Development of a New Model for Cascade Fuzzy Logic Controller Based on DC-DC Boost Converter to Track the Maximum Power Point of Photovoltaic Energy Systems

Dr. Imane Dilaneh*

(Received 12 / 3 / 2019. Accepted 3 / 2 / 2020)

□ ABSTRACT □

The research presents a new model of a Cascade Fuzzy Logic Controller (CFLC) to track the Maximum Power Point Tracker (MPPT) for photovoltaic solar PV systems. The MPPT-CFLC controller proposed to track the MPP, is achieved in two consecutive stages. In the first stage, the optimum operating voltage (VMPP) is evaluated using the VMPP Fuzzy Logic Estimator (VMPP-FLE). In the second stage, the duty cycle (D), which is used to control the DC-DC Boost Converter switching cycle, is determined using a DMPP-FLC controller. The error resulting from the comparison of the output voltage of VMPP-FLE and of the PV system, and the resulting error change are the input variables of the DMPP-FLC, which is used to determine the DMPP. Thus, the efficiency of the performance of the proposed Cascade controller model depends on the efficiency of the VMPP-FLE model in assessing the value of VMPP at different atmospheric variations and on the efficiency of the DMPP-FLC Controller in determining the optimum operating rate. Thus, this special structure of the MPPT-CFLC controller resulting from the cascade connection of the two models VMPP-FLE and DMPP-FLC will improve the dynamic performance of the proposed controller and achieve accuracy in MPP tracking. Thus, the MPPT-CFLC model proposed in the research is a new and different model of the reference FLC models, which is based on the simulation of the work of Conventional-tracking techniques such as Perturb and Observer technique, Incremental conductance technique. The simulation results performed in the Matlab/Simulink environment demonstrated the best performance of the proposed controller by improving the dynamic and static response of the PV system compared with the use of several other Fuzzy Logic and Neuronal reference models.

Keywords: Cascade Fuzzy Logic Controller, DC-DC Boost Converter, Maximum Power Point tracker, Conventional-tracking techniques.

***Associate Professor, Department of Mechanical Power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. imanedilaneh@gmail.com**

تطوير نموذج جديد لمتحكم عائم تسلسلي مرتكز على مبدل رافع الجهد المستمر لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى لنظم الطاقة الكهروضوئية

د. إيمان ديلانة *

(تاريخ الإيداع 12 / 3 / 2019. قُبِل للنشر في 3/ 2 / 2020)

□ ملخّص □

يقدم البحث نموذج جديد لمتحكم عائم تسلسلي (Cascade Fuzzy logic Controller, CFLC) لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracker, MPPT) لنظم الطاقة الكهروضوئية PV. يتحقق عمل المتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح وفق مرحلتين متتابعتين. يتم في المرحلة الأولى، تقدير توتر التشغيل الأمثل (Voltage of Maximum Power Point, VMPP) لنظام PV باستخدام نموذج مقدر توتر نقطة MPP العائم المطور في البحث (VMPP Fuzzy logic Estimator, VMPP–FLE). أما في المرحلة الثانية، يتم تحديد قيمة نسبة التشغيل المناسبة المثلى (Duty cycle, D) الموافقة للتوترVMPP، والمستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل رافع الجهد المستمر، باستخدام نموذج لمتحكم عائم (DMPP Fuzzy logic Controller, DMPP–FLC). حيث يشكل الخطأ الناتج من مقارنة توتر التشغيل VMPP–FLE مع توتر خرج نظام PV، وتغير الخطأ الناتج متغيرات الدخل للمتحكم العائم DMPP–FLC، المستخدم لتحديد نسبة التشغيل DMPP. بالتالي، يعتمد كفاءة أداء عمل نموذج المتحكم العائم التسلسلي المقترح على كفاءة عمل نموذج مقدر التوتر العائم VMPP–FLE في تقدير قيمة VMPP عند التغيرات الجوية المختلفة، وعلى كفاءة المتحكم العائم DMPP–FLC في تحديد قيمة نسبة التشغيل الأمثل. بالتالي، هذا التركيب الخاص للمتحكم MPPT–CFLC الناتج من الربط على التسلسل للنموذجين DMPP–FLC, VMPP–FLE من شأنه تحسين الأداء الديناميكي للمتحكم العائم المقترح، ويحقق دقة في تتبع نقطة MPP. بالتالي، يعتبر نموذج المتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح في البحث، نموذج جديد ومختلف عن نماذج المتحكمات العائمة المرجعية والتي تعتمد في عملها على محاكاة عمل تقنيات التتبع التقليدية كتقنية الاضطراب والمراقبة وتقنية زيادة الناقلية. أظهرت نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink الأداء الأفضل للمتحكم المقترح، بتحسين الاستجابة الديناميكية والاستاتيكية لنظام PV مقارنة مع استخدام عدة نماذج مرجعية أخرى عائمة وعصبونية.

الكلمات المفتاحية: متحكم عائم تسلسلي، مبدل رافع الجهد المستمر، متبع نقطة الاستطاعة العظمى، تقنيات تتبع تقليدية.

* أستاذ مساعد– قسم هندسة القوى الميكانيكية –كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.
imanedilaneh@gmail.com

مقدمة:

يشهد العالم حالياً اهتماماً متزايداً بتوسيع استخدام نظم توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Photovoltaic System ,PV)، لتغطية الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية. لذلك، يتنامى الاهتمام بتحقيق الحصول على الطاقة القصوى الناتجة من هذه النظم في ظل التغيرات الجوية المختلفة. يتم تحقيق ذلك باستخدام متتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracker, MPPT). تعتمد كفاءة تقنيات تتبع نقطة MPP (Maximum Power Point, MPP) بشكل أساسي على الدقة والسرعة في تتبع نقطة MPP. في هذا السياق، تعتبر نماذج متتبع نقطة MPP المطورة باستخدام تقنيات الذكاء الصنعي كالشبكات العصبونية الصنعية (Artificial Neural Networks, ANN) والمنطق العائم(Fuzzy Logic, FL) ، ذات كفاءة وأداء أفضل مقارنة مع تلك المعتمدة عبلى استخدام التقنيات التقليدية [1]،كتقنية الاضطراب والمراقبة (Perturb and Observer, P&O) وتقنية زيادة الناقلية (Incremental conductance, INC)والتي تعتمد منهج البحث التدريجي وبخطوة ثابتة عن نقطة MPP، مما يسبب البطء في عملية تتبع نقطة MPP وعدم الدقة في تحديدها وخاصة عند التغيرات الجوية السريعة[2]. يحد من توسع استخدام الشبكات العصبونية ضرورة الاعتماد على نماذج رياضية أو تجريبية للحصول على قاعدة البيانات المستخدمة لبناء نموذج المتتبع العصبوني MPPT–ANN. في حين، طورت نماذج متنوعة للمتحكمات العائمة (Fuzzy Logic Controller, FLC) لتتبع نقطة MPP، تعتمد في تصميمها على خبرة وفهم المصمم للعلاقة الرابطة بين تغيرات دخل وخرج المتحكم العائم. كما تحاكي المتحكمات العائمة MPPT–FLC في عملها تقنيات التتبع التقليدية الشهيرة P&O وINC، والتي تستخدم القياسات اللحظية لخرج نظام PV، كالتوتر والتيار لتحديد نسبة التشغيل المستخدمة لضبط دورة عمل مبدل الجهد. ولكن تمتاز نماذج المتحكمات MPPT–FLC المطورة بأنها ذات كفاءة وأداء أفضل لكونها تعمل على التحكم بمقدار تغير خطوة التشغيل بشكل يتناسب مع التغيرات اللحظية للتوتر والتيار لخرج نظام PV والناتجة عند التغيرات الجوية[5,4,3]، مما يحسن دقة وسرعة تتبع نقطة MPP . في الدراسة [6]، تم تطوير نموذج لمتحكم عائم MPPT– P&O –FLC يحاكي في عمله تقنية P&O، حيث تستخدم كل من تغيرات التياروتغيرات الاستطاعة كمتغيرات دخل للمتحكم، وبناء على العلاقة بين هذه التغيرات يتم تحديد خرج المتحكم الممثل لتغير التوتر المرجعي المستخدمة لضبط توتر خرج النظام PV عند التوتر المرجعي، أظهرت نتائج المحاكاة تحسين سرعة تتبع نقطة MPP، وتخفيض تذبذبات الحالة الثابتة، باستخدام المتحكم المطور MPPT– P&O –FLC مقارنة مع استخدام تقنية P&O التقليدية. تم تطوير نموذج أخر لمتحكم MPPT– P&O –FLC في الدراسة [7]، يستخدم نسبة تغير كل من الاستطاعة والتوتر، وتغير هذه النسبة كمتغيرات دخل للمتحكم لتحديد نسبة خطوة التشغيل المناسبة، أظهرت نتائج هذه الدراسة، تفوق أداء المتحكم المقترح على أداء كل من تقنية P&O و INC. في الدراسة [8]، تم تطوير نموذج جديد لمتحكم عائم MPPT– INC–FLC يحاكي تقنية INC، حيث تم استخدام القيم اللحظية للتوتر والتيار وتغيرات هذه القيم لتشكيل متغيرات دخل المتحكم، والتي تم استخدامها لتحديد تغير خطوة التشغيل، أظهرت نتائج المحاكاة تحسن كفاءة نظام PV باستخدام المتحكم المطور مقارنة مع استخدام تقنية INC.

