

تصنيف وتحليل خوارزميات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية للأنظمة الكهروضوئية

عهد محمد زينه *

(تاريخ الإيداع 4 / 7 / 2018. قُبل للنشر في 27 / 9 / 2018)

□ ملخص □

تُناقش هذه المقالة أساليب ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية (MPPT) للأنظمة الكهروضوئية ميكانيكياً و إلكترونياً، وتقدم تصنيفاً لخوارزميات (MPPT) الإلكترونية ضمن ثلاث فئات رئيسة: المستقلة عن اللوح الكهروضوئي، المتصلة باللوح، الخوارزميات الهجينة.

تشكل هذه الدراسة مرجعاً لحل نقطة ضعف العمل بالأنظمة الكهروضوئية التي تتمثل بانخفاض كفاءة تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية عبر خلايا PV وبالسلك غير الخطي لأنظمة (PV) وكذلك بالتغيرات في الحد الأقصى من القدرة الكهربائية وفقاً لمستوى الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة.

يقدم البحث طرق MPPT الأشهر ومبدأ عمل وميزات ومساوئ تطبيق كل منها، وتلخص نتائج مقارنة خوارزميات MPPT من حيث الصنف و التطبيق (رقمي، تشابهي) والبارامترات المتحسسة وسرعة التقارب والدقة ودرجة التعقيد. يحلل البحث أثر تطبيق هذه الخوارزميات على رفع الاستجابة الديناميكية للنظام الكهروضوئي لتغيرات درجة الحرارة والإشعاع وذلك عبر محاكاة أجزاء النظام المدروس في بيئة Matlab / Simulink، تُظهر المحاكاة والنتائج العملية أفضلية بعض الخوارزميات عن غيرها من حيث الكفاءة والاستجابة الديناميكية ضد التغيرات المفاجئة في الإشعاع ودرجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الكهروضوئية (PVs)، خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT)، زيادة الناقلية (IC)، الارتياب والملاحظة (P&O)، خوارزمية التحكم بالحدود القصوى (ESC)، جهد الدارة المفتوحة الجزئي (OCV)، تيار الدارة القصيرة الجزئي (OCC)، التحكم المنطقي الضبابي (FL)، الشبكة العصبونية (NN).

* ماجستير - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سوريا.

Classification and analysis of the Maximum Power Point Tracking algorithms of Photovoltaic Systems

Ahed Mohammad Zina *

(Received 4 / 7 / 2018. Accepted 27 / 9 / 2018)

□ ABSTRACT □

The article discusses the maximum power point tracking methods of photovoltaic systems, Mechanics and Electronics, and provides a classification of electronic MPPT algorithms into three main categories: Independent of the photovoltaic panel, Related to the photoelectric panel, Hybrid algorithms.

This study can provide a reference for the solution of the weak point of PV systems, which is the low efficiency of converting solar radiation to electrical energy through PV cells and the nonlinear behaviour of PV systems as well as changes in the maximum power according to the level of solar radiation and temperature.

The research presents the most popular MPPT methods, the working principle, features and disadvantages of each application, and summarizes the results of comparison of MPPT types of algorithms in terms of class and application (digital, simulated), sensitivity parameters, speed of convergence, accuracy and complexity.

The research analyses the effect of the implementation of these algorithms on raising the dynamic response of the PV system to changes in temperature and radiation by simulating the parts of the studied system in the Matlab / Simulink environment.

Simulation and practical results show the priority of some algorithms for others in terms of efficiency and dynamic response against sudden changes in solar radiation and temperature.

Key words: Photovoltaic system(PVs), Maximum power point tracking (MPPT), Increment Conductance(IC), Perturbation and Observation(P&O), Extremum seeking control method (ESC), Fractional Open-Circuit Voltage(OCV), Fractional Short-Circuit Current(OCC) , Fuzzy Logic Control(FL), Neural Network(NN).

* Master in Department Of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University Tartous- Syria.

مقدمة:

في ظل التحدي الطاقى المتمثل بإزدياد الطلب (المقدر عالمياً بحوالي 30-60 تيراواط في عام 2050 م) إضافة إلى ارتفاع تكلفة استهلاك الوقود الأحفوري وتوقع نفاذ مصادر الطاقة التقليدية (الفحم، البترول، والغاز) حتى عام 2050م، إضافة إلى خطورة استثمار الطاقة النووية، ناهيك عن ارتفاع معدل التلوث عن الحدود المسموح بها والذي يسبب تغيرات مناخية تولد بدورها الغازات الدفيئة (Greenhouse gases) الناتجة عن الإحتباس الحراري (Global Warming) والذي سيؤدي بدوره إلى مجموعة من العواقب البيئية العالمية بناءً على تقرير اللجنة الحكومية لتغير المناخ IPCC (في قمة كوبنهاجن) ومن بينها تزايد الجفاف والفيضانات وذوبان الجبال الجليدية وزوال المدن الساحلية و ظهور الموجات الحارة وغيرها [1].

نتيجة لماسبق ازداد التوجه العالمي إلى تحقيق الاستدامة الطاقية باستخدام مصادر نظيفة باختلاف أنواعها بهدف توفير الطاقة الآمنة بصورة اقتصادية و تحقيق الاستدامة والاستقرار المناخي وخفض معدل استهلاك الوقود التقليدي الذي سيؤدي بدوره إلى خفض انبعاثات غاز ثاني اوكسيد الكربون المتوقع أن تكون نسبته 40% لتصل إلى حوالي 475 طن في عام 2050 م.

حسب دراسات وكالة الطاقة الدولية (IEA)، الطاقة الشمسية هي واحدة من أهم مصادر الطاقة المتجددة الواعدة وتكلفة الحصول عليها ستكون أقل من مثيلاتها من المصادر التقليدية نتيجة لعمليات البحث والتطوير المستمرة والتوسع المتوقع في استخدام هذه التقنيات في الأنشطة كافة حيث أنه من المتوقع أن حاجة العالم سيتم تأمينها كاملة باستخدام الطاقة الشمسية سنويا بحلول عام 2050 م [2].

تعد منطقة شرق المتوسط والتي تقع سورية ضمنها من أنسب المناطق حول العالم للاستثمار كمزارع لإنتاج الطاقة الكهربائية من الشمس (في سورية: البادية)، وقد بينت دراسة الأسكوا (UN-ESCWA) أن عدد ساعات الشمس التي تتعم بها سورية والمنطقة تفوق الثلاثة آلاف ساعة سنوياً أي أن أشعة الشمس تكاد لا تغيب عنها طيلة أيام السنة (335 يوماً خلال 365 يوماً من أيام السنة) وهي من المعدلات المرتفعة جداً بالنسبة إلى باقي مناطق العالم ككندا أو روسيا مثلاً حيث لا تتجاوز فيها عدد ساعات الشمس المشرقة حاجز الألف ساعة سنوياً [3].

