

نمذجة ومحاكاة الألواح الشمسية وتحسين استطاعتها باستخدام خوارزمية الاضطراب والمراقبة لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى

ميساء الكنا*

(تاريخ الإيداع 5 / 8 / 2015. قُبل للنشر في 10 / 12 / 2015)

□ ملخص □

يتناول البحث تحليل ودراسة أداء الألواح الشمسية، حيث اخترنا العمل على اللوح (الموديول) الشمسي MSX-50، بالإضافة إلى تحسين استطاعته عن طريق تعقب نقطة الاستطاعة العظمى MAXIMUM POWER POINT، ويتم ذلك باستخدام مقطع رافع للجهد للحصول على أكبر استطاعة ممكنة من اللوح الشمسي. تم وضع نموذج رياضي مكافئ لعمل اللوح الشمسي الحقيقي (غير مثالي) من خلال دراسة الخلايا الكهروضوئية (PHOTOVOLTAIC CELLS)، حيث تم استخدام الطريقة التكرارية بالإضافة لخوارزمية نيوتن-رافسون من أجل تحديد قيمة المقاومة التسلسلية للموديول R_s ، والمقاومة التفرعية R_p . كما تم تنفيذ خوارزمية الاضطراب والمراقبة Perturbation and Observation P&O، بالإضافة إلى دراسة وتصميم دائرة المقطع chopper واختيار مكوناتها L,C (المكثف والملف) بناءً على تحديد كل من تردد عمل المقطع وعاملي التموج للجهد والتيار.

بناءً على ماسبق، قمنا بإجراء عملية النمذجة للموديول الشمسي MSX-50 باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK، حيث صممنا واجهة مستخدم رسومية GUI لعرض خصائص الموديول وحساب المقاومتين R_s, R_p ، بالإضافة إلى بناء خوارزمية P&O وتصميم دائرة المقطع الرفع للجهد (boost-step up). تم تطبيق النموذج المقترح على حمولة أومية وفق مبدأ ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPP، ومناقشة النتائج لحالي توصيل الموديول الشمسي على الحمل مباشرةً، والتوصيل عن طريق مقطع مقاد بخوارزمية P&O. الكلمات المفتاحية: خلايا كهروضوئية، ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى، الاضطراب والمراقبة، مقطع رافع للجهد.

* مشرفة على الأعمال - قسم الاتصالات-كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية-جامعة تشرين- اللاذقية - سورية .

Modeling and simulation solar panels and perform it power using perturbation and observation algorithm (P&O) to tracking maximum power point MPPT

Maisaa Alkanna*

(Received 5 / 8 / 2015. Accepted 10 / 12 / 2015)

□ ABSTRACT □

This paper deals with the analysis and study of performance of solar panels, so we choose working on the solar panel (module) MSX-50, in addition to improve his power by tracking the maximum power point, this is done by using boost (step up) chopper to obtain the largest possible capacity of solar panel.

We will determine a mathematical model equivalent to the real solar panel (not ideal) through studying photovoltaic cells, where we will use the iterative method in addition to the Newton-Raphson algorithm in order to determine the value serial resistance of module R_s , parallel resistance of module R_p .

As has been the implementation of perturbation and observation p&o algorithm in addition studying and designing the circuit of step up (boost) chopper, and selection the components (coil L, capacitor C), based on both the operation frequency f, ripple factor of output voltage Δv and output current Δi .

Based on the our study, we have performed a modeling process of the solar module MSX-50 using MATLAB/SIMULINK program, where we designed a graphical user interface GUI to display the module characteristics and calculate resistance R_p and R_s , in addition to build an algorithm p&o and design circuit of boost (step up) chopper.

The proposed model has been applied to the ohmic load according to the principle of the maximum power point tracking MPPT, and discuss the results of two cases wich are the following the solar module is connected directly to load, connected through chopper driven by p&o algorithm.

Key words: Photovoltaic cells PV, maximum power point tracking MPPT, Perturbation and Observation P&O, step up (boost) chopper.

*Work Supervisor, Department of Communication, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering , Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تتزايد أهمية الطاقة الكهروضوئية في تطبيقات توليد الطاقة الكهربائية نظراً لميزاتها المتعددة، فهي تعتبر مصدر طاقة لا ينضب (لانهائي)، وأنها متاحة على نطاق واسع [8]، كما تقدم الخلايا الكهروضوئية للمستهلكين القدرة على توليد الكهرباء بموثوقية عالية وبشكل نظيف (صديقة للبيئة).

تحتوي هذه الأنظمة على الخلايا الكهروضوئية، بالإضافة إلى المعدات والأجهزة الضرورية والتي تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية من شكل لآخر (جهد-تردد) [1]، حيث تعمل هذه التجهيزات الحديثة على خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT، من أجل الحصول على أكبر قدر ممكن من استطاعة اللوح الشمسي.

أهمية البحث وأهدافه:

تمكن أهمية البحث في بناء نموذج مكافئ للوح (الموديول) الشمسي الحقيقي، حيث يتضمن الموديول الشمسي الحقيقي بارامترات إضافية مثل المقاومة التسلسلية R_s والمقاومة التفرعية R_p ، إضافة إلى ارتباط هذا النموذج بالإشعاع الشمسي G ودرجة الحرارة T ، كما يهدف البحث إلى بناء نظام لملاحقة الاستطاعة العظمى للوح الشمسي باستخدام خوارزمية الاضطراب والمراقبة.

أهداف البحث:

1. بناء نموذج مكافئ لسلوك موديول كهروضوئي الحقيقي، بعد حساب المقاومتين المكافئتين للوح (R_s, R_p) .
2. اختبار الموديول الشمسي العملي وربطه مع الحمل عن طريق مقطع رافع للجهد BOSST CHOPPER.
3. تصميم قيم عناصر المقطع (الملف L والمكثف C)، اعتماداً على تموج الجهد والتيار وتردد العمل f .
4. بناء متحكم لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى باستخدام خوارزمية الاضطراب والمراقبة.

طرائق البحث ومواده:

تصنع الخلايا الكهروضوئية من مواد أنصاف النواقل، حيث عند اصطدام الأشعة الشمسية (الفوتونات) بالخلايا الكهروضوئية، تتحرر الإلكترونات التي اصطدمت بها الفوتونات من ذراتها في المواد النصف ناقلة، مشكلة أزواج من ثقب- إلكترون، فإذا كانت النواقل الكهربائية مربوطة على جهتي القطبين الموجب و السالب فإنها تشكل بذلك تيار كهربائي للدارة، بحيث أن الإلكترونات المسحوبة تشكل تيار كهربائي يدعى التيار الضوئي I_{pv} [3].

الخلايا المثالية:

تتألف الخلايا الكهروضوئية من وصلة P-N مصنوعة من شرائح (طبقات) رقيقة من أنصاف النواقل، والتي لديها خصائص كهربائية تختلف بشكل طفيف عن الديود الممثل بمعادلة شوكللي، هكذا فإن أبسط دارة مكافئة للخلية الشمسية هي منبع تيار على التفرع [3] كما هو موضح بالشكل (1). إن خرج منبع التيار $I_{pv,cell}$ متناسب بشكل مباشر مع الضوء الساقط على الخلية، لذلك فإن عملية النمذجة يمكن أن تطوّر بالإعتماد على المعادلات التالية [3]:

$$I = I_{pv,cell} - I_{diode} = I_{pv,cell} - I_{0,cell} * [e^{\frac{q \cdot v}{a \cdot k \cdot T}} - 1] \quad (1)$$

حيث أن:

$I_{pv,cell}$: التيار المتولد نتيجة الضوء الساقط، I_{diode} : معادلة ديود شوكللي.

$I_{0,cell}$: تيار التسريب للديود، q: شحنة الإلكترون (colom) $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ c}$

k: ثابت بولتزمان $1.3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

T: درجة حرارة الوصلة P-N وتقدر بالكلفن [K].

α : معامل مثالية الديود ويتراوح بين 1-2 للخلايا السيليكونية البلورية الاحادية.

