

تطوير نموذج جديد لمتتبع (عصبوني-عائم) لنظم الطاقة الكهروضوئية مرتكز على تقنية توتر الدارة المفتوحة مع مبدل رافع الجهد المستمر

د. إيمان ديلانه *

(تاريخ الإيداع 8 / 2 / 2020. قُبِلَ للنشر في 25 / 1 / 2021)

□ ملخص □

يقدم البحث منهجية جديدة لتطوير متتبع مرتكز على استخدام تقنيات الذكاء الصناعي كالشبكات العصبونية الصناعية (Artificial Neural Networks, ANN) والمنطق العائم (Fuzzy logic, FL) لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracker, MPPT) لنظم الطاقة الكهروضوئية (Photovoltaic System, PV). يتحقق عمل المتتبع العصبوني-العائم المقترح عبر مرحلتين متتابعتين. يتم في المرحلة الأولى، تقدير توتر التشغيل الأمثل (Voltage of Maximum Power Point, VMPP) لنظام PV باستخدام نموذج مطور لمقدر توتر عصبوني (VMPP ANN Estimator, VMPP-ANNE)، بالاعتماد على استخدام تقنية توتر الدارة المفتوحة للحصول على قاعدة البيانات اللازمة لتدريب الشبكة العصبونية المشكلة لنموذج المقدر العصبوني. أما في المرحلة الثانية، يتم تحديد قيمة نسبة التشغيل المناسبة، باستخدام نموذج مطور لمتحكم عائم (Developed Fuzzy DFLLC logic Controller)، حيث يشكل الخطأ في التوتر وتغيره متغيرات الدخل للمتحكم العائم DFLLC، والمستخدم لتحديد نسبة التشغيل المناسبة المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل رافع الجهد المستمر. بالتالي، يمتاز المتتبع العصبوني-العائم MPPT-ANN-DFLLC المقترح، بالأداء العال في تتبع نقطة MPP، لارتكازه من جهة على استخدام الشبكات العصبونية التي تمتاز بدقتها العالية وسرعتها الفائقة في تحديد التوتر VMPP. من جهة أخرى، يركز المتتبع المقترح، على استخدام المنطق العائم الذي يساهم في تحسين الأداء الديناميكي للمتحكم DFLLC. أظهرت نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink، الأداء الأفضل للمتتبع MPPT-ANN-DFLLC المقترح، مقارنة مع استخدام عدة نماذج أخرى لمتتبعات مرجعية.

الكلمات المفتاحية: متتبع نقطة الاستطاعة العظمى، شبكات عصبونية صناعية، منطق عائم، تقنية توتر الدارة المفتوحة، مبدل رافع الجهد المستمر.

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

Development of a New Model for a (Neuron-Fuzzy) Tracker for Photovoltaic Energy Systems based on Open Circuit Technique With DC-DC Boost Converter

Dr. Iman Dilaneh*

(Received 8 / 2 / 2020. Accepted 25 / 1 / 2021)

□ ABSTRACT □

The research introduces a new methodology for developing a tracker based on the use of artificial intelligence technologies such as Artificial Neural Networks (ANN) and Fuzzy logic (FL) to track the Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Photovoltaic Systems (PV). The proposed neuronal- Fuzzy tracker action is achieved in two successive phases. In the first stage, the optimum operating tension (Voltage of Maximum Power Point, VMPP) for the PV system is estimated using a developed model of neural tension estimator (VMPP ANN Estimator, VMPP-ANNE), using the use of open circuit technology to obtain the database necessary to train the problem neural network for the neuronal estimator model. In the second stage, the value of the appropriate duty cycle is determined, using a developed model for the Fuzzy logic Controller (DFLC). Where the error in voltage and its variability is the input variables of the Fuzzy controller DFCLC, which is used to determine the appropriate the duty cycle, which is used to control the DC-DC Boost Converter switching cycle. Thus, the proposed MPPT-ANN-DFLC is characterized by high MPP point tracking performance, on the one hand because it is based on the use of neuron networks that are characterized by high accuracy and very fast VMPP determination. On the other hand, the proposed tracker, is based on the use of Fuzzy logic that improves the dynamic performance of the DFCLC controller. Simulation results performed in Matlab/Simulink environment showed the best performance of the proposed MPPT-ANN-DFLC tracker, compared to using several other reference tracker models.

Keywords: Maximum Power Point tracker, Artificial Neural Networks, Fuzzy Logic, Open Circuit Technique , DC-DC Boost Converter.

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

مقدمة:

يساهم استخدام متتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracker, MPPT) لنظم الطاقة الكهروضوئية (Photovoltaic System, PV)، بشكل جيد وفعال في الحصول على الطاقة القصوى الممكنة من هذه النظم. أظهرت الدراسات المرجعية، فعالية استخدام تقنيات الذكاء الصناعي المختلفة كالشبكات العصبونية الصناعية (Artificial Neural Networks, ANN) والمنطق العائم (Fuzzy Logic, FL)، لتطوير نماذج متنوعة للمتتبع MPPT، تمكن من تحسين كفاءة نظم PV بشكل كبير مقارنة مع استخدام متتبعات تقليدية المعتمدة كتقنية الاضطراب والمراقبة وتقنية زيادة الناقلية [2,1]. في هذا السياق، طورت نماذج متنوعة للمتتبعات العائمة (Fuzzy Logic Controller, FLC)، وذلك لأن بناء هذه النماذج لا يتطلب الحاجة لاستخدام نماذج رياضية، وإنما يتم ذلك بالاعتماد على خبرة وفهم الباحث. بناء على ذلك تم تطوير نماذج متنوعة للمتتبع العائم MPPT-FLC باستخدام القياسات الكهربائية الممثلة للتوتر وللتيار لخرج نظام PV، حيث يتفاوت أداء هذه النماذج المطورة تبعاً للاختيار الصحيح لعدد ولأنواع توابع الانتماء ودقة وصحة قواعد الأساس المطبقة التي تحدد العلاقة بين متغيرات دخل وخرج المتتبع [4,3]. إن استخدام الشبكات العصبونية الصناعية لتصميم متتبع MPPT، يتسم أيضاً بالسهولة والبساطة. حيث يمكن بناء متتبع MPPT-ANN بسهولة في حال توفر بيانات تدريب كافية، وبالاختيار الصحيح لهيكلية الشبكة العصبونية الصناعية، المحققة لمعايير الأداء الجيد لكل من متوسط مربع الخطأ ومعامل الارتباط [6,5]. نتيجة ذلك، تم تطوير نماذج متنوعة عصبونية تعتمد بعضها على استخدام نماذج رياضية وأخرى تعتمد على تجارب عملية للحصول على قاعدة البيانات اللازمة لبناء النموذج العصبوني. في الدراسة المرجعية [6]، تم تطوير نموذج لمتتبع MPPT-ANN، حيث اعتمد بناء نموذج الشبكة على استخدام قاعدة بيانات تدريب ناتجة من الاستخدام لتقنية زيادة الناقلية (Incremental conductance, INC). في الدراسة [7]، تم تطوير شبكة عصبونية صناعية ذات طبقة خفية واحدة لتقدير توتر التشغيل الأمثل (Voltage of Maximum Power Point, VMPP). أظهرت نتائج هذه الدراسة دقة نموذج الشبكة الناتج في تقدير قيم التوتر VMPP عند التغيرات الجوية المختلفة، كما تم استخدام متحكم تناسبي-تكاملي تقليدي لضبط توتر خرج نظام PV عند التوتر VMPP. غير أنه، لم توضح هذه الدراسة كيفية الحصول على بيانات تدريب الشبكة العصبونية. أما في الدراسة [8]، فقد تم نمذجة شبكة عصبونية مكونة من طبقة دخل بمتغير واحد ممثل لاستطاعة النظام PV، طبقة خفية واحدة، وطبقة خرج بعصبون واحد لتقدير نسبة التشغيل. أظهرت نتائج هذه الدراسة الأداء الأفضل للمتتبع MPPT-ANN المعتمد على نموذج الشبكة العصبونية مقارنة مع متتبع يستخدم تقنية الاضطراب والمراقبة في زيادة الاستطاعة الناتجة لنظام PV. ولكن أيضاً أُغفلت هذه الدراسة ذكر آلية الحصول على بيانات تدريب الشبكة العصبونية.