أهمية البحث وأهدافه:

يقدم البحث نموذج جديد لمتحكم عائم تسلسلي (Cascade Fuzzy logic Controller, CFLC) لتتبع نقطة MPP لنظم الطاقة الكهروضوئية PV. يتحقق عمل المتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح لتتبع نقطة

MPP وفق مرحلتين متتابعتين. يتم في المرحلة الأولى، تقدير توتر التشغيل الأمثل VMPP لنظام PV باستخدام نموذج مقدر توتر نقطة MPP العائم المطور في البحث (VMPP Fuzzy logic Estimator, VMPP−FLE). أما في المرحلة الثانية، يتم تحديد قيمة نسبة التشغيل المناسبة DMPP (Duty cycle, D) الموافقة للتوترVMPP، والمستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل رافع الجهد المستمر، باستخدام نموذج لمتحكم عائم DMPP−FLC . حيث يشكل الخطأ الناتج من مقارنة توتر التشغيل VMPP−FLE مع توتر خرج نظام PV، وتغير الخطأ الناتج متغيرات الدخل للمتحكم العائم DMPP−FLC، المستخدم لتحديد نسبة التشغيل DMPP. بالتالي، يعتمد كفاءة أداء عمل نموذج المتحكم العائم التسلسلي MPPT−CFLC المقترح على كفاءة عمل نموذج مقدر التوتر العائم VMPP−FLE في تقدير قيمة VMPP عند التغيرات الجوية المختلفة، وعلى كفاءة المتحكم العائم DMPP−FLC في تحديد قيمة نسبة التشغيل الأمثل. بالتالي، هذا التركيب الخاص للمتحكم الناتج من الربط على التسلسل للنموذجين VMPP−FLE, DMPP−FLC من شأنه تحسين الاستجابة الديناميكية والاستاتيكية لنظام PV. يعتبر نموذج المتحكم العائم التسلسلي MPPT−CFLC المقترح في البحث، نموذج جديد ومختلف عن نماذج المتحكمات العائمة والتي تعتمد في عملها على محاكاة عمل تقنيات التتبع التقليدية P&O وINC.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد تصميم نموذج المتحكم العائم التسلسلي المقترح، على تطبيق العمليات الأساسية المعروفة في المنطق العائم باستخدام مكتبة Fuzzy Logic Toolbox الموجودة في بيئة Matlab. كما يعتمد تقييم أداء المتحكم على تحليل ومقارنة نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink عند تتبع نقطة MPP لنظام PV باستخدام المتحكم المقترح، مقارنة مع استخدام عدة متحكمات عائمة مرجعية.

1− موذج الرياضي للنظام الكهروضوئي PV:

تحدد الخصائص الكهربائية (تيار − توتر) لنظام PV المكون من N_s عدد من الخلايا الشمسية الموصولة على التسلسل، بالاعتماد على العلاقات التالية:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_O\left(e^{\left(\frac{V_{PV}+R_s*I_{PV}}{V_t a}\right)} - 1\right) - \frac{V_{PV} + R_s * I_{PV}}{R_p} \quad (1)$$

$$I_{Ph} = (I_{Ph,N} + K_I \Delta T)\frac{G}{G_N} \quad (2)$$

$$I_O = \frac{(I_{SC,n} + K_I \Delta T)}{e^{\left(\frac{V_{OC,n}+K_V \Delta T}{V_t a}\right)} - 1} \quad (3)$$

يمثل I_{PV} و V_{PV} تيار وتوتر خرج نظام PV على التوالي، حيث يقاس التيار بالأمبير [A] والتوتر بالفولت [V]. كما يمثل $I_{Ph}[A]$ التيار الضوئي المتولد ، $I_{Ph,N}[A]$ التيار الضوئي المتولد عند الشروط القياسية الموافقة لشدة إشعاع شمسي $G_N = 1000[\mathrm{W/m^2}]$ ودرجة حرارة الخلية الشمسية $T_N = 25[°\mathrm{C}]$. يمثل $I_O[\mathrm{A}]$ تيار الإشباع العكسي، $V_t = kTN_s/q$ الجهد الحراري ، a ثابت يمثل عامل مثالية الديود. k ثابت بولتزمان، q شحنة الالكترون. كما تمثل R_s والمقاومة التسلسلية و R_P المقاومة التفرعية وتقاس بالأوم. يمثل $I_{SC,n}$ و $V_{OC,n}$ تيار القصر وتوتر الدارة المفتوحة المحددين عند الشروط القياسية النظامية المذكورة. يمثل $\mathrm{G[W/m^2]}$ شدة الإشعاع الشمسي و $\mathrm{T}[°\mathrm{C}]$ درجة حرارة الخلية الشمسية، K_I المعامل الحراري للتيار و K_V المعامل الحراري للجهد.

لتحقيق عمل المتحكم MPPT في تتبع نقطة MPP للنظام PV نستخدم مبدل رافع الجهد المستمر، حيث تمثل متغيرات الدخل للمبدل الممثلة للتيار Ipv[A] ، وللتوتر Vpv[V] لخرج النظام PV، مع متغيرات خرج المبدل الممثلة لتيار الحمل Iout[A] ولتوتر الحمل Vout[V]، ترتبط هذه المتغيرات بالعلاقات التالية:

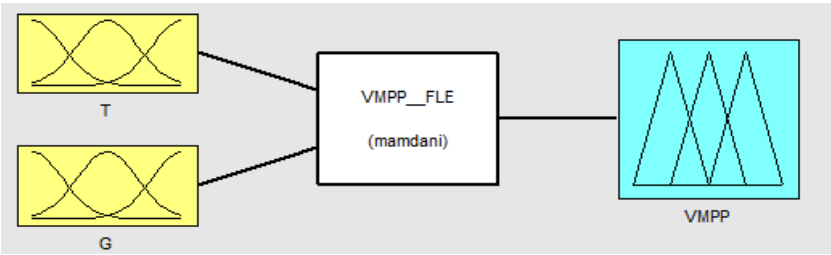
$$D = 1 - \frac{Vpv}{Vout} \quad (4)$$

$$Iout = (1 - D) * Ipv \quad (5)$$

D: عدد لا بعدي تتراوح قيمته بين الصفر والواحد، وتساوي لنسبة الزمن الذي يكون الترانزستور فيه مغلقاً إلى زمن الدور الكلي (المساوي مجموع زمن الإغلاق والفتح للترانزستور). حيث يستخدم تغير قيمة نسبة التشغيل D لتعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation, PWM)، المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل الجهد لضبط توضع نقطة عمل اللاقط الكهروضوئي عند نقطة MPP عند التغيرات الجوية المختلفة.

2- نمذجة مقدر توتر نقطة MPP العائم VMPP-FLE

نعمد بداية إلى بناء نموذج باستخدام المنطق العائم لتقدير قيمة VMPP الموافق لتوتر نقطة MPP الناتج عند تغيرات كل من درجة حرارة الخلية الشمسية T[°C] وشدة الإشعاع الشمسي $G[W/m^2]$. يوضح الشكل (1)، بنية نموذج VMPP-FLE المقترح في البحث.

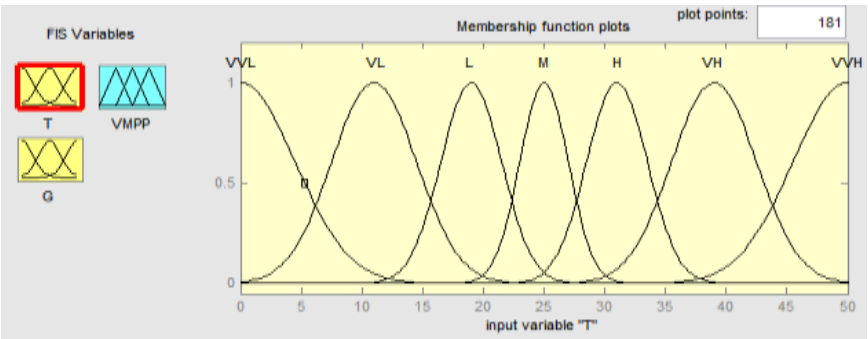


الشكل (1) النافذة الرئيسية لنموذج VMPP-FLE العائم المطور في بيئة Matlab/Simulink.

