

## تحقيق أقصى قدرة من أنظمة PV باستخدام خوارزمية MPPT من نوع P&O محاكاة عبر Simulink

إبراهيم علي أحمد العريض<sup>1</sup>، الصالحين مصباح محمد الصالحين<sup>2</sup>  
محمد يوسف ابوخزام<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> المعهد العالي للعلوم والتقنية- تمزاوة

<sup>2</sup> كلية صرمان للعلوم والتقنية

<sup>1</sup>Alaridh1981@gmail.com, <sup>2</sup>slhancora@gmail.com, <sup>3</sup>hmu.aboukhazam@gmail.com

### المخلص

في ظل التوجه العالمي نحو الطاقات المتجددة، تمثل الأنظمة الكهروضوئية (PV) أحد أبرز الحلول لتوليد الكهرباء بطريقة نظيفة ومستدامة. ومع ذلك، فإن كفاءة هذه الأنظمة تتأثر بشكل كبير بالتغيرات المناخية مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، مما يتطلب تقنيات فعالة لتعزيز القدرة المستخرجة منها. تهدف هذه الدراسة إلى تطبيق خوارزمية التتبع P&O (Perturb and Observe) لتحقيق أقصى قدرة ممكنة من النظام الشمسي باستخدام بيئة المحاكاة MATLAB.

تم تصميم نموذج شامل لنظام PV متكامل مع وحدة MPPT تعتمد خوارزمية P&O، مع استخدام محول DC-DC من نوع Boost وموسفت (MOSFET) للتحكم في الجهد والتيار. أظهرت نتائج المحاكاة أن الخوارزمية قادرة على تتبع نقطة القدرة العظمى بكفاءة عالية، حتى في ظل تغير ظروف الإشعاع ودرجة الحرارة. كما تم تحليل استقرار الأداء وفعالية الاستجابة الزمنية للنظام. تؤكد النتائج فعالية خوارزمية P&O كحل بسيط وفعال لتطبيقات MPPT في الأنظمة الكهروضوئية، مما يساهم في تحسين كفاءة تحويل الطاقة وتعزيز الاعتماد على الطاقة الشمسية في أنظمة القدرة المستقلة والمتصلة بالشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** الأنظمة الكهروضوئية، MPPT، كفاءة الطاقة الشمسية، محول Boost.

Submitted: 19/09/2025

Accepted: 17/10/2025

### 1-المقدمة (Introduction)

أصبحت أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Photovoltaic - PV) من أبرز مصادر الطاقة المتجددة انتشاراً في السنوات الأخيرة، وذلك لما تقدمه من حلول مستدامة وصديقة للبيئة في ظل التزايد المستمر في الطلب العالمي على الكهرباء [1]. ومع ذلك، فإن الأداء الفعلي لهذه الأنظمة يتأثر بشكل مباشر بالظروف البيئية المحيطة، وعلى رأسها شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، مما يؤدي إلى تذبذب في القدرة الناتجة عن الألواح الشمسية [2].

ومع ذلك، تواجه الطاقة الشمسية بعض التحديات، مثل انخفاض كفاءة التحويل، وتذبذب الإنتاج، واعتمادها على الظروف الجوية، مما يجعلها مصدراً غير موثوق به في بعض الأحيان.

وللتغلب على هذه التحديات وزيادة القدرة المستخرجة من أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV)، يتم استخدام تقنيات تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) [3] تهدف خوارزميات MPPT إلى استخراج أكبر قدر ممكن من الطاقة من اللوحات الشمسية عن طريق ضبط الجهد والتيار العاملين بالشكل الأمثل [4]، [5].

عادةً ما يتم دمج وحدة تحكم MPPT مع محول تيار مستمر إلى تيار مستمر (DC-DC)، متصل بحمل مناسب. وتقوم وحدة التحكم بتعديل دورة العمل (Duty Cycle) لهذا المحول لضمان عمل النظام عند نقطة القدرة العظمى (MPP).

