

Detection and Diagnosis of a Photovoltaic Cells System Faults

Dr. Ammar Hajjar^{*}
Dr. Massoud Sobyh^{**}
Ibrahim Haddad^{***}

(Received 20 / 5 / 2019. Accepted 29 / 8 / 2019)

□ ABSTRACT □

In recent years, solar energy has been received a great attention because it is free, clean and sustainable for electrical energy production. Where, the use of the photovoltaic (PV) systems has been increased widely due to the reduction in the prices of the PV panels due to the technology advancement in this field. However, the photovoltaic systems need continuous monitoring and periodic maintenance in order to get their optimal investment. The photovoltaic systems are prone to many faults, at different levels, starting from the failure of some cells to outage the whole panel(s) from a service and this may be developed to threaten the entire photovoltaic strings or arrays, thus it may results in reduction in their efficiency and fires occurring. To minimize the serious consequences of these faults, it is important to study the behavior of the PV systems and diagnose them as quickly as possible to ensure their reliability. Therefore, In this paper, a method based on monitoring the change in power value and voltage deviation was presented in the photovoltaic cells array with the total cross-tide (TCT) method for detecting and diagnosing the prominent photovoltaic array faults (open-circuit fault, short-circuit fault, shading condition) in real-time. To test the performance of this method in detecting and diagnosing faults in the photovoltaic cells array with the total cross-tide (TCT) method, in this paper has been modeling this array and simulating the prominent faults on it, using MATLAB / SIMULINK / SIMSCAPE environment. Modeling and simulation results have proven the efficiency of this method in detecting and diagnosing faults in the photovoltaic cells array with the total cross-tide (TCT) method, accurately and efficiently in real time.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Cells System, Total Cross Tied (TCT), Photovoltaic Array Faults.

^{*} Professor - Department of Electrical Power Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University – Lattakia -Syria. E-mail: ammarhajjar@hotmail.com or ammarhajjar@tishreen.edu.sy .

^{**}Professor - Department of Electrical Power Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University – Lattakia -Syria.

^{***}Postgraduate Student (Master) - Department of Electrical Power Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University – Lattakia -Syria.
E-mail: engibrahimhaddad1991@gmail.com

اكتشاف وتشخيص أعطال نظام خلايا كهروضوئي

د. عمّار حجار*

د. مسعود صبيح**

إبراهيم حداد***

(تاريخ الإيداع 20 / 5 / 2019. قُبِلَ للنشر في 29 / 8 / 2019)

□ ملخص □

حظيت الطاقة الشمسية خلال السنوات الأخيرة باهتمام كبير كونها طاقة مجانية نظيفة ومُستدامة لإنتاج الطاقة الكهربائية. حيث ازداد استخدام أنظمة الخلايا الكهروضوئية بشكل واسع بسبب انخفاض أسعار الألواح الكهروضوئية نتيجة للتقدم التكنولوجي في هذا المجال. لكن، تحتاج أنظمة الخلايا الكهروضوئية هذه إلى المراقبة المُستمرة والصيانة الدورية بهدف الاستثمار الأمثل لها.

تتعرض أنظمة الخلايا الكهروضوئية إلى العديد من الأعطال، على مستويات مُختلفة، بدءاً من تعطل بعض الخلايا الكهروضوئية إلى خروج ألواح كاملة عن الخدمة، وقد يتطور الأمر ليُهدد سلاسل أو صفوف كهروضوئية بأكملها مما يؤدي إلى الحد من كفاءتها وإلى حدوث حرائق. للحد من النتائج الخطيرة المترتبة عن حدوث تلك الأعطال، من الأهمية بمكان دراسة سلوك أنظمة الخلايا الكهروضوئية لتشخيص أعطالها بأسرع وقت مُمكن وذلك لضمان عملها بموثوقية عالية. لذا، تم في هذا البحث تقديم طريقة تعتمد على مراقبة التغير في قيمة الاستطاعة وانحراف الجهد في مصفوفة الخلايا الكهروضوئية، ذات التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT)، لأجل اكتشاف وتشخيص أبرز الأعطال فيها (عطل الدارة المفتوحة، عطل الدارة القصيرة، حالة التظليل) في الزمن الحقيقي.

لاختبار أداء هذه الطريقة في اكتشاف وتشخيص الأعطال في مصفوفة الخلايا الكهروضوئية ذات التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT)، تم في هذا البحث نمذجة هذه المصفوفة وتم محاكاة أبرز الأعطال عليها، وذلك باستخدام بيئة MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE. لقد أثبتت نتائج النمذجة والمحاكاة كفاءة هذه الطريقة في اكتشاف وتشخيص الأعطال في مصفوفة الخلايا الكهروضوئية، ذات التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل، بدقة وكفاءة عاليتين في الزمن الحقيقي.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، منظومة الخلايا الكهروضوئية، التشكيل التقاطعي الكلي/المُتكامل (TCT)، أعطال مصفوفة الخلايا الكهروضوئية.

* أستاذ دكتور - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ دكتور - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالب ماجستير - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

E-mail: engibrahimhaddad1991@gmail.com

مقدمة:

نظراً لنمو استهلاك الطاقة في العالم والمخاوف بشأن الآثار البيئية للوقود الأحفوري، فإن المجتمع البشري في حاجة ماسة إلى مصادر طاقة متجددة نظيفة مستدامة وصديقة للبيئة. دخلت مصادر الطاقة المتجددة بشكل أساسي ضمن برامج توليد الطاقة لدى العديد من بلدان العالم، وذلك بسبب خصائصها ومميزاتها العديدة التالية:

- متوفرة في معظم دول العالم، وتتلاءم مع واقع واحتياجات التنمية في المناطق النائية.
 - نظيفة ولا تلوث البيئة.
 - ذات عائد اقتصادي، وتُحقق تطوراً بيئياً، اجتماعياً، صناعياً وزراعياً على طول البلاد وعرضها.
- لقد ازدادت أهمية أنظمة التوليد الكهروضوئية PV، وبالأخص في أنظمة التوليد الموزع، لأنها تولد الطاقة الكهربائية بالقرب من الحمل بدون ضجيج أو انبعاثات غازية. الميزة الرئيسية لأنظمة PV مقارنة بأنظمة الطاقات المتجددة الأخرى هو أنها تُوفر استطاعات منخفضة يمكن حيازتها وتشغيلها من قبل المستهلك العادي.

يُمكن أن نُخلص المُميّزات الرئيسية للنظم الكهروضوئية بالنقاط التالية [1]:

- قصر الزمن اللازم لتصميم محطة جديدة وتركيبها وتشغيلها.
 - ساكنة، لا تحتوي على أجزاء متحركة، وبالتالي ليس لها ضجيج.
 - عمرها طويل مع حاجة مُتدنية للصيانة، نظراً لعدم وجود أجزاء متحركة فيها.
- نظراً للمزايا التي تم ذكرها، بالإضافة إلى انخفاض سعر الألواح الشمسية، فقد ازداد تركيب النظام الشمسي بشكل كبير في العقود الماضية [2]. على الرغم من ذلك، لا تزال هذه المنظومات تُعاني من تحديات رئيسية [3]، مثل تدهور الوحدات الكهروضوئية، الظروف الجوية القاسية، تقادم الأسلاك الكهربائية، انهيار العازلية، عدم توازن مُلاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية ... الخ.

يرتبط إنتاج الطاقة من منظومة الخلايا الكهروضوئية بظروف عملها، حيث تُؤثر أعطال النظام الكهروضوئي بشكل كبير على كفاءة هذه المنظومات وموثوقيتها. علاوةً على ذلك، قد تُؤدي بعض الأعطال إلى كوارث الحريق، أنظر إلى الشكل (1)، التي تُهدد السلامة الشخصية والممتلكات العامة. أبرز الأعطال التي قد تحصل في المصفوفة PV هي، أعطال عدم التطابق الناتج عن التظليل أو عن ربط الوحدات التي لا تملك خصائص مُتطابقة، أعطال الدارة المفتوحة والدارة القصيرة. مقارنةً مع الأعطال الأخرى، تُعتبر مُشكلة تظليل المصفوفة PV الناجمة عن الظروف البيئية العامل الرئيسي الذي يُؤثر على خرج المصفوفة، أنظر إلى الشكل (2)، وعادةً تُحتل حوالي 10%-20% من أعطال النظام PV [4].



الشكل (1) الأضرار الناتجة عن حدوث الأعطال.

تؤثر مشكلة الاتساح أو الظل على أداء المصفوفة الكهروضوئية، حيث تعمل الخلية المغطاة جزئياً أو كلياً كمستهلك للطاقة الكهربائية، مما يؤدي إلى سخونة الخلية ومن ثم تشكيل بقع ساخنة تُسبب تلف خلية أو مجموعة من الخلايا الكهروضوئية وأحياناً ألواح بأكملها، وبالتالي ينخفض إنتاج الطاقة الكهربائية بشكل حاد بسبب الظل.



الشكل (2) حالات تظليل منظومات كهروضوئية ناتجة عن الغيوم والثلوج والأشجار.

يُعدّ تطوير نموذجاً رياضياً لنظام فيزيائي عملاً أساسياً لتصميم نظام فعّال بهدف التنبؤ بأدائه بدقة. للتحقق من أداء نظام التوليد الكهروضوئي، يتطلب الأمر معرفة خصائص الخلايا الكهروضوئية بهدف تطوير دارة مكافئة يُمكن الاعتماد عليها، واستخراج البارامترات اللازمة لبناء نموذج كهروضوئي مكافئ [5, 6].

لقد تم اقتراح العديد من النماذج الرياضية اللازمة لمحاكاة أداء الخلايا الكهروضوئية في العديد من الأبحاث العلمية [5-10]. تعتمد أبرز الدارات المكافئة المستخدمة على النموذج الأحادي الديود والنموذج الثنائي الديود [7]. تعدّ هذه النماذج أداة مُمتازة للتنبؤ بتأثير الظروف الجوية على الاستطاعة المولدة من الخلايا الكهروضوئية، مثل الإشعاع، التظليل، ودرجة الحرارة. يتطلب مثل هذا الأمر معرفة التفاصيل الكاملة بفيزيائية النظام الكهروضوئي.

تُتيح بيئة MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE تجميع كتل جاهزة من مكتباتها لمحاكاة سلوك المكونات الفيزيائية الحقيقية [8]، وتعدّ أداة قوية لبناء الأنظمة الكهروضوئية وتمثيل تأثير الظروف البيئية كالإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة على الاستطاعة المولدة ومُنحنيات الخواص للمنظومة الكهروضوئية [11].

