

New Algorithm for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems based on Fuzzy Logic

Dr. Massoud Spaih*
Dr. Nesmat Abu Tabak**
Ali Haji Ogli***

(Received 29 / 3 / 2017. Accepted 2 / 11 / 2017)

□ ABSTRACT □

Maximum Power Point Tracking is one of the most important issues which earns the attention of researchers because of the low efficiency and high prices of the photovoltaic cells.

The present paper proposes a new maximum power point tracker (MPPT) algorithm, applied to a photovoltaic system composed of photovoltaic arrays, boost DC-DC converter, and resistive load.

The new algorithm based on Fuzzy logic, the rules of Fuzzy logic controller (FLC) are determined depending on the voltage and current deviation. Then, the output signal is modified according to the power deviation.

The simulation has been accomplished in MATLAB/SIMULINK software. Simulation results compared with those obtained by the conventional perturbation and observation (P&O) algorithm show the effectiveness of the new method during steady-state and varying weather conditions.

Keywords: Photovoltaic Systems (PVs), Maximum Power Point, Fuzzy Logic (FL), Perturb-And-Observe(P&O), PV model, Boost Converter.

*Professor, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

** Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen university, Syria.

***Postgraduate Student, Department of electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

خوارزمية جديدة لتتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية في الأنظمة الكهروضوئية بالاعتماد على المنطق الضبابي

د. مسعود صبيح*

د. نسيم أبو طيق**

علي حاجي اوغلي***

(تاريخ الإيداع 29 / 3 / 2017. قُبل للنشر في 2 / 11 / 2017)

□ ملخص □

نالت مسألة تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT) Maximum Power Point Tracking اهتمام الباحثين نظراً لارتفاع أسعار الخلايا الكهروضوئية وانخفاض مردودها. نقترح في هذا البحث خوارزمية جديدة لتتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية لنظام كهروضوئي يتألف من ألواح كهروضوئية، مع مقطع رافع Boost Converter، وحمل أومي. تعتمد الخوارزمية المقترحة على استخدام التغير بالجهد و التغير بالتيار كمتحولات دخل لمتحكم المنطق الضبابي (Fuzzy logic controller) الذي توضع قواعده بالاعتماد عليهما، ثم إجراء تعديل على إشارة الخرج للمتحكم بالاعتماد على التغير بالاستطاعة. تمت النمذجة و المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK، ثم قمنا بمقارنة النتائج مع النتائج التي حصلنا عليها عند تطبيق خوارزمية الاضطراب و المراقبة (Perturb-and-Observe (P&O الأكثر انتشاراً و تبين لدينا فعالية الخوارزمية المقترحة من أجل شروط مختلفة للإشعاع الشمسي و درجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الكهروضوئية، نقطة الاستطاعة الأعظمية، المنطق الضبابي، الاضطراب و المراقبة، نموذج الخلية الكهروضوئية، المقطع الرافع.

* أستاذ - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** مدرس - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

مع ازدياد الطلب على الطاقة وظهور مفهوم الاستدامة الذي تسعى أغلب المجتمعات للوصول إليه، لاقت الأنظمة الكهروضوئية انتشاراً واسعاً، وقد نالت مسألة تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية لهذه الأنظمة حيزاً كبيراً من الاهتمام لما لها من اثرٍ ايجابيٍّ على رفع كفاءة المنظومة و خفض كلفتها الاقتصادية، إضافة لإسهامها في تخفيض المساحة المطلوب تغطيتها بالألواح الشمسية من أجل منظومة معينة.

تعددت التقنيات المستخدمة في تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية للأنظمة الكهروضوئية، فتم في البداية اعتماد طرقٍ تقريبيةٍ بسيطةٍ تعتبر العلاقة خطيةً بين الجهد عند نقطة الاستطاعة الأعظمية و جهد العمل على فراغ، أو بين التيار عند نقطة الاستطاعة الأعظمية و تيار القصر [1,2]، أو بين التيار عند نقطة الاستطاعة الأعظمية و شدة الإشعاع الشمسي [2]، أو علاقات رياضية أكثر دقة تربط الجهد و التيار عند نقطة الاستطاعة الأعظمية مع درجة الحرارة و شدة الإشعاع الشمسي [2]، ثم ظهرت خوارزميات متعددة كتسلسل الهضبة [2,3]، و الاضطراب و المراقبة Incremental Conductance Perturb-And-Observe(P&O) [1,2,3,4]، و نظرية الناقلية التزايدية (IncCon) [1,3,5]، وصولاً إلى استخدام تطبيقات الذكاء الاصطناعي كالشبكات العصبونية [1,3,6]، و المنطق الضبابي [1,3,7].

بالرغم من بساطة نظرية الاضطراب و المراقبة (التي سنتحدث عنها بالتفصيل) و نظرية تسلسل الهضبة إلا أن لهما سيئة مشتركة وهي تأرجح نقطة العمل حول نقطة الاستطاعة الأعظمية، إضافة لإمكانية ضياع نقطة العمل والابتعاد عن نقطة الاستطاعة الأعظمية عند حدوث تغير بشدة الإشعاع الشمسي [1,2]، كما أن اعتماد خوارزمية الناقلية التزايدية على المشتق في عملها يخفض من أدائها عند سويات منخفضة للإشعاع الشمسي، إضافة لاحتياجه العدد كبير من الحساسات الأمر يجعلها أكثر تعقيداً و أقل فعالية من الناحية الاقتصادية مقارنة بنظرية الاضطراب والمراقبة [1,2].

إن اختلاف مميزة الخرج من لوح شمسي لآخر و الكم الكبير من البيانات المطلوبة عند سويات مختلفة للإشعاع الشمسي و درجة الحرارة يزيد من الكلفة الاقتصادية عند استخدام الشبكات العصبونية في عملية التتبع مقارنة بغيرها، و هو ما يعتبر من أهم سيئاتها بالإضافة إلى الحاجة لتدريب الشبكة بشكل دوري بسبب تغير خصائص اللوح الشمسي مع الزمن [2,8].

يبرز المرجع [9] ست خوارزميات لتتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية جميعها تعتمد على المنطق الضبابي، إلا أن مساوئها تتباين ما بين اعتمادها على عملية القسمة في حساب متغيرات الدخل أو عدم قدرتها على تحديد موقع نقطة العمل أثناء تغير قيمة الإشعاع الشمسي.

نقترح في هذا البحث استخدام التغير بالجهد و التغير بالتيار كمدخلات لمنطق الضبابي، ثم إجراء تعديل على إشارة الخرج وفقاً لتغير الاستطاعة لتكون بذلك قد صممت خوارزمية جديدة لا تعتمد على عملية القسمة في حساب متغيرات الدخل للمتحكم و قادرة على تحديد موقع نقطة العمل أثناء تغير شدة الإشعاع الشمسي.

إثبات صحة أي من الخوارزميات غالباً ما يتم عن طريق تصميم نموذج للألواح الشمسية مع مقطع DC/DC و حمل أومي، ثم إجراء تغيرات في قيمة الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة و مراقبة قيمة الاستطاعة المسحوبة من الألواح و مقارنتها مع قيمتها عند استخدام نظرية الاضطراب و المراقبة الأكثر انتشاراً، و هو الأمر الذي سنقوم به في هذا البحث.

أهمية البحث و أهدافه:

إن أي تحسين في خوارزميات تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية سيسهم بشكلٍ فعالٍ في رفع مردود الخلايا الشمسية، و يزيد من انتشارها و هذا الأمر سينعكس إيجاباً على انتشار الطاقات المتجددة صديقة البيئة على حساب الطاقات التقليدية، و يمكن تلخيص أهداف البحث بالتأكد من قدرة الخوارزمية المقترحة على:

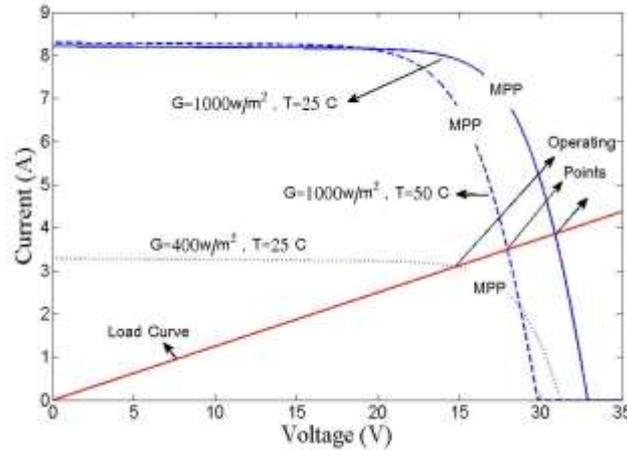
- 1- تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية عند الحالة المستقرة ومن أجل سويات مختلفة لشدة الإشعاع الشمسي.
- 2- تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية عند التغير المفاجئ في قيمة الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة.
- 3- تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية عند التغير التدريجي في قيمة الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة.
- 4- تحديد موقع نقطة العمل في اللحظة التي يحدث فيها تغيير في شدة الإشعاع الشمسي.

طرائق البحث و مواده:

1- منحنى الخرج للخلية الشمسية و نقطة العمل:

تملك الخلية الشمسية منحنى خرج لا خطي يتعلق بعوامل عدة كدرجة الحرارة و شدة الإشعاع الشمسي [1,3] كما هو موضح بالشكل (1).