كما تبين خرائط الأطلس العالمي الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) أن القيمة المتوسطة للطاقة الشمسية الساقطة على السطح الأفقي في سوريا تقدر بحوالي $5 \text{ [Kwh/m}^2\text{]}$ في اليوم وهذه القيمة عالية جداً مقارنةً مع مناطق أخرى في العالم حيث تبلغ مثلاً في ألمانيا نصف القيمة السابقة بالتالي تعتبر معظم المناطق السورية ذات سوية إشعاعية جيدة على مدار العام إضافة إلى عدد الأيام المشمسة الكبير نسبياً خلال السنة [4].

أهمية البحث وأهدافه:

يناقش البحث عموماً استخدام الطاقة الكهروضوئية لحل مشاكل الطاقة في سورية وتتركز الدراسة حول تصنيف خوارزميات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية من حيث اعتماد مبدأ عملها على فصل اللوح عن العمل مؤقتاً ويقارن فيما بينها وذلك من أجل استرجار الطاقة القصوى وتحقيق الاستفادة الأعظمية من الطاقة الشمسية ومن مكونات المنظومة الكهروضوئية وفق الخطوات التالية:

- شرح مبدأ عمل ومكونات النظام الكهروضوئي بشكل عام.
- تصنيف تقنيات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية إلى تقنيات ميكانيكية وخوارزميات تحكم الكترونية.

- تصنيف خوارزميات ملاحقة MPP الإلكترونية إلى:
 1. الخوارزميات التي لا تحتاج فصلاً مؤقتاً للوح PV (online Methods): خوارزمية الملاحظة والارتياب (P&O)، وخوارزمية التحكم بالقيم الحديدية (ESC).
 2. الخوارزميات التي تحتاج إلى فصل مؤقت للوح PV (offline Methods): الملاحقة باستخدام الشبكات العصبونية (ANN) وخوارزمية تيار الدارة القصيرة (SCC) وخوارزمية جهد الدارة المفتوحة (OCV).
 3. الخوارزميات الهجينة (hybrid Methods): تعتمد على دمج الخوارزميات السابقة ضمن حلقات متداخلة.
- مناقشة محاسن ومساوئ العمل بالخوارزميات المدروسة.
- استخدام النمذجة والمحاكاة في بيئة (SIMULINK) MATLAB من أجل تطبيق الخوارزميات المدروسة على نظام PV، ومقارنة الاستجابة الديناميكية للنظام المصمم في ظروف الإشعاع المختلفة ضمن المجال (20-40°C) (500-1000W/m²).
- استخدام النماذج المصممة من أجل استنتاج الخوارزميات الأمثل للعمل على التطبيقات المختلفة من حيث المردود سرعة الاستجابة .

منهجية البحث:

يعتمد البحث على المنهج الوصفي والتحليلي:

اعتمد المنهج الوصفي لدراسة الوضع الطاقى عالمياً باستخدام دراسات اللجنة الحكومية للمناخ (IPCC) ودراسات وكالة الطاقة الدولية (IEA)، ودراسة وضع الإشعاع في سوريا اعتماداً على: خرائط الأطلس العالمي المُقدّم من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)، وعلى تقارير منظمة الأسكوا (UN-ESCW).

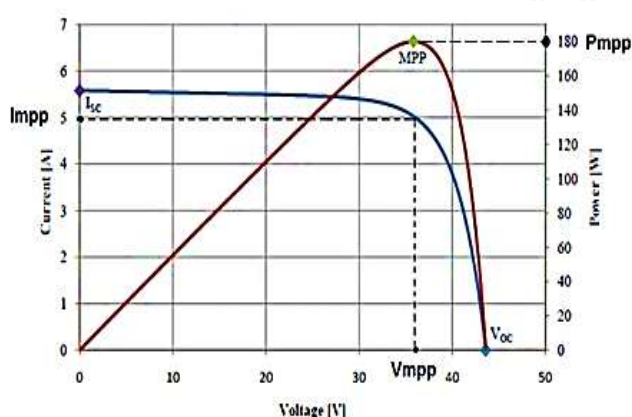
و اعتمد المنهج التحليلي

- لدراسة مبدأ عمل ومكونات النظام الكهروضوئي.
- لتحليل تقنيات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية الميكانيكية والإلكترونية.
- لإجراء دراسة تفصيلية لتصنيف خوارزميات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية إلى (online Methods) و (offline Methods) و (hybrid Methods) وتحليل مبدأ عمل الخوارزميات العاملة على كل صنف وميزات ومساوئ كل منها.
- لدراسة وتصميم أنظمة الملاحقة بالخوارزميات المدروسة باستخدام بيئة Matlab واستخدام قيم الإستطاعة ومنحنيات الإستطاعة كتابع للزمن عند تغير قيم الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة في مقارنة نتائج الملاحقة باستخدام خوارزمية الملاحظة والارتياب (P&O)، وخوارزمية التحكم بالقيم الحديدية (ESC) وباستخدام الشبكات العصبونية (ANN) وخوارزمية تيار الدارة القصيرة (SCC) وخوارزمية جهد الدارة المفتوحة (OCV)، الخوارزميات الهجينة hybrid Methods التي تتكون من حلقتين متداخلتين: الحلقة الأولى تعتمد على خوارزمية جهد الدارة المفتوحة (OCV) والحلقة الثانية تعتمد على خوارزمية (P&O).
- لاستنتاج كفاءة الخوارزميات المدروسة وأفضلية اختيارها وفقاً للتطبيقات العملية حسب صنف وسرعة تقارب ومردود ودقة وتعقيد تطبيق كل منها.

النتائج والمناقشة:

1 مبدأ عمل نظام PV:

في ظروف التشغيل العادية يكون تيار (وتوتر) خلية PV متعلقاً بالحرارة و بشدة الإشعاع الساقط على الخلية كما أنه يتأثر بالتظليل (كالغبار والأوساخ وغيرها) والتغيم، وبما أن هذين البارومتريين متغيرين بصورة مستمرة خلال النهار إذاً ستتغير خصائص خلية PV بشكل مستمر خلال النهار، يبين الشكل (1) منحنى (I-V) ومنحنى (P-V) للوح الشمسي ونستنتج من المنحني أن النظام يعمل بالاستطاعة العظمى عند نقطة وحيدة تمثل ركبة المنحني يكون عندها جهد وتيار خرج اللوح أعظميين (V_{mpp}, I_{mpp}) MPP [5].



الشكل(1): منحنى (I-V) ومنحنى (P-V) للوح الشمسي

وبما أنه لا بد من الاستغلال الأمثل للمنظومة الكهروضوئية فلا بد إذاً من ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT) عن طريق ضمان عمل مبدلة DC/DC بالشكل الأمثل، ولكي تعمل هذه المبدلة عند MPP فإنه من الضروري إيجاد خوارزمية تحكم لقيادة (تشغيل) المفتاح الإلكتروني في المبدلة باستخدام أكواد برمجية وطرق متبعة عالمياً للحصول على استطاعة خرج أعظمية عند العمل بالتوتر والتيار المقابلين لنقطة المنحني الموافقة لنقطة الاستطاعة الأعظمية، علماً أن هذه النقطة غير ثابتة و تتعلق بالإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة [5-6].