إنّ المعادلة الأساسية للخلية الكهروضوئية (1) لا تمثل الخصائص I-V للموديول العملي (الواقعي)، نظراً لأنّ الموديول العملي يتربك من توصيل عدّة خلايا PV تحتاج تضمين بارامترات إضافية مثل R_s, R_p . يمكن تمثيل تأثيرات R_s, R_p وفق المعادلة التالية [2]:

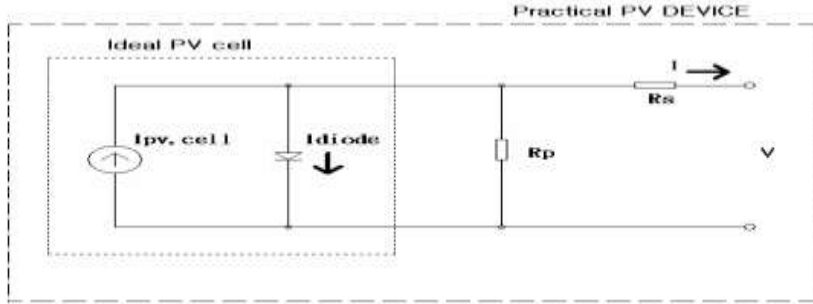
$$I = I_{pv} - I_0 * [e^{\frac{(V+R_s \cdot I)}{V_t \cdot \alpha}} - 1] - (V + R_s * I) / R_p \quad (2)$$

حيث أنّ:

V_t : عبارة عن الجهد الحراري، ويعبر عنه على الشكل التالي [2]:

$$V_t = k * T / q \quad (3)$$

k: ثابت بولتزمان، و q: شحنة الإلكترون، و T: درجة الحرارة بالكلفن.



الشكل (1) يبيّن الدارة المثالية للخلية الكهروضوئية والدارة الفعلية للخلية الكهروضوئية

إنّ الضوء يولّد تيار من مصفوفة من الخلايا، يعتمد بشكل خطّي على الإشعاع الشمسي، كما أنّه يتأثر أيضاً بالحرارة تبعاً للمعادلة التالية [2]:

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + k_i * \Delta T) * G / G_n \quad (4)$$

حيث أنّ:

$I_{pv,n}$: التيار المتولّد عند الشروط الاسميّة ($T=298.15 \text{ K}, G=1000 \text{ w/m}^2$).

$\Delta T = T - T_n$: حيث T, T_n هما درجتا الحرارة الحقيقية و القياسيّة على التوالي.

k_i : معامل الحرارة للتيار I_{sc} ، G: الإشعاع الشمسي w/m^2 .

G_n : الإشعاع الشمسي عند شروط التشغيل القياسيّة 1000 w/m^2 .

إنّ تيار الإشعاع للديود I_0 يعتمد على درجة الحرارة، كما هو موضّح بالعلاقة التالية [2]:

$$I_0 = I_{0,n} * (T_n / T)^3 * e^{\frac{(q \cdot E_g)}{(\alpha \cdot k) * (\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T})}} \quad (5)$$

حيث:

E_g : الفجوة الطاقية لأنصاف النواقل وهي عبارة عن المجال الطاقى في الجسم الصلب ولا يمكن للإلكترونات أن توجد فيه. و تمثل الفرق الطاقى، الذي غالباً ما يعبر عنه بالإلكترون فولت eV ، بين أعلى نطاق التكافؤ وأسفل نطاق التوصيل.

$I_{0,n}$: تيار الإشباع الإسمي الموضَّح بالعلاقة التالية [2]:

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\frac{V_{oc,n}}{(e^{(V_{t,n} + \alpha)} - 1)}} \quad (6)$$

من المعادلتين السابقتين نجد أن:

$$I_0 = (I_{sc,n} + k_i * \Delta T) / (e^{\frac{(V_{oc,n} + k_v \Delta T)}{(V_{t,n} + \alpha)}} - 1) \quad (7)$$

حيث:

$V_{oc,n}$: جهد الدارة المفتوحة الاسمي، $I_{sc,n}$: تيار دارة القصر الاسمي.

V_t : الجهد الحراري، K_v : المعامل الحراري عند الجهد V_{oc} .

$$V_t = N_s * k * T / q \quad (8)$$

تعبّر العلاقة السابقة عن الجهد الحراري للموديول مع N_s خلية موصولة على التسلسل (الخلايا توصل على التسلسل لزيادة التيار، وتوصل على التفرع لزيادة جهد الخرج) [3].

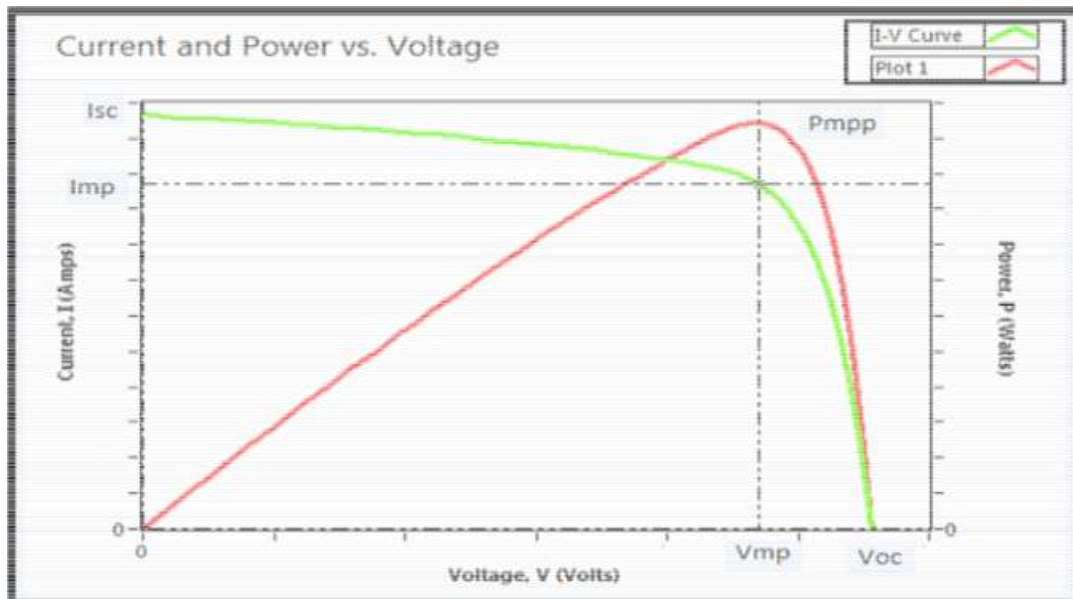
إذا كان الموديول مركب من N_p وصلة تفرعية من الخلايا الكهروضوئية، عندها يتحدد كل من تيار الإشباع والتيار الكهروضوئي المتولد كما يلي:

$$I_{pv} = I_{pv,cell} * N_p \quad (9)$$

$$I_0 = I_{0,cell} * N_p \quad (10)$$

في المعادلة (2) تكون قيمة المقاومة التسلسلية R_s والمقاومة التفرعية R_p للموديول مجهولة (غير معلومة)، لذلك يجب علينا إيجاد قيمها. والمعادلة (2) تبدأ من المنحنى $I-V$ المبين في الشكل (2) حيث

نجد ثلاث نقاط واضحة [2]:



الشكل (2.2) يبين الخصائص $P-V$, $I-V$ للموديول MSX-50

i. تتحدد إحداثيات الدارة المفتوحة بالقيم $(V_{oc}, 0)$.

ii. تتحدد إحداثيات الدارة المقصورة بالقيم $(0, I_{sc})$.

iii. تتحدد إحداثيات نقطة الاستطاعة العظمى بالقيم (V_{mp}, I_{mp}) .

i. الدارة المفتوحة: تحدث هذه الحالة عندما يتم فصل الحمل عن الموديول، في هذه الحالة يدعى الجهد بجهد

الدارة المفتوحة V_{oc} ، كما هو موضَّح بالعلاقة التالية:

$$V_{oc} = \frac{\alpha * k * T_{cell}}{q} * \ln \frac{I_{pv}}{I_0} \quad (11)$$

ii. الدارة المقصورة: في هذه الحالة يكون الحمل الموصول على الموديول ذو مقاومة مثالية (معدومة)، عندها يمر

تيار يدعى بتيار الدارة المقصورة I_{sc} ، كما أنَّ الجهد على طرفي الموديول يكون صفر، وتعطى علاقة التيار على

الشكل التالي:

$$I_{sc} = I_{pv} = K * G \quad (12)$$

حيث K عبارة عن ثابت.

iii. نقطة الاستطاعة العظمى MAXIMUM POWER POINT: هنا في هذه الحالة يكون جداء الجهد بالتيار

أعظماً، V_{mp} ترتبط بالجهد V_{oc} بالعلاقة التالية :

$$V_{mp} \approx 0.8 * V_{oc} \quad (13)$$

و I_{mp} يرتبط بالتيار I_{sc} بالعلاقة التالية:

$$I_{mp} \approx 0.9 * I_{sc} \quad (14)$$

تعتبر شروط التشغيل القياسية هي أفضل شروط التشغيل التي تمثل إشعاع شمسي يساوي 1000 w/m^2 ، وحرارة الخلايا تعادل 25 c^0 ، وتوزع الطيف AM يساوي 1.5 .

الأجهزة الكهروضوئية الحقيقية:

الخلايا الكهروضوئية تعد البنية الأساسية للموديولات الكهروضوئية، في أغلب التطبيقات، تنتج كل خلية 0.5 v

وهذا غير كافٍ، لذلك يتم توصيل الخلايا مع بعضها على التسلسل لزيادة الجهد، كما يتم بعد ذلك توصيل عدد من

هذه السلاسل مع بعضها على التفرع لزيادة التيار .

