل والخرج.

$$V_{out} = V_{PV} \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

$$I_{out} = I_{PV} (1-D) \quad (2)$$

حيث V_{pv} و I_{pv} يمثلان جهد وتيار اللوح الكهروضوئي على التوالي و D هي نسبة التشغيل للمحول.

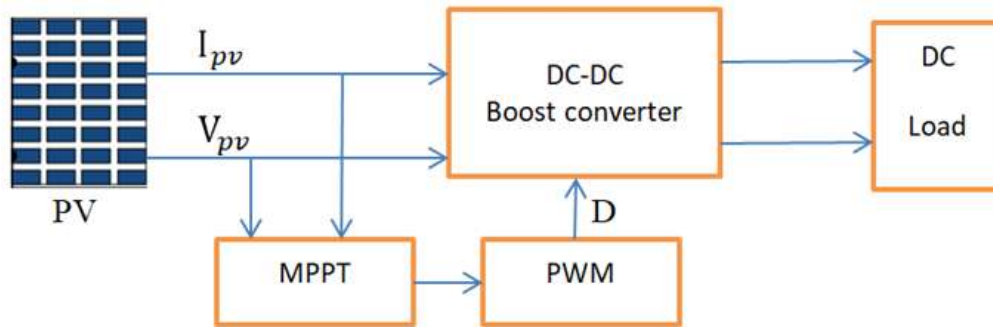
وعند ربط المولد الكهروضوئي بالحمل عبر محول الرفع (DC-DC) تتحقق عند نقطة القدرة العظمى العلاقة التالية بين نسبة التشغيل المثلى ومقاومة الحمل

$$D_{mpp} = 1 - \sqrt{\frac{R_{mpp}}{R}} \quad (3)$$

$$R_{mpp} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (4)$$

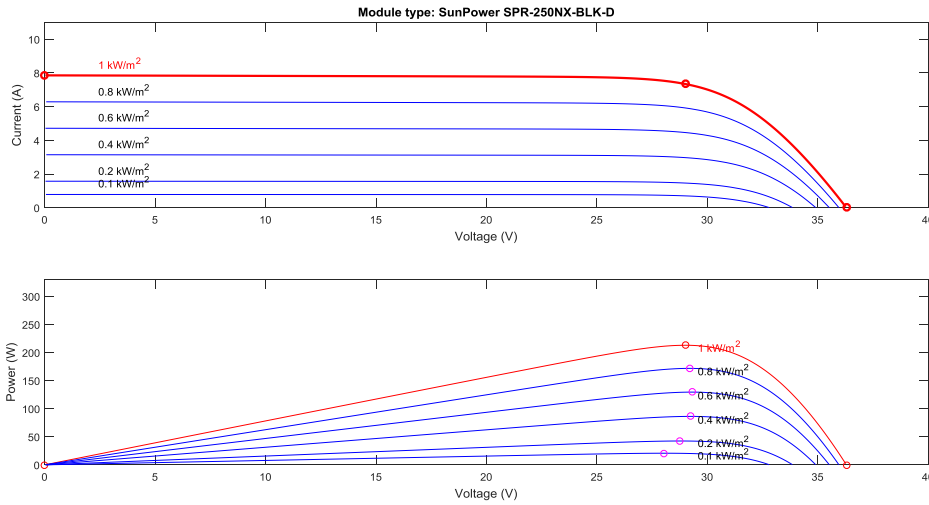
حيث تمثل R_{mpp} مقاومة اللوح عند نقطة القدرة العظمى، V_{mpp} و I_{mpp} الجهد والتيار المقابلين لها.