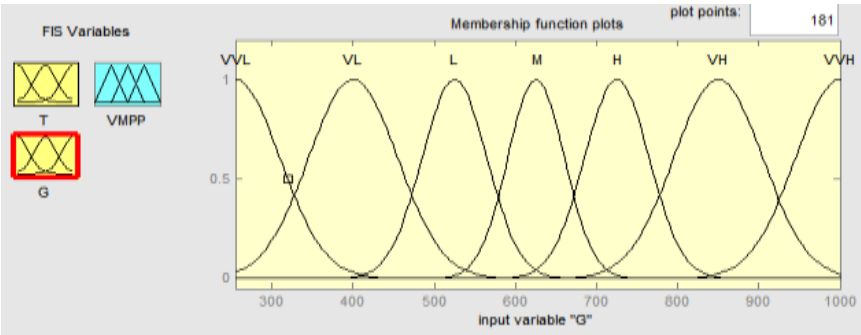
تتم عملية تعويم متغيرات دخل وخرج النموذج VMPP-FLEالمقترح، باستخدام عدة مجموعات عائمة جزئية تغطي المجال الكلي لتغير هذه المتغيرات، ممثلة بتوابع انتماء غوسية لتلائم تمثيل طبيعة التغيرات اللاخطية لهذه المتغيرات، والمعبر عنها بالمتغيرات اللغوية (Linguistic variables) المبينة في الجدول (1).

جدول (1) المتغيرات اللغوية للمجموعات العائمة لنموذج VMPP-FLE.

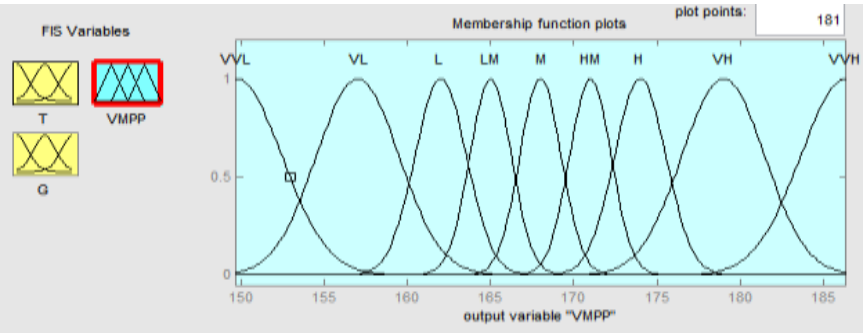
المتغيرات اللغوية		المتغيرات اللغوية	
Low	L	**Medium High**	MH
Very Low	VL	**High**	H
Very Very Low	VVL	**Very High**	VH
Medium	M	**Very Very High**	VVH
Medium Low	ML		



الشكل (2) تعويم متغير الدخل الأول لنموذج VMPP–FLE والممثل لدرجة حرارة الخلية الشمسية T.



الشكل (3) تعويم متغير الدخل الثاني لنموذج VMPP–FLE والممثل لشدة الإشعاع الشمسي G.

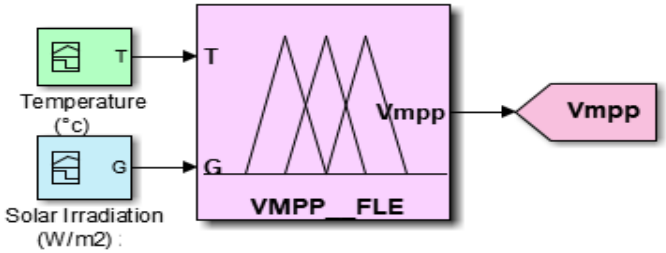


الشكل (4) تعويم متغير الخرج لنموذج VMPP–FLE والممثل للتوتر VMPP.

توضح الأشكال (2)، (3) و(4) عملية تعويم المتغيرات الممثلة لدرجة حرارة الخلية الشمسية وشدة الإشعاع الشمسي والتوتر VMPP. كما يبين الجدول (2)، مجموعة قواعد الأساس الناتجة باستخدام عبارات شرطية من نوع " IF–Then "، حيث تطبيق طريقة الاستدلال العائم Max–Min. يمكن الحصول على قيمة الخرج العددية للتوتر VMPP باستخدام طريقة مركز المساحة (Method Centroid). بالتالي يظهر الشكل (5) نموذج مقدر التوتر VMPP–FLE المقترح في البحث والمطور باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.

الجدول (2) قواعد الأساس لنموذج VMPP–FLE العائم.

درجة حرارة الخلية الشمسية T[°C]	شدة الإشعاع الشمسي G[W/m²]						
	VVL	**VL**	**L**	**M**	**H**	**VH**	**VVH**
VVL	MH	MH	H	H	VH	VVH	VVH
VL	M	M	MH	MH	H	VH	VVH
L	LM	LM	M	M	MH	H	VH
M	L	L	LM	M	MH	H	H
H	VL	L	LM	M	M	MH	MH
VH	VVL	VL	L	LM	LM	M	M
VVH	VLL	VVL	VL	L	L	LM	LM



الشكل (5) النموذج النهائي لنموذج VMPP–FLE العائم المطور باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.

3- نمذجة المتحكم العائم المقترح DMPP–FLC

نعمد الآن إلى اقتراح نموذج لمتحكم عائم DMPP–FLC يستخدم لتحديد قيمة نسبة التشغيل المناسبة DMPP الموافقة للتوتر VMPP، والمستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل رافع الجهد المستمر. لذلك نحدد بداية، الخطأ E(k) الناتج من مقارنة التوتر المرجعي الأمثل خرج نموذج لنموذج VMPP–FLE العائم، و التوتر Vpv خرج النظام PV، حيث يتم استخدام الخطأ E(k) الناتج، وتغير هذا الخطأ CE(k)، كمتغيرات دخل للمتحكم DMPP–FLC، لتحديد تغير نسبة التشغيل dD(k) المستخدمة لتحديد نسبة التشغيل اللحظية D(k)، تعرف متغيرات دخل وخرج المتحكم DMPP–FLC المقترح كما يلي:

$$E(k) = Vmpp(k) - Vpv(k) \tag{6}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \tag{7}$$

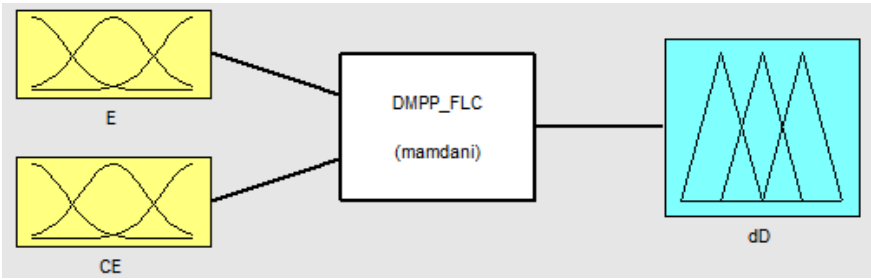
$$dD(k) = D(k) - D(k-1) \tag{8}$$

توضح الأشكال (7)، (8) و(9) عملية تعويم متغيرات دخل وخرج المتحكم DMPP–FLC المقترح، باستخدام عدة مجموعات عائمة، ممثلة بتوابع انتماء مثلثية الشكل وأخرى ذات شبه منحرف. تم اعتماد هذا النوع من توابع الانتماء لتأمين تحقيق العلاقة التناسبية بين تغير الخطأ وتغير خطوة التشغيل، وبحيث يتحقق انتقال سلس وتدريجي من مجموعة عائمة إلى أخرى، توابع الانتماء هذه معبر عنها بالمتغيرات اللغوية المبينة في الجدول (3).

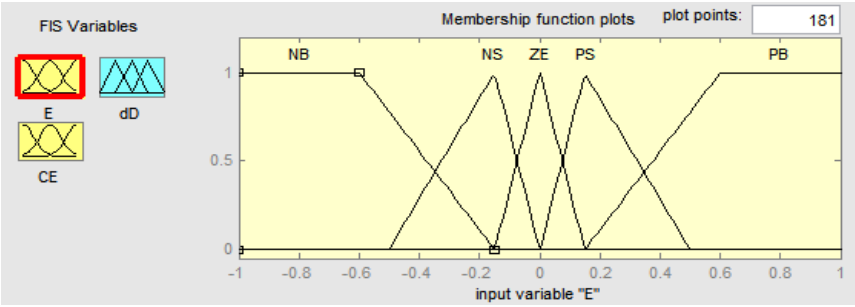
جدول (3) المتغيرات اللغوية للمجموعات العائمة لنموذج DMPP–FLC.