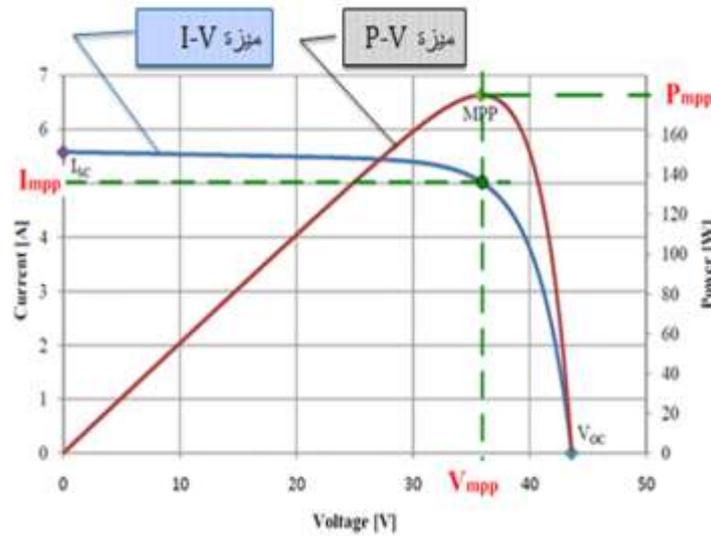
تحدد نقطة العمل في الأنظمة الكهروضوئية من تقاطع منحنى الحمل (Load curve) مع منحنى الخرج (I-V) للخلية الشمسية [10].



الشكل (1) أثر تغير درجة الحرارة و شدة الإشعاع الشمسي على موقع نقاط العمل

2- مفهوم نقطة الاستطاعة الأعظمية:

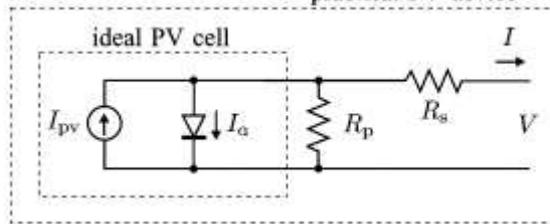
تعرف نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPP) بأنها النقطة الموافقة لأعظم استطاعة خرج يمكن الحصول عليها من مصفوفة الخلايا الكهروضوئية [1,3,11]، و تمثل مساقطها على مميزة (الجهد - التيار) جهد نقطة الاستطاعة الأعظمية V_{mpp} و تيار نقطة الاستطاعة الأعظمية I_{mpp} ، كما يوضح الشكل (2).



الشكل (2) نقطة الاستطاعة الأعظمية

3- نموذج اللوح الشمسي:

يمثل الشكل (3) الدارة المكافئة للخلية الشمسية حيث يشير منبع التيار I_{pv} الى التيار الذي تولده الفوتونات. وتشير كل من المقاومات R_p و R_s الى المقاومة التسلسلية و التفرعية للخلية الشمسية على التوالي.



الشكل (3) الدارة المكافئة للخلية الشمسية

أما رياضياً وبالأخذ بعين الاعتبار ربط الخلايا الشمسية تسلسلياً و تفرعياً عند تشكيل الألواح الشمسية فإنه يمكن توصيف الموديل العام للوح الشمسي بالمعادلات [12]:

$$I_{pv} = \left[I_{pv,n} + K_i(T - T_r) \right] * \frac{G}{G_n} \quad (1)$$

حيث:

I_{pv} (A): التيار الذي يولده الضوء مباشرة بسقوطه على مصفوفة الخلايا الشمسية.

$I_{pv,n}$ (A): التيار الذي يولده الضوء مباشرة بسقوطه على مصفوفة الخلايا الشمسية عند درجة الحرارة و

الإشعاع الشمسي المرجعيين.

K_i ($A/^\circ C$): معامل زيادة تيار القصر الناتج عن زيادة درجة الحرارة .

T (K): درجة حرارة مصفوفة الخلايا الشمسية بالكلفن.

T_r (K): درجة حرارة مصفوفة الخلايا الشمسية المرجعية.

G (W/m^2): شدة الإشعاع الشمسي.

G_n (W/m^2): قيمة الإشعاع الشمسي المرجعية.

$$I_0 = \frac{I_{SC,n} + K_i(T - T_r)}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_v(T - T_r)}{a N_s K T}\right) - 1} \quad (2)$$

$V_{oc,n}$ (V): جهد العمل على فراغ عند درجة الحرارة و الإشعاع الشمسي المرجعيين.

I_0 (A): تيار الإشباع للموديل متغيراً وفقاً لدرجة الحرارة.

$I_{sc,n}$ (A): تيار القصر الاسمي.

q (C): شحنة الإلكترون $1.6 * 10^{-19} c$.

N_s : عدد الخلايا الشمسية المربوطة تسلسلياً.

K (J/K): ثابت بولتزمان $1.3805 * 10^{-23} J/K$.

K_v (V/°C): معامل تغير جهد العمل على فراغ الناتج عن تغير درجة الحرارة.

E_{go} (eV): طاقة الانتزاع للمادة نصف الناقلة، و من أجل السيليكون فإن $E_{go} = 1.1$ (eV).

a : معامل الحالة المثالية.

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{a N_s K T}\right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3)$$

I (A): تيار الخرج لمصفوفة الخلايا الشمسية.

V (V): جهد الخرج لمصفوفة الخلايا الشمسية.

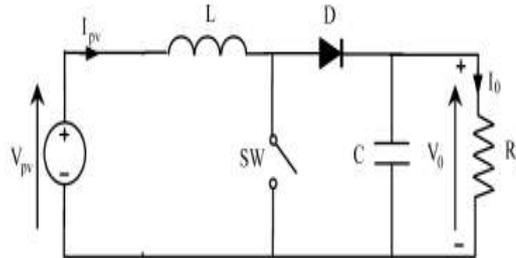
N_p : عدد الخلايا الشمسية التفرعية في مصفوفة الخلايا الشمسية.

4- المقطع الرفع للجهد Boost Converter

يتألف المقطع الرفع [10] من ملف (L)، ديود (D)، مكثف (C)، حمل (R)، ومفتاح الكتروني (SW)،

حيث تربط العناصر السابقة على خرج الألواح الشمسية كما هو موضح بالشكل (4).

من خلال التحكم بنبضة القدر للمفتاح الالكتروني تتحدد لدينا قيمة جهد الخرج للمقطع وفق المعادلة:



الشكل (4) المقطع الرفع للجهد

$$\frac{V_o}{V_{pv}} = \frac{1}{1-D} \quad (4)$$

V_{pv} (V): الجهد على دخل المقطع، رمزنا له بهذا الرمز لأنه يمثل جهد خرج الألواح الكهروضوئية في حالتنا.

V_o (V): الجهد على خرج المقطع و هو جهد الحمل في حالتنا.

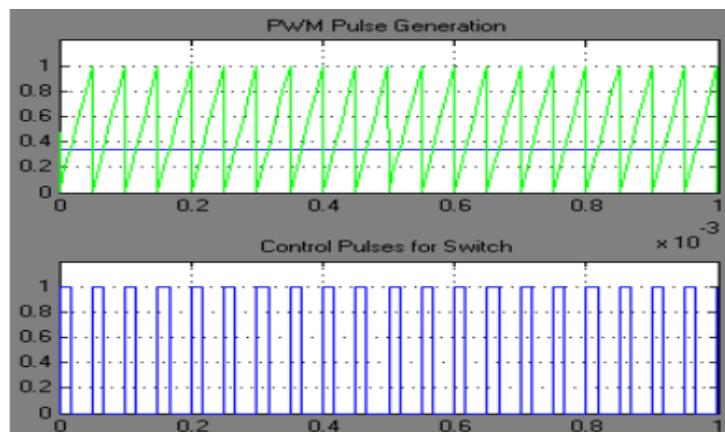
D : نسبة التشغيل (Duty Cycle) و هي تمثل نسبة زمن فتح المفتاح الالكتروني إلى دور الفتح و الإغلاق.

تجد الإشارة إلى أن عملية التحكم بالمفتاح الالكتروني تتم باعتماد التقنية الموضحة بالشكل (5) و

المعروفة بالتعديل العرضي للنبضة (PWM) Pulse width modulation و التي يتم خلالها مقارنة إشارة مثلثية

ذات

تردد f و مطال قيمته تساوي الواحد مع إشارة ثابتة (تمثل نسبة التشغيل D)، و بالتالي فان تعديل قيمة الإشارة الثابتة باتجاه الزيادة أو النقصان سيسمح لنا بتعديل زمن الفتح و الإغلاق للمفتاح الالكتروني [11] و هو الأمر الذي سيتم وفق خوارزمية التتبع المقترحة.



الشكل (5) التعديل العرضي للنابضة (PWM)

يبين المرجع [10] أن وجود مقطع رافع على خرج الألواح الكهروضوئية يكافئ وجود المقاومة R_{in} المحددة بالمعادلة (5):

$$R_{in} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = (1 - D)^2 * R_L \quad (5)$$

حسب المرجع [11] فإنه من الممكن اختيار محارضة الملف L و سعة المكثف C حسب مقدار التموج المطلوب لتيار الدخل و جهد الخرج انطلاقاً من المعادلات التالية:

$$L = \frac{V_{in}}{f_s \Delta I_L} \cdot D \quad (6), C = \frac{I_{out}}{f_s \Delta V_o} \cdot D \quad (7)$$

$V_{in}(V)$: الجهد على دخل المقطع و هو الجهد على خرج مجموعة الألواح الشمسية في حالتنا.

D : النسبة بين زمن فتح المفتاح الالكتروني و دور الفتح و الإغلاق.

$V_o(V)$: الجهد على خرج المقطع و هو جهد الحمل في حالتنا.

$f_s(Hz)$: تردد الفتح و الإغلاق للمفتاح الالكتروني.

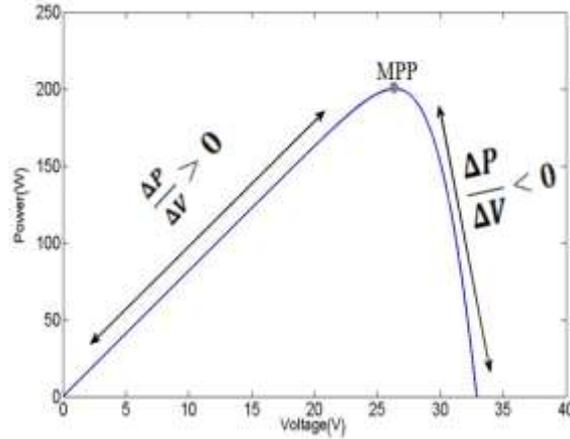
$I_{out}(A)$: التيار على خرج المقطع.

$\Delta I_L(\%)$: معامل تموج تيار الدخل كنسبة مئوية من تيار الخرج.