يرتكز النظام على خوارزميتين لتتبع نقطة القدرة العظمى، خوارزمية الاضطراب و الملاحظة (P&O) وخوارزمية التحكم المنطقي الضبابي (FLC)، إذ تقوم كلتاها بتحديد نسبة التشغيل المثلى بغرض تحقيق أقصى قدرة ممكنة. تم استخدام حمل مقاوم ثابت؛ وذلك لتوفير بيئة اختبار مستقرة. هذا يتيح إجراء مقارنة دقيقة بين الخوارزميتين من حيث الكفاءة، وزمن الاستجابة، واستقرار القدرة. تحت مستويات مختلفة من الإشعاع الشمسي تتراوح بين 200 و 1000 واط/م² مع تثبيت درجة حرارة الخلايا.



الشكل 1: نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية مع تقنية تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)

يوضح الشكل (1) البنية العامة للنظام الكهروضوئي المزود في وحدة MPPT، فيما يبين الشكل (2) خصائص التيار، الجهد (I , V) إضافة إلى القدرة، الجهد (P , V) عند مستويات إشعاع مختلفة. هذه المنحنيات تظهر تغير موقع نقطة القدرة العظمى بشكل واضح مع تغير الظروف البيئية. هذا يؤكد أهمية استخدام تقنيات MPPT المتقدمة من أجل ضمان التشغيل الأمثل للنظام.



الشكل 2: خصائص التيار-الجهد (I-V) والقدرة-الجهد (P-V) للوحدة الكهروضوئية عند مستويات إشعاع مختلفة

وفقاً لذلك، تركز هذه الدراسة على إجراء تحليل مقارنة للأداء الديناميكي لخوارزميتي (P&O و FLC)، بهدف تقييم مدى كفاءتهما في تتبع نقطة القدرة العظمى تحت ظروف إشعاع متغيرة.

2.2 تقنية تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT)

تتغير نقطة القدرة العظمى (MPPT) في داخل الأنظمة الكهروضوئية تبعاً لظروف التشغيل، خصوصاً شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا، وذلك نتيجة للطبيعة غير الخطية لمنحنيات التيار، الجهد (I, V) والقدرة، الجهد (P, V). لهذا السبب، فإن استمرار تشغيل النظام تحت حمل ثابت لاستخلاص القدرة الأكبر، مما يستلزم توظيف أساليب تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) لتعديل نقطة التشغيل بصورة مستمرة.

يمكن تصنيف خوارزميات (MPPT) إلى ثلاث من الفئات الرئيسية:

- الخوارزميات التقليدية مثل في الاضطراب والملاحظة (P&O) والموصلية المتزايدة (IC)، والتي تتميز بالبساطة وانخفاض التكلفة الحسابية، لكنها تعاني من تذبذب حول نقطة القدرة العظمى وضعف الأداء تحت التغيرات السريعة في الإشعاع.
- الخوارزميات الذكية مثل التحكم المنطقي الضبابي (FLC) أو الشبكات العصبية (ANN) التي توفر استجابة أسرع. كما أنها توفر قدرة أفضل للتعامل مع اللاخطية، ولكن على حساب زيادة التعقيد الحسابي.
- الخوارزميات الهجينة تجمع بين أكثر من تقنية؛ الهدف تحقيق توازن بين سرعة التتبع ودقته، تحديداً في حالات التظليل الجزئي.

بناءً عليه، تركز هذه الدراسة على مقارنة أداء خوارزميتي (P&O مع FLC) من حيث الكفاءة والاستجابة الديناميكية

1- خوارزمية الاضطراب والملاحظة (P&O)

تعتمد خوارزمية (P&O) على إحداث اضطراب صغير في جهد التشغيل، ومراقبة التغير الناتج في القدرة، ومن ثم تعديل اتجاه الاضطراب وفقاً لإشارة المشتقة التقريبية لمنحنى القدرة-الجهد.

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \quad (5)$$

حيث $P(K)$ و $V(K)$ تمثل القيم الحالية، و $P(K-1)$ و $V(K-1)$ تمثل القيم السابقة.