لذلك يجب تضمين المقاومة التسلسلية R_s والمقاومة التفرعية R_p في الموديول المراد نمذجته على برنامج

. MATLAB/SIMULINK

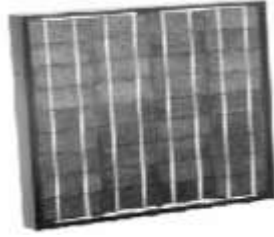
نمذجة الموديول الكهروضوئي باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK:

سنقوم بهذا المقال بنمذجة الموديول MSX-50 المبين بالشكل (3).

تم تركيب الموديول من خلال توصيل 36 خلية شمسية (من النوع السيليكون البلوري المتعدد)، على التوالي

للتزويد باستطاعة أعظمية قدرها 50 W ، حيث أنَّ الجدول التالي يبيِّن الخصائص الكهربائية للموديول، كما نستطيع

التعرف على خصائص المنحني $I-V$ من الوثيقة الفنية (DATASHEET)[5].



الشكل (3) يبين الموديول MSX-50

جدول الخصائص الكهربائية للموديول MSX-50 عند درجة حرارة T=25 C وإشعاع IRRADIANCE = 1000 W/M²

Electrical Characteristics	VLAUE
Maximum Power (Pmax)	50W
Voltage at Pmax (Vmp)	17.1V
Current at Pmax (Imp)	2.92A
Open-circuit voltage (Voc)	21.1V
Short-circuit current (Isc)	3.17A
Temperature coefficient of Isc	(0.065 ± 0.015)%/°C
Temperature coefficient of Voc	-(80 ± 10)mV/°C
NOCT	47 ± 2°C

حسابات قيم R_s , R_p :هنالك بارمتران متبقيان غير معلومين في المعادلة (2) وهما R_s, R_p .

يوجد العديد من الطرق المقترحة للحسابات الرياضية الخاصة بهاتين المقاومتين، حيث أنه من المفيد أن يكون لدينا صيغة رياضية لتحديد البارمترات المجهولة، أي يكون لدينا علاقة خاصة بالمتحولين R_s, R_p تستند بشكل رئيسي على البيانات التجريبية، حيث أن الخوارزمية التي سوف نستخدمها ستقترح طريقة من أجل تعديل R_s, R_p بالإعتماد على أن هنالك قيمة وحيدة فقط للزوج (R_s, R_p) والذي يضمن صحة العلاقة $P_{max,m} = P_{max,e} = I_{mp} * V_{mp}$ عند النقطة (V_{mp}, I_{mp}) في المنحني I-V [3].

تحسب القدرة الأعظمية من النموذج I-V حيث تكون $P_{max,e}$ مساوية للاستطاعة الأعظمية الموجودة في الوثيقة الفنية للموديول عند النقطة MPP.

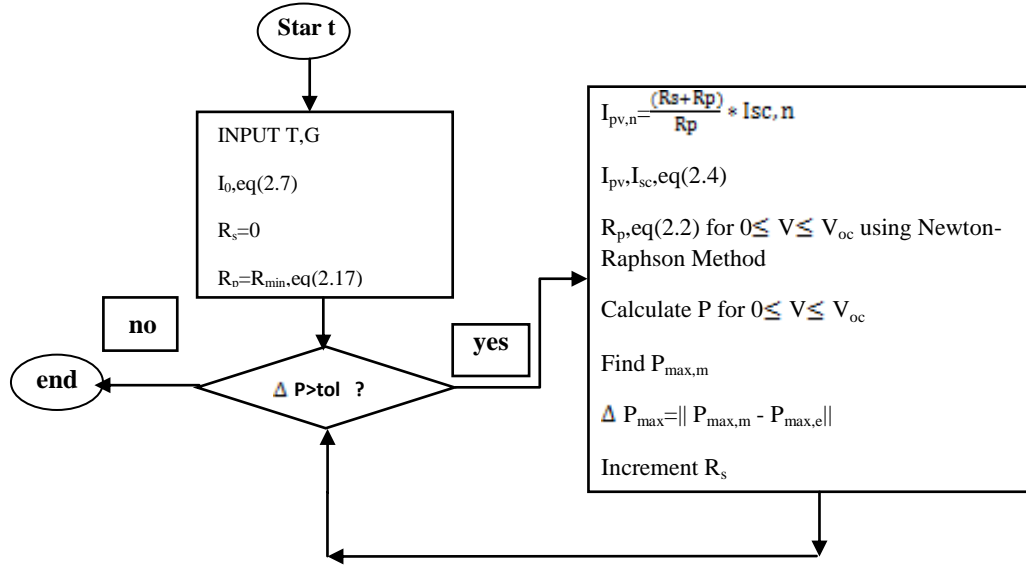
إن العلاقة بين R_s, R_p غير معلومة، ولكن يمكن إيجادها من خلال افتراض أن $P_{max,m} = P_{max,e}$ وبعدها نحل المعادلة من أجل R_s كما يلي [2]:

$$P_{max,m} = V_{mp} * (I_{pv} - I_0 * [e^{\frac{(V+R_s*I)}{V_t*\alpha}} - 1]) - \frac{V_{mp} + I_{mp}*R_s}{R_p} = P_{max,e} \quad (15)$$

$$R_p = \frac{V_{mp} * (V_{mp} + R_s * I_{mp})}{[V_{mp} * I_{pv} - V_{mp} * I_0 * e^{\frac{(V_{mp} + I_{mp} * R_s)}{\alpha * N_s}} - k * T + V_{mp} * I_0 - P_{max,e}]} \quad (16)$$

إن العلاقة الأخيرة تعني ببساطة أنه من أجل أي قيمة للمقاومة التسلسلية R_s سوف يكون هنالك مقاومة تفرعية R_p تجعل المنحني الرياضي I-V يمر عبر النقطة التجريبية (V_{mp}, I_{mp}) .

إنّ الهدف لإيجاد القيمتين R_s , R_p من أجل جعل قَمّة المنحني $I-V$ يتطابق مع القمة التجريبية للاستطاعة عند النقطة (V_{mp}, I_{mp}) ، لذلك نحن بحاجة إلى العديد من التكرارات حتى تتحقق العلاقة $P_{max,m} = P_{max,e}$.



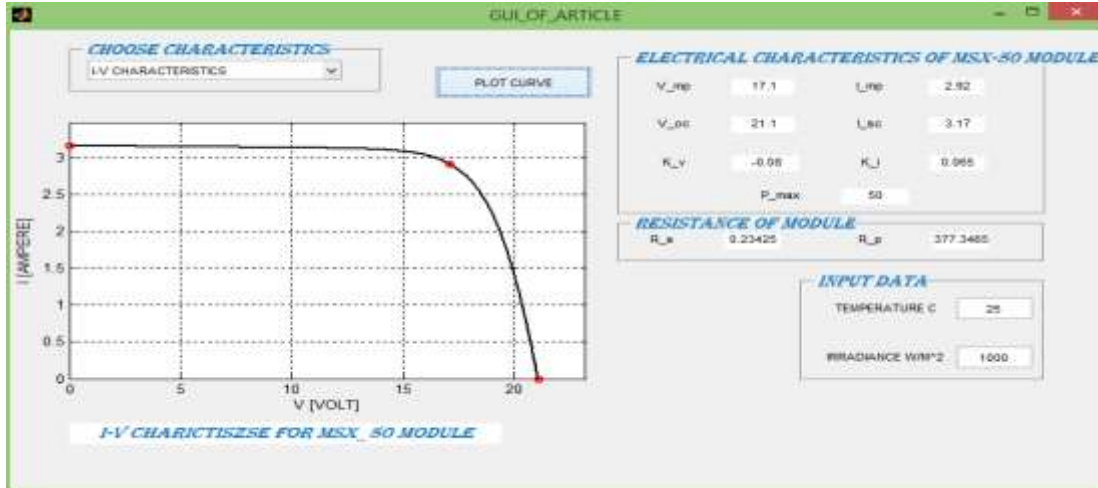
الشكل (4) يبيّن المخطط الصندوقي لحساب R_s, R_p

إنّ إعطاء قيم ابتدائية لكلاً من R_s, R_p يعتبر ضرورياً قبل أن تبدأ عملية التكرار، لذلك يمكن أن تعطى المقاومة التسلسلية R_s القيمة 0، أمّا القيمة الابتدائية من أجل المقاومة التفرعية R_p فتعطى بالعلاقة التالية [3]:

$$R_{p,min} = \frac{V_{mp}}{(I_{sc,n} - I_{mp})} - \frac{(V_{oc,n} - V_{mp})}{I_{mp}} \quad (17)$$

إنّ المعادلة السابقة تحدد القيمة الأصغرية للمقاومة R_p ، والتي تعبر عن ميلان المستقيم بين دائرة القصر ونقطة الاستطاعة العظمى، على الرغم أنّ R_p لا تزال غير معلومة، إلا أنها تبقى أكبر من $R_{p,min}$.