يُعدّ الكشف عن الأعطال أمراً لا بدّ منه لضمان عمل منظومات الخلايا الكهروضوئية بأمان وموثوقية عاليتين. لذا، ركزت الأبحاث المرتبطة بهذا المجال على تحليل الأعطال. لقد اعتمدت أول طريقة للكشف عن الأعطال على مقارنة بيانات تشغيل النظام الفعلي مع بيانات النمذجة والمحاكاة [12-14]. لكن، لم تستطع هذه الطريقة تصنيف الأعطال في المصفوفة الكهروضوئية [15, 16]. لقد تمّ أيضاً تطوير طريقة للكشف عن الأعطال تعتمد على المراقبة عن بُعد للأنظمة الكهروضوئية التي يصعب الوصول إليها [17]، حيث تم فيها استخدام بيانات الإشعاع المُقادة فضائياً لمحاكاة إنتاج الطاقة من النظام الكهروضوئي، إلا أن زمن العمل بهذه الطريقة كبير والاستجابة بطيئة، على سبيل المثال قد يستغرق كشف الأعطال في هذه الطريقة يوماً واحداً على الأقل. لقد تمّ أيضاً استخدام طريقة تعتمد على الشبكات

العصبونية الاصطناعية للكشف عن الأعطال وتصنيفها في النظام الكهروضوئي [18]. لكن، تتطلب هذه الطريقة قاعدة بيانات كبيرة وتدريباً دورياً للتقييم الدقيق.

لقد تمّ استخدام طريقة لتشخيص أعطال منظومات الـ PV بإتباع تيار السلسلة [19]. ولكن، لم تشمل كل الأعطال التي تُؤثر في تيار السلسلة، وبالتالي هناك فرصة التعرض للكشف الخاطئ مما يتطلب معايرة جيدة وضبط نظام PV المُحاكي بدقة مع نظام الاختبار الفعلي. كما تمّ في [20] استخدام تقنية تصوير سطح الألواح PV بواسطة كاميرا حرارية لرؤية توزع درجة الحرارة وكشف العطل فيها. ولكن، تعتمد دقة الطريقة على الظروف المحيطة التي تُؤثر على درجة الحرارة الحقيقية للخلايا. لقد استُخدم في [21] الحماية التفاضلية المُستخدمة في حماية عناصر نظم القدرة الكهربية (المحولات، المولدات...) للكشف عن الأعطال الكهروضوئية، حيث تمّ تطبيق كاشف التيار المتبقي لمراقبة التيار بين طرفي دخل وخرج منطقة الحماية، فإذا كان فرق التيار أعلى من العتبة يتم إرسال إنذار بوجود عطل. ولكن، عند حدوث عطل خارج منطقة الحماية لا تستطيع الحماية التفاضلية اكتشافه.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من ضرورة الاستثمار الأمثل لأنظمة الخلايا الكهروضوئية، وتقليل تكاليف الصيانة واستبدال الألواح الكهروضوئية المُعطلة، وذلك لاسترداد تكاليف إنشاء المحطات الكهروضوئية. يهدف البحث إلى دراسة سلوك عمل نظام كهروضوئي مُستقل عن الشبكة عند سويات إشعاع شمسي ودرجات حرارة مُختلفة، لأجل أبرز الأعطال المُحتملة، بهدف اكتشافها وتشخيصها في الزمن الحقيقي وذلك في بيئة MATLAB البرمجية.

طرائق البحث ومواده:

لقد تمّ في هذا البحث نمذجة مصفوفة خلايا كهروضوئية نموذجية، بدءاً من نموذج الخلية الكهروضوئية إلى نموذج اللوح الكهروضوئي، ثم تمّ تشكيل مصفوفة الألواح الكهروضوئية بطريقة التقاطع الكلي/المتكامل (TCT) باستخدام بيئة MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE. لقد تمّ محاكاة أبرز أعطال مصفوفة الخلايا الكهروضوئية، ومن ثم تمّ دراسة وكشف وتشخيص الأعطال وأثرها على مُنحنيات خواص النظام الكهروضوئي بالاعتماد على قياس اختلاف بارامترات المصفوفة الكهروضوئية في الزمن الحقيقي.

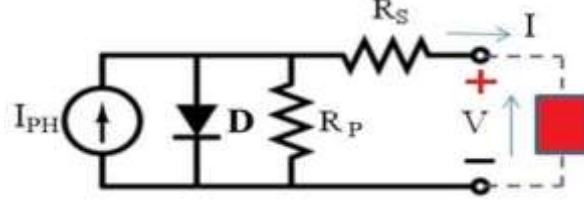
محاكاة الخلية الكهروضوئية:

يتم توليد الطاقة الكهربائية في الخلايا الكهروضوئية بتحويل الإشعاع الشمسي إلى تيار مستمر باستخدام أنصاف النواقل المصنوعة من السيليكون أحادي البلورة أو متعدد البلورات [22]، حيث تعتمد الطاقة الكهربائية التي تُنتجها الخلايا الكهروضوئية على شدة الإشعاع الذي تتلقاه على سطحها. يُوضح الشكل (3) بناء المصفوفة الكهروضوئية، حيث يتم تجميع الخلايا لتشكيل اللوح الكهروضوئي، ومن ثم وصل الألواح على التسلسل لتشكيل السلسلة الكهروضوئية، ومن ثم يتم وصل هذه السلاسل على التفرع لتشكيل المصفوفة الكهروضوئية.



الشكل (3) بنية مصفوفة كهروضوئية نموذجية [29].

يتكون أبسط نموذج لتمثيل الخلية الكهروضوئية من منبع تيار يوصل على التوازي مع ثنائي (Diode). يُوضح الشكل (4) نموذج الدارة المكافئة للخلية الكهروضوئية، حيث يُضاف تأثير المقاومة التسلسلية R_S للمادة المُصنعة المانعة لمرور التيار، ومقاومة تفرعية R_P تُمثل التسريبات في الخلية الكهروضوئية.



الشكل (4) نموذج يُمثل الدارة المكافئة للخلية الكهروضوئية.

تُعطى المُعادلة العامة للتيار الكلي I الناتج عن اللوح الكهروضوئي، المُكون من خلايا مُتصلة على التسلسل والتفرع، كما يلي [23]:

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

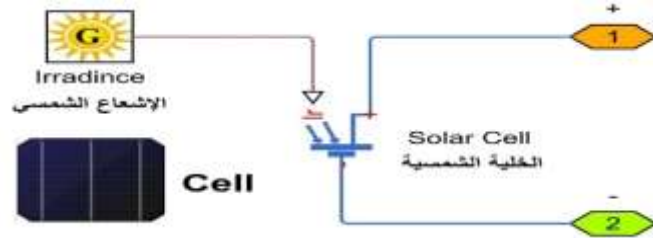
حيث: يُمثل I_{PV} تيار اللوح الكهروضوئي المولد بالضوء، و يُمثل N_P عدد الخلايا التفرعية في اللوح الكهروضوئي، و يُمثل I_S تيار الإشباع العكسي للديود، و يُمثل $V_t = \frac{N_S \cdot K \cdot T}{q}$ جهد التماس الحراري للوح، و يُمثل N_S عدد الخلايا المُتصلة على التسلسل، و يُمثل T درجة الحرارة و تُقدر بال [K]، و تُمثل R_S المقاومة المكافئة التسلسلية، و تُمثل R_P المقاومة المكافئة التفرعية، و يُمثل A عامل مثالية الديود، و تُمثل q شحنة الإلكترون ($1.6021 \cdot 10^{-19} \text{C}$)، و يُمثل K ثابت بولتزمان ($1.3806 \cdot 10^{-23} \text{J/k}$).

يتعلق التيار الضوئي I_{PV} المولد بشكل خطي بالإشعاع الشمسي ويتأثر بالحرارة، ويُعطى بالعلاقة التالية [24]:

$$I_{PV} = \left(I_{SC} + K_I (T_C - T_{ref}) \right) \cdot \frac{G}{G_n} \quad (2)$$

حيث: يُمثل I_{SC} تيار القصر للوح الشمسي عند شروط اسمية ($25^\circ\text{C}, 1000 \text{W/m}^2$)، و تُمثل G شدة الإشعاع الشمسي عند سطح اللوح الكهروضوئي (W/m^2)، و تُمثل G_n شدة الإشعاع الشمسي الاسمي (1000W/m^2)، و تُمثل T_{ref} درجة الحرارة المرجعية القياسية و تُقدر بال [K]، و تُمثل T_C درجة الحرارة المُقاسة عند سطح اللوح الكهروضوئي و تُقدر بال [K]، و يُمثل K_I مُعامل تيار القصر على درجة الحرارة، و وحدته ($\text{A}/^\circ\text{C}$).

يتم تمثيل الخلية الكهروضوئية في بيئة Simscape/SimElectronics بكتلة مُمثلة للعلاقة الرياضية (1)، كما هو مبين في الشكل (5)، بفرض أن $N_P = N_S = 1$. يُمكن ضبط بارامترات الخلية وفقاً للجدول (1):

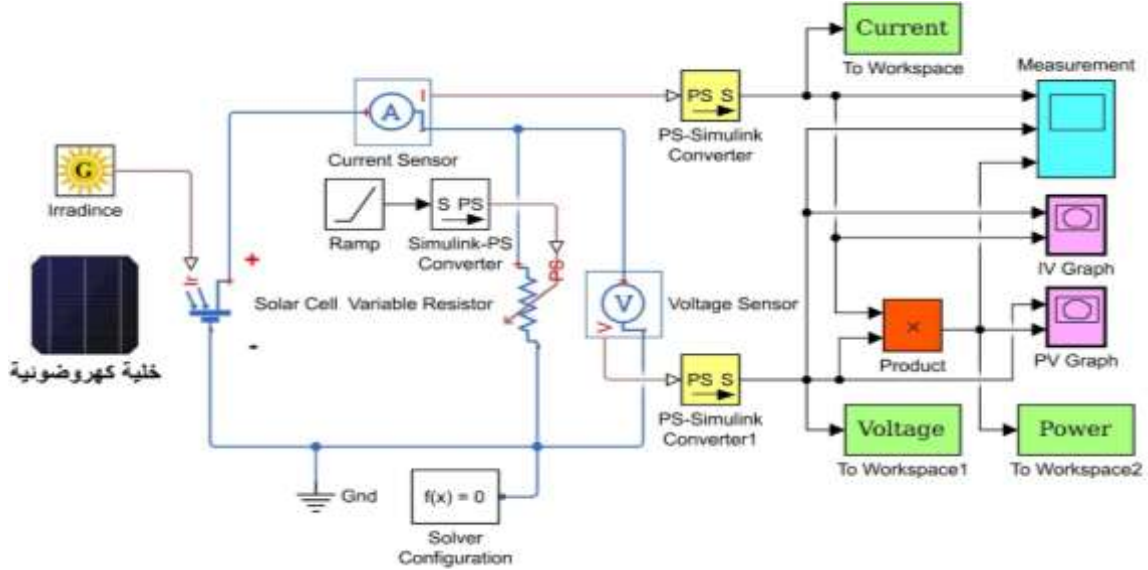


الشكل (5) تمثيل الخلية الكهروضوئية في بيئة Simscape/SimElectronics.