أهمية البحث وأهدافه:

يقدم البحث نموذج جديد لمتتبع (عصبوني-عائم) لتتبع نقطة MPP لنظم الطاقة الكهروضوئية. يركز المتتبع المقترح في البحث، في عمله من جهة استخدام الشبكات العصبونية الصناعية لتطوير نموذج لمقدر توتر عصبوني (VMPP ANN Estimator, VMPP-ANNE)، لتقدير التوتر VMPP، ويتم ذلك بالاعتماد على استخدام تقنية الدارة المفتوحة للحصول على قاعدة البيانات اللازمة لتدريب الشبكة العصبونية الصناعية متعددة الطبقات ذات التغذية

الأمامية (Multi-Layers Feed Forward Neural Networks, MLFFNN) المشكلة للنموذج VMPP-ANNE. بالتالي، يسمح نموذج مقدر التوتر VMPP-ANNE من تحديد التوتر VMPP بشكل سريع ومباشر، دون الحاجة لفصل نظام PV أثناء العمل، عن الحمل لقياس توتر الدارة المفتوحة وبالتالي تحديد التوتر VMPP. من جهة أخرى، يركز المنتبج العصبي-العائم المقترح، على استخدام المنطق العائم لتطوير نموذج جديد لمتحكم عائم (Developed Fuzzy logic Controller, DFCL)، لتحديد نسبة التشغيل المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل رافع الجهد المستمر لتحقيق عملية تتبع نقطة MPP. بالتالي، هذا التركيب الخاص للمنتبج المقترح المعتمد في عمله على استخدام نموذجين عصبيين وعائم يعملان بشكل متتالي، يسمح بتطوير نموذج جديد لمتبج متقدم يجمع مزايا كل من تقنيات الذكاء الصناعي المدمجة فيه للحصول على منتبج يمتاز بأداء عال من ناحية الدقة والسرعة عند تتبع نقطة MPP مقارنة مع المنتبجات المرجعية الأخرى العائمة والعصبونية.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد تصميم نموذج المنتبج MPPT-ANN-DFCL المقترح، على استخدام توابع معرفة في مكتبة Neural Network Toolbox ومكتبة Fuzzy Logic Toolbox الموجودة في بيئة Matlab، لتصميم النموذج العصبي VMPP-ANNE والعائم DFCL. كما يعتمد تقييم أداء المنتبج المقترح على تحليل ومقارنة نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink، مقارنة مع استخدام عدة منتبجات مرجعية أخرى.

1- النموذج الرياضي للنظام الكهروضوئي PV

تحدد العلاقة بين تيار وتوتر خرج النظام PV، باستخدام العلاقة اللاخطية التالية [1]:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{PV} + R_s * I_{PV}}{V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s * I_{PV}}{R_p} \quad (1)$$

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

$$I_0 = \frac{(I_{SC,n} + K_I \Delta T)}{e^{\left(\frac{V_{OC,n} + K_V \Delta T}{V_t} \right)} - 1} \quad (3)$$

يمثل I_{PV} و V_{PV} تيار وتوتر خرج نظام PV على التوالي، حيث يقاس التيار بالأمبير [A] والتوتر بالفولت [V]. كما يمثل $I_P[A]$ التيار الضوئي المتولد، $I_{P,N}[A]$ التيار الضوئي المتولد عند الشروط القياسية الموافقة لشدة إشعاع شمسي $G_N = 1000[W/m^2]$ ودرجة حرارة الخلية الشمسية $T_N = 25[^\circ C]$. يمثل $I_0[A]$ تيار الإشباع العكسي، V_t الجهد الحراري. يمثل $I_{SC,n}$ و $V_{OC,n}$ تيار القصر وتوتر الدارة المفتوحة المحددين عند الشروط القياسية النظامية المذكورة. يمثل $G[W/m^2]$ شدة الإشعاع الشمسي و $T[^\circ C]$ درجة حرارة الخلية الشمسية، K_I المعامل الحراري للتيار و K_V المعامل الحراري للجهد.

2- نمذجة علاقة توتر نقطة MPP بتوتر الدارة المفتوحة

تتحقق الحالة المثالية لعمل الخلية الكهروضوئية كلما انخفضت قيمة المقاومة التسلسلية R_s ، ازدادت قيمة التفرعية R_p ، بالتالي باستخدام فرضيات الحالة المثالية ($R_s = 0$ و $R_p = \infty$) وبالتعويض في العلاقة السابقة، نحصل على العلاقة التالية [2]:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{PV}}{V_t}\right)} - 1 \right) \quad (4)$$

بناء على ذلك، تكون قيمة تيار خرج النظام PV معدومة ($I_{PV} = 0$) عند نقطة توتر الدارة المفتوحة [10]، وبالتالي يمكن الحصول على علاقة يمكن استنتاج علاقة V_{OC} وفق ما يلي:

$$V_{OC} = V_t * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (5)$$

بالتالي يمكننا تحديد قيمة V_{OC} عند تغيرات الجوية المختلفة لشدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، باستخدام العلاقة (5). من جهة أخرى، أظهرت الدراسات التجريبية العلاقة الخطية بين توتر V_{MPP} وتوتر الدارة المفتوحة V_{OC} ، والمعبر عنها كما يلي [12,11]:

$$V_{MPP} = K * V_{OC} \quad (6)$$

يمثل K ثابت تناسب قيمته أصغر من الواحد، وتعتمد قيمته على الخصائص الكهربائية للوح الشمسي. يتحقق عمل المتحكم MPPT في تتبع نقطة MPP للنظام PV باستخدام مبدل رافع الجهد المستمر، حيث تمثل متغيرات الدخل للمبدل الممثلة للتيار $I_{pv}[A]$ ، وللتوتر $V_{pv}[V]$ لخرج النظام PV، مع متغيرات خرج المبدل الممثلة لتيار الحمل $I_{out}[A]$ ولتوتر الحمل $V_{out}[V]$ ، ترتبط هذه المتغيرات بالعلاقات التالية:

$$\frac{I_{out}}{I_{pv}} = \frac{V_{pv}}{V_{out}} = 1 - D \quad (7)$$

D : عدد لا بعدي تتراوح قيمته بين الصفر والواحد، حيث يستخدم تغير قيمة نسبة التشغيل D لتعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation, PWM)، المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل الجهد.

3- تطوير نموذج مقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE

يمثل النموذج العصبوني VMPP-ANNE المقترح لتقدير قيمة VMPP عند التغيرات الجوية المختلفة، بشبكة عصبونية صناعية متعددة الطبقات ذات تغذية أمامية MLFFNN. تتم نمذجة الشبكة MLFFNN في بيئة Matlab، بإدخال أزواج بيانات تدريب الشبكة الممثلة بالمصفوفة "inputs" الممثلة لدرجة حرارة الخلية الشمسية $T [^{\circ}C]$ وشدة الإشعاع الشمسي $G [W/m^2]$ ، والقيم المرغوبة للخروج الممثلة بالمصفوفة "targets" والموافقة للقيم النظرية لتوتر التشغيل الأمثل V_{MPP_Target} . بناء على ذلك وباستخدام التابع "newff"، يمكن تحديد نموذج الشبكة MLFFNN كما يلي:

$$\text{net} = \text{newff}(\text{inputs}, \text{targets}, [n_1 \cdot n_n], \{\text{'tansig'}, \dots, \text{'tansig'}, \text{'purelin'}\}, \text{'trainlm'});$$

تمثل n_1, \dots, n_n : عدد العصبونات في الطبقات الخفية المختلفة المحدد عددها أثناء تدريب الشبكة. يمثل التابع 'tansig' تابع التفعيل سيغمويد (تابع الظل القطعي) في الطبقات الخفية، بينما يمثل "purelin" تابع التفعيل الخطي في طبقة الخرج. تم اختيار تابع التدريب "trainlm"، الممثل لخوارزمية التدريب العكسي "Marquardt" Levenberg". يتم تقييم كفاءة أداء الشبكة MLFFNN الناتجة، باستخدام معايير الأداء من متوسط مربع الخطأ (Mean square error, MSE) ومعامل الارتباط (Correlation Coefficient, R)، والتي تدل بدورها على مدى التقارب بين القيم النظرية المرغوبة للتوتر V_{MPP_Target} المستخدمة لتدريب الشبكة، وبين القيم المقدرة للتوتر الناتجة باستخدام الشبكة MLFFNN، حيث تحدد كل من MSE و R بالعلاقات التالية [2]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (\overline{VMPP}_K - VMPP_K)^2 \quad (8)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{K=1}^N (VMPP_K - \overline{VMPP}_K)^2}{\sum_{K=1}^N (VMPP_K - \overline{VMPP}_K)^2}} \quad (9)$$

$$\overline{VMPP}_K = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N VMPP_K \quad (10)$$

حيث $VMPP_K$ تمثل القيم الحقيقية المرغوبة لتوتر التشغيل الأمل V_{MPP_Target} و \overline{VMPP}_K تمثل القيم المقدر V_{MPP_ANN} الناتجة من نموذج مقدر التوتر VMPP-ANNE العصبوني. أما \overline{VMPP}_K تمثل المتوسط الحسابي للقيم الحقيقية للخروج $VMPP_K$ والتي عددها يساوي N .

