

## نمذجة وتحليل أداء نظام طاقة شمسي مستقل باستخدام MatLab مع تتبع نقطة الاستطاعة العظمى

\* الدكتور مخائيل سليم مخول

\*\* الدكتور علي بديع خضور

\*\*\* جاسم يوسف

(تاريخ الإيداع 15 / 1 / 2017. قُبِلَ للنشر في 11 / 5 / 2017)

### □ ملخص □

إن محدودية مصادر الطاقة العالمية من الوقود الاحفوري والنووي، استوجب البحث المَلح عن مصادر طاقة بديلة. بما يحقق موازنة العرض والطلب دون اللجوء أو التخفيف قدر الإمكان من المولدات التي تعتمد على الغازات، والوقود الأحفوري. وتعتبر السلامة البيئية من الشروط الهامة لمصدر الطاقة، حيث أن الطلب المتزايد على مصادر الطاقة التقليدية جعل من الضروري تحسين تكلفة مصادر الطاقة غير التقليدية، والاعتماد على الطاقة الشمسية بوصفها مصدر للحصول على الطاقة الكهربائية.

يقدم البحث نموذجاً لنظام PV مع دراسة تأثير تغير شروط العمل (الإشعاع، درجة الحرارة)، وبعض العوامل (المقاومة التسلسلية  $R_s$ ، والتفرعية  $R_p$ ، وعامل المثالية  $A$ ) على مميزات  $(I-V)$  و  $(P-V)$ ، وتم وضع نموذج نظام الطاقة الكهروضوئي المستقل باستخدام MatLab، وللحصول على أعظم طاقة كهربائية يمكن توليدها من النظام الشمسي طورت عدة تقنيات لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى واستخدمت في هذا البحث خوارزمية P&O بتقنية MPPT، وتم مقارنة الاستطاعة المولدة المقدمة للحمل مع وجود تقنية MPPT وبدون وجودها وحساب الزيادة في الكفاءة الناتجة من استخدام هذه التقنية.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة البديلة، نظام PV مستقل، ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT، خوارزمية P&O، الكفاءة.

\*أستاذ - قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سورية  
\*\*أستاذ مساعد - قسم تقانات الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سورية  
\*\*\*طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سورية

## Modeling and Performance Analysis of Stand-Alone Solar System Using a MATLAB with MPPT

Dr. Mikhael Salim Makhoul \*  
Dr. Ali Badeea Kaddour \*\*  
Jasem Yousef \*\*\*

(Received 15 / 1 / 2017. Accepted 11 / 5 / 2017)

### □ ABSTRACT □

The limitations of global resources of fossil and nuclear fuel, has necessitated an urgent search for alternative sources of energy. Therefore, a new way has to be found to balance the supply and demand without resorting to coal and gas fuelled generators. Environment safety has become very important for any energy system, Increasing demand of conventional sources has further increases the need and optimizes cost of non-conventional energy sources.

This paper has analyzed the development of a method for the mathematical modeling of PV System. behavior of the PV Array with series resistance model are studied in this paper. Included effects are: temperature dependence, solar radiation change, diode ideality factor and series resistance influence, and shows the mathematical modeling of stand-alone PV system and then compare with Analysis of Perturb and Observe MPPT and without MPPT simulation of photovoltaic modules with Matlab/Simulink, And Calculate the increase in efficiency resulting from the use of technology MPPT.

**Keywords:** Photovoltaic PV array, renewable Energy, Maximum Power Point Tracking MPPT, Perturb and Observe (P&O), stand-alone PV system, efficiency.

---

\*Professor Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.

\*\*Assistant Professor Department of Renewable Energies Technologies, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.

\*\*\*Postgraduate Student, Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.

## مقدمة:

تسارع العمل خلال العقود الأخيرة في تطوير مصادر الطاقة المتجددة لتكون مصادر واعدة في بناء اقتصاد طاقة مستدام وصادق للبيئة نظراً لعدة أسباب منها: الحاجة الماسة لتخفيض الانبعاثات الغازية، تزايد الطلب العالمي على الطاقة، التزايد الحاد في أسعار المشتقات النفطية، عدم استقرار مصادر التزود بالطاقة.

تعتبر الطاقة القادمة من الشمس إلى الأرض المصدر الأساسي لمعظم الطاقات على الأرض ويعتمد استغلال الطاقة الشمسية على وسيلة جمعها وعلى كمية الإشعاع الذي يصل إلى سطح الأرض في المنطقة المراد استغلال الطاقة الشمسية بها، وتعتمد قيمة الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الأرض على مقدار ما يعكس ويتشتت ويمتص منه أثناء مساره خلال الغلاف الجوي.

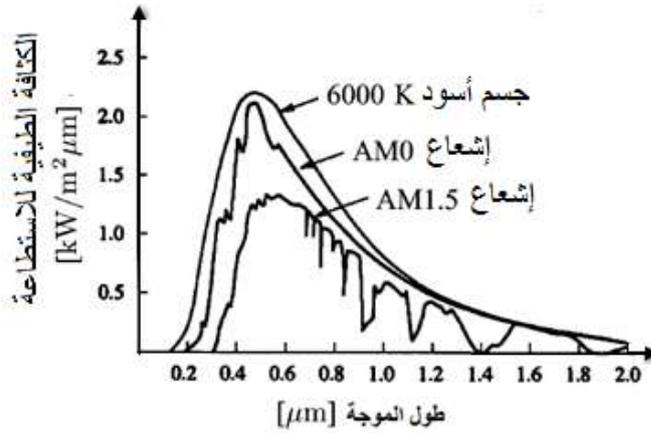
ينقسم الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى وحدة المساحات على سطح الأرض إلى قسمين، الأول: الإشعاع الشمسي المباشر وهو ما يبقى من الشعاع الشمسي بعد نفاذه من الغلاف الجوي ووصوله إلى سطح الأرض، الثاني: هو ما يصل إلى سطح الأرض من الإشعاع الشمسي الذي تشتت أو انعكس عند اصطدامه بجزيئات الهواء وبخار الماء وأي غبار جوي صلب أو سائل يحمله الهواء، ويسمى هذا الإشعاع بالإشعاع المنتثر، ويسمى مجموع الإشعاع المباشر والمنتثر بالإشعاع الكلي.

يتسم استثمار الطاقة الشمسية بخصائص إيجابية ، طاقة لا تنضب، جديدة متجددة، صديقة للبيئة ، وتمتاز بسهولة الحصول عليها بعكس مصادر الطاقة التقليدية.

تعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقات المتجددة التي يمكن الاستفادة منها و المتوفرة في جميع مناطق العالم إذ تزيد قيمة الطاقة الشمسية الواردة إلى الأرض سنوياً آلاف المرات عن حاجة جميع سكانها، و قيمتها تقدر بحدود  $15 \times 79510$  kWh [1]، وهذه القيمة تساوي 8500 ضعف من الطاقة الكلية المطلوب توليدها في يومنا هذا. وتعتبر الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة الأولية في العالم عموماً ومنها سورية، فهناك أكثر من 300 يوم مشمس على الأقل في سورية، ويبلغ عدد ساعات سطوع الشمس 2820 إلى 3270 ساعة في السنة [2]، وهي من المعدلات المرتفعة عالمياً.

وبالأخذ بالاعتبار مردود الخلايا الشمسية المتوفرة تجارياً و الذي يصل للحدود ( [3] 17%)، وذلك بحسب نوع الخلايا وتقنية تصنيعها، نجد أن تخصيص جزء صغير من مساحة الكرة الأرضية لغرض إنشاء محطات توليد كهروشمسية لتأمين الطاقة الكهربائية اللازمة لسكان الأرض يكفي لذلك.

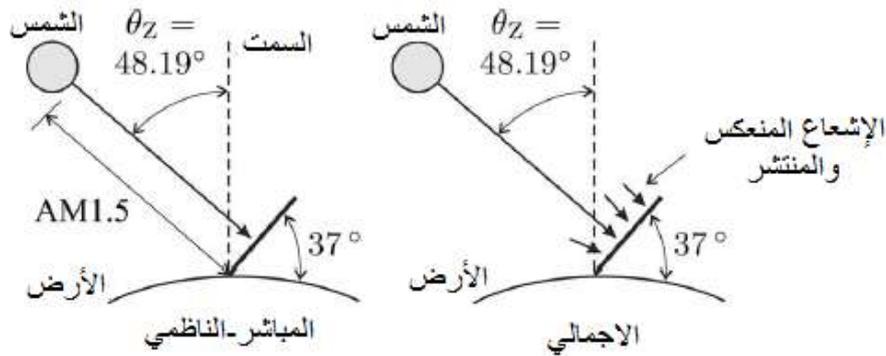
إن كفاءة نظام PV يعتمد على التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي، إن الشمس كمصدر للضوء بطيف إشعاعي يشبه طيف جسم أسود قرب 6000K، يمتص ويبعث إشعاعاً كهرومغناطيسياً بكل الأطوال الموجية. والتوزيع النظري لأطوال موجة إشعاع الجسم الأسود يوصف رياضياً بقانون بلانك، الذي يحدد علاقة وترابط طول الموجة (أو التردد)، درجة الحرارة والتوزيع الطيفي لهذا الجسم. يبين الشكل (1)، التوزيع الطيفي لإشعاع الجسم الأسود مقارنة مع الإشعاعات الشمسي في الفضاء الخارجي وعلى الأرض [4].



الشكل (1) التوزيع الطيفي لإشعاع الجسم الأسود، وإشعاع الشمس في الفضاء الخارجي (AM0)، وعلى سطح الأرض (AM1.5).

إن دراسة تأثير الإشعاع الشمسي على نظام PV-System ليس بالأمر السهل لأن طيف ضوء الشمس على سطح الأرض يتأثر بعدة عوامل مثل التغيرات في درجة الحرارة على قرص الشمس وتأثير الغلاف الجوي [5]، في الفضاء الخارجي، ووفقاً لمتوسط المسافة بين الشمس والأرض، طاقة الإشعاع الشمسي حوالي  $1.353 \text{ kW/m}^2$ ، والإشعاع الشمسي على سطح الأرض حوالي  $1 \text{ kW/m}^2$  (هذه القيمة مرجعية فقط، وصافي الإشعاع على سطح الأرض يعتمد على عوامل كثيرة).