الجدول (1) المواصفات الكهربائية لخلايا كهروضوئية واحدة عند شروط الاختبار القياسية STC
($G=1000W/m^2$, $T=25^0 C$)

البارامتر	القيمة
تيار الدارة القصيرة للخلايا الواحدة [A]	$I_{SC} = 7.34$
جهد الدارة المفتوحة للخلايا الواحدة [V]	$V_{OC} = 0.6$
التيار عند نقطة الاستطاعة الأعظمية للخلايا الواحدة [A]	$I_{mpp} = 6.56$
الجهد عند نقطة الاستطاعة الأعظمية للخلايا الواحدة [V]	$V_{mpp} = 0.49$
الاستطاعة الأعظمية للخلايا الواحدة [W]	$P_{max} = 3.23$

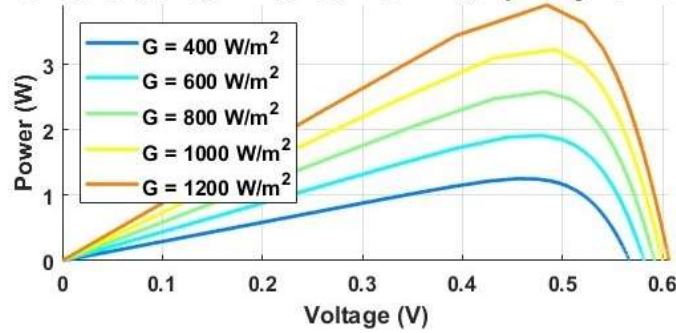
للخلايا الكهروضوئية مدخل واحد يُمثل شدة الإشعاع (W/m^2)، وطرفي جهد بقطبية $+V$ و $-V$. وبالتالي، فهي تعمل كمصدر جهد يتعلّق بشدة الإشعاع ودرجة الحرارة، ويُمرر تيار عند وصل حمل بين طرفيه. اعتماداً على نموذج الخلايا الكهروضوئية المبين في الشكل (6)، تم دراسة خصائص الخلايا الكهروضوئية واستخراج منحنيات خواصها ($P-V$) و ($I-V$) لأجل سويات إشعاع شمسي ودرجات حرارة مُختلفة وحمل مُتغير.



الشكل (6) نموذج لخلايا كهروضوئية مع الحمل في بيئة Simscape/SimElectronics.

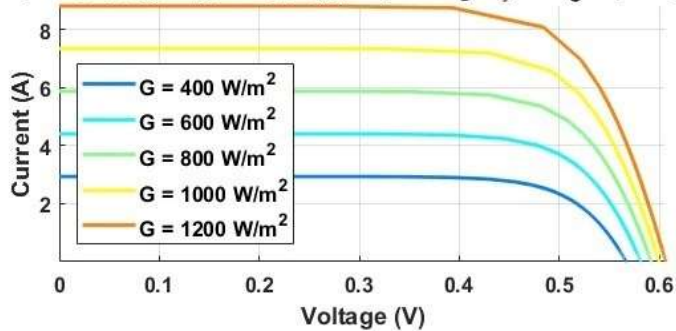
يُبين الشكل (7,a,b,c,d) منحنيات خواص الخلايا الكهروضوئية عند سويات إشعاع شمسي ودرجات حرارة مُختلفة.

تأثير شدة الإشعاع الشمسي على أداء الخلية الكهروضوئية عند درجة حرارة $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$



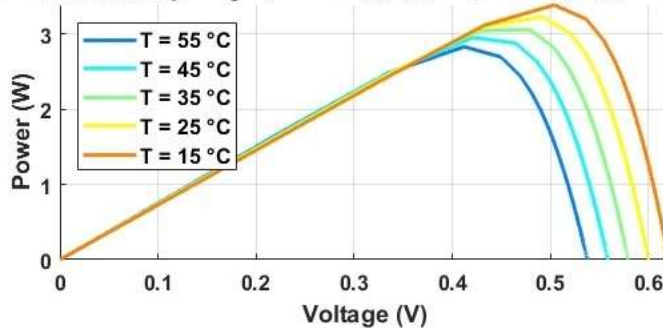
الشكل (7,a) منحنى خواص الخلية الكهروضوئية (P-V) عند سويات إشعاع شمسي مختلفة.

تأثير شدة الإشعاع الشمسي على أداء الخلية الكهروضوئية عند درجة حرارة $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$



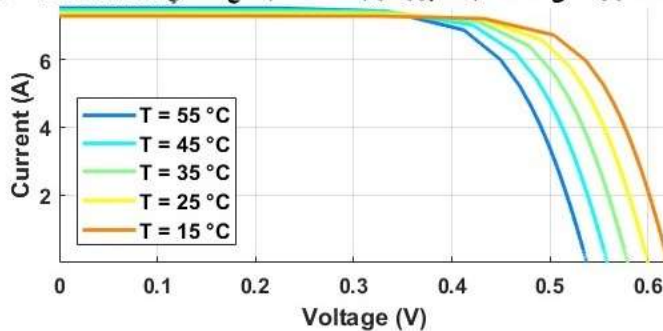
الشكل (7,b) منحنى خواص الخلية الكهروضوئية (I-V) عند سويات إشعاع شمسي مختلفة.

تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية الكهروضوئية عند شدة إشعاع شمسي $G = 1000\text{ W/m}^2$



الشكل (7,c) منحنى خواص الخلية الكهروضوئية (P-V) عند درجات حرارة مختلفة.

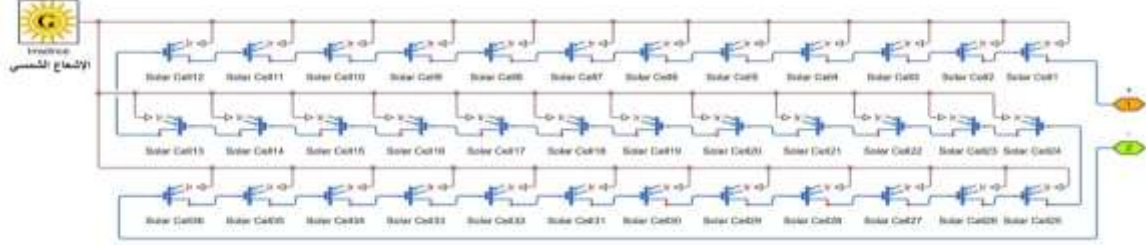
تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية الكهروضوئية عند شدة إشعاع شمسي $G = 1000\text{ W/m}^2$



الشكل (7,d) منحنى خواص الخلية الكهروضوئية (I-V) عند درجات حرارة مختلفة.

محاكاة اللوح الكهروضوئي:

اعتماداً على التمثيل السابق للخلية الكهروضوئية تم بناء لوح كهروضوئي يتكون من 3 مجموعات مُتصلة على التسلسل، حيث تتضمن كل مجموعة 12 خلية مُتصلة على التسلسل، أنظر إلى الشكل (8,a,b).



الشكل (8,a) تمثيل لوح كهروضوئي في بيئة Simscape/SimElectronics.



الشكل (8,b) اللوح الكهروضوئي.

من الوصل التسلسلي لخلايا اللوح الكهروضوئي نجد أن:

$$I_{SC} = I_{SC1} = I_{SC2} = I_{SC3} \dots \dots \dots = I_{SC36} \quad (3)$$

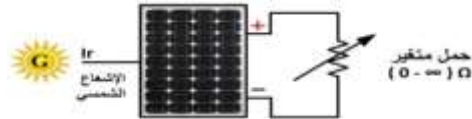
$$V_{OC} = V_{OC1} + V_{OC2} + V_{OC3} \dots \dots \dots + V_{OC36} \quad (4)$$

$$R_S = R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} \dots \dots \dots + R_{S36} \quad (5)$$

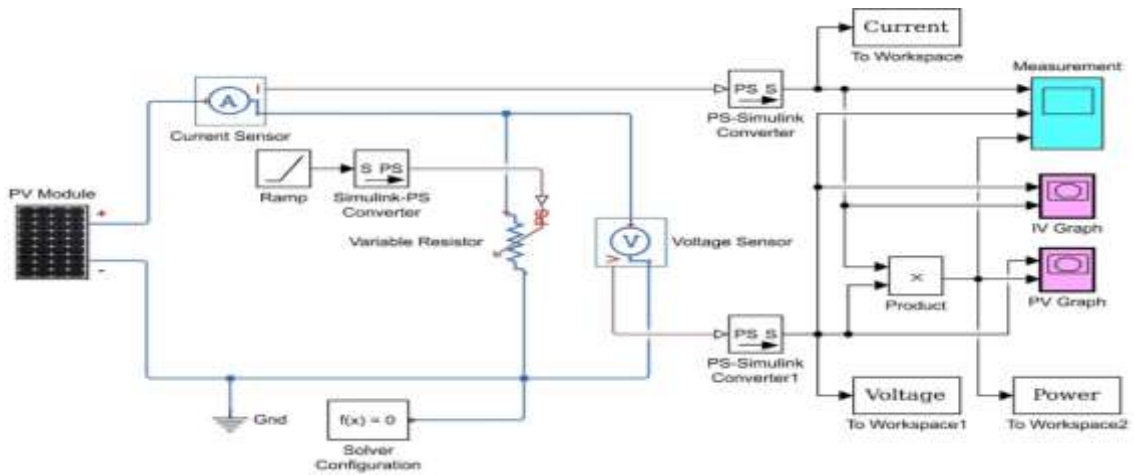
سيتم هنا تمثيل لوح كهروضوئي له المواصفات الكهربائية المُبينة في الجدول (2)، ودراسة خصائصه واستخراج المُنحنيات المُميزة له عند سويات إشعاع شمسي ودرجات حرارة مُختلفة، وذلك بتطبيق حمل مُتغير بشكل خطي. تمثيل اللوح الكهروضوئي مع الحمل ودائرة الاختبار مُوضح في الشكل (9,a,b).