$\Delta V_o(\%)$: معامل تموج جهد الخرج كنسبة مئوية من قيمة جهد الخرج.

5- خوارزمية الاضطراب و المراقبة:

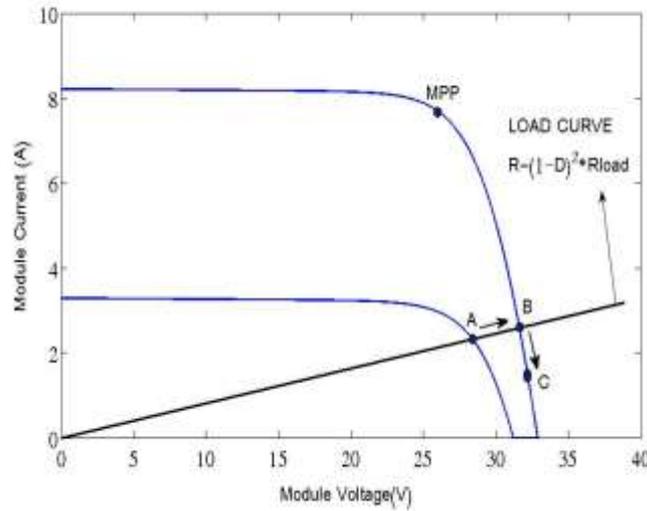
تعتبر من أكثر الطرق انتشاراً نظراً لبساطتها و سهولة تنفيذها إضافة لقلّة الحساسات اللازمة لتصميمها [2,4]، و هي تعتمد على مقارنة التغير بالجهد مع التغير بالاستطاعة من أجل كل دورة فتح و إغلاق للمفتاح الالكتروني، و إعطاء فعل مناسب حسب موقع نقطة العمل، فبالعودة إلى الشكل (6) يتضح أنه إذا كان $\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0$ فهذا يعني أننا على يسار نقطة الاستطاعة الأعظمية و يجب إنقاص نسبة التشغيل (التي تمثل نسبة زمن فتح المفتاح الالكتروني إلى دور الفتح و الإغلاق) بمقدار ΔD ، و إذا كان $\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0$ فهذا يعني أننا على يمين نقطة الاستطاعة الأعظمية و يجب زيادة نسبة التشغيل بمقدار ΔD [4].



الشكل (6) خوارزمية الاضطراب و المراقبة

مناقشة:

انظر الشكل (7) ولنفرض أننا في حالة عمل مستقرة عند مستوى إشعاع شمسي معين، عندها بتطبيق خوارزمية الاضطراب و المراقبة ستكون نقطة العمل (A) و التي تمثل تقاطع منحنى الحمل (التابع لنسبة التشغيل (D) مع منحنى الخرج الحالي للألواح الشمسية قريبة من نقطة الاستطاعة الأعظمية.



الشكل (7) سلوك خوارزمية الاضطراب و المراقبة لحظة ازدياد الإشعاع الشمسي

بفرض حدوث ارتفاع في قيمة الإشعاع الشمسي سنتنقل نقطة العمل إلى النقطة B التي تمثل تقاطع منحنى الحمل مع منحنى الخرج الجديد للألواح الشمسية، عندها سيكون التغير بالجهد والاستطاعة لهما نفس الإشارة، و حسب الخوارزمية فان قيمة ΔD ستكون سالبة، الأمر الذي سيؤدي إلى انتقال نقطة العمل بعيداً عن نقطة الاستطاعة الأعظمية (النقطة C) بدلاً من انتقالها باتجاهها، لتنتقل باتجاهها في المرحلة التالية.

ستكون مناقشة هذا الموضوع اعقد فيما لو أخذنا بعين الاعتبار تأرجح نقطة العمل حول نقطة الاستطاعة الأعظمية و عدم ثباتها، إضافة إلى قيمة التغير بالإشعاع الشمسي و لحظته الزمنية، و هو ما يبينه المرجع [2].

نشير إلى أن قيمة التآرجح حول نقطة الاستطاعة الأعظمية و زمن الوصول إليها عند تطبيق هذه الخوارزمية يتعلقان بقيمة ΔD ، إذ تسهم قيمة كبيرة ل ΔD بتأرجح كبير مقابل زمن أقل للوصول [1,2]، مما يعني استحالة الجمع بين الاستقرار و سرعة الاستجابة للتغيرات بدرجة الحرارة و شدة الإشعاع الشمسي.

6- استخدام المنطق الضبابي في تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية:

استخدمت المتحكمات التي تعتمد على المنطق الضبابي بشكل واسع في عملية تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية في الأنظمة الكهروضوئية نظراً لقدرتها على التعامل مع الأنظمة غير الخطية و عدم الحاجة إلى معرفة النموذج الرياضي بشكل دقيق أثناء استخدامها [1,2].

حسب المرجع [2,13] فإن استخدام المنطق الضبابي في عملية التحكم يقوم على ثلاث خطوات أساسية هي:

1-التضبيب Fuzzification يتم في هذه المرحلة حساب معاملات العضوية لقيم المدخلات العددية للمجموعات الضبابية لكل متحول اعتماداً على توابع العضوية membership functions .

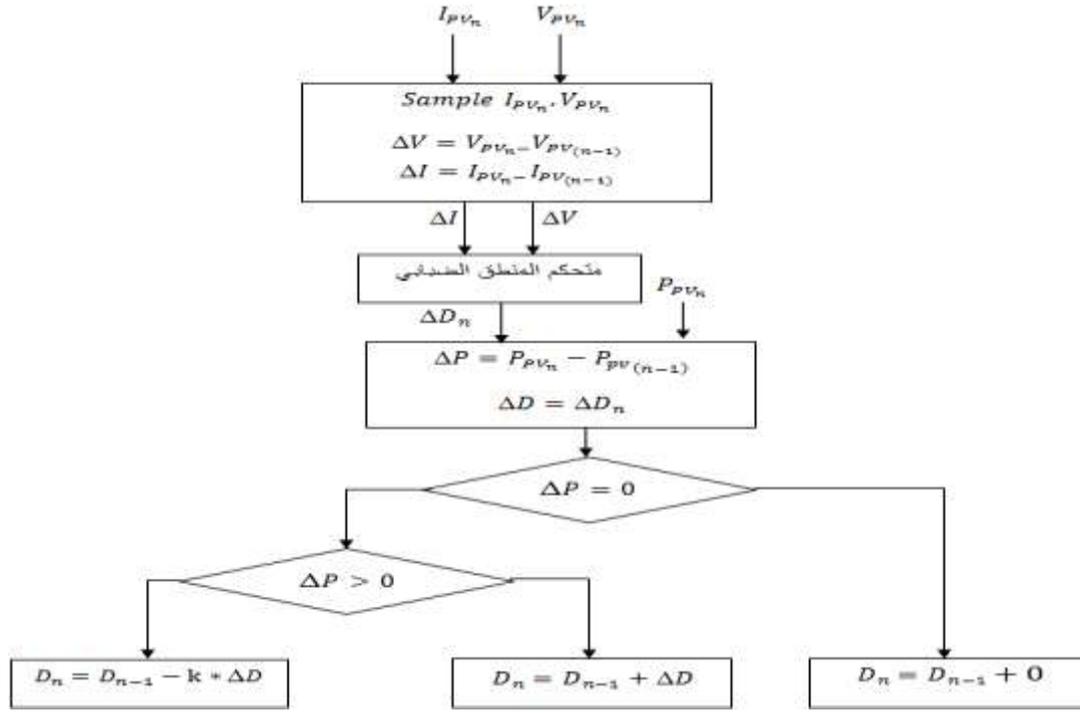
2-محرك الاستنتاج inference engine يتم في هذه المرحلة تحديد الخرج الضبابي للمتحكم بناءً على توابع العضوية و القواعد الضبابية Fuzzy rules المدخلة و التي غالباً ما تكون من الصيغة (IF..and..Then..).

3-إزالة التضبيب Defuzzification يتم في هذه المرحلة تحديد القيم العددية لمتحولات الخرج من خلال عدد من الطرق أشهرها مركز الثقل (center-of-gravity).

تلعب المتغيرات المستخدمة في عملية التتبع دوراً أساسياً في وضع قواعد المتحكم، و تؤثر بشكل فعال على الأداء، فاختيار متحولات دخل كتغير الاستطاعة و تغير الجهد، أو تغير الاستطاعة و تغير التيار يجعل الخوارزمية عاجزة عن تحديد موقع نقطة العمل أثناء حدوث تغير في شدة الإشعاع الشمسي [9]، كما أن اعتماد بعض الخوارزميات على نسبة تغير الاستطاعة إلى تغير الجهد كأحد متغيرات الدخل كما في [7] قد يسبب تأرجحاً ملحوظاً بالقرب من نقطة الاستطاعة الأعظمية نظراً لتقارب و انخفاض قيمة كل من تغير الجهد و تغير الاستطاعة بالقرب من هذه النقطة [9]، إضافة لذلك فإن اعتماد بعض الخوارزميات كالخوارزمية المذكورة في المرجع [14] على عملية القسمة في تحديد متغيرات الدخل يشكل تحدياً من الناحية التصميمية نظراً لإمكانية الحصول على قيم متماثلة من أجل القيم الكبيرة و الصغيرة للمتغيرات [9].

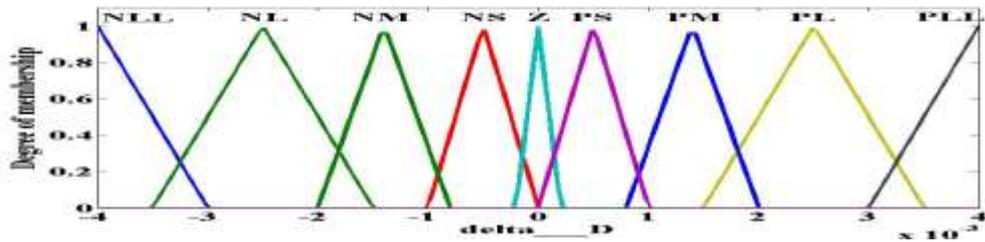
7- الخوارزمية المقترحة:

تعتمد الخوارزمية المقترحة على استخدام متحكم المنطق الضبابي في مقارنة التغير بالجهد مع التغير بالتيار على خرج الألواح الشمسية من أجل كل دورة فتح و إغلاق للمفتاح الإلكتروني لتحديد قيمة ΔD ثم إجراء تعديل على إشارة ΔD و قيمتها بناءً على إشارة التغير بالاستطاعة وفق ما يبين المخطط الموضح بالشكل (8).