ولضمان التشغيل في النقطة المثلى التي تُمكن النظام من إنتاج أعلى قدرة ممكنة، تم تطوير تقنيات تُعرف بتقنيات تتبع نقطة القدرة العظمى (Maximum Power Point Tracking - MPPT)، والتي تُعد من أهم مكونات أنظمة PV الحديثة [6]. ومن بين هذه التقنيات، تبرز خوارزمية (MPPT) "بوصفها واحدة من أكثر الخوارزميات استخدامًا، نظرًا لبساطتها وسهولة تنفيذها في التطبيقات العملية [8]، [7]. ولتجاوز هذه الإشكاليات، اقترحت العديد من الدراسات خوارزميات بديلة أو مُحسنة، مثل Incremental Conductance والمنطق الضبابي (Fuzzy Logic)، والتي تقدم أداءً أفضل من حيث الاستقرار وسرعة الاستجابة. إلا أن خوارزمية P&O لا تزال تُعتبر خيارًا مناسبًا في التطبيقات التي تتطلب حلولًا بسيطة وفعالة من حيث التكلفة. انطلاقًا من هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نموذج محاكاة رقمي لنظام PV يعمل بخوارزمية MPPT من نوع P&O باستخدام بيئة MATLAB/Simulink.

تعتمد خوارزمية P&O على تعديل جهد الخرج بشكل دوري ومراقبة تأثير هذا التعديل على القدرة الناتجة؛ فإذا زادت القدرة، يُستمر في نفس الاتجاه، وإذا انخفضت، يتم عكس اتجاه التعديل. إلا أنها تتميز بسهولة التنفيذ وفعاليتها في تتبع نقطة القدرة القصوى تحت ظروف تشغيل مستقرة. كما أنها توفر أداءً جيدًا في العديد من تطبيقات أنظمة الطاقة الشمسية، مما يجعلها خيارًا شائعًا وموثوقًا في أنظمة MPP. وسيتم تقييم أداء الخوارزمية في ظروف بيئية متغيرة، من خلال تحليل مجموعة من مؤشرات الأداء، مثل سرعة التتبع، وثبات القدرة الخارجة، وكفاءة الاستخلاص الكلي للطاقة من النظام الكهروضوئي. وعلاوة على ذلك، تُساهم هذه الورقة في جانب النمذجة والتعليم، إذ تمثل مرجعًا تطبيقيًا يمكن الاستفادة منه في المجال الأكاديمي لتعليم مبادئ تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) باستخدام بيئة المحاكاة MATLAB/Simulink. يُظهر النموذج المُقترح كيفية دمج المكونات العملية مثل محول Boost وخوارزمية P&O ضمن نظام كهروضوئي متكامل، مما يُمكن الطلاب والباحثين من فهم آلية عمل الأنظمة الشمسية بشكل واقعي ومحاكي.

تعتمد هذه الورقة على تنظيم منهجي يبدأ بمقدمة عامة حول الموضوع. يتناول القسم الثاني صياغة المشكلة وتحديد أهداف الدراسة، بينما يستعرض القسم الثالث النموذج الرياضي المستخدم لتمثيل أداء اللوحة الشمسية. يتناول القسم الرابع، تقنية تعقب نقطة القدرة العظمى (MPP) باعتبارها إحدى الآليات الفعالة لتحسين كفاءة الأنظمة الشمسية. يلي ذلك عرض نتائج المحاكاة التي توضح فعالية النموذج المقترح والتقنية المستخدمة. وتُختتم الورقة بخاتمة تُلخص أبرز ما تم التوصل إليه، متبوعة بالخلاصة التي تبرز النقاط الرئيسية.

## 2- بيان المشكلة (Problem Statement)

في ظل التزايد المتسارع في الطلب العالمي على الطاقة، أصبحت أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) من بين أبرز البدائل المتجددة التي تحظى باهتمام عالمي متزايد، لما توفره من حلول صديقة للبيئة ومستدامة. ومع ذلك، لا تزال هذه الأنظمة تواجه تحديات جوهرية تؤثر سلبًا على أدائها وكفاءتها التشغيلية، وعلى رأسها التذبذب الكبير في القدرة الناتجة نتيجة لتغير الظروف البيئية المحيطة، مثل شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، الأمر الذي يؤدي إلى صعوبة في ضمان تشغيل الألواح الشمسية عند نقطة القدرة العظمى (MPP) بشكل مستمر.

