

دراسة استثمار التموج في المبدلات DC/DC في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية في النظم الكهروضوئية الشمسية المستقلة

الدكتور ثائر إبراهيم*

الدكتور علي خضور**

نهال بيطار***

(تاريخ الإيداع 20 / 4 / 2015. قُبِلَ للنشر في 5 / 7 / 2015)

□ ملخص □

يرتكز البحث على المرحلة الأولى DC/DC في النظام الكهروضوئي الشمسي، حيث تم استخدام تقنية التحكم المرتبط التموج RCC في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية للمنظومات الكهروضوئية. تستفيد هذه التقنية من تموج الإشارة الموجود أصلاً في المبدلات DC/DC، حيث يُعامل هذا التموج كتغير يمكن الوصول منه إلى تقارب أمثلي. إن الميزة الأساسية لتقنية التحكم بعلاقة التموج (RCC) أنها تلاحق نقطة الاستطاعة العظمى (MPP) بسرعة وتحتاج إلى دارات تشابهية بسيطة وغير مكلفة لتطبيقها، وسيتم التحقق من صحة النتائج عملياً.

الكلمات المفتاحية: ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT)، النظام الكهروضوئي (PV)، التحكم بعلاقة التموج (RCC).

* مدرس - قسم الأتمتة الصناعية - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - طرطوس - سورية.
** أستاذ مساعد - قسم تقانات الطاقات المتجددة - قسم تقانات الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - طرطوس - سورية.
*** طالبة دراسات عليا - ماجستير - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - طرطوس - سورية.

Study the utilization of DC-DC converters ripple for maximum power point tracking in stand –alone solar photovoltaic systems

Dr. Their Ibrahim^{*}
Dr. Ali Khadour^{**}
Nehal Bittar^{***}

(Received 20 / 4 / 2015. Accepted 5 / 7 / 2015)

□ ABSTRACT □

Search is based on the first stage DC/DC in the solar photovoltaic system, where it was appropriate to use Ripple Correlation Control method for tracking the maximum power point of photovoltaic arrays. The technique takes advantage of the signal ripple, which is automatically present in power converters, where the ripple is interpreted as a perturbation from which a gradient ascent optimization can be realized. The Basic feature of Ripple Correlation Control technique converges asymptotically at maximum speed to the maximum power point, and has simple circuit implementations. And will validate the results in practice.

Index Terms—Maximum power point tracking (MPPT), photovoltaic (PV), ripple correlation control (RCC).

* Associate Professor- Department Of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tishreen University- Syria.

**Associate Professor In The Department Of Renewable Energy Technologies - Faculty of Technical Engineering - Tishreen University - Syria.

*** Postgraduate Student - Faculty of Technical Engineering - Tishreen University - Tartous - Syria.

مقدمة:

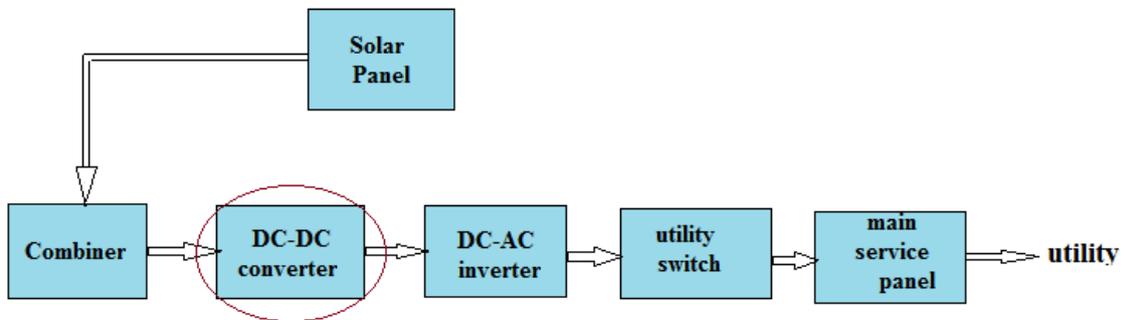
يزداد الطلب على الطاقة الكهربائية في سورية بشكل كبير، وفي ظل هذا التحدي الطاقوي الهائل والنمو المطرد لاستهلاك الطاقة تبدو خيارات الطاقات المتجددة هدفاً هاماً لا يجوز إغفاله في أي من الخيارات الإستراتيجية القادمة، لاسيما في ضوء النضوب المتوقع والمعلن للمصادر العالمية والمحلية للوقود الأحفوري إضافة إلى ظروف الواقع الحالي في سوريا والحاجة الملحة للطاقة.

في سوريا حسب دراسة الأسكوا:

- تبلغ القيمة المتوسطة للطاقة الشمسية الساقطة على السطح الأفقي في سوريا حوالي $5 [Kwh/m^2]$ في اليوم وهذه القيمة عالية جداً مقارنة مع مناطق أخرى في العالم حيث تبلغ مثلاً في ألمانيا نصف القيمة السابقة.
- يتراوح عدد الساعات المشمسة سنوياً ما بين 2800 و 3200 ساعة سنوياً، بينما يقدر عدد الأيام الغائمة سنوياً بجوالي 40 يوماً.

بالتالي تعتبر معظم المناطق السورية ذات سوية إشعاعية جيدة على مدار العام إضافة إلى عدد الأيام المشمسة الكبير نسبياً خلال السنة. هذه المؤشرات السابقة تعد بمستقبل مشرق لاستغلال الطاقة الشمسية في سوريا. إذاً هناك إمكانية كبيرة للاستفادة من تقانة التحويل الكهروضوئي (Photovoltaic conversion) في تعويض النقص الحاصل في الطاقة الكهربائية في سوريا وتعويض النقص الحاصل جراء صعوبة الحصول على الوقود الأحفوري. تعتبر طاقة الخلايا الكهروضوئية شكلاً من أشكال الطاقة المتجددة والنظيفة، لأنه لا يسفر عن تشغيلها نفايات ملوثة ولا ضوضاء ولا إشعاعات ولا تحتاج لوقود غير أشعة الشمس.

يوجد في النظام الكهروضوئي مرحلتين أساسيتين هما: DC/AC - DC/DC، كما هو مبين في الشكل (1) وسنركز في بحثنا هذا على المرحلة الأولى DC/DC.

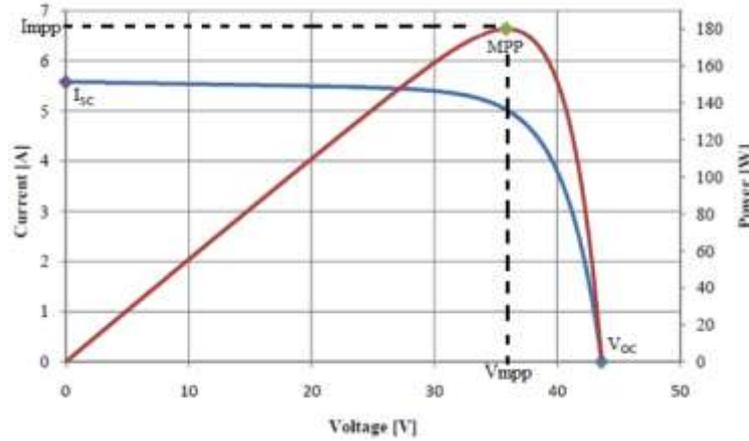


الشكل (1) المخطط الأساسي لنظام التحويل الشمسي.

كما سنسلط الضوء على أهمية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية وسيتمحور البحث حول تقنية الـ RCC، حيث تُستخدم هذه الخوارزمية في حساب دورة التشغيل للمفتاح الإلكتروني لمبدلة DC/DC بهدف الحصول على أعظم استطاعة من اللوح الكهروضوئي. ونستنتج قانون التحكم المرتبط بالتموج (تموج تيار خرج اللوح ودخل المبدلة DC/DC) الذي يمكن تطبيقه باستخدام دارات تكاملية ICs بسيطة ذات تكلفة قليلة. من ثم نقوم بإجراء الاختبارات البرمجية عن طريق النمذجة والمحاكاة باستخدام بيئة Labview، وفي الختام نقوم بالتحقق من صحة العمل بإجراء التجارب الميدانية والمخبرية في مخبر الطاقة الشمسية.