الشكل (8) المخطط التدفقي للخوارزمية المقترحة

إن عدم اعتماد الخوارزمية على القسمة في تحديد متغيرات الدخل و قدرتها على مناقشة حالة تغير الإشعاع الشمسي (كما سنرى لاحقاً) ببساطتها من الناحية التصميمية و يعطيها أفضلية من حيث الأداء مقارنة بالخوارزميات التي تعتمد على المنطق الضبابي المذكورة في المرجع [9]، و هي التي وضحت عيوبها في الفقرة السابقة. نقترح تقسيم كل من التغير بالجهد و التغير بالتيار على خرج الألواح الشمسية، و اللذان يمثلان مداخل المتحكم الضبابي إلى سبع مستويات هي سالب كبير (NL)، سالب متوسط (NM)، سالب صغير (NS)، صفر (ZE)، موجب صغير (PS)، موجب متوسط (PM)، موجب كبير (PL)، ثم قسمنا قيمة ΔD التي تمثل خرج المتحكم إلى تسع مستويات هي سالب كبير جداً (NLL)، سالب كبير (NL)، سالب متوسط (NM)، سالب صغير (NS)، صفر (ZE)، موجب صغير (PS)، موجب متوسط (PM)، موجب كبير (PL)، موجب كبير جداً (PLL)، و ذلك وفق توابع العضوية الموضحة بالشكل (9).



الشكل (9) توابع العضوية لمتحولات متحكم المنطق الضبابي

تم اقتراح القواعد الموضحة بالجدول (1) لتحديد قيمة الخرج كمتغير لغوي، لتتم عملية إزالة التضييب وفق نظرية مركز الثقل Center of gravity، و التي من خلالها يتم تحديد القيمة العددية لخرج المتحكم [13].

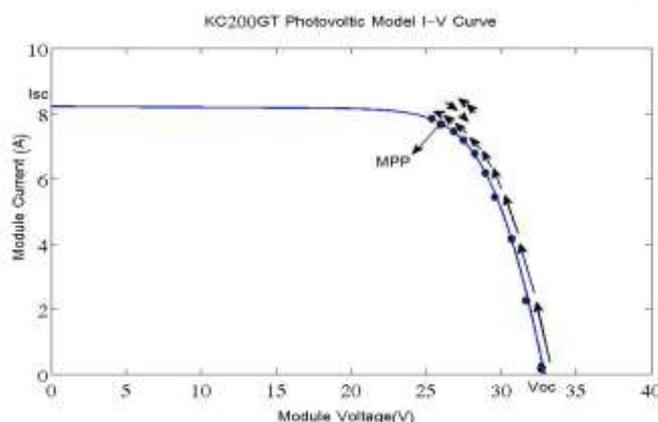
الجدول (1) قواعد المتحكم

ΔI	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PM	PM	PM	PS	PLL	PL	PM
NM	PM	PS	PS	PS	PM	PL	PL
NS	PM	PS	PS	PS	PS	PM	PLL
ZE	NS	NS	NS	ZE	PS	PS	PS
PS	NLL	NM	NS	NS	PS	PM	PL
PM	NL	NL	NM	NS	PM	PM	PL
PL	NM	NL	NLL	NS	PL	PL	PL

وضع القواعد:

1- حالة اختلاف ΔV و ΔI بالاشارة:

نناقش في هذه الحالة ثبات قيمة الإشعاع الشمسي عندما تكون الحركة على منحنى واحد، و لفهمها سنفرض أن نقطة العمل تقع بعيداً على يمين نقطة الاستطاعة الأعظمية بالقرب من جهد العمل على فراغ (الشكل 10)، عندها سنميز حالتين:

الشكل (10) حالة اختلاف ΔV و ΔI بالاشارة

a- أن يكون ΔV موجباً و صغيراً و ΔI سالباً و كبيراً عندها و حسب القواعد ستعطي ΔD قيمة سالبة و كبيرة جداً، و بما أن ΔP في هذه الحالة أصغر من الصفر سيكون $D_n = D_{n-1} - K * \Delta D$ ، أي أن التغير الكلي لقيمة ΔD موجباً، و هو الأمر الذي سيحرك نقطة العمل باتجاه نقطة الاستطاعة الأعظمية.

b- أن يكون ΔV سالباً و صغيراً و ΔI موجباً و كبيراً عندها و حسب القواعد ستعطي ΔD قيمة موجبة و كبيرة جداً، و بما أن ΔP في هذه الحالة أكبر من الصفر سيكون $D_n = D_{n-1} + \Delta D$ أي أن التغير الكلي لقيمة ΔD موجباً، و هو الأمر الذي سيحرك نقطة العمل باتجاه نقطة الاستطاعة الأعظمية.

مع الاقتراب من نقطة الاستطاعة الأعظمية ستزداد القيمة المطلقة لتغير الجهد ΔV و تتناقص القيمة المطلقة لتغير التيار ΔI و عندها ستعمل قواعد المتحكم على إنقاص ΔD بشكل تدريجي، مما سيسبب تناقص كل من ΔV و ΔI بالقيمة المطلقة بشكل تدريجي أيضاً ليساوي الصفر عند نقطة الاستطاعة الأعظمية في الحالة المثالية.

في حال تجاوزنا نقطة الاستطاعة الأعظمية باتجاه اليسار عندها سيكون ΔV سالباً و صغيراً و ΔI موجباً و صغيراً و هذا يعني حسب القواعد أن ΔD ستكون بقيمة موجبة و صغيرة، و لكن ΔP عندها سيصبح سالباً مما يعني انه و حسب الخوارزمية سيكون $D_n = D_{n-1} - K * \Delta D$ أي أن التغير الكلي سيكون سالباً و بقيمة أكبر

بمقدار K مرة منه فيما لو كان ΔP موجباً و بالتالي ستتحرك نقطة العمل باتجاه نقطة الاستطاعة الأعظمية. إن معياراً صحيحاً لمتحكم المنطق الضبابي و اختياراً مناسباً لقيمة العامل K سيضمن جعل ΔP موجباً عند العودة باتجاه نقطة الاستطاعة الأعظمية، الأمر الذي سيؤدي إلى إعطاء التغير بنسبة التشغيل ΔD قيمة سالبة و سيكون $D_n = D_{n-1} + \Delta D$ مما يعني ابتعاد نقطة العمل عن نقطة الاستطاعة الأعظمية باتجاه اليمين، لتعود نحوها في الخطوة التالية.

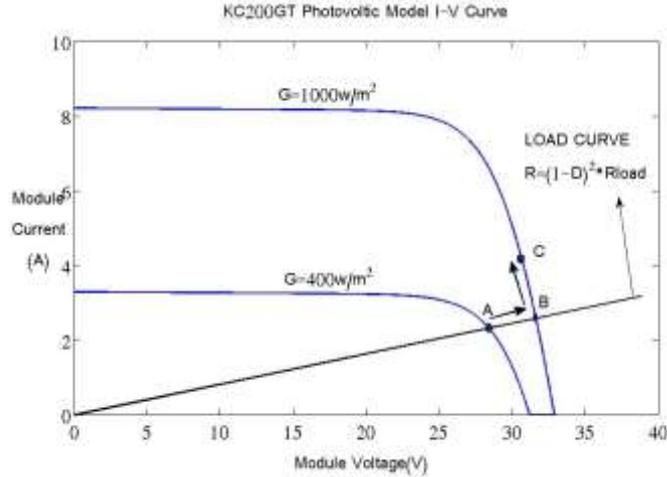
سيستمر التراجع حول نقطة الاستطاعة الأعظمية بمطال صغير جداً و متناقص بشكل مستمر بالحالة المثالية ليبلغ الصفر بالقرب من نقطة الاستطاعة الأعظمية.

2- حالة اتفاق ΔV و ΔI بالإشارة:

نناقش في هذه الحالة الانتقال من حالة إشعاع شمسي مستقر إلى متغير حيث نميز حالتين:

a- في حال ازدياد شدة الإشعاع الشمسي (الشكل 11):

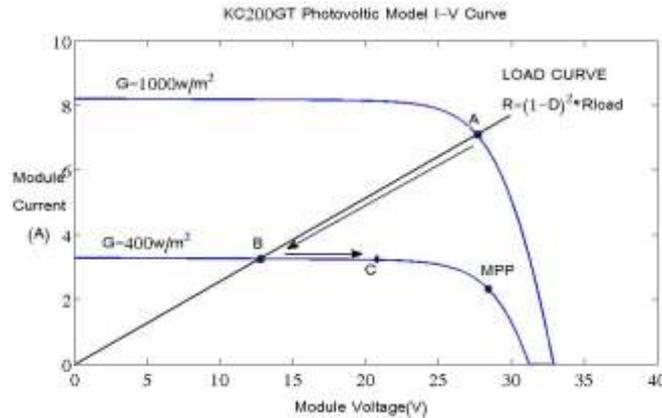
لنفرض أننا في حالة عمل مستقرة عند مستوى إشعاع شمسي معين، عندها بتطبيق الخوارزمية ستكون نقطة العمل و التي تمثل تقاطع منحنى الحمل مع منحنى الخرج للألواح الشمسية منطبقة على نقطة الاستطاعة الأعظمية (النقطة A)، و بفرض حدوث ارتفاع في قيمة الإشعاع الشمسي ستنتقل نقطة العمل إلى النقطة B التي تمثل تقاطع منحنى الحمل مع منحنى الخرج الجديد للألواح الشمسية، عندها سيكون ΔP و ΔV و ΔI لهم إشارة موجبة، و حسب الخوارزمية فان قيمة ΔD ستكون موجبة و يكون $D_n = D_{n-1} + \Delta D$ ، الأمر الذي سيؤدي إلى انتقال نقطة العمل باتجاه نقطة الاستطاعة الأعظمية (C).