يتم تقييم وحدات PV بشكل عام بالاعتماد على توزيع طيف الإشعاع القياسي. الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (American Society for Testing and Materials, ASTM) تعرف اثنين من التوزيعات الطيفية الأرضية القياسية [6]، المباشر-الناظمي والإجمالي. كما في الشكل (2).



الشكل (2) رسم توضيحي لمسار (AM1.5)، الإشعاعات المباشرة-الناظمية، والإجمالية الساقطة على سطح مواجه للشمس بميل  $37^\circ$ .

المعيار المباشر-الناظمي يتوافق مع الإشعاع الساقط والذي يصل بشكل عمودي على السطح المواجه للشمس مباشرة. المعيار العالمي أو الإجمالي يتوافق مع طيف من الإشعاعات المباشرة والمنتشرة، يتم تحديد معيار (AM1.5) لوحدة PV التي تميل بزاوية  $37^\circ$  والمواجهة لأشعة الشمس.

إن كثافة الهواء (air mass, AM) الموجود بين سطح الأرض والشمس تؤثر على توزيع الطيف وشدة الإشعاع الشمسي [7]. يشير AMx إلى طول مسار الأشعة الشمسية من خلال الغلاف الجوي.

$$x = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (1)$$

حيث:  $\theta_z$  الزاوية بين أشعة الشمس والناظم على سطح الأرض.

أبزر قيمة لـ  $x$  تتوافق أو تتعلق مع أطول مسار لأشعة الشمس وأبزر كثافة للهواء بين الشمس وسطح PV الموجودة على الأرض، ووجد أن القيمة القياسية هي 1.5 متوافقة مع الإشعاع الشمسي بزاوية  $\theta_z = 48.19^\circ$ .

$$x = \frac{1}{\cos 48.19} = 1.5$$

توزع كثافة الطيف والإشعاع الشمسي يعتمد على الموقع الجغرافي والوقت وأيام السنة، والظروف المناخية، وتكوين الغلاف الجوي، والارتفاع، وعوامل أخرى متعددة.

ويستخدم توزيع (AM1.5) القياسي الذي هو متوسط التقديرات التي تستخدم كمرجع لدراسة توزيع وكثافة الإشعاع الشمسي وتأثيره على وحدة PV. ويستخدم كمييار في تصنيع وحدات PV الصناعية، وإن شروط الاختبار القياسية وفق ASTM تعطي بشكل قياسي الإشعاع الشمسي عند توزيع AM1.5 مقدار  $1000 \text{ W/m}^2$  عند درجة حرارة  $T=25^\circ\text{C}$  [8].

تعتبر اللواقط الكهروضوئية أحد أشكال المصادر اللاخطية، وإن العمل عند نقطة تشغيل مغلوطة يؤدي إلى ضياع في الاستطاعة المتوافرة، ولتلافي هذه الظاهرة درست أنظمة تحكم وظيفتها ملاحقة نقطة العمل التي يعطي عندها النظام الكهروضوئي أعظم استطاعة متاحة. تواجه الطاقة الشمسية مشكلتين رئيسيتين من الناحية التقنية: الأولى: انخفاض مردود تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية و الذي يصل لحدود (17%). الثانية: تغيير الطاقة الكهربائية المولدة من اللواقط الكهروضوئية بتغيير الظروف المناخية المحيطة، (الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة).

### أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في أنه يبين أثر البارامترات المختلفة من درجة حرارة وإشعاع شمسي، وكذلك أثر المقاومة التسلسلية والتفرعية وعامل مثالية الديود، على منحنيات الأداء ( $I-V$ ) و ( $P-V$ ) لوحدة PV. ويتناول البحث أهمية ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT) في نظم الطاقة الشمسية، لتحسين أدائها وثوقيتها، وزيادة كفاءتها، حيث يقدم البحث نموذج لنظام كهروضوئي بملاحقة لنقطة الاستطاعة العظمى باستخدام خوارزمية P&O، مع مبدل رافع للجهد DC/DC Boost Converter.

تم الاهتمام في هذا البحث بوضع نموذج حاسوبي باستخدام MatLab يساعد ببساطة على تمثيل وحدة PV ودراسة تأثير شدة الإشعاع ودرجة الحرارة والمقاومة التسلسلية وبارامترات أخرى على منحنيات أدائها، وكذلك استخدام مبدل رافع للجهد DC-DC مع ملاحقة لنقطة الاستطاعة العظمى، وحساب الزيادة في كفاءة نظام الطاقة الشمسي الناتجة من استخدام تقنية (MPPT).

## طرائق البحث ومواده:

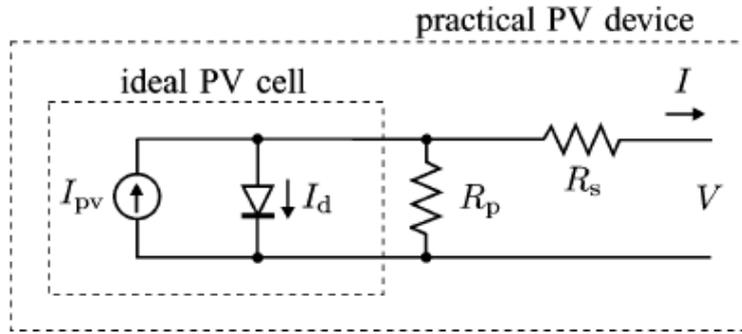
يقوم البحث على وضع نموذج رياضي وحاسوبي لنظام طاقة كهروضوئي، باستخدام الحزمة البرمجية MatLab ودراسة تأثير بعض البارامترات على منحنيات خواص اللاقط الشمسي، وكذلك وضع نموذج للنظام مع المبدل DC/DC Boost Converter المتحكم به باستخدام خوارزمية تتبع نقطة الاستطاعة العظمى P&O، وحساب زيادة كفاءة النظام الشمسي عند تتبع نقطة الاستطاعة العظمى.

## نمذجة وحدة PV:

## a - خلية PV المثالية Ideal PV Cell:

يبين الشكل (3) الدارة المكافئة لخلية PV المثالية، وكما هو معلوم من دراسة أنصاف النواقل فإن المعادلة الأساسية التي تصف رياضياً خصائص (I-V) لخلية PV تعطى على الشكل التالي:

$$I = I_{PV,cell} - I_{s,cell} \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{aKT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$



الشكل (3) الدارة المكافئة لخلية PV المثالية والعملية بإضافة المقاومة التسلسلية والتفرعية.

حيث:  $I_{PV,cell}$ : تيار الخلية المولد التابع للضوء (يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي).

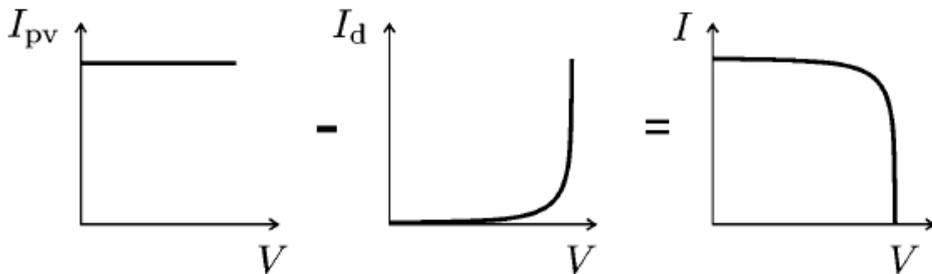
$I_d$ : معادلة تيار ديود شوتكي  $I_d = I_{0,cell} \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{A \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right]$ .

$I_{s,cell}$ : تيار الإشباع العكسي أو تيار التسريب العكسي للديود.

$q$ : شحنة الإلكترون  $(1.6021 \cdot 10^{-19} \text{C})$ .  $K$ : ثابت بولتزمان  $(1.3806 \cdot 10^{-23} \text{J/k})$ .

$T$ : درجة حرارة وصلة p-n وتقاس بالكلفن (K).  $A$ : عامل مثالية الديود.

إن منحنيات خواص (I-V) الناتجة عن المعادلة (2) تكون كما هو مبين في الشكل (4):



الشكل (3) منحنيات خواص (I-V) لخلية PV النظرية.

**b نمذجة مصفوفة PV:**

المعادلة الأساسية (2) لخلية PV الأولية لا تمثل خصائص (I-V) لمصفوفة PV العملية. والمصفوفات العملية تتكون من عدة خلايا PV المتصلة مع بعضها على التسلسل وعلى التفرع أو بشكل مختلط، لذلك لمعرفة خصائص (I-V) لمصفوفة PV يجب إدراج وتضمين بارامترات إضافية إلى المعادلة الأساسية [9].

$$I = I_{PV} - I_S \left[ \exp \left( \frac{V + R_S \cdot I}{A \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S \cdot I}{R_P} \quad (3)$$

حيث:  $I_{PV}$ : تيار المصفوفة المولد التابع للضوء.

$I_S$ : تيار الإشباع العكسي أو تيار التسريب العكسي.

$V_t = \frac{N_S \cdot K \cdot T}{q}$ : جهد التماس الحراري للمصفوفة،  $N_S$ : الخلايا المتصلة على التسلسل.

$R_S$ : المقاومة المكافئة التسلسلية للمصفوفة.  $R_P$ : المقاومة المكافئة التفرعية للمصفوفة.

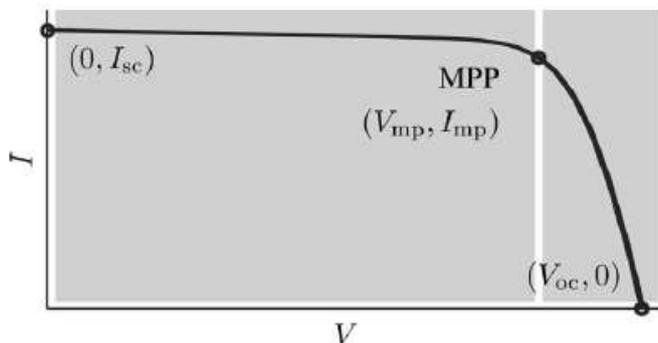
للخلايا المتصلة على التفرع تزيد التيار، والخلايا المتصلة على التسلسل تعطي جهود خرج أكبر.