1 أهمية ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى

إن تيار (وتوتر) خلية الـ PV يتعلق بالحرارة و بشدة الإشعاع الساقط على الخلية (إضافة إلى مشكلة التظليل الكلي أو الجزئي للخلايا) وبما أن هذين البارامترين متغيران وبصورة مستمرة خلال النهار؛ إذاً ستتغير خصائص خلية الـ PV بشكل مستمر خلال النهار. يبين الشكل (2) منحنى (التيار - جهد) ومنحنى (الاستطاعة - جهد) المكافئة للوح الكهروضوئي [1, 2, 3, 4, 5].



الشكل (2) منحنيات I-V و P-V للوح الكهروضوئي.

وبما أن فعالية تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية في خلايا الـ PV تكون بشكل عام منخفضة (حوالي 15% ويمكن أن تصل حتى 30% في أحسن الأحوال) ولا تزال تكلفة الطاقة الكهروضوئية عالية (بالمقارنة مع كلفة الطاقة الكهربائية المتاحة من المصادر التقليدية)، لذلك فإنه من المهم والضروري الحصول على الحد الأقصى المتاح من الطاقة الكهربائية انطلاقاً من خلايا الـ PV، عن طريق ضمان عمل مبدلة DC/DC بالشكل الأمثل. مما يتيح الحصول على الطاقة الأعظمية عند العمل بالتوتر والتيار المقابلين لنقطة المنحني الموافقة لنقطة الاستطاعة الأعظمية، ولكن هذه النقطة غير ثابتة و تتعلق بالإشعاع الشمسي، لذلك يجب ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT).

هناك العديد من التقنيات التي يمكن بواسطتها التأكد من أن المبدلة تعمل عند نقطة الاستطاعة الأعظمية. تختلف هذه التقنيات عن بعضها بالعديد من الصفات منها: الحاجة إلى الحساسات، التعقيد، الكلفة، مجال التأثير، التعقب (الملاحقة) الصحيح عندما يتغير الإشعاع الشمسي أو الحرارة،..... وغيرها. وعلى الرغم من اختلاف هذه التقنيات إلا أنها جميعاً تحاول انتزاع أكبر كمية من الاستطاعة من اللوح الشمسي بأقل ضياعات ممكنة في الطاقة. ومن خوارزميات التحكم تقنية التحكم بعلاقة التوج RCC والتي هي موضوع البحث [8, 9, 11, 13].

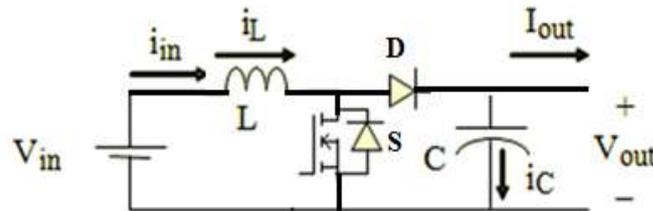
يُشكل اللوح الشمسي منبع استطاعة مستمر DC والتيار المستقر من هذا اللوح يجب أن يكون مثالياً (دون توج) من أجل كفاءة استرجار الاستطاعة. لكن المبدلة DC/DC هي مبدلة إلكترونية تُنتج أصلاً مقداراً محدداً من التوج (ripple) في تيار اللوح بسبب وجود الملف في دائرة المقطع.

لذلك تم التفكير بطريقة تنفيذها من هذا التوج في التيار لأجل ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية وكانت الفكرة بأن نستخدم توج الإبدال الطبيعي في تيار وجهد اللوح الشمسي في عملية ملاحقة الـ MPP. وتعتمد هذه الطريقة على الارتباط الموجود بين التغير الزمني لجهد أو تيار اللوح (المشتق بالنسبة للزمن) والتغير الزمني للاستطاعة حيث

تستخدم خوارزمية RCC لحساب Duty cycle الخاص بالمفتاح الإلكتروني للمبدلة DC-DC والتحكم بها بهدف الحصول على أعظم استطاعة خرج من اللوح الكهروضوئي.

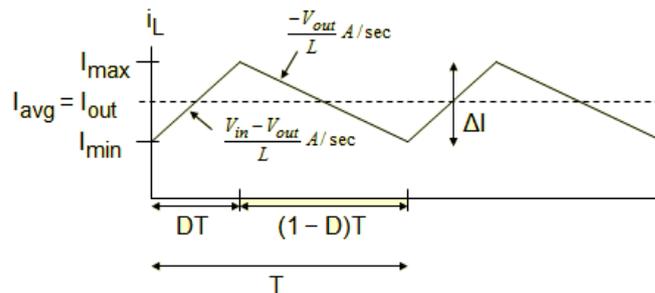
2 قانون التحكم بعلاقة التموج

في حالة مبدلة Boost يتألف تيار الملف i_L من مركبة مستمرة I_L ومركبة التموج \tilde{i}_L ، يوضح الشكل (3) الدارة المكافئة للمقطع الرفع Boost [6, 7, 8, 9].



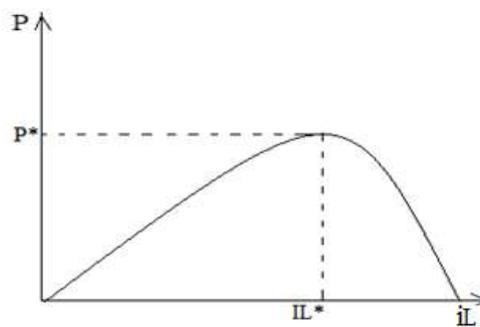
الشكل (3) الدارة المكافئة لمبدلة Boost.

يوضح الشكل (4) شكل تيار الملف (تيار اللوح) لمبدلة Boost [3, 12].



الشكل (4) شكل تيار الملف لمبدلة Boost.

عند درجة حرارة وإشعاع معلومين يمر التيار i_L وتتغير الاستطاعة المتدفقة $P = V \cdot I_L$ ، تتألف هذه الاستطاعة من قيمة وسطية P وتموج \tilde{P} . تتغير هذه الاستطاعة بشكل غير خطي كما في منحنى P-I الشكل (5).

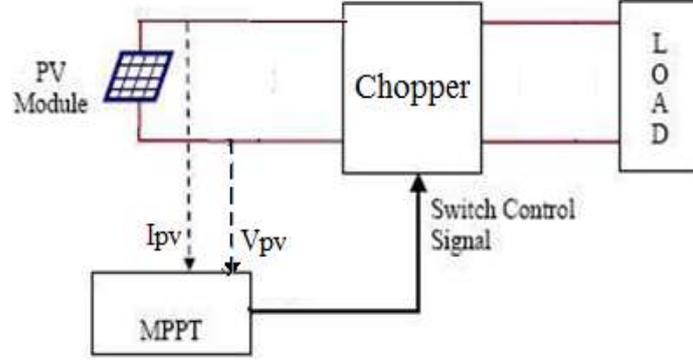


الشكل (5) الاستطاعة كتابع لتيار للوح.

عند تغير الحرارة والإشعاع ينحرف منحنى الاستطاعة في اتجاهات متباينة. بالتالي نتعرف الـ MPP تبعاً لمنحنى الاستطاعة. لذلك هدفنا هو إجبار i_L أن تلاحق I_L^* التي يصل عندها التيار إلى الـ MPP بأسرع ما يمكن دون اعتبار

الحرارة والإشعاع أو أي من المتغيرات الأخرى. يبين الشكل (6) النظام الكهروضوئي المستقل الذي سنعتمد عليه في دراستنا [1, 2, 4].

نستطيع إيجاد علاقة بين تيار الملف I_L واستطاعة المصفوفة الشمسية P لتحديد فيما إذا كان التيار I_L فوق أو تحت I_L^* ، مع الأخذ بعين الاعتبار تغيرات التيار والاستطاعة.