الجدول (2) المواصفات الكهربائية للوح كهروضوئي عند شروط الاختبار القياسية (STC) ($G=1000W/m^2$, $T=25^0 C$)

القيمة	البارامتر
$P_{max} = 117$	الاستطاعة الاسمية للوح الكهروضوئي [W]
$I_{SC} = 7.34$	تيار الدارة القصيرة للوح الكهروضوئي [A]
$V_{OC} = 21.6$	جهد الدارة المفتوحة للوح الكهروضوئي [V]
$I_{mpp} = 6.8$	التيار عند نقطة الاستطاعة الأعظمية للوح الكهروضوئي [A]
$V_{mpp} = 17.22$	الجهد عند نقطة الاستطاعة الأعظمية للوح الكهروضوئي [V]
$N_S = 36$	عدد الخلايا الموصولة على التسلسل في اللوح الكهروضوئي
$N_P = 1$	عدد الخلايا الموصولة على التفرع في اللوح الكهروضوئي

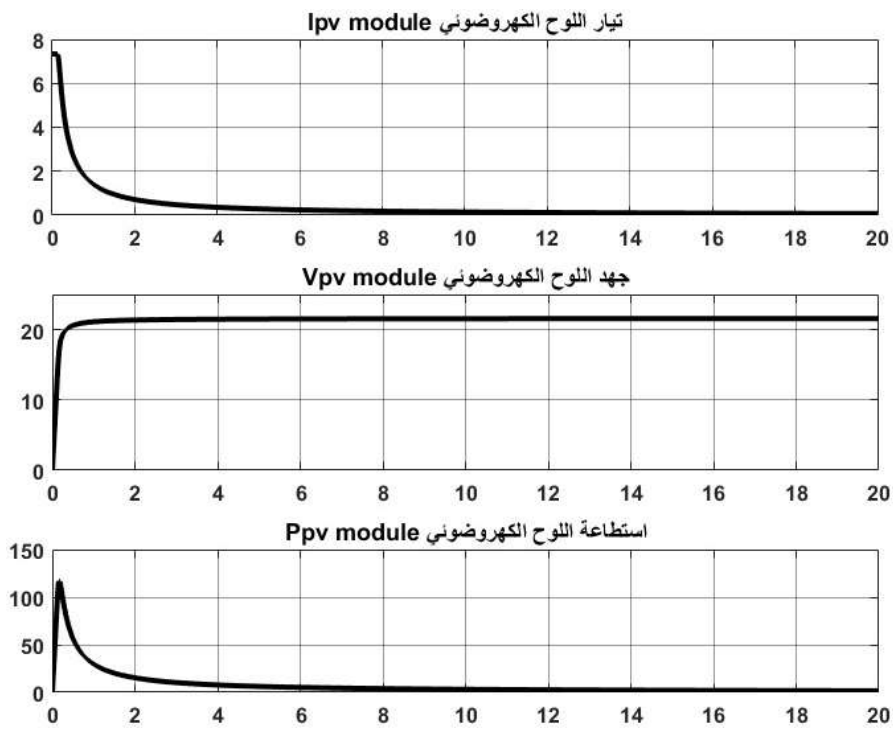


الشكل (9,a) لوح كهروضوئي مكون من 36 خلية موصول مع حمل متغير بشكل خطي [23].



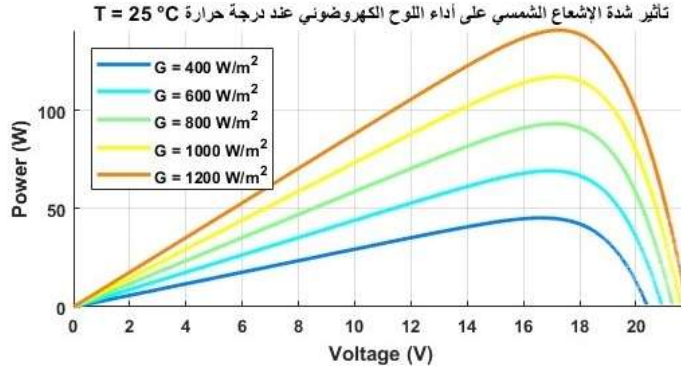
الشكل (9,b) تمثيل نموذج اللوح الكهروضوئي مع دائرة الاختبار في بيئة Simscape/SimElectronics.

يُبين الشكل (10) مُنحنيات التيار، الجهد، والاستطاعة على خرج اللوح الكهروضوئي عند الشروط القياسية STC.

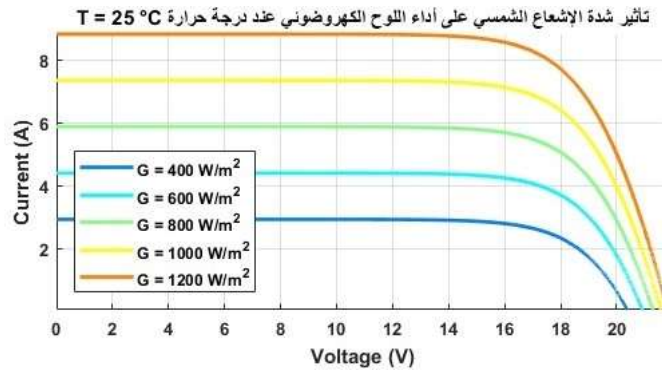


الشكل (10) مُنحنيات التيار والجهد والاستطاعة للوح الكهروضوئي.

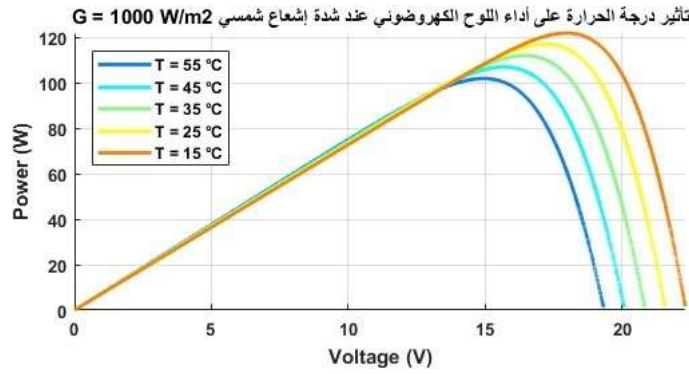
يُبين الشكل (11,a,b,c,d) مُنحنيات خواص اللوح الكهروضوئي عند سويات إشعاع ودرجات حرارة مُختلفة.



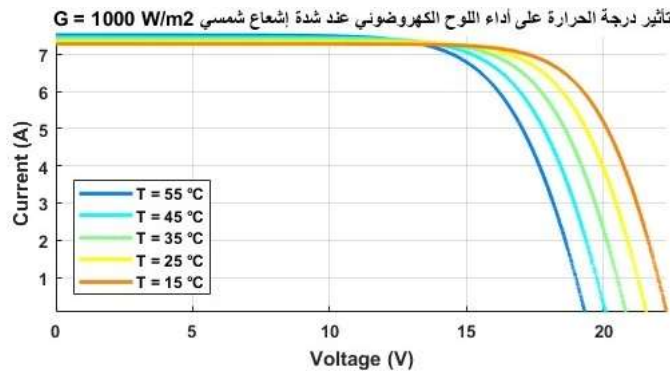
الشكل (11, a) منحنى خواص اللوح الكهروضوئي (P-V) عند سويات إشعاع شمسي مختلفة.



الشكل (11, b) منحنى خواص اللوح الكهروضوئي (I-V) عند سويات إشعاع شمسي مختلفة.



الشكل (11, c) منحنى خواص اللوح الكهروضوئي (P-V) عند درجات حرارة مختلفة.



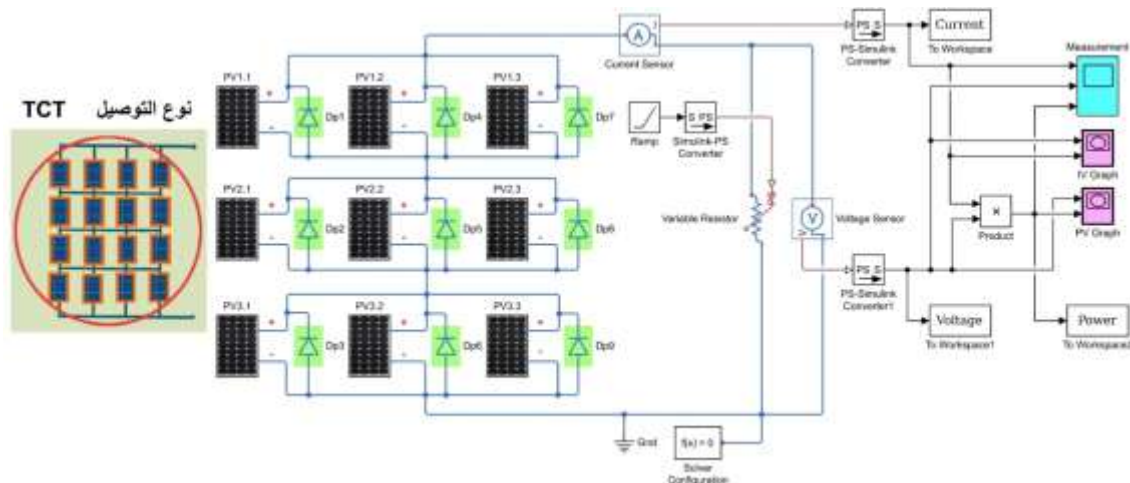
الشكل (11, d) منحنى خواص اللوح الكهروضوئي (I-V) عند درجات حرارة مختلفة.

النمذجة والمحاكاة لنظام كهروضوئي مُستقل عن الشبكة (النظام المدروس):

بعد أن تمّ بناء اللوح الكهروضوئي في بيئة Simscape ودراسة خصائصه، تم تشكيل مصفوفة كهروضوئية نموذجية ذات تشكيل (توصيل) تقاطعي كلي/متكامل (TCT: Total Cross Tide)، لما لهذا التشكيل من أفضلية تسامح مع بيئة العمل. يتم في هذا التشكيل توصيل الوحدات الكهروضوئية في كل صف في المصفوفة الكهروضوئية بشكل تقري أولاً، ومن ثم يتم وصل مجموعات الصفوف الناتجة على التسلسل، كما هو موضح في الشكل (12). لقد تم محاكاة ودراسة أبرز الأعطال على المصفوفة الكهروضوئية ذات المواصفات الكهربائية المبينة في الجدول (3).

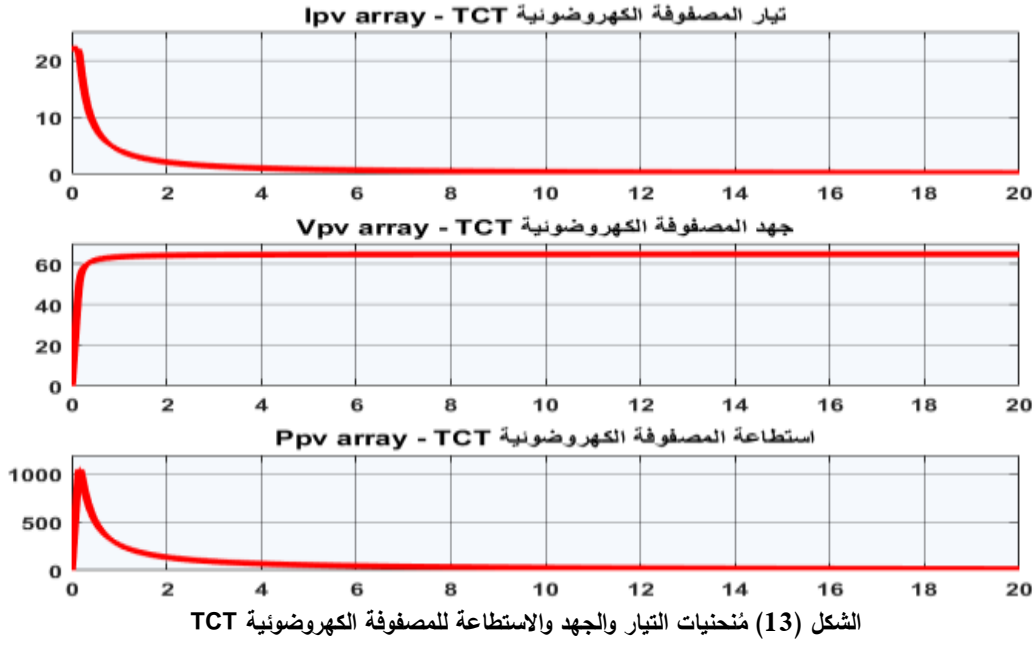
الجدول (3) المواصفات الكهربائية للمصفوفة الكهروضوئية ذات التشكيل TCT عند شروط الاختبار القياسية (STC)