المتغيرات اللغوية		المتغيرات اللغوية	
Negative–Big	NB	**Positive–Small**	PS
Negative– Medium	NM	**Positive– Medium**	PM
Negative–Small	NS	**Positive–Big**	PB
Zero	Zero		

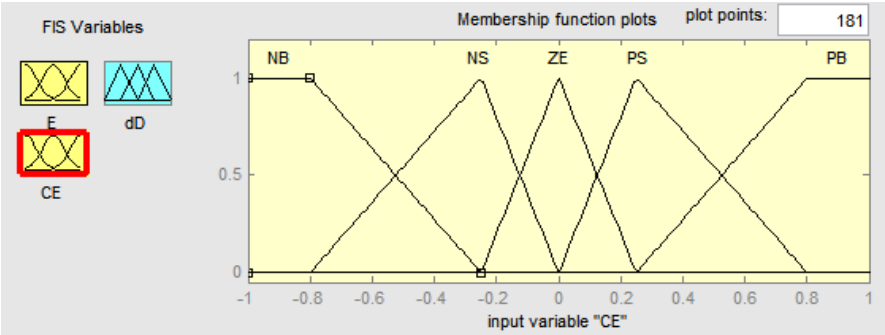
يبين الجدول (4) قواعد الأساس للمتحكم DMPP–FLC المقترح. كما يبين الشكل (10) النموذج النهائي للمتحكم DMPP–FLC المقترح، حيث تمثل K_1 و K_2 عوامل التقييس المستخدمة لضبط مجال تغير كل من E و CE ضمن المجال [−1,1].



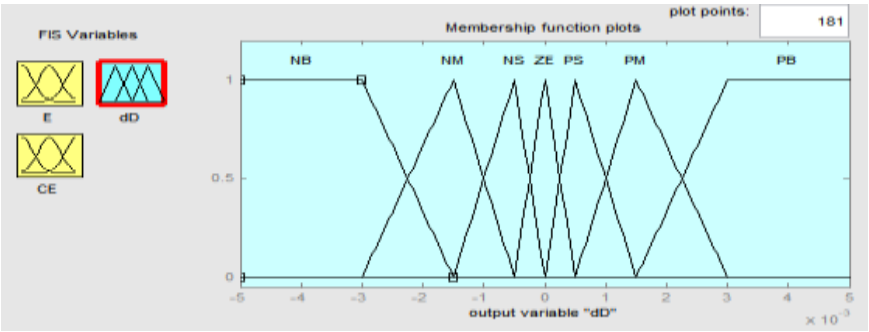
الشكل (6) النافذة الرئيسية لنموذج المتحكم DMPP–FLC المطور في بيئة Matlab/Simulink.



الشكل (7) تعويم متغير الدخل الأول للمتحكم DMPP–FLC الممثل للخطأ.



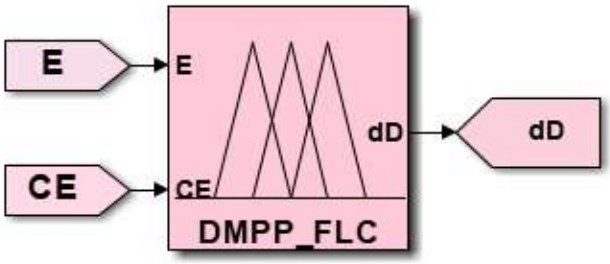
الشكل (8) تعويم متغير الدخل الثاني للمتحكم DMPP–FLC الممثل لتغير الخطأ.



الشكل (9) تعويم متغير الخرج للمتحكم DMPP–FLC الممثلة لتغير نسبة التشغيل ΔD.

الجدول (4) قواعد الأساس لنموذج المتحكم DMPP–FLC العائم.

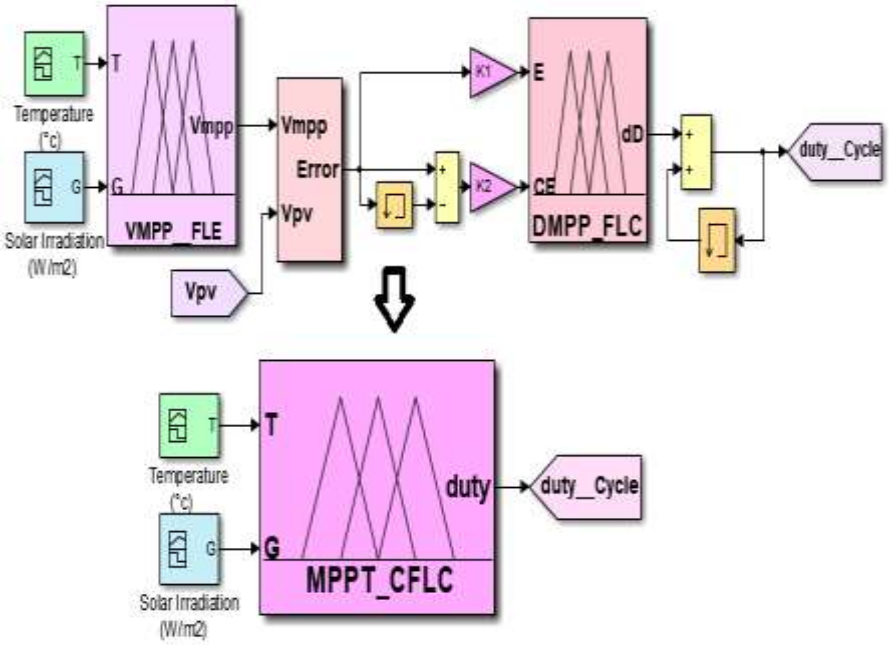
الخطأ E	تغير الخطأ CE				
	NB	**NS**	**ZE**	**PS**	**PB**
NB	PB	PB	PM	PS	ZE
NS	PB	PM	PS	ZE	NS
ZE	PM	PS	ZE	NS	NM
PS	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	ZE	NS	NM	NB	NB



الشكل (10) النموذج النهائي للمتحكم DMPP–FLC باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.

4- النموذج النهائي للمتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح

يظهر الشكل (11) النموذج النهائي للمتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح لتتبع نقطة MPP، والذي يرتبط عمله بتغيرات شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلية الشمسية، لتقدير نسبة التشغيل المثلى DMPP. ويتم تحقيق ذلك بالربط على التسلسل للنموذجين العائمين DMPP–FLC, VMPP–FLE.



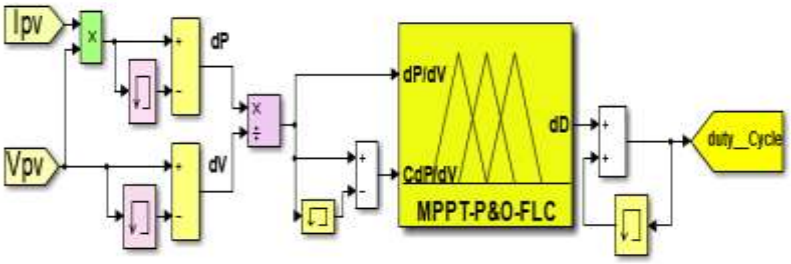
الشكل (11) النموذج النهائي للمتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح لتتبع نقطة MPP.

5– محاكاة المتحكمات المرجعية المستخدمة لتتبع نقطة MPP

استعرضنا فيما سبق محاكاة المتحكم العائم MPPT–CFLC المقترح في البحث، سنعمد الآن إلى استعراض عدد من المتحكمات المرجعية والتي سيتم استخدامها لتقييم أداء المتحكم المقترح في تتبع نقطة MPP.

5–1 محاكاة المتحكم العائم المرجعي MPPT–P&O–FLC

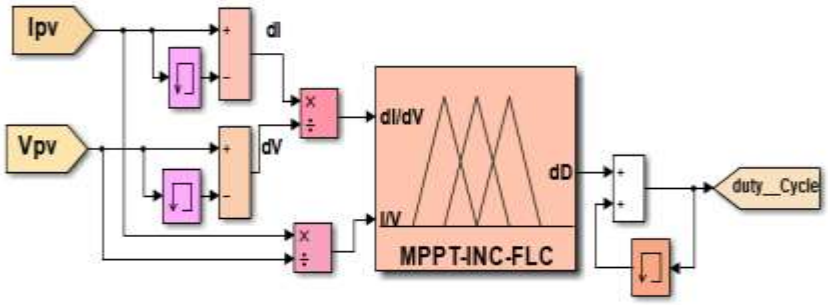
تعتمد النماذج المتنوعة للمتحكم العائم MPPT–P&O–FLC المرتكزة على تقنية الاضطراب والمراقبة P&O، بشكل أساسي على استخدام كل من تغيرات الاستطاعة ΔP وتغيرات التوتر ΔV لخرج النظام PV، لتحديد نسبة التشغيل المناسبة. يوضح الشكل (12)، محاكاة لنموذج لمتحكم MPPT–P&O–FLC مرجعي [7] يستخدم كل من نسبة ΔP و ΔV وتغير هذه النسبة كمتغيرات دخل للمتحكم لتحديد قيمة نسبة التشغيل المناسبة.



الشكل (12) محاكاة المتحكم العائم المرجعي MPPT–P&O–FLC الناتج باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.