لقد قمنا بتصميم واجهة رسومية GUI باستخدام برنامج matlab من أجل حساب قيم R_s , R_p ، التي تجعل العلاقة الرياضية للمنحني $P-V$ مطابقة للقمة التجريبية للاستطاعة عند النقطة (V_{mp}, I_{mp}) ، حيث أنّ المخطط الصندوقي الذي في الشكل (4) يبيّن الية عمل البرنامج [2].

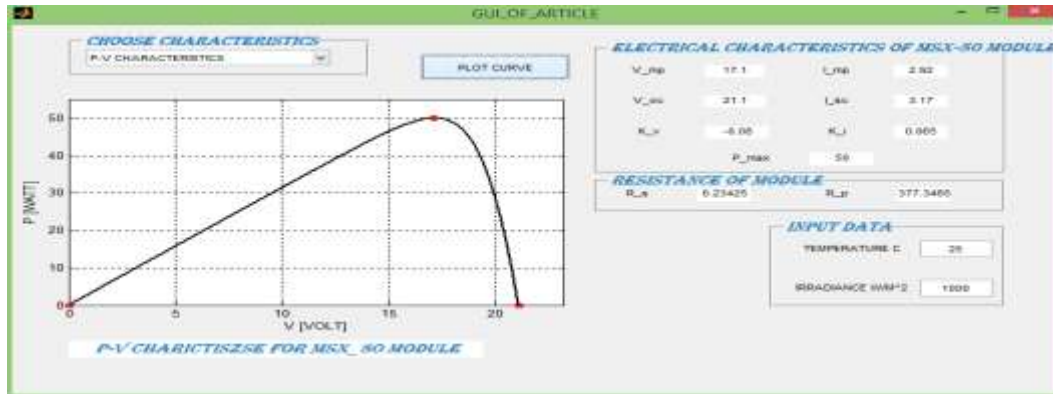


الشكل (5) يبين واجهة GUI مصممة لعرض خصائص I-V للموديول الشمسي MSX-50

إنَّ قيمتي R_s , R_p يمكن الحصول عليهما عندما يتوقف التكرار وذلك عندما $P_{max,m}$ المحسوبة تكون مساوية للقيمة المقدرة $P_{max,e}$. بعد تنفيذ البرنامج تم الحصول على قيمتي R_s , R_p ، وذلك من أجل الموديول الشمسي MSX-50:

$$R_p = 377.34\Omega , R_s = 0.234\Omega$$

إنَّ الشكل (5) يوضح الخصائص I-V، والشكل (6) يوضح الخصائص P-V عند شروط التشغيل القياسية. (IRRADIANCE = 1000 W/M², T = 25 C) وعند قيم V_{mp}, I_{mp} و V_{oc} و I_{sc} مع استخدام القيم المحسوبة للمقاومات R_s, R_p والتي يتم عرضها أيضاً على واجهة المستخدم الرسومية GUI التي قمنا بتصميمها.



الشكل (6) يبين الواجهة GUI مصممة لعرض خصائص P-V للموديول الشمسي MSX-50

خوارزمية نيوتن-رافسون:

إنَّ خوارزمية نيوتن رافسون هي إحدى التقنيات القوية في طرائق التحليل العددي، فعلى الرغم من كونها بحاجة إلى بعض الحسابات التفاضلية، إلا أنها تعتمد على فكرة بسيطة من أفكار التقريب الخطي، كما أنَّ من أكثر تطبيقاتها شهرة هي إيجاد جذور حل المعادلات [6].

استخدام التقريب الخطي لحل المعادلات:

ليكن لدينا التابع $f(x)$ وليكن r هو جذر لحل المعادلة $f(x)=0$ ، بداية سنقدر النقطة x_0 بالنسبة للجذر r ، بعد ذلك سنقوم بتحسين التخمين لنحصل على النقطة x_1 ، ثم بعد ذلك نقوم بتخمين جديد فنحصل على النقطة x_2 والتي تكون أقرب للجذر r ، سنكرر الخطوة السابقة حتى نصبح قريبين بشكل مقبول من النقطة r ، عندها نكون قد أوجدنا الجذر بشكل تقريبي [6].

إن الخطوات السابقة تمثل الشكل العام لآلية حلّ تسمى بالتركرار، حيث أنه من بين العديد من طرق الحل التكراري لإيجاد الجذور، تجمع طريقة نيوتن-رافسون بين البساطة في التنفيذ والقوة في النتائج، لهذا السبب هي من أكثر الطرق انتشاراً [6].

شرح طريقة نيوتن-رافسون التكرارية:

ليكن لدينا التقدير الأولي x_0 بالنسبة للجذر r حيث أنّ $r = x_0 + h$ ، وبما أن الجذر الحقيقي للمعادلة هو r فإنّ $h = x_0 - r$ ، حيث أنّ h تمثل المسافة بين القيمة x_0 والجذر r .

وبما أنّ الجذر يجب أن يكون قريب بشكل كافي من الجذر r عندها يمكننا استخدام قواعد التقريب العددي على الشكل التالي [6]:

$$0 = f(r) = f(x_0 + h) \approx f(x_0) + h * f'(x_0) \quad (18)$$

وبشرط ألا يكون $f'(x_0)$ يساوي الصفر يكون لدينا:

$$h = - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (19)$$

وبالتالي يصبح معادلة الجذر r على اشكل التالي:

$$r = x_0 + h = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (20)$$

ومن أجل تقدير قيمة النقطة x_1 :

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (21)$$

ويمكن تعميم الصيغة من أجل تكرار n للحصول على الصيغة العامة:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (22)$$

نمذجة الموديول باستخدام برنامج matlab/Simulink 2014a:

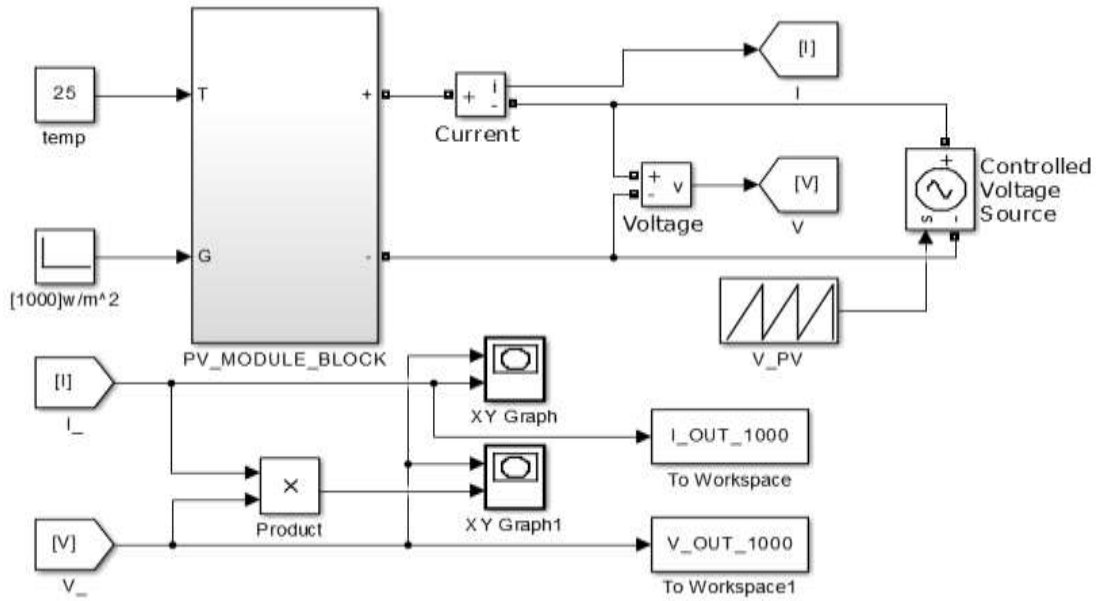
بعد توصيفنا لمعادلات الموديول، قمنا بتطبيق هذه المعادلات بالإضافة إلى قيم المقاومات R_s, R_p من أجل بناء بلوك يحاكي سلوك الموديول الكهروضوئي باستخدام برنامج matlab/Simulink 2014a حيث كان شكل الموديول كما هو مبين بالشكل (7).

