

تحسين كفاءة نظم القدرة الشمسية الكهروضوئية باستخدام متحكم تتبع نقطة الاستطاعة العظمى المرتكز على مبدل رافع للجهد المستمر

الدكتورة إيمان ديلانة*

(تاريخ الإيداع 18 / 10 / 2015. قُبل للنشر في 16 / 3 / 2016)

□ ملخص □

يعالج هذا البحث تحسين كفاءة نظم القدرة الشمسية الكهروضوئية باستخدام متحكم تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، المرتكز في عمله على تقنيات تتبع تستخدم طريقة التحكم المباشر للتحكم في دورة عمل مبدل جهد مستمر لتحقيق عمل النظام الكهروضوئي عند نقطة الاستطاعة العظمى في ظل التغيرات الجوية المختلفة من شدة إشعاع شمسي ودرجة حرارة محيطية. في هذا السياق، يتركز عملنا على محاكاة مكونات نظام توليد الطاقة من نظام كهروضوئي، مبدل رافع للجهد المستمر ومتحكم MPPT في بيئة Matlab/Simulink. تتم محاكاة المتحكم MPPT باعتماد عدة خوارزميات: خوارزمية التوتر الثابت، خوارزمية الإضطراب والمراقبة وخوارزمية زيادة الناقلية، باستخدام تابع Embedded MATLAB function. أظهرت نتائج المحاكاة فعالية المتحكم MPPT في زيادة استطاعة النظام الكهروضوئي مقارنة مع عدم استخدام متحكم MPPT. كما أظهرت النتائج الأداء الأفضل لمتحكم MPPT المعتمد على خوارزمية الإضطراب والمراقبة وخوارزمية زيادة الناقلية، مقارنة مع خوارزمية التوتر الثابت في تتبع نقطة الاستطاعة العظمى للنظام في ظل التغيرات الجوية.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي، مبدل رافع للجهد المستمر، متحكم تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، طريقة التحكم المباشر.

*مدرسة- قسم هندسة القوى الميكانيكية -كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Improving the efficiency of Solar Photovoltaic Power Systems using a Maximum Power Point Tracker Controller based on DC-DC Boost Converter

Dr. Imane Dilaneh *

(Received 18 / 10 / 2015. Accepted 16 / 3 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research deals with improving the efficiency of solar photovoltaic (PV) power systems using a Maximum Power Point Tracker controller (MPPT controller), based in his work on the Maximum Power Point Tracking techniques via the direct control method. Which used to control the duty cycle of DC-DC Voltage Converter, to achieve the photovoltaic system works at a Maximum Power Point under different atmospheric changes of the solar insolation and ambient temperature. In this context, our work is focused on the simulation of the components of the power generating system, such as the photovoltaic system, DC-DC Boost Converter and a MPPT controller in Matlab/Simulink environment. The simulating of the MPPT controller was based on several algorithms such as: Constant Voltage algorithm, Perturb and Observe algorithm and Incremental Conductance algorithm by using Embedded MATLAB function. The simulation results showed the effectiveness of the MPPT controller to increase the photovoltaic system power compared with non-use of a MPPT controller. The results also showed the best performance of MPPT controller based on Perturb and Observe and Incremental Conductance algorithm, compared with constant voltage algorithm in tracking the Maximum Power Point under atmospheric changes.

Key words: Photovoltaic System, DC-DC Boost Converter, Maximum Power Point Tracker Controller, Direct control method.

*Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تعتبر الطاقة الشمسية الكهروضوئية أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة، الأكثر موثوقية والأكثر انتشاراً. تتنوع تطبيقات نظم الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Solar Photovoltaic Systems)، لتشمل نظم توليد الطاقة الكهربية المرتبطة بالشبكة الكهربية والمستقلة. غير أن توسع انتشار نظم توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية تحده تحديات تتعلق بانخفاض كفاءة وأداء هذه النظم في ظل تغير الظروف الجوية المحيطة. حيث تتأثر الطاقة الكهربية المولدة من اللواقط الشمسية الكهروضوئية، بتغير شدة الإشعاع الشمسي الساقط عليها، تغير درجة حرارة الجو المحيط وباضطرابات الحمل المربوط معها. مما يضعف الإنتاجية الطاقية الكهربية لهذه النظم الكهروضوئية (PV Photovoltaic) بسبب فقدان الطاقة، كما يتطلب ذلك زيادة عدد اللواقط اللازمة لتغطية متطلبات الحمل من الطاقة وخاصة في ظروف شدة الإشعاع الشمسي المنخفضة، مما يزيد في النهاية من تعقيد نظم PV ومن تكلفتها الاقتصادية. للتغلب والحد من هذه التحديات قدر المستطاع، يعتبر استخدام متحكمات تتبع نقطة الاستطاعة العظمى للنظم الكهروضوئية الحل الأمثل، للحصول على الطاقة القصوى من هذه النظم. مما يمكن من تحسين كفاءة هذه النظم باستخدام متحكم تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracking, MPPT). وهذا سينعكس على تحقيق استفادة مثلى من الطاقة الشمسية المتوفرة وبالتالي تخفيض ضياعات الطاقة الغير مستفاد منها في حال غياب نظام التحكم.

أهمية البحث وأهدافه

يقدم البحث مساهمة في دراسة تحسين كفاءة وأداء نظم توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية باستخدام متحكم تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT Controller)، في ظل تغيرات الشروط الجوية المحيطة من إشعاع شمسي ودرجة حرارة. في هذا السياق، يهدف البحث إلى محاكاة نظام توليد طاقة كهروضوئي مكون من نظام كهروضوئي PV، مبدل رافع للجهد مستمر (DC-DC Boost Converter)، متحكم تتبع نقطة الاستطاعة العظمى MPPT في بيئة Matlab/Simulink. الهدف من محاكاة نظام الطاقة الكهروضوئي مع متحكم MPPT يتجلى في تبيان أهمية استخدام متحكمات MPPT في الحصول على الطاقة القصوى من نظم PV، بالإضافة إلى اختبار و تقييم أداء متحكم MPPT في ظل التغيرات الجوية باعتماد عدة خوارزميات لتتبع نقطة MPP خوارزمية التوتير الثابت (Constant voltage, CV)، خوارزمية الاضطراب والمراقبة (Perturbation and Observation, P&O)، وخوارزمية زيادة الناقلية (Incremental conductance, INC). كما تتجلى أهمية البحث باستخدام طريقة التحكم المباشر في التحكم مباشرة بدورة عمل مبدل الجهد لتحقيق عمل نظام PV عند نقطة الاستطاعة العظمى. حيث خرج خوارزميات التتبع هو نسبة تشغيل ترانزستور مبدل الجهد، مما يمكن من الاستغناء عن حلقة التحكم بالتوتير باستخدام المتحكم PI، ويحقق سرعة في عمل متحكم MPPT، لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى في ظل التغيرات الجوية.

طرائق البحث ومواده

سنقوم في هذه البحث بمحاكاة نظام توليد طاقة كهروضوئي في بيئة Matlab/Simulink. محاكاة المتحكم MPPT سنتم ببرنامج خوارزميات عمل تقنيات التتبع MPPT باستخدام تابع Embedded MATLAB function. لتبيان أهمية استخدام متحكم MPPT سنعمل على مقارنة نتائج المحاكاة باستخدام متحكم MPPT مع دون استخدام

متحكم أي حالة الوصل المباشر لحمل أومي مع نظام PV. كما أن تقييم أداء المتحكمات سيتم بالاعتماد على تقييم عامل الكفاءة وسرعة التقارب نحو نقطة MPP في ظل التغيرات الجوية.

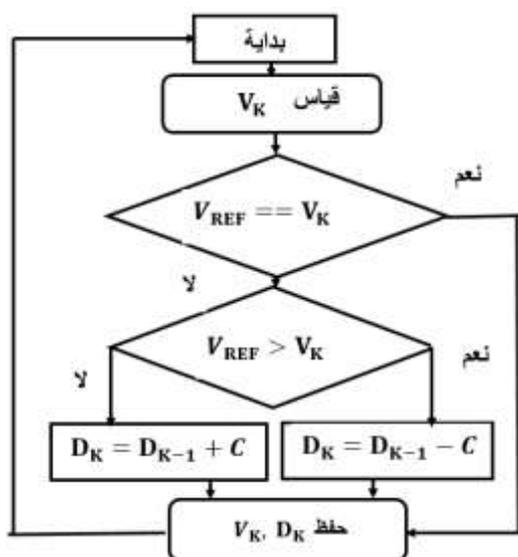
متحكم تتبع نقطة القدرة العظمى

يمتلك اللاقط الشمسي الكهروضوئي نقطة على منحنى الخصائص المميزة توتر-تيار (I-V) للاقط، تدعى نقطة الاستطاعة العظمى MPP يعطي اللاقط عندها استطاعته الكهربائية العظمى. تتحدد نقطة العمل للاقط الشمسي الكهروضوئي المربوط مباشرة إلى الحمل، بنقطة تقاطع منحنى الخصائص المميزة (I-V) للاقط مع خط الحمل الذي هو العلاقة بين توتر وتيار الحمل. إذا انطبقت نقطة العمل على نقطة الاستطاعة العظمى، عندها يعطي اللاقط استطاعته العظمى للحمل. ولكن عملياً نادراً ما تتطابق النقطتان، من جهة أخرى تتغير نقطة العمل للاقط مع تغير الشروط الجوية المحيطة من إشعاع شمسي ودرجة حرارة ونتيجة اضطرابات الحمل. وبالتالي لا بد من نظام تحكم يضمن عمل اللاقط عند MPP.