القيمة	البارامتر
$P_{max} = 1053$	الاستطاعة الاسمية للمصفوفة الكهروضوئية [W]
$I_{SC} = 22.02$	تيار الدارة القصيرة للمصفوفة الكهروضوئية [A]
$V_{OC} = 64.8$	جهد الدارة المفتوحة للمصفوفة الكهروضوئية [V]
$I_{mpp} = 20.38$	التيار عند نقطة الاستطاعة الأعظمية للمصفوفة الكهروضوئية [A]
$V_{mpp} = 51.66$	الجهد عند نقطة الاستطاعة الأعظمية للمصفوفة الكهروضوئية [V]
$N_{module} = 3$	عدد الألواح الموصولة على التفرع في الصف الواحد في المصفوفة الكهروضوئية
$N_{group} = 3$	عدد مجموعات الصفوف الموصولة على التسلسل في المصفوفة الكهروضوئية

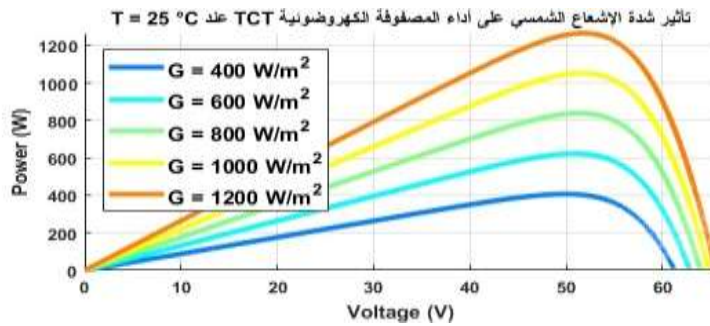


الشكل (12) نمذجة مصفوفة كهروضوئية نموذجية ذات التشكيل (التوصيل) TCT باستخدام Matlab/Simscape

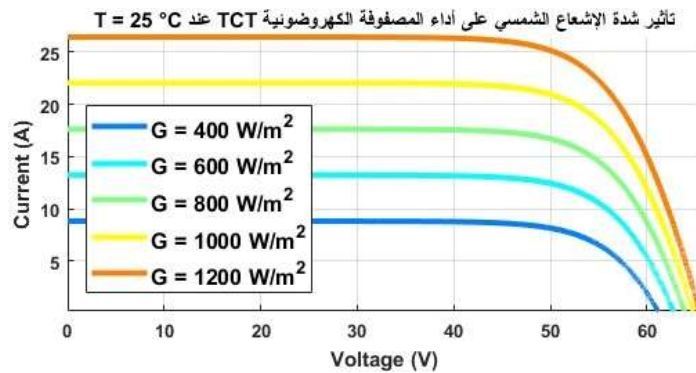
يُبين الشكل (13) مُنحنيات التيار، الجهد، والاستطاعة على خرج المصفوفة PV عند الشروط القياسية (STC).



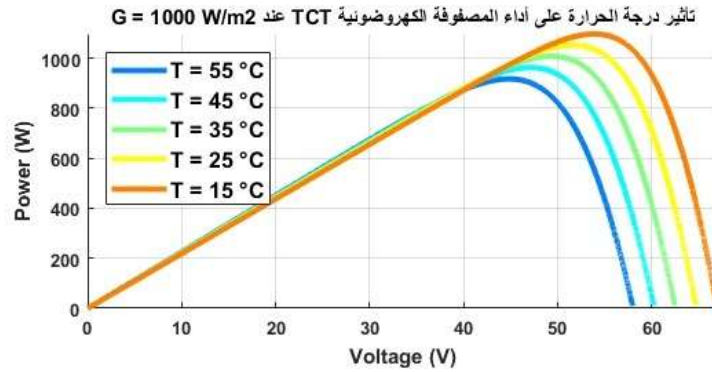
يُبين الشكل (14,a,b,c,d) منحنيات خواص المصفوفة الكهروضوئية TCT عند مستويات إشعاع شمسي ودرجات حرارة مُختلفة.



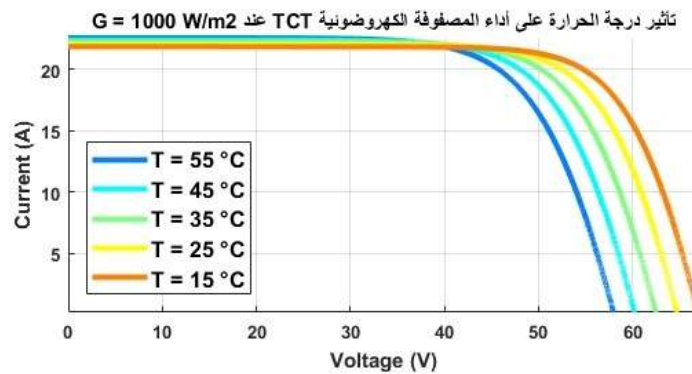
الشكل (14,a) منحنى خواص المصفوفة الكهروضوئية (P-V) عند مستويات إشعاع شمسي مُختلفة.



الشكل (14,b) منحنى خواص المصفوفة الكهروضوئية (I-V) عند مستويات إشعاع مُختلفة.



الشكل (14,c) منحنى خواص المصفوفة الكهروضوئية (P-V) عند درجات حرارة مختلفة.

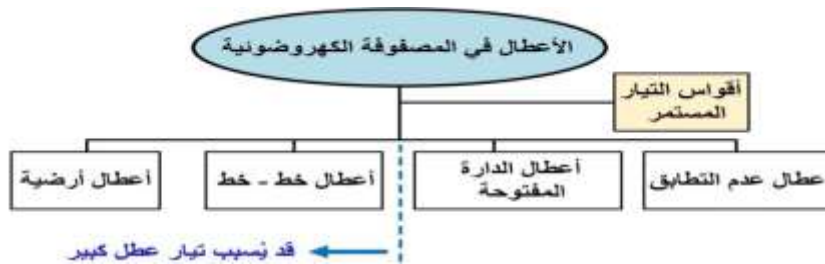


الشكل (14,d) منحنى خواص المصفوفة الكهروضوئية (I-V) عند درجات حرارة مختلفة.

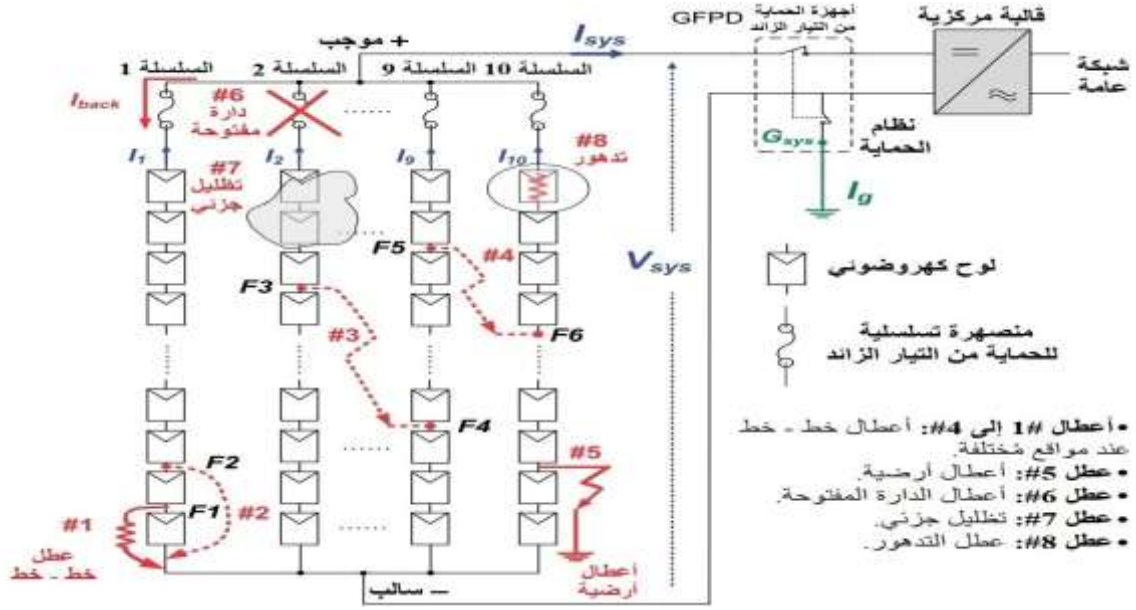
تحليل أعطال النظام الكهروضوئي المُستقل عن الشبكة (النظام المدروس):

بشكلٍ عام، يُمكن تصنيف أعطال النظام الكهروضوئي إلى نوعين أساسيين [26]: (أ) أعطال دائم سببها المشاكل الميكانيكية أو الكهربائية، مثل قصر خط - أرض، قصر خط - خط، وأعطال الدارة المفتوحة، (ب) عطل مؤقت، كأعطال ضياع الاستطاعة (عدم التطابق) التي يُسببها الظل الناتج عن السحاب مثلاً. يُبين الشكل (15) وصفاً موجزاً لأبرز الأعطال التي قد تحصل في المصفوفة الكهروضوئية. يُبين الشكل (16) تمثيل الأعطال المُختلفة في نظام PV متصل مع شبكة عامة.

تتكون المصفوفة PV النموذجية المدروسة في هذا البحث من ثلاث مجموعات (صفوف) مُتصلة على التسلسل وكل مجموعة (صف) تتكون من ثلاث ألواح مُتصلة على التفرع.

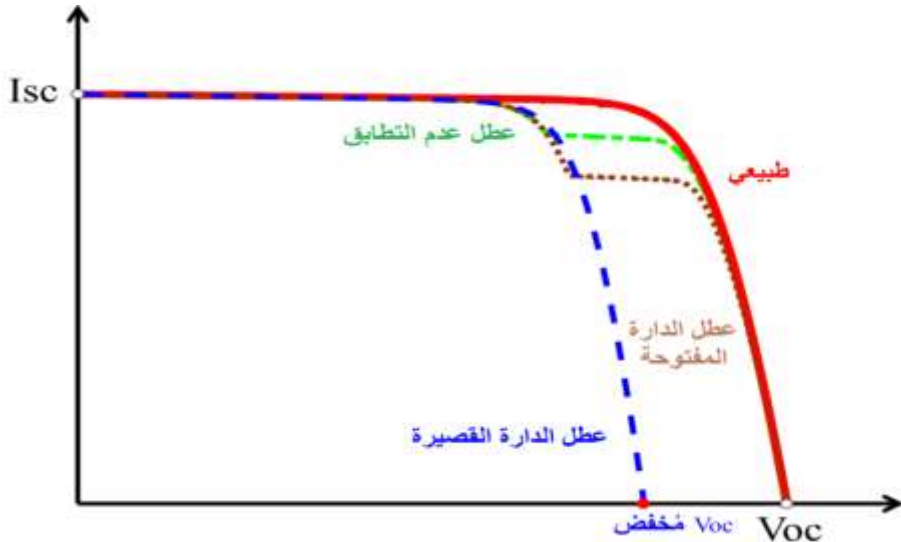


الشكل (15) أبرز الأعطال التي قد تحصل في المصفوفة الكهروضوئية (عند طرف التيار المستمر) [25].



