

تطوير متحكم عائم مرتكز على تقنية الاضطراب والمراقبة لتحسين كفاءة نظم الطاقة الشمسية الكهروضوئية باستخدام Matlab/Simulink

الدكتورة إيمان ديلانة*

(تاريخ الإيداع 3 / 4 / 2016. قُبِلَ للنشر في 19 / 6 / 2016)

□ ملخص □

يعالج هذا البحث تحسين كفاءة نظم القدرة الشمسية الكهروضوئية باستخدام متحكم عائم لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى، 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، يقدم البحث نموذج جديد لمتحكم عائم MPPT-P&O Fuzzy مطور في بيئة Matlab/Simulink. يعتمد النموذج المقترح للمتحكم على تقنية الاضطراب والمراقبة P&O. حيث بطريقة مشابهة لتقنية P&O، تمثل كل من تغيرات الاستطاعة والتوتر للنظام الكهروضوئي، متغيرات دخل للمتحكم العائم المقترح، أما متغير الخرج فهو تغير نسبة التشغيل. الميزة الرئيسية للمتحكم العائم المطور، ترتكز على اعتبار أن خطوة تغير نسبة التشغيل ذات قيمة متغيرة ومتعلقة بشكل مباشر بتغيرات الاستطاعة والتوتر للنظام الكهروضوئي. مما يمكن من التغلب على مشكلة الخطوة الثابتة لتغير نسبة التشغيل في المتحكم MPPT-P&O المرتكز على تقنية P&O التقليدية. إن عمل المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy، بخطوة تشغيل متغيرة يحقق سرعة استجابة عالية وكفاءة عالية لتتبع نقطة MPP عند التغيرات الجوية المفاجئة أو السريعة، مقارنة مع المتحكم التقليدي MPPT-P&O. أظهرت نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink، الأداء الأفضل للمتحكم العائم المطور MPPT-P&O Fuzzy عند تتبع نقطة MPP بتحقيق أداء ديناميكي أفضل ودقة عالية، مقارنة مع استخدام المتحكم التقليدي MPPT-P&O عند التغيرات الجوية المختلفة.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي، متحكم عائم، مبدل رافع للجهد المستمر، تقنية الاضطراب والمراقبة.

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

Developing Fuzzy Logic Controller based on Perturb and Observe technique to improve the efficiency of Solar Photovoltaic Energy Systems using Matlab/Simulink

Dr. Imane Dilaneh *

(Received 3 / 4 / 2016. Accepted 19 / 6 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research deals with improving the efficiency of solar photovoltaic (PV) power systems using a Fuzzy Logic Controller (FLC) for Maximum Power Point Tracking (MPPT), 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, this research presents a new model for FLC developed in Matlab/Simulink environment. The proposed model for the controller is based on the conventional Perturb and Observe (P&O) technique. Where, in similar to the conventional P&O technique, the changes in the Power and tension of photovoltaic power system, are considered as the input variables of the proposed controller, while the output variable is the change in the duty cycle. The main advantage of the developed controller FLC, based on the considering the change in the duty cycle has a Variable Step Size, and directly related to the changes in the power and tension of the Photovoltaic system. Which make it possible to overcome the problem of fixed Step Size in the change of the duty cycle in the conventional MPPT- P&O Controller based on P&O technique. The MPPT- P&O Fuzzy, works by a variable step size achieve a fast speed response and high efficiency for tracking the MPP point under sudden and rapidly varying atmospheric conditions, compared with the conventional MPPT- P&O. The simulation results completed in Matlab/Simulink environment, showed the best performance of developed MPPT- P&O Fuzzy controller in tracking the MPP by achieving a better dynamic performance and high accuracy, compared with the use of the conventional MPPT- P&O under different atmospheric changes.

Key words: Photovoltaic System, Fuzzy Logic Controller, DC-DC Boost Converter, Perturb and Observe technique.

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

مقدمة:

يعتبر استخدام متتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracker, MPPT) للنظم الشمسية الكهروضوئية (Solar Photovoltaic Systems)، الحل الأمثل، للحصول على الطاقة القصوى من هذه النظم في ظل تغيرات الشروط الجوية من شدة الإشعاع الشمسي، ودرجة حرارة الجو المحيط وفي ظل اضطرابات الحمل المربوط معها. يركز عمل متتبع نقطة الاستطاعة العظمى على نظام تحكم (MPPT Controller)، يعمل على تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point, MPP) للنظام الكهروضوئي (Photovoltaic System, PV)، ومن ثم يجعل نظام PV يعمل عند نقطة MPP.

طورت عدة تقنيات تحكم لتتبع نقطة MPP لنظم PV. نذكر منها، تقنيات التحكم المرتكزة على التقنيات التقليدية (Traditional MPPT techniques) المستخدمة لتحديد توتر التشغيل VMPP الموافق لتوتر نقطة الاستطاعة العظمى والمطلوب لتحديد نسبة التشغيل (Duty Cycle, D)، المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل الجهد [1,2,3]. من التقنيات التقليدية، نذكر تقنية توتر الدارة المفتوحة (Open Voltage, OV) وتقنية التوتر الثابت (Constant, CV Voltage, CV)، تتميز هذه التقنيات السابقة بالبساطة وسهولة التنفيذ وانخفاض التكلفة فهي لا تتطلب سوى حساس واحد لقياس التوتر. غير أن هذه التقنيات تحقق عمل نظام PV في جوار نقطة MPP، كما أن تحقيق عمل هذه التقنيات، يركز على المعرفة المسبقة للخصائص الكهربائية لنظام PV. كما تتطلب تقنية OV قواطع ساكنة، لقياس توتر الدارة المفتوحة خلال فترات زمنية محددة عند تغير سويات الإشعاع ودرجة الحرارة، مما ينتج عنه فقدان بالطاقة خلال عملية القياس لأن نظام PV لا يحقن أي استطاعة خلال عملية الفصل، مما يخفض الأداء [1,2]. كما أن تقنية CV لا تأخذ بعين الاعتبار تأثير تغير الشروط المحيطة على قيمة توتر التشغيل VMPP [2]. من التقنيات التقليدية لتتبع نقطة MPP، الأكثر موثوقية وانتشاراً، نذكر تقنية الاضطراب والمراقبة (Perturb and Observe, P&O) وتقنية زيادة الناقلية (Incremental conductance, INC). حيث أن تحقيق عمل كل من تقنية P&O و INC، لا يتطلب الحاجة لمعرفة الخصائص الكهربائية لنظام PV لتحديد نقطة MPP. كما أن تقنية P&O، تتميز بالبساطة والسهولة في التنفيذ مقارنة مع تقنية INC، وهذا يفسر الانتشار الواسع لاستخدام P&O في تتبع نقطة MPP عند الشروط الجوية الثابتة، ولكن يمكن أن تفشل تقنية P&O في تتبع نقطة MPP عند التغيرات الجوية المفاجئة والسريعة، بينما تحقق تقنية INC أداء أفضل عند هذه الشروط [3]. بالرغم من ذلك، لا تحقق تقنيات P&O و INC سرعة تقارب جيدة نحو عند نقطة MPP لأن ذلك مرتبط بالزمن اللازم لتقارب خوارزمية عمل هذه التقنيات نحو نقطة MPP.

يمكن استخدام تقنيات تحكم متقدمة، لضمان أداء أفضل لعمل أنظمة التحكم في تتبع نقطة MPP، من حيث تحقيق سرعة عالية في الاستجابة للتغيرات الجوية ودقة عالية في تتبع نقطة MPP، كالتقنيات العصبونية (Neural network) والمنطق العائم (Fuzzy Logic) [4,5]. إن استخدام الشبكات العصبونية [4]، يتطلب المعرفة التامة لخصائص النظام الكهربائية لتدريب وبناء النموذج العصبوني. على خلاف ذلك، يمكن باستخدام المنطق العائم بناء نظام تحكم لتتبع نقطة MPP، مستقل عن المعرفة المسبقة للخصائص الكهربائية للنظام PV وذلك بالاعتماد فقط على استخدام قيم التيار والتوتر اللحظية والمقاسة مباشرة لتحديد نقطة MPP. ويمكنه أن يحقق أداء جيد عند التحكم بالأنظمة اللاخطية مثل نظم PV.