إن وظيفة المتحكم، هي البحث عن MPP للاقط الشمسي الكهروضوئي، ومن ثم جعل اللاقط يعمل عند هذه النقطة. ولتحقيق وظيفة المتحكم طورت عدة تقنيات لتتبع نقطة MPP لنظم PV [1,2]. نذكر منها، التقنيات المعتمدة على الخصائص الكهربائية للاقط لتحديد نقطة الاستطاعة العظمى MPP، كتقنية توتر الدارة المفتوحة المعتمدة على قياس توتر الدارة المفتوحة (Open Voltage, OV)، حيث تعتبر هذه التقنية أن توتر نقطة الاستطاعة العظمى VMPP يعادل 76% من توتر الدارة المفتوحة [3]. نذكر أيضاً تقنية نبضة تيار القصر (Short-Current Pulse, SC) المعتمدة على قياس تيار القصر، وتعتبر هذه التقنية أن تيار نقطة الاستطاعة العظمى IMPP يعادل 92% من تيار القصر [4]. وتقنية التوتر الثابت CV التي تعتبر أن توتر التشغيل للاقط هو توتر الموافق لنقطة الاستطاعة العظمى VMPP [3]. تتميز هذه التقنيات السابقة بالبساطة وسهولة التنفيذ وانخفاض التكلفة فهي لا تتطلب سوى حساس واحد لقياس التوتر أو التيار تبعاً للتقنية [1,2,3]. غير أن هذه التقنيات تحقق عمل نظام PV في جوار نقطة MPP. كما تتطلب التقنيتين OV، SC قواطع ساكنة، لقياس توتر الدارة المفتوحة وتيار القصر خلال فترات زمنية محددة عند تغير سويات الإشعاع ودرجة الحرارة، مما ينتج عنه فقدان بالطاقة خلال عملية القياس لأن نظام PV لا يحقق أي استطاعة خلال عملية الفصل، مما يخفض الأداء [2,3]. كما أن تقنية CV لا تأخذ بعين الاعتبار تأثير تغير الشروط المحيطة على قيمة توتر التشغيل VMPP، ولكن تعتبر هذه التقنية عملية في ظروف الإشعاع المنخفض [3]. نتيجة مشاكل التقنيات السابقة، تعتبر تقنيات MPPT المستقلة عن الخصائص الكهربائية للاقط لتحديد MPP والمعتمدة فقط على قيم تيار وتوتر اللاقط اللحظية والمقاسة مباشرة لتحديد نقطة MPP، أكثر موثوقية. من هذه التقنيات المباشرة نذكر، تقنية الاضطراب والمراقبة P&O، حيث تتميز بسهولة تنفيذها في التنفيذ [5]، ذات دقة جيدة في تحديد نقطة MPP. من التقنيات المباشرة، نذكر أيضاً تقنية زيادة الناقلية، التي تتميز بأداء جيد في التقارب نحو MPP عند ظروف الإشعاع السريعة التغير [6]، غير أنها أكثر تعقيداً عند التنفيذ وأعلى تكلفة من تقنية الاضطراب والمراقبة. تحدد آلية عمل تقنيات التتبع MPPT المذكورة، وفق خوارزميات معينة لتحديد نقطة MPP. وبالتالي خرج هذه الخوارزميات يسمى التوتر المرجعي VREF المستخدم لضبط عمل اللاقط عند نقطة MPP [1,2,4]. وبالتالي يتطلب تحقيق عمل المتحكم MPPT، حلقتين تحكم. الحلقة الأولى، لتحديد قيمة التوتر المرجعي VREF التي هي خرج خوارزمية التتبع. والحلقة الثانية، تستخدم لضبط توتر تشغيل اللاقط Vpv عند VREF باستخدام متحكم

تناسبي-تكاملي تقليدي (Proportional integral Controller, PI)، تستخدم إشارة خرج المتحكم PI لتعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation, PWM)، المستخدمة للتحكم في عمل مبدل الجهد. أما في طريقة التحكم المباشر (Direct Control Method) [7]، يكون خرج خوارزميات التتبع هو نسبة تشغيل (Duty Cycle, D)، المستخدمة مباشرة لتعديل عرض النبضة للتحكم في عمل المبدل.

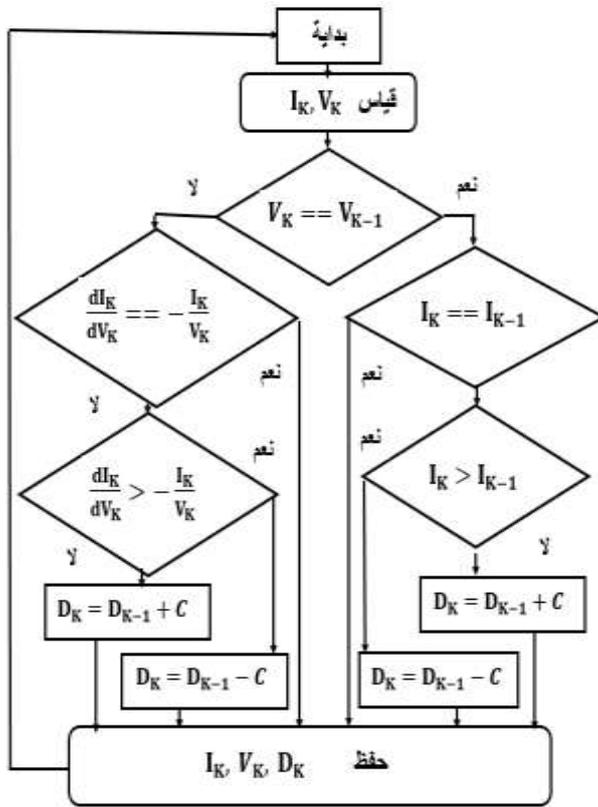
بعد هذه الدراسة المرجعية، يمكننا القول ركزت البحوث العلمية السابقة على عرض ومقارنة الخصائص والمميزات النظرية لتقنيات MPPT المعتمدة في معظمها على خوارزميات التتبع التي خرجها هو توتر التشغيل المرجعي المطلوبة استخدام متحكم PI. بالإضافة لذلك أغفلت تلك الدراسات لمحاكاة المكونات المختلفة للنظام من نظام PV، مبدل جهد ومتحكم MPPT، وهذا ما يمكنه أن يخلق من الناحية النظرية صعوبة في إجراء دراسات مقارنة أو تقييم لأداء تلك التقنيات. في هذا السياق، ستركز عملنا في البحث على محاكاة المكونات المختلفة لنظام توليد الطاقة الكهروضوئي باعتماد متحكمات MPPT وباستخدام طريقة التحكم المباشر. لذلك سننتقل فيما يلي لعرض خوارزميات التتبع المعتمدة في البحث، التي خرجها هو نسبة التشغيل.



الشكل (1) خوارزمية عمل تقنية التوتر الثابت.

تقنية التوتر الثابت CV

تعتبر تقنية التوتر الثابت CV من أبسط تقنيات MPPT، إذ أن نقطة عمل اللاقط الكهروضوئي تبقى قريبة من نقطة MPP من خلال تنظيم التوتر V_{pv} ومطابقته مع توتر ثابت مرجعي V_{REF} [1]. تعير قيمة V_{REF} على أساس قيمة VMPP المحددة في نشرة المواصفات الكهربائية للاقط الكهروضوئي المستخدم. يتطلب تحقيق عمل هذه التقنية حساس واحد لقياس توتر خرج النظام V_{pv} لمقارنته مع VMPP لتحديد قيمة نسبة التشغيل، كما هو موضح بالشكل (1).



الشكل (2) خوارزمية عمل تقنية زيادة الناقلية.

تقنية زيادة الناقلية INC

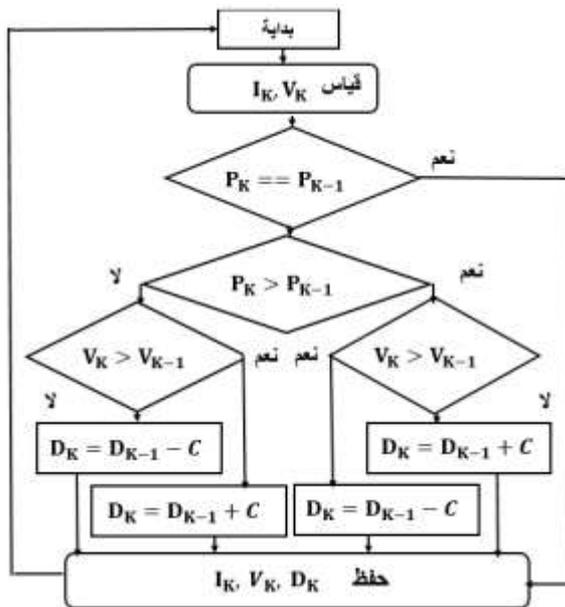
تعتمد هذه التقنية على اجراء

اضطراب زيادة أو نقصان على توتر النظام ومن ثم مقارنة نسبة تغيرات تيار و توتر النظام مع القيم ال لحظية المقاسة، لتحديد زيادة أو نقصان الاضطراب في الخطوة اللاحقة [6].

تتطلب هذه التقنية حساسي توتر وتيار لتحقيق عمل تحقق هذه التقنية أداء جيد عند ظرف الإشعاع سريعة التغير. خوارزمية عمل هذه التقنية موضحة بالشكل (2). عند عمل النظام PV عند النقطة MPP، يتحقق التالي:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = 0$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$



الشكل (3) خوارزمية عمل تقنية الاضطراب والمراقبة.