الشكل (16) الأعتال النموذجية في نظام كهروضوئي مُتصل مع شبكة عامة [26].

تؤثر الأنواع المختلفة للأعتال على النظام الكهروضوئي في جوانب مُختلفة (على سبيل المثال اختلاف الجهد والتيار واستطاعة خرج النظام الكهروضوئي)، وبالتالي تنتج قيم بارامترات خرج ومُنحنيات خواص (P-V) و (I-V) مُختلفة [27]. يُبين الشكل (17) مُنحنيات الخواص (I-V) للمصفوفة الكهروضوئية لأجل أبرز أنواع الأعتال.



الشكل (17) مُنحنيات (I-V) للمصفوفة الكهروضوئية لأجل أبرز الأعتال [27].

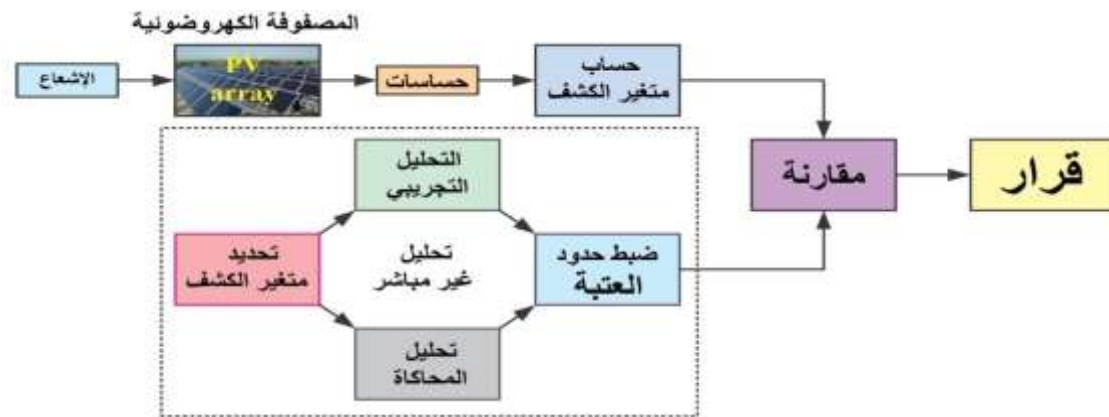
الهدف الأساسي من البحث هو تشخيص واكتشاف الأعتال اعتماداً على مراقبة تغير قيم الاستطاعة في الزمن الحقيقي. عند تجاوز التغير في قيمة الاستطاعة لقيمة العتبة يتم بدء عملية التشخيص واتخاذ القرار بالتدخل السريع، كما مُوضح بالشكل (18). يُمكن تحديد عطل خط - خط وعطل الدارة المفتوحة من خلال معرفة عدد الألواح المُعطلة، حيث تم هنا تعريف المتغير $\Delta\alpha$ كتابع للتغير في الاستطاعة ΔP_{PV} . يتم هنا مُراقبة جهود المصفوفة PV

عند نقطة الاستطاعة الأعظمية قبل وبعد العطل بواسطة حساسات الجهد. يُفيد مراقبة تغيرات $\Delta\alpha$ وتجاوز حدود العتبة في التنبؤ بحدوث عطل خط - خط. لم يتم التعامل مع أعطال خط - أرض بشكل منفصل في هذا البحث، لكن تم اعتبارها حالة خاصة من أعطال خط-خط مع الأرض (النظام مؤرض).

$\Delta\alpha$ هي تغير قيمة استطاعة الخرج للمصفوفة PV في الزمن الحقيقي، ويُعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$\Delta\alpha = \Delta P_{PV} = (V_{PV1} \times I_{PV1}) - (V_{PV2} \times I_{PV2}) \quad (6)$$

حيث V_{PV1} و I_{PV1} يمثلان جهد و تيار خرج المصفوفة الكهروضوئية قبل حدوث العطل، على التوالي، أما V_{PV2} و I_{PV2} فيمثلان جهد و تيار خرج المصفوفة الكهروضوئية بعد حدوث العطل، على التوالي. وحدة $\Delta\alpha$ هي الواط.



الشكل (18) طريقة قياس التغير في الاستطاعة لكشف العطل في الزمن الحقيقي [28].

النتائج والمناقشة:

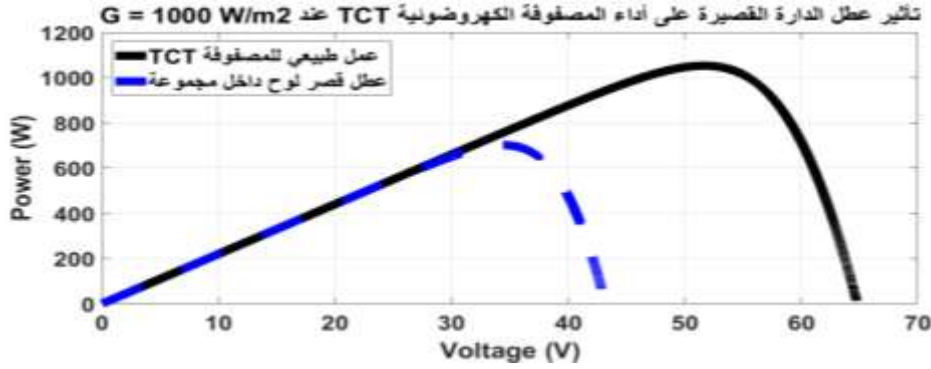
1- اكتشاف وتشخيص الأعطال الدائمة (أعطال الدارة القصيرة والدارة المفتوحة):

1-1- أعطال الدارة القصيرة - حالة قصر لوح كهروضوئي داخل مجموعة:

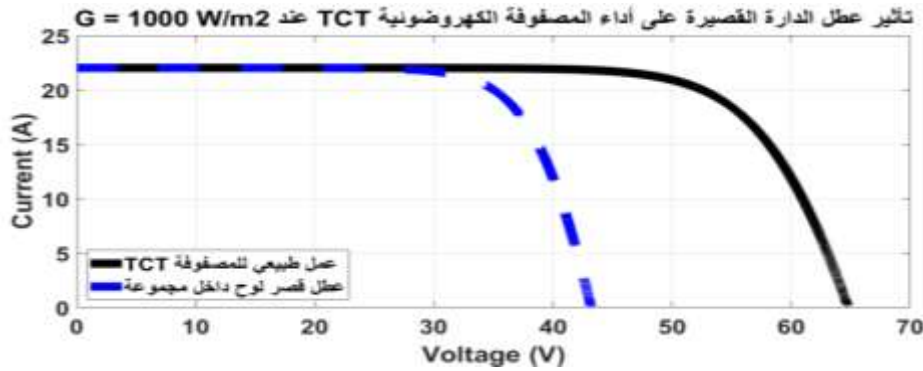
لأجل التشكيل التقاطعي الكلي/المتكامل (TCT)، إذا وقع عطل الدارة القصيرة داخل مجموعة، ستصبح هذه المجموعة كلياً بحالة دارة قصيرة، وبالتالي سيمر التيار عبر فرع الدارة القصيرة. يؤثر عطل الدارة القصيرة بشكل كبير على قيم بارامترات المصفوفة الكهروضوئية.

لقد قمنا هنا بتحليل حالة قصر خط - خط للوح الشمسي (قصر لوح مع الأرض الممثل بالعطل #1 في الشكل (16)) بمساعدة المنحني (P-V)، المحدد عند شروط الاختبار القياسية (STC)، والمُبين في الشكل (19,a). لقد تم النظر هنا إلى جهد المصفوفة عند نقطة الاستطاعة الأعظمية قبل وبعد العطل، حيث يكون الجهد بعد العطل عند هذه النقطة أقل من الجهد قبل العطل. بعد حدوث هذا العطل يُصبح الفرق في الاستطاعة المُقدمة من المصفوفة، بعد العطل وقبله، عند نقطة الاستطاعة الأعظمية مساوياً إلى 350W، أي ما يُعادل ثلاثة أضعاف الاستطاعة الأعظمية للوح الواحد. هذا التغير في الاستطاعة يُحدد التغير في قيمة $\Delta\alpha$ الذي يُساوي 350W في هذه الحالة، وفقاً للعلاقة (6). بناءً على ذلك، يُمكن التعرف على عطل خط - خط عند وجود لوح واحد مقصور خارج عن العمل في المجموعة من خلال تغير قيمة $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha \geq 350W$). تجريبياً، تتغير قيمة $\Delta\alpha$ قبل حدوث العطل بشكل طفيف مع تغير شدة الإشعاع الشمسي، لكن عند لحظة حدوث العطل تتغير $\Delta\alpha$ بشكل حاد (من 1053W إلى 701W). وبالتالي، يكون

مقدار التغيير عند حدوث العطل هو $\Delta\alpha = 352W$ ، وهو أكبر من العتبة المحددة سابقاً عند الشروط القياسية والبالغة 350W.



الشكل (19, a) المنحني (P-V) على خرج المصفوفة PV ذات التشكيل (TCT) عند قصر لوح PV داخل مجموعة.

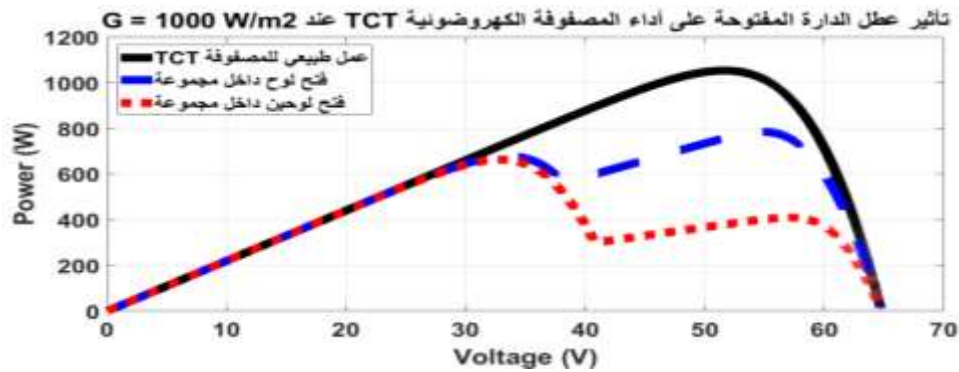


الشكل (19, b) المنحني (I-V) على خرج المصفوفة PV ذات التشكيل (TCT) عند قصر لوح PV داخل مجموعة.