وبعد إجراء عملية النمذجة على قيم مختلفة للإشعاع IRADIANCE، حيث أخذ الإشعاع الشمسي القيم التالية:

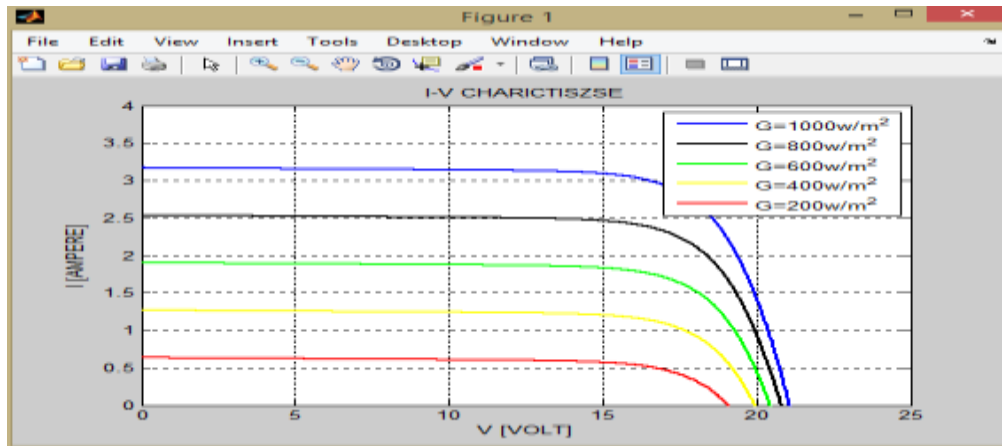
$$IRRDIANCE = [200, 400, 600, 800, 1000] \text{ W/M}^2$$

فكانت نتائج مخططات $I-V$ كما هو موضّح في الشكل (8) حيث تم تصدير نتائج المحاكاة من البيئة

Simulink إلى Workspace ومن ثمّ رسم النتائج.



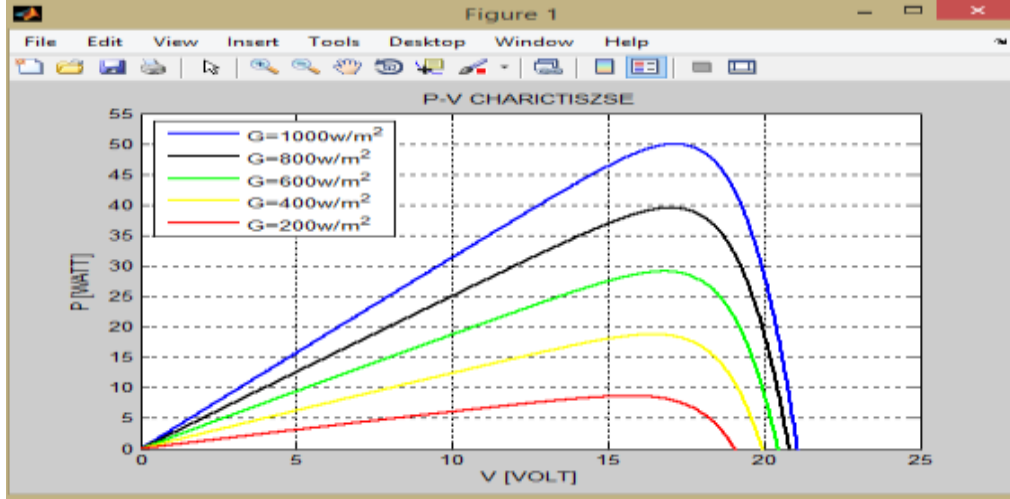
الشكل (7) يبين الموديول MSX-50 باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK



الشكل (8) يبين الخصائص I-V للموديول MSX-50 عند إشعاعات مختلفة

أما نتائج مخططات P-V فهي موضحة في الشكل (9) حيث تم تصدير النتائج من البيئة Simulink إلى Workspace ومن ثم رسم النتائج.

نجد مما سبق أنّ خرج الموديول الكهروضوئي يتعلق بالإشعاع الشمسي، حيث أنّه بزيادة الإشعاع الشمسي تزداد استطاعة خرج الموديول، ويتناقصها تنقص الاستطاعة.

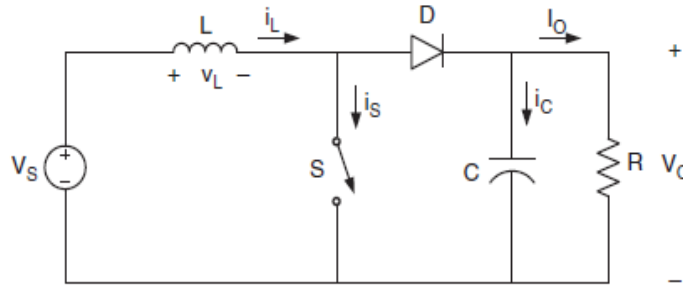


الشكل (9) يبين الخصائص P-V للموديول MSX-50 عند إشعاعات مختلفة

المقطعات الرافعة للجهد:

إن الهدف الأساسي من استخدام هذا النوع من المقطعات هو الحصول على جهد حمل أعلى من مستوى جهد الدخل، حيث يبين الشكل (10) الدارة المكافئة للمقطعات الرافعة للجهد .

إن الشكل (10) يوضح بنية مقطع التقوية، حيث يتألف من منبع جهد مستمر على دخل المقطع V_s ، ملف تقوية L ، مفتاح ترانزستوري S ، ديود D ، مكثف ترشيح C ، بالإضافة إلى مقاومة حمل R ، كما يبين الشكل (11) أشكال إشارات التيارات وجهد خرج المقطع chopper في نمط التوصيل المستمر continuous conduction mode CCM [9].



الشكل (10) الدارة المكافئة للمقطعات الرافعة للجهد.

عند يكون الترانزستور S في حالة وصل ON، يتزايد تيار ملف L المقطع بشكل خطي، بينما يكون الديود D في حالة فصل OFF، أما عند فصل الترانزستور S ، سيتم تفريغ الطاقة المخزنة في الملف L إلى دارة خرج المقطع RC [9].

إن نسبة التشغيل DUTY CYCLY تعطى بالعلاقة التالية [10]:

$$K = 1 - \frac{V_{s,min} * \eta}{V_o} \quad (23)$$

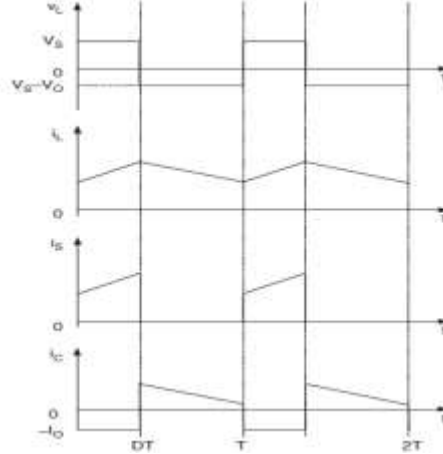
حيث أن η : عبارة عن كفاءة المقطع.

بإهمال الضياعات في الدارة نجد:

$$K = 1 - \frac{V_{s,min}}{V_o} \quad (24)$$

ويمكن حساب ذاتية الملف من علاقة تموج التيار كما يلي [10]:

$$L = \frac{V_{s,min} * K}{f * \Delta I_L} \quad (25)$$



الشكل (11) إشارات التيارات وجهد الخرج لمقطع التقوية (Boost chopper)

ويمكن حساب سعة المكثف C من علاقة تموج الجهد [10]:

$$C = \frac{I_{o,max} * K}{f * \Delta V_o} \quad (26)$$

بفرض كان المطلوب تصميم مقطع تقوية على دخله جهد $V_s = 17.1 \text{ volt}$ (لكي يعمل على جهد V_{mp} للموديول)، لينتج لدينا جهد خرج أعظمي $V_o = 50 \text{ volt}$ ، وتيار $I_o = 1 \text{ A}$ وإذا كان تموج التيار $\Delta I = 0.1 \text{ A}$ وعامل تموج الجهد $\Delta V = 0.05 \text{ V}$ ، المطلوب حساب قيم كل من المكثف والملف اللازمين لتصميم المقطع، إذا علمنا أن تردد المقطع 10 KHz .

$$K = \frac{50 - 17.1}{50} = 0.658 \quad \text{نحسب K من العلاقة (24):}$$

بعد ذلك نستخدم العلاقة (25) فنجد أن قيمة الملف L:

$$L_{min} \approx 11.25 \text{ mh}$$

بعد ذلك نستخدم العلاقة (33) فنجد أن قيمة الملف C:

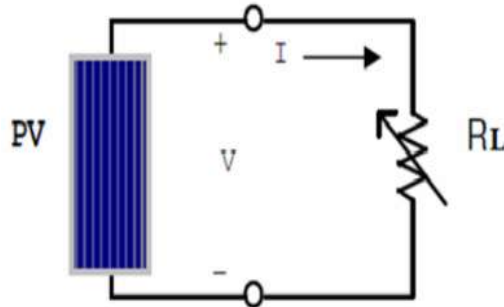
$$C_{min} = 1.316 \text{ mF} \approx 1.35 \text{ mF}$$