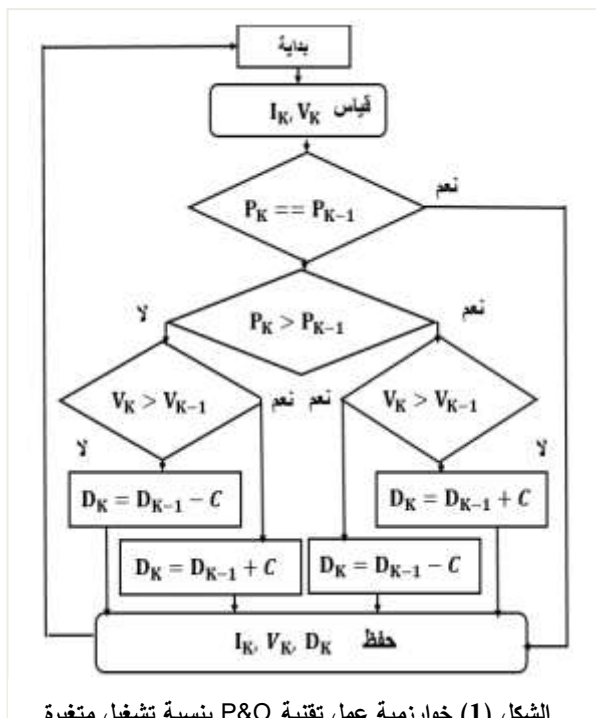
يرتكز تصميم المتحكم العائم (Fuzzy Logic Controller, FLC) بشكل أساسي على خبرة المصمم وفهمه العميق للعلاقة الرابطة بين تغيرات كل من متغيرات الدخل والخرج للمتحكم FLC. ففي المرجع [5]، تم اعتبار مدخلي المتحكم FLC، هما تيار وتوتر خرج النظام PV، أما خرج FLC فهو نسبة التشغيل المستخدمة للتحكم في عمل مبدل خافض للجهد المستمر، أما في المرجع [6]، تم اعتبار أن مدخلي المتحكم FLC يمثلان الاستطاعة وتغير الاستطاعة لخرج نظام PV، أما مخرج المتحكم فهو تغير نسبة التشغيل المستخدمة للتحكم في عمل قالبة AC-DC (Inverter). في هذا البحث سنعتمد إلى تطوير متحكم FLC جديد يرتكز على تقنية الاضطراب والمراقبة P&O، في هذه الحالة، ستكون كل من تغيرات توتر وتغيرات استطاعة خرج النظام الكهروضوئي مداخل للمتحكم FLC، بينما خرج المتحكم فهو تغير نسبة التشغيل المستخدمة لتحديد نسبة التشغيل للتحكم في عمل مبدل رافع للجهد المستمر. نتيجة ذلك يمكن بسهولة بناء واستنباط قواعد الأساس للمتحكم FLC من شروط عمل خوارزمية P&O.

أهمية البحث وأهدافه:

يقدم البحث مساهمة جديدة في تطوير متحكم عائم FLC لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى MPP، بهدف الحصول على الاستطاعة القصوى الممكنة من النظم الشمسية الكهروضوئية في ظل التغيرات الجوية المختلفة من شدة إشعاع شمسي ودرجة حرارة محيطية. في هذا السياق، يعتمد تطوير المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy على محاكاة عمل تقنية الاضطراب والمراقبة P&O التقليدية الشائعة الاستخدام لتتبع نقطة MPP. مما يمكننا من بناء متحكم FLC، سهل التنفيذ ويحاكي الأداء الجيد لتقنية الاضطراب والمراقبة عند الشروط الجوية الثابتة، مع العمل على تحسين أداء هذه التقنية عند التغيرات الجوية السريعة التغير. بالإضافة لتحقيق معيار سرعة تقارب عالية نحو نقطة MPP عند هذه التغيرات. لتحقيق ذلك، خرج المتحكم FLC المطور هو تغير نسبة تشغيل، التي تعتبر متغيرة بخطوة متغيرة (Variable Step Size, VSS) ومتعلقة بشكل مباشر بتغيرات الاستطاعة والتوتر للنظام الكهروضوئي الممثلة لمتغيرات دخل المتحكم FLC. وبالتالي يمكن التغلب على مشكلة الخطوة الثابتة (Fixed Step Size, FSS) لتغير نسبة التشغيل في المتحكم MPPT-P&O التقليدي المرتكز على تقنية P&O التقليدية.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد تصميم نموذج المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور في البحث على تطبيق العمليات الأساسية المعروفة في المنطق العائم وعلى استخدام مكتبة Fuzzy Logic Toolbox، الموجودة في بيئة Matlab/Simulink. كما يعتمد اختبار أداء وفعالية المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور، على نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink، لنظام توليد طاقة كهروضوئي مكون من نظام PV، مبدل رافع للجهد مستمر (DC-DC Boost Converter)، المتحكم العائم. بالإضافة لمقارنة نتائج المحاكاة باستخدام متحكم MPPT-P&O Fuzzy مع حالة استخدام متحكم MPPT-P&O التقليدي، ومع حالة عدم استخدام متحكم MPPT (Without MPPT) أي حالة الوصل المباشر لحمل أومي مع نظام PV عند التغيرات الجوية المفاجئية والسريعة.



الشكل (1) خوارزمية عمل تقنية P&O بنسبة تشغيل متغيرة بخطوة ثابتة FSS.

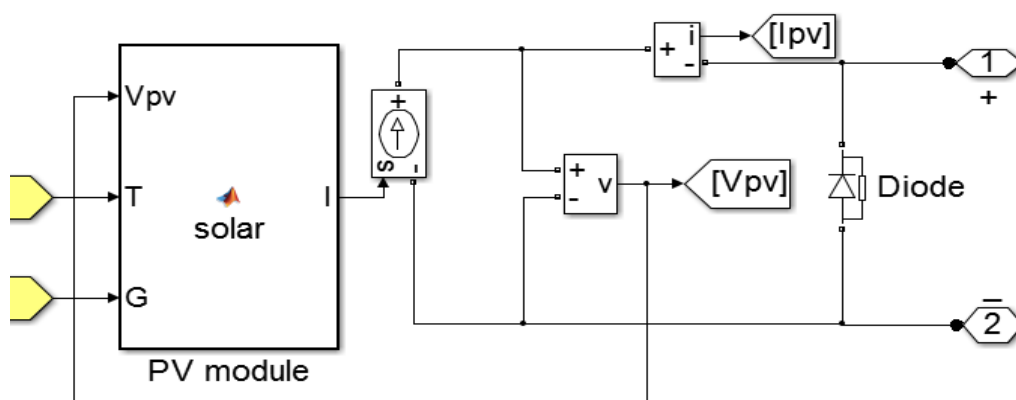
4. تقنية الاضطراب والمراقبة P&O

تعتبر هذه التقنية من أكثر تقنيات MPPT انتشاراً وذلك لسهولة تنفيذها في التنفيذ. تعمل هذه التقنية على إجراء اضطراب زيادة أو نقصان 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 بخطوة ثابتة FSS مقدارها C سالب أو موجب كما هو موضح بالشكل (1)، بما يحقق نقل نقطة العمل للنظام PV إلى نقطة MPP [3]. إن تغير قيمة نسبة التشغيل بخطوة ثابتة FSS يخفض أداء هذه التقنية في ملاحقة التغيرات الجوية سريعة التغيير.

5. النموذج الرياضي للنظام الكهروضوئي

تحدد الخصائص الكهربائية تيار - توتر (I-V) للنظام PV، الممثل لنموذج كهروضوئي مكون من N_s عدد من الخلايا الشمسية الموصولة على التسلسل، بالاعتماد على العلاقة التالية [7]:

$$I_{PV} = I_p - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{V_t a} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (1)$$



الشكل (2) محاكاة نظام PV المطور في بيئة Matlab/Simulink .

يقاس التيار I_{PV} خرج النظام PV المحدد بالعلاقة (1) بالأمتير [A]، أما التوتر V_{PV} فيقاس بالفولت [V]، كما يمثل I_p [A] التيار الضوئي المتولد أما I_0 [A] تيار الإشباع العكسي. يحدد الجهد الحراري المقاس بالفولت

بالعلاقة التالية: $V_t = \frac{kTN_s}{q}$. يمثل الثابت a عامل مثالية الديود، k ثابت بولتزمان، q شحنة الإلكترون. درجة حرارة الخلية الشمسية T مقاسة بالكلفن [K]. تمثل R_p ، R_s المقاومات التسلسلية والتفرعية على التوالي وتقاس بالأوم. يمثل الشكل (2) محاكاة نظام كهروضوئي (موديول) في بيئة Matlab/Simulink. يتم تشكيل نظام كهروضوئي مكون من مصفوفة خلايا شمسية، بوصل عدد من الموديولات على التسلسل لتشكيل سلسلة، ثم يتم وصل عدد من السلاسل على التفرع للحصول على النظام الكهروضوئي بالاستطاعة المطلوبة.