إذا كانت المصفوفة مكونة من  $N_P$  خلية متصلة على التفرع يعبر عن تيار الإشباع  $I_{PV} = I_{PV,cell} \cdot N_P$

وتيار الإشباع العكسي  $I_S = I_{S,cell} \cdot N_P$ .

يوضح الشكل (4) منحنيات الخواص (I-V) للخلية العملية، مع ملاحظة ثلاث نقاط:  $(0, I_{sc})$  تيار الدارة

القصيرة (تيار القصر)،  $(V_{oc}, 0)$  جهد الدارة المفتوحة، ونقطة الاستطاعة العظمى  $(V_{mp}, I_{mp})$ .



الشكل (4) منحنيات خواص (I-V) لخلية PV العملية.

تصف المعادلة (3) نموذجاً للديود واحد المبين بالشكل (3)، وقد تم اقتراح نماذج أخرى تعطي دقة أكبر، ففي

[11, 10] تم إضافة ديود يستخدم لتمثيل تأثير الالتحام أو إعادة تركيب حاملات الشحن. وفي [13] نموذج ثلاثي

الديود ليشمل تمثيل التأثيرات الغير موجودة في النماذج السابقة. من أجل التبسيط سيدرس في هذا البحث النموذج وحيد

الديود، حيث يقدم هذا النموذج حلاً وسطاً بين البساطة والدقة [14].

بساطة النموذج بديود واحد المستخدم في هذا البحث يجعل منه نموذجاً مثالياً لمصممي الكترونييات القدرة الذين

يبحثون عن نموذج سهل وفعال لمحاكاة وحدات PV مع مبدلات القدرة.

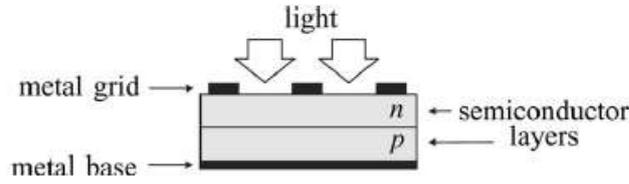
الشركات المصنعة لوحات PV توفر عدد قليل من البيانات التجريبية حول الخصائص الكهربائية والحرارية

للاقط الشمسي بدل من إعطاء معادلة خواص (I-V)، حيث لا يتم إعطاء بعض البارامترات المطلوبة لضبط نموذج

مصفوفة PV، فمثلاً لا يعطى الضوء الذي يبدأ عنده التوليد الكهربائي، وكذلك تيار  $I_{PV}$ ، والمقاومة التسلسلية

والتفرعية، وأيضاً عامل مثالية الديود، وتيار الإشباع العكسي (التسريب) للديود، وكذلك الثغرة الطاقية لأنصاف النواقل. حيث يتم إعطاء المعلومات الأساسية التالية للاقط الشمسي:

- 1- جهد الدارة المفتوحة الاسمي  $(V_{OC,n})$ ، 2- تيار الدارة القصيرة الاسمي  $(I_{SC,n})$ ، 3- الجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى  $(V_{mp})$ ، 4- التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى  $(I_{mp})$ . 5- معامل جهد الدارة المفتوحة على درجة الحرارة  $(K_V)$  واحدته  $(V/^\circ C)$ . 6- معامل تيار القصر على درجة الحرارة  $(K_I)$  واحدته  $(A/^\circ C)$ . 7- الاستطاعة العظمى الفعلية لخرج اللوح  $(P_{ma,e})$ . هذه المعلومات تعطى عند الشروط الاسمية أو القياسية كما ذكرنا سابقاً وفق standard test conditions (STCs) لدرجة الحرارة وشدة الإشعاع الشمسي. بعض المصنعين يعطي منحنيات  $(I-V)$ ، لأجل عدة حالات اشعاع ودرجة الحرارة، هذه المنحنيات تجعل من الاسهل ضبط والتحقق من صحة معادلة  $(I-V)$ .



إن منحنيات خواص  $(I-V)$  لمصفوفة PV تعتمد على الخصائص الداخلية  $(R_S, R_P)$ ، والتأثيرات الخارجية مثل مستوي الإشعاع ودرجة الحرارة، حيث تتعلق المقاومة التسلسلية  $R_S$  بشكل أساسي بمقاومة اتصال القاعدة المعدنية مع الطبقة النصف ناقلة  $P$  ومقاومة بنية وصلة  $(p,n)$ ، والمقاومة  $R_P$  هي مقاومة تيار تسريب وصلة  $(p,n)$ ، وتعتمد على طريق تصنيع خلية PV، إن كمية الضوء الساقط على مصفوفة PV تؤثر بشكل مباشر على توليد حوامل الشحن وبالتالي على التيار المولد منها.

إن التيار الضوئي  $I_{PV}$  المولد يتعلق بشكل خطي بالإشعاع الشمسي ويتأثر بالحرارة ويعطى بالعلاقة التالية:

$$I_{PV} = (I_{PV,n} + K_I(T_C - T_{ref})) \cdot \frac{G}{G_n} \quad (4)$$

حيث إن:  $I_{PV,n}$ : التيار الضوئي المولد الاسمي عند شروط اسمية  $(25^\circ C, 1000 W/m^2)$ .

$G$ : شدة الإشعاع الشمسي عند سطح اللاقط الشمسي  $(W/m^2)$ .

$G_n$ : شدة الإشعاع الشمسي الاسمي  $(1000 W/m^2)$ .

$T_{ref}$ : درجة الحرارة المرجعية القياسية وتقدر بـ  $(K)$ .

$T_C$ : درجة الحرارة المقاسة عند سطح اللاقط الشمسي وتقدر بـ  $(K)$ .

وعند شروط القياس الاسمية يكون  $I_{PV} \approx I_{SC}$  وتستخدم في نمذجة مصفوفة PV لأن مقاومة خلية PV

التسلسلية منخفضة، والتفرعية عالية.

تيار الإشعاع للديود يعطى بالعلاقة التالية [15]:

$$I_S = I_{rs} \left( \frac{T_C}{T_{ref}} \right)^3 \left[ \exp\left( \frac{q \cdot E_g}{K \cdot A} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_C} \right) \right) \right] \quad (5)$$

حيث إن:  $E_g$ : الثغرة الطاقية لأنصاف النواقل  $(E_g = 1.12 \text{ eV for Si at } 25^\circ C)$  [16]

$I_{rs}$ : تيار الإشعاع العكسي للديود ويعطى بالعلاقة التالية:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{OC}}{N_S \cdot K \cdot A \cdot T_C}\right) - 1 \right]} \quad (6)$$

حيث إن:  $V_{OC}$ : جهد الدارة المفتوحة للوح الشمسي.  $N_S$ : عدد الخلايا المتصلة على التسلسل في اللوح الشمسي.

$I_{sc}$ : تيار الدارة القصيرة للوح الشمسي.

$A$ : يعبر عن الطرق المختلفة لحركة حاملات الشحن ويأخذ عادة قيم  $1 \leq A \leq 1.5$  [14].

بالتالي التيار الناتج عن اللوح الشمسي يعطى بالعلاقة التالية:

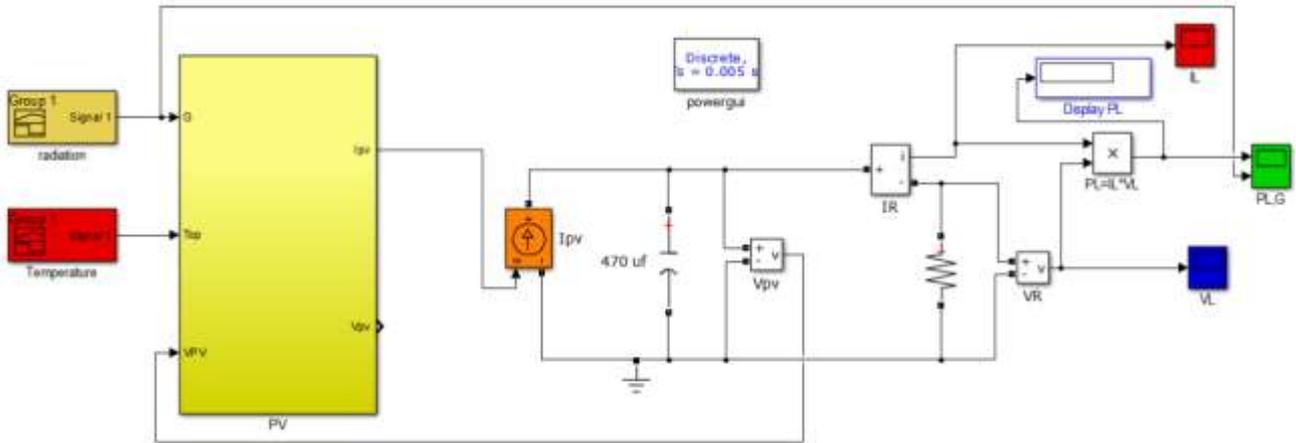
$$I = N_P \cdot I_{PV} - N_P \cdot I_S \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V + R_S \cdot I)}{N_S \cdot A \cdot K \cdot T_C}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_S \cdot I}{R_P} \quad (7)$$

حيث:  $N_P$ : عدد الخلايا التفرعية في اللوح الشمسي.