تقنية الاضطراب والمراقبة P&O

تعتبر هذه التقنية من أكثر تقنيات MPP انتشاراً وذلك لسهولة تنفيذها في التنفيذ. تعمل هذه التقنية على إجراء اضطراب على توتر التشغيل للنظام PV ومراقبة تأثير هذا الاضطراب على تغير الاستطاعة للنظام. وبناء على اشارة نسبة تغير التوتر على تغير الاستطاعة، يتحدد زيادة أو نقصان قيمة الاضطراب اللاحقة بما يحقق نقل نقطة العمل للنظام PV إلى نقطة MPP [5]. خوارزمية P&O موضحة بالشكل (3).

محاكاة النظام الكهروضوئي PV في بيئة Matlab/Simulink:

لتشكيل مصفوفة خلايا شمسية يتم توصيل N_s عدد من الخلايا الشمسية على التسلسل لتكوين موديول (Module)، ثم يوصل N_{ss} عدد من الموديول على التسلسل لتكوين سلسلة (String)، يتم توصيل N_{pp} عدد من السلاسل على التفرع لتكوين مصفوفة خلايا شمسية كهروضوئية (Array PV)، تحدد الخصائص الكهربائية تيار-توتر (I-V) لمصفوفة الخلايا شمسية كهروضوئية، بالاعتماد على العلاقة التالية [8]:

$$I = I_p N_{pp} - I_o N_{pp} \left(e^{\frac{V + R_s \left(\frac{N_{pp}}{N_{ss}} \right) I}{V_t a N_{ss}}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \left(\frac{N_{pp}}{N_{ss}} \right) I}{R_p \left(\frac{N_{pp}}{N_{ss}} \right)}$$

، a عامل

مثالية الديود. k ثابت بولتزمان، q شحنة الاكترون، T درجة حرارة الخلية الشمسية. والمقاومات التسلسلية R_s والتفرعية R_p . يتعلق التيار الضوئي المتولد I_p بشدة الإشعاع الشمسي G و درجة حرارة الخلية الشمسية T ، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$I_p = (I_{p,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_N}$$

أما تيار الإشباع العكسي I_o ييسى بـ $I_{o,n}$.

$$I_o = \frac{(I_{SC,n} + K_I \Delta T)}{e^{\left(\frac{V_{OC,n} + K_V \Delta T}{V_t a} \right)} - 1}$$

ند الشروط القياسية النظامية

حيث تمثل $I_{SC,n}$ و $V_{OC,n}$

على التوالي حيث $I_{SC,n} = I_{p,n}$. المعامل الحراري للتيار و K_V المعامل الحراري للجهد. يوضح الشكل (4) محاكاة نظام كهروضوئي ممثل لمصفوفة خلايا كهروضوئية. أما الشكل (5) يبين محاكاة التيار الضوئي المتولد و تيار الإشباع في بيئة Matlab/Simulink.

محاكاة المبدل الرفع للجهد المستمر في بيئة Matlab/Simulink:

لتحقيق عمل المتحكم MPPT في تتبع نقطة MPP للنظام PV سنستخدم مبدل رافع للجهد المستمر،

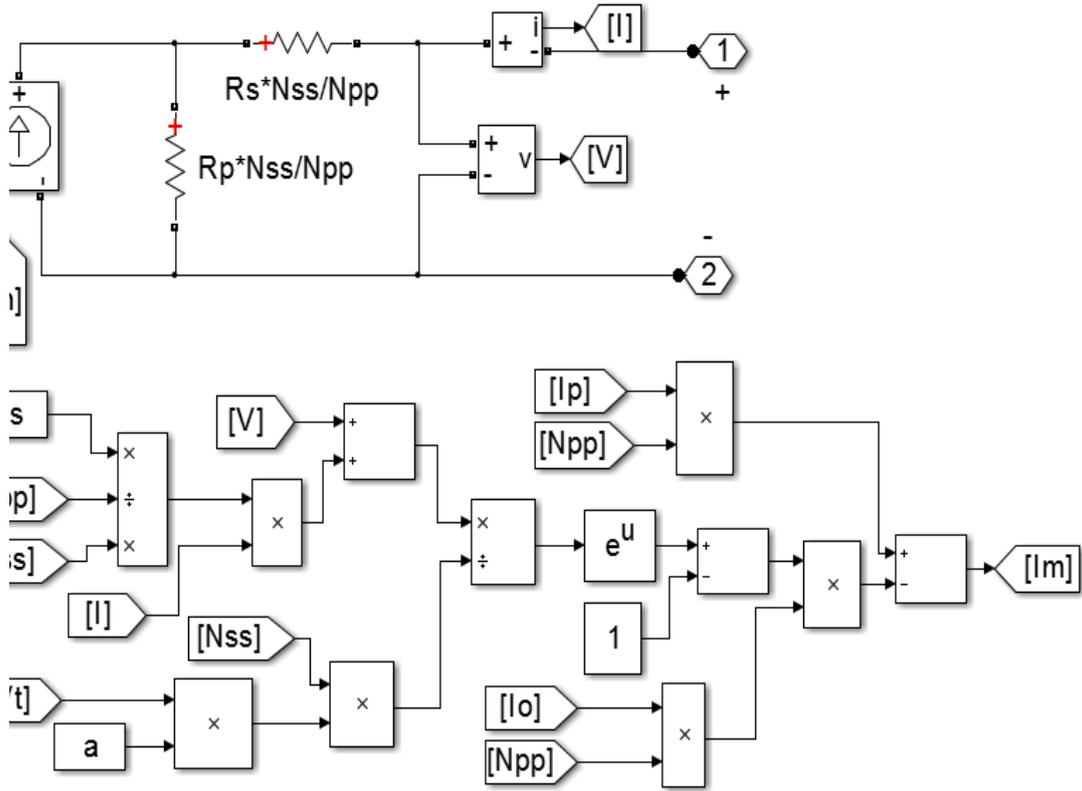
حيث يكون توتر خرج المبدل المذكور أكبر من توتر دخل المبدل، يرتبط توتر دخل وخرج المبدل بالعلاقة [3]:

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{out}}$$

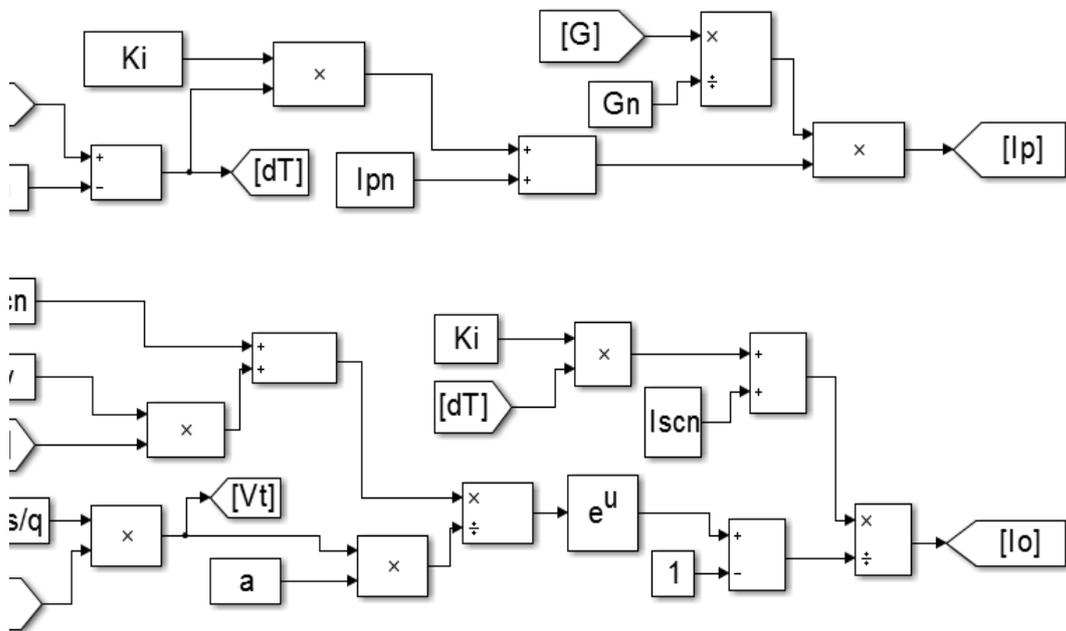
تمثل V_{pv} ، توتر دخل المبدل V_{out} ، توتر خرج المبدل وتوتر خرج

الحمل. D هي نسبة تشغيل ترانزستور مبدل الجهد. يبين الشكل (6) محاكاة المبدل المذكور في بيئة

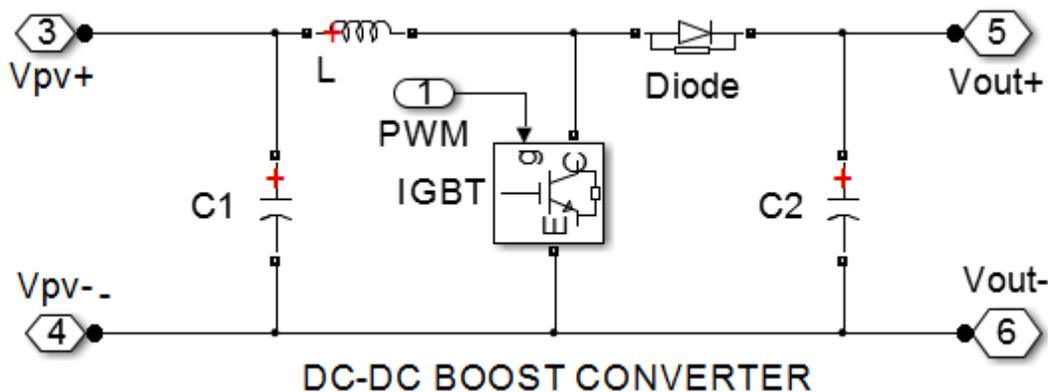
Matlab/Simulink.



