مقارنة الطرائق التقليدية في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى في اللواقط الشمسية

م. محمد سركس[*] د.م.عباس صندوق[**]

الملخص

مع ازدياد الاعتماد على الطاقة الشمسية بوصفها مصدراً للحصول على الطاقة الكهربائية، طُورتْ عدة تقنيات لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى المستخدمة في اللواقط الكهروضوئية بهدف الحصول على أعظم طاقة كهربائية يمكن توليدها من النظام الكهروضوئي، وتختلف هذه التقنيات من حيث البساطة وسرعة الأداء والأدوات المستخدمة فيها (كالحساسات) والكلفة الاقتصادية. تتضمن هذه الدراسة مقارنة عشر من الطرائق التقليدية المستخدمة في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للواقط الكهرضوئية باختلاف أنواعها، إذْ قُيم أداؤها من وجهة نظر طاقية باستخدام برنامج Matlab، آخذين بالحسبان أشكالاً مختلفة للإشعاع الشمسي. فضلاً عن التقييم الاقتصادي لها؛ وذلك لإجراء مقارنة بناء على الأداء والكلفة لتحديد الخيار الأمثل بينها.

الكلمات المفتاحية: نقطة الاستطاعة العظمى، ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى، اللواقط الكهروضوئية، النظم الكهروضوئية

[*] محمد سركس- ماجستير في الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.
[**] أستاذ مساعد في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

المقدمة:

تعد الطاقة الشمسية Solar energy من أهم مصادر الطاقة الأولية Primary energy في العالم عموماً وفي سورية خصوصاً، إذ تبلغ عدد ساعات سطوع الشمس في سورية 2820 إلى 3270 ساعة في السنة [2]، وهي من المعدلات الجيدة عالمياً.

تبرز تطبيقات الطاقة الشمسية في الحصول على الطاقة الكهربائية في النظم الشمسية الكهروضوئية، التي منها النظام المرتبطة ضمن الشبكة Grid connected PV systems (كمحطات التوليد الكهروضوئية والأنظمة الهجينة و.....إلخ) والنظم المستقلة Stand-alone PV systems (كأنظمة الإنارة وأنظمة التغذية الكهربائية غير المرتبطة بالشكبة والنظم المستخدمة في ضخ المياه و....إلخ) [5].

تتميز الطاقة الشمسية بأنها صديقة للبيئة ومتجددة لا تنضب، إلا أنها أيضاً تواجه مشكلتين رئيسيتين من الناحية التقنية:

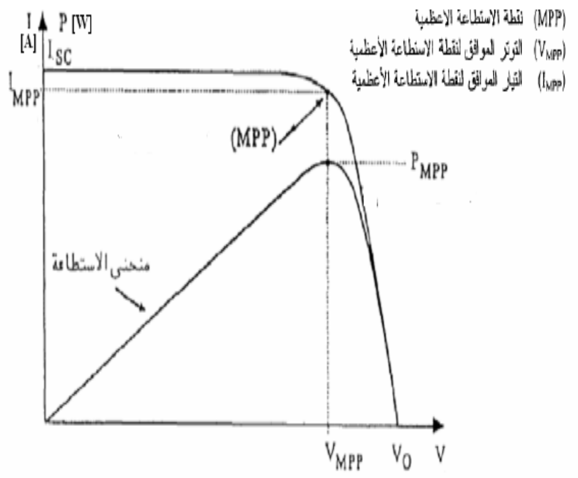
الأولى: انخفاض مردورد تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية الذي يراوح بين (% 17- 9) [1].

الثانية: تغير الطاقة الكهربائية المولدة من اللواقط الكهروضوئية بتغير الظروف المناخية المحيطة (الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة).

1. نقطة الاستطاعة العظمى Maximum power point:

تعرف نقطة الاستطاعة العظمى من خلال منحنى التيار-توتر، ومن خلال منحنى التوتر-استطاعة للخلية الكهروضوئية، إذْ تمثل هذه النقطة أعظم استطاعة يمكن الحصول عليها من حقل اللواقط الكهروضوئية PV array.

يبين الشكل (1) منحنى التيار-توتر ومنحنى التوتر-استطاعة لخلية كهروضوئية [1] :



الشكل (1) منحنى التيار-توتر ومنحنى التوتر-استطاعة لخلية كهروضوئية

فمن منحنى التوتر-استطاعة نلاحظ في الزاوية العليا على يمين المنحنى وجود قمة حادة تمثل نقطة الاستطاعة العظمى، وهي التي نسعى للوصول إليها بدقة، وذلك باستخدام منحنى التيار-توتر عن طريق تغيير نقطة التشغيل للنظام الكهروضوئي ككل.