المواصفات الكهربائية للوح الشمسي SL 100-36M عند  $25^\circ\text{C}$  and  $1000\text{W/m}^2$ :

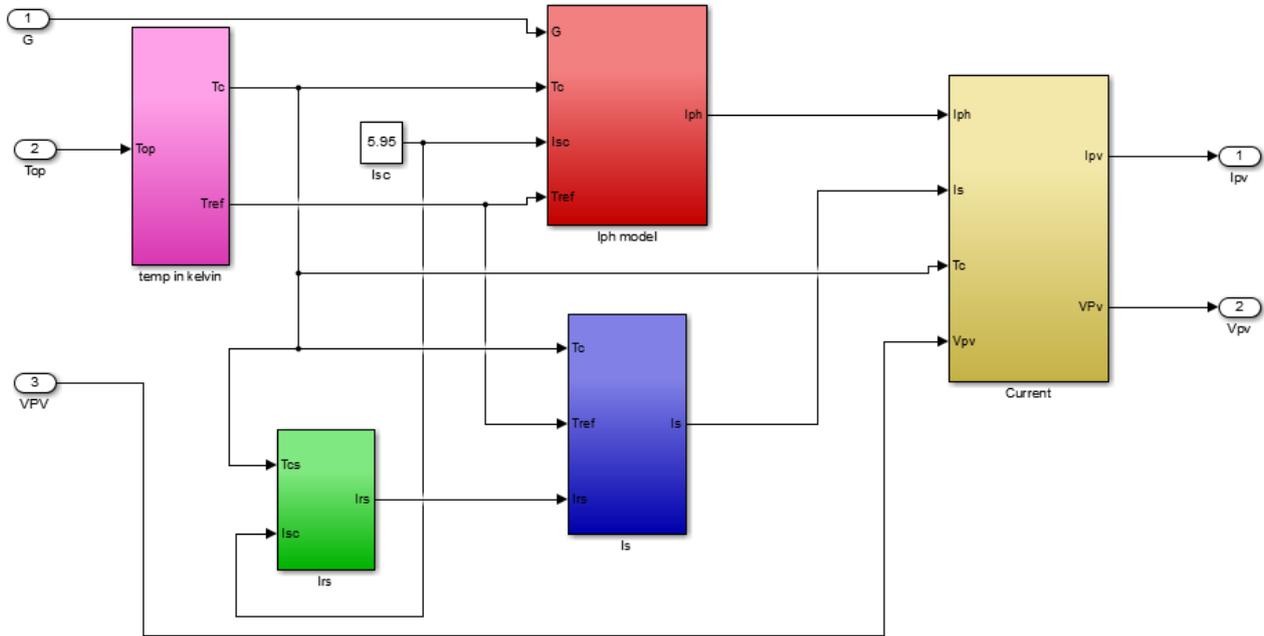
100 W	الاستطاعة الاسمية $P_{max}$
22.86 V	جهد الدارة المفتوحة $V_{OS}$
5.95 A	تيار الدارة القصيرة $I_{sc}$
18.5 V	الجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى $V_{mpp}$
5.4 A	التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى $I_{mpp}$
36	عدد الخلايا المتصلة على التسلسل $N_S$
1	عدد الخلايا المتصلة على التفرع $N_P$

نموذج اللوح الشمسي مع الحمل  $R_L = 15\Omega$  المنفذ من خلال برنامج MatLab:



الشكل (5) مخطط نموذج لنظام طاقة شمسي.

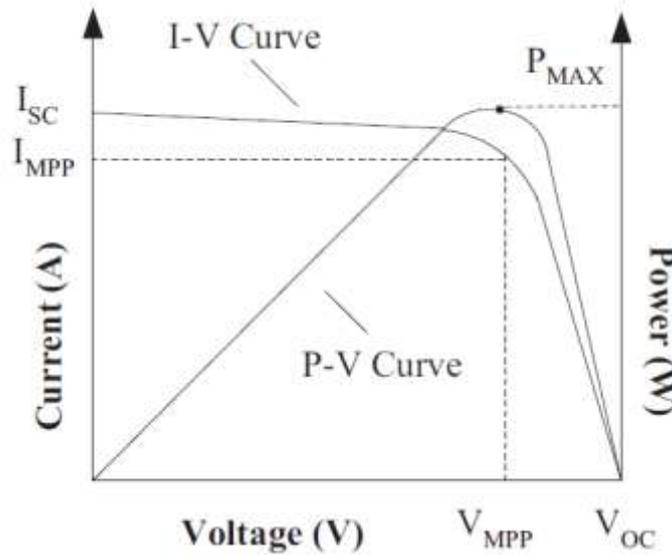
الشكل (6) يوضح النموذج الفرعي للوح الشمسي PV المنفذ من خلال برنامج MatLab:



الشكل (6) مخطط النموذج الفرعي للوح الشمسي.

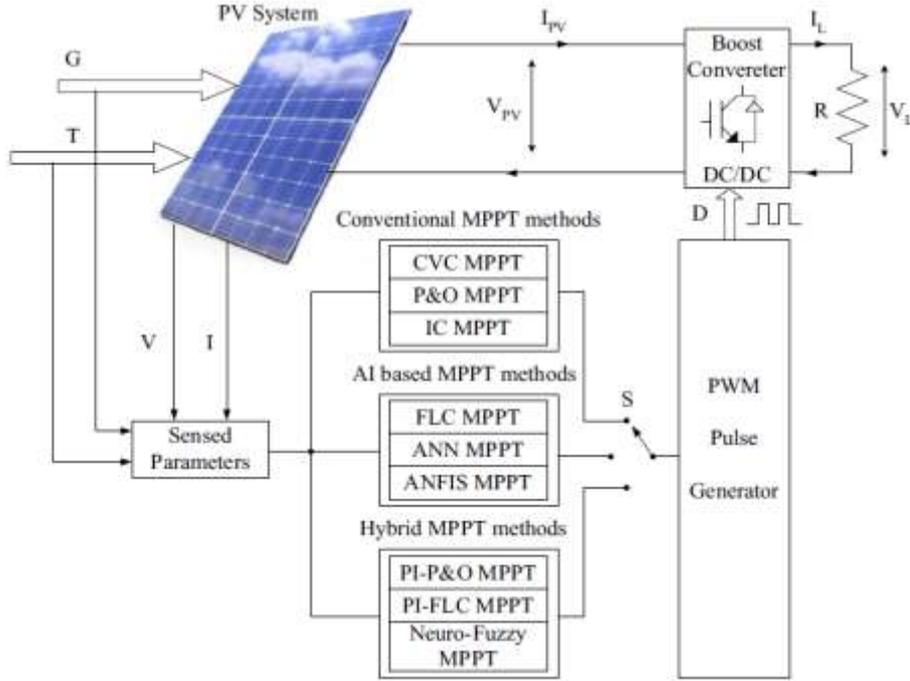
c- نمذجة النظام مع مبدل DC/DC Boost Converter المستخدم لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى:

نقطة الاستطاعة العظمى Maximum power point تعرف من خلال منحنى التيار-جهد، ومن خلال منحنى جهد-استطاعة للخلية الكهروضوئية، حيث تمثل هذه النقطة أعظم استطاعة يمكن الحصول عليها من اللاقط الكهروضوئي PV array، يبين الشكل (7) منحنيات خواص (I-V) و (P-V) لخلية كهروضوئية ونقطة الاستطاعة العظمى.



الشكل (7) منحنيات خواص الخلية الكهروضوئية.

يمكن الحصول على نقطة الاستطاعة العظمى عن طريق تغيير نقطة التشغيل للنظام الكهروضوئي ككل، ولتحقيق هذا الهدف ظهرت عدة تقنيات تعتمد على نقل نقطة العمل للاقط الشمسي إلى نقطة الاستطاعة العظمى وعرفت هذه التقنيات بتقنيات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT) Maximum power point tracking، يبين الشكل (8) مخطط أغلب التقنيات المستخدمة في MPPT.

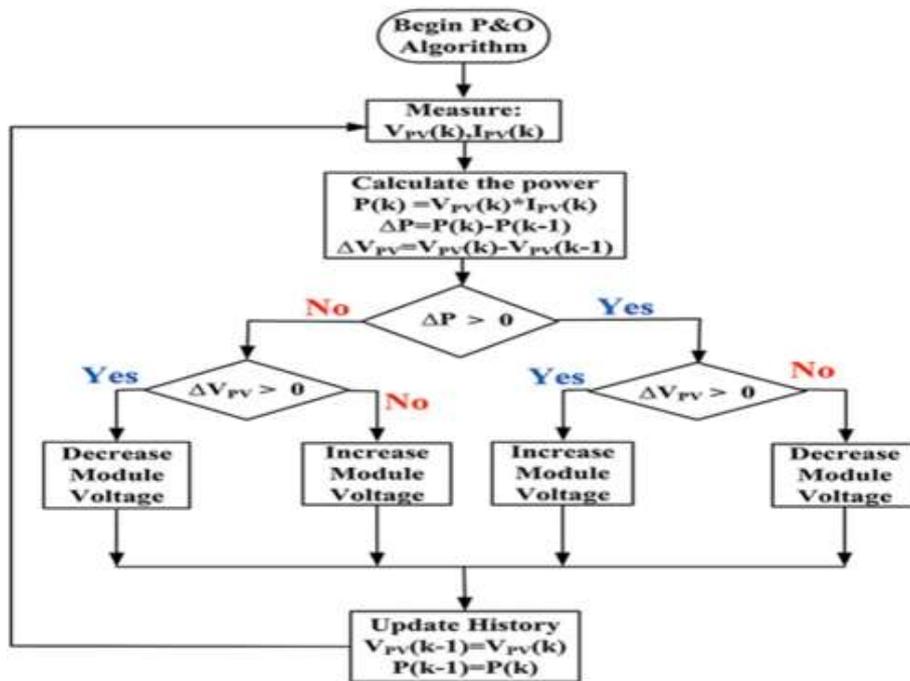


الشكل (8) مخطط الطرق المتبعة في mppt.

تعتمد تقنيات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى على التبديل بقيم الجهد المستمر (DC to DC [3]) ، بهدف الوصول إلى النقطة المثلى على منحنى (I-V) بحيث نوصل أكبر استطاعة للحمل الذي قد يكون مدخرات، شبكة عامة، محركاً مستمراً، مضخة أو حمل أومي. ولتحقيق ذلك يتم الاعتماد على مبدلات DC/DC Converter، التي لها الأنواع:

- 1- boost converters.
- 2- buck converters.
- 3- buck–boost converters
- 4- cuk converter.