الشكل (4) محاكاة نظام PV المطور في بيئة Matlab/Simulink .



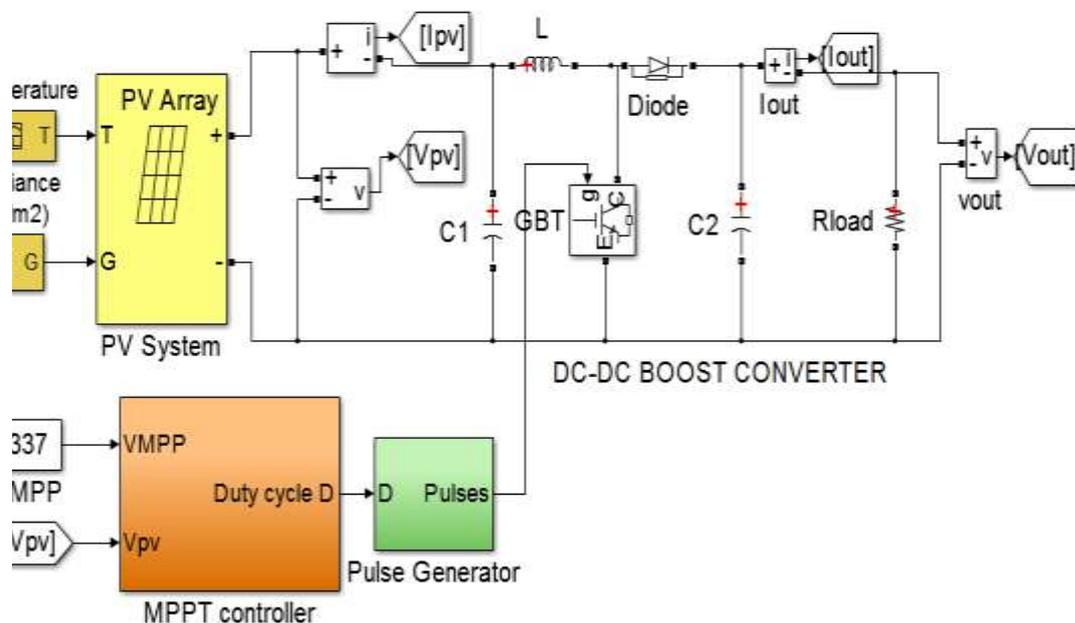
الشكل (5) محاكاة التيار الضوئي المتولد و تيار الإشباع في بيئة Matlab/Simulink .



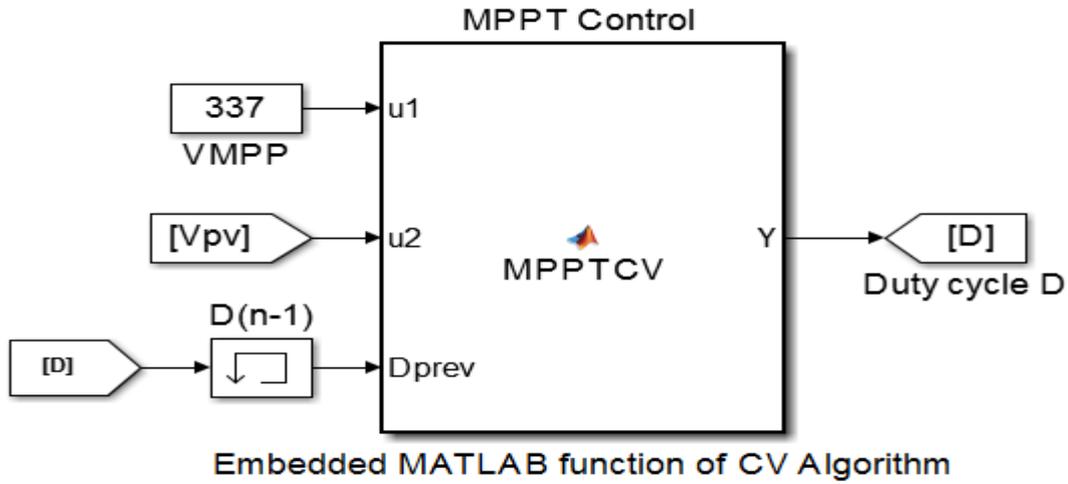
الشكل (6) محاكاة المبدل الرفع للجهد المستمر في بيئة Matlab/Simulink .

محاكاة النظام الكلي المدروس في بيئة Matlab/Simulink

سنعمد الآن إلى محاكاة نظام توليد الطاقة الكهروضوئي الكلي المدروس المكون من نظام كهروضوئي PV ، مبدل رفع للجهد مستمر (DC-DC Boost Converter)، متحكم MPPT في بيئة Matlab/Simulink. النظام الكهروضوئي PV استطاعته الكلية هي $12000 [W]$. قيم التوتر والتيار الموافقة لنقطة الاستطاعة العظمى MPP: $VMPP = 337 [V]$ و $IMPP = 35.6 [A]$. يستخدم النظام المدروس لتغذية حمل مستقل أومي مقاومته $R = 24.3 [\Omega]$. يوضح الشكل (7) محاكاة النظام الكلي مع متحكم MPPT-CV المتحكم المعتمد على تقنية التوتر الثابت حيث دخل المتحكم هو التوتر $VMPP$ و V_{pv} توتر خرج النظام PV.

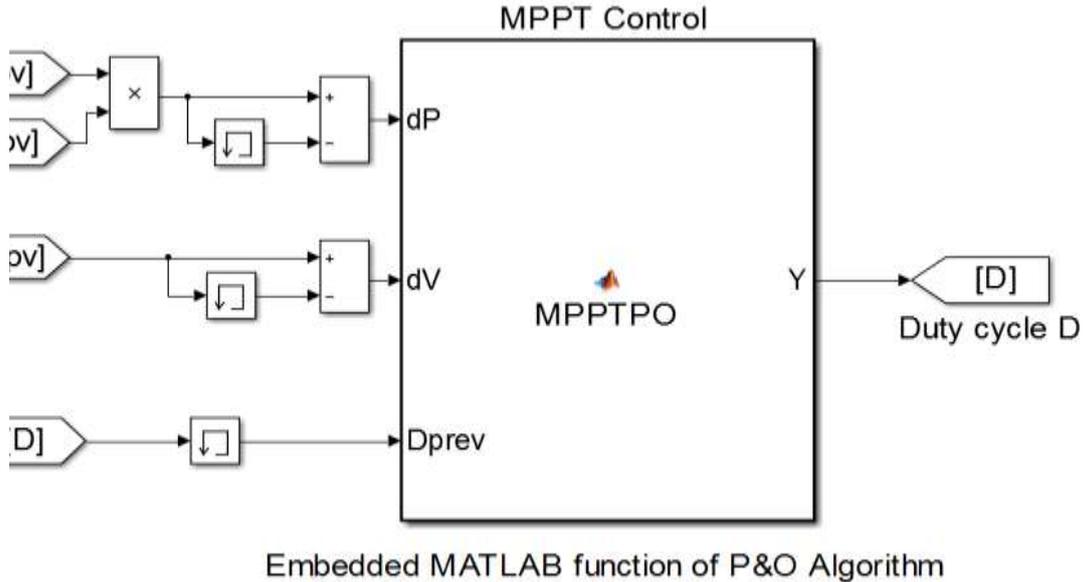


الشكل (7) محاكاة النظام الكلي مع متحكم MPPT-CV المطور في بيئة Matlab/Simulink .



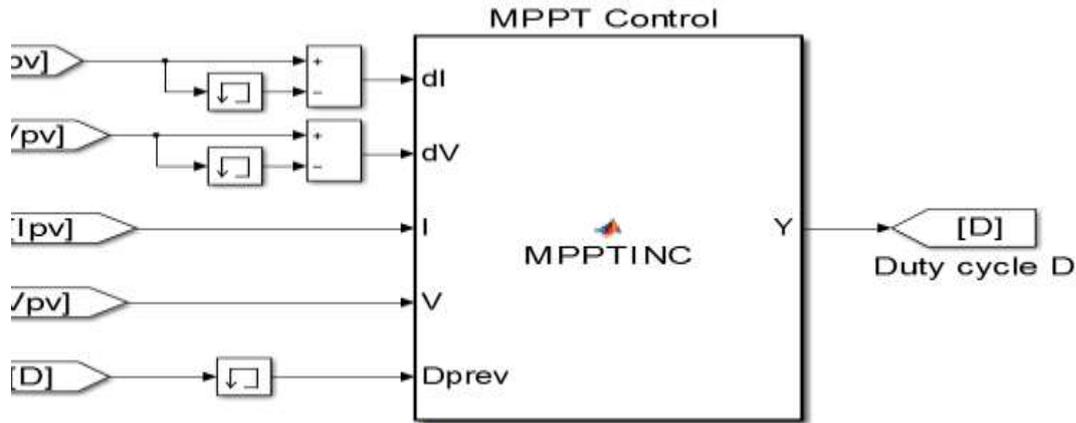
الشكل (8) محاكاة متحكم MPPT-CV المطور في بيئة Matlab/Simulink.

تمت برمجة خوارزميات عمل تقنيات التتبع MPPT المستخدمة في الدراسة: خوارزمية التوتر الثابت CV، خوارزمية الاضطراب والمراقبة P&O وخوارزمية زيادة الناقلية INC باستخدام تابع Embedded MATLAB function. حيث خرج هذه الخوارزميات هو نسبة تشغيل ترانزستور D مبدل الجهد المستمر. وبذلك يتم التحكم بمبدل الجهد بما يحقق عمل النظام عند نقطة MPP، باعتماد طريقة التحكم المباشر.