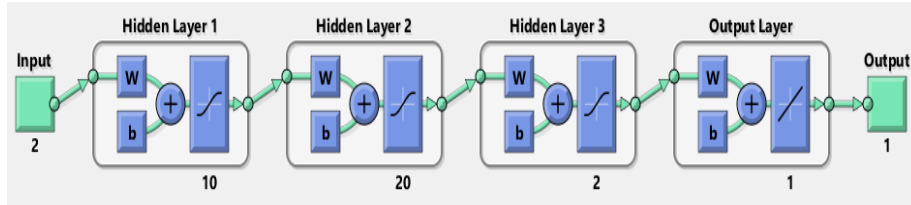
الجدول (1) يوضح سيناريوهات الشبكة التي تم بناؤها مع قيم E و R في مرحلة التدريب والاختبار والتحقق.

عدد الطبقات الخفية	عدد العصبونات في كل طبقة خفية في الشبكة العصبونية الصناعية المدربة	مرحلة التدريب training		مرحلة التحقق validation		مرحلة الاختبار testing	
		متوسط مربع الخطأ MSE	معامل الارتباط R	متوسط مربع الخطأ MSE	معامل الارتباط R	متوسط مربع الخطأ MSE	معامل الارتباط R
طبقة خفية واحدة	$n_1=5$	2.6544	0.98827	1.9305	0.98875	2.2674	0.98746
	$n_1=10$	0.2409	0.99897	1.6428	0.99203	1.4728	0.99189
	$n_1=15$	0.0276	0.99988	0.5957	0.99591	0.4203	0.99778
	$n_1=20$	0.0051	0.99998	0.1258	0.99939	0.0978	0.99964
طبقتين خفيتين	$n_1=2; n_2=5$	0.0048	0.99997	0.0061	0.99997	0.0038	0.99999
	$n_1=2; n_2=10$	0.0042	0.99997	0.0040	0.99998	0.0027	0.99999
	$n_1=5; n_2=10$	0.0029	0.99999	0.0020	0.99999	0.0025	0.99999
	$n_1=5; n_2=20$	0.0015	0.99999	0.0020	1.00	0.0020	1.00
ثلاث طبقات خفية	$n_1=5; n_2=5; n_3=2$	0.0010	0.99997	0.0012	0.99988	0.0015	0.99994
	$n_1=5; n_2=10; n_3=2$	4.99e-04	1.00	8.62e-04	0.99999	0.0014	0.99999
	$n_1=10; n_2=10; n_3=2$	3.23e-04	1.00	6.16e-04	1.00	3.84e-04	1.00
	$n_1=10; n_2=20; n_3=2$	6.98e-05	1.00	5.87e-05	1.00	2.32e-05	1.00

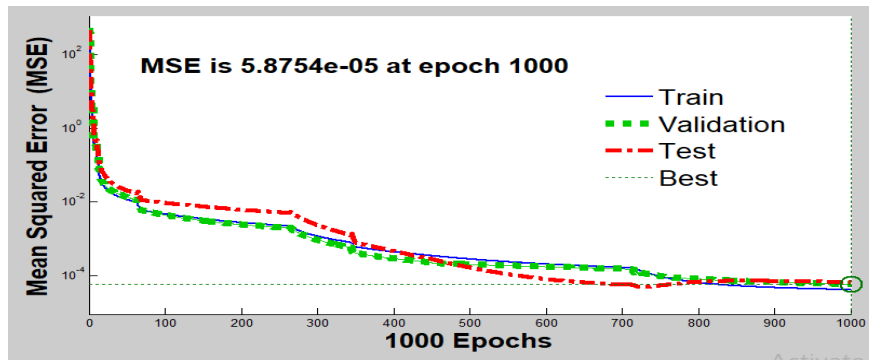
يتم تحديد الهيكلية الأفضل للشبكة MLFFNN المختارة في البحث، بالتجريب وذلك باختيار الهيكلية التي تحقق القيم الصغرى لقيم متوسط مربع الخطأ وقيم مساوية للواحد لمعامل الارتباط الناتجة في نهاية مرحلة التدريب والتحقق والاختبار للشبكة. لهذا الغرض، تم اقتراح عدة سيناريوهات لهيكلية الشبكة، تمتلك كل منها طبقة خفية واحدة، طبقتين خفيتين، ثلاث طبقات خفية على التوالي. وتم زيادة عدد العصبونات الموجودة في كل طبقة كما هو مبين في الجدول (1). تظهر النتائج المبينة في الجدول (1)، أن الاستمرار في زيادة عدد الطبقات الخفية وعدد العصبونات الموجودة فيها، يؤدي إلى الحصول على قيم أصغر لمتوسط مربع الخطأ MSE، ويحقق قيم مثلى لمعامل الارتباط R مساوية للواحد. ولكن من جهة أخرى، يؤدي ذلك إلى زيادة في حجم وتعقيد الشبكة العصبونية. لذلك تم التوقف عند السيناريو الأخير لهيكلية الشبكة الموافق للسطر الأخير في الجدول (1)، وتم اعتماده باعتباره يوافق القيم الأفضل لكل من MSE و R، في كل من مرحلة التدريب والتحقق والاختبار. وبناء على ذلك، تمتلك الهيكلية الأفضل للشبكة العصبونية MLFFNN الموافقة للسيناريو الأخير، والمستخدم في البحث، التركيبة التالية:

▪ طبقة الدخل مؤلفة من دخلين، ممثلين لدرجة حرارة الخلية الشمسية وشدة الإشعاع الشمسي.

- ثلاث طبقات خفية، عدد العصبونات في الطبقة الخفية الأولى عشرة، وفي الطبقة الخفية الثانية فهو عشرون عصبون، وعصبونان في الطبقة الخفية الثالثة كما هو مبين في الشكل (1).
- طبقة خرج بعصبون واحد، ممثل لتوتر التشغيل الأمل V_{MPP_ANN} .

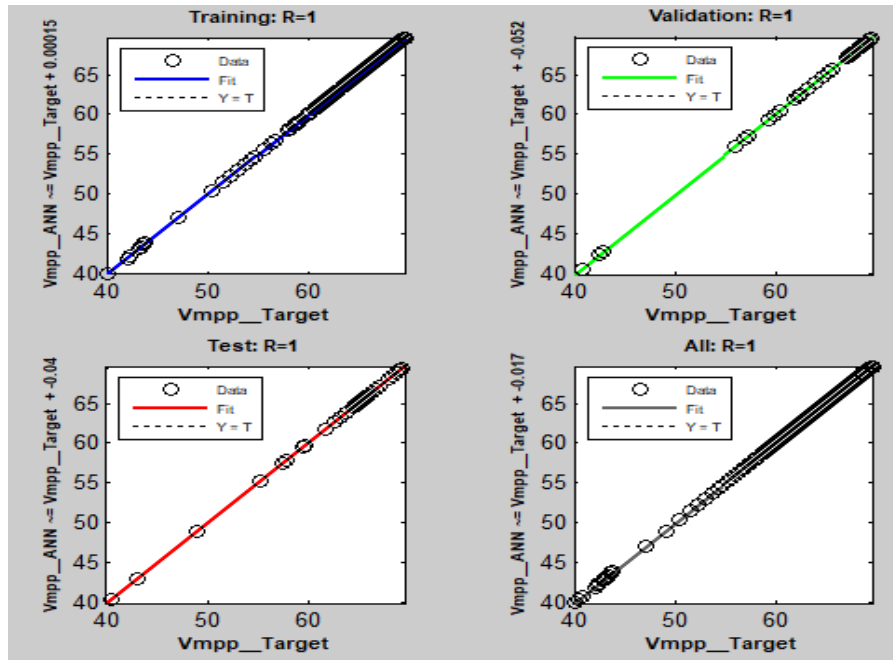


الشكل (1) هيكلية الشبكة MLFFNN المختارة لتقدير التوتر VMPP الناتجة في بيئة Matlab.

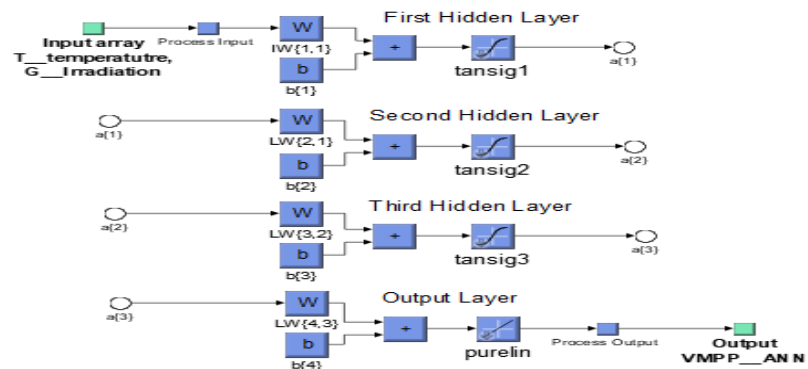


الشكل (2) منحنى الأداء للشبكة العصبونية المستخدمة لتقدير التوتر VMPP.