5–2 محاكاة المتحكم العائم المرجعي MPPT– INC –FLC

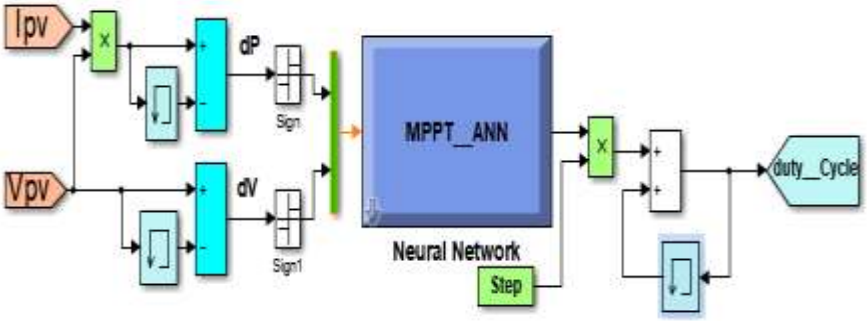
تعتبر تقنية زيادة الناقلية INC من أكثر تقنيات التقليدية دقة وسرعة غير أنها أكثر تعقيدا في التنفيذ، يبين الشكل (13) نموذج لمتحكم MPPT– INC –FLC مرجعي [8] مرتكزة على تقنية INC. يعتمد على استخدام نسبة تغيرات تيار وتوتر النظام $\frac{dI}{dV}$ ونسبة اللحظية المقاسة $\frac{I}{V}$ لخرج نظام PV، لتحديد قيمة نسبة التشغيل.



الشكل (13) محاكاة المتحكم العائم المرجعي MPPT- INC -FLC الناتج باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.

5-3 محاكاة المتحكم العصبوني المرجعي MPPT-ANN

يبين الشكل (14)، محاكاة نموذج لمتحكم MPPT-ANN مرجعي [2] يستخدم شبكة عصبونية صنعية ANN، ويحاكي هذا المتحكم عمل تقنية الاضطراب والمراقبة P&O. حيث يستخدم كمتغير دخل للشبكة ANN، نوع الإشارة الموجب أو السالب لكل من تغيرات الاستطاعة ΔP وتغيرات التوتر ΔV لخرج النظام PV، وبناء على ذلك يحدد خرج الشبكة الممثل لنوع إشارة المقدار الثابت $Step$ المستخدم لتحديد قيمة نسبة التشغيل.

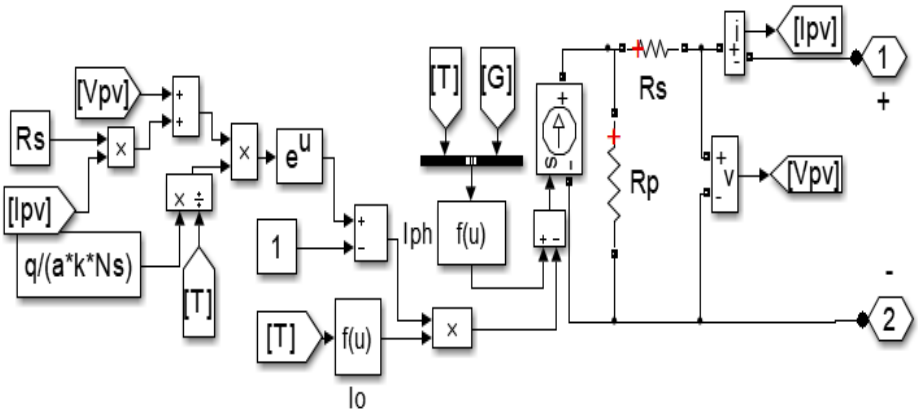


الشكل (14) محاكاة المتحكم العائم المرجعي MPPT-ANN الناتج باستخدام Neural Network Toolbox .

النتائج والمناقشة:

1- نموذج المحاكاة لنظام PV افي بيئة Matlab/Simulink

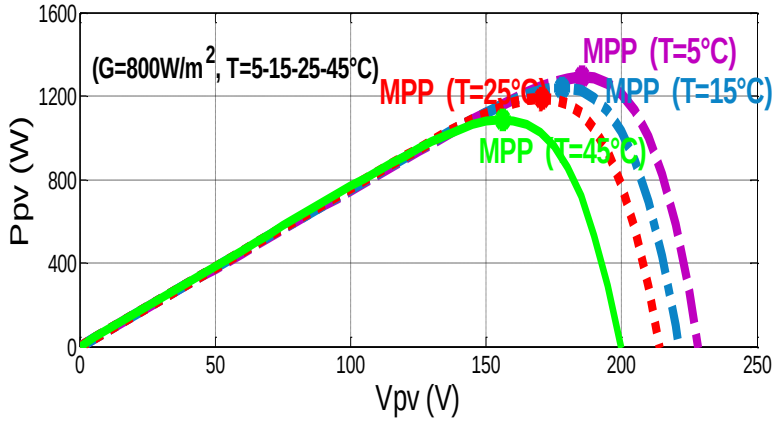
يبين الشكل (15)، نموذج المحاكاة لنظام PV الناتج في بيئة Matlab/Simulink باستخدام النموذج الرياضي للنظام PV. حيث يستخدم نموذج المحاكاة الناتج في التنبؤ بتأثير التغيرات الجوية على تغير الخصائص الكهربائية للنظام PV، كذلك يستخدم في تتبع نقطة MPP باستخدام المتحكم المقترح في البحث.



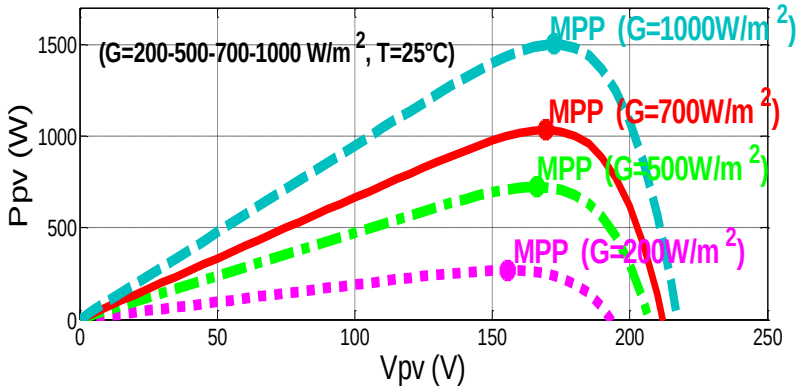
الشكل (15) نموذج المحاكاة لنظام PV الناتج في بيئة Matlab/Simulink.

2- دراسة تأثير تغيرات الظروف الجوية على الخصائص الكهربائية لنظام PV باستخدام نموذج المحاكاة المنجز للنظام

يمكننا الآن بتطبيق تغيرات مختلفة لدرجة درجة حرارة الخلية الشمسية وشدة الإشعاع الشمسي، وذلك باعتبارها متغيرات لنموذج المحاكاة لنظام PV المنجز باستخدام Simulink. وبناء عليه، يمكننا الحصول على منحنيات الخصائص المميزة (الاستطاعة–توتر) للنظام PV الموضحة في الأشكال (16) و(17).



الشكل (16) منحني الخصائص المميزة الناتج باستخدام نموذج المحاكاة المنجز لنظام PV عند ثبات درجة الحرارة.

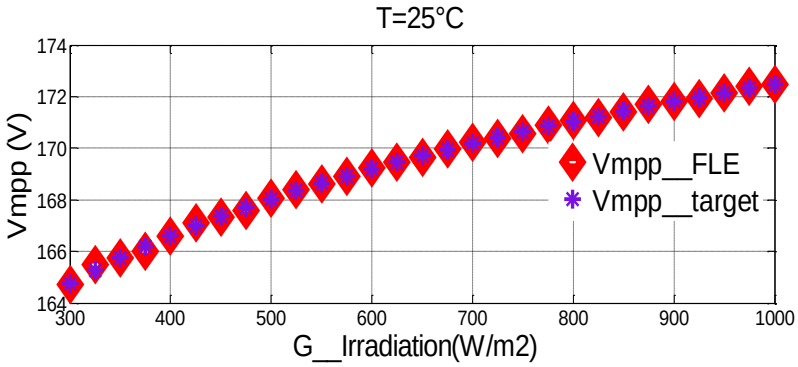


الشكل (17) منحني الخصائص المميزة الناتج باستخدام نموذج المحاكاة المنجز لنظام PV عند شدة إشعاع شمسي ثابتة.