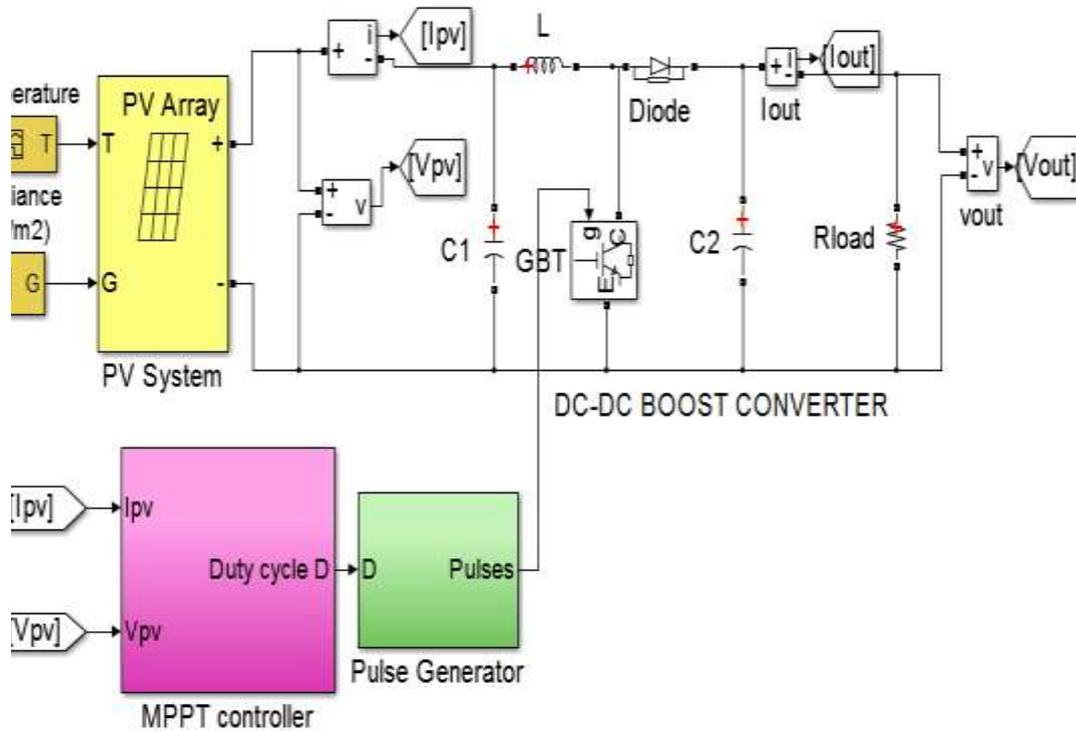
الشكل (9) محاكاة متحكم MPPT-P&O المطور في بيئة Matlab/Simulink.

توضح الأشكال (8)، (9) و(10) محاكاة كل من متحكم MPPT-CV، MPPT-P&O و MPPT-INC في بيئة Matlab/Simulink. حيث يوضح الشكل (11) محاكاة النظام الكلي مع متحكم MPPT المعتمد في كل من تقنية P&O و INC حيث دخل المتحكم هو I_{pv} تيار و V_{pv} توتر خرج النظام PV.



Embedded MATLAB function of INC Algorithm

الشكل (10) محاكاة متحكم MPPT-INC المطور في بيئة Matlab/Simulink.

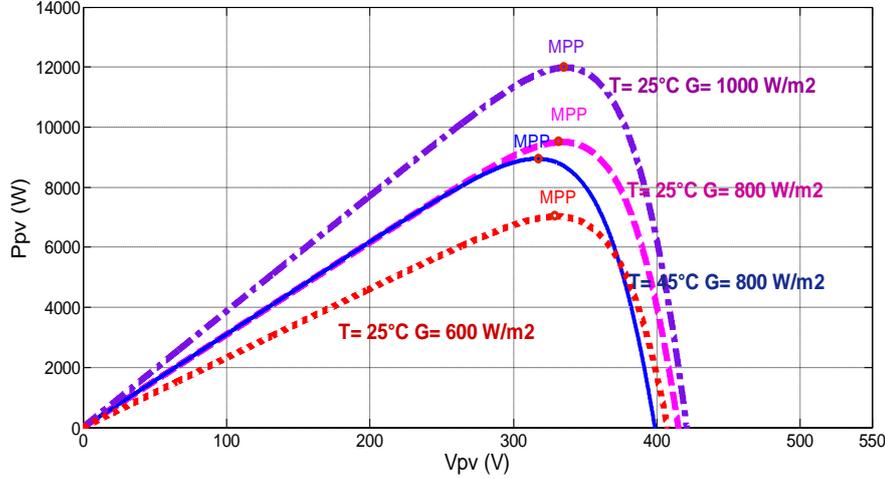


الشكل (11) محاكاة النظام مع متحكم MPPT المعتمد في تقنية P&O و INC في بيئة Matlab/Simulink.

النتائج والمناقشة:

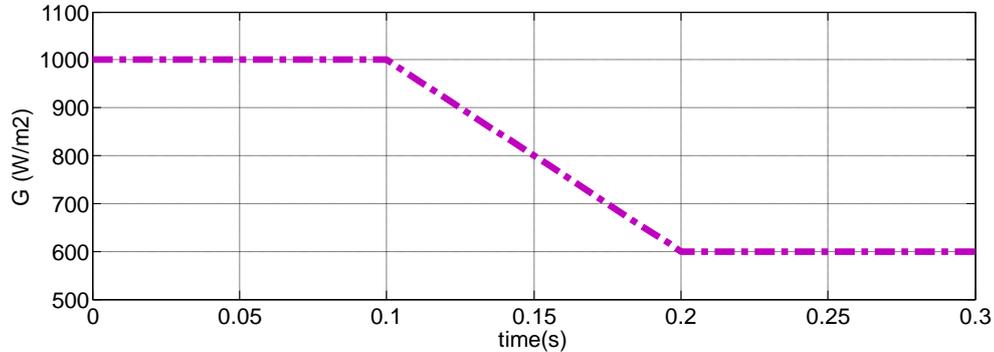
- سنعرض فيما يلي نتائج محاكاة النظام المدروس مع استخدام متحكم MPPT وبدون استخدام متحكم (حالة الوصل المباشر للنظام PV مع حمل أومي) عند تعرض النظام لشروط جوية مختلفة موافقة للحالات التالية:
- الحالة الأولى: شدة إشعاع شمسي متغيرة ودرجة حرارة الخلية الشمسية ثابتة.
 - الحالة الثانية: شدة إشعاع شمسي ثابتة ودرجة حرارة الخلية الشمسية متغيرة.

قبل مناقشة الحالات المذكورة، سنعرض أولاً منحنيات الخصائص المميزة (P-V) للنظام PV عند شروط مختلفة من شدة إشعاع شمسي و درجة حرارة، تظهر هذه المنحنيات تغير الاستطاعة النظرية العظمى P_{MPP} للنظام PV عند تغير الشروط الجوية.



الشكل (12) منحنيات الخصائص المميزة (P-V) للنظام PV.

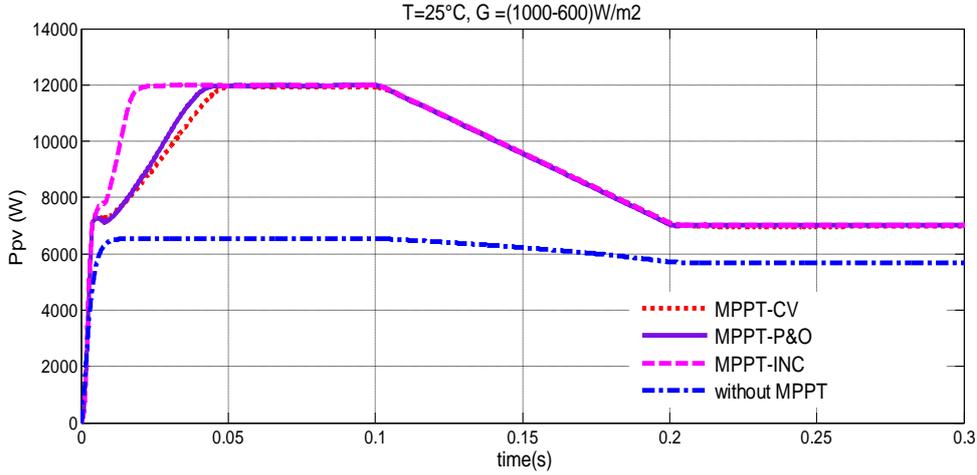
لنبدأ الآن بعرض ومناقشة نتائج محاكاة الحالة الأولى، الموافقة لتعرض النظام لسويات شدة إشعاع شمسي مختلفة بينما تعتبر درجة حرارة الخلية الشمسية ثابتة $T = 25[^\circ\text{C}]$ كما هو موضح بالشكل (13). توافق السوية الأولى شدة إشعاع شمسي ثابتة $G = 1000 [W/m^2]$ ، ثم يحدث انخفاض تدريجي بشدة الإشعاع لتستقر عند السوية الثانية الثابتة $G = 600 [W/m^2]$.



الشكل (13) تغيرات شدة الإشعاع الشمسي.