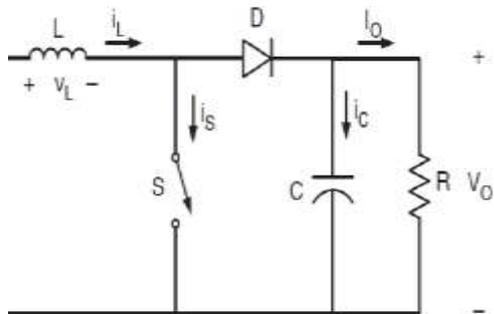
حيث يتم تغيير عامل الدور (D) بتقنية MPPT الذي يتحكم بعمل المفتاح الإلكتروني (IGBT) للمبدل عن طريق خوارزمية (P&O)، للحفاظ على نقطة العمل عند نقطة الاستطاعة العظمى. في هذا البحث سيتم استخدام مبدل boost converters، وسيتم تغيير (D) باستخدام خوارزمية الاضطراب والمراقبة perturb and observe (P&O)، الممثلة بالمخطط التدفقي المبين بالشكل (9)، وعملياً يتم تحقيق تقنية MPPT بتحويل الخوارزمية (P&O) لبرنامج حاسوبي يمكن حقنه بمتحكم صغري يعطي إشارة نبضية بعامل دور (D) مناسب، تتحكم هذه الإشارة بعمل المفتاح الإلكتروني بدارة الشكل (10).



الشكل (9) المخطط التدفقي لخوارزمية P&O.

يبين الشكل (10) الدارة المكافئة لمبدل boost converters المستخدم لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى، مع

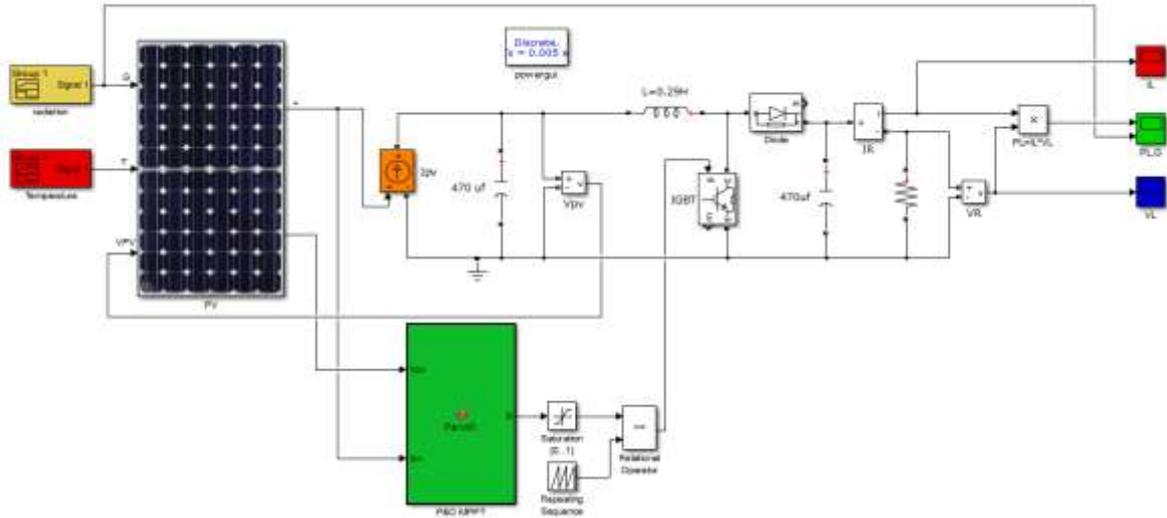
قيم عناصر الدارة في الجدول المجاور.



PV-Boost Link Capacitor	470 $\mu$ F
Boost -Load Link Capacitor	330 $\mu$ F
Standalone Load	15 $\Omega$
Inductor Value +(ESR)	290 mH
Controlled Power Switch	Power MOSFET
Switching Frequency	20 kHz

الشكل (10) الدارة المكافئة لمبدل boost converters المستخدم لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.

نموذج النظام الشمسي (اللاقط، المبدل، الحمل) المنفذ من خلال برنامج MatLab مع تقنية MPPT:

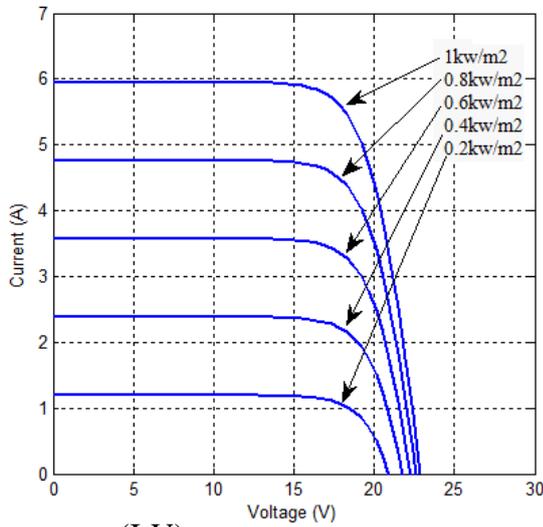


الشكل (11) مخطط نموذج نظام طاقة شمسي مع MPPT

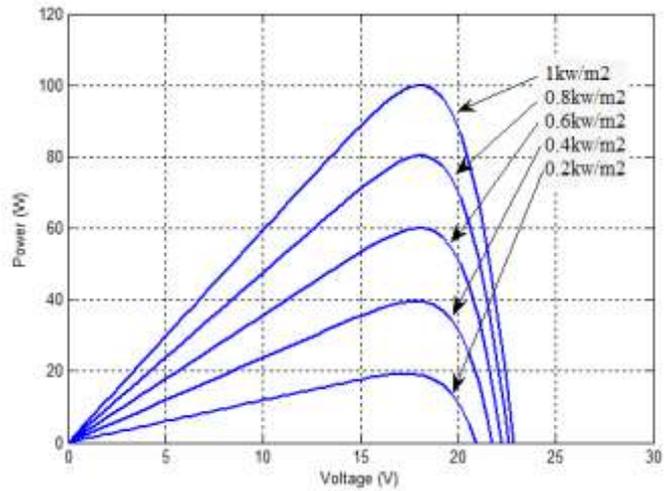
### النتائج والمناقشة:

1 - من خلال النموذج المصمم للوح الشمسي المبين في الشكل (6) تم دراسة التأثيرات المختلفة لتغير شدة الاشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، والمقاومة التسلسلية والتفرعية، وعامل مثالية الديود، على منحنيات خواص اللوح الشمسي.

يبين الشكل (12) و (13) منحنيات خواص (I-V) و (P-V) لوحدة PV عند تغير شدة الاشعاع الشمسي  $G, W/m^2$  ودرجة الحرارة  $T, ^\circ C$ .



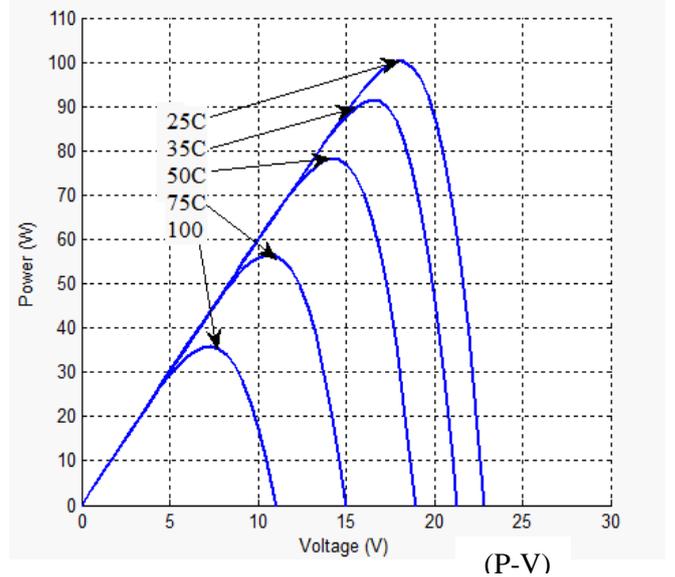
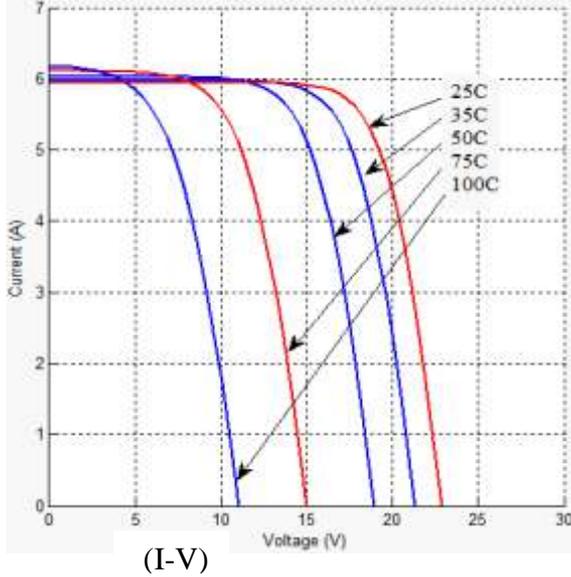
(I-V)



(P-V)

الشكل (12) منحنيات خواص (I-V) ، (P-V) للاقط الشمسي عند تغير شدة الاشعاع الشمسي  $G, w/m^2$ .

نلاحظ انخفاض تيار اللوح الشمسي بالتالي الاستطاعة بانخفاض شدة الإشعاع، مع تغير بسيط في جهد اللوح، بالتالي نستنتج أن جهد اللوح الشمسي لا يتأثر كثير بتغير شدة الإشعاع على العكس من التيار الذي ينخفض بقيمة كبيرة.