2 تقنيات ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية:

هناك نوعان من أنظمة الملاحقة [7]:

- أنظمة ملاحقة ميكانيكية: (منظومة تتبع الشمس) تعتمد هذه الآلية على ربط الألواح الشمسية على حوامل قابلة للدوران بحيث تلاحق الأشعة الشمسية خلال فترات النهار وتحتاج هذه الآلية قبل تصميمها إلى دراسة وضع الإشعاع وزوايا وروده خلال فترات النهار ضمن المنطقة المدروسة، يعيب هذه الآلية حاجتها إلى مصدر طاقة ثانوي لتغذية المحرك الذي يحرك اللوح وبالتالي تُعد مُكلفة اقتصادياً كما أنها تتأثر سلباً بالعوامل الميكانيكية (صدأ، رطوبة، أوساخ ...) ولن نتطرق لهذه الآلية في بحثنا.

- أنظمة ملاحقة إلكترونية (خوارزميات التحكم): يوجد العديد من خوارزميات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية الإلكترونية، يمكن تحميل هذه الخوارزميات على حواسيب شخصية أو متحكمات صغيرة بغاية التحكم بدروة عمل مفتاح المبدلة للاقترب من العمل عند نقطة الاستطاعة الأعظمية، وتختلف هذه التقنيات بالعديد من الصفات منها الحاجة إلى الحساسات والتعقيد والكلفة ومجال التأثير والتعقب (الملاحقة) الصحيح عندما يتغير الإشعاع الشمسي أو الحرارة وغيرها. وعلى الرغم من اختلاف هذه التقنيات إلا أنها جميعاً تحاول إنتاج أكبر كمية من الإستطاعة من اللوح

الشمسي بأقل ضياعات ممكنة في الطاقة الواردة إلى اللوح. ويكلام آخر جعل مرحلة الملاءمة الأولى تعمل بالشكل الأمثل.

بشكل عام تشير الدراسات إلى أن هذه الطرق يمكن تصنيفها وفق ارتباط عملها باللوح ضمن ثلاثة أصناف سنستعرض في الفقرة الآتية هذه الأصناف والخوارزميات التي تندرج تحت كل صنف منها.

3 تصنيف خوارزميات ملاحقة MPP الإلكترونية:

كما ذكرنا أنفاً، يمكن تصنيف خوارزميات ال-MPP إلى ثلاثة أصناف رئيسة وتحت كل صنف تندرج مجموعة من الخوارزميات سوف نستعرض الأصناف الثلاثة والخوارزميات الأكثر شهرة:

3-1 الخوارزميات التي لا تحتاج فصلاً مؤقتاً للمنظومة (Online Methods):

تستخدم هذه الخوارزميات قيمة بارامترات خرج لوح PV اللحظية (جهد اللوح و تيار اللوح) من أجل توليد إشارات التحكم وتقسّم إلى:

3-1-1 الازتياب والملاحظة (Perturbation and Observation, P&O):

وهي من أكثر طرق MPPT شيوعاً، تعتمد على أخذ قراءات دورية للاستطاعة واستخدام الاضطراب في قيم الإستطاعة لإبقاء العمل عند نقطة الإستطاعة الأعظمية.

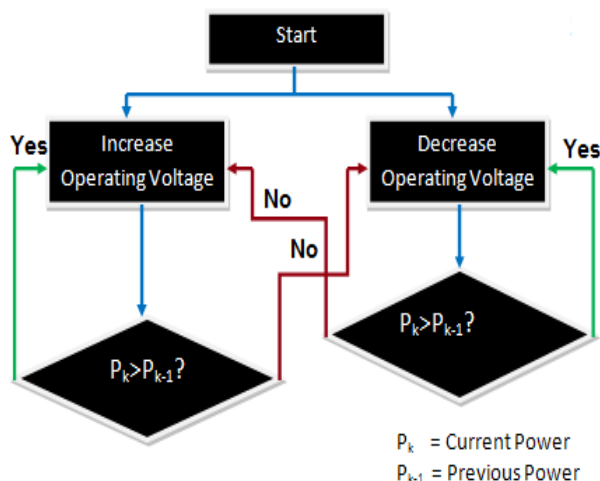
اعتماداً على مميزات الجهد/استطاعة P(V) لمنظومة PV المبينة في الشكل (2) في حالة الإشعاع المستقر ونقصان الطاقة فإن نقطة العمل تنتقل من A إلى B وفي حال زيادة الإشعاع سينتقل العمل إلى المنحني P₂ وستنتقل نقطة العمل من A إلى C وفي الحالتين سنحصل على اضطراب وبالتالي فإن نقطة التشغيل (نقطة العمل) تبتعد عن MPP وستبقى متباعدة طالما أن الإشعاع يتباين، ومن هذه المنحنيات نلاحظ أن تغير الإستطاعة بالنسبة للجهد (للتيار) في الجهة اليسرى موجباً $dP/dV > 0$ أما في الجهة اليمنى يكون $dP/dV < 0$ ، أي أن مشتق الاستطاعة بالنسبة للجهد (التيار) لمنظومة PV يساوي الصفر عند MPP وموجباً (سالِباً) على اليسار إذا كان سالِباً (موجباً) على اليمين كما يلي:

✓ عند الـ MPP يكون $(dI/dP = 0)$ $dV/dP = 0$.

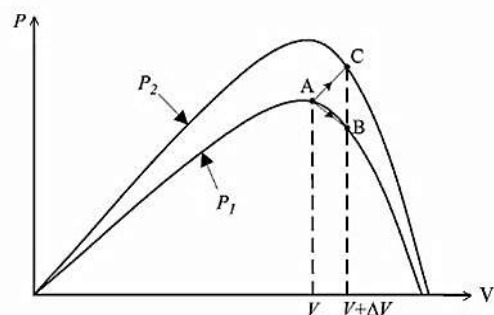
✓ على اليسار يكون $(dI/dP < 0)$ $dV/dP > 0$.

✓ على اليمين يكون $(dI/dP > 0)$ $dV/dP < 0$.