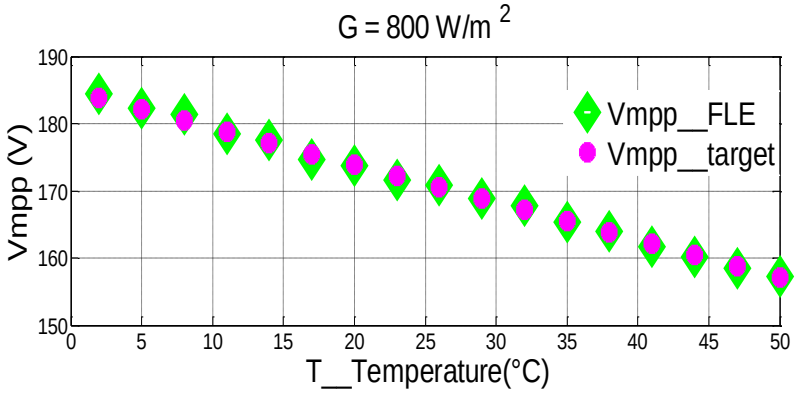
يمكننا من نتائج المحاكاة الناتجة، ملاحظة تزايد الاستطاعة العظمى P_{MPP}، وكذلك التوتر V_{MPP} الموافق لنقطة MPP مع ازدياد شدة الإشعاع الشمسي عند ثبات درجة حرارة الخلية الشمسية. بينما، تتناقص الاستطاعة P_{MPP} وكذلك التوتر V_{MPP}، مع ازدياد درجة حرارة الخلية الشمسية T عند ثبات شدة الإشعاع الشمسي. وهذا يظهر دقة نموذج المحاكاة لنظام PV في إعطاء نتائج عملية تتوافق مع تلك الناتجة في عدة دراسات مرجعية [10,9].

3- تقييم أداء نموذج VMPP-FLE العائم

يمكن التحقق من كفاءة أداء نموذج VMPP-FLE العائم، بمقارنة نتائج خرجه الممثلة للتوتر V_{MPP_FLE} مع قيم التوتر الأمثل النظرية V_{MPP_target}. حيث كما تظهر نتائج الشكل (18)، والناتجة عند تغيرات مختلفة لشدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة حرارة الخلية الشمسية $T = 25[°C]$، ونتائج الشكل (19) الناتجة عند تغيرات درجة حرارة الخلية الشمسية مع ثبات شدة الإشعاع الشمسي $G = 800\ [W/m^2]$، نلاحظ أن هناك تقارب كبير بين قيم التوتر النظرية V_{MPP_target} والمقدرة V_{MPP_FLE} عند كل من التغيرات الجوية المختلفة، مما يظهر الأداء الجيد لمقدر التوتر V_{MPP_FLE} الذي يمكن استخدامه لتتبع نقطة MPP. كما تظهر هذه النتائج تزايد قيم V_{MPP_FLE} مع ازدياد شدة الإشعاع الشمسي، وتتناقص قيم V_{MPP_FLE} مع ازدياد درجة الحرارة. وهذا يتوافق مع نتائج المحاكاة العملية الناتجة باستخدام نموذج المحاكاة المنجز لنظام PV.



الشكل (18) قيم التوتر V_{MPP_target} والمقدرة V_{MPP_FLE} الناتجة عند ثبات درجة الحرارة.

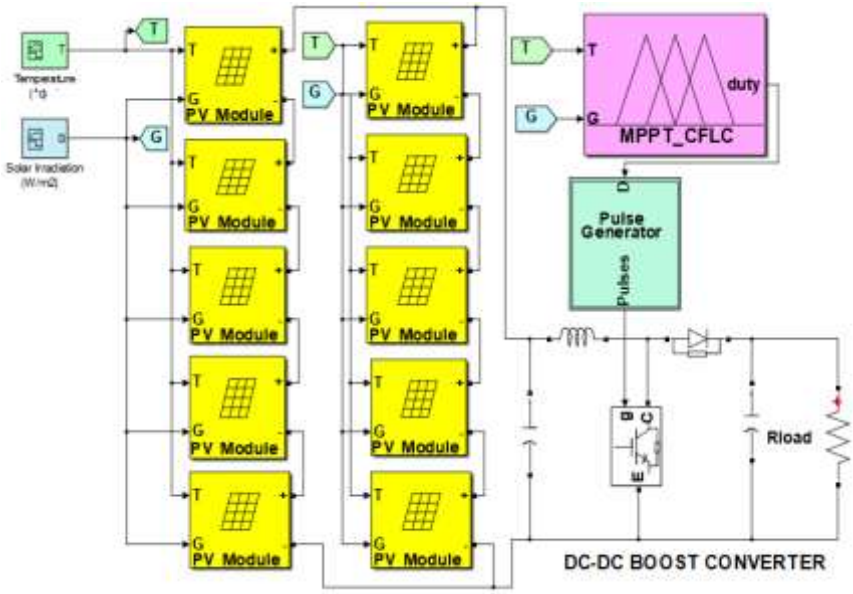


الشكل (19) قيم التوتر V_{MPP_target} والمقدرة V_{MPP_FLE} الناتجة عند شدة إشعاع شمسي ثابتة.

4 - تقييم أداء المتحكم العائم التسلسلي MPPT-CFLC المطور

يتم تقييم أداء المتحكم العائم التسلسلي MPPT-CFLC المقترح لتقدير نسبة التشغيل الأمثل المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل رافع للجهد المستمر (DC-DC Boost Converter) لتتبع نقطة MPP لنظام PV، باستخدام

نموذج المحاكاة للنظام المبين في الشكل (20). يتكون نظام PV المعتمد في البحث من سلسلتين موصولتين على التفرع، تحوي السلسلة الواحدة على خمسة ألواح كهروضوئية موصولة على التسلسل بحيث الاستطاعة الكلية لنظام تساوي [W] 1500.

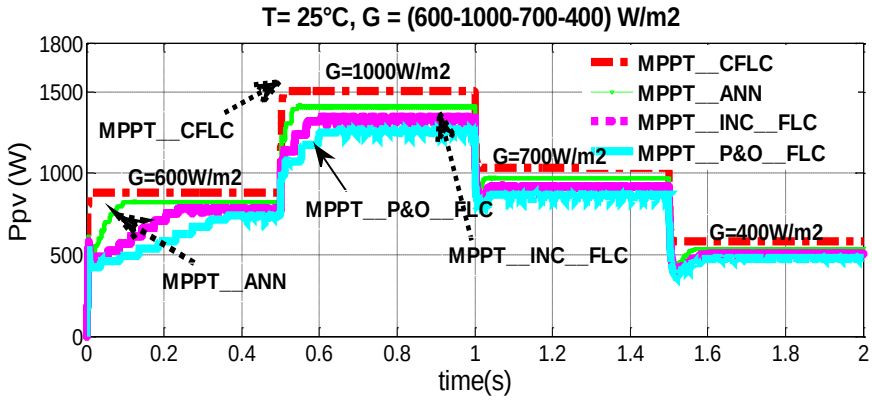


الشكل (20) نموذج نظام تتبع نقطة MPP باستخدام المتحكم MPPT–CFLC في بيئة Matlab/Simulink.

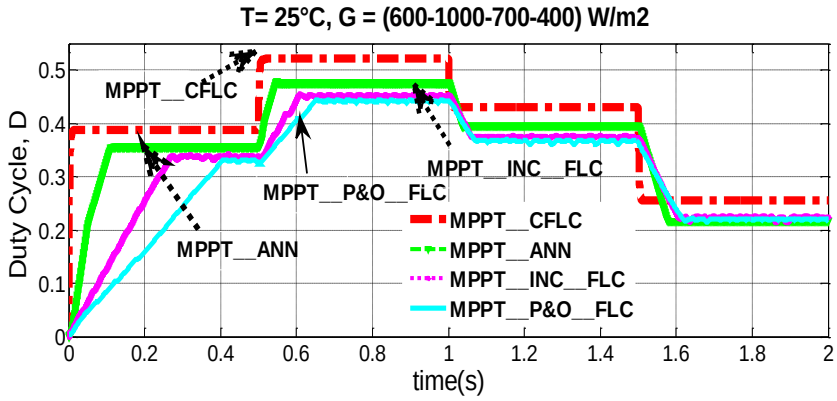
كما يعتمد تقييم أداء المتحكم المطور MPPT–CFLC على مقارنة نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink، مع تلك الناتجة باستخدام كل من المتحكمات المرجعية العائمة MPPT–P&O–FLC، MPPT– INC –FLC والمتحكم العصبوني MPPT–ANN عند الشروط الجوية المفروضة التالية :

- حالة الأولى: شدة الإشعاع الشمسي متغيرة مع ثبات درجة الحرارة، نفرض تغيرات فجائية سريعة لشدة الإشعاع الشمسي (Irradiance, G): $G = 600 - 1000 - 700 - 400[W/m^2]$، درجة حرارة الخلية الشمسية ثابتة $T = 25[°C]$.
- حالة ثانية: تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة، حيث نفرض تغيرات لدرجة حرارة الخلية الشمسية $T = 45 - 25 - 35 - 15\ [°C]$ ، مع شدة الإشعاع الشمسي $G = 800\ [W/m^2]$.