الشكل (6) نظام كهروضوئي مستقل.

يمكن إدخال سعة المصفوفة في الدارة (لأن ترمج التيار العالي التردد يمكن أن يعطي معلومات خاطئة عن تغيرات الاستطاعة بوجود السعة (خصوصاً الكبيرة) - المكثفات ذات المسار الجانبي الخارجية))، [10, 11, 12, 13].

- رفرض: $i = i_L$ أي أن $C=0$.

عندما يكون التيار I_L أقل من التيار I_L^* يُقاد ترمج التيار المفروض على طول المنحني إلى ترمج الاستطاعة المنطبق بالطور. أي أن زمن الإشتقاق للتيار i_L (di/dt) مضروباً بزمن الإشتقاق للاستطاعة P (dP/dt) موجب. عندما يكون التيار I_L أكبر من التيار I_L^* يكون ترمج التيار وترمج الاستطاعة متقاو تين في الطور وناتج زمن الإشتقاق للتيار i_L (di/dt) ضرب زمن الإشتقاق للاستطاعة P (dP/dt) سالب. كما هو مبين في العلاقة (1):

$$\begin{aligned} \frac{d i_L}{d t} \frac{d P}{d t} > 0 &\Rightarrow I_L < I_L^* \\ \frac{d i_L}{d t} \frac{d P}{d t} < 0 &\Rightarrow I_L > I_L^* \end{aligned} \quad (1)$$

I_L تزداد عندما تكون العلاقة (1) أكبر من الصفر بينما تتناقص I_L عندما تكون العلاقة (1) أصغر من الصفر لتحقيق هذا يجب مكاملة هذه العلاقة:

$$D = k \int \frac{dP}{dt} \frac{d i_L}{dt} dt \quad (2)$$

حيث أن d هي نسبة التشغيل للمفتاح الإلكتروني.

k ثابت ربح موجب.

تيار الملف يزداد وينقص بشكل يتناسب مع D لذلك نضبط D بحيث تزود I_L بالحركة الصحيحة. ونجد في العلاقة (2) أننا نستخدم تفاضل الإشارات (التي يمكن قياسها مباشرة) لكن الفرق بين هذه الإشارات يشكل مشكلة في تصميم الدارات العملية (دارات تحويل الاستطاعة). لذلك نستخدم ترمج التيار أو الجهد مباشرة بدلا من التفاضل.

بما أن النقطة المرجعية المثلى (MPP) تحدث عندما $dp/di_L = 0$ عندئذ يصبح قانون التحكم بالشكل:

$$D = \int \frac{dP}{d i_L} dt \quad (3)$$

تكون هذه العلاقة ممكنة عندما يقترب التكامل من الصفر أي عندما تقترب I_L من I_L^* . لكن هذا التكامل بشكل عام ليس إشارة يمكن تطبيقها في الدارات العملية (الحقيقة)، لأنه من الصعب تحقيق نسبة الإشارة إلى الضجيج (إشارة التموج) والتي تؤثر على زمن التقارب. كما أن تحديد التكامل في هذه العلاقة بعدد موجب سيغير سرعة ومسار التقارب لكنها يمكن أن تبقى ضمن التقارب. يمكن أن نوضح هذا باعتبار قانون تحكم بديل بمجال للتكامل $(d i_L / dt)^2$ والذي هو موجب طالما أن I_L يتغير. كما في العلاقة (4):

$$D = k \int \frac{dp}{diL} \left(\frac{diL}{dt} \right)^2 dt = k \int \frac{dp}{dt} \frac{diL}{dt} dt \quad (4)$$

النتائج هي نفسها في القانون (2) لكنها تتحدد من وجهة نظر مختلفة. والشروط التي يتقارب عندها التحكم إلى المثالية هي:

- أن تكون P غير محددة بشرط.
 - يكون تفاضل التيار مساويا للصفر لعدد محدود من اللحظات في الدورة.
- يتحدد الشرط الأول بمصفوفات الـ PV أما الشرط الثاني فيحدث عند عمل المفتاح و الهبدلة المنتظم في نظام العمل المستمر (CCM).

تطبق العلاقات (1) ، (4) أيضاً في حال استبدالنا الجهد بالتيار، لكننا سنستخدم قيمة سالبة للثابت K بدلاً من الموجبة لأن علاقة الجهد والتيار عكسية في مصفوفة الـ PV. فيصبح قانون التحكم بالشكل:

$$D = \int \frac{dp}{dvL} dt \quad (5)$$

يمكن الحصول على نقطة الاستطاعة الأعظمية عندما يكون تغير D يساوي الصفر لأنه الموقع الذي يكون فيه جهد المصفوفة الشمسية مساوياً للجهد الاسمي وبالتالي لن يكون هناك تغير في D، [14, 15, 16].
البرهان الرياضي المقدم لاستقرار خوارزمية الـ RCC، يمكن أن يحقق نسبة تشغيل مناسبة لنقطة الاستطاعة الأعظمية عند إشعاع شمسي متغير. لكن من المتوقع أن يكون العمل بهذا القانون صعباً بسبب التعقيد في تحقيق تكامل هذه النسبة في الدارة. لذلك ف إن العلاقة السابقة غير كافية للحكم بأنه يمكن الحصول على نسبة التشغيل المناسبة من أجل نقطة الاستطاعة الأعظمية لأنه من المستحيل المحافظة على النسبة بين الاستطاعة والجهد مثالية (تساوي الصفر) لفترة معينة من الزمن.

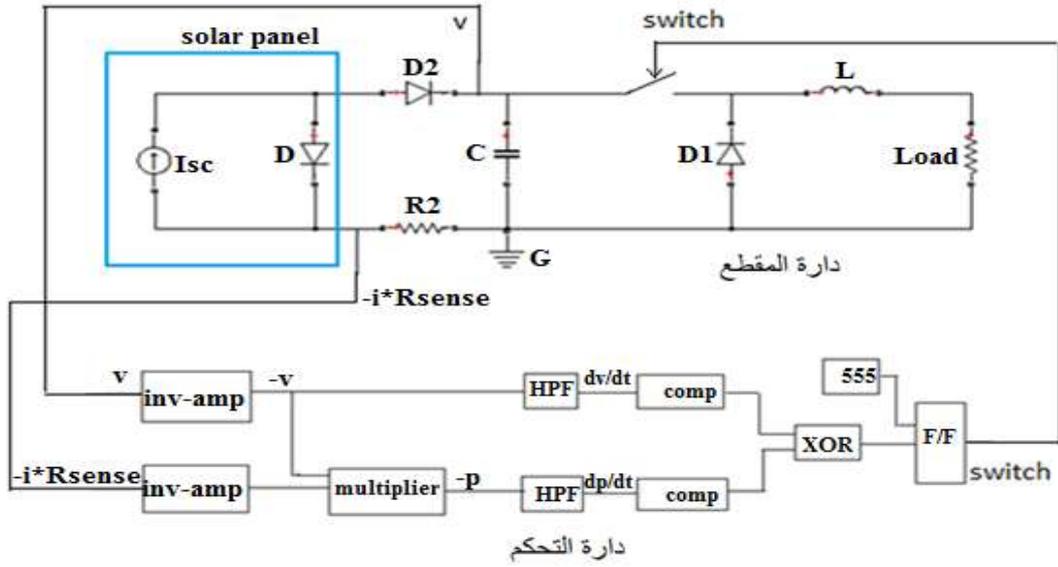
بالنسبة لتأثير الضجيج، نجد أن هذا القانون غير موثوق لوضع التصميم، لذلك سنعدّل قانون التحكم بحيث يسمح تابع الإشارة بتعقب الـ MPP في الدارة. وليصبح كما يلي:

$$D = k \int \text{sign}\left(\frac{dp}{dt}\right) \text{sign}\left(\frac{diL}{dt}\right) dt \quad (6)$$

نلاحظ أن تأثير الضجيج موجود لأن تابع الإشارة موجود سواء كان المشتق أكبر أو أصغر أو يساوي الصفر (نتحكم بالضجيج بواسطة تابع الإشارة)، ومن السهل تحقيقه في التجهيزات الالكترونية باستخدام تابع منطقي بسيط أو بواسطة دارات المضخمات العملية أو يمكن تطبيقها باستخدام دارات تكاملية تزامنية غير مكلفة ICs.