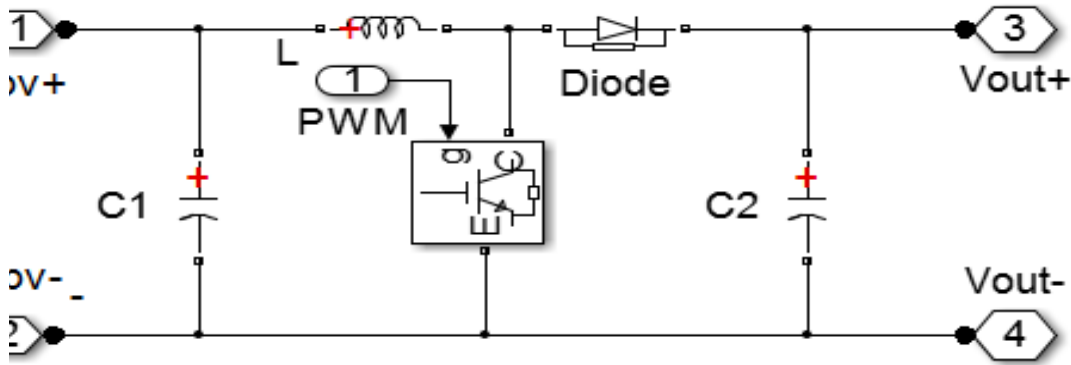
6. محاكاة المبدل الرفع للجهد المستمر في بيئة Matlab/Simulink

يعتمد تحقيق عمل المتحكم MPPT في تتبع نقطة MPP للنظام PV على مبدل رافع للجهد المستمر، يقوم المبدل برفع توتر الدخل V_{pv} الممثل لتوتر خرج النظام PV إلى توتر الحمل V_{out} بالاعتماد على نسبة التشغيل D المحددة بالعلاقة التالية [3]:

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{out}} \quad (2)$$

تعتبر D عدد لابعدي، يمثل نسبة تشغيل ترانزستور مبدل الجهد، الناتجة من نسبة الزمن الذي يكون الترانزستور مغلقاً إلى زمن الدور (المساوي مجموع زمن الإغلاق والفتح للترانزستور). يقاس كل من التوتر V_{pv} و V_{out} بالفولت [V]. يرتبط تيار خرج النظام الكهروضوئي I_{pv} وتيار الحمل I_{out} المقاسين بالأمبير [A] بالعلاقة التالية:

$$I_{pv} = (1 - D) * I_{out} \quad (3)$$



الشكل (3) محاكاة مبدل الرفع للجهد في بيئة Matlab/Simulink

7. تطوير المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy

سنعمد الآن إلى بناء نموذج المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy، المرتكز على P&O، لتتبع نقطة MPP لنظم PV. حيث تعتبر كل من تغيرات الاستطاعة ΔP وتغيرات التوتر ΔV ، مداخل للمتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy، أما إشارة خرج المتحكم، فهي تغير قيمة نسبة التشغيل ΔD المستخدمة لتحديد قيمة نسبة التشغيل D المستخدمة للتحكم في عمل مبدل جهد مستمر لتحقيق عمل نظام PV عند نقطة MPP عند التغيرات الجوية المختلفة.

• يعبر عن تغير استطاعة خرج النظام الكهروضوئي ΔP المقاس بالوات [W]، كما يلي:

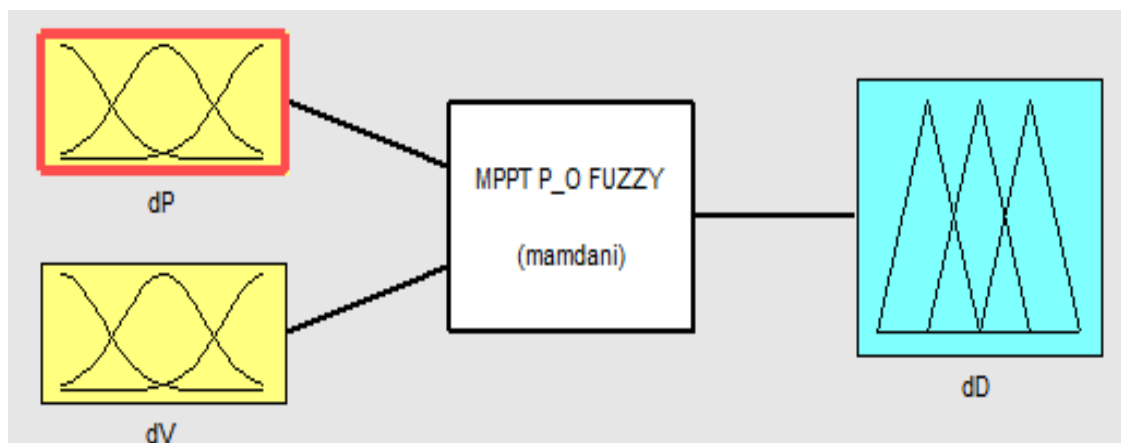
$$\Delta P = P(k) - P(k - 1)$$

• كما يعبر عن تغير توتر خرج النظام الكهروضوئي ΔV المقاس بالفولت [V]، بالتالي:

$$\Delta V = V(k) - V(k - 1)$$

• أما تغير نسبة التشغيل ΔD (عدد لابعدي)، فيعبر عنها كما يلي:

$$\Delta D = D(k) - D(k - 1)$$



الشكل (4) النافذة الرئيسية للتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور في بيئة Matlab/Simulink.

سنقوم الآن بتحويل متغيرات دخل المتحكم FLC العددية ΔP و ΔV إلى متغيرات عائمة وذلك بتطبيق عملية التعويم. ففي عملية التعويم (Fuzzification)، يتم تحويل قيم الدخل التي تعبر عن كميات عددية إلى مجموعات عائمة (Fuzzy sets). حيث يمكن التعبير عن متغير الدخل العائم العددي بمتغيرات لغوية (Linguistic) مختلفة تمثل بتتابع انتماء (Membership Functions). تمثل توابع الانتماء بمجموعات عائمة، وكل مجموعة عائمة تسمح للمنتميين لها بالحصول على درجات مختلفة من الانتماء تتراوح بين الصفر والواحد $\mu \in [1,0]$. حيث μ تمثل درجة الانتماء (Membership Degree). كما يمكن أن تتداخل المجموعات العائمة المتجاورة بنسب (50-10)%.

• لتعويم متغيري الدخل ΔP و ΔV ، سنستخدم توابع انتماء لها شكل شبه منحرف، ومعبر عنها بالمتغيرات

اللغوية التالية:

• NB: Negative-Big, NM: Negative-Medium, NS: Negative-Small, Zero, PS: Positive-Small, PM: Positive-Medium, PB: Positive-Big.

• أما لتعويم متغير الخرج ΔD ، سنستخدم توابع انتماء لها شكل مثلثي، ومعبر عنها بالمتغيرات اللغوية التالية:

• NM: Negative-Medium, NS: Negative-Small, Zero, PS: Positive-Small, PM: Positive-Medium.

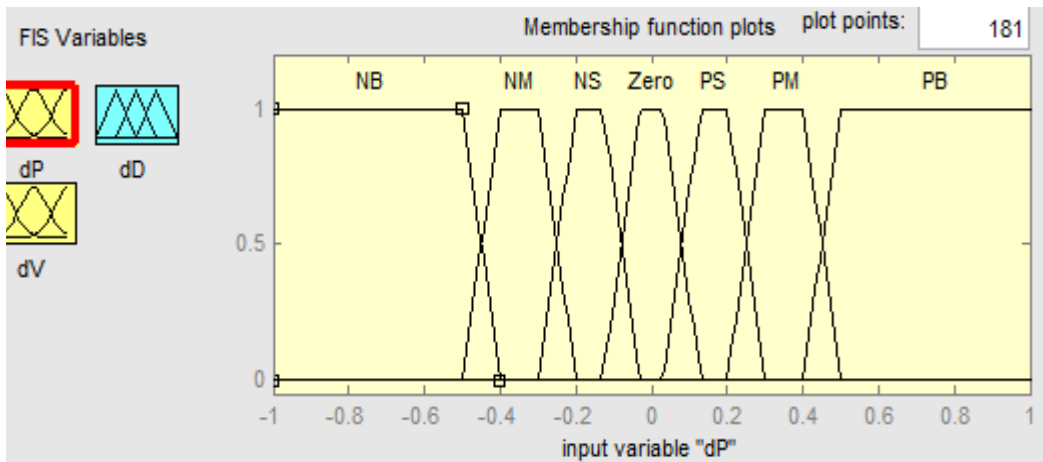
كما سنستخدم توابع انتماء لها شكل شبه منحرف، ومعبر عنها بالمتغيرات اللغوية التالية:

NB: Negative-Big, PB: Positive-Big.

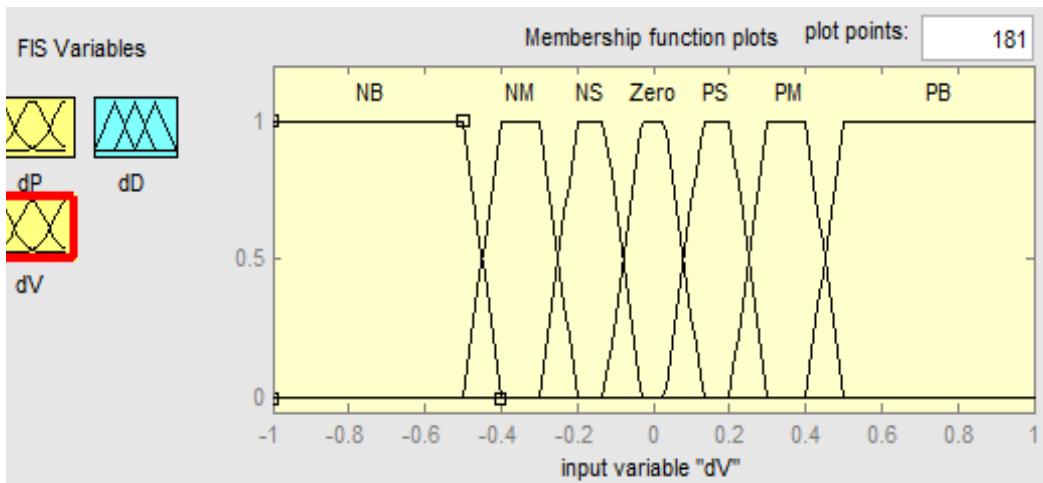
يظهر الشكل (4)، النافذة الرئيسية للتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور الناتجة باستخدام