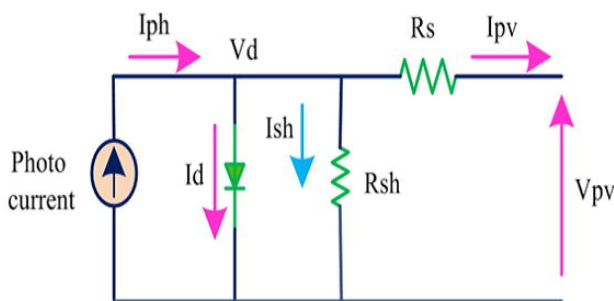
إن فعالية أي نظام PV تعتمد بشكل كبير على قدرته على التكيف مع التغيرات البيئية، مما يستدعي استخدام تقنيات متقدمة لتعقب نقطة القدرة العظمى (MPPT). وفي هذا السياق، ظهرت خوارزميات متعددة تهدف إلى تحسين استخلاص الطاقة من الألواح الشمسية، من بينها خوارزمية Perturb and Observe (P&O)، والتي تُعد من أكثر الخوارزميات شيوعًا بفضل بساطتها وسهولة تنفيذها. ورغم ذلك، فإن هذه الخوارزمية تُعاني من بعض القيود، مثل التذبذب حول نقطة القدرة العظمى في حالات الاستقرار، والاستجابة غير المثالية للتغيرات السريعة في الظروف البيئية، مما قد يؤثر سلبًا على الكفاءة الكلية للنظام.

وعلى الرغم من وفرة الدراسات النظرية حول أداء خوارزمية P&O، إلا أن هناك نقصًا ملحوظًا في النماذج التطبيقية والمحاكاة الواقعية التي تتيح تقييم أدائها بدقة تحت ظروف تشغيل متنوعة ومعقدة. هذا الغياب يشكل فجوة بحثية واضحة في الأدبيات العلمية، خصوصًا فيما يتعلق بتكامل الخوارزميات مع مكونات النظام الكهروضوئي مثل محولات DC-DC من نوع Boost، وتحليل أداء النظام باستخدام أدوات محاكاة متقدمة كـ MATLAB/Simulink.

بناءً على ما سبق، تتبع الحاجة إلى تطوير نموذج محاكاة رقمي متكامل لنظام PV مدعوم بخوارزمية MPPT من نوع P&O، بهدف دراسة سلوك النظام بدقة وتحليل كفاءته في ظروف بيئية متغيرة. ويسهم هذا النموذج في سد الفجوة بين النظرية والتطبيق، ويُعد أداة تعليمية وتطبيقية في الوقت ذاته، يمكن أن يستفيد منها الباحثون والمهندسون وطلاب الهندسة المهتمون بمجال الطاقة الشمسية.

### 3-النموذج الرياضي للوحدة الكهروضوئية (PV Module)

الشكل 1 يمثل الدائرة المكافئة للخلية الكهروضوئية، ويُعرف هذا النموذج باسم نموذج الصمام الثنائي الواحد يعتمد هذا النموذج على فرضية أن الفقد الناتج عن إعادة الاتحاد في منطقة الجهد الحاجر (Depletion Region) يمكن إهماله. ويُستخدم هذا النموذج على نطاق واسع في تطبيقات الخلايا الشمسية نظراً لبساطته وكفاءته. ولكن، لتمثيل خلية شمسية عملية بطريقة أكثر دقة، يجب أخذ المقاومة المتسلسلة ( $R_s$ ) والمقاومة المتوازية ( $R_{sh}$ ) في الاعتبار داخل النموذج. في هذا البحث، تم اعتماد نموذج الصمام الثنائي الواحد لتمثيل الخلية الشمسية ويمكن التعبير عن خصائص الجهد-التيار (I-V) لهذا النموذج من خلال المعادلة (1) التالية:



الشكل 1 نموذج الصمام الثنائي الواحد للخلية الشمسية

$$(1) \quad I = I_{ph} - I_o \left( e^{\frac{q(V + IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

حيث أن الجدول 1 يوضح معنى المتغيرات للوح الشمسي

| الرمز    | المعنى                                                       |
|----------|--------------------------------------------------------------|
| I        | التيار الناتج من الخلية (الخروج)                             |
| V        | الجهد الخارج من الخلية                                       |
| $I_{ph}$ | التيار الضوئي الناتج من الضوء (يتأثر بالإشعاع ودرجة الحرارة) |
| $I_0$    | تيار الإشباع العكسي للصمام الثنائي                           |
| $R_s$    | المقاومة المتسلسلة داخل الخلية                               |
| $R_{sh}$ | المقاومة المتوازية داخل الخلية                               |
| n        | معامل المثالية (عادةً بين 1 و 2)                             |
| $V_t$    | الجهد الحراري                                                |