3 مرحلة الاختبار البرمجي (نمذجة اللوح الشمسي ودارة التحكم والمقطع):

تمت نمذجة النظام الكهروضوئي المدروس باستخدام LabView كما هو مبين في الشكل (7).



الشكل (7) نمذجة النظام الكهروضوئي المدروس.

في البداية تمت نمذجة اللوح الشمسي اعتماداً على العلاقات الرياضية التالية:

- تيار القصر:

$$I_{sc-new} = I_{sc-stc} \left[\frac{E_{new}}{E_{stc}} \right] [1 + \alpha (T_{new} - T_{stc})] \quad (7)$$

- جهد الدارة المفتوحة:

$$V_{oc-new} = V_{oc-stc} [1 + \beta (T_{new} - T_{stc})] \quad (8)$$

- تيار اللوح كتابع لجهد اللوح :

$$I_{pv} = I_{sc-new} - I_o \left[e^{\left(\frac{v_{pv}}{\gamma \cdot V_{oc-new}} \right)} - 1 \right] \quad (9)$$

- التيار على فراغ:

$$I_o = (I_{sc} - I_{mpp}) \cdot e^{\left(\frac{-v_{mpp}}{\gamma \cdot V_{oc}} \right)} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{V_{mpp} - V_{oc}}{V_{oc} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \right)} \quad (11)$$

حيث أن:

Estc: شدة الإشعاع الشمسي المعياري مقدراً بـ [W/m²].

Enew: شدة الإشعاع الشمسي الحالي مقدراً بـ [W/m²].

Tstc: درجة الحرارة المرجعية [K].

Tnew: درجة الحرارة الحالية [K].

α: عامل التيار الحراري مقدراً بـ [A/c].

β: عامل الجهد الحراري مقدراً بـ [volt/c].

I_{sc-stc}: تيار القصر المرجعي [A].

I_{sc-new}: تيار القصر الحالي [A].

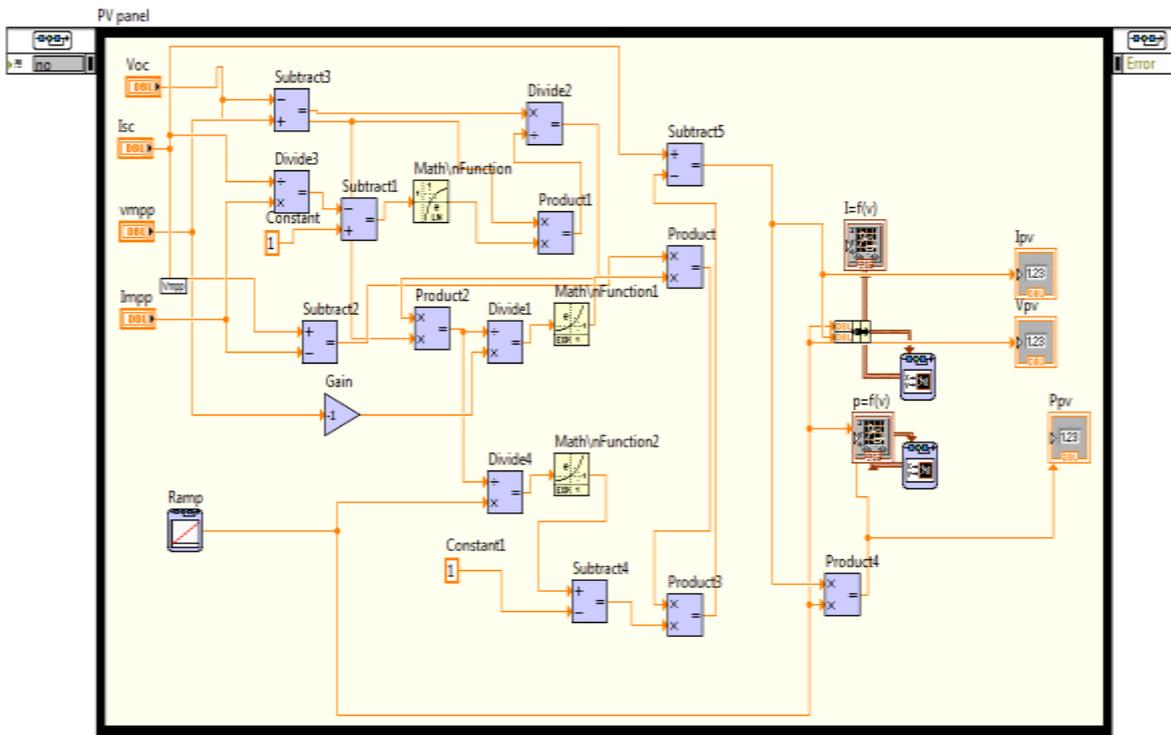
V_{oc-stc} : جهد الدارة المفتوحة المرجعي [volt].

V_{mpp} : جهد نقطة الاستطاعة العظمى [volt].

V_{vp} : جهد الحمل [volt].

I_{vp} : تيار الحمل [A].

يبين الشكل (8) النموذج المكافئ للوح الكهروضوئي باستخدام الـ LabView.



الشكل (8) النموذج المكافئ للوح الكهروضوئي باستخدام الـ LabView.

بعد الانتهاء من اللوح الكهروضوئي تمت نمذجة دارة التحكم المبينة في الشكل (6) بشكل مباشر على قانون الـ RCC التالي:

$$D = k \int \frac{dp}{dt} \frac{dv}{dt} dt \quad (12)$$

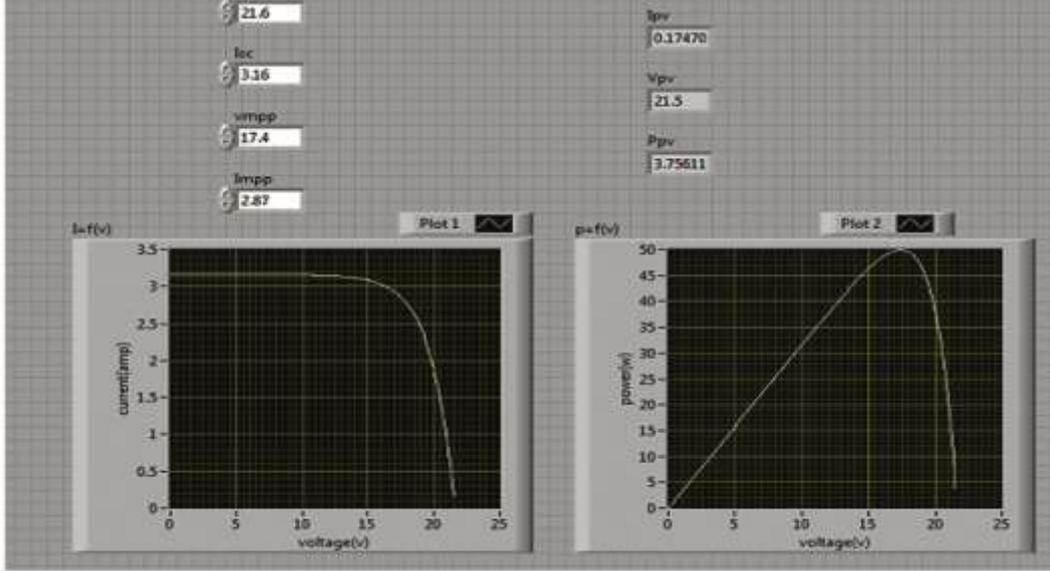
في البداية يتحسس المتحكم لجهد وتيار المنظومة، ونستخدم لقياس التيار مقاومة صغيرة جداً $0,5\Omega$ بهدف تقليل ضياع الاستطاعة الزائد. هذه القيم تُعكس و(تُضخم أو تُخفض) قبل أن تدخل إلى ضارب تشابهي يعطي قياس استطاعة المصفوفة الشمسية. إن موجات الجهد والاستطاعة المقاسة تصبح قيم تفاضلية (مشتق بالنسبة للزمن) باستخدام مرشحات التمرير العالي مع قيم مرجعية محددة، ويعطي خرج المقارن القيمة العظمى [V]12 (أو واحد منطقي) من أجل تفاضل استطاعة أو جهد موجب ويعطي القيمة الدنيا [V]0 (أو صفر منطقي) من أجل تفاضل استطاعة أو جهد سالب.