بمكتبة Fuzzy Logic Toolbox، حيث يبين الشكل أن للتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy، متغيري دخل ΔP

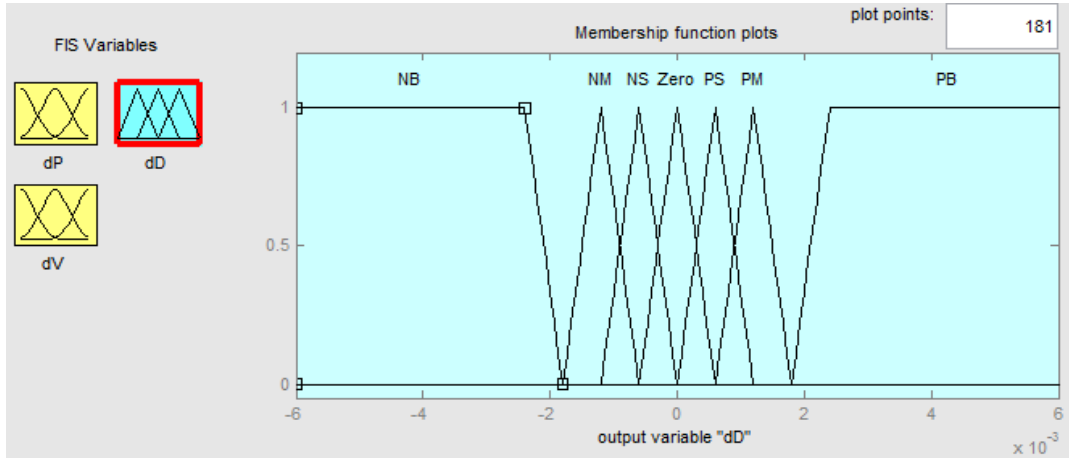
و ΔV ، ومتغير خرج واحد ΔD . كما تبين الأشكال (5)، (6) و (7) كيفية تعويم كل من متغيري دخل ومتغير خرج المتحكم FLC على التوالي. الخطوة التالية لتعويم مدخلات الدخل والخرج للمتحكم FLC هي تطبيق عملية الاستدلال. بعد عملية التعويم، تسقط هذه القيم على الجدول (1) وتطبق القواعد باستخدام العملية المنطقية and. ثم يتم تجميع نتائج عملية الاستدلال لكل قاعدة، للحصول على إشارة الخرج المعومة، وتطبيق عملية فك التعويم يتم الحصول على قيمة الخرج العددية وذلك باستخدام طريقة مركز المساحة، حيث يتم تحديد طريقة فك التعويم في النافذة الرئيسية للمتحكم وذلك باختيار Defuzzification: centroid. يبين الشكل (8)، نافذة تظهر كيفية تطبيق قواعد الأساس الموضحة بالجدول (1)، المحددة للعلاقة بين تغيرات متغيري الدخل ΔP و ΔV ، ومتغير الخرج ΔD ، باستخدام العبارة الشرطية IF-Then. كما يبين الشكل (9) النموذج النهائي للمتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.



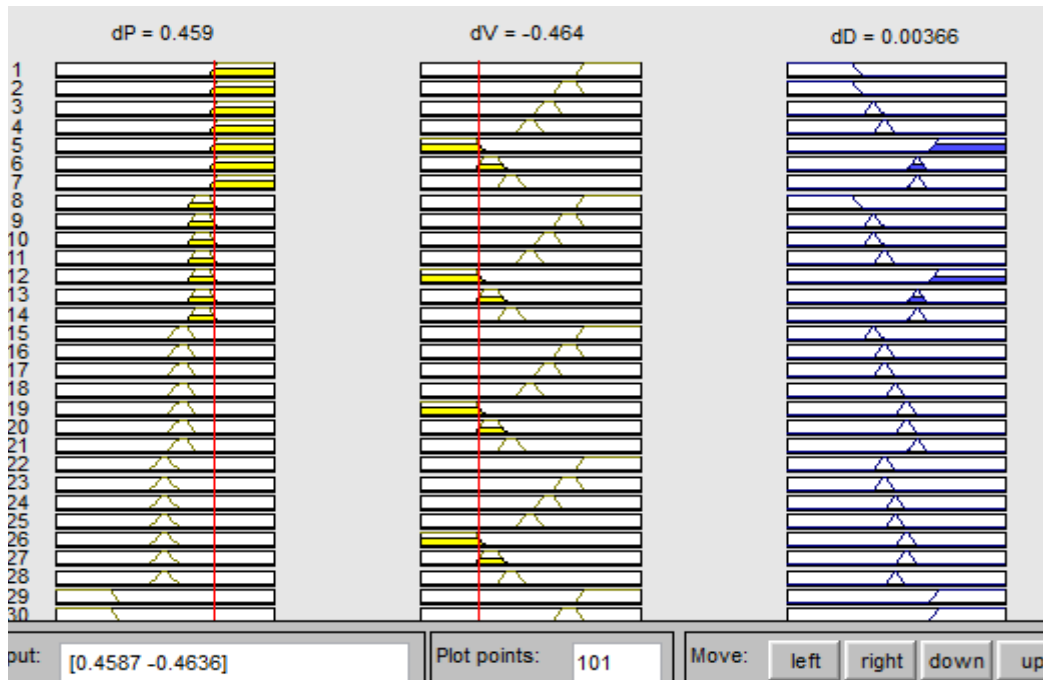
الشكل (5) توابع الانتماء لإشارة الدخل الأول للمتحكم العائم الممثلة لتغير الاستطاعة



الشكل (6) توابع الانتماء لإشارة الدخل الثاني للمتحكم العائم الممثلة لتغير التوتر ΔV .



الشكل (7) توابع الانتماء لإشارة الخرج للمتحكم العائم الممثلة لتغير نسبة التشغيل ΔD .

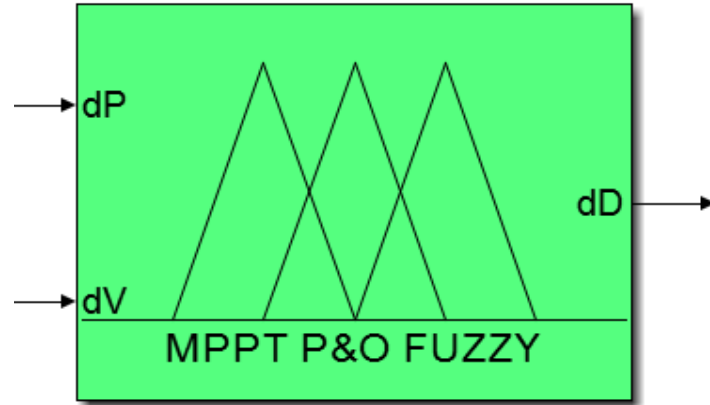


الشكل (8) نافذة تطبيق قواعد الأساس للمتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy.

الجدول (1) قواعد الأساس التي تعطي الخرج بالشكل العائم.

تغير استطاعة خرج النظام PV، ΔP	تغير توتر خرج النظام PV، ΔV						
	NB	NM	NS	Zero	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	PS	PM	PB	PB
NM	NB	NM	NM	PS	PM	PM	PB

NS	NM	NS	NS	Zero	PS	PS	PM
Zero	PS	PS	Zero	Zero	Zero	NS	NS
PS	PM	PS	PS	Zero	NS	NS	NM
PM	PB	PM	PM	NS	NM	NM	NB
PB	PB	PB	PM	NS	NM	NB	NB

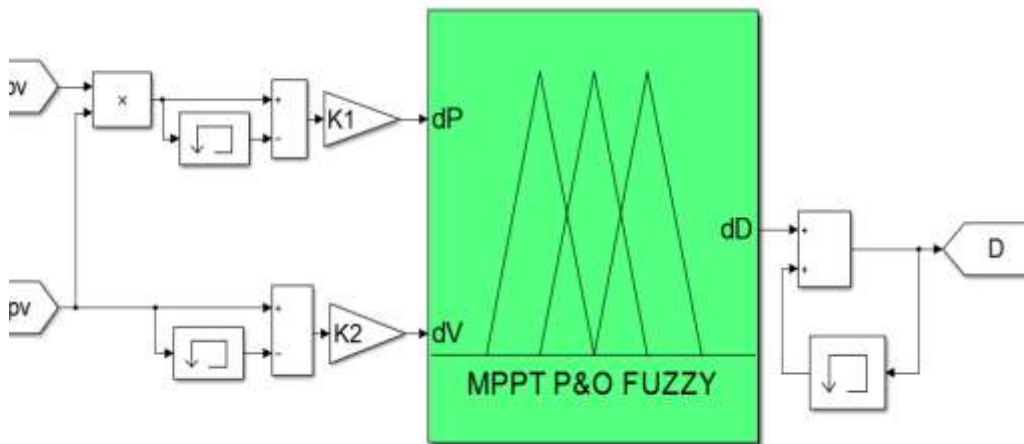


الشكل (9) المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.