- إذا كانت $\Delta P / \Delta V > 0$ ، يتم الاستمرار في نفس اتجاه الاضطراب.
- إذا كانت $\Delta P / \Delta V < 0$ ، يتم عكس اتجاه الاضطراب، بهدف دفع نقطة تشغيل النظام نحو نقطة القدرة العظمى (MPP).

تعكس هذه الآلية اقتراب نقطة التشغيل من (MPP)، إلا أن الخوارزمية تعاني من تذبذب مستمر حول النقطة المثلى بسبب طبيعة الاضطراب الدوري، كما يتدهور أداؤها في حالات التغير السريع في الإشعاع الشمسي.

2 - خوارزمية التحكم الضبابي (FLC)

تم تصميم متحكم ضبابي من نوع Mamdani بمدخلين ومخرج واحد، حيث يمثل المدخلان:

$$e(k) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \quad (6)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (7)$$

بينما يمثل المخرج التغير في نسبة التشغيل وفق العلاقة ΔD ، ويتم تحديته:

$$D(k) = \Delta D + D(1 - k) \quad (8)$$

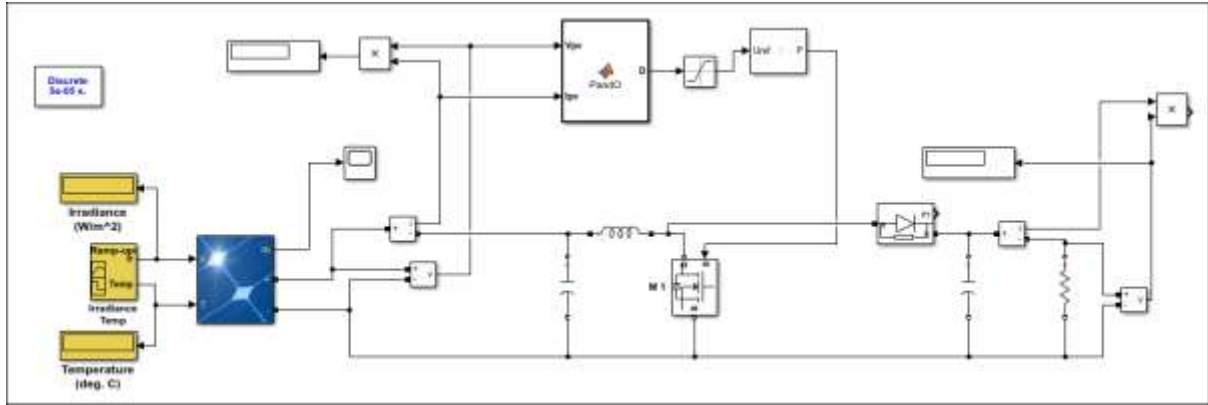
تم استخدام خمس دوال انتماء مثلثية (NB, NS, ZE, PS, PB)، مما أدى إلى تكوين قاعدة قواعد مكونة من 25 قاعدة. يعتمد المتحكم على تفسير موقع نقطة التشغيل بالنسبة لنقطة القدرة العظمى، حيث:

- عندما يكون النظام بعيداً عن (MPP) يتم تطبيق تغييرات كبيرة في D
 - عند الاقتراب من (MPP) يتم تقليل التغييرات لتقليل التذبذب
- تتميز هذه الخوارزمية بقدرتها على التعامل مع اللاخطية العالية للنظام الكهروضوئي، مما يؤدي إلى استجابة أسرع وتقليل التذبذب مقارنة بالخوارزميات التقليدية.

3. محاكاة وتقييم أداء خوارزميات تتبع نقطة القدرة العظمى باستخدام MATLAB/Simulink

لقد جرى بناء نموذج محاكاة متكامل ومفصل للنظام الكهروضوئي المقترح بالاستناد إلى بيئة MATLAB/Simulink، وهذا بغرض تقييم الأداء تقيماً كمياً دقيقاً، بالإضافة إلى إجراء مقارنة منهجية بين خوارزميتين معروفتين لتتبع نقطة القدرة القصوى MPPT وهما خوارزمية الاضطراب والملاحظة P&O وخوارزمية التحكم المنطقي الغائم FLC.