هذه النماذج تُقيّم بواسطة بوابة XOR ويعدّد تُختبر بواسطة قلاب نمط D عند تردد ثابت. خرج القلاب يقدم إشارة مناسبة لقيادة مفتاح المبدلة DC-DC.

يمكن تلخيص عمل المتحكم (دائرة التحكم) بما يلي:

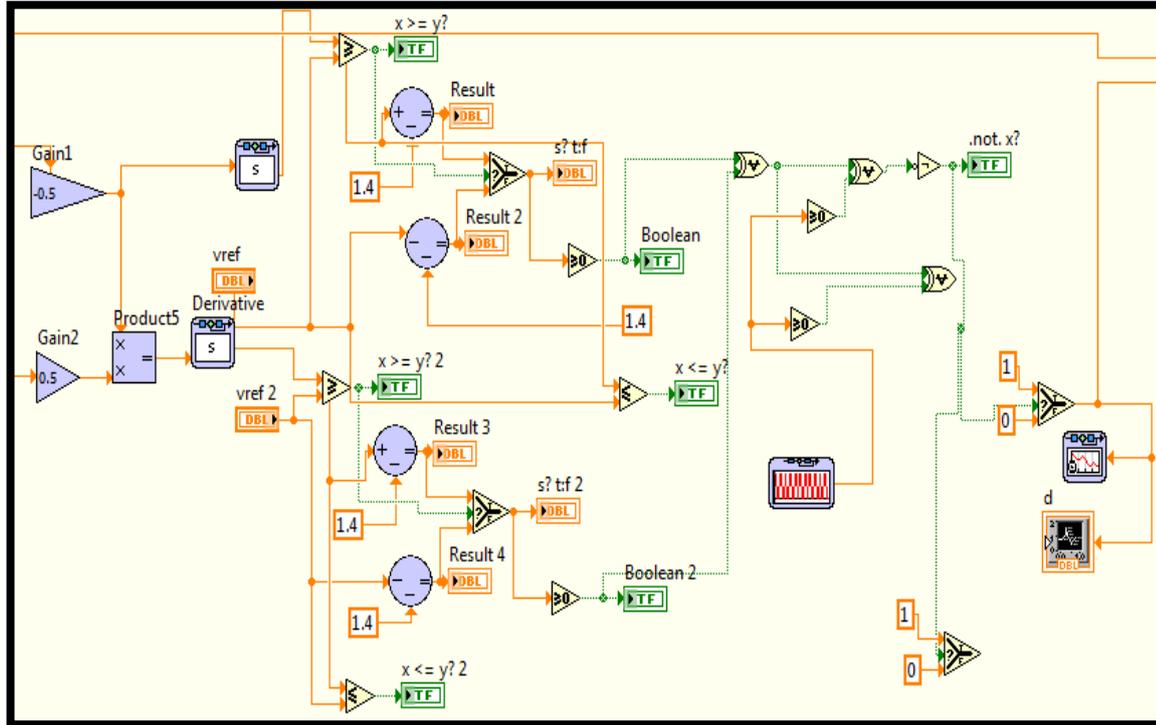
عندما يتداد الاستطاعة المقاسة ويزداد الجهد المقاس أو تنقص يكون جهد المنظومة اقل من الجهد عند الاستطاعة الأعظمية يفتح مفتاح المبدلة ويبدو أن الجهد يزداد بواسطة المبدلة. والعكس صحيح فعندما يزداد الجهد المقاس وتنقص الاستطاعة المقاسة، أو عندما تزداد الاستطاعة المقاسة وينقص الجهد المقاس يكون جهد المنظومة اكبر من الجهد عند نقطة الاستطاعة الأعظمية من اجل هذه الحالات يُغلق مفتاح المبدلة ويبدو أن الجهد ينقص بواسطة المبدلة. بالتالي يبدو الجهد يتأرجح حول قيمته المثلى بواسطة المبدلة.

حيث أعطى النموذج المكافئ للوح المنحنيات التالية: $I_{pv}=f(V_{pv})$ ، $P_{pv}=f(V_{pv})$ المبينة في الشكل (9).



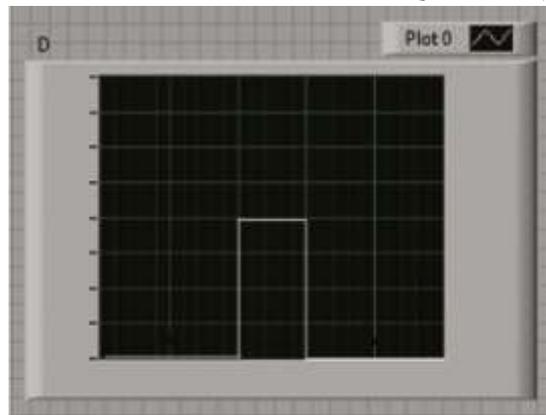
الشكل (9) خرج النموذج المكافئ للوح الشمسي.

يبين الشكل (10) النموذج المكافئ لدارة التحكم.



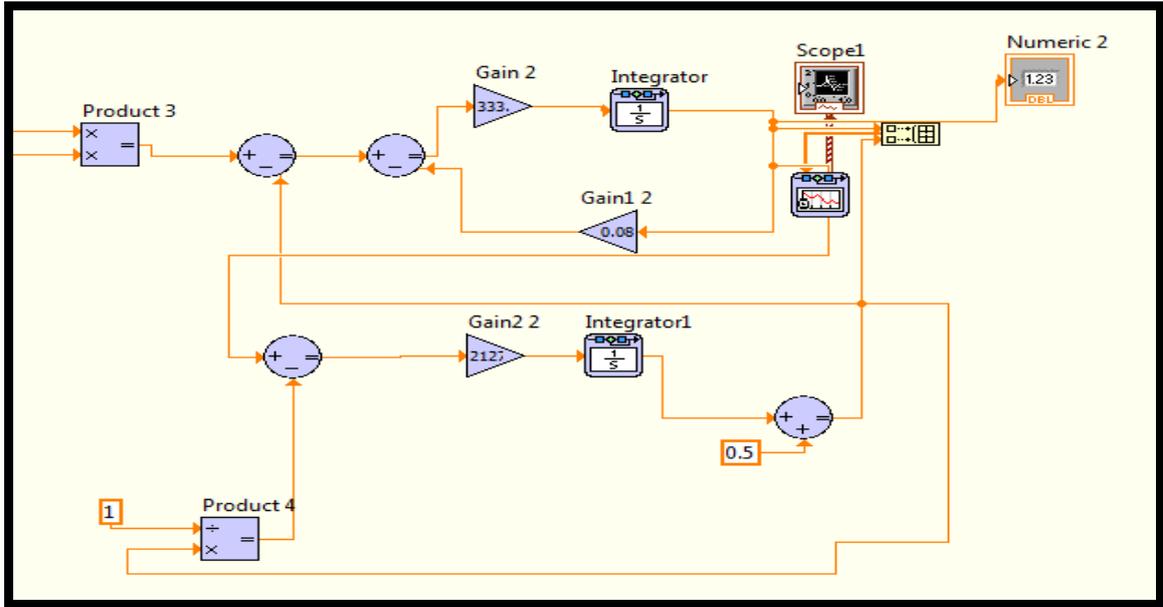
الشكل (10) النموذج المكافئ لدارة التحكم.