8. محاكاة المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور في بيئة MATLAB/SIMULINK

سنعمد الآن إلى محاكاة نموذج المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy في بيئة Matlab/Simulink،

فبعد أن تم بناء نموذج المتحكم FLC كما هو موضح بالشكل (9). يتم استخدام قياسات تيار وتوتر خرج النظام الكهروضوئي، لتحديد تغيرات الاستطاعة ΔP وتغيرات التوتر ΔV لخرج النظام الكهروضوئي PV، لتستخدم هذه المتغيرات كمدخل للمتحكم FLC، أما خرج المتحكم FLC هو تغير قيمة نسبة التشغيل ΔD كما هو موضح بالشكل (10).

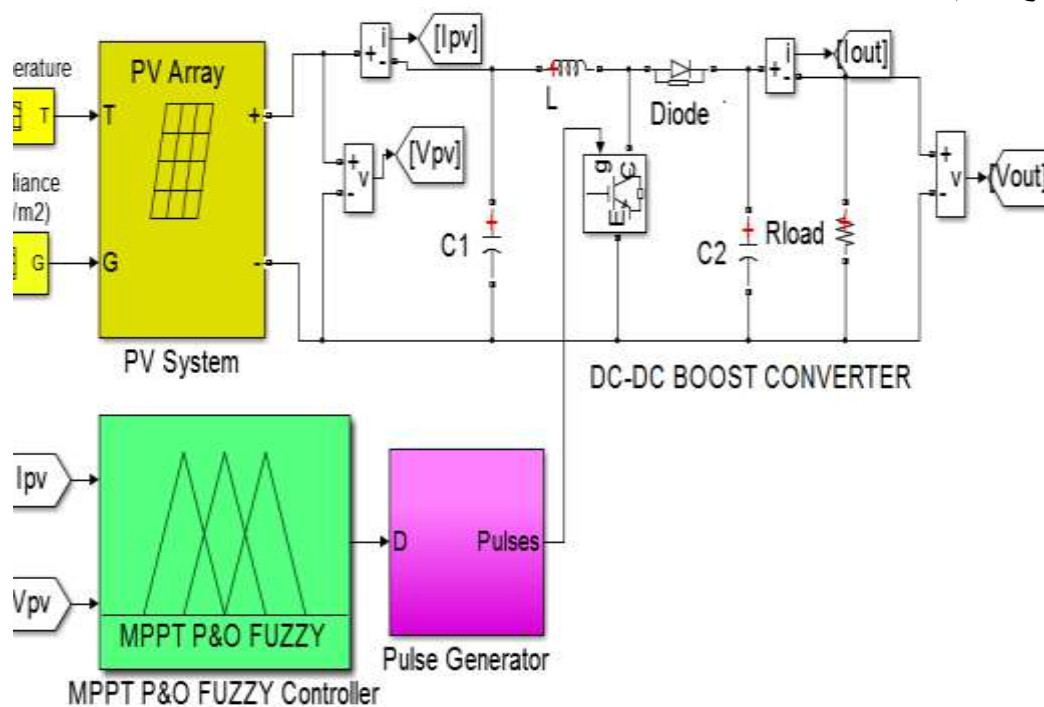


الشكل (10) محاكاة نموذج المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور في بيئة Matlab/Simulink

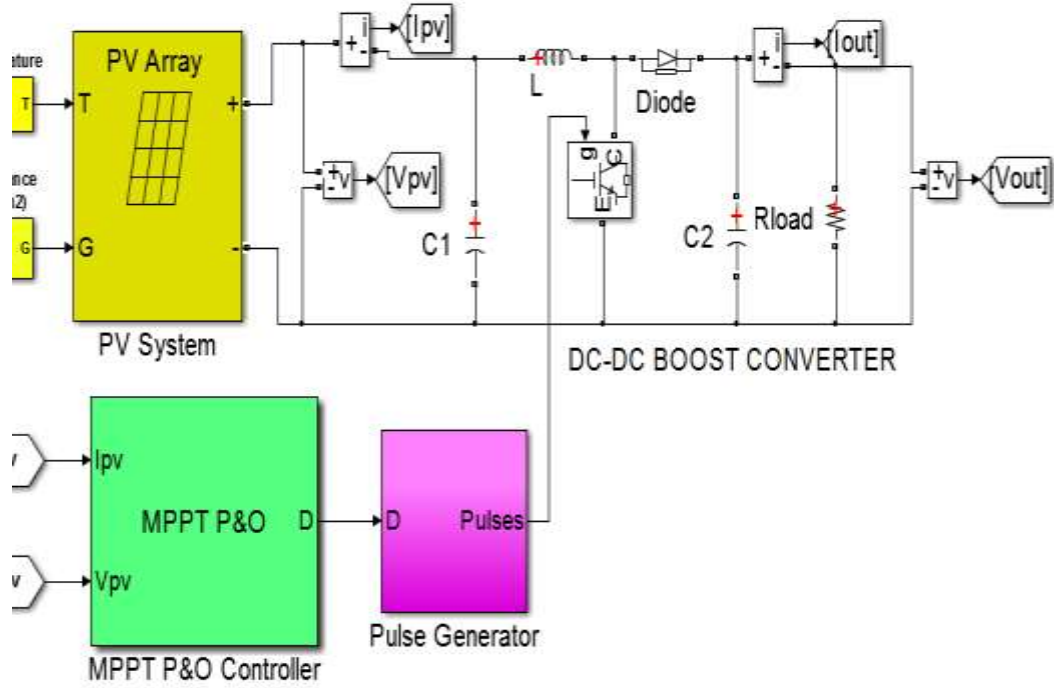
حيث تضاف قيمة ΔD إلى قيمة $D(k-1)$ لتحديد قيمة $D(k)$ الموافقة. تعتبر قيمة ΔD متغيرة بخطوة متغيرة (Variable Step Size) كبيرة أو صغيرة سالبة أو موجبة بما يتوافق مع تغيرات كل من ΔP و ΔV الموافقة. بناء على ذلك، تتغير قيمة $D(k)$ بشكل يتناسب مع تغيرات كل من ΔP و ΔV ، بما يمكن أن يحقق سرعة في الوصول لقيمة $D(k)$ المناسبة للتحكم في عمل ترانزستور مبدل الجهد لتحقيق سرعة استجابة عالية و كفاءة عالية مقارنة مع متحكم MPPT-P&O في تتبع نقطة MPP عند التغيرات الجوية المختلفة. حيث K_1 و K_2 عوامل التقييس المستخدمة لضبط مجال تغير كل من ΔP و ΔV ضمن المجال $[-1,1]$

9. محاكاة نظام تتبع نقطة MPP لنظام PV، في بيئة Matlab/Simulink

بغرض التحقق من فعالية وأداء المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور في البحث، سنعمد الآن إلى محاكاة نظام تتبع نقطة MPP لنظام PV، مكون من نظام كهروضوئي PV، مبدل رافع للجهد مستمر (DC-DC Boost Converter)، متحكم عائم MPPT-P&O Fuzzy في بيئة Matlab/Simulink، كما يوضحه الشكل (11). أما الشكل (12)، يبين المحاكاة مع المتحكم التقليدي المرتكز على تقنية الاضطراب والمراقبة MPPT-P&O. الاستطاعة الكلية العظمى للنظام PV هي $12000 [W]$ ، المحددة عند الشروط القياسية من شدة إشعاع شمسي $G = 1000 [W/m^2]$ ودرجة حرارة الخلية الشمسية $T = 25[^\circ C]$. قيم توتر و تيار النظام PV الموافقة للاستطاعة النظرية العظمى MPP: $V_{MPP} = 337 [V]$ و $I_{MPP} = 35.6 [A]$ ، مقاومة الحمل الأومي المربوط مع النظام: $R = 24.3 [\Omega]$.



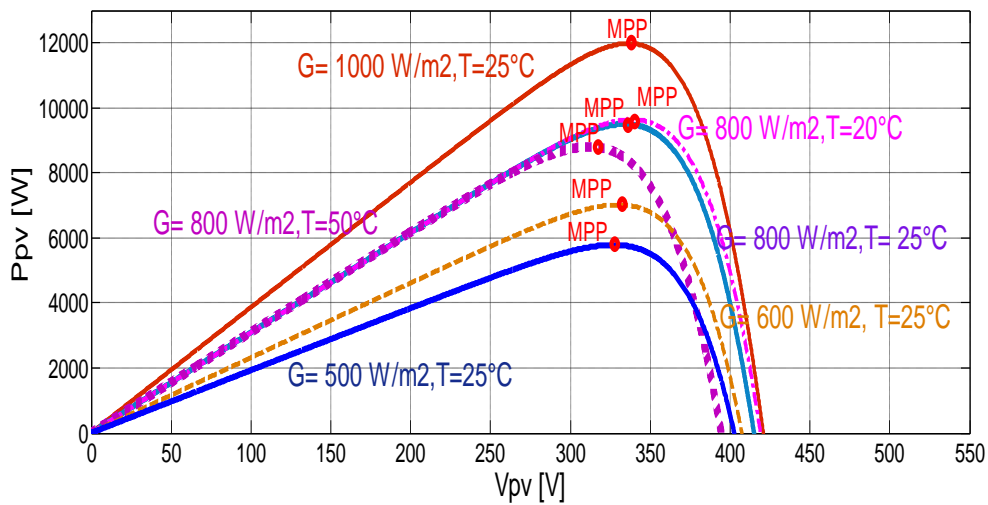
الشكل (11) محاكاة النظام مع المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور في بيئة Matlab/Simulink