لضمان الحصول على نتائج تعكس سلوك الخوارزميات بصورة واضحة، جرى اختبار النظام. تم ذلك ضمن نطاق واسع من شدة الإشعاع الشمسي، إذ تراوحت القيم ما بين 200 إلى 1000 واط/م² مع تثبيت درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية في فترة المحاكاة بأكملها. أتاح ذلك عزلاً للتأثيرات الحرارية والتركيز المباشر على استجابة كل خوارزمية للتغيرات بالإشعاع. يوضح الشكل (3) التصميم المستخدم بالبحث، ويتضمن منظومة ضوئية متصلة بمحول تعزيز، مع وحدة سيطرة مخصصة لطريقة MPPT، بجانب أجهزة القياس والتحكم الضرورية لضمان اقتفاء نقطة الطاقة القصوى بثبات وإحكام.



الشكل 3: نموذج محاكاة نظام كهروضوئي مزود بخوارزميات (MPPT)

يبين الجدول (2) النتائج الكمية للمقارنة بين خوارزميتي (P&O و FLC) عند مستويات إشعاع مختلفة، متضمناً القدرة الداخلة والخارجة، والكفاءة، وزمن الاستقرار، إضافة إلى مقدار التذبذب في الحالة المستقرة.

جدول 2: نتائج محاكاة خوارزميتي (P&O و FLC) عند مستويات مختلفة من الإشعاع الشمسي

إشعاع (W/m ²)	خوارزمية التحكم	القدرة الداخلة (W)	القدرة الخارجة (W)	الكفاءة (%)	زمن الاستقرار (ms)	التذبذب عند الاستقرار (±W)
200	P&O	50.0	43.8	87.6	185	2.8
200	FLC	50.0	45.6	91.2	115	1.1
400	P&O	100.0	89.4	89.4	175	3.1
400	FLC	100.0	93.7	93.7	100	1.4
600	P&O	150.0	137.2	91.5	160	3.7
600	FLC	150.0	142.9	95.3	92	1.5
800	P&O	200.0	186.5	93.3	140	3.6
800	FLC	200.0	192.8	96.4	82	1.2
1000	P&O	250.0	237.6	95.0	125	4.1
1000	FLC	250.0	244.9	98.0	78	1.0

تُظهر نتائج المحاكاة توافقاً وثيقاً مع الخصائص غير الخطية المعروفة للأنظمة الكهروضوئية، مما يؤكد على دقة النموذج ويعزز من موثوقية التحليل المقارن. تُبين النتائج تفوقاً ملحوظاً لخوارزمية التحكم المنطقي الضبابي (FLC) من حيث الكفاءة. هي أيضاً أكثر ملاءمة للتطبيقات التي تعمل تحت ظروف بيئية متغيرة نظراً للاستجابة الديناميكية. ويرجع هذا التفوق لقدرة خوارزمية (FLC) على تغيير معامل التشغيل بمرونة حسب وضع النظام، مما يساعد في تخفيف الاهتزاز حول نقطة الطاقة القصوى قياساً بالتكرار في خوارزمية (P&O) إذ تحقق خوارزمية (FLC) نمواً في الكفاءة مقداره ما

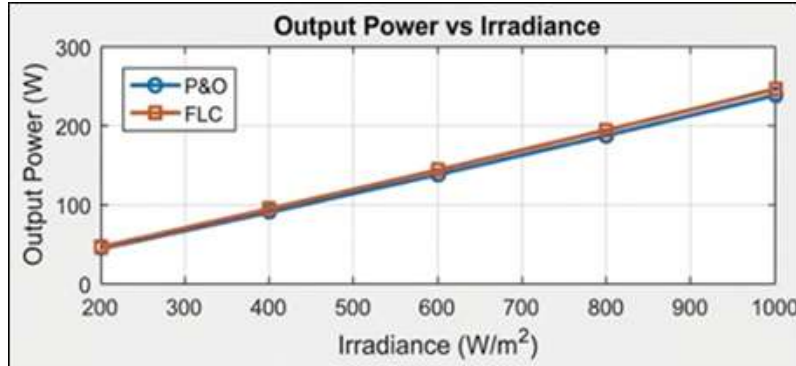
بين 2% إلى 3% قياساً بخوارزمية (P&O)، مع تخفيض زمن الاستقرار بمعدل يبلغ 40% مع تقليل التذبذب بنسبة تفوق 60%.