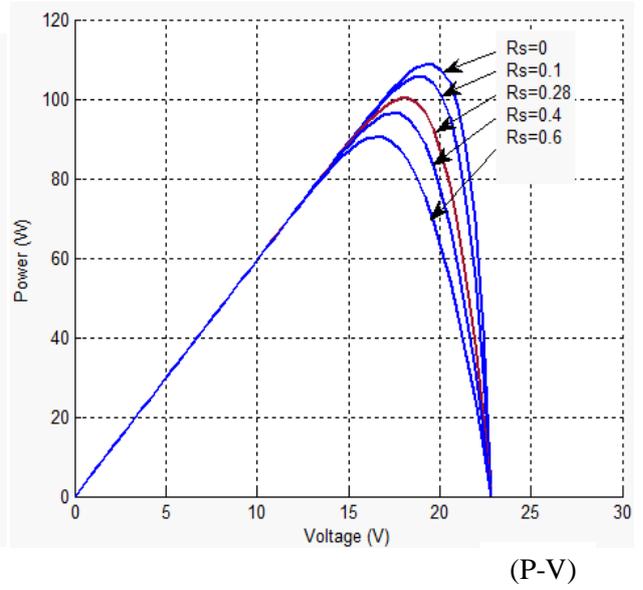
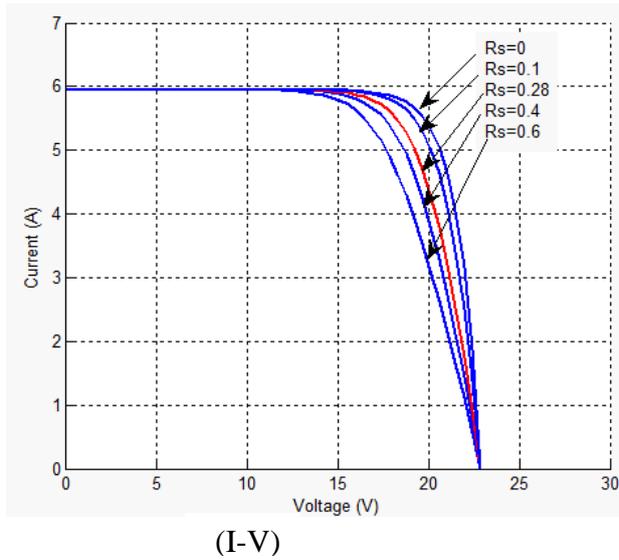


الشكل (13) منحنيات خواص (I-V) ، (P-V) للواحد الشمسي عند تغير درجة الحرارة  $T, C^{\circ}$ .

نلاحظ انخفاض جهد اللوح الشمسي بالتالي الاستطاعة بازدياد درجة حرارة اللوح، و تغير بسيط في تيار اللوح، بالتالي نستنتج أنه لا يتأثر كثيراً تيار اللوح الشمسي بتغير درجة الحرارة على العكس من الجهد الذي ينخفض بقيمة كبيرة.

يبين الشكل (14) منحنيات خواص (I-V) و (P-V) للواحد الشمسي PV عند تغير قيمة المقاومة التسلسلية

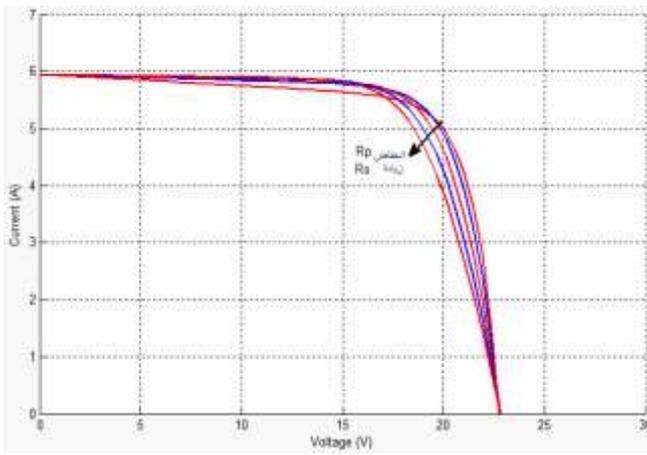
$R_s$ .



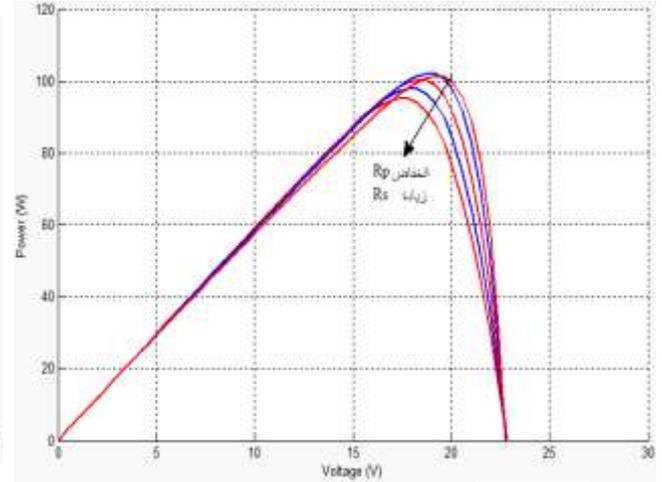
الشكل (14) منحنيات خواص (I-V) ، (P-V) للواحد الشمسي عند تغير المقاومة التسلسلية للواحد الشمسي  $R_s, \Omega$ .

نلاحظ ازدياد الجهد والتيار عند نقطة الانعطاف على منحنيات خواص اللوح بالتالي ازدياد الاستطاعة العظمى مع انخفاض قيمة المقاومة التسلسلية، ونلاحظ أن المقاومة التسلسلية للوح الذي تم نمذجته والتي تعطي استطاعته الاسمية  $R_s = 0.28\Omega$ .

يبين الشكل (15) تغيير منحنيات خواص  $(I-V)$  و  $(P-V)$  للوح الشمسي مع تغير المقاومة التسلسلية  $R_s$  والتفرعية  $R_p$  معاً.



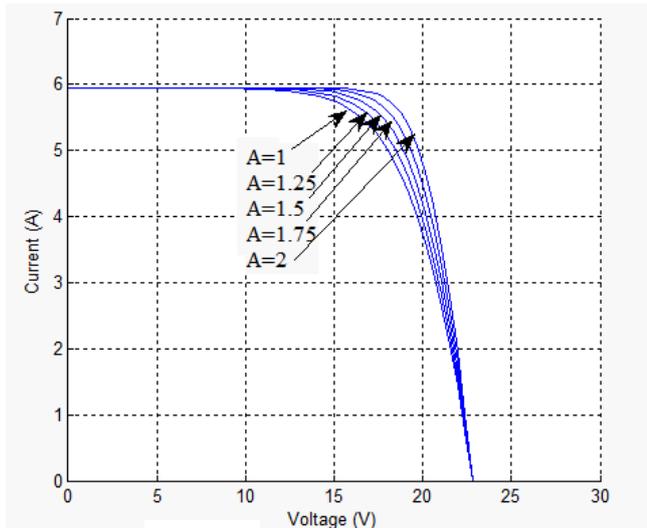
(I-V)



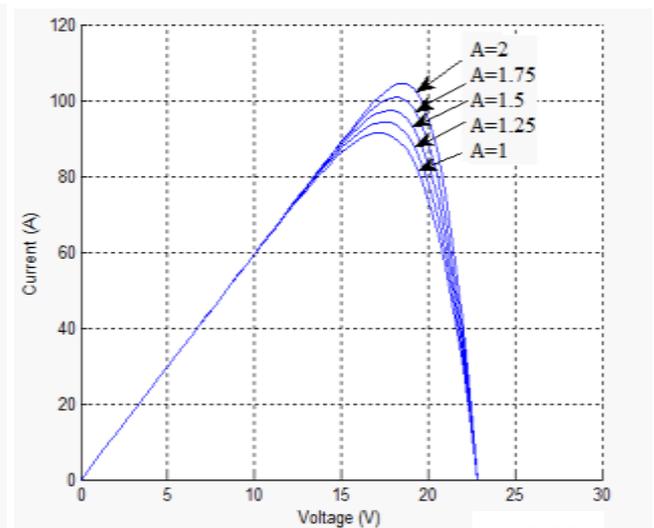
(P-V)

الشكل (15) تغيير منحنيات خواص  $(I-V)$  ،  $(P-V)$  للوح الشمسي عند تغير المقاومة التسلسلية والتفرعية للوح الشمسي  $R_s, R_p, \Omega$ .  
نلاحظ من الشكل التأثير الضعيف للمقاومة التفرعية على منحنيات عمل اللوح الشمسي على العكس من ذلك نلاحظ تأثيراً لا بأس به للمقاومة التسلسلية على منحنيات عمل اللوح الشمسي.

يبين الشكل (16)، تأثير عامل مثالية الديود للخلية على منحنيات خواص  $(I-V)$  و  $(P-V)$  للوح الشمسي.



(I-V)



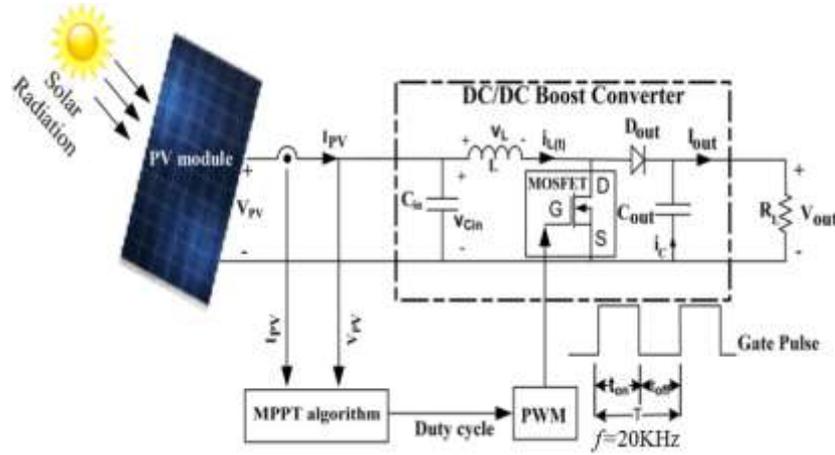
(P-V)

الشكل (16) تغيير منحنيات خواص  $(I-V)$  ،  $(P-V)$  للوح الشمسي عند تغير عامل مثالية الديود  $A$ .