الشكل (12) محاكاة النظام مع متحكم MPPT-P&O التقليدي المطور في بيئة Matlab/Simulink

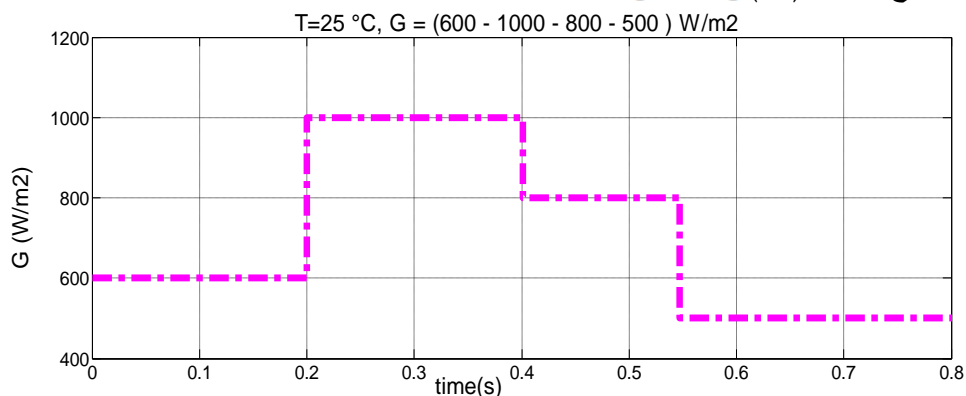
النتائج والمناقشة

باستخدام نموذج نظام PV الموضح بالشكل (2)، يمكن الحصول على منحنى الخصائص المميزة لنظام PV، والذي يوضح تغير الاستطاعة النظرية العظمى P_{MPP} لنظام PV، عند تغيرات مختلفة لشدة الإشعاع الشمسي G ودرجة حرارة الخلية الشمسية T كما هو موضح بالشكل (13). حيث يلاحظ، ازدياد الاستطاعة النظرية P_{MPP} بزيادة شدة الإشعاع الشمسي G عند ثبات درجة الحرارة T ، بينما تتناقص الاستطاعة مع زيادة T و ثبات قيمة G .



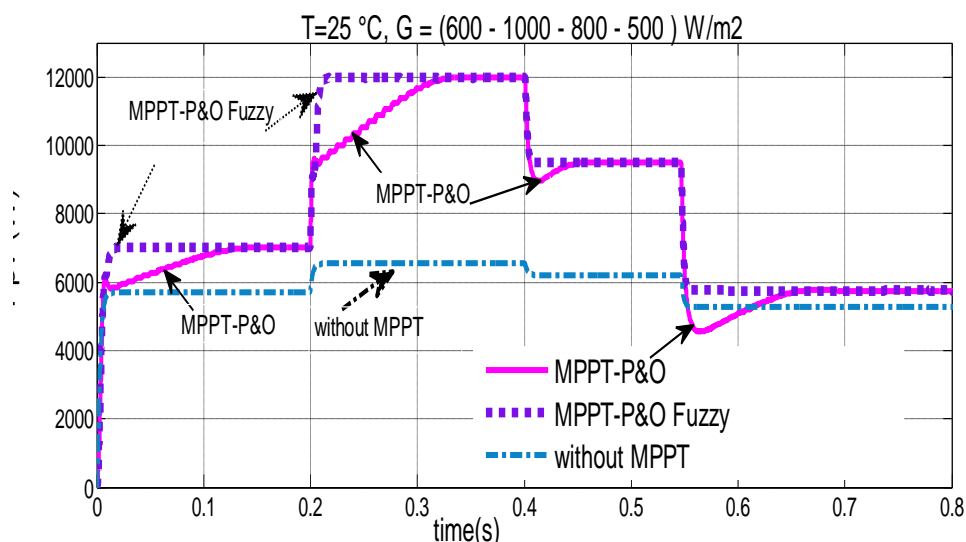
الشكل (13) منحنيات الخصائص المميزة (P-V) للنظام PV.

سنعرض فيما يلي نتائج محاكاة نظام توليد الطاقة الكهروضوئي المدروس مع المتحكم العائم MPPT- P&O Fuzzy والمتحكم التقليدي MPPT-P&O. سنعرض أولاً نتائج المحاكاة الناتجة عند ثبات درجة حرارة الخلية الشمسية $T = 25 [^{\circ}\text{C}]$ ، وعند تغيرات مختلفة لسويات شدة الإشعاع الشمسي، والتي تمثل تغيرات سريعة وفجائية كما هو موضح بالشكل (14): $G = 600 - 1000 - 800 - 500 [W/m^2]$.



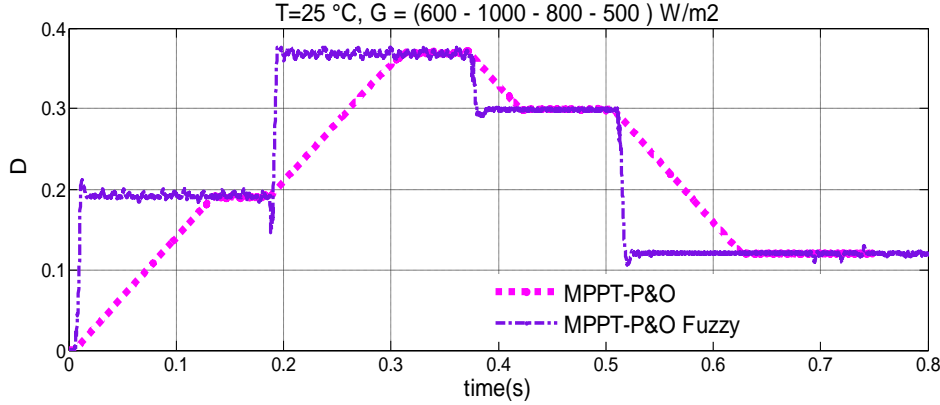
الشكل (14) تغيرات شدة الإشعاع الشمسي.

يوضح الشكل (15)، تغير استطاعة خرج نظام PV تبعاً لتغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة. حيث تتقارب منحنيات الاستطاعة عند الحالة المستقرة الثابتة بوجود كل من المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy والمتحكم التقليدي MPPT-P&O، إلى قيمة الاستطاعة النظرية العظمى P_{mpp} الموافقة لقيم G المختلفة، أما عند الوصل المباشر للنظام PV مع الحمل أي عند عدم استخدام متحكم MPPT (Without MPPT) يستقر منحنى الاستطاعة عند قيم استطاعة أقل بكثير مقارنة مع حالة استخدام كل من متحكمات MPPT-P&O و Fuzzy .



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

من جهة أخرى، يظهر المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy تحقيق سلوك حالة عابرة أفضل لنظام PV في تتبع نقطة MPP، حيث يلاحظ سرعة عالية في الوصول لقيمة MPP الجديدة عند التغيرات الجوية الفجائية السريعة الموافقة للانتقال من شروط سوية إشعاع شمسي إلى أخرى، مقارنة مع المتحكم MPPT-P&O.



الشكل (16) تغير نسبة التشغيل D عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.

يفسر الأداء الأفضل للمتحكم العائم المطور، إلى نتيجة مفادها أن قيمة تغير نسبة التشغيل ذات قيمة متغيرة VSS في حالة المتحكم العائم، مما يمكن من تغير قيمة نسبة التشغيل بسرعة كبيرة لملاحقة التغيرات الجوية السريعة والمفاجئة مقارنة مع في حالة استخدام متحكم MPPT-P&O. حيث تعتبر تغير نسبة التشغيل متغيرة بخطوة ثابتة FSS. كما هو موضح بالشكل (16)، الذي يبين التغيرات السريعة في قيمة نسبة التشغيل، خرج المتحكم العائم وذلك استجابة للتغيرات السريعة في تغير سويات شدة الإشعاع الشمسي مقارنة مع MPPT-P&O.