إذا كان جهد نقطة العمل لمنظومة PV متغيراً في اتجاه مُعطى وكان $dV/dP > 0$ فإن التغير سيجرّك نقطة عمل المنظومة باتجاه MPP. وهكذا تستمر خوارزمية P&O حتى تجعل جهد منظومة PV بنفس الاتجاه. أما إذا كان $dP/dV < 0$ فإن التغير في نقطة العمل سيبعد منظومة PV عن MPP. بالتالي تعكس خوارزمية P&O اتجاه التغير لتعيد نقطة العمل باتجاه MPP كما يبين الشكل (3):



الشكل(3): المخطط التدفقي لطريقة P&O



الشكل(2): منحنى (P-V) في طريقة P&O

- مميزات خوارزمية الارتباب والملاحظة:
 - طريقة قليلة الكلفة وغير معقدة وسهلة التطبيق
 - متطلباتها الحسابية منخفضة.
 - فعالة في حال العمل في الأوساط التي يتغير فيها الإشعاع بشكل بطيء.
 - تعطي قيمة MPPT صحيحة نسبياً ولا تحتاج إلى إعادة ضبط دوري.
- مساوي خوارزمية الارتباب والملاحظة:
 - على الرغم من تحقيق MPP إلا أن النظام يتابع اهتزازه مما يؤدي ذلك إلى ضياع مستمر في القدرة.
 - ضعف الملاحظة (من المحتمل أن تكون في الاتجاه الخاطئ بعيداً عن MPP).
 - يفشل النظام في حال العمل في ظروف تغير الإشعاع المستمر حيث تفترض خطية التغير بين الجهد والاستطاعة ولكن في حالة التغيرات الآتية مع الإشعاع فإن التغيرات في الاستطاعة لا تتناسب مع التغير في الجهد. بالنتيجة ليس من الممكن أن تحدد هذه الخوارزمية سواء كان التغير في الاستطاعة يتأثر بزيادة جهدها الخاص أو يتأثر بتغير الإشعاع.
 - يمكن زيادة دقة الخوارزمية بزيادة عدد العُنات المدروسة ولكن بالمقابل تصبح المنظومة أبطأ، وبالعكس تقليل عدد العينات يزيد السرعة على حساب الدقة [10,9,8].

3-1-2 خوارزمية التحكم بالقيم الحدية (ESC) Extremum seeking control method

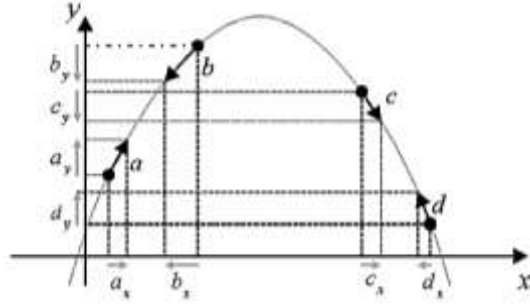
الشكل (5) يوضح سلوك خوارزمية البحث عن القيم الحدية. يتم تنظيم المعادلات التي تصف سلوك الدارة التماثلية التي تعمل كمكامل من أجل أربع قيم فعالة a,b,c,d:

$$\frac{dx}{dt} = k \varepsilon : \varepsilon = \bar{f}1, k \text{ is a constant} \quad (3)$$

$$g = \frac{dy}{dt} \quad (4)$$

والدارة المنطقية الرقمية المدمجة كنظام فرعي ينفذ التابع الآتي:

- ✓ إذا كانت $g < 0$ الخوارزمية تتغير إشارة ح: على اعتبار أن $(\varepsilon = \bar{f}1)$
- ✓ إذا كانت $g > 0$ الخوارزمية تحافظ على إشارة ح



الشكل(5): سلوك خوارزمية البحث عن القيم الحدية ESC

الحالة 1: الشعاع **a** يوصف الحركة التي تزداد فيها المركبتين الأفقية والعمودية $(dx/dt) > 0, (dy/dt) > 0$ ويبين أن مسار نقطة العمل يقترب من mpp وتقع على يسارها وبالتالي يجب أن يحتفظ المتحكم بقيمة المركبة الأفقية (K).

الحالة 2: الشعاع **b** يوصف الحركة التي تتناقص فيها المركبتان الأفقية والعمودية $(dx/dt) < 0, (dy/dt) < 0$ ويبين أن مسار نقطة العمل يبتعد عن mpp وعلى يسارها، وبالتالي يجب على الدارة المنطقية (النظام المضمن) تغيير عامل التباين الأفقي (K).

الحالة 3: الشعاع **c** يوصف الحركة التي تزداد فيها المركبة الأفقية وتتناقص فيها قيمة المركبة العمودية $(dx/dt) > 0, (dy/dt) < 0$ ويبين أن مسار نقطة العمل يبتعد عن mpp وعلى يمينها. في هذه الحالة يغير المتحكم إشارة عامل التباين للمركبة الأفقية (-K).

الحالة 4: الشعاع **d** يوصف الحركة التي تتناقص فيها المركبة الأفقية وتزداد فيها قيمة المركبة العمودية $(dx/dt) < 0, (dy/dt) > 0$ ويبين أن مسار نقطة العمل يتجه باتجاه mpp وعلى يمينها. في هذه الحالة يغير المتحكم إشارة عامل التباين للمركبة الأفقية (-K).

بما أن $dy/dx = (dy/dt)/(dx/dt)$ فإن الحالات الأربعة يمكن تلخيصها كما يلي:

$$\checkmark \text{ عندما } (dx/dt) = K \text{ عندما } (dy/dx) > 0$$

$$\checkmark \text{ عندما } (dx/dt) = -K \text{ عندما } (dy/dx) < 0$$

يتطابق المتغيران x و y لخوارزمية القيم الحدية مع جهد واستطاعة خرج اللوح على التوالي V_{PV} و P_{PV} ، ويتحقق تباين قيمة V_{PV} ، بتطبيق هذه المعادلات فإن الخوارزمية الحدية ستجبر نظام PV على الاقتراب من نقطة MPP عن طريق زيادة أو خفض جهد الخرج مع قيمة ثابتة للمشتق الزمني عبر التحكم بدورة عمل مقطع التيار المستمر DC/DC Chopper الذي يعمل كوسيط بين اللوح الشمسي والحمل.

• **مميزات العمل بطريقة الـ ESC:**

تعتبر طريقة مستمرة في التطور حيث أنها تزداد دقة بإزدياد ترددات عمل الدارات الرقمية والمفاتيح الإلكترونية وتتميز بسرعة التقارب في نقطة MPP التي تتعلق فقط بتردد عمل المفاتيح الإلكترونية.

• **مساوئ العمل بطريقة الـ ESC:**

ارتفاع درجة تعقيد تصميمها لأنها طريقة رقمية والإلكترونية في آن معاً [12,11].