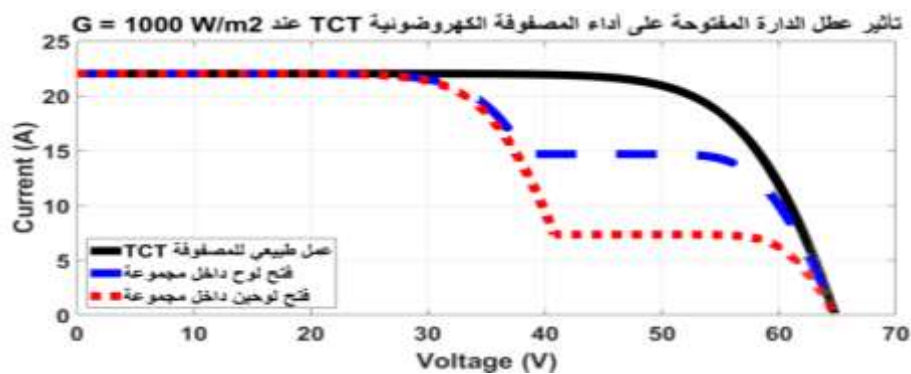
1-2- أعطال الدارة المفتوحة (حالة فتح لوح كهروضوئي أو لوحين داخل مجموعة):

عند حدوث عطل دارة مفتوحة داخل اللوح الكهروضوئي، يُنشط ديود التمرير الموصول على التفرع مع اللوح، الأمر الذي يجعل تيار المجموعة الكلي مُنخفضاً نتيجة عطل اللوح الكهروضوئي. يؤدي نقصان هذا التيار إلى كبح التيار المار إلى المجموعات الأخرى المتصلة على التسلسل. وبناءً على ذلك، ستتأثر استطاعة المصفوفة الكهروضوئية، وستظهر نقطة انعطاف بالمقارنة مع منحنى العمل عند ظروف التشغيل الطبيعية.

يُبين الشكل (20, a, b) منحنيات الخواص (P-V) و (I-V) للمصفوفة الكهروضوئية عند حدوث عطل فتح لوح أو لوحين (خروج لوح أو لوحين عن العمل) في النظام المدروس، نلاحظ من هذه الأشكال انخفاض استطاعة المصفوفة نتيجة لحدوث عطل داخل المجموعة. قيمة $\Delta\alpha$ في هذه الحالة تساوي 268W. بناءً على ذلك، يُمكن التعرف على عطل فتح لوح (خروجه عن العمل) في المجموعة من خلال الانخفاض المفاجئ في قيمة $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha \geq 260W$). تجريبياً، تتغير قيمة $\Delta\alpha$ بشكل طفيف قبل حدوث العطل، أما عند حدوث العطل (فتح لوحين داخل المجموعة) فهي تتغير إلى القيمة 389W. لذلك، يُفيد مراقبة تغيرات $\Delta\alpha$ اللحظية في الكشف عن الأعطال الدائمة (أعطال الدارة المفتوحة والدارة القصيرة).



الشكل (20, a) المنحني (P-V) على خرج المصفوفة PV ذات التشكيل (TCT) عند فتح لوح PV داخل مجموعة.

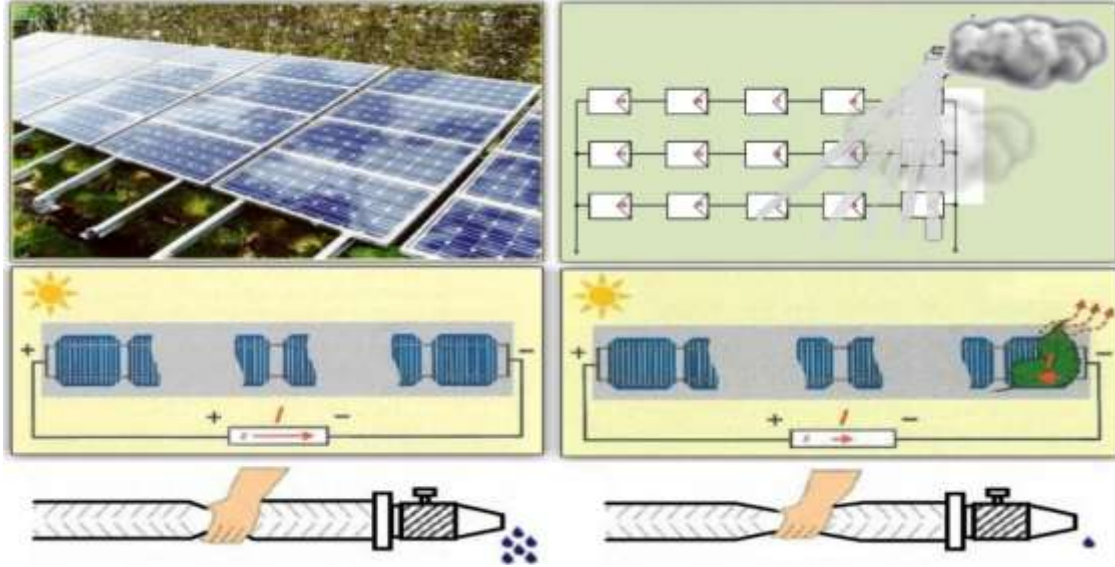


الشكل (20, b) المنحني (I-V) على خرج المصفوفة PV ذات التشكيل (TCT) عند فتح لوح PV داخل مجموعة.

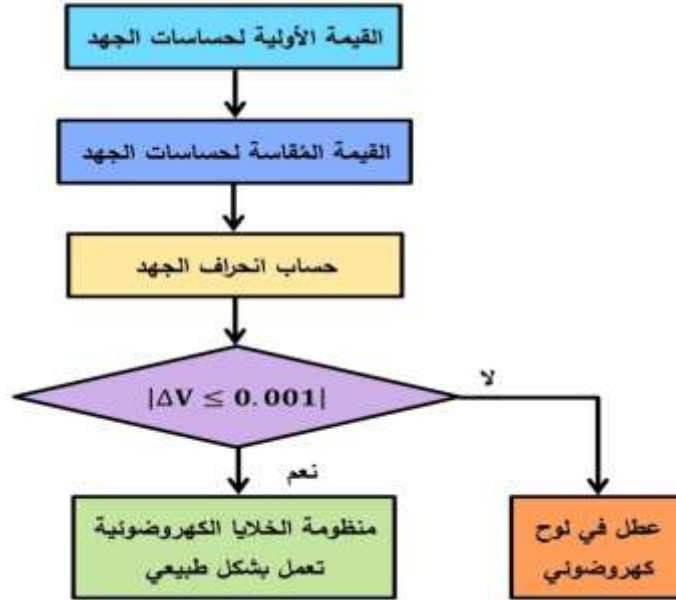
2- اكتشاف وتشخيص الأعطال المؤقتة (أعطال التظليل / عدم التطابق):

تحدث أعطال عدم التطابق عن طريق ربط خلايا PV أو ألواح لا تملك خصائص متطابقة أو تُواجه ظروف عمل (تظليل) مختلفة، ويُلاحظ تأثير حالات التظليل عن طريق تغيير كثافة الإشعاع على الألواح PV. لأجل وصل الألواح الكهروضوئية بطريقة التشكيل التسلسلي - تفرعي (SP)، المبينة في الشكل (21)، تشكل كل سلسلة منبع تيار واحد، لذا عند حدوث تظليل على أي لوح ضمن السلسلة الكهروضوئية يُؤثر ذلك على معدل تدفق الاستطاعة المنتجة وتُشكل بُقع ساخنة تُسبب فيما بعد بانهايار المنظومة الكهروضوئية، بينما يُعطي وصل الألواح الكهروضوئية بطريقة التشكيل التقاطعي الكلي/المُتكامِل (TCT) أكبر استطاعة مُمكنة من الألواح عند التظليل لأن كل لوح كهروضوئي يُمثل منبع تيار مستقل.

يتم كشف أعطال التظليل وتحديد مكانها كما يلي: عند العمل الطبيعي وخلال شروط الاختبار القياسية، عند درجة حرارة 25°C وشدة إشعاع شمسي 1000 W/m²، يتم قياس جهد كل لوح كقيمة مرجعية بشكل أولي، عندما تُصبح بعض خلايا المصفوفة الكهروضوئية مُظلمة جزئياً أو كلياً ينخفض تيارها واستطاعة خرجها، في هذه الحالة يتم قياس الجهد لكل لوح وحساب انحراف الجهد عند حدوث التظليل. عندما يكون هذا الانحراف في الجهد ضمن حدود العتبة (|ΔV| ≤ 0.001) تكون المنظومة بحالة عمل طبيعي، أما عند يتجاوز هذا الانحراف في الجهد حدود العتبة يتم تشخيص الحالة على أنها حالة عطل تظليل. يُبين الشكل (22) المُخطط الانسيابي لخوارزمية كشف الأعطال المؤقتة.

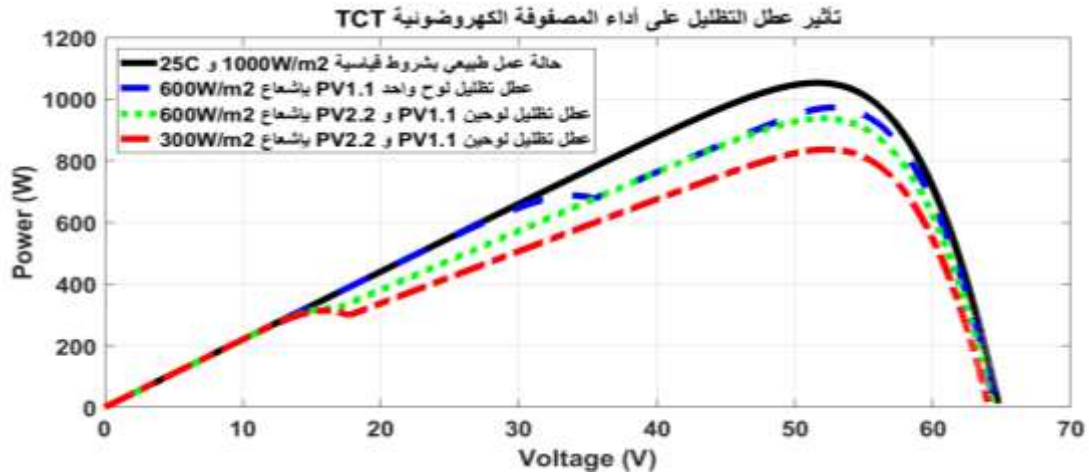


الشكل (21) تمثيل حالة التظليل الجزئي على الألواح الكهروضوئية [29].

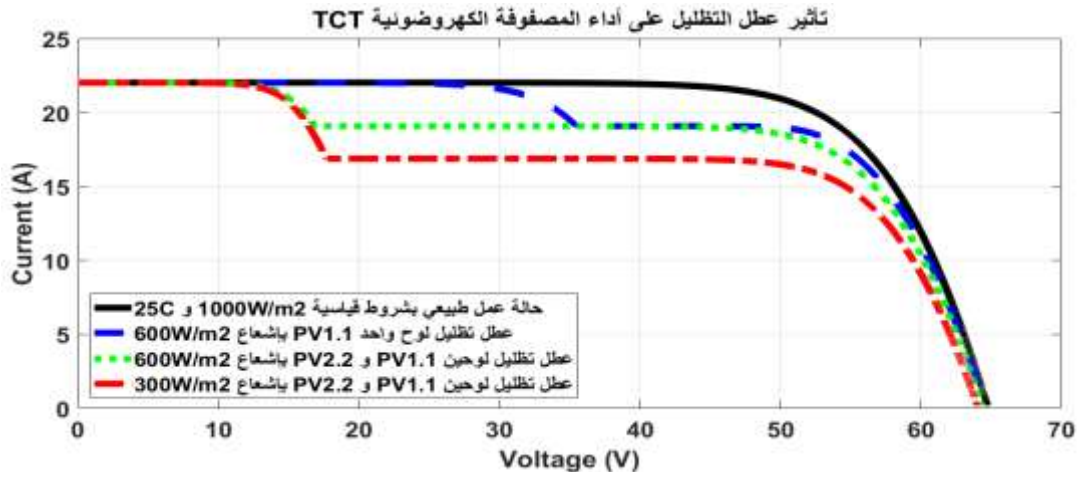


الشكل (22) المخطط الانسيابي لخوارزمية كشف عطل التظليل.