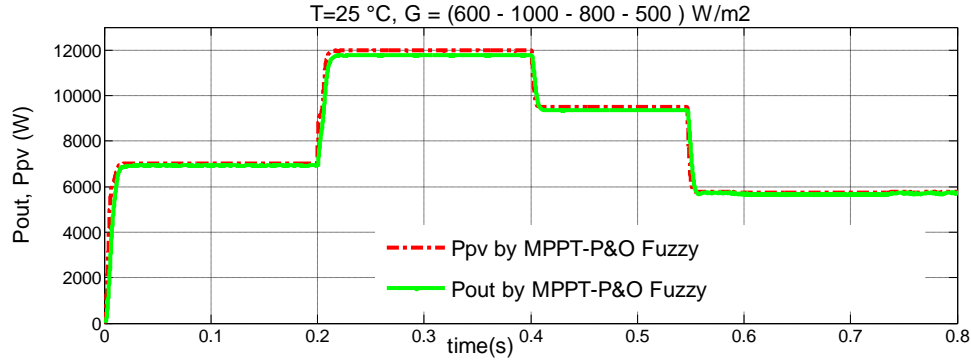
الجدول (2) عامل كفاءة نظام PV الناتج عند الحالة المستقرة مع متحكم MPPT-P&O Fuzzy

MPPT-P&O، و بدون متحكم MPPT عند سويات مختلفة للإشعاع الشمسي

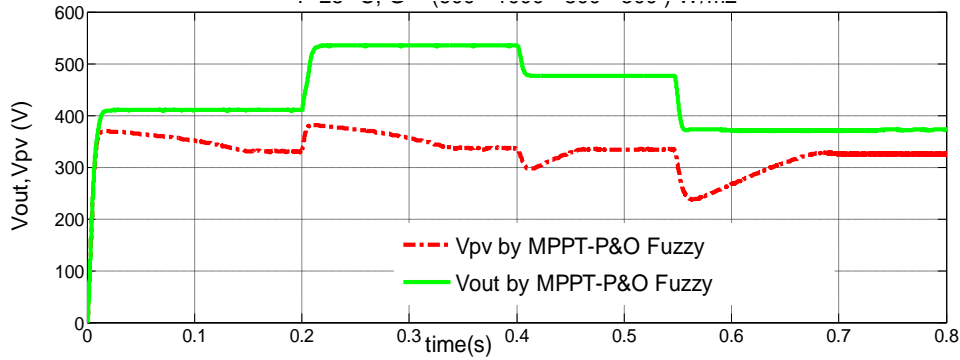
شدة الإشعاع الشمسي [W/m ²]	η_{pv} MPPT-P&O Fuzzy	η_{pv} MPPT-P&O	η_{pv} Without MPPT
1000	0.9995	0.9994	0.5448
800	0.9998	0.9996	0.6534
600	0.9998	0.9985	0.8102
500	0.9998	0.9903	0.9099

يمكن تقييم فعالية كل من المتحكمات العائم والتقليدي، بالاعتماد على قيم عامل الكفاءة η_{pv} للنظام PV، الناتج بقسمة استطاعة خرج نظام PV الناتجة عند الحالة المستقرة الثابتة (P_{pv} المحددة من الشكل (15)) على الاستطاعة النظرية العظمى P_{MPP} الناتجة عند نفس الشروط الجوية. فمن الجدول (2) نلاحظ أنه عند شدة إشعاع شمسي مختلفة، تظهر كل من المتحكمات MPPT-P&O و MPPT-P&O Fuzzy فعالية كبيرة في تحسين كفاءة

نظام PV مقارنة مع حالة عدم استخدام متحكم MPPT. كما يلاحظ أن النظام PV يمتلك عامل كفاءة أعلى باستخدام متحكم MPPT-P&O Fuzzy مقارنة مع المتحكم التقليدي MPPT-P&O.

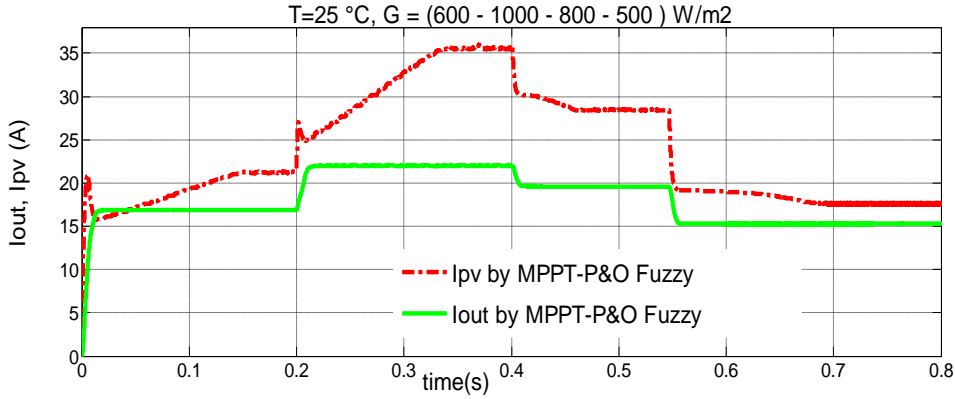


الشكل (17) استطاعة خرج الحمل P_{out} و خرج نظام PV P_{pv} عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.



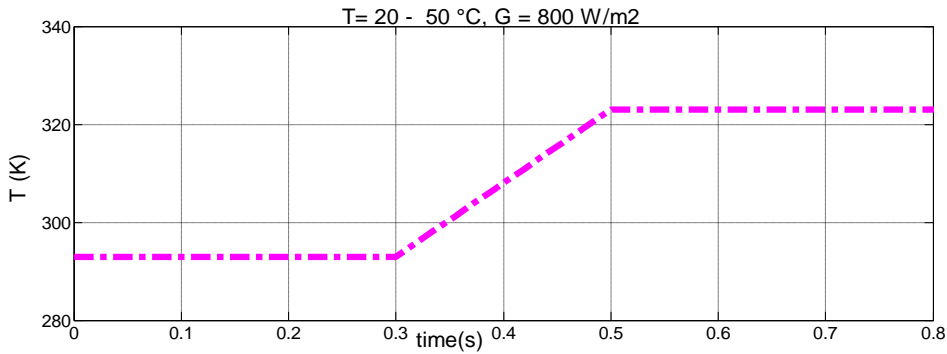
الشكل (18) توتر خرج الحمل V_{out} و خرج نظام PV V_{pv} عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.

يوضح الشكل (17)، مقارنة بين استطاعة خرج الحمل P_{out} و استطاعة خرج نظام PV، عند تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة، باستخدام المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy. حيث يلاحظ أن الاستطاعة P_{out} هي أقل بقليل من P_{pv} ، وذلك نتيجة الضياعات الناتجة في مبدل الجهد. أما الشكل (18)، يبين أن V_{out} توتر خرج الحمل أكبر من V_{pv} توتر خرج النظام PV، بينما يظهر في الشكل (19)، أن I_{out} تيار خرج الحمل أقل من I_{pv} وذلك يفسر بكون المبدل المستخدم رافع للجهد مما يؤدي بدوره إلى انخفاض قيم التيار عند خرج المبدل مع ازدياد قيم التوتر.



الشكل (19) تيار خرج الحمل I_{out} و خرج نظام PV I_{pv} عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة ثابتة.

الآن سنعرض وسناقش نتائج محاكاة الحالة الثابتة، حيث سنعتبر تغيرات لدرجة حرارة الخلية الشمسية من $T = 20[^\circ\text{C}]$ حتى الدرجة $T = 50[^\circ\text{C}]$ ، كما هو موضح بالشكل (20) والذي يوضح تغيرات درجة الحرارة بالكلفن، مع افتراض شدة إشعاع شمسي ثابتة $G = 800 [W/m^2]$ ،



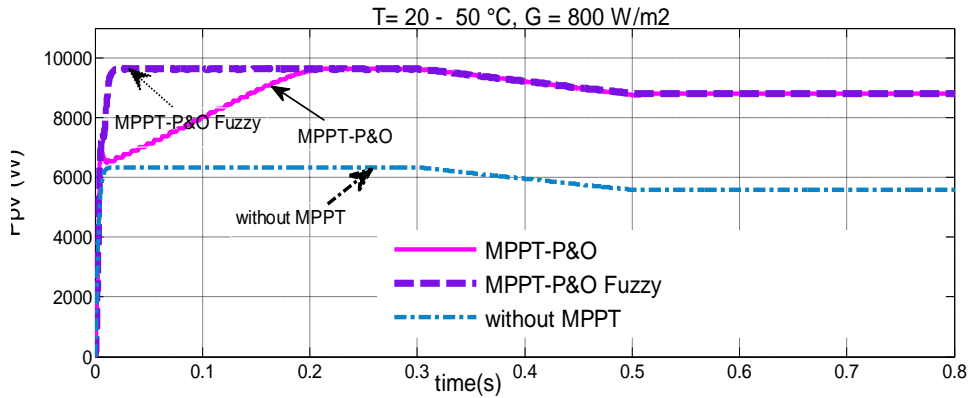
الشكل (20) تغيرات درجة الحرارة.

يوضح الشكل (21)، تغير استطاعة خرج نظام PV مع تغير درجة الحرارة. حيث يلاحظ زيادة استطاعة نظام PV عند استخدام كل من متحكمات MPPT-P&O Fuzzy و MPPT-P&O، مقارنة مع حالة عدم استخدام متحكم MPPT (Without MPPT). حيث تتقارب منحنيات الاستطاعة للنظام إلى قيمة الاستطاعة النظرية العظمى P_{mpp} الموافقة لقيم T المختلفة، كما يلاحظ انخفاض استطاعة النظام مع زيادة درجة الحرارة. من جهة أخرى، يحقق المتحكم MPPT-P&O Fuzzy أداءً ديناميكيًا أفضل، حيث يتقارب منحنى الاستطاعة بزمن أقل بكثير نحو قيم P_{mpp} الموافقة لقيم T المختلفة، مقارنة مع حالة المتحكم MPPT-P&O. يوضح الشكل (22)، سرعة استجابة المتحكم MPPT-P&O Fuzzy للتغيرات في درجة الحرارة للوصول بسرعة عالية نحو قيم نسبة التشغيل الأمثل D_{mpp} ، مقارنة مع المتحكم MPPT-P&O.