نلاحظ ازدياد القيمة العظمى لاستطاعة خرج اللوح الشمسي مع ازدياد معامل مثالية الديود.

## 2 - دراسة ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للوح الشمسي عند تغير شدة الإشعاع الشمسي:

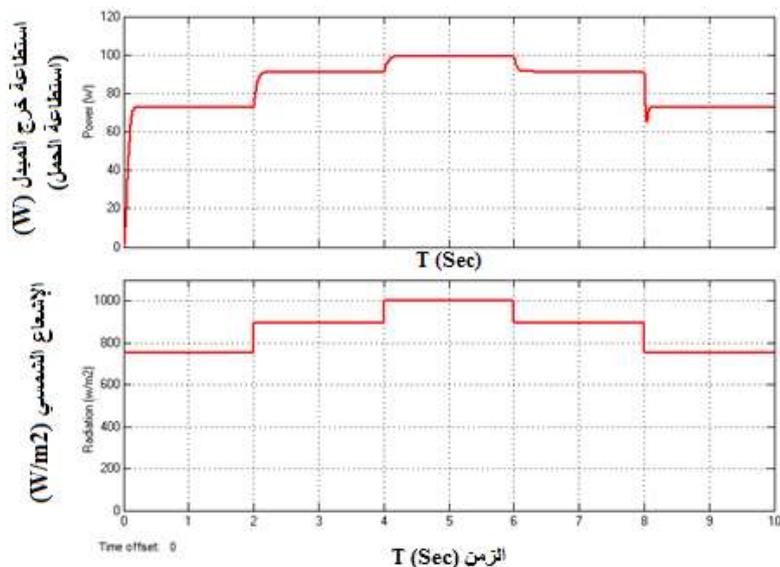
ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى كما ذكرنا سابقاً تعني الحصول على أعظم استطاعة مولدة من اللوح الشمسي عند تغير شدة الإشعاع الشمسي، ولابد من التفريق بين الملاحقة الالكترونية MPPT وبين الملاحقة الميكانيكية التي تتم بتحريك اللوح الشمسي ( Panel tracking ) بواسطة نظام تحريك ميكانيكي لملاحقة الشمس الذي يعتمد على مجموعة من الحساسات التي تقوم بتتبع حركة الشمس بشكل يومي وبالتالي تحريك اللوح من خلال محرك ليصبح مواجهاً لقرص الشمس بحسب تغير حركة الشمس الأمر الذي يحقق سقوط أعظم إشعاع شمسي على اللوح. أما الملاحقة الالكترونية MPPT بتعديل عرض النبضة يتم من خلال جهاز ليس له علاقة بالتحريك الميكانيكي السابق وإنما يقوم بمراقبة خرج اللوح الشمسي مع توتر الحمل بحيث تنقل أكبر استطاعة ممكنة للحمل، ويكون مخطط النظام كما في الشكل (17).



الشكل (17) الرسم التخطيطي لنظام شمسي مع ملاحقة لنقطة الاستطاعة العظمى.

إنه هدفاً يتقنية ملاحقة لنقطة الاستطاعة العظمى، هو إيجاد طريقة لجعل المبدل يعمل وقدورة عمل ملائمة في أي لحظة زمنية بما يحقق أعلى ملعدنقطة الاستطاعة العظمى، وقد استخدمت خوارزمية (P&O) للتحكم بعمل المبدل. نموذج النظام الشمسي مع تقنية MPPT كما هو مبين في الشكل (11).

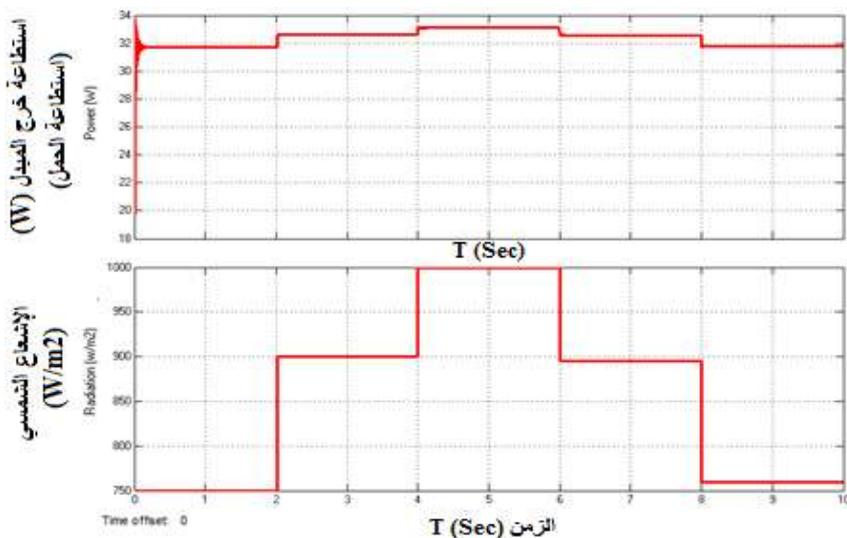
لم ندخل في هذا البحث بموضوع التظليل الجزئي وإنما اعتبرنا كامل اللوح يتعرض للإشعاع الشمسي، وكذلك النموذج المنفذ هو لنظام كهروضمسي مستقل غير مرتبط بالشبكة، حيث تم نمذجة هذا النظام بالأخذ بالاعتبار التصميم الرياضي لكل مكون، كما هو الحال في النظام الحقيقي.



الشكل (18) تتبّع نقطة الاستطاعة العظمى MPPT مع تغير شدة الإشعاع الشمسي.

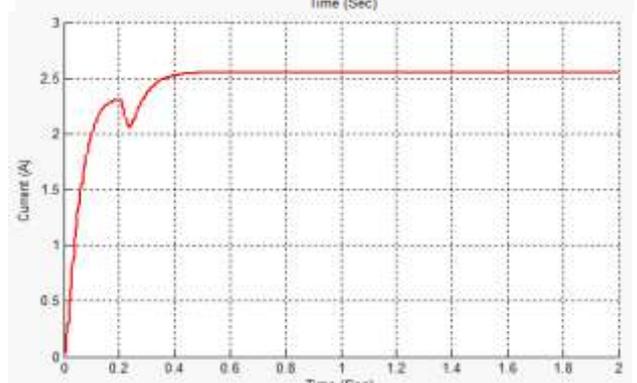
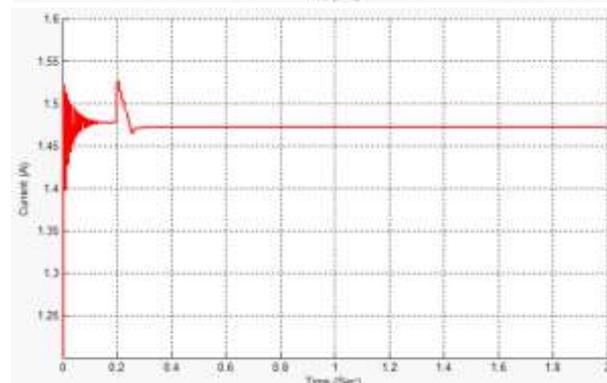
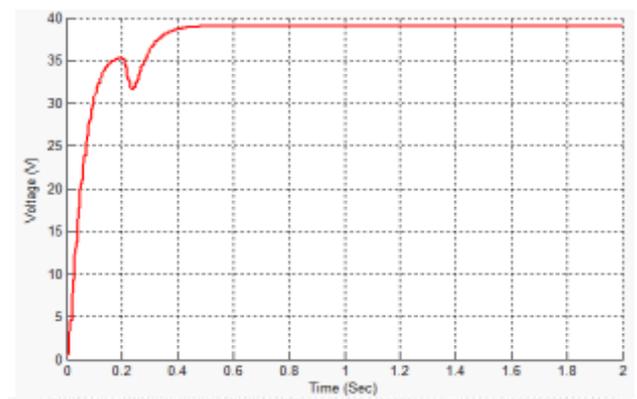
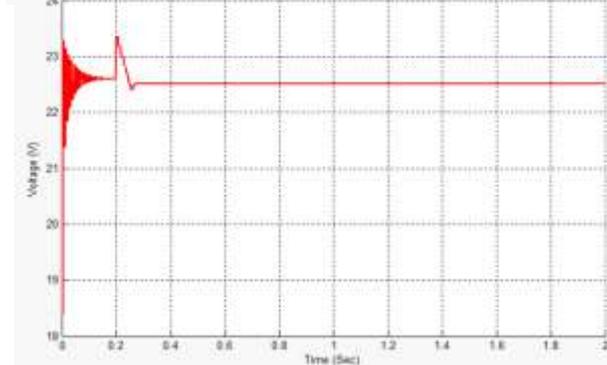
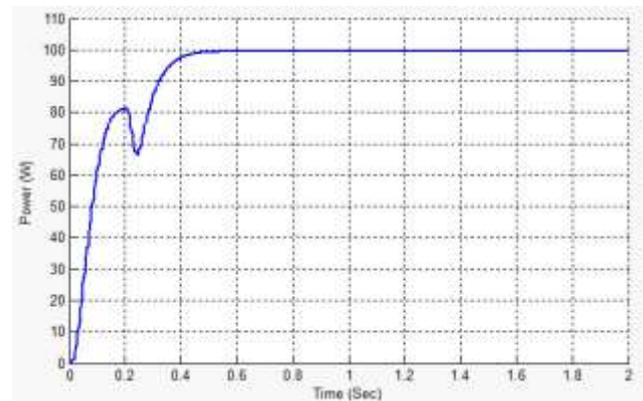
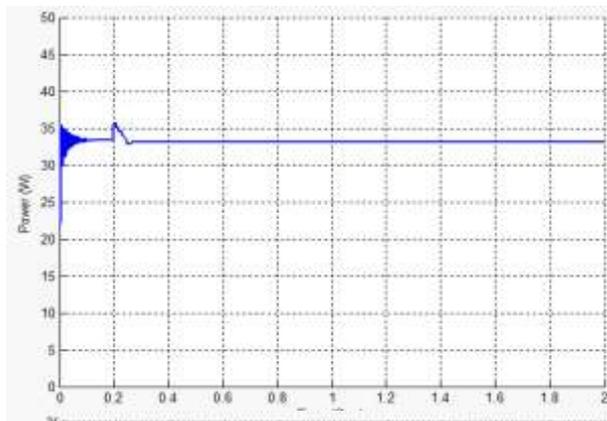
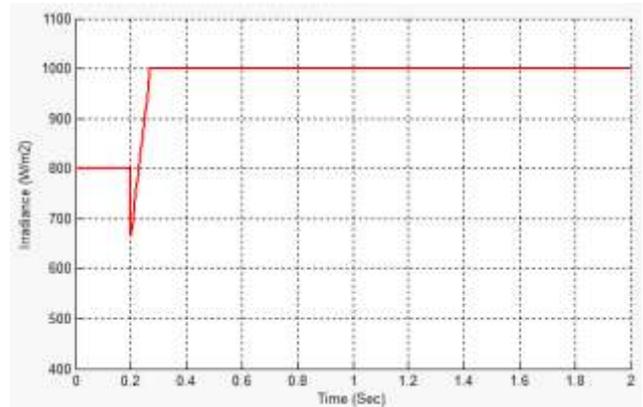
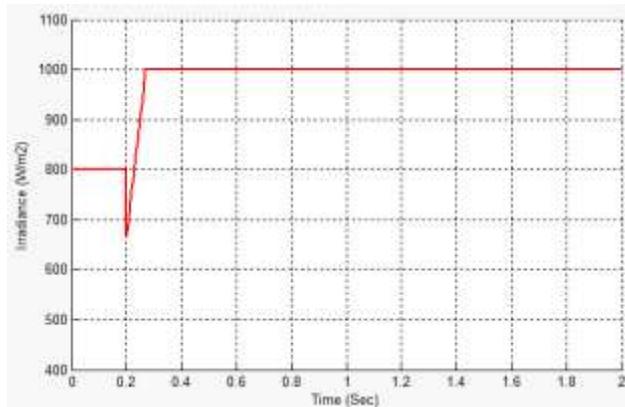
يبين الشكل (18) تغير استطاعة الحمل بتغير شدة الإشعاع مع تقنية MPPT، حيث يلاحق المبدل الاستطاعة العظمى المولدة ويقدمها للحمل، يمثل المنحني السفلي تغير شدة الإشعاع الساقط على اللوح الشمسي، والمنحني العلوي تغير الاستطاعة على خرج المبدل المقدمة للحمل وملاحظتها للقيمة العظمى بتغير الإشعاع.