تم الحصول من دارة التحكم على نبضة التحكم الموضحة في الشكل (11) والتي سنتحكم من خلالها بقدح المفتاح الإلكتروني (Mosfet) الموجود في دارة المقطع.



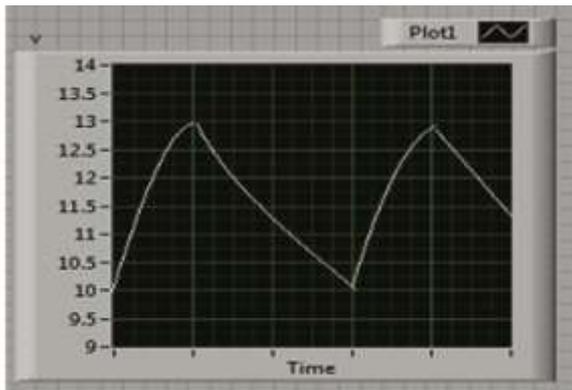
الشكل (11) نبضة خرج المتحكم (خرج منطقي).

يبين الشكل (12) النموذج المكافئ للمقطع.

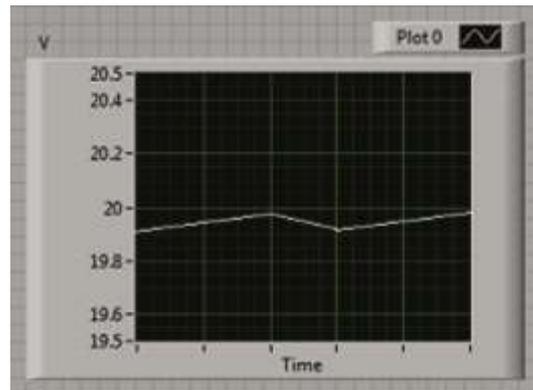


الشكل (12) النموذج المكافئ للمقطع.

يوضح الشكل (13) جهد خرج المقطع عندما $V < V_{MPP}$ والشكل (14) جهد خرج المقطع عندما $V > V_{MPP}$.

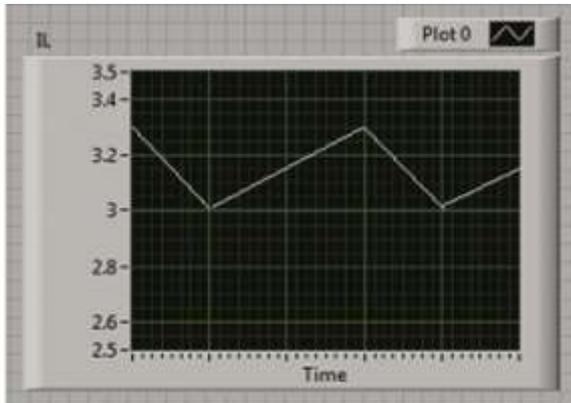


الشكل (14) خرج دائرة المقطع عندما $V > V_{MPP}$.

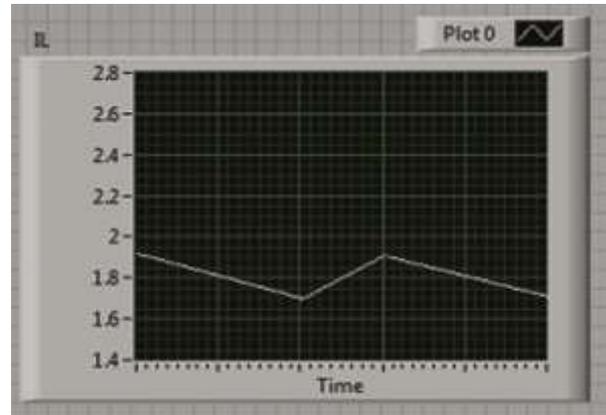


الشكل (13) خرج دائرة المقطع عندما $V < V_{MPP}$.

يبين الشكل (15) تيار الملف عندما $I_L < I_{LMPP}$ ، والشكل (16) تيار الملف عندما $I_L > I_{LMPP}$.



الشكل (16) تيار الملف عندما $I_L > I_{LMPP}$.



الشكل (15) تيار الملف عندما $I_L < I_{LMPP}$.

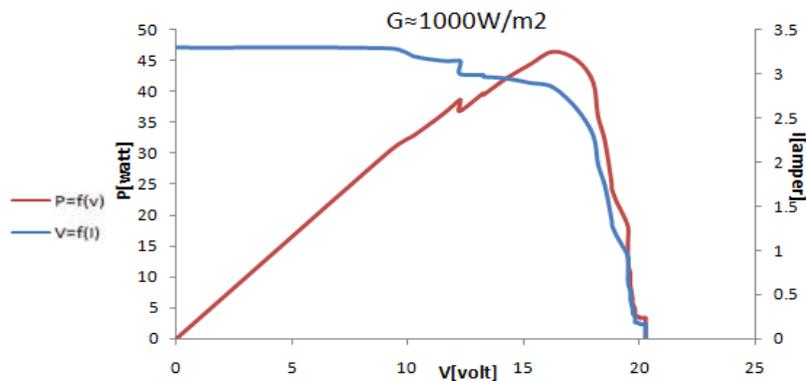
5- الاختبار العملي التجريبي

يبين الشكل (17) اللوح الكهروضوئي المدروس الأول.

	اللاقط الكهروضوئي I3SY50	
	درجة الحرارة 25°C	شروط الإختبار
	الإشعاع $1000[\text{W}/\text{m}^2]$	
	$V_{OC} = 20.26$	جهد الدارة المفتوحة [V]
	$I_{SC} = 3.3$	تيار القصر [A]
	$V_{max} = 17$	جهد العمل الأعظمي [V]
	$I_{max} = 2.94$	تيار العمل الأعظمي [I]
	$P_{max} = 50$	الاستطاعة العظمى [W]

الشكل (17) اللوح المدروس مع اللوحة الإسمية له.

تم اختبار اللوح الكهروضوئي باستخدام مجموعة من المقاييس منها مقياس الإشعاع الشمسي ومقياس درجة الحرارة وحصلنا على المنحنيات التجريبية (I-V) - (P-V) للوح عند اشعاع $G=1000 [\text{W}/\text{m}^2]$ ودرجة حرارة $t=25^{\circ}\text{C}$ كما يوضح الشكل (18).



الشكل (18) منحنيات (I-V) - (P-V) للوح الأول عند اشعاع $G=1000 [\text{W}/\text{m}^2]$.

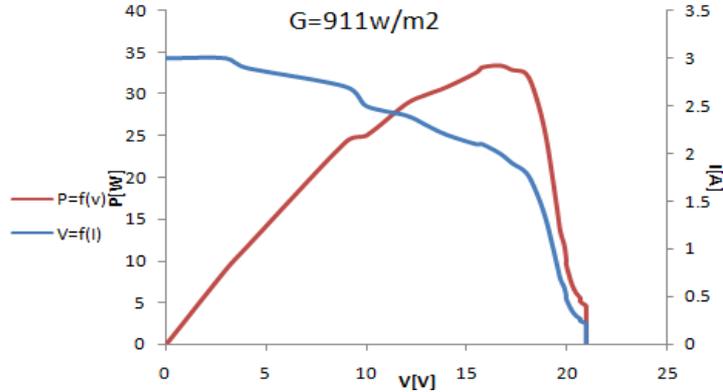
من هذه المنحنيات نجد أن اللوح المدروس مطابق للمواصفات الاسمية. تم استخدام لوح ثاني له المواصفات الاسمية الموضحة في الشكل (19).

اللاقط الكهروضوئسي KHCH	
درجة الحرارة [CO] 25	شروط الإختبار
الإشعاع [W/m ²] 1000	
VOC = 22	جهد الدارة المفتوحة [V]
ISC = 5.1	تيار القصر [A]
Vmax = 17	جهد العمل الأعظمي [V]
Imax = 4.7	تيار العمل الأعظمي [I]
Pmax = 80	الاستطاعة العظمى [W]

الشكل (19) اللوح الثاني من الألواح المدروسة مع اللوحة الإسمية له.