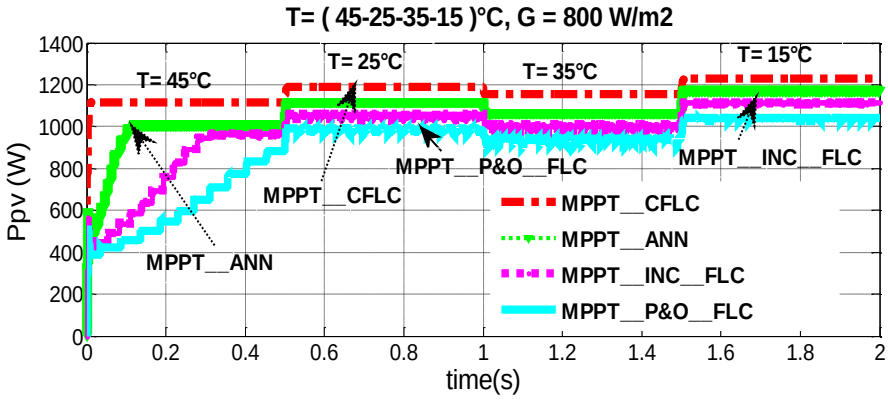
يظهر الشكل (21)، نتائج المحاكاة الناتجة لاستطاعة خرج نظام PV عند تطبيق التغيرات الجوية الموافقة للحالة الأولى، والناتجة باستخدام كل من المتحكم MPPT–CFLC المقترح والمتحكمات المرجعية MPPT–P&O–FLC، MPPT–INC–FLC MPPT–ANN. حيث تظهر هذه النتائج تزايد استطاعة خرج نظام PV مع تزايد زيادة شدة الإشعاع الشمسي، بينما تنخفض الاستطاعة مع تناقص شدة الإشعاع.



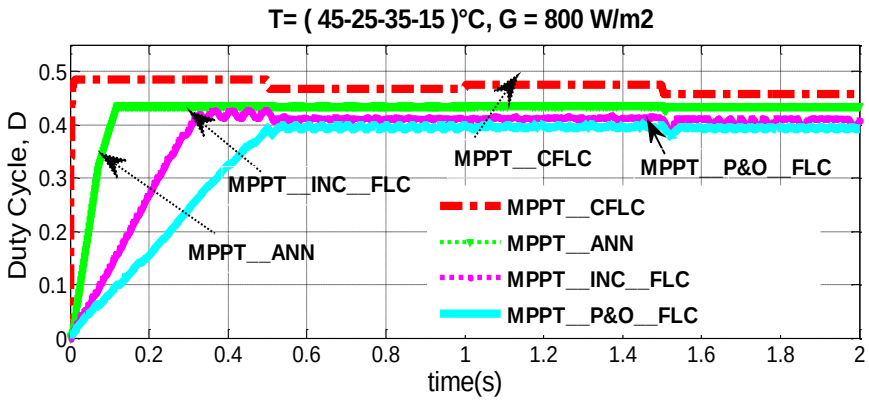
الشكل (21) استطاعة خرج نظام PV عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة.



الشكل (22) تغير نسبة التشغيل D عند شروط تغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة.



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



الشكل (24) تغير نسبة التشغيل D عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.

بينما يظهر الشكل (23) تغير استطاعة خرج نظام PV الناتجة باستخدام كل من المتحكم MPPT–CFLC والمتحكمات المرجعية عند تطبيق التغيرات الجوية الموافقة لشروط الحالة الثانية. حيث يلاحظ العلاقة العكسية بين تغير الاستطاعة ودرجة الحرارة مما يظهر الأثر السلبي لزيادة درجة حرارة الخلية الشمسية على تخفيض قيمة استطاعة خرج نظام PV. كما يظهر الشكل (22) و(24) قيم نسب التشغيل الناتجة باستخدام كل من المتحكمات عند كل من الشروط المفروضة على التتالي.

يمكن من نتائج المحاكاة الناتجة المبينة في الأشكال السابقة استخلاص ما يلي:

✓ يحقق المتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح سلوك حالة عابرة أفضل يتوضح ذلك بسرعة وصول نظام PV إلى استطاعة نقطة MPP عند الانتقال من سوية إلى أخرى لشدة الإشعاع الشمسي أو درجة الحرارة.

✓ يحقق المتحكم MPPT–CFLC سلوك حالة استاتيكية (ثابتة) أفضل لنظام PV، حيث تم التغلب بشكل كامل على مشكلة وجود اهتزازات دائمة في استجابة استطاعة خرج النظام والتي تسبب فقدان في الطاقة، بالإضافة إلى أن قيم الاستطاعة الناتجة لنظام PV هي أكبر من تلك الناتجة باستخدام المتحكمات الأخرى وهذا يدل الكفاءة والأداء الأفضل للمتحكم المقترح في التخلص من خطأ الحالة الثابتة مقارنة بالمتحكمات الأخرى.

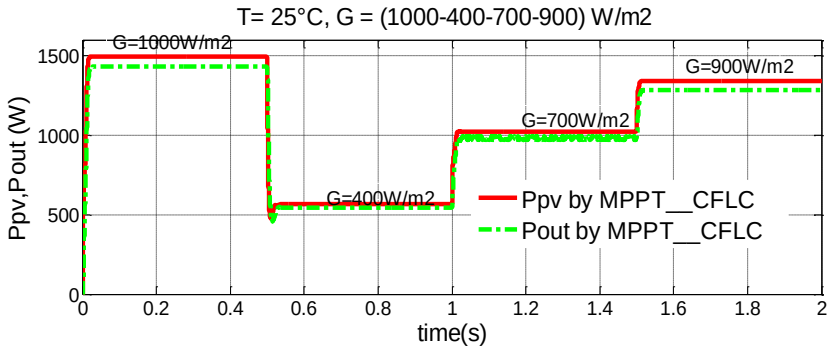
بالنتيجة، يمكن تصنيف الأداء الأفضل للمتحكمات عند تتبع نقطة MPP تبعاً لسلوك الحالة الثابتة والعابرة وفق ما يلي: الأداء الأفضل للمتحكم المقترح MPPT–CFLC ، يليه المتحكم MPPT–ANN، ثم يليه المتحكم العائم التقليدي MPPT– INC –FLC ثم المتحكم MPPT–P&O–FLC.

يمكن تفسير الأداء الأفضل للمتحكم العائم MPPT–CFLC المقترح بما يلي:

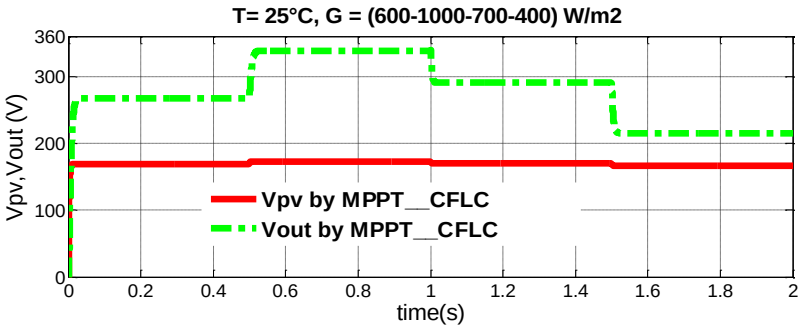
- دقة وسرعة نموذج VMPP–FLE العائم في تحديد التوتر VMPP عند التغيرات الجوية المختلفة.
- دقة المتحكم المقترح DMPP–FLC العامل على الخطأ الناتج بين توتر خرج نظام PV والتوتر VMPP، في جعل الخطأ الناتج متناهي في الصغر مما نتج عنه جعل خطأ الحالة الثابتة لاستطاعة خرج نظام PV تتناهى في الصغر وبالتالي القدرة على الحصول على الاستطاعة العظمى للنظام.
- دقة المتحكم المقترح DMPP–FLC في تقدير قيم نسبة التشغيل بسرعة ودقة فائقة مقارنة مع كل من المتحكمات المرجعية كما هو موضح في الأشكال (21) و(24).

5- نتائج دخل وخرج المبدل رافع الجهد المستمر

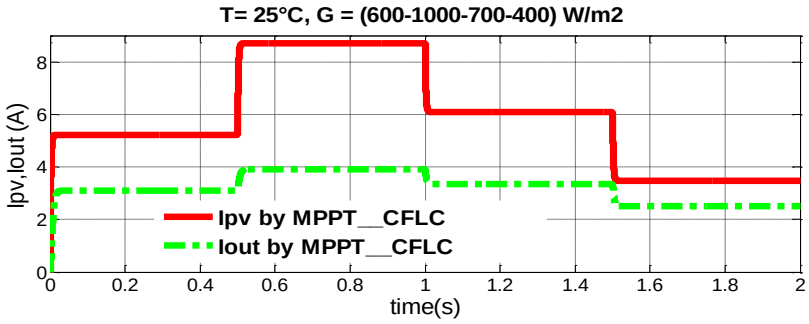
تستخدم نسبة التشغيل خرج المتحكم العائم التسلسلي MPPT-CFLC المقترح للتحكم في دورة عمل مبدل رافع الجهد المستمر، حيث يعتمد نجاح عملية تتبع نقطة MPP على كل الأداء الجيد لكل من المتحكم MPPT-CFLC والمبدل وهذا ما أظهرته النتائج المبينة في الفقرة السابقة.