#### 4- تقنيات التحكم في MPPT – تعقب نقطة القدرة القصوى

تقنية تتبع نقطة القدرة العظمى (Maximum Power Point Tracking - MPPT) تهدف إلى استخلاص أكبر قدر ممكن من الطاقة الكهربائية من الألواح الشمسية، حتى عند تغير الظروف البيئية مثل:

- شدة الإشعاع الشمسي (Irradiance)
- درجة الحرارة (Temperature)

سبب الحاجة إلى: MPPT

العلاقة بين الجهد (V) والتيار (I) في الخلية الشمسية غير خطية، مما يعني أن القدرة ( $P = V \times I$ ) لا تكون ثابتة، بل يوجد نقطة معينة على منحنى (I-V) تمثل أقصى قدرة يمكن للألواح إنتاجها. هذه النقطة تُسمى نقطة القدرة القصوى (Maximum Power Point - MPP)، وتتغير باستمرار مع تغير الإشعاع ودرجة الحرارة [6]. طريقة العمل:

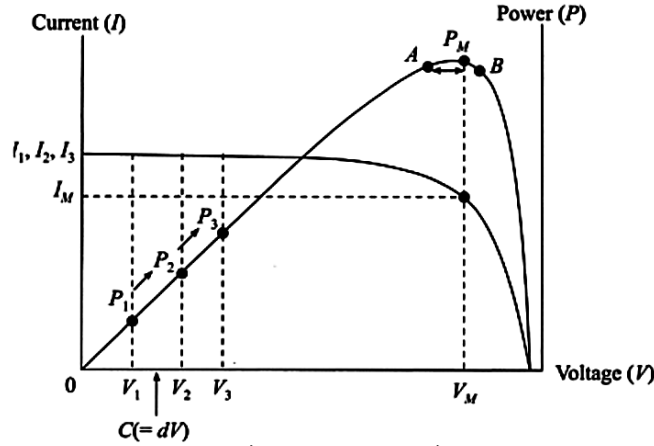
كما هو موضح الشكل 2، يقوم متحكم الـ MPPT بضبط جهد الدخل للعاكس أو المحول (DC-DC converter) باستمرار حتى يجعل النظام يعمل عند نقطة القدرة القصوى.

طريقة "الاضطراب والمراقبة: (Perturb & Observe - P&O) "

وهي من أكثر خوارزميات MPPT شيوعاً وبساطة في التطبيق.

خطواتها الأساسية:

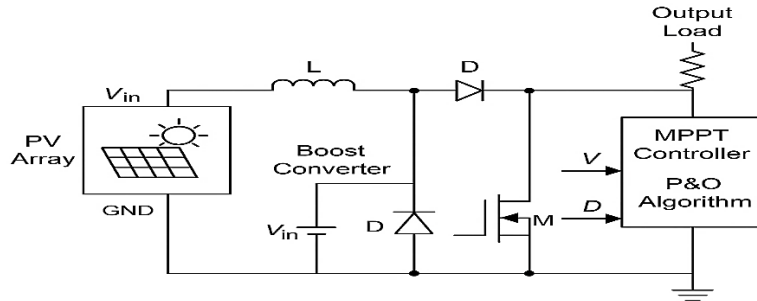
1. يقوم المتحكم بتغيير الجهد (Perturb) قليلاً بمقدار معين.
2. يقيس القدرة الناتجة الجديدة.
3. إذا زادت القدرة → يستمر في نفس اتجاه التغيير.
4. إذا قلت القدرة → يعكس الاتجاه يقلل الجهد أو يزيده في الاتجاه المعاكس
5. تكرر هذه العملية بشكل دوري حتى يتم تتبع النقطة العظمى.