يوضح الشكل (14)، تغير الاستطاعة الكهربائية الناتجة من نظام PV تبعاً لتغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة. فعند الشروط الجوية الثابتة الموافقة لدرجة حرارة الخلية الشمسية $T = 25[^\circ\text{C}]$ وشدة إشعاع شمسي $G = 1000 [W/m^2]$ ، حيث تعرف هذه الشروط المذكورة بالشروط النظامية، تتقارب منحنيات الاستطاعة عند الحالة المستقرة الثابتة بوجود متحكمات MPPTs: MPPT-INC, MPPT-P&O, MPPT-CV، إلى الاستطاعة النظرية العظمى $P_{MPP} = 12000 [W]$. أما عند الوصل المباشر للنظام PV مع الحمل أي عند عدم استخدام متحكم MPPT، يستقر منحنى الاستطاعة عند $P_{pv} = 6098 [W]$. كما يوضح الشكل (14)، أنه

مع انخفاض شدة الإشعاع الشمسي بشكل تدريجي من السوية الثابتة الأولى الموافقة $G = 1000 [W/m^2]$ إلى السوية الثابتة الأخرى $G = 600 [W/m^2]$ وعند ثبات درجة الحرارة، تنخفض استطاعة نظام PV تدريجياً. حيث عند $G = 600 [W/m^2]$ ، تتقارب منحنيات الاستطاعة عند الحالة المستقرة الثابتة بوجود متحكم MPPT إلى الاستطاعة النظرية العظمى $P_{MPP} = 7070.52 [W]$ ، أما بدون متحكم يستقر منحنى الاستطاعة عند $P_{pv} = 5669.7 [W]$.



الشكل (14) استطاعة خرج نظام PV عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.

يلخص الجدول (1)، قيم P_{pv} الممثلة لاستطاعة نظام PV الناتجة عند الحالة المستقرة الثابتة المحددة من الشكل (14)، باستخدام كل من متحكمات MPPTs المذكورة و بدون استخدام متحكم عند الشروط الجوية $T = 25 [°C]$ و $G = 1000 [W/m^2]$. كما يتضمن هذا الجدول عامل كفاءة نظام PV، المحسوب بقسمة P_{pv} الممثلة لاستطاعة خرج نظام PV على الاستطاعة النظرية العظمى $P_{MPP} = 12000 [W]$ المحددة من منحنى (P-V) عند نفس الشروط. كما يتضمن الجدول (2)، قيم P_{pv} المحددة عند الحالة المستقرة الثابتة من منحنيات الاستطاعة عند الشروط $T = 25 [°C]$ و $G = 600 [W/m^2]$ ، وعامل كفاءة نظام PV، الناتج بقسمة P_{pv} على الاستطاعة النظرية العظمى: $P_{MPP} = 7070.52 [W]$ الناتجة عند نفس الشروط.

الجدول (1) عامل كفاءة نظام PV مع وبدون متحكم MPPT عند $G = 1000 [W/m^2]$ و $T = 25 [°C]$.

تقنية التحكم	$P_{pv} [W]$	عامل الكفاءة
MPPT-CV	11925.6	0.9938
MPPT-P&O	11974	0.9978
MPPT-INC	11980.98	0.9984
بدون متحكم	6098	0.5082

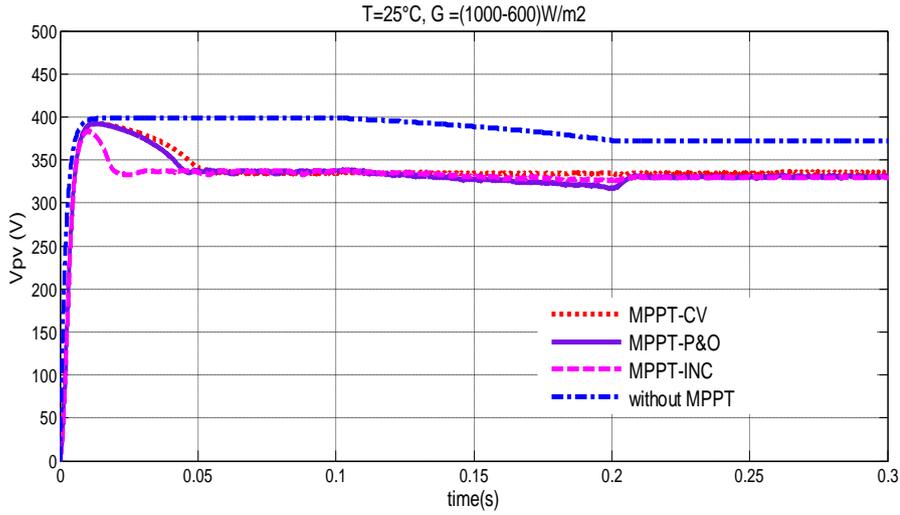
بمقارنة نتائج الجدول (1) و(2)، تظهر المتحكمات MPPTs، فعالية كبيرة في زيادة استطاعة نظام PV مقارنة مع عدم استخدام متحكم MPPT عند الشروط الجوية المختلفة. كما يلاحظ أن النظام PV يمتلك عامل كفاءة أعلى باستخدام متحكم MPPT-INC، ثم مع متحكم MPPT-P&O ثم متحكم MPPT-CV.

الجدول (2) عامل كفاءة نظام PV مع و بدون متحكم MPPT عند $T = 25[^\circ\text{C}]$ ، $G = 600 [\text{W}/\text{m}^2]$.

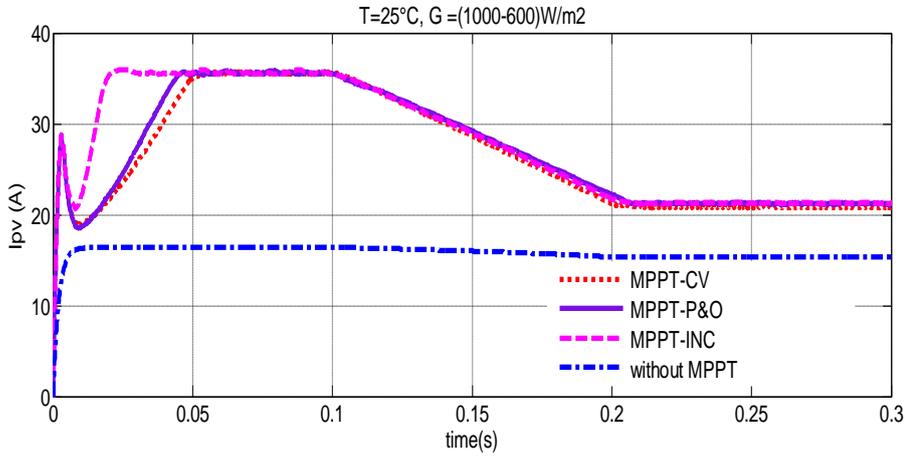
تقنية التحكم	$P_{pv} [\text{W}]$	عامل الكفاءة
MPPT-CV	6980	0.9872
MPPT-P&O	7016.28	0.9923
MPPT-INC	7018.885	0.9927
بدون متحكم	5669.7	0.8019

من جهة أخرى، تظهر نتائج الجداول (1) و(2)، فعالية كل من المتحكم MPPT-INC، في التقارب نحو قيم الاستطاعة النظرية العظمى المختلفة P_{MPP} الموافقة لهذه الشروط، دون الاعتماد على المعرفة المسبقة لخصائص النظام وإنما بالاعتماد مباشرة على قياس القيم اللحظية لتوتر و تيار نظام PV لتحديد P_{MPP} . حيث عند الشروط الثابتة المختلفة، تحقق خوارزمية INC سرعة في التقارب نحو نقط MPPs، تليها خوارزمية P&O ثم خوارزمية CV. كما يبدو أيضاً من الشكل (14)، تظهر كل من الخوارزميات سرعة في ملاحقة التغيرات الجوية للانتقال بسرعة من شروط السوية الأولى إلى شروط السوية الثانية.

توضح الأشكال (15) و(16)، تغير كل من V_{pv} و I_{pv} الممثلين لتوتر و تيار خرج نظام PV مع تغير شدة الإشعاع الشمسي على التوالي، حيث تظهر هذه الأشكال انخفاض قيم التوتر V_{pv} والتيار I_{pv} مع انخفاض شدة الإشعاع الشمسي G ، إلا أن تغيرات قيم التوتر تعتبر صغيرة مقارنة مع تغيرات قيم التيار. وبالتالي تنخفض قيمة VMPP بشكل طفيف مع انخفاض قيمة G . وهذا ما يفسر أن المتحكم MPPT-CV يحقق عامل كفاءة أعلى عند الشروط النظامية القياسية الموافقة $T = 25[^\circ\text{C}]$ و $G = 1000 [\text{W}/\text{m}^2]$ ، وذلك يعود لأن توتر التشغيل للنظام يضبط عند قيمة التوتر النظري الثابت $V_{MPP} = 337 [\text{V}]$ المحددة من خصائص النظام عند الشروط القياسية، بينما ينخفض عامل كفاءة النظام باستخدام متحكم MPPT-CV بشكل طفيف مع انخفاض G ، لأن تقنية CV، تفترض بقاء VMPP ثابتة رغم تغير شدة الإشعاع الشمسي.