الشكل (11) حالة تزايد شدة الإشعاع الشمسي

b- في حال انخفاض شدة الإشعاع الشمسي (الشكل 12):

لنفرض أننا في حالة عمل مستقرة عند إشعاع شمسي معين، عندها بتطبيق الخوارزمية ستكون نقطة العمل التي تمثل تقاطع منحنى الحمل مع منحنى الخرج للألواح الشمسية منطبقة على نقطة الاستطاعة الأعظمية (النقطة A)، و بفرض حدوث انخفاض في قيمة الإشعاع الشمسي ستنتقل نقطة العمل إلى النقطة B التي تمثل تقاطع منحنى الحمل مع منحنى الخرج الجديد

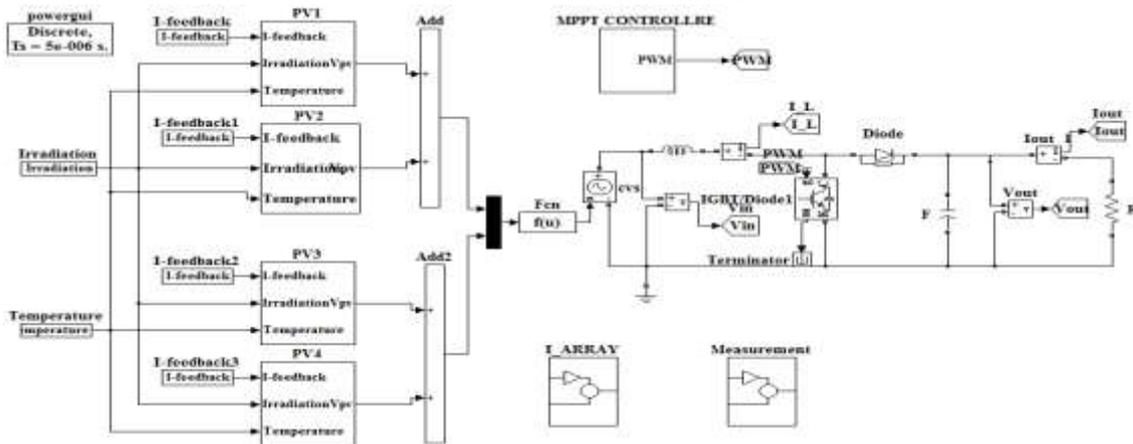


الشكل (12) حالة انخفاض شدة الإشعاع الشمسي

للألواح الشمسية، عندها سيكون ΔP و ΔV و ΔI لهم إشارة سالبة، و حسب الخوارزمية فان قيمة ΔD ستكون موجبة و يكون $D_n = D_{n-1} - K * \Delta D$ ، أي أن التغير الكلي سيكون سالباً و بالتالي سنتنقل نقطة العمل باتجاه نقطة الاستطاعة الأعظمية (النقطة C).
و هكذا ستكون الخوارزمية المقترحة قادرة على تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية، في حالة ثبات الإشعاع الشمسي و في حال تغيره .

النتائج و المناقشة:

بهدف التحقق من صحة الخوارزمية قمنا باستخدام برنامج MATLAB R2008a لنمذجة النظام الكهروضوئي الموضح بالشكل (13) و الذي يتألف من : أربعة ألواح شمسية من النوع KC200GT ربط كل اثنان منها تسلسلياً ثم ربطت المجموعتان تفرعياً، مقطع رافع، حمل أومي، نظام تتبع لنقطة الاستطاعة الأعظمية.



الشكل (13) نموذج النظام الكهروضوئي المقترح

يقوم نظام التتبع بالتحكم بنبضة القدرح للثايرستور IGBT بهدف ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية لمجموعة الألواح الشمسية من أجل حالة العمل المستقرة و عند تغير كل من درجة الحرارة و الإشعاع الشمسي.
يبين الجدول (2) البارامترات المستخدمة في تصميم نموذج اللوح الشمسي من النوع KC200GT و التي تم الحصول عليها من المرجع [12]:

الجدول (2) بارامترات اللوح الشمسي من النوع KC200GT

$P_{mpp}(W)$	200.143	$K_v(V/^{\circ}C)$	-0.1230
$V_{mpp}(V)$	26.3	a	1.3
$I_{mpp}(A)$	7.61	N_s	54
$V_{oc,n}(V)$	32.9	N_p	1
$I_{sc,n}(A)$	8.21	$R_s(\Omega)$	0.221
$K_i(A/^{\circ}C)$	0.0032	$R_p(\Omega)$	415.405

انطلاقاً من المعادلات (6 و 7) و بهدف الحصول على تموج للتيار قليل على خرج الألواح الكهروضوئية

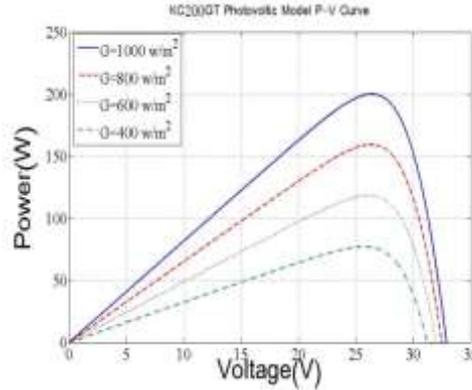
قمنا باختيار بارامترات المقطع كالتالي:

$$L = 50 \text{ mH}, C = 1000 \text{ } \mu\text{F}, R = 10 \text{ } \Omega, f = 10 \text{ kHz}$$

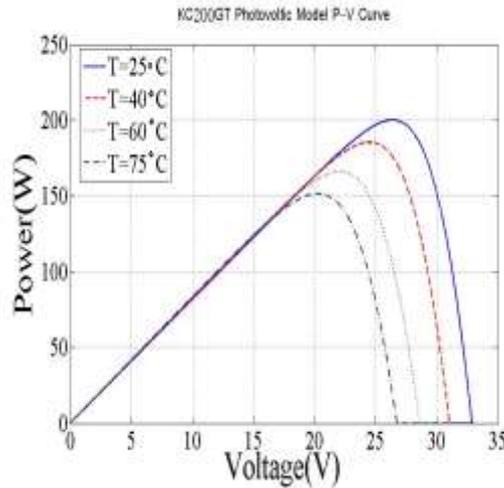
1- منحنيات الخواص للوح الكهروضوئي:

بهدف التأكد من فعالية نموذج اللوح الكهروضوئي المصمم قمنا بإجراء المحاكاة و إظهار منحنيات الخواص

عند سويات مختلفة للإشعاع الشمسي (الشكلان 14 و 15) و سويات مختلفة لدرجة الحرارة (الشكلان 16 و 17).

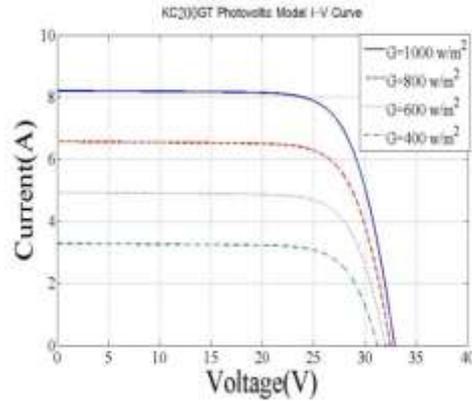


الشكل (14) مميزة (P-V) للوح KC200GT عند درجة حرارة مرجعية و سويات مختلفة للإشعاع الشمسي

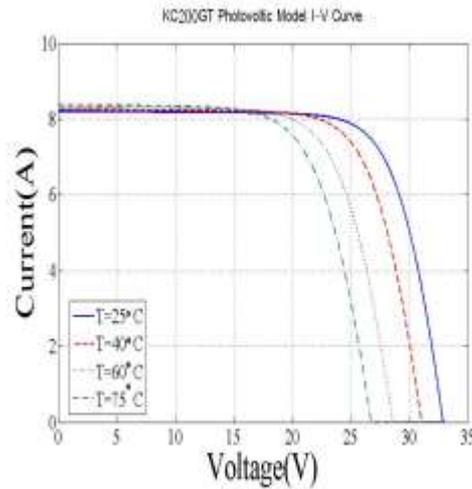


الشكل (16) ميزة (P-V) للوح KC200GT عند إشعاع

شمسي مرجعي و سويات مختلفة لدرجة الحرارة



الشكل (15) مميزة الخرج (I-V) للوح KC200GT عند درجة حرارة مرجعية و سويات مختلفة للإشعاع الشمسي



الشكل (17) ميزة الخرج (I-V) للوح KC200GT إشعاع شمسي مرجعي و سويات مختلفة لدرجة الحرارة
يبين الجدول (3) قيمة البارامترات التي حصلنا عليها عند القيم المرجعية لدرجة الحرارة و الإشعاع الشمسي و
الخطأ النسبي لهذه البارامترات، و هو ما يؤكد فعالية نموذج اللوح الكهروضوئي المصمم.