الشكل 2. طريقة اضطراب ومراقبة القدرة القصوى

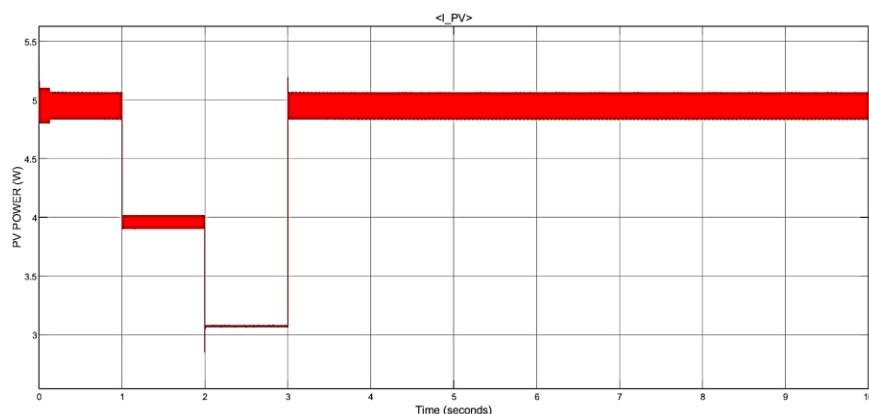
### 5. النتائج والمحاكاة

تم تنفيذ نموذج محاكاة دقيق لنظام تعقب نقطة القدرة القصوى (MPPT) باستخدام بيئة محاكاة MATLAB/Simulink بهدف تقييم أداء النظام تحت ظروف تشغيل مختلفة من حيث الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة. وقد تم اعتماد خوارزمية التحكم من نوع "الاضطراب والمراقبة" (Perturb and Observe) لسهولة تطبيقها وفعاليتها في التعقب الديناميكي لنقطة القدرة العظمى كما موضح في الشكل 3.



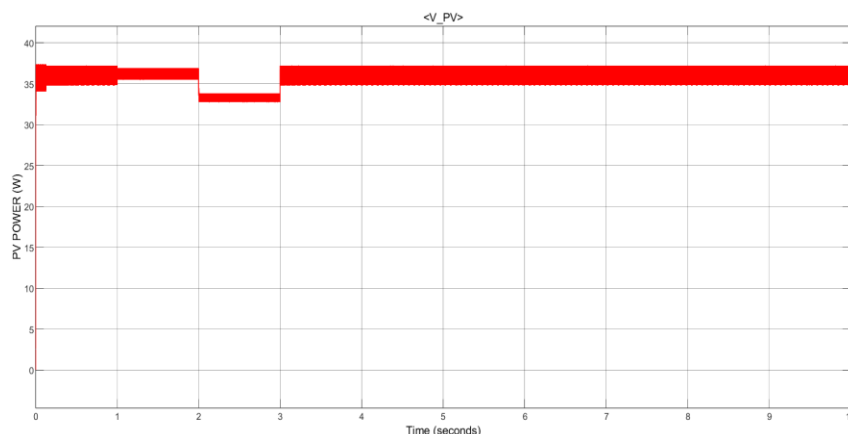
الشكل 3. نموذج النظام مع MPPT

يوضح الشكل 4. تغير التيار الخارج من اللوح الشمسي مع الزمن أثناء عمل خوارزمية MPPT في اللحظات الأولى (من 0 إلى حوالي 2.5 ثانية)، يلاحظ وجود تذبذب في التيار نتيجة لآلية عمل خوارزمية P&O، حيث تقوم الخوارزمية بتعديل نقطة التشغيل تدريجياً للوصول إلى التيار الموافق لأقصى قدرة ممكنة. بعد هذه الفترة، يبدأ التيار في الاستقرار تدريجياً مع استقرار الخوارزمية على نقطة التشغيل المثلى. التغيرات المفاجئة في التيار قد تكون ناتجة عن تغير ظروف الإشعاع الشمسي أو تأثير الحمل.



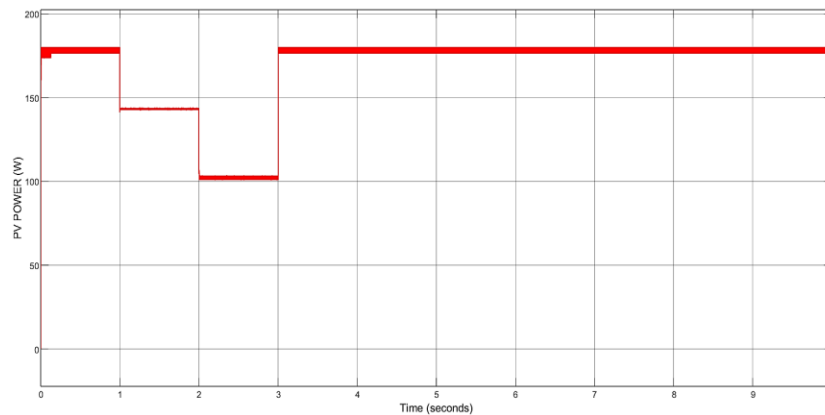
الشكل 4. تيار الخرج من النظام الكهروضوئي

يبين الشكل 5 استجابة جهد الخرج للوح الشمسي أثناء تطبيق خوارزمية تتبع نقطة القدرة العظمى. في البداية، يظهر تذبذب بسيط في الجهد نتيجة التعديلات المستمرة التي تجريها الخوارزمية لاكتشاف اتجاه التغير في القدرة. وعند اقتراب النظام من نقطة التشغيل المثلى، يستقر الجهد تدريجياً. الانخفاض والارتفاع الطفيفان في الجهد عند لحظات معينة يعكسان سلوك الخوارزمية عند حدوث تغيرات مفترضة في الإشعاع الشمسي أو الحمل، حيث تقوم بإعادة تعديل الجهد للحفاظ على أقصى قدرة ممكنة.