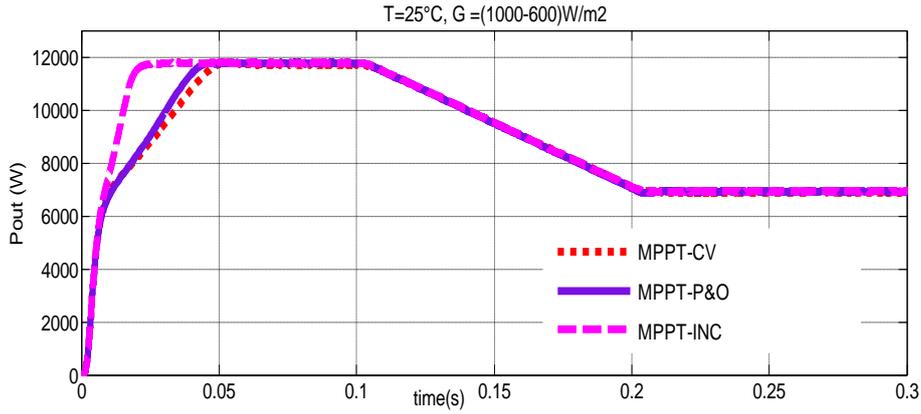


الشكل (15) توتر خرج نظام PV عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.

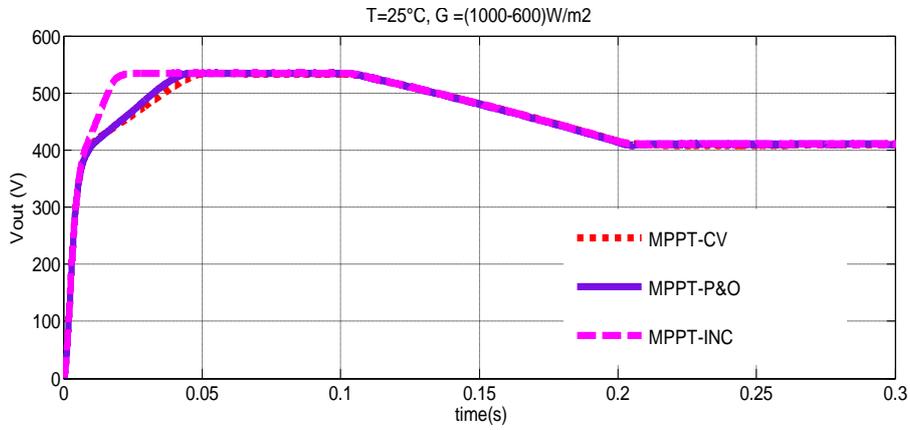


الشكل (16): تيار خرج نظام PV عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.

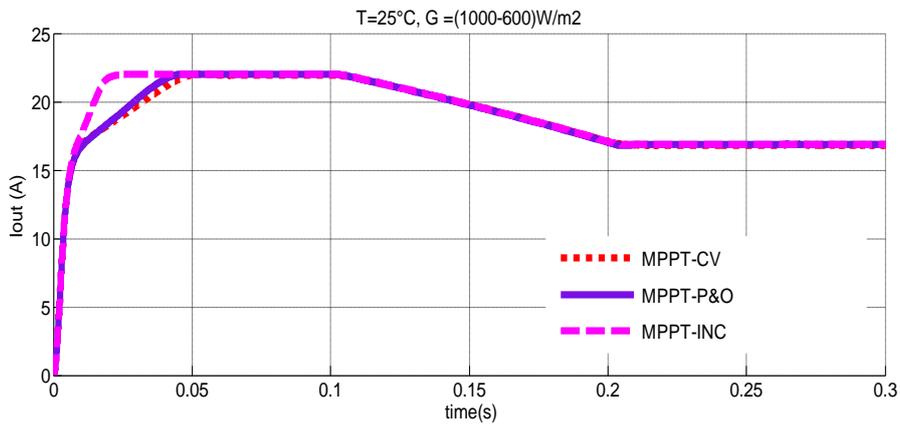
تظهر الأشكال (17)، (18)، و(19) منحنيات تغير استطاعة P_{out} ، توتر V_{out} وتيار I_{out} خرج الحمل على التوالي مع تغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة، بالمقارنة مع الأشكال (14)، (15) و(16)، يمكن ملاحظة أن P_{out} هي أقل بقليل من P_{pv} ، وذلك نتيجة الضياعات الناتجة في مبدل الجهد. كما أن V_{out} أكبر من V_{pv} ، أما I_{out} أقل من I_{pv} وذلك كون المبدل المستخدم رافع للجهد. كما تظهر الأشكال السابقة فعالية مبدل الجهد في رفع توتر V_{pv} إلى توتر V_{out} بالاعتماد على قيم نسبة تشغيل D التي هي خرج خوارزميات MPPT، التي تضمن عمل مبدل الجهد في ملاحقة التغيرات في الإشعاع لتتبع نقاط MPPs الموافقة وتحقيق عمل نظام PV عند نقط MPPs الموافقة لهذه التغيرات.



الشكل (17) استطاعة خرج الحمل عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.



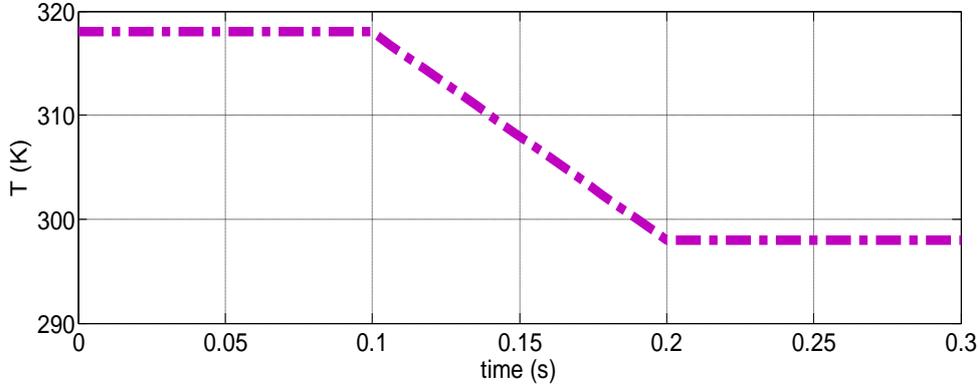
الشكل (18) توتر خرج الحمل عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.



الشكل (19) تيار خرج الحمل عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.

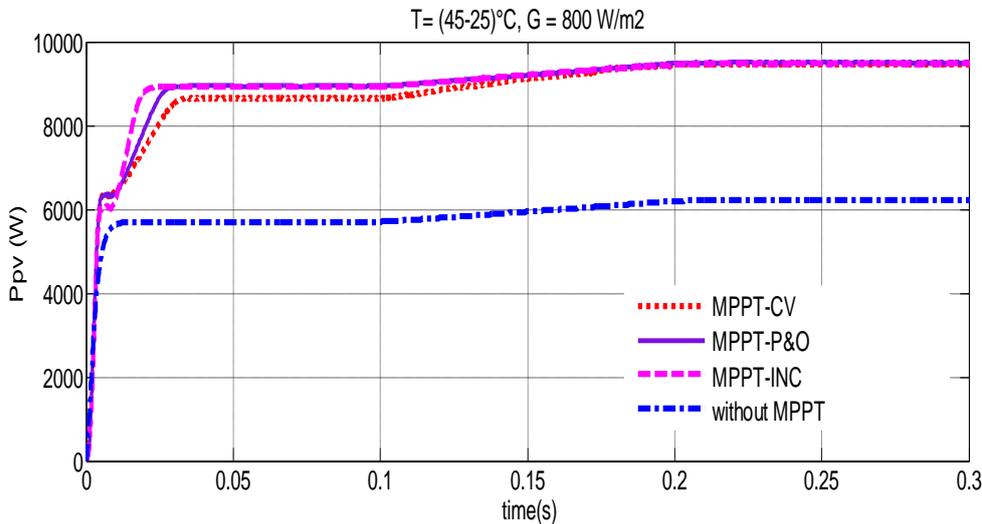
الآن سنعرض وسناقش نتائج محاكاة الحالة الثانية، حيث سنعتبر تغيرات لدرجة حرارة الخلية الشمسية من $T = 45[^\circ\text{C}]$ مع انخفاض تدريجي حتى الدرجة $T = 25[^\circ\text{C}]$ ، كما هو موضح بالشكل (20). مع افتراض شدة إشعاع شمسي ثابتة $G = 800 [W/m^2]$. يوضح الشكل (21)، تغير استطاعة نظام PV مع تغير درجة الحرارة مع

اعتبار $G = 800 [W/m^2]$ ، فعند الشروط الجوية الثابتة الموافقة لدرجة حرارة $T = 45 [^{\circ}C]$ ، تتقارب منحنيات الاستطاعة لنظام PV بوجود متحكمات MPPTs إلى الاستطاعة النظرية العظمى $P_{MPP} = 8964.9 [W]$. أما بدون متحكم MPPT، يستقر المنحني عند $P_{pv} = 5705.6 [W]$.



الشكل (20) تغيرات درجة الحرارة.