أهمية ملاحظة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT:

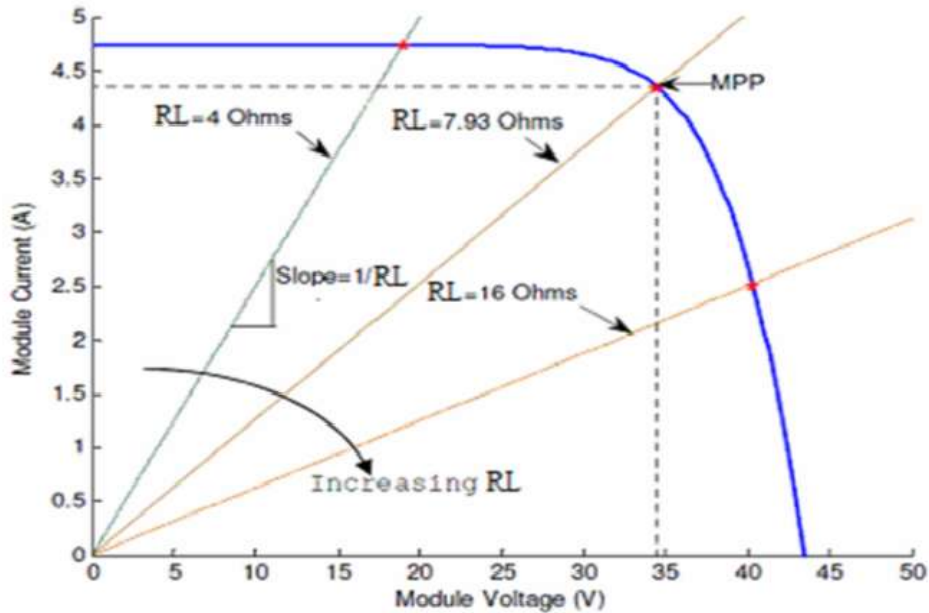
عند وصل موديول الخلايا الكهروضوئية بشكل مباشر إلى الحمل، فإن نقطة عمل الموديول هي عبارة عن تقاطع منحنى $I-V$ للموديول مع خط الحمل الذي يعبر عن العلاقة $I-V$ للحمل، فعلى سبيل المثال إن الشكل (12) يبين أن مقاومة الحمل وهي موصولة مع الموديول، ولديها أيضاً خط مستقيم ميله $1/R_L$ كما يبين الشكل (13)، أي أن ممانعة الحمل هي التي تحدد شروط التشغيل للموديول الكهروضوئي، وبشكل عام إن هذه النقاط من النادر أن تكون عند نقطة الاستطاعة الأعظمية MPP، لذلك لا ينتج الموديول الطاقة الأعظمية [3].

بينت الدراسات أنه بوصول النظام بشكل مباشر مع الموديول الكهروضوئي سنستفيد من 31% من قدرة الموديول، كما أن مصفوفة من الخلايا الكهروضوئية ستكون أكبر من المعتاد وذلك لتعويض الاستطاعة المنخفضة خلال الأشهر في فصل الشتاء.

وبسبب عدم التطابق بين موديول الخلايا الكهروضوئية وبين متطلبات الحمل، إضافة إلى الحجم الأكبر من اللازم لمصفوفة الموديولات الشمسية والتي بدورها تزيد من تكلفة النظام ككل، لحل هذه المشاكل، سنستعمل خوارزمية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT للمحافظة على نقطة تشغيل الموديول عند نقطة الاستطاعة الأعظمية MPP، كما أن هذه النقطة تعطي حوالي 97% من الاستطاعة الأعظمية للموديول [3].



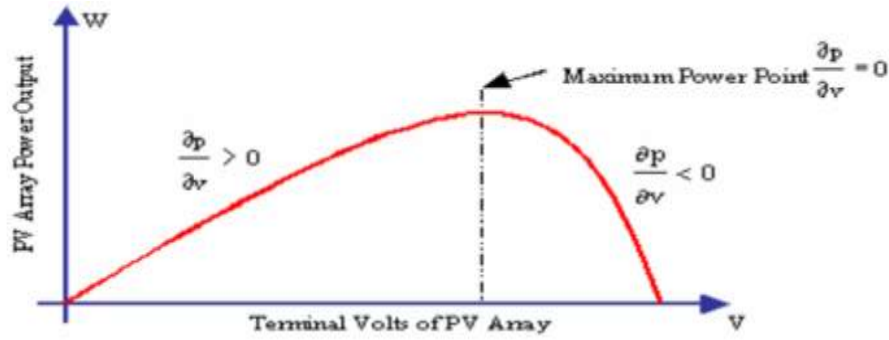
الشكل (12) مقاومة الحمل المتغيرة الموصولة مع الموديول الشمسي



الشكل (13) يبين تقاطع المستقيم الممثل للحمل (ذو الميل $1/R_L$) مع المنحني $I-V$

مبدأ خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT:

إن خوارزمية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية تعتمد على حقيقة أن مشتق استطاعة الخرج P بالنسبة لجهد الموديول V يكون معدوم عند نقطة الاستطاعة العظمى MPP كما هو موضح في الشكل (14)، حيث أن الشكل (14) يبين لدينا الخصائص $P-V$ ، حيث تكون قيمة المشتق أكبر من الصفر على يسار القمة، كما يكون أصغر من الصفر على يمين القمة [3].



الشكل (14) يوضح خصائص P-V

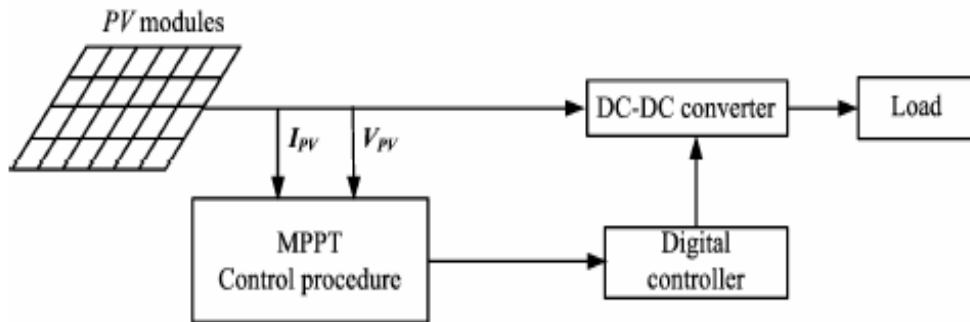
$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \text{ FOR } V = V_{mp} \quad (27)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} > 0 \text{ FOR } V < V_{mp} \quad (28)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} < 0 \text{ FOR } V > V_{mp} \quad (29)$$

خوارزمية الاضطراب والمراقبة Perturbation and Observation :

طريقة الاضطراب والمراقبة P&O هي من أكثر الخوارزميات شهرةً من أجل ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية، وذلك لبساطة بنيتها من جهة، وقلة البارامترات المطلوبة للخوارزمية من جهة أخرى. هذه الطريقة توجد الاستطاعة الأعظمية للموديول الكهروضوئي من خلال متوسط تكرارات الاضطرابات والمراقبة، ومقارنة الاستطاعة المتولدة مع استطاعة الموديول [4].



الشكل (15) يبين بنية نظام ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT

تبعاً لبنية متحكم ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT للنظام الموضحة في الشكل (15)، إن البارامترات المطلوبة للتغذية العكسية للاستطاعة من أجل عمل هذه الخوارزمية هي كلاً من الجهد والتيار للموديول الكهروضوئي. إن نقطة الاستطاعة العظمى يتم الحصول عليها عندما يتحقق الشرط $dP/dV = 0$ إن الميل (dP/dV) يمكن حسابها من خلال قيم متتالية للجهد و التيار بعد تطبيقها على العلاقة التالية [4]:

$$\frac{\partial P}{\partial V}(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (30)$$

حيث أن:

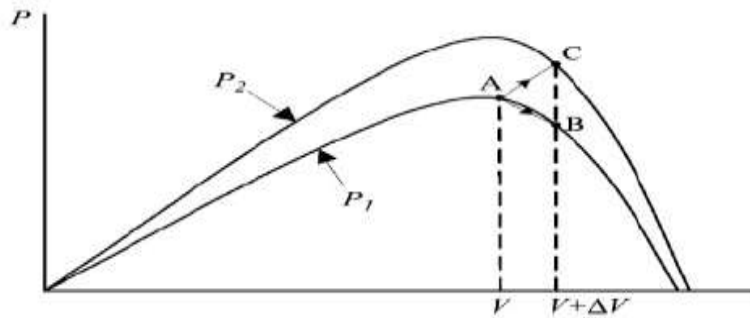
$$P(n) = V(n) * I(n)$$

إن مبدأ عمل خوارزمية P & O، يقوم على أنه خلال فترة دورية ثابتة يجب ضبط الحمل الموصول مع النظام الكهروضوئي من أجل تغيير كل من جهد و استطاعة الموديولات، إن الفرق قبل وبعد لكل من الجهد والاستطاعة يراقب ويقارن مع القيم المرجعية وذلك من أجل زيادة أو نقصان الحمل في الخطوة التالية [4].
-إذا كان الاضطراب ينتج لدينا استطاعة خرج للموديول أعلى من سابقتها قبل التغيير، عندها يتم تعديل جهد الموديول للتغيير بنفس الاتجاه.
-إذا كانت استطاعة الخرج أقل مما كانت عليه قبل التعديل، هذا يدل على اتجاه التغيير في الخطوة التالية يجب أن يتم تعديله (عكسه).
إن عملية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT يمكن أن تجز من خلال سلسلة من تكرارات الاضطرابات والمراقبة والمقارنة.