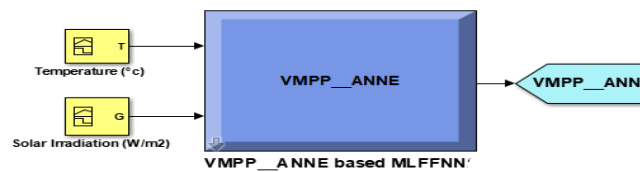
يبين الشكل (2)، منحنيات الأداء للشبكة العصبونية MLFFNN المختارة في البحث لتقدير التوتر VMPP، حيث يتضمن الشكل المذكور أربعة منحنيات: منحنى عملية التدريب (Train)، منحنى صلاحية الشبكة العصبونية أي التحقق (Validation)، منحنى عملية الاختبار (Test)، ومنحنى القيم الأفضل (Best). كما يظهر الشكل (3)، قيمة معاملات الارتباط R للمجموعات الثلاث (التدريب-التحقق-الاختبار) المساوية للواحد. تظهر هذه الأشكال أن النموذج النهائي للشبكة MLFFNN، يحقق معايير الأداء الجيد الموافقة لقيم لمتوسط مربع الخطأ MSE متناهية في الصغر، بالإضافة لقيمة مثلى لمعامل الارتباط R مساوية للواحد، مما يدل على التقارب الدقيق بين نتائج خرج الشبكة الممثلة للتوتر V_{MPP_ANN} وبين القيم الحقيقية النظرية للتوتر V_{MPP_Target} الناتجة بتطبيق العلاقة النظرية الخطية (6) بدلالة توتر الدارة المفتوحة يتم استخدام نموذج الشبكة MLFFNN المتعددة الطبقات المبينة في الشكل (4)، لتشكل نموذج لمقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE المقترح لتقدير التوتر VMPP المبين في الشكل (5).



الشكل (3) معاملات الارتباط للشبكة العصبونية المستخدمة لتقدير التوتر VMPP.



الشكل (4) محاكاة نموذج الشبكة MLFFNN الناتج باستخدام Neural Network Toolbox.



الشكل (5) نموذج مقدر التوتر VMPP-ANNE العصبوني الناتج في بيئة Matlab/Simulink.

4- تطوير نموذج المتحكم العائم DFLL

تم اقتراح في الدراسات المرجعية نماذج متنوعة للمتحكم العائم المستخدم لمتابعة نقطة MPP. حيث تختلف النماذج المقترحة، من حيث طبيعة متغيرات الدخل والخرج للمتحكم كاستخدام تغيرات كل من التوتر أو تغيرات التيار أو تغيرات الاستطاعة، لتحديد متغير الخرج للمتحكم والذي عادة ما يكون تغير نسبة التشغيل [3,4]. وتتطلب نماذج أخرى لمتابعة نقطة MPP، استخدام متحكم تناسبي تكاملي PI لضبط التوتر V_{pv} لخرج نظام PV عند توتر الأمثل [7]. لذلك،

نقترح في هذا البحث، الاستغناء عن استخدام متحكم PI لتحقيق عمل نظام PV عند التوتر الأمثل V_{mpp} ، وذلك بتصميم نموذج لمتحكم عائم يعمل على الخطأ في التوتر وتغييره. لذلك نحدد بداية، متغير الدخل الأول للمتحكم العائم، الممثل للخطأ في التوتر $E(k)$ الناتج من مقارنة التوتر المرجعي الأمثل خرج نموذج مقدر التوتر VMPP-ANNE العصبوني، والتوتر V_{pv} خرج النظام PV، أما متغير الدخل الثاني للمتحكم، فيمثل تغير الخطأ $CE(k)$. يمثل متغير الخرج للمتحكم، تغير نسبة التشغيل $dD(k)$ المستخدمة لتحديد نسبة التشغيل اللحظية $D(k)$ ، تعرف متغيرات دخل وخرج المتحكم DFCLC المقترح كما يلي:

$$E(k) = V_{mpp}(k) - V_{pv}(k) \tag{11}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \tag{12}$$

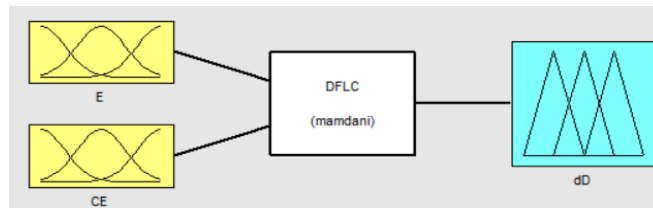
$$dD(k) = D(k) - D(k - 1) \tag{13}$$

$$D(k) = dD(k) + D(k - 1) \tag{14}$$

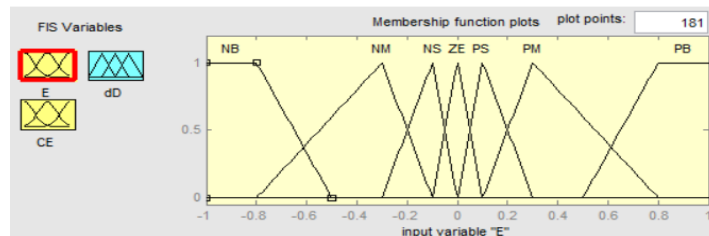
توضح الأشكال (7)، (8) و(9) عملية تعويم متغيرات دخل وخرج المتحكم DFCLC المقترح، باستخدام عدة مجموعات عائمة، ممثلة بتتابع انتماء مثلثية الشكل وأخرى ذات شبه منحرف. تم اعتماد هذا النوع من تتابع الانتماء لتأمين تحقيق العلاقة التناسبية بين تغير الخطأ وتغير خطوة التشغيل، وبحيث يتحقق انتقال سلس وتدرجي من مجموعة عائمة إلى أخرى، تتابع الانتماء هذه معبر عنها بالمتغيرات اللغوية المبينة في الجدول (2). يبين الجدول (3) قواعد الأساس للمتحكم، ويبين الشكل (10) النموذج النهائي للمتحكم DFCLC، حيث تمثل K_1 و K_2 عوامل التقييس المستخدمة لضبط مجال تغير E و CE ضمن المجال $[-1,1]$.

جدول (2) المتغيرات اللغوية للمجموعات العائمة لنموذج DFCLC.

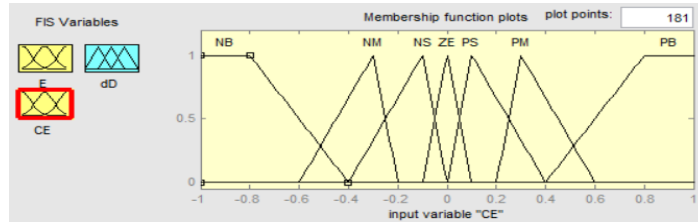
المتغيرات اللغوية		المتغيرات اللغوية	
Negative-Big	NB	Positive-Small	PS
Negative-Medium	NM	Positive-Medium	PM
Negative-Small	NS	Positive-Big	PB
Zero	ZE		



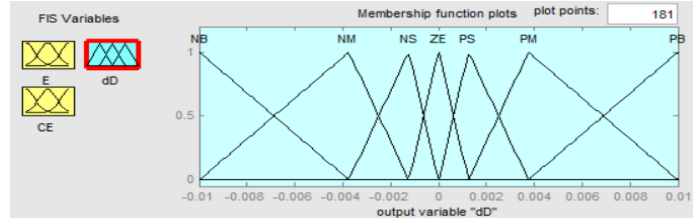
الشكل (6) النافذة الرئيسية لنموذج المتحكم DFCLC المطور باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.



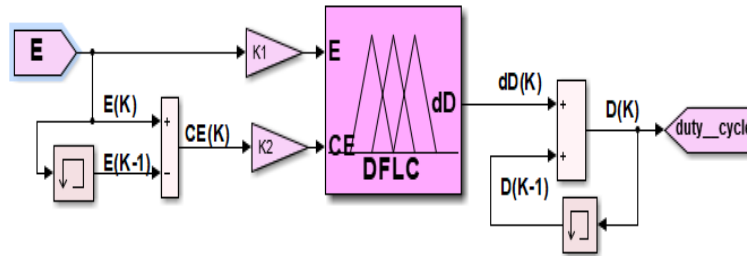
الشكل (7) تعويم متغير الدخل للمتحكم DFCLC الممثل للخطأ.



الشكل (8) تعويم متغير الدخل الثاني للمتحكم DFLL الممثل لتغير الخطأ.



الشكل (9) تعويم متغير الخرج للمتحكم DFLL الممثلة لتغير نسبة التشغيل ΔD .