3-2 الخوارزميات التي تحتاج إلى فصل مؤقت للوح (Offline Methods):

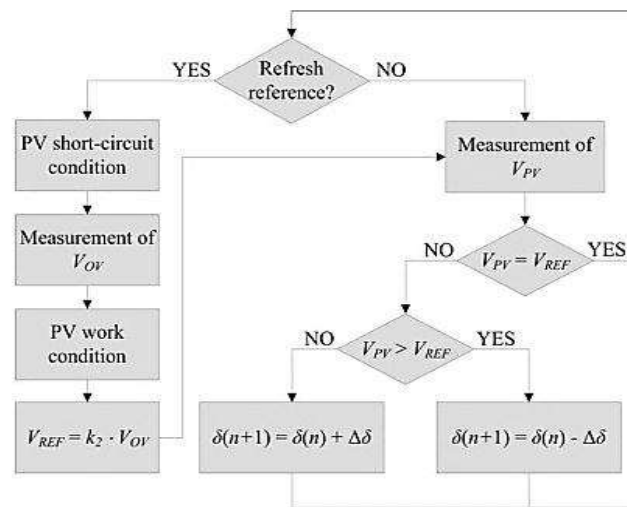
تستخدم هذه الخوارزميات قيمة بارامترات خرج لوح الـ PV الفيزيائية (الاسمية) من أجل توليد إشارات التحكم وتقسّم إلى:

3-2-1 جهد الدارة المفتوحة الجزئي (Fractional Open-Circuit Voltage):

تعتمد هذه الطريقة على أن قيمة V_{MPP} تعطى كنسبة مئوية من جهد الدارة القصيرة V_{oc} وتعتمد على الخطية في العلاقة بين V_{oc} و V_{MPP} للوح PV عند مستويات متغيرة من الإشعاع والحرارة وفق العلاقة التالية:

$$V_{MPP} \approx K_2 V_{oc} \quad (5)$$

K_2 : ثابت تتناسب (0.71 - 0.78) ويتعلق بخصائص صف الـ PV المستخدمة، وعادة يتم حسابه مسبقاً عن طريق التحديد التجريبي للـ V_{MPP} و V_{oc} لصف PV معينة عند مستويات مختلفة من الإشعاع والحرارة. إذا كان K_2 معروف عندئذ يمكن حساب V_{MPP} من العلاقة السابقة بعد قياس V_{oc} بشكل دوري عن طريق قصر مبدلة الاستطاعة بشكل مؤقت وبالتالي كخوارزمية تيار الدارة القصيرة تصنف هذه الخوارزمية من الخوارزميات التي تحتاج إلى فصل دوري للمنظومة (Offline methods) ولتفادي عملية الفصل يمكن أن نستخدم نوع خاص من الخلايا يُدعى (Pilot Cell) (لوح شمسي مخصص للاختبار يوضع في نفس ظروف التشغيل بشكل مستقل عن المنظومة). تتمثل هذه الطريقة بالمخطط التدفقي المبين في الشكل (6)، (ة تمثل Duty cycle).



الشكل (6): المخطط التدفقي لخوارزمية جهد الدارة المفتوحة

- مميزات العمل بخوارزمية جهد الدارة المفتوحة:
 - سهولة وقليلة الكلفة للتطبيقات التي لا تحتاج لنظام تحكم رقمي DSP أو معالج صغري.
 - الجهد المتولد من ديويدات وصلة PN يساوي تقريباً 75% من V_{oc} و بالتالي يمكن باستخدام التقريب قراءة جهد الديود لقياس V_{oc} وحساب V_{MPP} .
- مساوي العمل بخوارزمية جهد الدارة المفتوحة:
 - ضياع مؤقت في الاستطاعة بسبب عمليات الفصل والوصل المتكرر.

- العلاقة (5) هي العلاقة التقريبية الوحيدة، لأن صف PV عملياً لا تعمل أبداً عند MPP.
- تقترح هذه التقنية مساراً لجهد صف PV لتحديث K_2 لأن النقاط خارج K_2 غير فعالة بوجود التظليل الجزئي لصف PV، لكن هذا يزيد التعقيد والضياع في الاستطاعة وبالتالي تعتبر هذه الطريقة غير صحيحة بوجود التظليل الجزئي [9,7].

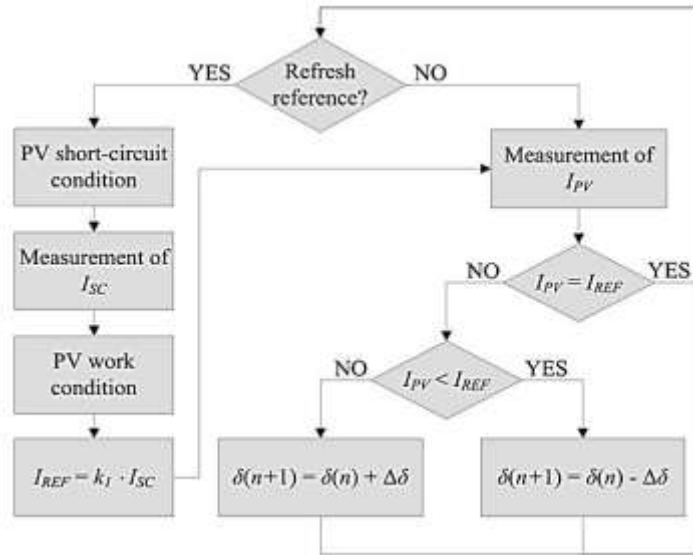
3-2-2 تيار الدارة القصيرة الجزئي (Fractional Short-Circuit Current):

في هذه الطريقة يتم تحقيق MPP بتغيير قيمة Duty cycle لمفتاح مقطع التيار المستمر عبر مقارنة القراءات الدورية لقيمة تيار الخلايا I_{PV} مع تيار مرجعي (I_{ref}) حيث أن التيار المرجعي هو التيار الأمثل لإنتاج الطاقة الأعظمية وبالتالي فهو يساوي I_{MPP} و يتناسب مع تيار القصر (I_{SC}) عند ظروف عمل مختلفة (عند تغيير الإشعاع S) كما هو مبين في المعادلة:

$$I_{MPP} \approx K_1 \cdot I_{SC} \quad (6)$$

حيث أن K_1 هو ثابت التناسب ويعتمد على مميزات الخلايا ويجب أن يتم تحديده مسبقاً أثناء أخذ قيم I_{SC} و V_{mpp} ويعطى بقيم بين (0.78-0.92).

تتمثل هذه الطريقة بالمخطط التدفقي المبين في الشكل (7)، (هـ تمثل Duty cycle).



الشكل (7): المخطط التدفقي لخوارزمية تيار الدارة القصيرة

• مميزات العمل بطريقة تيار الدارة القصيرة الجزئي:

تصنف هذه الخوارزميات من الخوارزميات التي تحتاج إلى فصل دوري للمنظومة (Offline methods) لأن حساب I_{sc} خلال العمل أمر صعب لذلك يتم عادة إضافة مفتاح إلى مبدلة الاستطاعة ليتم قصر صف PV بشكل دوري وبالتالي يمكن قياس I_{sc} باستخدام تيار الحساس. ولتفادي عملية الفصل يمكن أن نستخدم نوع خاص من الخلايا يُدعى Pilot Cell.

• مساوئ العمل بطريقة تيار الدارة القصيرة الجزئي:

عند حساب I_{sc} تنخفض استطاعة الخرج بسبب فصل المنظومة عن العمل، لذلك يجب اقتراح طريقة لتعويض K_1 لأن تعقب MPP يكون أفضل عند ظروف جوية متغيرة. لضمان MPPT الصحيح بوجود الحدود العليا للمتغيرات ينتقل جهد صف PV بشكل دوري من الدارة المفتوحة إلى الدارة المقصورة لتحديث K_1 . معظم أنظمة PV التي تستخدم I_{sc}

الجزئي تستخدم مولد إشارة رقمي أو حلقة تحكم مغلقة بسيطة (بتغذية عكسية) للتيار لتعويض الفقد في الإستطاعة وهذا الأمر يسبب زيادة في عدد العناصر والكلفة ويمكن تقليل الكلفة باستخدام مبدلة كالا Boost حيث يمكن استخدام المفتاح الموجود في المبدلة نفسها لقصر صف الـ PV [7, 9].