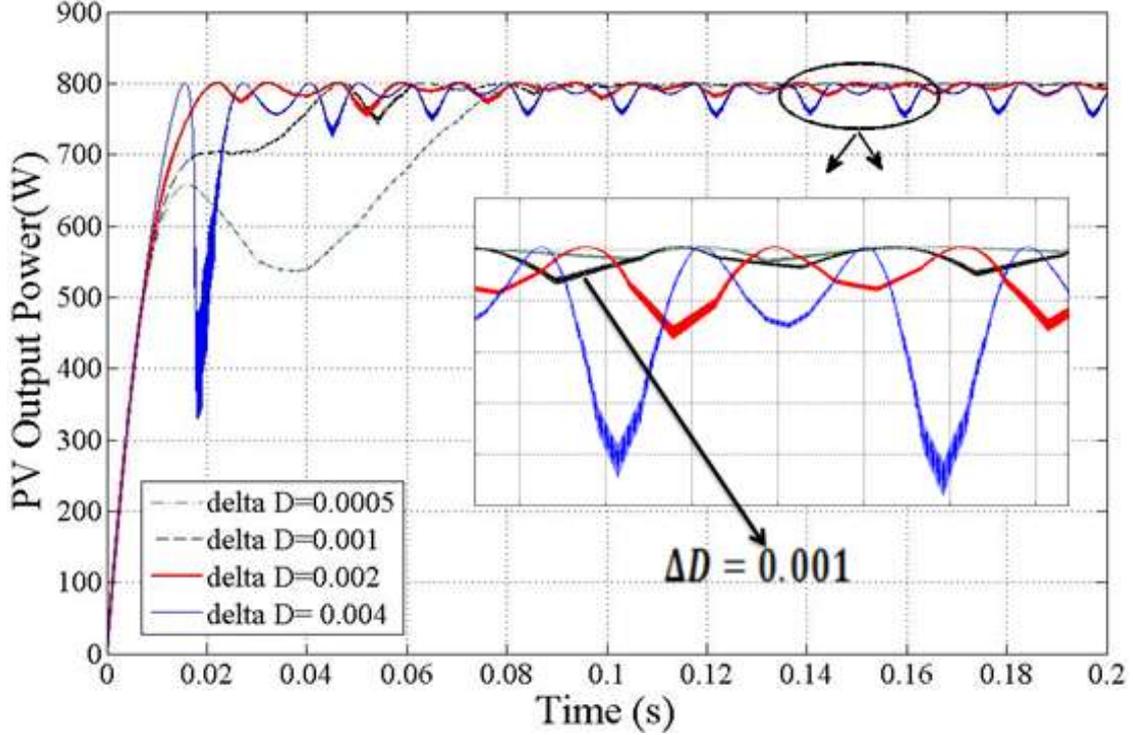
الجدول (3) قيمة بارامترات اللوح الشمسي و خطأها النسبي عند المحاكاة من أجل إشعاع شمسي و درجة حرارة مرجعيين

المتغير	القيمة الاسمية	نتيجة النمذجة و المحاكاة	الخطأ النسبي المئوي
$P_{mpp}(W)$	200.134	200.1172	0.008%
$V_{mpp}(V)$	26.3	26.34	-0.15%
$I_{mpp}(A)$	7.61	7.5974	0.16%
$V_{oc,n}(V)$	32.9	32.8832	0.05%
$I_{sc,n}(A)$	8.21	8.21	0%

2- تطبيق خوارزمية الاضطراب و المراقبة:

قمنا بمحاكاة عمل النظام بتطبيق خوارزمية الاضطراب و المراقبة عند قيم مرجعية لدرجة الحرارة و شدة الإشعاع الشمسي و من أجل قيم مختلفة لنسبة التشغيل ΔD ، و حصلنا على الشكل (18) الذي يبين أثر قيمة ΔD

على زمن الوصول إلى نقطة الاستطاعة الأعظمية و مقدار التأرجح حولها، حيث نلاحظ زمن وصول أقل و تذبذب أكبر للاستطاعة من أجل قيم أكبر لنسبة التشغيل ΔD .
اعتماداً على هذه النتائج قمنا باختيار قيمة $\Delta D = 0.001$ من أجل المقارنة مع الخوارزمية المقترحة كونها تملك زمن وصل و تذبذب مقبولين.



الشكل (18) استطاعة الخرج للألواح الشمسية عند تطبيق خوارزمية الاضطراب و المراقبة من أجل قيم مختلفة ل ΔD

3-معايرة متحكم المنطق الضبابي:

قمنا بمعايرة المتحكم معايرة أولية من خلال مراقبة تغير كل من الجهد و التيار (كل دورة فتح و إغلاق للثايرستور) عند تطبيق خوارزمية الاضطراب و المراقبة (الفقرة السابقة) من أجل قيم مختلف ΔD ، ثم قمنا بتعديل قيم المعايرة عن طريق التجربة و الخطأ لتحسين الأداء إلى أن وصلنا إلى توابع العضوية المبينة بالشكل (7).

4- تطبيق الخوارزمية:

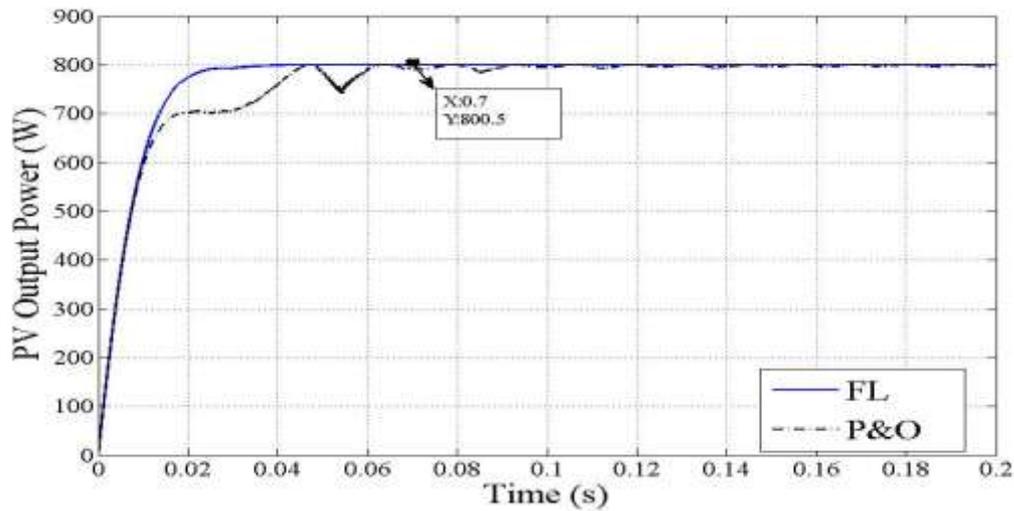
بهدف التأكد من إمكانية تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية وفق الخوارزمية المقترحة قمنا بدمج الخوارزمية في نموذج النظام و مقارنة النتائج مع خوارزمية الاضطراب و المراقبة من أجل الحالات التالية:

1- عند الحالة المستقرة:

a- عند الشروط المرجعية لدرجة الحرارة و الإشعاع الشمسي:

بإعطاء شدة إشعاع شمسي ($G = 1000(W/m^2)$) و درجة حرارة ($T = 25(^{\circ}C)$) و تطبيق

الخوارزمتين حصلنا على المنحنيين المبينين بالشكل (19).

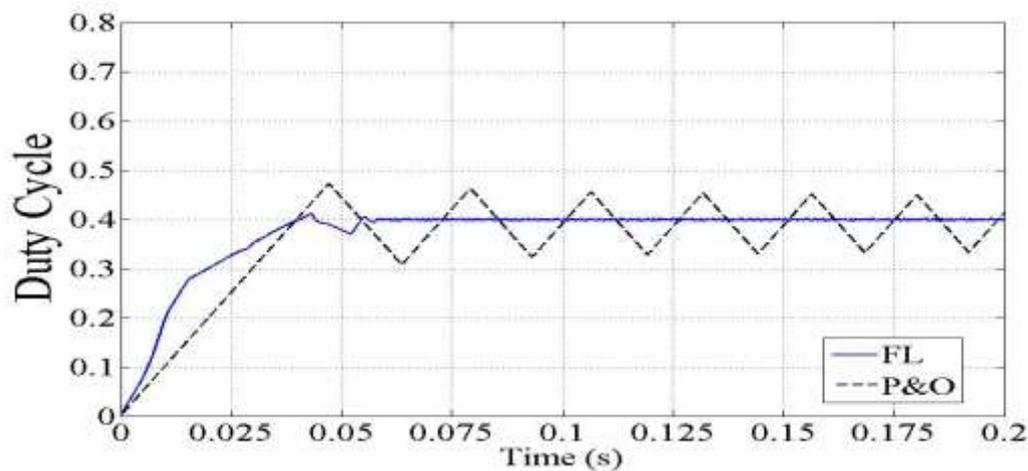


الشكل (19) استطاعة الخرج للألواح الشمسية عند الشروط المرجعية لدرجة الحرارة و شدة الإشعاع الشمسي يبين الشكل (19) قدرة الخوارزمية المقترحة على تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية و بأداء أفضل بكثير من خوارزمية الاضطراب و المراقبة ،حيث وصلت الاستطاعة إلى الحالة المستقرة أسرع من خوارزمية الاضطراب و المراقبة التي بقي خرجها متأرجحاً حتى بعد الوصول إلى الحالة المستقرة.

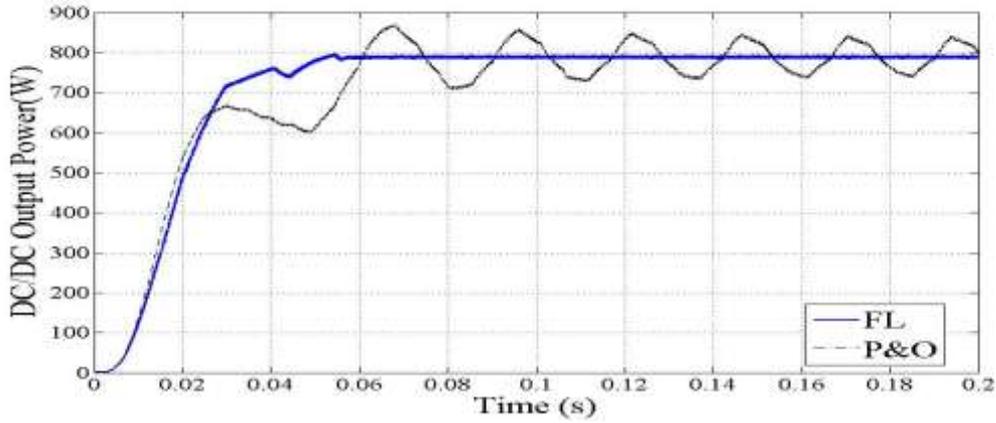
كما يبين الشكل (19) حصولنا على استطاعة $P = 800.5 (W)$ و هي قيمة الاستطاعة الأعظمية

التي يمكن الحصول عليها من أربع ألواح شمسية $((P_{max} = 200.1172 * 4 = 800.5(W))$.