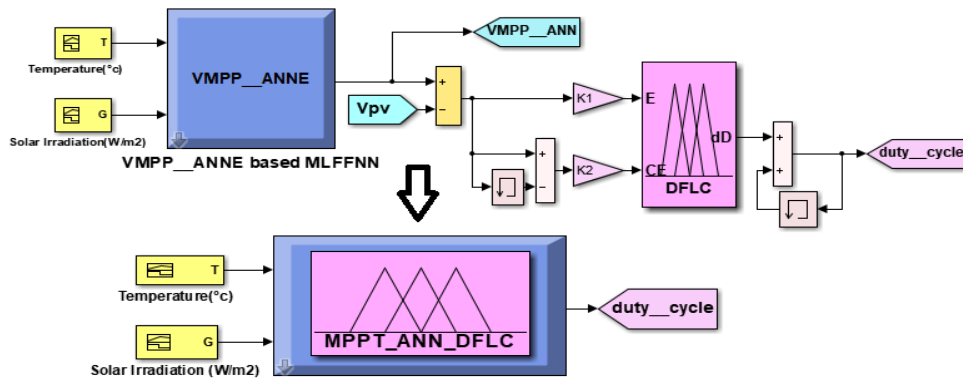
الشكل (10) النموذج النهائي للمتحكم DFLL باستخدام Fuzzy Logic Toolbox.

الجدول (3) قواعد الأساس لنموذج المتحكم DFLL العائم.

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

5- النموذج النهائي للمتتبع العصبوني-العائم المقترح

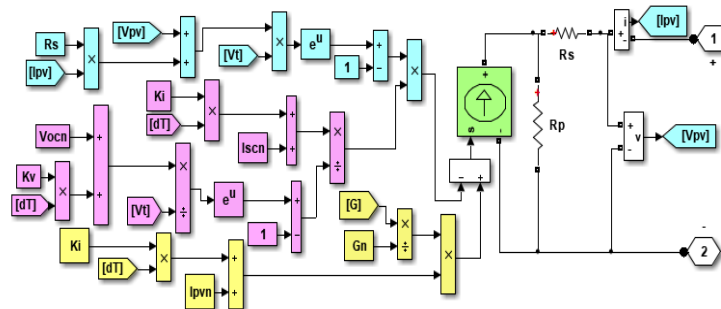
يظهر الشكل (11) النموذج النهائي للمتتبع العصبوني-العائم MPPT-ANN-DFLL المقترح، والذي يعتمد في عمله على استخدام كل من نموذج مقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE والمتحكم العائم DFLL لتتبع نقطة MPP لنظام PV.



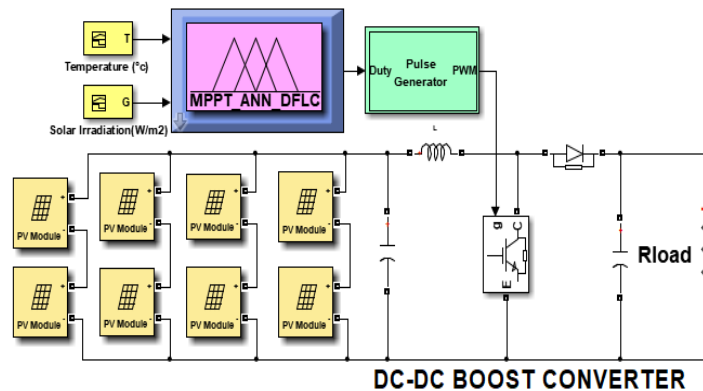
الشكل (11) النموذج النهائي للمتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح لتتبع نقطة MPP.

6- محاكاة نظام تتبع نقطة MPP باستخدام المتتبع المقترح

يبين الشكل (12)، محاكاة لوح شمسي كهروضوئي واحد في بيئة Matlab/Simulink. بينما يتكون النظام الكهروضوئي PV، من أربع سلاسل موصولة على التفرع، بحيث تحوي السلسلة الواحدة على لوحين كهروضوئيين موصولين على التسلسل، بحيث الاستطاعة الكلية للنظام PV تساوي 1200[W] عند الشروط القياسية النظامية. كما يوضح الشكل (13) التوصيف لنظام التتبع بمكوناته المختلفة نظام PV، متتبع MPPT-ANN-DFLC، مبدل رافع الجهد، مولد نبضات PWM.



الشكل (12) محاكاة نظام PV في بيئة Matlab/Simulink.



الشكل (13) محاكاة نظام تتبع نقطة MPP باستخدام المتتبع المقترح في بيئة Matlab/Simulink.

7-المتتبعات المرجعية المستخدمة لتتبع نقطة MPP

استعرضنا فيما سبق محاكاة المتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح في البحث، سنعمد الآن إلى استعراض عدد من المتتبعات المرجعية والتي سيتم استخدامها لاحقا لتقييم أداء المتتبع المقترح في البحث.

- المتتبع العصبوني المرجعي MPPT-ANN: يستخدم المتتبع MPPT-ANN العصبوني المرجعي [9]، إشارة كل من تغيرات الاستطاعة ΔP وتغيرات التوتر ΔV لخرج النظام PV، لتحديد نوع إشارة تغير نسبة التشغيل المتغيرة بخطوة ثابتة والممثلة لمتغير خرج الشبكة ANN، وبناء على ذلك يتم زيادة أو إنقاص نسبة التشغيل اللحظية.

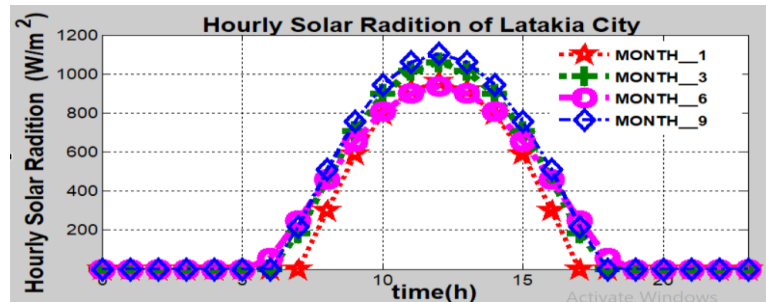
- المتتبع العائم المرجعي MPPT-FLC: يستخدم المتتبع العائم MPP-FLC المرجعي [4]، نسبة تغيرات الاستطاعة ΔP وتغيرات التيار ΔI ، وتغير هذه النسبة لتشكيل متغيرات الدخل للمتتبع، ليتم بناء عليها وباستخدام مجموعة من قواعد الأساس تحديد التغيرات المناسبة لخطوة نسبة التشغيل.

- المتتبع المرجعي MPPT-INC: يعتمد المتتبع MPPT-INC على تقنية زيادة الناقلية INC التقليدية، حيث تعتمد هذه التقنية على مقارنة نسبة تغيرات التيار ΔI وتغيرات التوتر ΔV لخرج النظام PV مع نسبة القيم اللحظية للتيار والتوتر، ليتم تحديد زيادة أو تخفيض قيمة نسبة التشغيل بمقدار محدد ثابت Step [1].

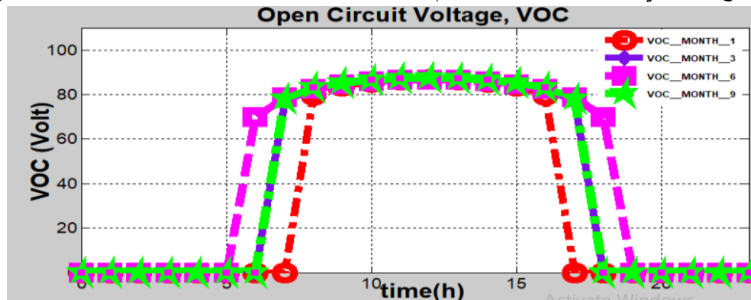
النتائج والمناقشة:

1- تطبيق علاقة توتر الدارة المفتوحة لتحديد قيم توتر التشغيل الأمثل

نعمد الآن إلى استخدام قيم الإشعاع الشمسي الساعي الساقط على لوح شمسي مائل بزاوية مقدارها 35.5 مساوية لخط عرض مدينة اللاذقية، والموافقة لقيم الإشعاع الشمسي لليوم 21 لكل من الأشهر: الأول، الثالث، السادس والتاسع. يوضح الشكل (14) قيم الإشعاع الشمسي الساعي لليوم 21 لكل من الأشهر المذكورة. حيث قمنا في البحث، بتطوير برنامج في Matlab باستخدام المعادلات الرياضية المعروفة للإشعاع الشمسي المائل، لحساب قيم الإشعاع الشمسي النظرية الناتجة المبينة في الشكل (14). لم يتم التطرق إلى ذكر معادلات الإشعاع الشمسي لعدم الإطالة، وللتركيز فقط على موضوع وهدف البحث.

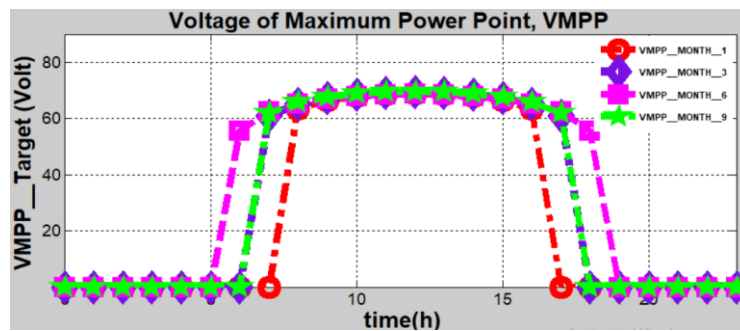


الشكل (14) قيم الإشعاع الشمسي النظرية المحسوبة لليوم 21 لكل من الشهر الأول، الثالث، السادس والتاسع لمدينة اللاذقية.