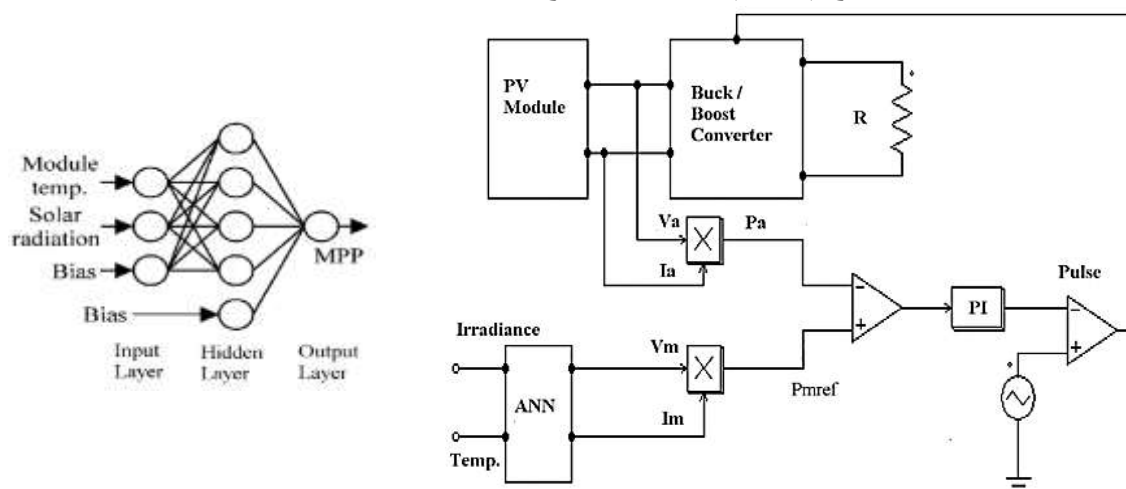
3-2-3 الشبكة العصبونية (Neural Network):

يوضح الشكل (11) مخطط صندوقي لشبكة عصبونية تُستخدم في الـ MPPT.

تتألف الشبكة العصبونية بشكل عام من ثلاث طبقات:

- طبقة الدخل: يمكن أن تكون متغيرات الدخل هي بارامترات الـ PV مثل V_{OC} و I_{SC} أو الإشعاع ودرجة الحرارة.
- الطبقة المخفية: وتستخدم شبكة تعقب خلفية، يتغير عدد العقد في كل طبقة تبعاً للمستخدم.

يعتمد مدى قرب نقطة العمل من MPP على الخوارزميات المستخدمة في الطبقة المخفية وعلى كيفية تدريب الشبكة العصبونية بشكل جيد. تتصل الشبكة بشكل كامل مع كل الخلايا العصبونية (العقد) في الطبقة المخفية من خلال أوزان (Weight)، وتضاعف إشارة الانحياز لكل العقد بواسطة الوزن، فمثلاً جدول الوصلة بين العقدتين i و j كأنها تملك وزناً w_{ij} . لتمييز MPP بدقة يجب تحديد w_{ij} بشكل دقيق خلال عمليات التدريب، بحيث يتم اختبار صف الـ PV خلال أشهر أو سنوات وتُسجل النماذج (العينات) بين الدخل والخرج للشبكة العصبونية.



الشكل (11): مخطط صندوقي لشبكة عصبونية تُستخدم في الـ MPPT الشكل (12): مثال عن الشبكة العصبونية

يمكن اختلاف ميزات معظم مصفوفات الـ PV من استخدام شبكة عصبونية مدربة بشكل محدد من أجل صف الـ PV محدد. كذلك تتغير ميزات صف الـ PV مع الزمن وبالتالي استخدام تلك الشبكة العصبونية يجب أن يدرج بشكل دوري لضمان تحقيق MPPT.

- طبقة الخرج: عادة يكون الخرج إشارة واحدة أو عدة اشارات مرجعية (S) مثل إشارة نسبة التشغيل التي تستخدم لقيادة مبدلة الاستطاعة لتعمل عند أو قرب MPP كما هو مبين في الشكل (12) [7,8,13].

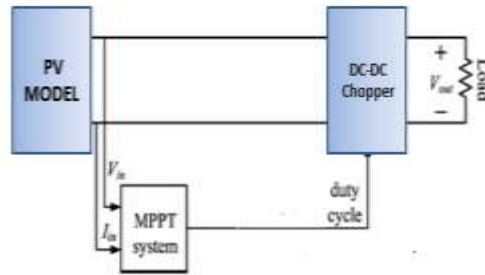
3-3 الخوارزميات الهجينة (The Hybrid methods):

تقدم أنظمة الملاحظة الهجينة دقة أكبر، حيث أنه في هذه الخوارزميات تتكون إشارة التحكم المرتبطة بالخوارزمية من جزئين. كل جزء يتم توليده بالاعتماد على حلقة تحكم مستقلة، الجزء الأول يتم تحديده اعتماداً على offline methods كقيمة ثابتة تعتمد على معطيات الحرارة والإشعاع الواردة على اللوح الكهروضوئي وتستجيب للحالات

العابرة للحظية وهذا الجزء مسؤول عن تأمين استجابة النظام بالاعتماد على العلاقة بين تغير قيمة استطاعة الخرج للوح بالاعتماد على تغير الظروف المحيطة (حرارة وإشعاع) القسم الثاني من اشارة التحكم يتم توليده بالاعتماد على إحدى خوارزميات Online methods التي تبحث في القيمة الأصح للحالات العابرة من أجل ملاحقة MPP بدقة [15,14].

4 الاختبار البرمجي:

يبين الشكل (13) مخططاً لمكونات النظام الكهروضوئي الذي يتكون بشكل عام من الأجزاء التالية: (ألواح PV، أحد طوبولوجيات مبدلات DC-DC، الحمل الذي قد يكون بطارية للتخزين أو حمل مستمر DC أو حمل مناوب عبر قابلية (DC/AC Inverter). يضاف إلى مكونات النظام السابقة خوارزميات الملاحقة كدارات رقمية أو الكترونية أو توابع مضمنة Embedded Matlab function تتحكم بدورة عمل مفتاح مبدل التيار المستمر Duty cycle.



الشكل(13): المخطط الأساسي للنظام الكهروضوئي المستقل

تمت نمذجة عدد من خوارزميات الملاحقة في بيئة (MATLAB (SIMULINK من أجل مقارنة الإستجابة الديناميكية لنظام PV. يتكون النظام الذي تمت نمذجته من لوح كهروضوئي باستطاعة خرج 60W وقابلية من نوع Boost chopper وحمل بطارية 36V. وأجريت الإختبارات التالية:

1. قمنا بتطبيق خوارزميات الملاحقة التي تحتاج لفصل مؤقت للوح PV (offline Methods)، تمت مقارنة نتائج الملاحقة باستخدام الشبكات العصبونية (ANN) وخوارزمية تيار الدارة القصيرة (SCC) وخوارزمية جهد الدارة المفتوحة (OCV).