يبين الشكل (20) تغير نسبة التشغيل D من أجل الخوارزمية المقترحة و خوارزمية الاضطراب و المراقبة، حيث تظهر جلياً الوتيرة المتناقصة لزيادة نسبة التشغيل عند استخدام الخوارزمية المقترحة مع الاقتراب من نقطة الاستطاعة الأعظمية لتتأرجح بمطال متناقص قبل أن تستقر عند قيمة ثابتة تقريباً، خلافاً لما هو الحال عند استخدام خوارزمية الاضطراب و المراقبة التي بقيت فيها نسبة التشغيل متأرجحة، و هو الذي انعكس مباشرة على تأرجح استطاعة الخرج للألواح الذي بيناه بالشكل (19)، إضافة لانعكاسه على استطاعة الخرج للمقطع المبينة بالشكل (21).



الشكل (20) نسبة التشغيل D



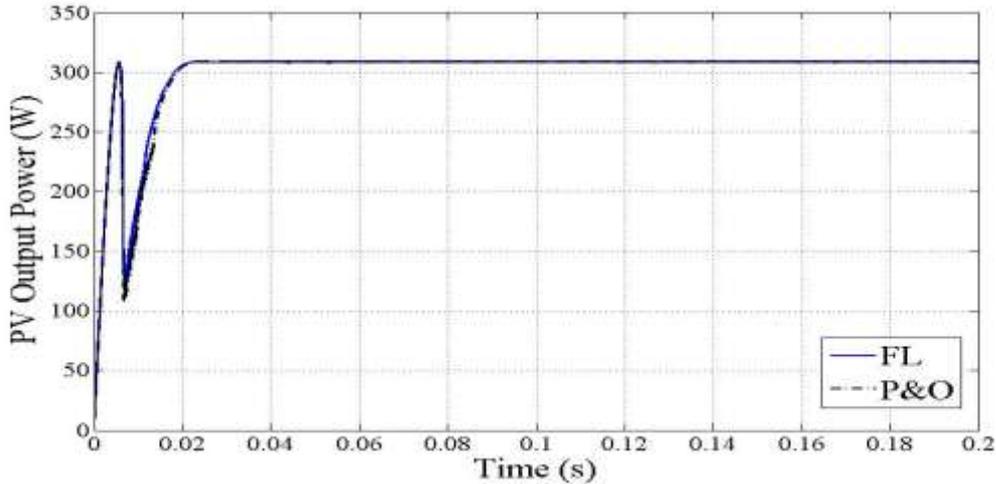
الشكل (21) استطاعة الخرج للمقطع الرفع

نلاحظ في الشكل (21) انخفاض الاستطاعة عن القيمة (W) 800.5 من أجل الخوارزمية المقترحة، و نعل ذلك بالضيق الحاصل بالملف و الديود و الترانزستور.

نلاحظ أيضاً في الشكل (21) تأرجح قيمة الاستطاعة بقيم أكبر و أصغر من (W) 800.5، من أجل خوارزمية الاضطراب و المراقبة، ونعل ذلك بعملية الشحن و التفريغ الإضافية للمكثف الموجود على خرج المقطع، والناجمة عن تأرجح نسبة التشغيل.

b- عند قيم منخفضة لشدة الإشعاع الشمسي:

يظهر الشكل (22) استطاعة الخرج من أجل إشعاع شمسي ($G = 400(W/m^2)$) و درجة حرارة مرجعية عند تطبيق الخوارزمتين، و هو ما يؤكد قدرة الخوارزمية على التتبع عند سويات منخفضة للإشعاع الشمسي.

الشكل (22) استطاعة الخرج للألواح الشمسية من أجل شدة إشعاع شمسي $G = 400W/m^2$ و درجة حرارة $T = 25^{\circ}C$

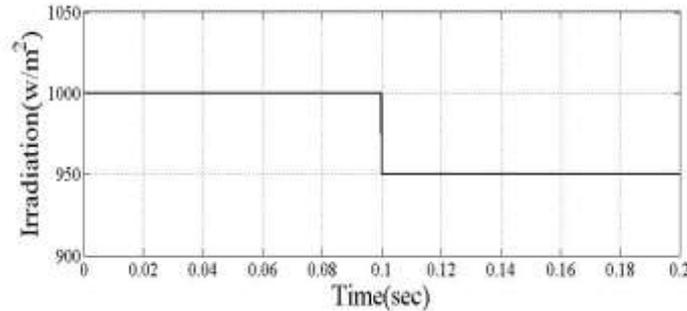
نلاحظ في الشكل (22) انخفاض قيمة التآرجح للاستطاعة عند تطبيق نظرية الاضطراب و المراقبة، حيث يمكن تفسير ذلك بالعودة إلى الشكل (1) حيث يظهر لدينا بالتدقيق بالشكل انخفاض أثر تغير نسبة التشغيل على موقع نقطة العمل من أجل سويات منخفضة للإشعاع الشمسي، لأن $R_{in} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = (1 - D)^2 * R_L$ تمثل ظل زاوية منحنى الحمل، و بتغير قيمة D نكون قد غيرنا من زاوية ميل المنحنى الأمر الذي سيؤدي إلى انخفاض التآرجح من أجل سويات منخفضة للإشعاع الشمسي.

2- عند حدوث تغير مفاجئ بشدة الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة:

a- يهدف التأكد من قدرة الخوارزمية على العمل عند حدوث تغير مفاجئ في شدة الإشعاع الشمسي تم إحداث

تغير في شدة الإشعاع الشمسي

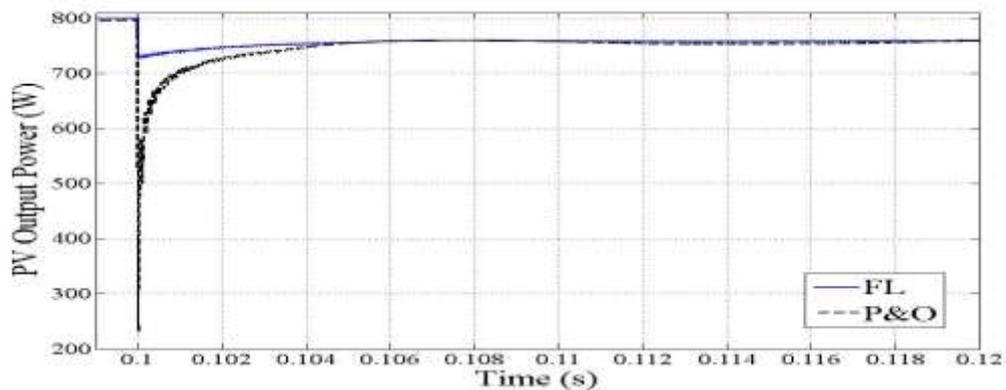
وفق المنحني المبين بالشكل (23).



الشكل (23) تغير الإشعاع الشمسي المفاجئ

بإجراء المحاكاة حصلنا على الشكل (24) الذي يبين قدرة الخوارزمية على الاستجابة للتغير المفاجئ في

شدة الإشعاع الشمسي و بأداء أفضل من خوارزمية الاضطراب و المراقبة.



الشكل (24) استعادة الخرج للألواح الشمسية عند التغير المفاجئ لشدة الإشعاع الشمسي

نعلل الانخفاض الشديد للاستعادة (لحظة حدوث الانخفاض في الإشعاع الشمسي) عند تطبيق خوارزمية

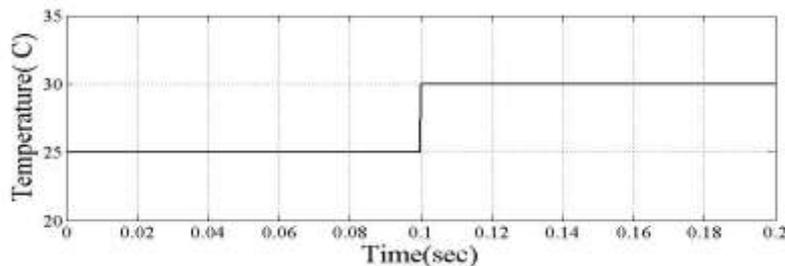
الاضطراب و المراقبة بتأرجح نقطة العمل حول نقطة الاستعادة الأعظمية، حيث أن الانخفاض حدث في لحظة زمنية

كانت فيها نقطة العمل الجديدة (نقطة تقاطع منحنى الحمل التابع لنسبة التشغيل مع منحنى الخرج للألواح الشمسية)

بعيدة جداً عن نقطة الاستعادة الأعظمية الجديدة.

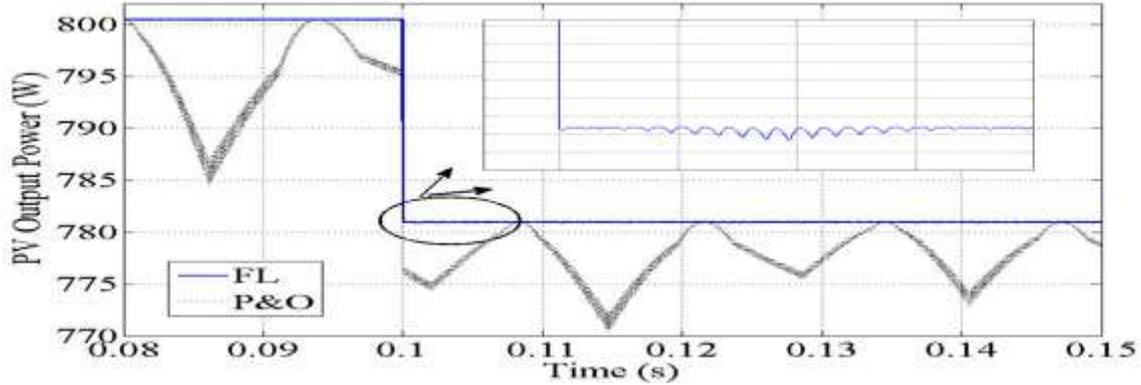
b- يهدف التأكد من قدرة الخوارزمية على العمل عند حدوث تغير مفاجئ في درجة الحرارة تم إحداث تغير في

قيمة درجة الحرارة وفق المنحني المبين بالشكل (25).