الشكل 5. جهد الخرج من النظام الكهروضوئي

يوضح الشكل 6 استجابة النظام الكهروضوئي لتغيرات فجائية في ظروف التشغيل (مثل شدة الإشعاع الشمسي أو درجة الحرارة)، والتي تمثل سيناريوهات ديناميكية واقعية. في المراحل الأولى من المحاكاة، تُسجل القدرة الخارجة مستويات متناقصة بشكل متتابع، وهو ما يعكس تأثير النظام بانخفاض الإشعاع أو تغير الحمل. ويظهر المنحنى قدرة الخوارزمية على تتبع نقطة القدرة العظمى (MPP) بفعالية، حيث تُلاحظ فترات استقرار واضحة بعد كل تغيير. عند حوالي الثانية 3، يطرأ تحسن في ظروف التشغيل، مما يؤدي إلى ارتفاع مفاجئ في القدرة الخارجة. وتستجيب خوارزمية P&O بسرعة وتُعيد ضبط نقطة التشغيل لتحقيق الاستفادة القصوى من القدرة المتاحة. يشير هذا السلوك إلى كفاءة الخوارزمية في تتبع القدرة العظمى بشكل لحظي، وقدرتها على التكيف مع الظروف المتغيرة بما يحقق الأداء الأمثل للنظام الكهروضوئي.



الشكل 6. القدرة الخارجة من النظام الكهروضوئي

## 6- الخلاصة (conclusion)

تشير النتائج المستخلصة من تحليل منحنيات القدرة، الجهد، والتيار الخارجة من النظام الكهروضوئي إلى أن خوارزمية Perturb and Observe (P&O) تُظهر أداءً مقبولاً في تتبع نقطة القدرة العظمى (MPP) ضمن ظروف تشغيل متغيرة. حيث أظهرت الخوارزمية قدرة على الاستجابة للتغيرات المفاجئة في الإشعاع الشمسي، مع إعادة ضبط نقطة التشغيل للوصول إلى أقصى قدرة ممكنة. وعلى الرغم من بعض التذبذبات الأولية، إلا أن النظام يستقر في فترات قصيرة، مما يدل على فعالية الخوارزمية في بيئات ديناميكية. وعليه، يمكن اعتبار خوارزمية P&O مناسبة للتطبيقات التي لا تتطلب دقة عالية جداً أو استجابة فورية، لكنها تظل خياراً بسيطاً وفعالاً من حيث التعقيد الحسابي وسهولة التنفيذ.

## المصادر والمراجع:

- [1] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, et A. Lázaro, « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, n° 11, p. 1555-1578, juill. 2006, doi: 10.1016/j.solmat.2005.10.023.
- [2] B. Subudhi et R. Pradhan, « A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems », *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, n° 1, p. 89-98, janv. 2013, doi: 10.1109/TSTE.2012.2202294.
- [3] W. I. Hameed *et al.*, « Prediction of Solar Irradiance Based on Artificial Neural Networks », *Inventions*, vol. 4, n° 3, p. 45, août 2019, doi: 10.3390/inventions4030045.
- [4] K. Ishaque et Z. Salam, « A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, p. 475-488, mars 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.032.
- [5] W. I. Hameed, A. L. Saleh, B. A. Sawadi, Y. I. A. Al-Yasir, et R. A. Abd-Alhameed, « Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System by Using Fuzzy Neural Network », *Inventions*, vol. 4, n° 3, p. 33, juin 2019, doi: 10.3390/inventions4030033.

- [6] T. Eswam et P. L. Chapman, « Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques », *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, n° 2, p. 439-449, juin 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
- [7] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, et M. Vitelli, « Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, n° 4, p. 963-973, juill. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.850975.
- [8] D. P. Hohm et M. E. Ropp, « Comparative study of maximum power point tracking algorithms », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 11, n° 1, p. 47-62, janv. 2003, doi: 10.1002/pip.459.