2. تم تطبيق خوارزميات الملاحقة التي لا تحتاج إلى فصل مؤقت للوح PV (online Methods)، تمت مقارنة نتائج الملاحقة باستخدام خوارزمية الملاحظة والإرتياب (P&O)، وخوارزمية التحكم بالقيم الحدية (ESC).

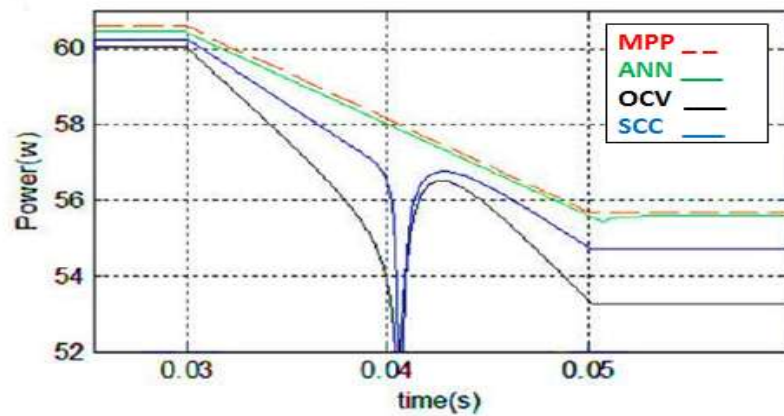
3. أخيراً تم تصميم خوارزمية هجينة (hybrid Methods) ضمن حلقتين متداخلتين: الحلقة الأولى تعتمد على خوارزمية جهد الدارة المفتوحة OCV والحلقة الثانية تعتمد على خوارزمية P&O.

يبين الجدول (1) مقارنة خوارزميات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية MPPT من حيث الصنف والتطبيق والبارامترات المتحسسة وسرعة التقارب والدقة وتعقيد التطبيق.

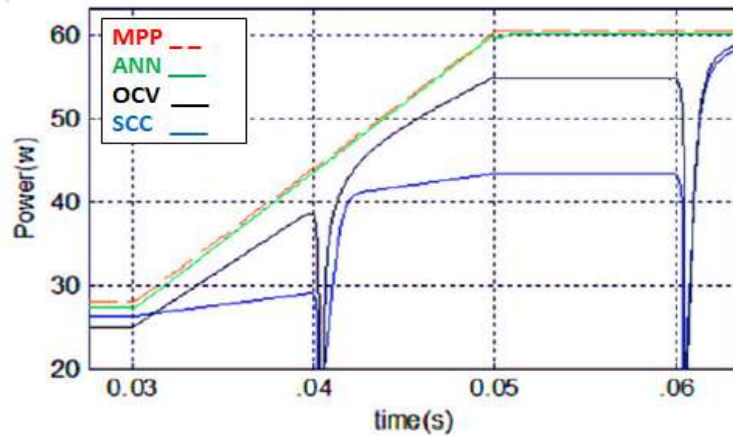
يبين الشكل (14-a) التغيرات الديناميكية لاستطاعة خرج اللوح مع الزمن $P_{pv}=f(t)$ عند قراءات مختلفة لدرجات الحرارة باستخدام offline Methods، كما يبين الشكل (14-b) التغيرات الديناميكية لاستطاعة خرج اللوح مع الزمن $P_{pv}=f(t)$ عند ظروف إشعاع مختلفة باستخدام offline Methods.

يبين الشكل (15-a) التغيرات الديناميكية لاستطاعة خرج اللوح مع الزمن $P_{pv}=f(t)$ عند قراءات مختلفة لدرجات الحرارة باستخدام online Methods، وباستخدام الخوارزميات الهجينة hybrid Methods كما يبين الشكل (15-b) التغيرات

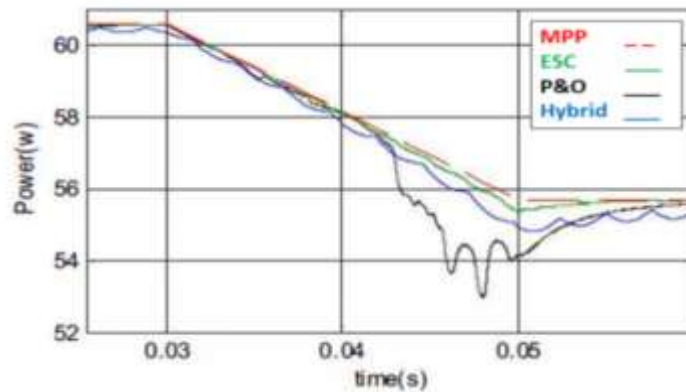
الديناميكية لاستطاعة خرج اللوح بغير الزمن $P_{pv}=f(t)$ عند ظروف إشعاع مختلفة باستخدام الـ online Methods، وباستخدام الخوارزميات الهجينة hybrid Methods.



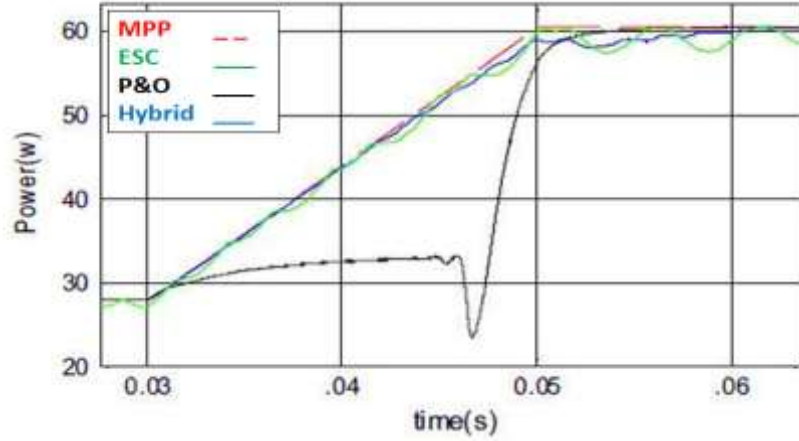
الشكل (14-a): $P_{pv}=f(t)$ بتغير درجات الحرارة باستخدام offline Methods



الشكل (14-a): $P_{pv}=f(t)$ بتغير الإشعاع الشمسي باستخدام offline Methods



الشكل (15-a): $P_{pv}=f(t)$ بتغير درجات الحرارة باستخدام hybrid Methods و online Methods



الشكل (15-a): $P_{pv}=f(t)$ بتغير الإشعاع الشمسي باستخدام online Methods و hybrid Methods

الجدول (1): مقارنة خوارزميات ملاحقة نقطة الإستطاعة الأعظمية الـMPPT.