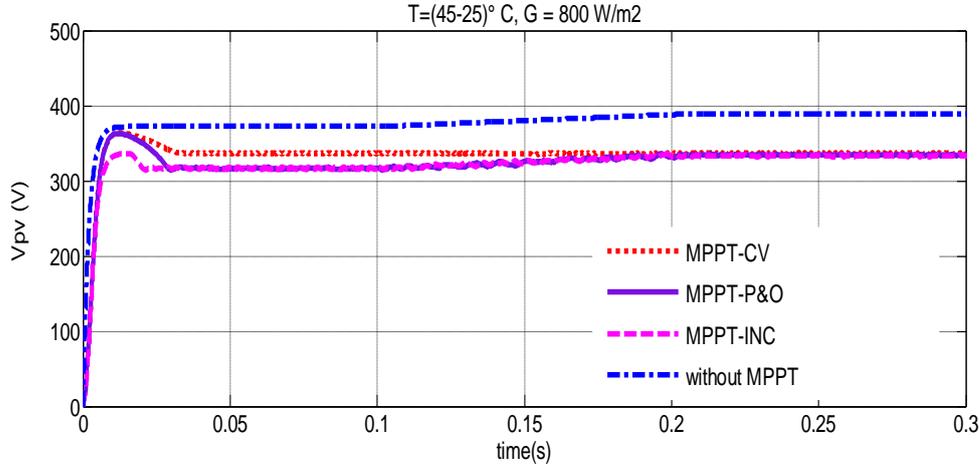
كما يبدو أيضا من الشكل (21)، عند نفس الشروط الثابتة المذكورة، تحقق خوارزمية INC سرعة في التقارب نحو نقطة MPP، تليها خوارزمية P&O ثم خوارزمية CV. كما يظهر الشكل (21)، تزداد الاستطاعة P_{pv} مع انخفاض درجة الحرارة. حيث عند الشروط الموافقة لدرجة $T=25 [^{\circ}C]$ ، تتقارب منحنيات الاستطاعة بوجود متحكمات MPPTs إلى $P_{MPP} = 9526.3 [W]$. بينما بدون استخدام متحكم MPPT، يستقر منحني الاستطاعة عند $P_{pv} = 6208 [W]$.



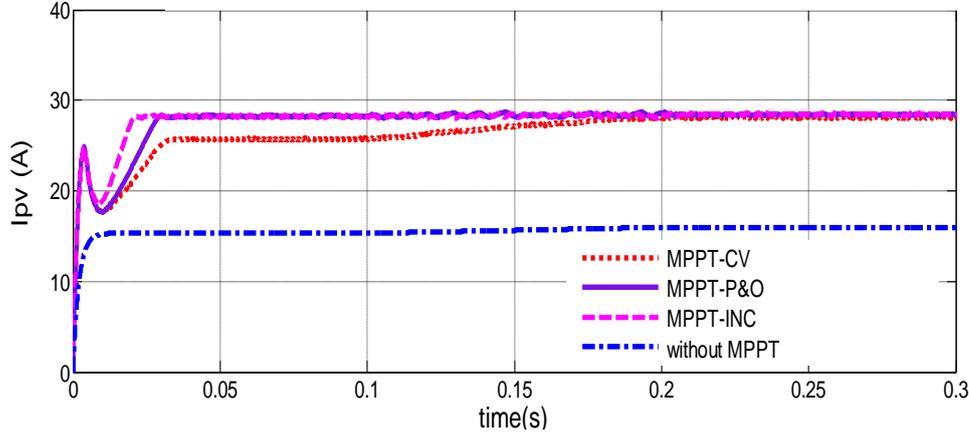
الشكل (21) استطاعة خرج نظام PV عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.

تبين الأشكال (22)، (23) تأثير درجة الحرارة على تغير توتر V_{pv} و تيار I_{pv} خرج النظام PV على التوالي، حيث تعتبر تغيرات درجة الحرارة ذات تأثير أكبر على تغير V_{pv} مقارنة مع تغير I_{pv} ، حيث تتخفص

V_{pv} بشكل كبير مع زيادة درجة الحرارة، وهذا ما يفسر انخفاض أداء تقنية CV بشكل ملحوظ مع ازدياد درجة الحرارة لانخفاض قيمة VMPP الحقيقية، التي تعتبر ثابتة في CV.



الشكل (22) توتر خرج نظام PV عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.



الشكل (23) تيار خرج نظام PV عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.

ينتضمن الجدول (3) عامل كفاءة نظام PV عند الشروط الثابتة $G = 800 [W/m^2]$

و $T = 45[{}^{\circ}C]$ ، الناتج عند $P_{MPP} = 8964.9 [W]$. بينما يتضمن الجدول (4) عامل الكفاءة عند $G = 800 [W/m^2]$ و $T = 25[{}^{\circ}C]$ ، الناتج عند $P_{MPP} = 9526.3 [W]$. بمقارنة نتائج الجدول (3) و(4)، يلاحظ تحسن عامل كفاءة نظام PV بوجود متحكم MPPT مقارنة بدون متحكم MPPT. حيث يمتلك النظام PV، عامل كفاءة باستخدام متحكم MPPT-INC، ثم متحكم MPPT-P&O ثم يليه متحكم MPPT-CV.

الجدول (3) عامل كفاءة نظام PV مع و بدون متحكم MPPT عند $T = 45[^\circ\text{C}]$ و $G = 800 [W/m^2]$.

تقنية التحكم	$P_{pv} [W]$	عامل الكفاءة
MPPT-CV	8657	0.9657
MPPT-P&O	8945.0	0.9978
MPPT-INC	8946.90	0.9980
بدون متحكم	5705.6	0.6364

الجدول (4) عامل كفاءة نظام PV مع و بدون متحكم MPPT عند $T = 25[^\circ\text{C}]$ و $G = 800 [W/m^2]$.

تقنية التحكم	$P_{pv} [W]$	عامل الكفاءة
MPPT-CV	9456.1	0.9926
MPPT-P&O	9499.90	0.9972
MPPT-INC	9501	0.9973
بدون متحكم	6208	0.6517

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث التركيز على تصميم و محاكاة نظام توليد طاقة كهروضوئي مكون من نظام كهروضوئي، مبدل رافع للجهد المستمر ومتحكم MPPT في بيئة Matlab/Simulink. كما تمت محاكاة المتحكم MPPT باعتماد عدة خوارزميات: خوارزمية CV، خوارزمية P&O وخوارزمية INC، باستخدام تابع Embedded MATLAB function لتحديد نسبة تشغيل D للتحكم مباشرة في دورة عمل مبدل رافع للجهد المستمر. تم اختبار أداء خوارزميات التتبع في ظل التغيرات الجوية. بناء على ذلك تم الوصول إلى الاستنتاجات التالية:

- أظهرت نتائج المحاكاة فعالية المتحكمات MPPT-CV، MPPT-P&O، MPPT-INC في تحسين كفاءة نظام PV عن طريق تتبع نقط MPPs، مقارنة مع حالة عدم استخدام متحكم.
- بينت النتائج سرعة عمل خوارزميات التتبع المختلفة في تحديد قيمة نسبة التشغيل للتحكم في دورة عمل مبدل رافع للجهد المستمر لملاحقة التغيرات الجوية المختلفة ولتحقيق عمل النظام عند نقط MPPs.
- أثبت متحكم MPPT-CV تحقيق عامل كفاءة أفضل و سرعة في التقارب نحو MPP عند الشروط الجوية النظامية الثابتة الموافقة $G = 1000 [W/m^2]$ و $T = 25[^\circ\text{C}]$ ، مقارنة مع الشروط الجوية الثابتة الأخرى. حيث ينخفض أداء تقنية CV بشكل كبير مع ازدياد درجة الحرارة، بينما ينخفض أداء هذه التقنية بشكل أقل أهمية مع انخفاض شدة الإشعاع الشمسي. كما أظهر متحكم MPPT-INC تحقيق عامل كفاءة أفضل و سرعة في التقارب نحو نقط MPPs عند الشروط الجوية المختلفة، مقارنة مع كل MPPT-P&O و MPPT-CV. بينما أظهر متحكم

MPPT- P&O تحقيق عامل كفاءة جيد و سرعة في التقارب نحو نقط MPPs أفضل مقارنة مع متحكم MPPT- CV عند الشروط الجوية المختلفة.

• تبدي متحكمات MPPT المعتمدة على تقنيات تتبع مستقلة في عملها عن خصائص نظام PV كتقنية P&O و INC، أداء أفضل مقارنة مع تقنية CV عند التغيرات الجوية.

• أوضحت نتائج المحاكاة صحة و دقة محاكاة نظام توليد الطاقة الكهروضوئي الكلي المعتمد على متحكمات MPPT في بيئة Matlab/Simulink، حيث تتوافق الاستنتاجات الناتجة المتعلقة بخصائص كل من المتحكمات MPPT-CV، MPPT-P&O و MPPT-INC مع نتائج الدراسات النظرية المرجعية.

يمكن استكمال العمل باستخدام تقنيات تحكم أخرى كالتحكم باستخدام الشبكات العصبونية والتحكم المنزلق ومقارنة نتائج هذه التقنيات مع التقنيات المستخدمة في هذا البحث.

المراجع:

- [1]- ESRAM, T.; CHAPMAN, P. *Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques*. IEEE Transactions on Energy Conversion 22, 2007, 439-449.
- [2]- RAVI, N.; RAVI, M. *A study on Maximum Power Point Tracking techniques for Photovoltaic systems*. International Journal of Engineering and Technical Research. 3, 2015, 189-196.
- [3]- SHARMA, D.; PUROHIT, G. *Hybrid Control Method for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Solar PV Power Generating System*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 8, 2014, 255-262.
- [4]- NOGUCHI, T.; TOGASHI, S.; NAKAMOTO, R. *Short Current Pulse Based Maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic and Converter Module System*. IEEE Trans. Ind. Electron. 49, 2002, 217-223.
- [5]- TOFOLI, F.; PEREIR, D.; PAULA, W. *Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems*. International Journal of Photo energy. Volume 2015, Article ID 812582, 10 pages.
- [6]- DOLARA, A.; FARANDA, R.; LEVA, S. *Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems*. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 1, 2009, 152-162.
- [7]- GAIKWAD, D.; CHAVAN, M. *A Novel Algorithm for MPPT for PV Application System by use of Direct Control Method*. International Journal of Computer Applications. 109, 2015, 10-15.
- [8]- VILLALVA, M.G.; GAZOLI, J.R.; FILHO, E.R. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays* IEEE Trans on Power Electronics 24, 2009, 1198- 1207.