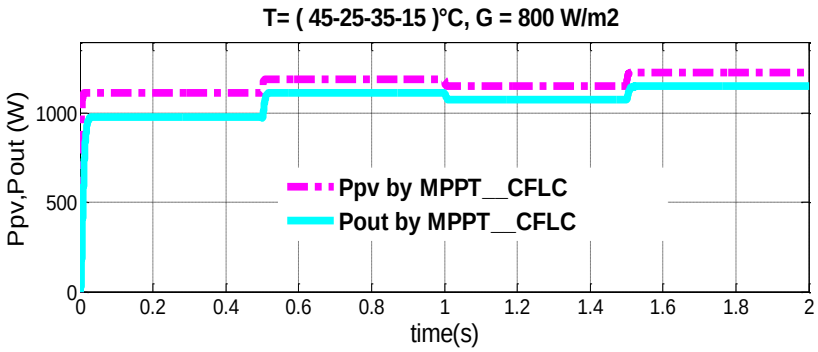
الشكل (25) تغيرات استطاعة P_{out} و P_{pv} عند تغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة.



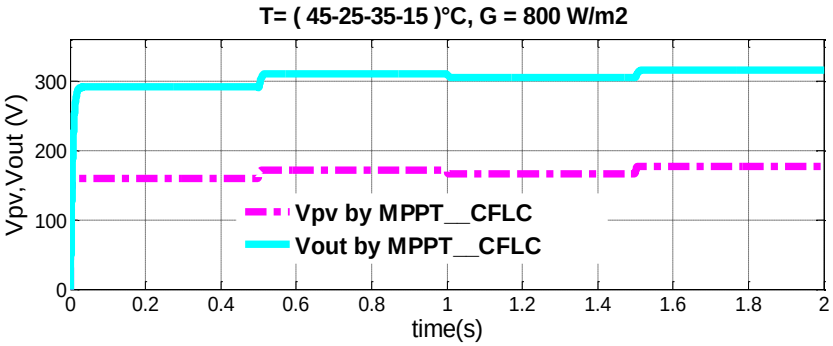
الشكل (26) تغير توتر V_{out} و V_{pv} عند تغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة.



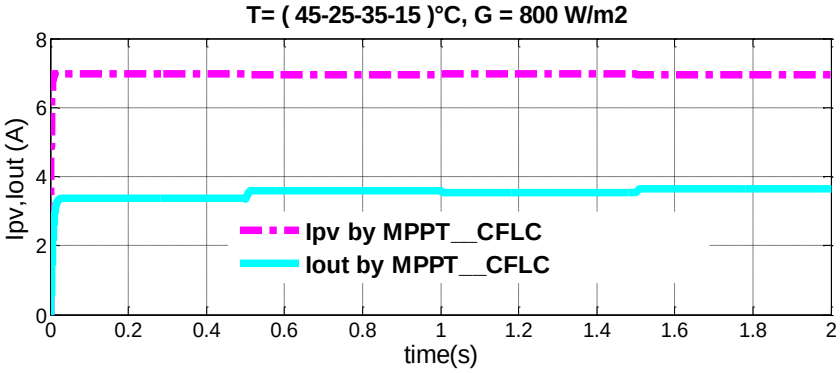
الشكل (27) تغير تيار I_{out} و I_{pv} عند تغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة.



الشكل (28) تغيرات استطاعة P_{out} و P_{pv} عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.



الشكل (29) تغير توتر V_{out} و V_{pv} عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.



الشكل (30) تغير تيار I_{out} و I_{pv} عند تغير درجة الحرارة وشدة إشعاع شمسي ثابتة.

نستعرض الآن نتائج أخرى تظهر الأداء الجيد للمبدل. يبين الشكل (25) و(28) تغير كل من استطاعة خرج الحمل P_{out} و P_{pv} استطاعة خرج نظام PV، الناتجة عند نفس الشروط الجوية المعتبرة سابقا، حيث يلاحظ أن استطاعة خرج الحمل P_{out} هي أقل بقليل من استطاعة خرج نظام P_{pv}، وذلك نتيجة الضياعات الناتجة في مبدل الجهد. أما الشكل (26) و(29) يبين أن V_{out} توتر خرج الحمل أكبر من V_{pv} توتر خرج النظام PV. بينما يظهر في الشكل (27) و(30) أن I_{out} تيار خرج الحمل أصغر من I_{pv} .

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث العمل على تطوير نموذج جديد لمتحكم عائم تسلسلي MPPT–CFLC لتتبع نقطة MPP لنظام PV في بيئة Matlab/Simulink. حيث يعتبر النموذج المقترح جديد ومختلف عن نماذج المتحكمات العائمة المرجعية والتي تعتمد في عملها على محاكاة عمل تقنيات التتبع التقليدية الشهيرة. تم تقييم أداء المتحكم المقترح MPPT–CFLC، مقارنة مع أداء متحكمات عائمة مرجعية MPPT–P&O–FLC، MPPT– INC –FLC والمتحكم العصبوني MPPT–ANN عند شروط جوية مختلفة. بناء على ذلك تم الوصول إلى الاستنتاجات التالية:

- تفوق أداء المتحكم العائم التسلسلي MPPT–CFLC المقترح في البحث على أداء كل من المتحكمات المرجعية المستخدمة، من حيث تحقيق الدقة العالية والسرعة الفائقة في تتبع نقطة MPP.
- الكفاءة العالية لأداء المتحكم MPPT–CFLC المقترح، في تحسين الاستجابة الديناميكية والاستاتيكية (الثابتة) لنظام PV، تعود لكفاءة أداء كل من النموذجين العائمين VMPP–FLE وDMPP–FLC، الموصولين على التسلسل في تقدير قيمة كل من التوتر العائم VMPP وتقدير نسبة التشغيل الأمثل بدقة وسرعة فائقة عند التغيرات الجوية المختلفة.
- مكن المتحكم MPPT–CFLC المقترح، من التخلص بشكل تام من اهتزازات الحالة الثابتة التي تسبب مشكلة في فقدان الطاقة وهذا لم يتم تحقيقه باستخدام كل من المتحكمات المرجعية.
- حقق المتحكم العائم MPPT–CFLC المقترح، زيادة في قيمة استطاعة الناتجة لخرج نظام PV مقارنة مع استخدام المتحكمات المرجعية الأخرى.

نوصي باقتراح نماذج أخرى لمتتبع نقطة MPP تعتمد على استخدام تقنيات الذكاء الصنعي التي تمتاز بقدرتها العالية في محاكاة عمل التقنيات الرياضية المعقدة بطريقة سهلة وبسيطة. والتي تمكن أيضاً من إيجاد حلول تترجم خبرة وفهم المصمم للنماذج المقترحة دون الحاجة للاعتماد على استخدام النماذج الرياضية.

References:

[1] HESHENG, C.; CUI, Y.; YUE, Z.; WANG, Z. *Comparison of P&O and INC Methods in Maximum Power Point Tracker for PV Systems*. Materials Science and Engineering 322, 2018, 1-8.

[2] SABIR, M.; HARRAG, A.; LOUKRIZ, A. *A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, 2017, 221–233.

[3] SABAN, O.; NECMI, A.; IBRAHIM, S. *Fuzzy logic based MPPT controller for high conversion ratio quadratic boost converter*. International Journal of hydrogen energy 42, 2017, 17748- 17759.

[4] SHIAU, J.; WEI, Y.; CHEN, B. *Hybrid maximum power point tracking algorithm with improved dynamic performance*. Renewable Energy 130, 2019, 982-991.

[5] NURUL, A.; AHMAD, R.; AJISMAN, A. *Integrated cooling systems and maximum power point tracking of fuzzy logic controller for improving photovoltaic* performances. Measurement 131, 2019, 100–108.

[6] MOHAMED, R.; RACHID, C.; DIAMEL, T. *Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Step of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Array*. Energies 11, 2018, 1-15.

[7] LAMNADI, M.; TRIHI, M.; BOSSOUFI, B.; BOULEZHAR, A. *Comparative Study of IC, P&O and FLC method of MPPT Algorithm for grid connected PV Module*. Journal of Theoretical and Applied Information Technology 89, 2016, 242- 253.
[8] MACHMUD, E.; NURALIF, M.; KHUSNUL, H. *Efficiency improvement of photo-voltaic by using maximum power point tracking based on a new fuzzy logic controller.* Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology 9, 2018, 57–64.
[9] MALIK, S.; SWARUP, A. *Fuzzy Logic Based adaptive perturbation and Observation MPPT for Photovoltaic System.* International Seminar on Renewable Energy and Sustainable Development 2, 2015, 47- 53.
[10] ASSEM, H, BOUCHAFA, F, HADJ, A, BOUZIDI, B. *Fuzzy logic controller in optimizing of power management in stand-alone photovoltaic system.* Revue des Energies Renouvelables Sienr 14, 2014, 41- 48.