4. النتائج والمناقشة

لقد جرى تنفيذ مجموعة من عمليات المحاكاة الرقمية عبر برنامج MATLAB/Simulink لتقييم أداء كل من خوارزميتي تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) وهما خوارزمية الاضطراب والملاحظة (P&O) إضافة إلى خوارزمية التحكم المنطقي الضبابي (FLC) وذلك في ظل ظروف عمل متنوعة بتغير الإشعاع الشمسي بين 200 و1000 واط/م² مع ثبات درجة الحرارة. هذا القسم يقدم تحليلاً معمقاً للنتائج. كذلك يفسر الأسباب الكامنة وراء تفوق كل خوارزمية في مؤشرات الأداء المختلفة من منظور ديناميكي. جرى التحقق من صحة النتائج عن طريق توافقها مع السلوك الفيزيائي المتوقع للنظام، بجانب مقارنتها بنتائج دراسات سابقة، مما يعزز موثوقية النموذج المقترح.

1.4 القدرة الناتجة مقابل الإشعاع الشمسي

تبين النتائج المضمنة بالشكل (4) أن خوارزمية (FLC) تحقق قدرة إنتاجية أعلى مع كفاءة أضخم بالمقارنة بخوارزمية (P&O) عند كل مستويات الإشعاع الشمسي. فعلى سبيل المثال، عند إشعاع 1000 واط/م²، بلغت القدرة الخارجة باستخدام (FLC) نحو 9.244 واط بكفاءة وصلت إلى 98%. وبلغت القدرة الخارجة حوالي 6.237 واط وبكفاءة 95% عند استخدام خوارزمية (P&O)، ويُعزى هذا التحسن إلى قدرة (FLC) على ضبط نقطة التشغيل بدقة أكبر حول نقطة القدرة العظمى، مما يقلل من فقدان الطاقة الناتجة عن التذبذب المستمر. يُلاحظ أيضاً أنّ هذا التميز بالأداء ليس فقط بالإشعاعات العالية، بل يشمل الإشعاعات المنخفضة كذلك. فعند 200 واط/م²، حققت (FLC) كفاءة بمقدار 2.91% مقابل 6.87% لخوارزمية (P&O)، مما يعكس قدرة أعلى على استخلاص الطاقة في ظروف التشغيل غير المثالية.