يبين الشكل (19) تغير استطاعة الحمل بتغير شدة الإشعاع الشمسي بدون تقنية MPPT.



الشكل (19) تغير استطاعة الحمل مع تغير شدة الإشعاع بدون تقنية MPPT.

نلاحظ من الشكل السابق تغير الاستطاعة بشكل طفيف عند قيم أقل بكثير من قيمة الاستطاعة الاسمية للوح الشمسي، وذلك عند عدم استخدام تقنية MPPT. يبين الشكل (20) تغير الاستطاعة والتيار وجهد المبدل بتغير شدة الإشعاع الشمسي مع تتبع MPP، والشكل (21) بدون تتبع MPP.



الشكل (21) الاشعاع واستطاعة وجهد والتيار الحمل بدون تقنية MPPT.

الشكل (20) الاشعاع واستطاعة وجهد والتيار الحمل مع تقنية MPPT.

يبين الجدول (1) تغير قيم الاستطاعة، الجهد، والتيار بتغير شدة الاشعاع ودرجة الحرارة مع تتبع MPP.

الجدول (1) قيم الاستطاعة والجهد والتيار عند تغير شدة الاشعاع ودرجة الحرارة مع تتبع MPP.

شدة الاشعاع W/m2	درجة الحرارة °C	الجهد V	التيار A	الاستطاعة W مع تتبع MPP
1000	25	39.06	2.56	100
	50	32.71	2.138	67
	75	25.83	1.7	44
600	25	28.06	1.9	53.4
	50	26.5	1.87	49.5
	75	22.5	1.54	34.65
200	25	17.29	1.13	19.18
	50	14.73	0.97	14.18
	75	11.36	0.72	8,2

يبين الجدول (2) تغير قيم الاستطاعة والجهد والتيار بتغير شدة الاشعاع ودرجة الحرارة بدون تتبع MPP.

الجدول (2) قيم الاستطاعة والجهد والتيار عند تغير شدة الاشعاع ودرجة الحرارة بدون تتبع MPP.

شدة الاشعاع W/m2	درجة الحرارة °C	الجهد V	التيار A	الاستطاعة W مع تتبع MPP
1000	25	22.5	1.47	33.1
	50	22	1.3	28.6
	75	14.5	0.99	14.4
600	25	21.62	1.413	30.6
	50	17.75	1.16	20.6
	75	13.86	0.9	12
200	25	11.05	0.75	8.3
	50	9.5	0.65	6.2
	75	9.2	0.6	5.5

يمكن حساب زيادة كفاءة النظام بتتبع الاستطاعة العظمى من الجدولين السابقين، وتحسب بالعلاقة التالية

[17]:

$$Efficiency\% = \frac{[Total Power (with MPPT) - Total Power (without MPPT)]}{Total Power (with MPPT)} \cdot 100$$

$$Total Power (with MPPT) = 390.11 W$$

$$Total Power (without MPPT) = 159.3 W$$

$$Efficiency\% = \frac{[390.11 - 159.3]}{390.11} \cdot 100 \cong 60\%$$

## الاستنتاجات والتوصيات:

### - الاستنتاجات:

- 1 من خلال النتائج السابقة تبين أهمية دراسة مميزات خواص الألواح الشمسية لمعرفة مدتها بتغير شروط العمل من درجة حرارة وإشعاع شمسي.
- 2 تم في البحث نمذجة اللوحة الشمسية PV رياضياً وحاسوبياً باستخدام Matlab ودراسة عدد من البارامترات التي تؤثر على منحنيات الاداء، ودراسة الاستجابة الديناميكية لنظام الطاقة الشمسي.
- 3 من خلال نتائج البحث تبين أن تقنية MPPT تؤدي إلى زيادة كفاءة النظام الشمسي المدروس بنسبة 60%.
- 4 تعطي خوارزمية (P&O) كفاءة أفضل عند شروط بيئة العمل المتغيرة بسرعة.

### - التوصيات:

- 1 يوصى بوضع نماذج حاسوبية لدراسة أداء نظم الطاقة الشمسية PV قبل البدء بتنفيذها وذلك للتأكد من أن النظام يؤدي وظيفته بشكل جيد وفق الشروط المطلوبة.
- 2 يوصى باستخدام تقنيات وأجهزة تتبع نقطة الاستطاعة العظمى عند بناء النظم الشمسية، لما لها من أثر كبير في رفع كفاءة هذه الأنظمة.
- 3 يوصى بإجراء اختبارات عملية على الألواح الشمسية قبل استخدامها في النظم الشمسية للتأكد من مطابقة القيم العملية مع القيم الاسمية.
- 4 يوصى بدراسة الطرق المختلفة التي تستخدم تقنية MPPT ومقارنة نتائجها عند شروط وبيئة عمل مختلفة.

## المراجع

1. John Wiley & Sons ،Renewable and Efficient Electric Power Systems, Stanford University, INC.2004.
2. قرارات وتشريعات صادرة عن مجلس الوزراء ووزارة الكهرباء في سورية ودراسات صادرة عن المركز الوطني لبحوث الطاقة.
3. حمزة، ع, "هندسة النظم الشمسية الكهروضوئية-تحليل وتصميم"، منشورات جامعة دمشق، (2009).
4. H. J .M'oller ،*Semiconductors for Solar Cells* .Norwood, MA :Artech House, 1993.
5. A. Guechi and M. Chegaar, "Effects of diffuse spectral illumination on microcrystalline solar cells," J. Electron Devices, vol. 5, pp. 116–121, 2007.
6. American Society for Testing and Materials (ASTM). Reference solar spectral irradiance: Air mass 1.5. [Online]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>.
7. IEEE Standard Definitions of Terms for Solar Cells, 1969.
8. W. Xiao, W. G. Dunford, and A. Capel, "A novel modeling method for photovoltaic cells," in Proc. IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf. (PESC), 2004, vol. 3, pp. 1950–1956.
9. H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Array Design Handbook*. NewYork: Van Nostrand Reinhold, 1980.

10. S. Chowdhury, G. A. Taylor, S. P. Chowdhury, A. K. Saha, and Y. H. Song, "Modelling, simulation and performance analysis of a PV array in an embedded-environment," in Proc. 42nd Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC), 2007, pp. 781–785.
11. J. Hyvarinen and J. Karila, "New analysis method for crystalline silicon cells," in Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Convers., 2003, vol. 2, pp. 1521–1524.
12. K. Nishioka, N. Sakitani, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, "Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration," *Solar Energy Mater. Solar Cells*, vol. 91, no. 13, pp. 1222–1227, 2007.
13. C. Carrero, J. Amador, and S. Arnaltes, "A single procedure for helping PV designers to select silicon PV module and evaluate the loss resistances," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2579–2589, Dec. 2007.
14. K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," in Proc. IEE Proc.-Generation, Transmiss. Distrib., Jan. 1995, vol. 142, pp. 59–64.
15. G. E. Ahmad, H. M. S. Hussein, and H. H. El-Ghetany, "Theoretical analysis and experimental verification of PV modules," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 8, pp. 1159–1168, 2003.
16. W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance," *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, Jan. 2006.
17. P. Hemant, G. Manju, "Mathematical Modeling and Performance Evaluation of Stand Alone PV using MPPT", *IJESC*, Volume 6 Issue No.3, March 2016.