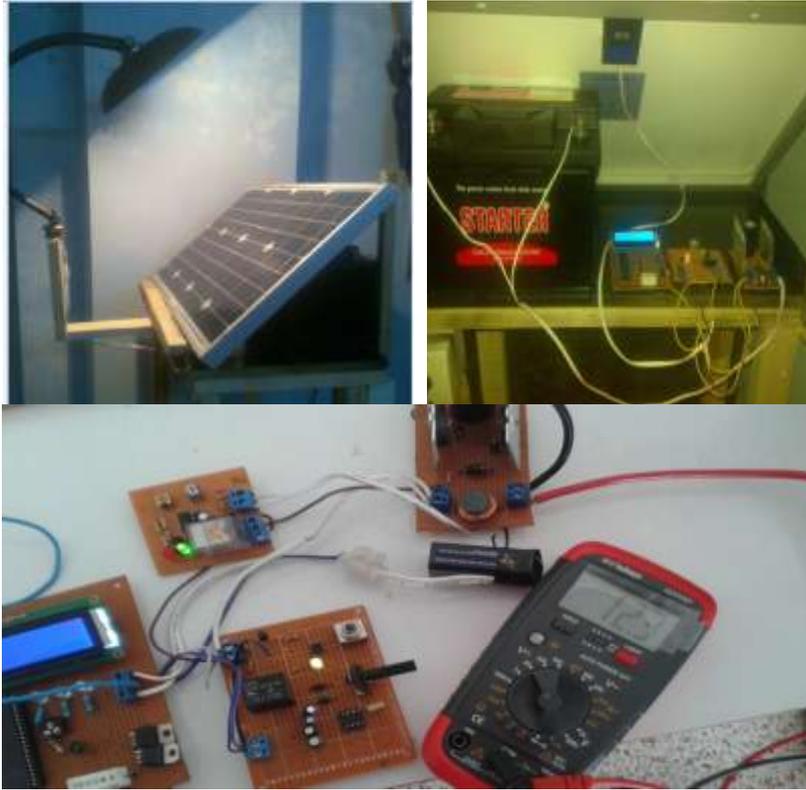
فكانت نتائج الاختبار (منحنيات (P-V) - (I-V) عند اشعاع $G=911 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ودرجة حرارة $t=25\text{[}^\circ\text{C]}$ موضحة

في الشكل (20) للوح الثاني عند اشعاع $G=911 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

الشكل (20) منحنيات (P-V) - (I-V) للوح الثاني عند اشعاع $G=911 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

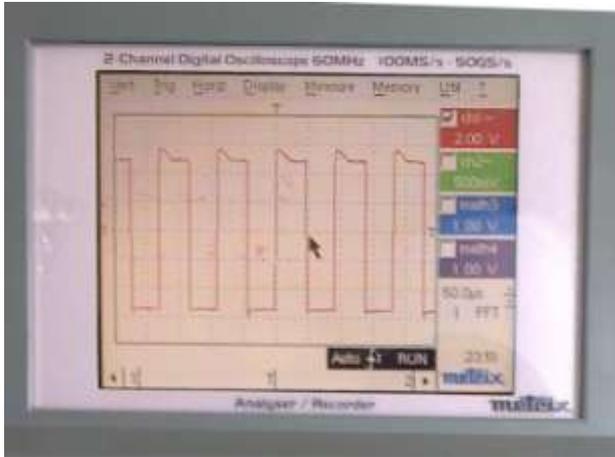
من هذه المنحنيات نجد أن هذا اللوح غير مطابق للمواصفات الاسمية.

يبين الشكل (21) الدارة العملية المنفذة.



الشكل (21) الدارة العملية المنفذة.

تم اختبار هذه الدارة باستخدام اللوح الكهروضويسي (I3SY50) فكانت نتائج الاختبار كما يلي:
يبين الشكل (22) دارة التحكم ويوضح الشكل (23) نبضة خرج دارة التحكم.



الشكل (23) نبضة خرج دارة التحكم.



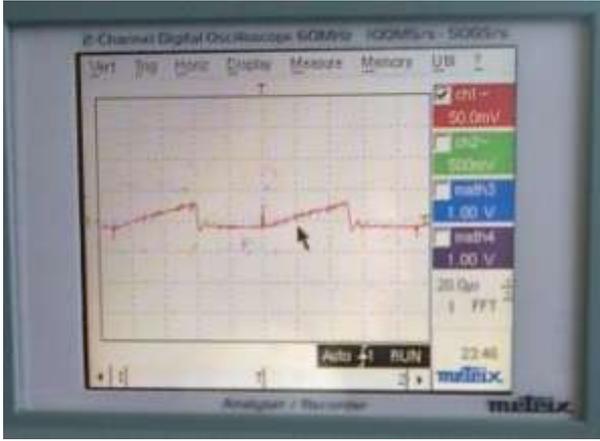
الشكل (22) دارة التحكم.

هنا سندرس حالتين:

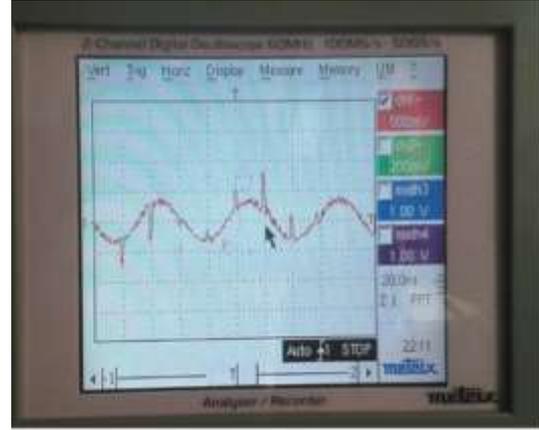
1- عندما $V < V_{MPP}$ و $I_L < I_{LMPP}$.

2- عندما $V > V_{MPP}$ و $I_L > I_{LMPP}$.

يوضح الشكل (24) جهد خرج المقطع عندما $V > V_{MPP}$ ، والشكل (25) جهد خرج المقطع عندما $V < V_{MPP}$.



الشكل (25) خرج دائرة المقطع عندما $V < V_{MPP}$.



الشكل (24) خرج دائرة المقطع عندما $V > V_{MPP}$.

يبين الشكل (26) تيار الملف عندما $I_L > I_{LMPP}$ والشكل (27) تيار الملف عندما $I_L < I_{LMPP}$.



الشكل (27) تيار الملف في دائرة المقطع عندما $I_L < I_{LMPP}$.



الشكل (26) تيار الملف في دائرة المقطع عندما $I_L > I_{LMPP}$.

أما من ناحية القيم فكانت النتائج على الشكل التالي:

استخدمنا اللوح الأول الذي يعطي استطاعة أعظمية عند إشعاع تقريباً $G=900[W/m^2]$ ودرجة حرارة $t=26[^\circ C]$ مقدارها: $P_{max}=39[W]$ واستطعنا أن نحافظ على هذه الاستطاعة عند خرج المقطع $I=2.54[A]$ و $V=14.7[V]$. ويظهر الشكل (28) قيم الإشعاع ودرجة الحرارة على مقياس شدة الإشعاع الشمسي ومقياس درجة الحرارة. ويبين الشكل (29) قيم تيار وتوتر خرج المقطع عند إشعاع $G=900[W/m^2]$.



الشكل (28) قيم الإشعاع ودرجة الحرارة.



الشكل (29) قيم تيار وتوتر خرج المقطع عند إشعاع $G=900\text{W/m}^2$.

وعند اشعاع $G=680\text{ [W/m}^2\text{]}$ ودرجة حرارة $t=22\text{[}^\circ\text{C]}$ كانت $P_{\max}=28\text{[W]}$ وحصلنا من الشاحن على استطاعة $I=1.8\text{[A]}$ و $V=14.7\text{[V]}$. ويبين الشكل (30) قيم تيار وتوتر خرج المقطع عند إشعاع $G=680\text{[W/m}^2\text{]}$.