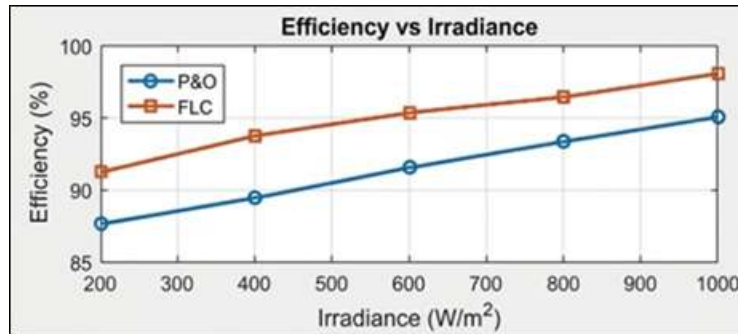


الشكل 4: القدرة الناتجة مقابل الإشعاع الشمسي

2.4 الكفاءة مقابل الإشعاع الشمسي

يُبين في الشكل (5) كفاءة النظام المثوية (Efficiency %) حول كل من (P&O) بجانب (FLC) كدالة للإشعاع الشمسي. يُظهر هذا الرسم البياني تفوقاً ملحوظاً لخوارزمية (FLC). التي حققت كفاءة أعلى مقارنة بطريقة (P&O) في جميع مستويات الإشعاع التي تم فحصها. تبدأ كفاءة (FLC) من نسبة 91% تقريباً عند 200 واط/م² حتى نسبة 98% تقريباً عند 1000 واط/م²، بينما تبدأ كفاءة (P&O) من نسبة 87% تقريباً حتى نسبة 95% تقريباً. هذا المستوى من التفوق في الكفاءة يرجع في شكل كبير إلى مقدرة التحكم المنطقي الضبابي على معالجة حالات عدم الخطية بجانب الاضطرابات في

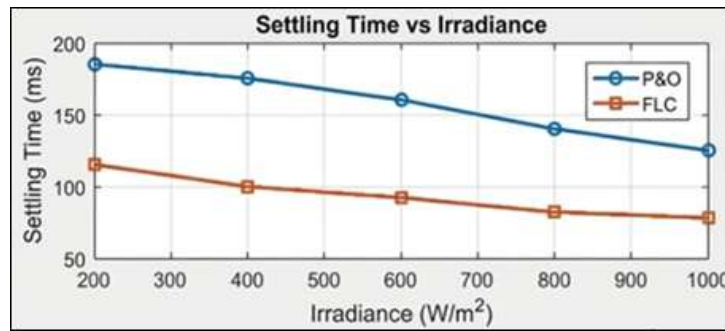
نظام (PV) بأسلوب فيه فعالية أكثر، الأمر الذي يتيح له تتبع نقطة القدرة القصوى بدقة أكبر مع العمل على تقليل فقد الطاقة.



الشكل 5: الكفاءة مقابل الإشعاع الشمسي

3.4 زمن الاستقرار مقابل الإشعاع الشمسي

في الشكل رقم (6) يظهر بوضوح زمن الاستقرار (Settling Time) لكل خوارزمية بالنسبة إلى الإشعاع الشمسي. يُعرف زمن الاستقرار على أنه الوقت الضروري للنظام لبلوغ حالة مستقرة عقب حدوث تغيير. بهذا الشكل، تكون خوارزمية (FLC) أفضل بشكل ملحوظ فلها أوقات استقرار أقصر بكثير من (P&O) فبينما ينخفض وقت استقرار (P&O) من 185 مللي ثانية تقريبا عند 200 واط/م² إلى 125 مللي ثانية تقريبا عند 1000 واط/م²، فإن وقت استقرار (FLC) ينخفض من 115 مللي ثانية تقريبا إلى أقل من 80 مللي ثانية بنفس المدى. تدل هذه الاستنتاجات على استجابة نظام التحكم باستعمال (FLC) للتغيرات بالإشعاع الشمسي، فيستقر عند نقطة القدرة القصوى بأسرع من (P&O)، وهذا ضروري للتطبيقات التي تحتاج استجابة حركية عاجلة.