تعميد التطبيق	الدقة	سرعة التقارب	البارامترات المتحسنة	التطبيق (تشابهي- رقمي)	الصف	معايير المقارنة خوارزمية MPP
منخفض	متوسطة	متوسطة	V	تشابهي ورقمي	offline	جهد الدارة المفتوحة الجزئي
متوسط	متوسطة	متوسطة	I	تشابهي ورقمي	offline	تيار الدارة القصيرة الجزئي
عالي	عالية	عالية	الإشعاع والحرارة و V&I	رقمي	offline	الشبكة العصبونية
متوسط	متوسطة	متوسطة	V&I	رقمي	Online	خوارزمية P&O
متوسط	عالية	عالية	V&I	تشابهي ورقمي	Online	خوارزمية ESC
عالي	الأفضل	عالية	الحرارة و V&I	تشابهي ورقمي	Hybrid	الخوارزمية الهجينة

الاستنتاجات والتوصيات:

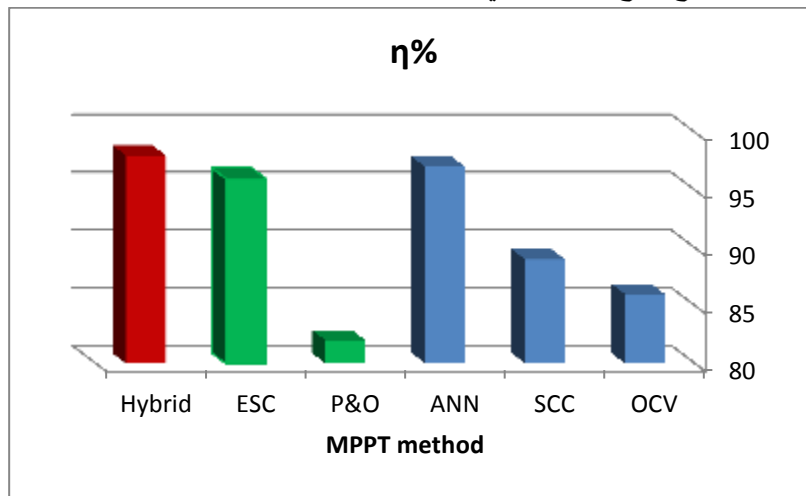
- بين الجدول (1) أنه لا يمكن ببساطة القول إن أحد خوارزميات الملاحقة تتفوق على بقية الخوارزميات لأن مفهوم الدقة عموماً يتناسب طرماً مع التكلفة ودرجة تعقيد التطبيق.
- **الاستجابة الديناميكية:** بينت النمذجة في الشكلين (14-a) و(14-b) أن طريقة ANN تلاحق نقطة الاستطاعة العظمى بدقة وسرعة تقارب أكثر (تحت ظروف إشعاع وحرارة متغيرين) من الطريقتين الباقيتين التي تلاحق بدورها الـ mpp ولكن تعاني من استجابة ديناميكية ضعيفة بسبب الانقطاعات اللحظية في الطاقة متزامنة مع لحظات قراءة جهد الدارة المفتوحة في خوارزمية ocv و تيار الدارة القصيرة في SCC. كما نلاحظ من المنحني أن طريقة scc تلاحق mpp بدقة أكثر من ocv.

وبينت النمذجة في الشكلين (15-a) و(15-b) أنه بينما تفشل خوارزمية الملاحظة والارتياب في ملاحقة الـ MPP في حالات التغيرات المفاجئة في قيم الإشعاع والحرارة، تستطيع ESC ملاحقة الـ MPP بسرعة استجابة أكبر. كما بينت المنحنيات أن الاستجابة العظمى تمت باستخدام الخوارزميات الهجينة تقدم نتائج أكثر دقة وأسرع استجابة.

• **الكفاءة:** يبين الشكل (16) المخطط البياني لكفاءة الخوارزميات المدروسة η_T التي تم استنتاجها بناءً على العلاقة الآتية:

$$\eta_T = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{P_i}{P_{max}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n 1 - \frac{P_l}{P_{max}} \quad (10)$$

حيث P_i هي قراءة استطاعة خرج اللوح ، P_{max} هي الاستطاعة الأعظمية، P_l الإستطاعة الضائعة



الشكل (16) المخطط البياني لكفاءة الخوارزميات المدروسة

• التوصيات:

نوصي بدراسة واختبار خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة الاعظمية المتبقية و تسجيل نتائج الاختبار ضمن مرجع موحد واستخدام محددات كل خوارزمية (الكفاءة والدقة وسرعة الاستجابة..) كمرجع للدراسات الاقتصادية لتصميم أنظمة PV الأكثر ملاءمة لتصميم أنظمة لتطبيقات مختلفة في الساحل السوري.

المراجع:

- [1] MORITA,T; ROBINSON,J. *Greenhouse gas emissions mitigation scenarios and implications Intergovernmental Panel of Climate Change*. IPCC Climate Change,2001.
- [2] IEA;UNEP,International Energy Agency.*United Nations Environment Programme, Reforming Energy Subsidies*, Paris 2002.
- [3]Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA) .*The Regional Conference on Renewable Energy and Sustainable Development in Rural Areas of the ESCWA Region* , Morocco,2013.
- [4]IRENA. *International Renewable Energy Agency* , 2 June.2018. <https://irena.masdar.ac.ae/gallery/#map/2651>
- [5]DINCER,F; EMIN MERAL,M.*Critical Factors that Affecting Efficiency of Solar Cells*. Smart Grid and Renewable Energy.Vol .1,No.1,2010,47-50.
- [6]FALINIRINA,F; RAKOTOMANANANDRO,B.S. *Study of Photovoltaic System* .The Ohio State University . 2011.
- [7]CHU ,Y. *Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies*.GENI Institute ,USA,2011.
- [8]CHAPMAN,P ; ESRAM,T.*Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power point Tracking Techniques*. IEEE Transactions On Energy Conversion .VOL.22, NO. 2, 2007,434-449.
- [9]DAVID ,S.M. *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications*.Espoo,2010.
- [10] ABDELSALAM ,K; MASSOUD,M. *High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based micro- grids*. IEEE Transactions on Power Electronics NO.4, 2011,26-34.
- [11] LEI,P, LI Y;SEEM JE. *Sequential ESC-based global MPPT control for photo- voltaic array with variable shading*. IEEE Transactions on Sustainable Energy.VOL.2, NO. 3, 2011,348–58.
- [12] LEYVA, R; ALONSO, C. *MPPT of Photovoltaic Systems using Extremum– Seeking control*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems VOL.42, NO. 1,2006,249–258.
- [13] SALAH,C; OUALI,M.*Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems*. Electric Power Systems Research,VOL 81;2011;43–50.
- [14] LAC,S; Lopes,XJ. *Comparative study of variable size perturbation and observation maximum power point trackers for PV systems*. Electric Power Systems Research, VOL 80 ;2010;296–305.
- [15] MORADI,M;REISI,A. *A hybrid maximum power point tracking method for photovoltaic systems*. Solar Energy,VOL 85;965–76.