نلاحظ من الشكلين (23,a,b) أنه عند حدوث عطل تظليل في المصفوفة الكهروضوئية ينخفض تيار الخرج والاستطاعة الأعظمية لخرج المنظومة، ويستمر هذا الانخفاض مع زيادة التظليل. لكن تبين لنا أن ربط المصفوفة الكهروضوئية بطريقة التقاطع الكلي/المتكامل (TCT) له أفضلية على طريقة الربط التسلسلي- التفرعي عند حدوث التظليل الجزئي للألواح وذلك من حيث قيمة استطاعة الخرج وتقليل ظاهرة التسخين الناتجة عن تظليل الألواح، وبالتالي يتم الحصول على معدل عائدات استثمار أكبر وزيادة عمر الألواح الشمسية.



الشكل (23, a) المنحني (P-V) على خرج المصفوفة الكهروضوئية ذات التشكيل TCT عند أعطال تظليل مختلفة.



الشكل (23, b) المنحني (I-V) على خرج المصفوفة الكهروضوئية ذات التشكيل TCT عند أعطال تظليل مختلفة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1- لقد تم في هذا البحث تقديم طريقة تعتمد على مراقبة التغير في قيمة الاستطاعة والانحراف في الجهد لكشف وتشخيص أعطال المصفوفة الكهروضوئية ذات التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT)، وتم التمييز من خلالها بين حالة العمل الطبيعي والأعطال.
- 2- هناك تأثير كبير للأعطال المختلفة على منحنيات الخرج المختلفة لمنظومة الخلايا الكهروضوئية ذات التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT)، كاختلاف الجهد والتيار والاستطاعة، وبالتالي هناك تأثير على كفاءة هذه المنظومة وأدائها مقارنة بطريقة التشكيل التسلسلي - التفرعي للمصفوفة الكهروضوئية.
- 3- ينخفض خرج المصفوفة الكهروضوئية مع زيادة درجة التظليل في حالة التشكيل التسلسلي - التفرعي للمصفوفة الكهروضوئية، في حين يكون هذا الانخفاض أقل في حالة التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT).
- 4- لقد تم كشف أعطال الدارة القصيرة والدارة المفتوحة في منظومة الخلايا الكهروضوئية ذات التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT) من خلال مراقبة تغيرات قيمة الاستطاعة، التي تزداد مع ازدياد عدد الألواح المعطلة.

5- لقد تم كشف أعطال التظليل لكل لوح كهروضوئي في منظومة الخلايا الكهروضوئية ذات التشكيل بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT) من خلال مراقبة انحراف الجهد لكل لوح مُعطل.

التوصيات:

1- يُوصى بتشكيل المصفوفات الكهروضوئية بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT)، في محطات التوليد الكهروضوئية المُستقلة أو الهجينة، لما لهذا التشكيل من تسامح أكبر مع بيئة العمل وأثر كبير في رفع كفاءة المحطات الكهروضوئية ولعوائدها الاستثمارية، وبالأخص في حالة تأثير الظروف الخارجية مثل انخفاض الإشعاع الشمسي وحدوث التظليل

2- يُوصى بتصميم وتشغيل نظام تحكم مع حساسات لمراقبة حالات عمل منظومة الخلايا الكهروضوئية، لما له من أثر كبير على عمليات كشف وتشخيص الأعطال في هذه المنظومة.

3- يُوصى بتدريب كادر فني مُختص على عمليات التدخل السريع والصيانة، مما يُقلل زمن خروج المنظومة عن العمل، وتفاقم حُطورة الآثار الناتجة عن الأعطال.

الخاتمة:

تتعرض الأنظمة الكهروضوئية إلى العديد من الأعطال التي تُقلل من كفاءة أداءها وعائدات الاستثمار لها، والتي قد تؤدي إلى نتائج خطيرة تتعلق بالسلامة العامة. لضمان عمل الأنظمة الكهروضوئية في حالة أمان وموثوقية عالية لا بُد من اكتشاف الأعطال بأسرع وقت تفادياً للأضرار الناتجة عنها. لقد تم في هذا البحث تقديم طريقة لاكتشاف أعطال المصفوفة الكهروضوئية تعتمد على مراقبة التغير في قيمة الاستطاعة والانحراف في الجهد في الزمن الحقيقي. لقد تم اختبار أداء هذه الطريقة على مصفوفة كهروضوئية، تم تشكيلها بطريقة التقاطع الكلي/المُتكامل (TCT) باستخدام البرنامج MATLAB/SIMSCAPE، لما لهذا التشكيل من أفضلية تسامح أكبر مع بيئة العمل. لقد أظهرت نتائج النمذجة والمحاكاة أن للطريقة المقدمة المقدرة على اكتشاف الأعطال في المنظومة الكهروضوئية بدقة وكفاءة عاليتين.

المراجع:

[1] إدريس أيمن؛ الرمحين جبر؛ القادري محمد منذر. نمذجة ومحاكاة لاقط كهروضوئي في بيئة الحزمة البرمجية LABVIEW. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية المجلد الثامن والعشرون، العدد الثاني، 2012.

[2] Van der Hoeven, M. *Technology Roadmap-Solar Photovoltaic Energy*; International Energy Agency: Köln, Germany, 2014.

[3] Köntges, M.; Kurtz, S.; Jahn, U.; Berger, K.; Kato, K.; Friesen, T.; Van Iseghem, M. *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. In International Energy Agency (IEA) PVPS Task 13; IEA: Köln, Germany, 2014.

[4] N.D. Kaushika, Anil K. Rai, "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks," *Energy*, Vol. 32, pp. 755-759, 2007.

[5] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho, *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*, IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 24,

[6] Po-Wen Hsiao, Chih-Hao Chang, Huan-Liang Tsai, *Accuracy Improvement of Practical PV Model*, SICE Annual Conference 2010, Taipei, Taiwan, pp. 2725-2730.

- [7] Soliman A. Mahmoud, Mejd M. Alsari, Esra I. Reda, and Ruqiya M. Alhmmadi, *MATLAB Modeling and Simulation of Photovoltaic Modules*, IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2012, pp. 786-789.
- [8] www.mathworks.com.
- [9] Li Changsong, *Development of Simscape Simulation Model For Power System Stability Analysis*, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012, pp.1-4.
- [10] Vandana Khanna, Bijoy Kishore Das, Dinesh Bisht, *MATLAB/SIMELECTRONICS Models Based Study of Solar Cells*, International Journal of Renewable Energy Research, 2013, pp. 30-34.
- [11] Hak-Gyun Jeong, Jae-Sub Ko, Jin-Gook Lee, Da-Eun Jeong, Dae-Kyong Kim, Dong-Hwa Chung, "Development of Active Module Considering the Shadow Influence of Photovoltaic System", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2012, Seoul, Korea, pp. 1362-1365.
- [12] Chouder, A.; Silvestre, S. *Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis*. Energy Convers. Manag. 2010, 51, 1929–1937; doi:10.1016/j.enconman.2010.02.025.
- [13] Silvestrea, S.; Chouderb, A.; Karatepec, E. *Automatic fault detection in grid connected PV systems*. Sol. Energy 2013, 94, 119–127; doi:10.1016/j.solener.2013.05.001.
- [14] Firth, S.K.; Lomas, K.J.; Rees, S.J. *A simple model of PV system performance and its use in fault detection*. Sol. Energy 2010, 84, 624–635; doi:10.1016/j.solener.2009.08.004.
- [15] Alonso-Garcia, M.C.; Ruiz, J.M.; Chenlo, F. *Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module*. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2006, 90, 329–340.
- [16] Lin, X.; Wang, Y.; Zhu, D.; Chang, N.; Pedram, M. *Online Fault Detection and Tolerance for Photovoltaic Energy Harvesting Systems*. In Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design, San Jose, CA, USA, 5–8 November 2012; pp. 1–6.
- [17] Drews, A.; Keizer, A.C.D.; Beyer, H.G.; Lorenz, E.; Betcke, J.; Van Sark, W.G.J.H.M.; Heydenreichd, W.; Wiemkend, E.; Stettlere, S.; et al. *Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations*. Sol. Energy 2007, 81, 548–564; doi:10.1016/j.solener.2006.06.019.
- [18] Laamami, S.; Benhamed, M.; Sbita, L. "Artificial Neural Network- based Fault Detection and Classification for Photovoltaic System" 2017.
- [19] Hazra, A.; Das, S.; Basu M. "An efficient fault diagnosis method for PV systems following string current" Journal of Cleaner Production 2017. 10.1016/j.jclepro.2017.03.214
- [20] D.L. King, J.A. Kratochvil, M.A. Quintana, T.J. McMahon, "Applications for infrared imaging equipment in photovoltaic cell, module, and system testing," IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1487-1489, 2000.
- [21] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying-Principles and Applications*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [22] John Wiley & Sons, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Stanford University, INC.2004.
- [23] Mohammed I, Shadi M, Mohammed M, Eid A. *Simscape solar cells model analysis and design*. Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy, 2014.
- [24] Boujemaa, M.; Rachid C. "Different methods of modeling a photovoltaic cell using Matlab /Simulink/Simscape", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 6, June-2014 671 ISSN 2229-5518.

- [25] Y. Zhao, "FAULT DETECTION, CLASSIFICATION AND PROTECTION IN SOLAR PHOTOVOLTAIC ARRAYS" ,Doctor thesis, August 2015.
- [26] Y. Zhao, B. Lehman, R. Ball, J. Mosesian and J.F. de Palma, "Outlier detection rules for fault detection in solar photovoltaic arrays," 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp.2913-2920, March 17-21, 2013.
- [27] Ji, D.; Zhang, C.; Lv, M.; Ma, Y.; Guan N. "Photovoltaic Array Fault Detection by Automatic Reconfiguration", Energies, 2017.
- [28] D.S. Pillai, N. Rajasekar "A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PV systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 91, August 2018, Pages 18-40.
- [29] Romano, G. C. Giaconia, E. Riva Sanseverino, L. Mistretta, V. Li Vigni, F. Viola. "New Technologies in Photovoltaic Technology: Reconfiguration Systems for Photovoltaic Plants" Palermo University – DEIM Scuola Politecnica, Hanoi Vietnam 2015.