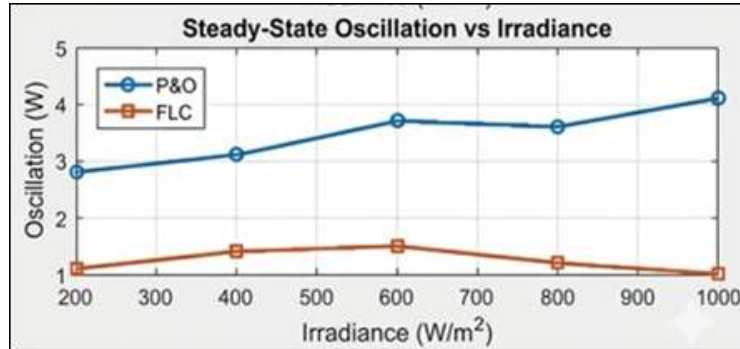


الشكل 6: زمن الاستقرار مقابل الإشعاع الشمسي

4.4 التذبذب في الحالة المستقرة مقابل الإشعاع الشمسي

يُظهر في الشكل (7) مقدار التذبذب في الحالة المستقرة (Steady-State Oscillation) بالواط لكلتا الخوارزميتين مقابل الإشعاع الشمسي. تُظهر خوارزمية (FLC) أداءً ممتازاً في هذا المقياس إذ تحافظ على مستوى تذبذب منخفض جداً بحيث يقترب من 1 واط في معظم النطاق إضافة إلى ذلك يزداد قليلاً عند الإشعاعات المتوسطة لكنه يظل أقل من 1.5 واط. في المقابل، تُظهر (P&O) تذبذبات أعلى بشكل ملحوظ بالفعل. ويتراوح هذا التذبذب ما بين 2.8 واط و 4.3 واط تقريباً. يُعدُّ

التذبذب المنخفض في الحالة المستقرة دلالة على استقرار النظام حول نقطة القدرة القصوى علاوةً على عدم إهدار الطاقة بسبب التقلبات المستمرة. هذا التفوق في (FLC) نتيجة لقدرتها على توفير تحكم أكثر سلاسة. هذا التحكم يقلل من "الضجيج" حول نقطة التشغيل المثلى وبدقة.



الشكل 7: التذبذب في الحالة المستقرة مقابل الإشعاع الشمسي

يمكن تفسير تفوق خوارزمية التحكم الضبابي الملحوظ في هذه الدراسة بواسطة قدرتها على التكيف مع طبيعة النظام الكهروضوئي غير الخطية. فعلى عكس خوارزمية الاضطراب والملاحظة التي تعتمد على خطوة اضطراب ثابتة، يقوم المتحكم الضبابي بتعديل في نسبة التشغيل لمحول الرفع بشكل تدريجي اعتماداً على ميل منحنى القدرة، الجهد ومعدل تغيره.

5.4 تحليل الأداء والمقارنة

يفسر التفوق الملحوظ لخوارزمية التحكم المنطقي الضبابي (FLC) لقدراتها العالية. تعالج هذه الخوارزمية الطبيعة غير الخطية لمنحنيات القدرة، الجهد في الأنظمة الكهروضوئية. فعلى عكس خوارزمية الاضطراب والملاحظة (P&O)، تعتمد الخوارزمية على خطوة اضطراب ثابتة. يؤدي ذلك بطبيعته إلى تذبذب مستمر حول نقطة القدرة العظمى، بينما يقوم المتحكم الضبابي بتعديل نسبة التشغيل (Duty Cycle) بشكل تكيفي بالاعتماد على حالة النظام اللحظية.

يتيح هذا التعديل قليلاً للخطأ خلال عملية التتبع، الأمر الذي ينعكس بشكل مباشر على تسريع الوصول إلى نقطة القدرة العظمى بالإضافة لتقليل التذبذب في الحالة المستقرة. النتائج الكمية الواردة في جدول (2) تُظهر أن خوارزمية (FLC) حققت انخفاضاً في زمن الاستقرار بنسبة وصلت إلى 40%. وهذا بالمقارنة مع خوارزمية (P&O)، إضافة إلى تقليل التذبذب بأكثر من 60%، مما يعزز استقرار النظام ويقلل فقد الطاقة.

بالإضافة إلى ذلك، اعتماد (FLC) على أسس منطقية يسمح له بالاستجابة الفعالة حيال التغيرات المفاجئة بالإشعاع الشمسي، الأمر الذي يفسر الأداء المتفوق في الظروف الديناميكية. وبناء على ذلك، يشمل هذا التقدم زيادة الكفاءة إضافة إلى تقوية الاستقرار الحركي للنظام وتجويد نوعية الطاقة المنتجة.