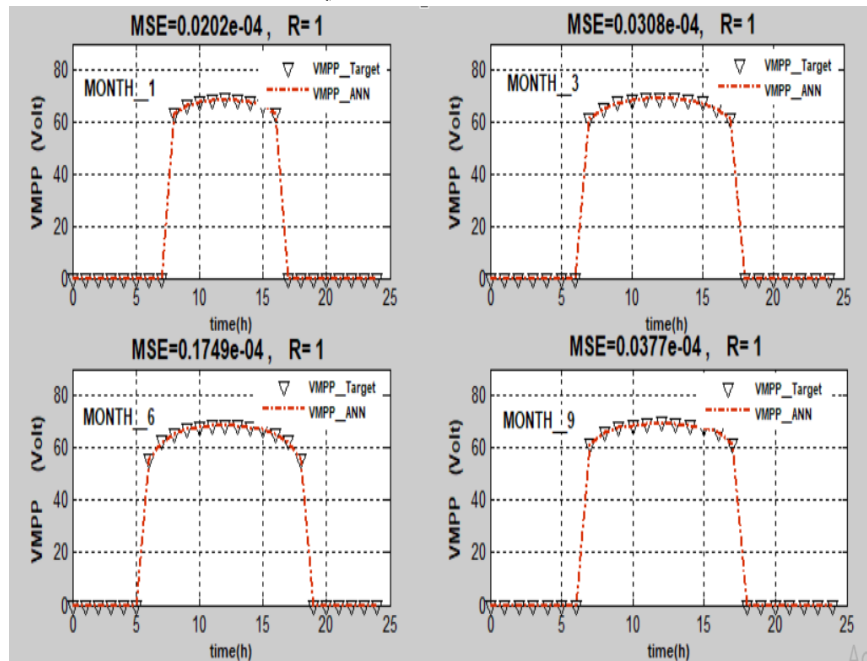
الشكل (15) قيم توتر الدارة المفتوحة الناتجة عند تغيرات الإشعاع الشمسي لليوم 21 لكل من الأشهر الأربعة.

يظهر الشكل (15)، قيم توتر الدارة المفتوحة النظرية V_{oc} الناتجة من العلاقة (5)، عند تطبيق قيم الإشعاع الشمسي الساعي لليوم 21 لكل من الشهر الأول، الثالث، السادس والتاسع لمدينة اللاذقية. بينما يظهر الشكل (16)، قيم التوتر V_{MPP} الموافقة لقيم توتر الدارة المفتوحة V_{oc} الناتجة بتطبيق العلاقة (6). وبالتالي بهذه الطريقة النظرية، تمكنا بسهولة وبساطة من تحديد قيم التوتر V_{oc} نظريا. وبذلك، تغلبنا على المشاكل العملية الناتجة عن فصل نظام PV عن الحمل لقياس توتر الدارة المفتوحة أثناء العمل، عند تغير سويات الإشعاع ودرجة الحرارة مما ينتج عنه فقدان بالطاقة خلال عملية القياس، ومما ينتج عنه تخفيض أداء المتتبع المرتكز على استخدام تقنية توتر الدارة المفتوحة لمتتبع نقطة MPP. من جهة أخرى، تمكنا بسهولة من تحديد قيم توتر التشغيل الأمثل V_{MPP} لنظام PV، وذلك بالاستفادة من العلاقة الخطية بين التوتر V_{oc} و V_{MPP} .



الشكل (16) قيم توتر التشغيل الأمثل الناتجة عند تغيرات الإشعاع الشمسي لليوم 21 لكل من الأشهر الأربعة.

2- تقييم أداء نموذج مقدر التوتر VMPP-ANNE العصبوني:

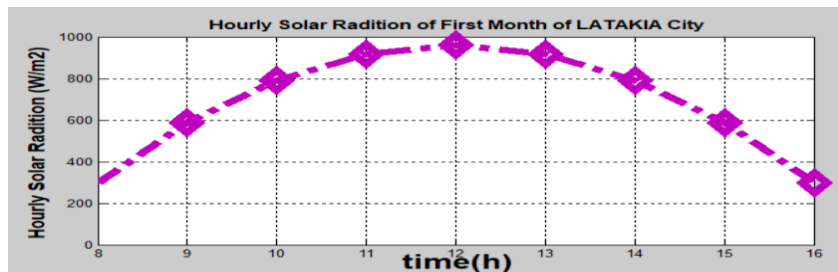


الشكل (17) قيم التوتر النظرية والمقدرة الناتجة عند تغير شدة الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة.

اعتمدنا في بناء نموذج مقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE، على استخدام قيم التوتر V_{MPP} المستخدمة كمدخلات لتدريب الشبكة العصبونية MLFFNN، والموافقة لقيم التوتر الأمثل النظرية V_{MPP_Target} . يمكننا الآن اختبار الكفاءة العملية لأداء نموذج مقدر التوتر VMPP-ANNE الناتج، وذلك بمقارنة نتائج خرج النموذج V_{MPP_ANN} مع قيم التوتر النظرية V_{MPP_Target} الناتجة عند نفس الشروط الجوية لتغيرات شدة الإشعاع الشمسي الموافقة لليوم 21 لكل من الشهر الأول، الثالث، السادس والتاسع لمدينة اللاذقية كما هو مبين في الشكل (17). تظهر نتائج الشكل (17) التقارب كبير بين قيم التوتر النظرية V_{MPP_Target} والمقدرة V_{MPP_ANN} الناتجة على مدار اليوم لكل من الشهور الأربعة. كما يظهر الشكل القيم الناتجة لمتوسط مربع الخطأ MSE ومعامل الارتباط R الناتجة باستخدام قيم التوتر النظرية V_{MPP_Target} والمقدرة V_{MPP_ANN} ، والتي تبين كفاءة مقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE المقترح.

3- تحليل وتقييم أداء المتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح لتتبع نقطة MPP

يعتمد تقييم أداء المتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح لتتبع نقطة MPP، على مقارنة نتائج المحاكاة الناتجة باستخدامه في بيئة Matlab/Simulink، مع تلك الناتجة باستخدام كل من والمتتبعات المرجعية MPPT-ANN، MPPT-FLC، MPPT-INC، ومع حالة عدم استخدام متتبع Without- MPPT والممثلة لحالة الوصل المباشر للنظام PV مع الحمل. لغرض انجاز المحاكاة، قمنا بتطوير برنامج في Matlab باستخدام المعادلات الرياضية المعروفة للإشعاع الشمسي المائل، وذلك لحساب قيم الإشعاع الشمسي النظرية لليوم 21 من كانون الثاني لمدينة اللاذقية، حيث اعتمدنا فقط القيم للإشعاع الموافقة لساعات السطوع الشمسي من الساعة الثامنة صباحاً حتى السادسة عشر مساءً كما هو مبين في الشكل (18). حيث تكون قيم الإشعاع الشمسي معدومة خارج هذا المجال.



الشكل (18) قيم الإشعاع الشمسي النظرية المحسوبة لليوم 21 من شهر كانون الثاني الموافق لساعات السطوع الشمسي.

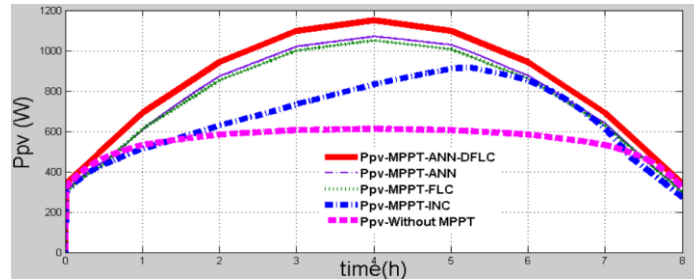
3-1 نتائج خرج نظام PV الناتجة باستخدام المتتبعات المذكورة وبدون متتبع

تظهر الأشكال (19)، (20)، (21) على التوالي، نتائج المحاكاة الممثلة لمنحنيات الاستطاعة، التوتر والتيار لخرج نظام PV والناتجة عند تتبع نقطة MPP، باستخدام كل من المتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح والمتتبعات المرجعية MPPT-ANN، MPPT-FLC، MPPT-INC، ومع حالة عدم استخدام متتبع Without- MPPT. كما يظهر الشكل (22) قيم نسب التشغيل الناتجة باستخدام كل من المتتبعات المذكورة.