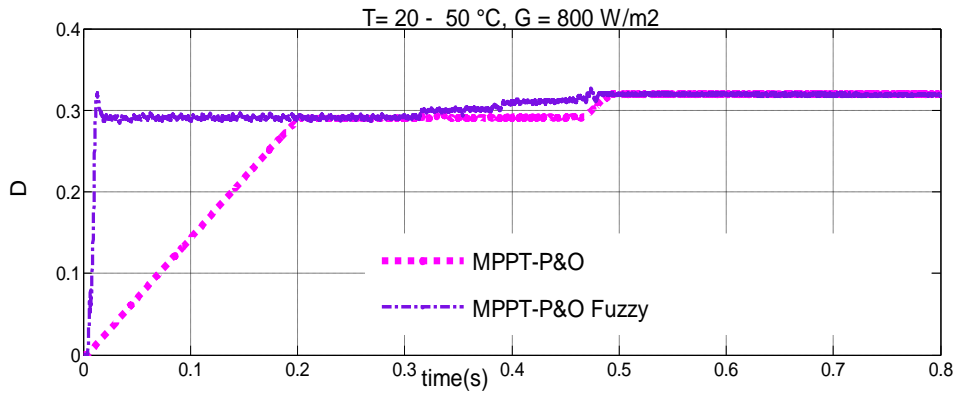
يتضمن الجدول (3)، η_{PV} عامل كفاءة نظام PV، الناتج عند الشروط الثابتة $G = 800 [W/m^2]$ و $T = 20[^\circ\text{C}]$ ، و عند الشروط $G = 800 [W/m^2]$ و $T = 50[^\circ\text{C}]$ ، بمقارنة نتائج الجدول (3)، يلاحظ حيث أن النظام PV، يمتلك عامل كفاءة أكبر باستخدام متحكم MPPT-P&O Fuzzy.

الجدول (3) عامل كفاءة نظام PV الناتج عند الحالة المستقرة مع متحكم MPPT-P&O Fuzzy و بدون متحكم MPPT عند $G = 800 [W/m^2]$ و عند تغير درجة الحرارة.

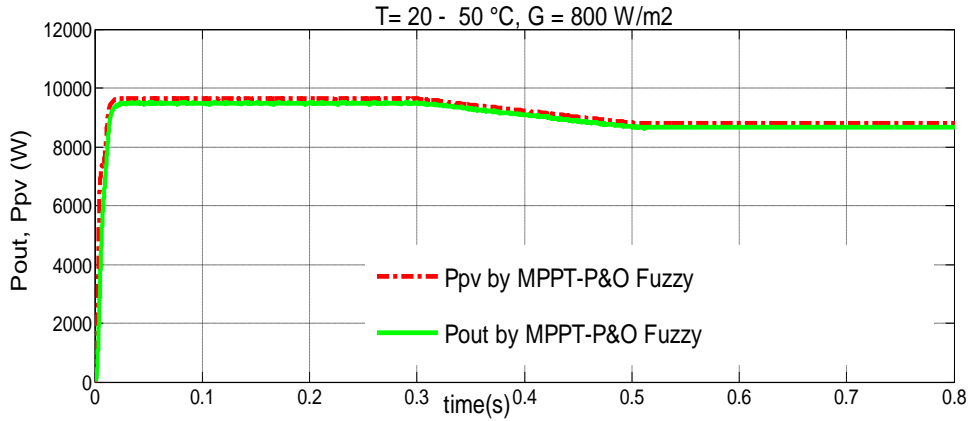
درجة الحرارة [°C]	η_{pv} MPPT-P&O Fuzzy	η_{pv} MPPT-P&O	η_{pv} Without MPPT
20	0.9996	0.9993	0.6569
50	0.9995	0.9993	0.6322



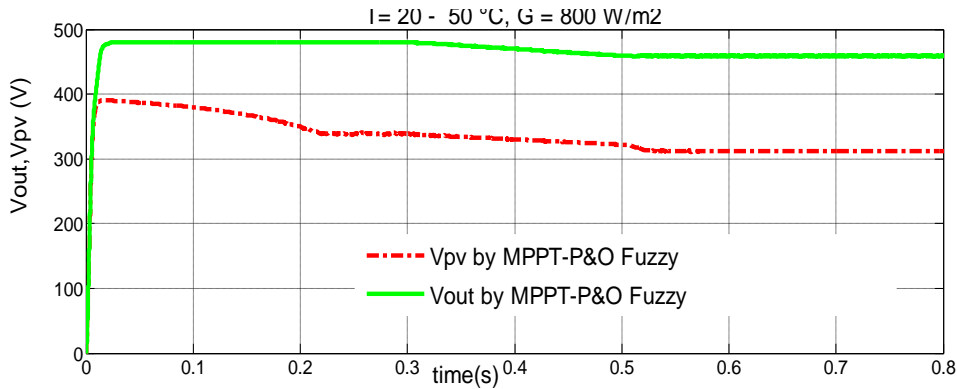
الشكل (21) استطاعة خرج نظام PV عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.



الشكل (22) تغير نسبة التشغيل D عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.



الشكل (23) استطاعة خرج الحمل P_{out} و خرج نظام PV P_{pv} عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.



الشكل (24) توتر خرج الحمل V_{out} و خرج نظام PV V_{pv} عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.

من الشكل (23)، يمكن ملاحظة أن P_{out} هي أقل بقليل من P_{pv} ، وذلك نتيجة الضياعات الناتجة في مبدل الجهد. كما يظهر الشكل (24)، فعالية مبدل الجهد في رفع توتر V_{pv} إلى توتر V_{out} بالاعتماد على قيم نسبة تشغيل D التي هي خرج المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy.

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم في هذا البحث التركيز على تطوير متحكم عائم MPPT-P&O Fuzzy لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى MPP لنظم القدرة الشمسية الكهروضوئية في بيئة Matlab/Simulink. كما تم اختبار فعالية وأداء المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور، مقارنة مع المتحكم التقليدي MPPT-P&O، عند تعرض النظام الكهروضوئي لتغيرات جوية سريعة وفجائية. بناء على ذلك تم الوصول إلى الاستنتاجات التالية:
- حقق المتحكم العائم MPPT-P&O Fuzzy المطور في البحث، عامل كفاءة أفضل لنظام PV ودقة عالية في الوصول لنقطة MPP مقارنة مع المتحكم MPPT-P&O.
- أظهر المتحكم MPPT-P&O Fuzzy، دقة فائقة في تحديد قيم نسبة التشغيل المثلى المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل رافع للجهد المستمر بما يحقق عمل نظام PV عند MPPs الموافقة للتغيرات الجوية.

• يتسم تصميم المتحكم MPPT-P&O Fuzzy المطور، بالبساطة والسهولة لأن بناء قواعد الأساس للمتحكم يحقق شروط عمل خوارزمية تقنية P&O، كما أنه يحسن من أداء تقنية P&O بتحقيق أداء ديناميكي أفضل، يتجلى هذا الأداء بسرعة تقارب عالية نحو نقطة MPP عند التغيرات الجوية الفجائية السريعة.

• الأداء الأفضل للمتحكم القائم، يعود لأن خطوة تغير نسبة التشغيل ذات قيمة متغيرة VSS ومتعلقة بشكل مباشر بقيمة ونوع إشارة تغيرات الاستطاعة ΔP والتوتر ΔV للنظام الكهروضوئي. بينما في حالة المتحكم MPPT-P&O، تعتبر نسبة التشغيل منغيرة بخطوة ثابتة FSS ومتعلقة فقط بنوع إشارة تغيرات كل من ΔP و ΔV مما نتج عنه انخفاض أداء المتحكم MPPT-P&O مقارنة مع المتحكم المطور في البحث.

• أوضحت نتائج المحاكاة صحة ودقة تصميم المتحكم المطور MPPT-P&O Fuzzy. حيث توافقت استجابة النظام الكهروضوئي مع الاستجابة المرغوبة المتوقعة باستخدام المتحكم MPPT-P&O Fuzzy عند كل التغيرات الجوية من شدة إشعاع شمسي ودرجة حرارة.

يمكن استكمال العمل باستخدام تقنيات تحكم متقدمة أخرى كالتحكم باستخدام الشبكات العصبونية والخوارزميات الجينية، ومقارنة نتائج هذه التقنيات مع التقنيات المستخدمة في هذا البحث.

المراجع:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] MAKHLOUFI, T.; KHIREDDINE, S.; ABDESSEMED, Y.; BOUTARFA, A. *Tracking Power Photovoltaic System using Artificial Neural Network Control Strategy*. Intelligent Systems and Applications 12, 2014, 17-26.
- [5] PATIL, R.; ATAR, K. D.; POTDAR, A.; MUDHOLKAR, R. *Embedded Fuzzy Module for Battery Charge Control*. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering 2, 2013, 4072- 4078.
- [6] TKOUTI, N.; MOUSSI, A. *Maximum Power Point Tracker using Genetic Fuzzy Controller for Photovoltaic Grid connected Array*. Revue Courrier du Savoir 24, 2015, 65-70.
- [7] 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.