5. الاستنتاج

تبعاً لنتائج المحاكاة بجانب التحليل المقارن، فإنه من الواضح أن دمج خوارزمية التحكم المنطقي الضبابي (FLC) في داخل نظام تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) يفضي إلى تحسين ملحوظ في كل من الأداء الديناميكي بجانب الكفاءة

الكلية للنظام الكهروضوئي. إذ بينت النتائج وجود تفوق جلي لهذه الخوارزمية بتقليل زمن الاستقرار، مع خفض التذبذب بالحالة المستقرة، علاوة على زيادة القدرة المستخرجة، تحديداً بظل ظروف الإشعاع المتغيرة.

الدراسة بينت في القدرة التكيفية لخوارزمية (FLC). هذه المقدره تتيح لها تعقب نقطة القدرة القصوى بدقة أكثر من خوارزميات مألوفة مثل (P&O)، الأمر الذي يجعلها تحديداً خياراً مناسباً للتطبيقات الفعلية التي تستلزم ردة فعل سريعة مع استقرار عال.

6. حدود الدراسة

على الرغم من النتائج الإيجابية، تقتصر هذه الدراسة على ظروف تشغيل مثالية دون الأخذ في الاعتبار تأثيرات التظليل الجزئي أو التغيرات الحرارية، مما يفتح المجال أمام أعمال مستقبلية لتطوير خوارزميات هجينة أو دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مثل الشبكات العصبية (ANN) لتحسين الأداء في ظروف أكثر تعقيداً.

المراجع

- [1] M. S. Patel, S. H. Patel, D. Y. Joshi, "Comparative Analysis of Fuzzy Logic and Incremental Conductance MPPT Techniques for Enhancing Photovoltaic System Efficiency," *J. Inf. Syst. Eng. Manage.*, vol. 9, no. 4s, Dec. 2024.
- [2] A. Chebri, F. Boukahil, A. Mouffouk, B. Azoui, "Performance Evaluation of P&O, improved Sliding Mode and Fuzzy Logic MPPT Methods in PV Systems," *JESC*, 2025.
- [3] F. Çakmak, Z. Aydoğmuş, M. R. Tür, "Analyses of PO-Based Fuzzy Logic-Controlled MPPT and Incremental Conductance MPPT Algorithms in PV Systems," *Energies*, vol. 18, no. 2, Jan. 2025.
- [4] R. Sørensen, L. Mihet-Popa, "Comparative Evaluation of Traditional and Advanced Algorithms for Photovoltaic Systems in Partial Shading Conditions," *Solar*, vol. 4, no. 4, Oct. 2024.
- [5] M. Imran, M. A. Shehzad, A. Wajid, "A Comparative study of Fuzzy Logic, Incremental Conductance and P & O MPPT Algorithms for Solar Energy System," *J. Eng. Res. Rev.*, vol. 1, no. 1, 2024.
- [6] I. Khennoufa, S. Hossin, M. Abir, "Fuzzy logic maximum power point tracking MPPT techniques for photovoltaic systems," University of El Oued, 2024.
- [7] M. A. D. Kiala, Y. Wang, B. Liu, "Research on improved MPPT Fuzzy Logic Control-Incremental Conductance Algorithm," *J. Elect. Eng. Automat.*, vol. 5, no. 2, Jun. 2023.
- [8] M. Zaghloul-El Masry, A. Mohammed, F. Amer, R. Mubarak, "New Hybrid MPPT Technique Including Artificial Intelligence and Traditional Techniques for Extracting the Global Maximum Power from Partially Shaded PV Systems," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, Jul. 2023.
- [9] M. Melhaoui et al., "Hybrid fuzzy logic approach for enhanced MPPT control in PV systems," *Sci. Rep.*, vol. 15, Art. no. 19235, 2025.



[10] K. Ahmadi, W. A. Serdijn, “Adaptive Gradient Descent MPPT Algorithm With Complexity-Aware Benchmarking,” arXiv:2511.20895, Nov. 2025.