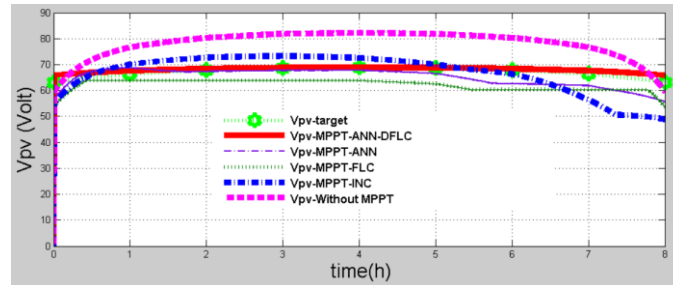
الجدول (4) عامل كفاءة نظام PV الناتج باستخدام كل من المتتبع MPPT-ANN-DFLC والمتتبعات المرجعية MPPT-ANN، MPPT-FLC، MPPT-INC، ومع عدم استخدام متتبع Without-MPPT.

التوقيت خلال اليوم 21 من شهر كانون الثاني [h]	شدة الإشعاع الشمسي [W/m ²]	η_{pv} MPPT-ANN-DFLC	η_{pv} MPPT-ANN	η_{pv} MPPT-FLC	η_{pv} MPPT-INC	η_{pv} Without-MPPT
10	791.79	1.00	0.934	0.902	0.673	0.623
12	959.31	1.00	0.931	0.9143	0.726	0.532
15	586.80	1.00	0.9249	0.889	0.859	0.778

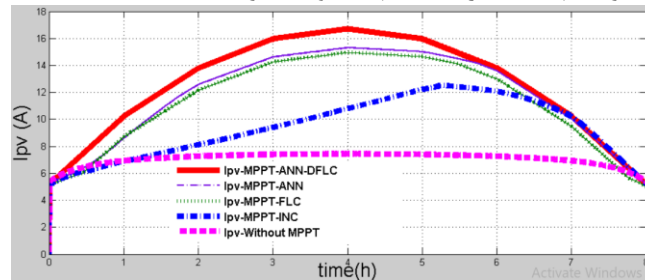
بالتالي تظهر المنحنيات السابقة، تفوق أداء المتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح على أداء جميع المتتبعات الأخرى. حيث يلاحظ زيادة قيم الاستطاعة الناتجة لخرج نظام PV في حالة استخدام المتتبع المقترح، مقارنة مع استخدام المتتبعات المرجعية الأخرى ومع عدم استخدام متتبع. وهذا ما تظهره أيضاً النتائج المبينة في الجدول (4)، حيث أن قيم عامل كفاءة نظام PV هي أفضل بكثير باستخدام المتتبع المقترح. حيث تم تحديد قيم عامل الكفاءة η_{PV} للنظام PV، بقسمة قيمة استطاعة خرج نظام PV عند ساعة معينة خلال اليوم، على قيمة الاستطاعة النظرية العظمى P_{MPP} الناتجة عند نفس شدة الإشعاع الشمسي الساعي من اليوم 21 من شهر كانون الثاني لمدينة اللاذقية.



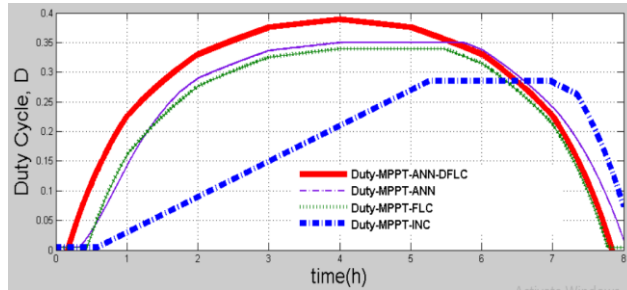
الشكل (19) استطاعة خرج نظام PV الناتجة باستخدام المتتبع المقترح، المتتبعات المرجعية وبدون استخدام متتبع.



الشكل (20) توتر خرج نظام PV الناتج باستخدام المتتبع المقترح، المتتبعات المرجعية وبدون استخدام متتبع.



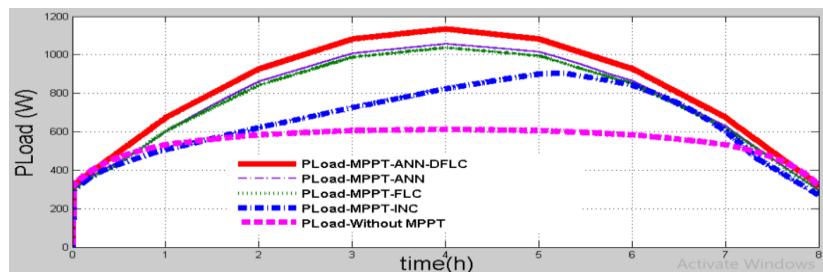
الشكل (21) تيار خرج نظام PV الناتج باستخدام المتتبع المقترح، المتتبعات المرجعية وبدون استخدام متتبع.



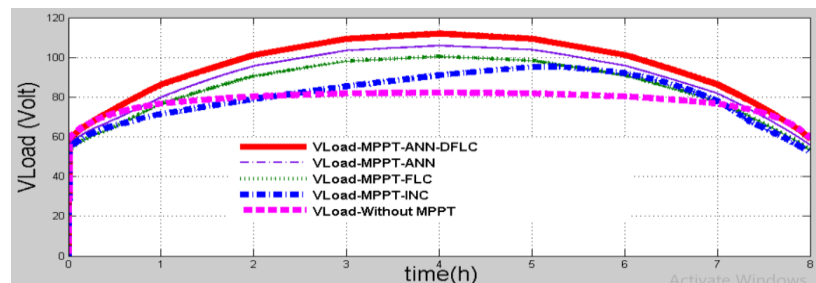
الشكل (22) نسبة التشغيل D الناتجة باستخدام المتتبع المقترح، المتتبعات المرجعية.

2-3 نتائج خرج المبدل رافع الجهد المستمر

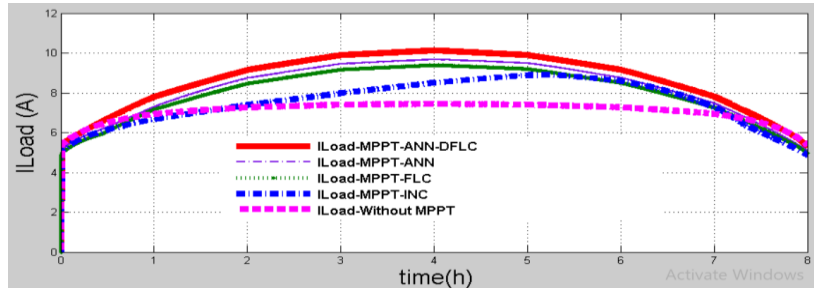
تظهر الأشكال (23)، (24)، (25)، (26) على التوالي، نتائج المحاكاة الممثلة لمنحنيات الاستطاعة، التوتر والتيار للحمل والناتجة عند استخدام كل من المتتبعات المذكورة ومع حالة عدم استخدام متتبع. حيث يلاحظ أنه تتساوى نتائج الحمل مع نتائج خرج نظام PV عند حالة الوصل المباشر للنظام PV مع الحمل، نتيجة عدم استخدام مبدل ومتتبع. ويمكن ملاحظة أيضاً بمقارنة نتائج خرج المبدل مع نتائج دخله الموضحة في الفقرة السابقة، نلاحظ أن منحنيات استطاعة خرج الحمل P_{Load} هي أقل بقليل من استطاعة خرج نظام P_{pv} ، وذلك نتيجة الضياعات الناتجة في مبدل الجهد. كذلك، نلاحظ أن توتر خرج الحمل V_{Load} أكبر من V_{pv} توتر خرج النظام PV، بينما تيار خرج الحمل I_{Load} أصغر من I_{pv} عند استخدام كل من المتتبعات المذكورة. وكذلك، يمكن تبيان دور المبدل في رفع التوتر وخفضه التيار عند الخرج، وذلك بمقارنة النتائج المبينة في الشكل (26)، والتي تظهر مقارنة نتائج خرج المبدل وخرج نظام PV الناتجة باستخدام المتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح.



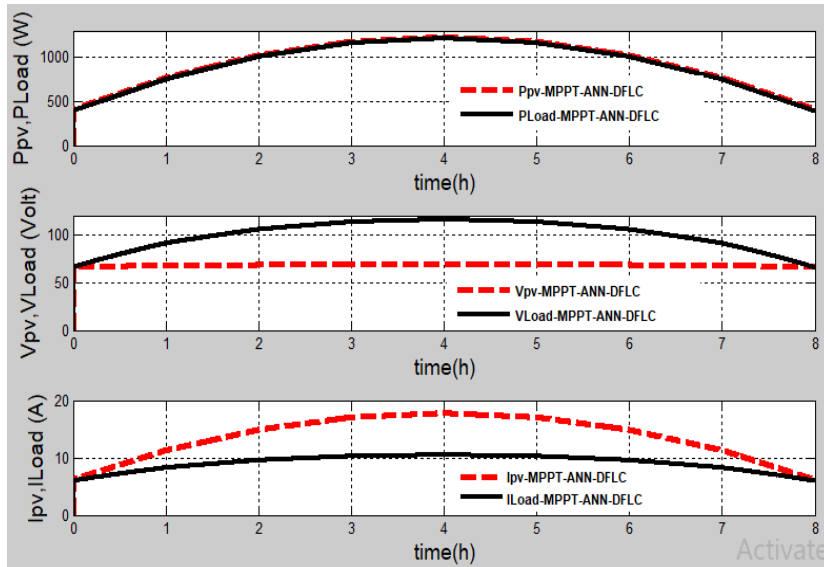
الشكل (23) استطاعة الحمل الناتجة باستخدام المتتبع المقترح، المتتبعات المرجعية وبدون استخدام متتبع.