الشكل (30) قيم تيار وتوتر خرج المقطع عند إشعاع $G=680\text{[W/m}^2\text{]}$.

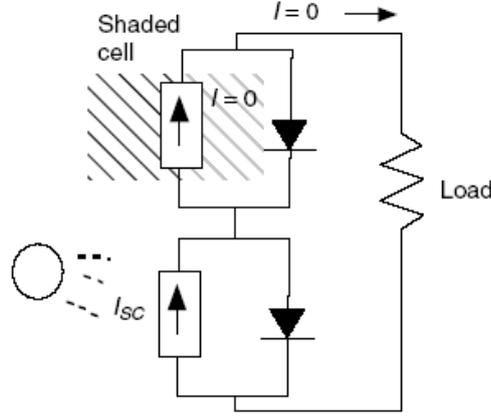
تم اختبار هذه الدارة باستخدام اللوح الكهروضويسي الثاني فكانت النتائج على الشكل التالي:
تم استخدام اللوح الثاني الذي يعطي استطاعة أعظمية عند اشعاع $G = 900\text{ [W/m}^2\text{]}$ ودرجة حرارة $t=25\text{[}^\circ\text{C]}$ مقدارها: $P_{\max}= 34\text{ [W]}$ وتمكنا من الحفاظ على هذه الاستطاعة عند خرج المقطع $I=1.87\text{[A]}$ و $V=17.55\text{[V]}$. ويبين الشكل (31) قيم تيار وتوتر خرج المقطع عند إشعاع $G=900\text{[W/m}^2\text{]}$.



الشكل (31) قيم تيار وتوتر خرج المقطع عند إشعاع $G=900\text{w/m}^2$.

تمت الاختبارات السابقة في أيام مشمسة، لكن عند حدوث التظليل لإحدى الخلايا سيكون تيار خرج المصفوفة يساوي الصفر كما هو مبين في الشكل (32). بما أن الاختبارات تمت على مصفوفة واحدة (لوح)، ومن قانون الـ RCC

المبين في العلاقة (4) نجد أنه لا يمكن تحديد D ، ولكن المشكلة عند وجود مجموعة من المصفوفات الموصولة مع بعضها، لذلك يُفضل وجود متعقب MPP خاص لكل مصفوفة.



الشكل (32) الدارة المكافئة لمجموعة خلايا عند تظليل أحدها.

مناقشة النتائج:

1. عندما $I_L < I_{LMPP}$: يكون ترمج الاستطاعة متفق في الطور مع ترمج التيار ومختلف في الطور مع ترمج الجهد، بالتالي ستتغير Duty cycle للمفتاح (سيتميز زمن التشغيل t_{on}) حتى تقترب نقطة العمل من الـ MPP.
2. عندما $I_L > I_{LMPP}$: يكون ترمج الاستطاعة متفق في الطور مع ترمج الجهد ومختلف في الطور مع ترمج التيار، بالتالي ستتغير Duty cycle للمفتاح حتى تقترب نقطة العمل من الـ MPP. أي أن زمن التشغيل يتغير ويتحكم بموقع نقطة العمل.
3. نلاحظ من نتائج القياس على التصميم المنفذ عملياً التوافق الجيد بينها وبين نتائج المحاكاة، ومقدرة النظام المصمم المحافظة على استطاعة خرج مساوية للاستطاعة الأعظمية للوح عند مستويات إشعاع مختلفة.
4. يعدّ هذا البحث بمثابة نموذج مخبري لاستخدام تقنية التحكم المرتبط بالترمج كتنقية ملاحقة لنقطة الاستطاعة العظمى MPPT في النظم الكهروضوئية.

الاستنتاجات والتوصيات

- تم بفضل تقنية الـ RCC المحافظة على استطاعة خرج المقطع كقيمة مساوية للاستطاعة الأعظمية للوح المدروس، كما أن تقنية الـ RCC تحقق ملاحقة سريعة لنقطة الاستطاعة العظمى، والدارة العملية المطبقة دارة بسيطة وغير مكلفة.
- وُجد بالاختبار التجريبي على الألواح أن اللوح (I3SY50) الذي يملك المواصفات الاسمية التالية: $V_{OC} = 20.26$ ، $V_{max} = 17$ ، $I_{max} = 2.94$ ، $P_{max} = 50$ ، $I_{sc} = 3.3$ يحقق مواصفاته، أما اللوح (KHCH) الذي يملك المواصفات الاسمية التالية: $V_{OC} = 22$ ، $V_{max} = 17$ ، $I_{max} = 4.7$ ، $P_{max} = 80$ ، فلا يحققها.
- وبالتالي نوصي بـ:
- ✓ نوصي باستخدام تقنية الـ RCC في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى، لكلفتها المنخفضة.
 - ✓ يجب التحقق من الألواح الشمسية المطروحة في الأسواق، لأن رداءة الألواح تؤثر على فعالية الملاحقة.

المراجع:

- [1] Bernal, P. *Study and Development of a Photovoltaic Panel Simulator*. Thesis for the degree of Master of Electrical and Computer Engineering, FEUP (FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO), January 2012.
- [2] Rahman , SH; Oni ,N; Abdullah Ibn Masud ,Q. *Design of a Charge Controller Circuit with Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Photovoltaic System*. Thesis for the degree of Master in Electrical & Electronic Engineering, BRAC University, December 2012.
- [3] Morales, D. *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications*. Thesis for the degree of Master of Science in Technology, Aalto University, Espoo 14.12.2010.
- [4] Jaen ,C; Pou , J; Capella ,G; Arias ,A; Lamich ,M. *On the use of sun trackers to improve maximum power point tracking controllers applied to photovoltaic systems*. Technical University of Catalonia (Terrassa, Catalonia, Spain), ENE2007- 67033 - C01.
- [5] Abd el Motaleb, A. *Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System*. Thesis for the degree of Master in Electrical Engineering, Sevilla University, September 2010.
- [6] Terng Yau, H; Han Wu, CH. *Comparison of Extremum-Seeking Control Techniques for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems*. Energies 2011, 4, 2180-2195; doi:10.3390/en4122180.ISSN 1996-1073.
- [7] Kang, B. *Maximum Power Point Tracking Using Kalman Filter for Photovoltaic System*. Thesis for the degree of Master in Electrical and Computer Engineering, Blacksburg University , Blacksburg Virginia, December 2010.
- [8] Sihem, M. *Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System*. Thesis for the degree of Master in Electrical Engineering, M'hamed Bougara Boumerdes, Boumerdes, 2011.
- [9] Yadav, A; Thirumaliah, S; Haritha, G. *Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems*. IJAREEIE(International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering). ISSN: 2278 – 8875. Vol. 1, Issue 1, July 2012.
- [10] Chandrashekar, H. *MAXIMUM POWER POINT TRACKING USING RIPPLE CORRELATION CONTROL WITH AN INTERLEAVED SEPIC CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS*. Thesis for the degree of Master of Science in Engineering, University of Texas at Austin, May 2010.
- [11] LIEDHOLM, E. *Tracking the maximum power point of solar panels*. Thesis for the degree of Master of Science in Engineering, University of CHALMERS, 2010.
- [12] Eram, T; Chapman, P. *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*. authors are with Grainger Center for Electric Machinery and Electro mechanics , University of Illinois at Urbana-Champaign, National Science Foundation ECS-01-34208.
- [13] Eram, T; Kimball, J; Krein, P; et al. *Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Using Ripple Correlation Control*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1406 W.Green St., Urbana, IL 61801, USA.
- [14] Wells, J; Chapman, P; Krein, P. *Applications of ripple correlation control of electric machinery*. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003, pp.1498-1503.
- [15] Zhang, Q. *MAXIMUM POWER POINT TRACKING IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL*. Thesis for the degree of Master in Electrical Engineering, University of Pittsburgh, November 2012.