إن من إيجابيات هذه الطريقة [4]:

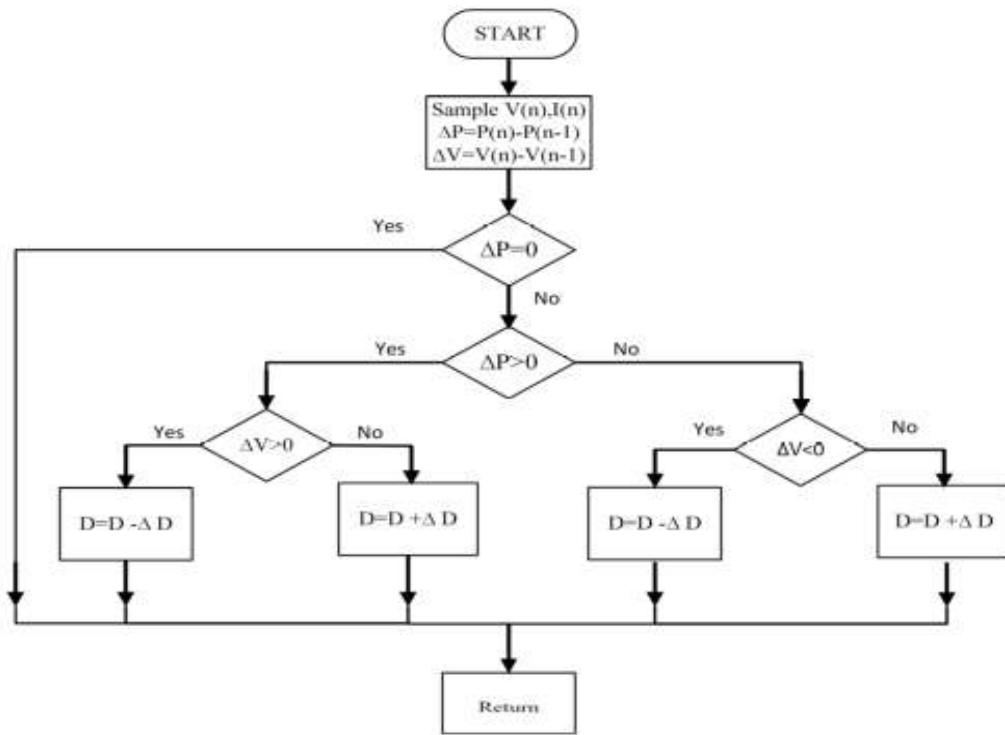
- 1 بساطة بنيتها. 2 - سهولة تنفيذها. 3- قلة البارامترات التي نحتاجها.
- إما سلبياتها فيمكن تلخيصها كما يلي [4]:

1. إن الاستطاعة التي يتم ملاحظتها بهذه الطريقة سوف تتذبذب قيمها صعوداً ونزولاً بالقرب من نقطة الاستطاعة العظمى، حيث أن مطال التذبذب يتحدد بمقدار التعديل على جهد الخرج.
2. كما تتميز هذه الطريقة، بظاهرة حكم غير عادلة عند حدوث تغيرات سريعة في الطقس، كما هو مبين في الشكل (16)، نقطة البداية هي A و $A+\Delta V$ هي نقطة البداية مضافاً لها جهد الاضطراب فعندها سوف تتحرك النقطة من A إلى B وسوف تسبب فقدان الاستطاعة عند الحالة المستقرة، تبعاً لقواعد الحكم في طريقة P&O فإن الاضطراب التالي سوف يكون $-\Delta V$ في الاتجاه المعاكس.



الشكل (16) يبين خصائص P-V عند تغير الإشعاع

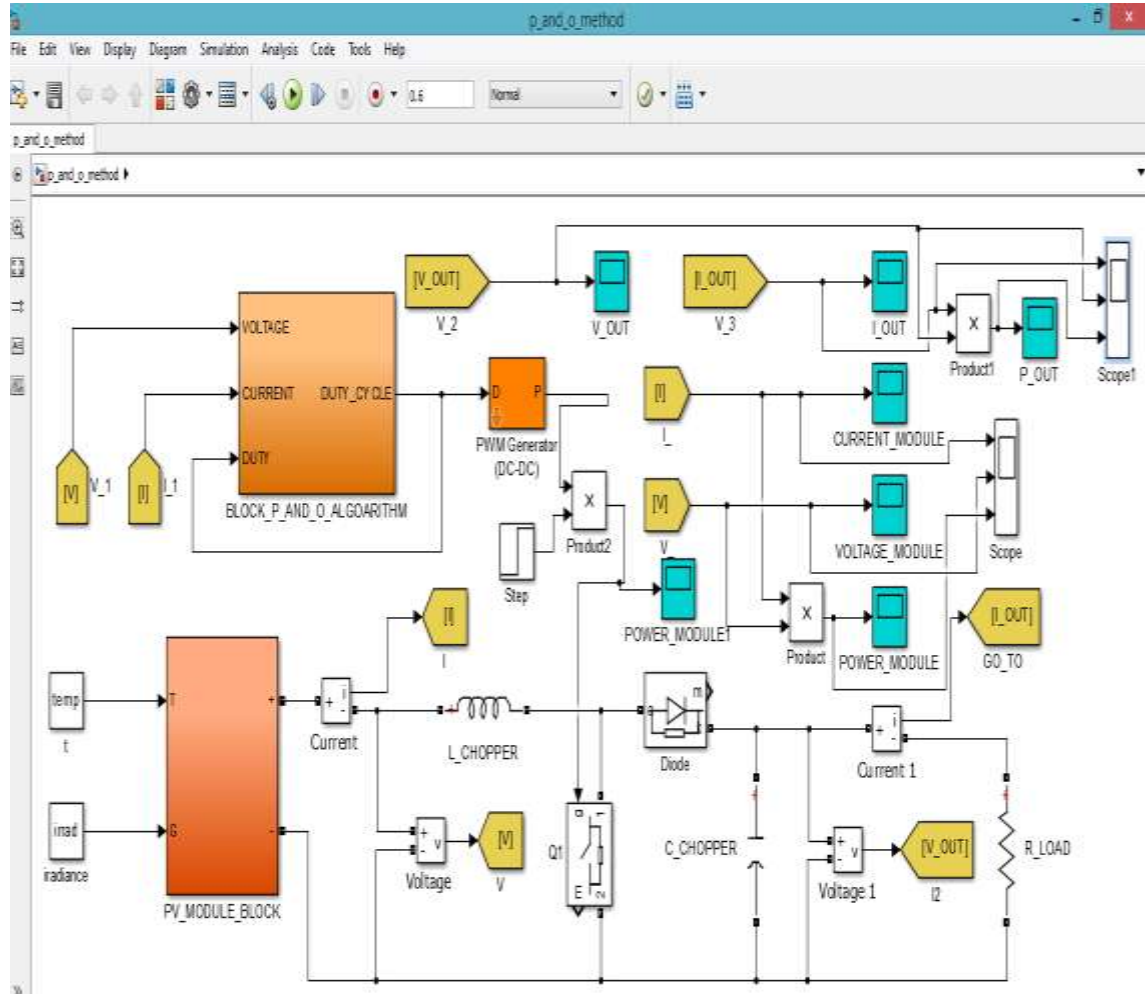
على كل حال إذا تغير الإشعاع الشمسي خلال دور العينة التالية، عندها منحنى الاستطاعة سينتقل من النقطة P_1 إلى النقطة P_2 ونقطة الانتقال سوف تصبح من A إلى C عوضاً عن A إلى B.
سوف تكون النتيجة أن الاستطاعة في ازدياد بشكل مستمر، وبالتالي فإن اضطراب الجهد سوف يستمر في الاتجاه $+\Delta V$ ، وبالتالي فإن نقطة التشغيل سوف تستمر في الابتعاد عن نقطة الاستطاعة العظمى، وإذا استمر الإشعاع الشمسي بالازدياد بشكل مستمر، عندها ستبقى نقطة التشغيل تبعد عن نقطة الاستطاعة العظمى، وهكذا ستستمر سيقى تناقص الاستطاعة للموديول مستمراً، وبالتالي تناقص الكفاءة للنظام الشمسي.
إن الشكل (17) يوضح آلية عمل الخوارزمية.