الشكل (24) توتر الحمل الناتج باستخدام المتتبع المقترح، المتتبعات المرجعية وبدون استخدام متتبع.



الشكل (25) تيار الحمل الناتج باستخدام المتتبع المقترح، المتتبعات المرجعية وبدون استخدام متتبع.



الشكل (26) مقارنة نتائج خرج المبدل وخرج نظام PV الناتجة باستخدام المتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح.

3-3 تقييم أداء المتتبع MPPT-ANN-DFLC المطور

يمكننا استخلاص الملاحظات والاستنتاجات التالية، من نتائج المحاكاة الموضحة في الأشكال السابقة:

- ✓ يعود الأداء الأفضل للمتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح في تتبع MPP، لارتكازه من جهة على استخدام نموذج مقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE، الذي شكل نموذج رياضي مكن من تقدير توتر التشغيل الأمثل بدقة، وبشكل مباشر ودون الحاجة لفصل نظام PV عن الحمل، ودون الحاجة لاستخدام المعادلات الرياضية اللاخطية لنظام PV. من جهة أخرى، بمقارنة منحنيات نسب التشغيل الموضحة في الشكل (22) والناتجة باستخدام جميع المتتبعات المذكورة، نلاحظ وجود تأخر زمني في سرعة المتتبعات المرجعية في تحديد نسب التشغيل وهذا مرتبط بالأداء الديناميكي لكل من هذه المتتبعات. بالمقابل نلاحظ سرعة المتتبع المقترح في تحديد نسب التشغيل عند تغيرات شدة الإشعاع الشمسي الساعية، وهذا يعود للأداء الديناميكي العال للمتحكم العائم DFLC المقترح في تحديد نسب التشغيل المثلى بسرعة أكبر مما مكن من التحكم الفعال في دورة عمل مبدل رافع الجهد المستمر.
- ✓ تفوق الأداء الديناميكي للمتتبع MPPT-ANN-DFLC المقترح، يعود أيضاً لبعض سلبيات عمل المتتبعات المرجعية، والتي تضعف من كفاءة أداء هذه المتتبعات والتي نوردتها فيما يلي:
 - يعمل المتتبع العصبوني MPPT-ANN بخطوة ثابتة لتغير خطوة نسبة التشغيل، حيث لا يرتبط هذا التغير بمقدار تغيرات الاستطاعة ΔP وتغيرات التوتر ΔV ، وإنما يتعلق هذا التغير فقط بمقدار ΔP و ΔV . وبالتالي، لا

يحقق المتتبع العمل عند نقطة MPP، نتيجة تذبذب تغير نسبة التشغيل بشكل دائم وهذا من شأنه أن يضعف الأداء الديناميكي للمتتبع.

- يعتمد المتتبع العائم MPPT-FLC على استخدام القياسات الكهربائية لخرج نظام PV والتي ترتبط بشكل غير خطي بتغيرات شدة الاشعاع الشمسي، مما ينتج عنه تباطؤ سرعة عمل المتتبع في تتبع نقطة MPP.
 - يعتمد عمل المتتبع التقليدي MPPT-INC على العمل بخطوة ثابتة لتغير نسبة التشغيل، وهذا ينجم عنه أحداث تذبذب في قيمة نسبة التشغيل ويسبب وجود اهتزازات ثابتة ودائمة في استجابة استطاعة خرج نظام PV، وهذا يضعف كفاءة أداء المتتبع MPPT-INC.
- بالنتيجة، يمكن تصنيف الأداء الأفضل للمتتبعات عند تتبع نقطة MPP وفق ما يلي: الأداء الأفضل للمتتبع المقترح MPPT-ANN-DFLC، يليه المتتبع العصبوني MPPT-ANN، ثم يليه المتتبع العائم MPPT-FLC ثم يليه المتتبع التقليدي MPPT-INC.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث العمل على تطوير نموذج جديد لمتتبع عصبوني-عائم MPPT-ANN-DFLC لتتبع نقطة MPP لنظام PV. أظهرت نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة Matlab/Simulink، تفوق أداء المتتبع المقترح على المتتبعات المرجعية الأخرى. نهاية يمكن القول ما يلي:

- ✓ حقق المتتبع المقترح عامل كفاءة نظام PV، أفضل بكثير مقارنة مع استخدام المتتبعات المرجعية الأخرى.
- ✓ ساهم استخدام نموذج مقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE الناتج باستخدام قاعدة بيانات التدريب الناتجة من العلاقة النظرية لتوتر الدارة المفتوحة، في الاستغناء عن تحديد قيم توتر الدارة المفتوحة تجريبياً والذي يتطلب عادة فصل نظام PV عن الحمل، مما ينتج عنه فقد وضياح في الطاقة أثناء عملية قياس توتر الدارة المفتوحة المستخدم لتحديد التوتر VMPP.
- ✓ ساهم استخدام المتحكم العائم من تحقيق ضبط خرج النظام PV عند توتر التشغيل الأمثل خرج مقدر التوتر العصبوني VMPP-ANNE، مما نتج عنه دقة عمل نظام PV عند نقطة MPP. وبالتالي، هذا مكن من الاستغناء عن استخدام متحكم PI، والذي لا يبدي أداءً ديناميكياً جيداً عند التحكم بالانظمة اللاخطية كنظم PV.
- ✓ نوصي بضرورة استخدام متتبع MPPT لتحسين الاستطاعة الناتجة لنظام PV بشكل واضح مقارنة مع حالة عدم استخدام متتبع MPPT. وبالتالي، يساهم استخدام متتبع في تقليل عدد الألواح الشمسية المستخدمة، ويخفض من الكلفة الاقتصادية لنظم توليد الطاقة الكهروضوئية.
- ✓ نوصي بتطوير نماذج أخرى لتقدير توتر التشغيل الأمثل، كاستخدام الخوارزميات الجينية ومقارنة نتائجها مع نتائج البحث.

References:

- [1] SAAD, M.; ABOUBAKER, H.; ABDELZIZ, G. *Photovoltaic system with quantitative comparative between an improved MPPT and existing INC and P&O methods under fast varying of solar irradiation*. Energy Reports 4, 2018, 341-350.
- [2] MOSTEFA, K.; MADJID, B. *Artificial intelligence-based maximum power point tracking controllers for Photovoltaic systems: Comparative study*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 69, 2017, 369-386.

- [3] SLAMET, K.; ESTIKO, R.; ASEP, N.; GHANI, R. *Comparison of Fuzzy Logic and PI MPPT Algorithm with Indirect Controller for PV Systems*. International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology 3, 2017, 25–31.
- [4] THAMEUR, O.; CHERIF, L.; ADRIAN, I.; GUL, K. *Fuzzy Logic-based Maximum Power Point Tracking for a Solar Electric Vehicle*. Acta Polytechnica Hungarica 15, 2018, 133-156.
- [5] KALAIARASI, N.; NAGALAKSHMAIAH, E.; SEKHAR, D.; PARAMASIVAM, S. . *Development and Analysis of ANN based MPPT and SL Z-Source Inverter for Photovoltaic Systems*. International Science Press IJCTA, 9, 2016, 313-323.
- [6] HARRAG, A.; MESSALTI, S. *IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances*. Energy Procedia 157, 2019, 362-374.
- [7] ELGHARBI, A.; MEZGHANI, D.; MAMI, A. *A Maximum Power Point tracking Method based on Artificial Neural Network for PV System*. International Journal of Advances in Engineering & Technology 5, 2012, 130-140.
- [8] 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.
- [9] MESSALTI, S.; HARRAG, A.; LOUKRIZ, A. *New neural networks MPPT controller for PV systems*. International Renewable Energy Congress, 2015, 1-6.
- [10] BHARATH, K.; SURESH, E. *Design and Implementation of Improved Fractional Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Applications*. International Journal of Renewable energy Research 7, 2017, 1108-1113.
- [11] YU, B. *Study on Maximum Power Point Tracking Method Using Open Circuit Voltage*. International Journal of Applied Engineering Research 11, 2016, 9763-9766.
- [12] PRATIMA, D. *Maximum Power Tracking Based Open Circuit Voltage Method for PV System*. Energy Procedia 90, 2016, 2-13.