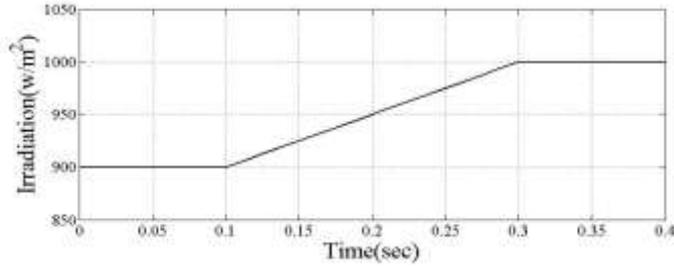
الشكل (25) التغير المفاجئ بدرجة الحرارة

بإجراء المحاكاة حصلنا على الشكل (26) و الذي يبين قدرة الخوارزمية على الاستجابة عند حدوث تغير مفاجئ لدرجة الحرارة، حيث نلاحظ تأرجح نقطة العمل حول نقطة الاستطاعة الأعظمية قبل استقرارها.



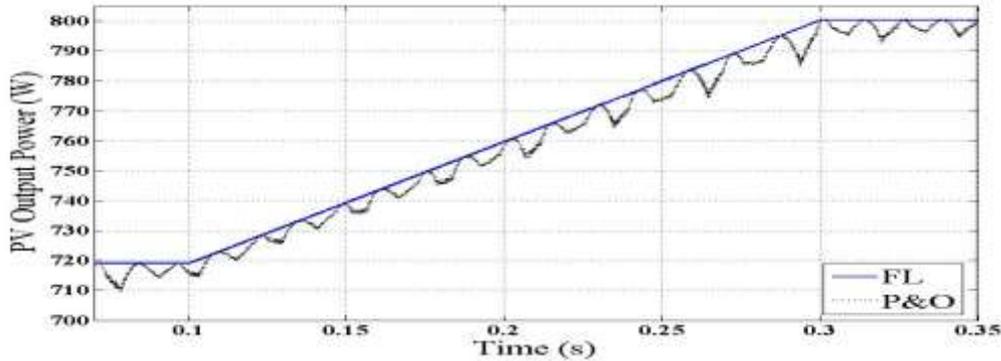
الشكل (26) استطاعة الخرج للألواح الشمسية من أجل الزيادة المفاجئة بدرجة الحرارة

- 3- التأكد من قدرة الخوارزمية على العمل عند التغيرات التدريجية للإشعاع الشمسي و درجة الحرارة:
- a- بهدف التأكد من قدرة الخوارزمية على العمل عند حدوث تغير تدريجي في شدة الإشعاع الشمسي، تم إحداث تغير في شدة الإشعاع الشمسي وفق المنحني المبين (27).



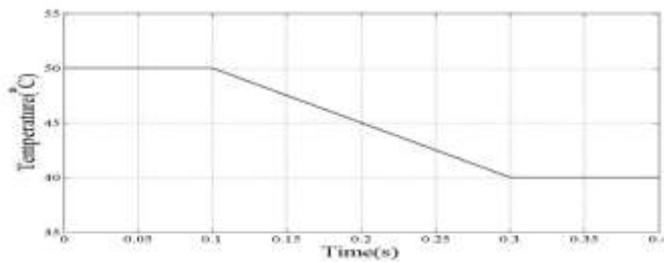
الشكل (27) التغير المتدرج بشدة الإشعاع الشمسي

و حصلنا من خلال النمذجة على المنحني (28) الذي يبين ابتعاد نقطة العمل عن نقطة الاستطاعة الأعظمية عند استخدام خوارزمية الاضطراب و المراقبة، و عودتها إليها بشكل متكرر، الأمر الذي سبب تأرجحاً كبيراً نسبياً في قيمة الاستطاعة، على خلافاً للخوارزمية المقترحة التي تمكنت من تحديد موقع نقطة العمل و ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية أثناء حدوث التغير في شدة الإشعاع الشمسي.



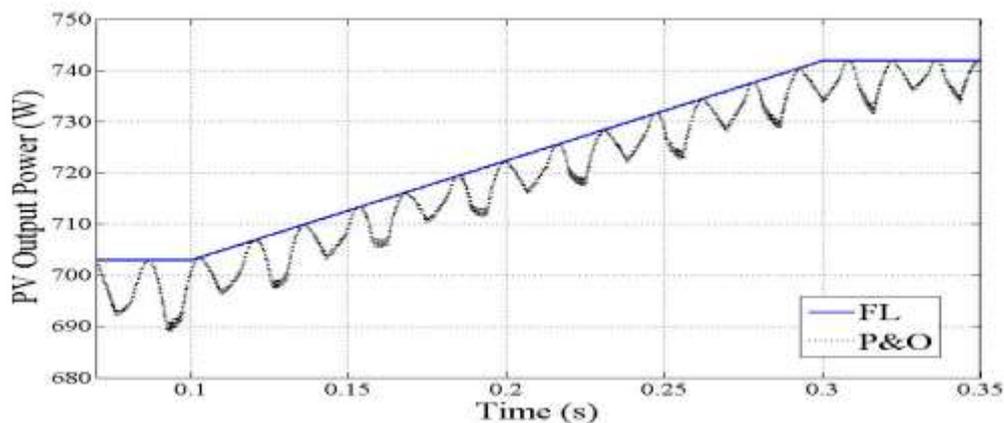
الشكل (28) استطاعة الخرج للألواح الشمسية من أجل التغيرات المتدرجة بشدة الإشعاع الشمسي

- b- بهدف التأكد من قدرة الخوارزمية على العمل عند حدوث تغير تدريجي في درجة الحرارة، و عند سويات مرتفعة لها قمنا بإحداث تغير بدرجة الحرارة وفق الشكل (29).



الشكل (29) التغير التدريجي في درجة الحرارة

بإجراء المحاكاة حصلنا على الشكل (30) الذي يبين قدرة الخوارزمية على العمل عند حدوث تغير تدريجي في درجة الحرارة، و عند سويات مرتفعة لدرجة الحرارة، حيث نلاحظ ازدياد الاستطاعة بشكل منتظم مع انخفاض درجة الحرارة من أجل الخوارزمية المقترحة، و تذبذبها من أجل خوارزمية الاضطراب و المراقبة.



الشكل (30) استطاعة الخرج للألواح الشمسية من أجل التغير المتدرج بدرجة الحرارة

الاستنتاجات و التوصيات:

الاستنتاجات:

1- إن الخوارزمية المقترحة لتتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية في الأنظمة الكهروضوئية فعالة و ذلك من أجل جميع مستويات الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة، و من أجل جميع أشكال التغير بشدة الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة المفاجئة و المتدرجة.

2- تتميز هذه الخوارزمية عن غيرها من الخوارزميات التي تستخدم متحكمات المنطق الضبابي في عملية التتبع بقدرتها على تحديد موقع نقطة العمل أثناء حدوث تغير في قيمة الإشعاع الشمسي من جهة، و بعدم اعتمادها على عملية القسمة في تحديد متغيرات الدخل من جهة أخرى.

التوصيات:

1- التطبيق العملي للخوارزمية المقترحة على نموذج مصغر أو مخبري لنظام كهروضوئي للاستفادة العملية منها و إمكانية طرحها في الأسواق.

2- التأكد من صحة عمل الخوارزمية المقترحة عند تغير الحمل و طبيعة الحمل و التأثير المتبادل لكل منهما على الآخر.

المراجع:

- [1] NAGAN, M. S, TAN, C. W. *A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-alone Photovoltaic Systems*. IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), USA, 2011, 22-27.
- [2] ESRAM, T, CHPMAN, L. *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*. IEEE Transactions on Energy Conversion, USA, Vol. 22, N°. 2, 2007, 439-449.
- [3] ELTAWIL, M. A, ZHAO, Z. *MPPT techniques for photovoltaic applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Netherlands, VOL 25, 2013, 793-813.
- [4] ALKANNA, M. *Modeling and simulation solar panels and perform it power using perturbation and observation algorithm (P&O) to tracking maximum power point MPPT*. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, Syria, Vol. 37, N°. 6, 2015, 149-168.
- [5] PUTEI, R. I, WIBOWO, S, RIFA'I, M. *Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method*. Energy Procedia, Netherlands, 68, 2015, 22 – 30.
- [6] HABIBI, M, YAZDIZADEH, A. *New MPPT controller design for PV arrays using neural networks*, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Germany, vol. 5552, 2009, 1050-1058.
- [7] BENDIB, B, KRIM.F, BELMILI, H, ALMI, M. F, BOULOUMA, S. *Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system*. Energy Procedia, Netherlands, 50, 2014, 383 – 392.
- [8] RAMAPRAHA, B.L, MATHUR L. *Intelligent Controller based Maximum Power Point*, International Journal of Computer Applications, Vol. 12, N°.10, 2011, 37 – 41.
- [9] SHIAU, J. K, WEI,Y. C, CHEN, B. C. *A Study on the Fuzzy-Logic-Based Solar Power MPPT Algorithms Using Different Fuzzy Input Variables*. Algorithms, Switzerland, VOL. 8, 2015, 100-127.
- [10] KOLSI. S, SAMET. H, BEN AMAR, M. *Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer throughout a Clear Day*. Journal of Power and Energy Engineering, USA, 2, 2014, 27-34.
- [11] Mohammed, S. S, Devaraj, D. *Simulation and Analysis of Stand-alone Photovoltaic System with Boost Converter using MATLAB/Simulink*. International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, USA, 2014,814-821.
- [12] VILLALVA, M. G, GAZOLI, J. R, FILHO, E. R. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*, IEEE Transactions on power electronics, USA, VOL. 24, NO. 5, 2009, 1198-1208.
- [13] SUBIYANTO, S, MOHAMED. A, HANNAN, M. A. *Intelligent maximum power point tracking for PV system using Hopfield neural network optimized fuzzy logic controller*. Energy and Buildings, Netherlands, 51, 2012, 29-38.
- [14] PUTRI, R. I, WIBOWO, S, TAUFU, M, TAUFIK. *Fuzzy Incremental Conductance for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System*. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), VOL. 3, Issue. 6, 2014, 352-359.