الشكل (17) يبيّن المخطط الصندوقي لآلية عمل خوارزمية P & O [7]

النتائج والمناقشة:

1. تم وضع نموذج رياضي فيزيائي للموديول الكهروضوئي يأخذ بعين الاعتبار تغيرات كلاً من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، كما قمنا بتصميم واجهة مستخدم رسومية GUI لحساب كلاً من المقاومة التسلسلية R_s والمقاومة التفرعية R_p .
2. تم دراسة تصميم دائرة مقطّع رافع للجهد وفق جهد خرج يعادل 50V وتيار حمل 1A ليعمل على استطاعة الموديول الكهروضوئي الأعظمية والبالغة 50W.
3. تم تصميم نظام تحكم يعمل المقطّع لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT للوح الكهروضوئي، تعمل وفق خوارزمية الاضطراب والمراقبة P & O.
4. بناءً على ما سبق ذكره، تمت نمذجة النظام الكهروضوئي بالكامل باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK، كما هو مبين بالشكل (18).
5. تم اختبار عمل النموذج على مقاومة حمل قيمتها $R_{load}=50\Omega$ وكانت النتائج تدل على دقة وصحة مراحل التصميم والنمذجة للنظام، كما هو ظاهر في الشكل (19)، حيث أنّ النتائج من الزمن [0,0.3]sec، تعرض إشارات التيار والجهد والاستطاعة على خرج الموديول الشمسي من دون ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT، أمّا النتائج من الزمن [0.3,0.6]sec، فهي تعرض الإشارات السابقة مع تنفيذ خوارزمية P&O لملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT.



الشكل (18) يبين الحمل موصول مع النظام الكهروضوئي الكامل

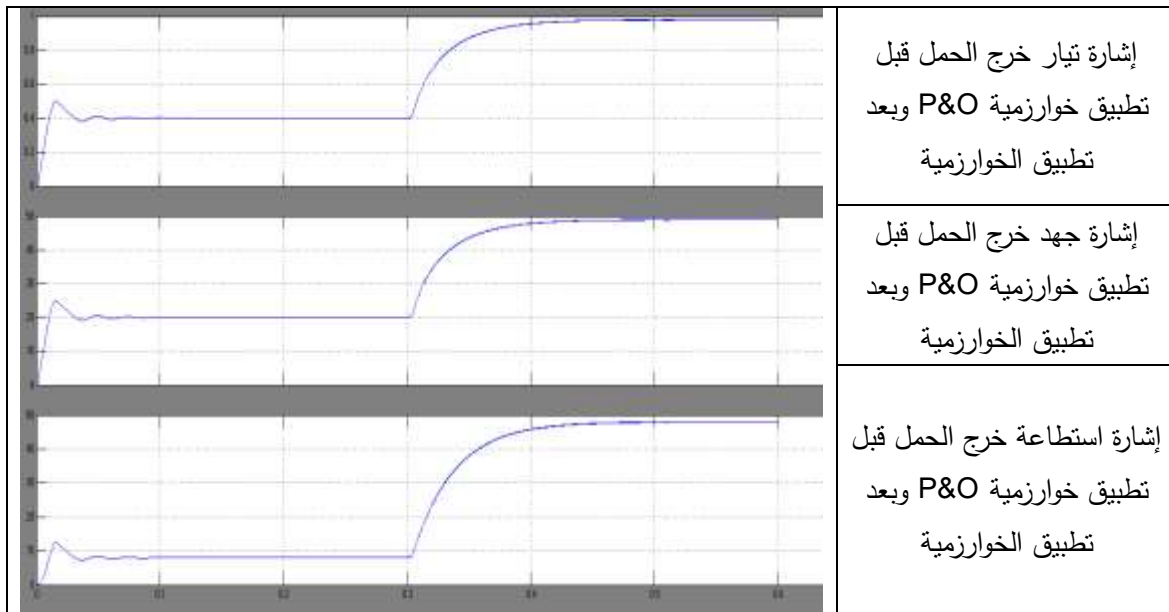
6. قبل تطبيق خوارزمية P&O، كان تيار الحمل $I_{load}=0.41$ A، كما أنّ الجهد الذي ينتجه الموديول $V_{out}=20.8$ V، وبالنتيجة تكون الاستطاعة المقدمة من الموديول MSX-50 للحمل R_{load} حوالي $P_{out}=8.66$ WATT، وبالتالي نكون قد حصلنا على حوالي 17.32% من الاستطاعة الكلية للموديول البالغة 50WATT، وبالتالي نكون خسرنا حوالي 82.68% من استطاعة الموديول (أي حوالي 41.34 WATT) لذلك سنقوم بتحسين هذه الاستطاعة عن طريق تطبيق متحكم MPPT من أجل الحصول على استطاعة أكبر.

7. بعد تطبيق خوارزمية P&O، نجد أنّ قيم تيار الموديول الكهروضوئي تتراوح تقريباً في المجال $[2.84, 2.93]$ A كما أنّ قيم جهد الموديول الشمسي تتراوح في المجال $[16.6, 17.25]$ V، أمّا الاستطاعة فهي تتراوح في المجال $[49.25, 50]$ WATT، وبالتالي هنالك فرق كبير بين الدارة بدون متحكم MPPT وبوجود المتحكم.



الشكل (19) يبين إشارات التيار والجهد والاستطاعة

8. نلاحظ من الشكل (20)، إن الاستطاعة المقدمة للحمل بعد استخدام خوارزمية P&O هي قرابة 48 WATT والسبب في انخفاض الاستطاعة هو وجود ضياعات في الديود والملف والترانزستور المستخدمين في دائرة المقطع، أما التيار فهو حوالي 0.98A، والجهد قرابة 49V.



الشكل (20) يبين إشارات التيار والجهد والاستطاعة على مقاومة الحمل

الاستنتاجات والتوصيات:

1. نوصي باستخدام النموذج الرياضي الخاص باللوح الكهروضوئي أثناء مراحل دراسة وتصميم وتركيب وتنفيذ الأنظمة الكهروضوئية، ليعطي تصوراً مستقبلياً عن أدائها بعد التركيب.
2. نوصي بتشجيع الصناعة المحلية في إنتاج مقطعات تقوية، وقد تمّ في البحث وضع الأسس التصميمية لهذا النظام.
3. نوصي باستخدام خوارزمية البحث الاضطراب والمراقبة P & O، للعمل عند نقطة الاستطاعة العظمى MPP، لسهولة تنفيذها وبساطتها من جهة، ولرفع كفاءة ومردود الألواح الكهروضوئية من جهة أخرى، حيث أنّ البحث أظهر الفرق الكبير في مردود الاستطاعة عند استخدام خوارزمية لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT، وبدون استخدامها، مما يوفر في عدد الموديولات المطلوبة من أجل الحصول على استطاعة معينة، وبالتالي توفير التكلفة المادية للنظام ككل.

المراجع:

- [1] *Introduction to Photovoltaic Systems*, in Renewable Energy The Infinite Power of Texas.
http://mspic.ee.nchu.edu.tw/class_course/university/English/handout/Test-Hints.pdf
- [2] Alsaid B. *Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell/Module/Array with Two-Diode Model*. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering .Vol.1, Issue.3, June 2012
- [3] Jallad J. *design and simulation of a photovoltaic system with maximum power control to supply a load with alternating current*.
- [4] Ting-Chung Yu, Yu-Cheng Lin. *A Study on Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems*.
- [5] datasheet MSX-50 photovoltaic module.
- [6] *The Newton-Raphson Method*.
<https://www.math.ubc.ca/~ansteemath104/104newtonmethod.pdf>
- [7] Williams K. Francis, Prof. Shanifa Beevi S, Prof. Johnson Mathew. *MATLAB/Simulink PV Module Model of P&O And DC Link CDC MPPT Algorithms with Labview Real Time Monitoring And Control Over P&O Technique*. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 3, Special Issue 5, December 2014
- [8] F. Chekired, C. Larbes, D. Rekioua, F. Haddad. *Implementation of a MPPT fuzzy controller for photovoltaic systems on FPGA circuit*. Energy Procedia, vol.6, January (2011), pages 541–549
- [9] Muhammad H. Rashid. *POWER ELECTRONICS HANDBOOK*. 3rd ed, Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier. U.S.A, 2011, 1409.
- [10] HAUKE B. *Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage*. Texas instruments .Application Report SLVA372C–November 2009.