ولتحقيق هذا الهدف ومن ثَم لمواجهة المشكلتين الرئيسيتين اللتين تواجهان تطبيقات الطاقة الشمسية في الحصول على الطاقة الكهربائية، ومحاولة التخفيف من أثرهما في عمل اللواقط الكهروضوئية، ظهرت عدة تقنيات تعتمد على نقل نقطة العمل للاقط الكهروضوئي إلى نقطة الاستطاعة العظمى، وعرفت هذه التقنيات بتقنيات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمىMaximum power point tracking (mppt).

يتأثر عمل الخلية الكهروضوئية بتغيرات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة [1]، فمثلاً لو أخذنا لاقطاً باستطاعة [W] 120، فإن هذا اللاقط سيكون قادراً على توليد الاستطاعة 120[W] فقط ضمن ظروف التشغيل المعيارية STC، أما في الحالة التطبيقية العملية فإنه لن يكون قادراً على ذلك.

فعلى سبيل المثال، لو انخفضت درجة الحرارة عن درجة الحرارة المعيارية فإن اللاقط سيولد استطاعة أكبر (مثلاً 130 [W])، ومن ثم فإن نقطة الاستطاعة العظمى قد تغيرت، ولابد من نقل نقطة العمل إليها للحصول على الاستطاعة العظمى المتاحة من اللاقط الكهروضوئي.

2.الفرق بين mppt وتحريك اللواقط Panel tracking:

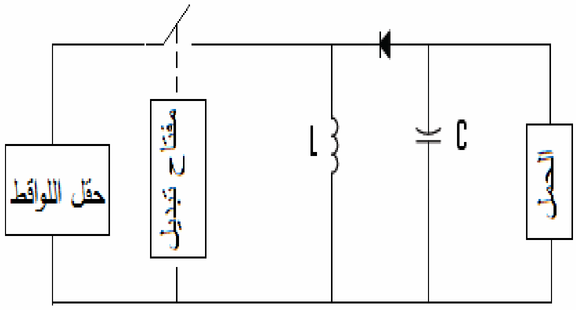
لتجنب الالتباس في مصطلح الملاحقة لا بد من التفريق بين mpptوملاحقة اللواقط (Panel tracking)، فملاحقة اللواقط هي تحريكها بوساطة نظام تحريك وملاحقة للشمس نفسها، وهذا النظام يعتمد على مجموعة من الحساسات التي تقوم بتتبع حركة الشمس اليومية، ومحرك يقوم بتحريك اللواقط بحيث تصبح مواجهة لقرص الشمس بحسب تغير حركة القرص، وبما يحقق سقوط أعظم إشعاع شمسي من الشمس على اللواقط.

أما النظام الثاني فهو mppt وهو جهاز ملاحقة فليس له علاقة بتحريك اللواقط إنّما يقوم بمراقبة خرج اللواقط الشمسية الكهروضوئية مع توتر الحمل بحيث تُنْقَلُ أكبر استطاعة ممكنة للحمل؛ وذلك عن طريق أفضل جهد لإعطاء أكبر تيار.

3. المبدأ الأساسي في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للواقط الكهروضوئية:

تعتمد تقنيات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى على التبديل من جهد مستمر إلى جهد مستمر (DC to DC)[1] بهدف الوصول إلى النقطة المثلى على منحنى التيار-توتر، بحيث نوصل أكبر استطاعة للحمل الذي قد يكون مدخرات أو الشبكة العامة أو محركاً مستمراً أو مضخة.

ولتحقيق ذلك يجري الاعتماد على محول رافع – خافض للتوتر، قادر على رفع توتر المنبع المستمر DC (المولد الكهرضوئي) أو خفضه إلى توتر مستمر DC موافق للحمل المطلوب. ويبين الشكل (2) دارة التبديل (المبدل):



الشكل (2) دارة التبديل DC-DC المستخدمة في تقنيات mppt

إِذْ يقوم الترانزستور (المفتاح) بالوصل والفصل بمعدل سريع (20 kHz)، ويحوي النظام أيضاً مكثفاً موصلاً عبر المولد غير مبين في الشكل.

فعندما يكون المفتاح مغلقاً، يكون التوتر عبر الملف هو توتر المنبع V_i، الذي يدفع تياراً I_L عبر الملف. يجري تيار المنبع بأكمله خلال الملف لأن الديود يمنع أي تيار من الجريان في بقية الدارة، في أثناء هذا الجزء من الدورة تضاف طاقة إلى الحقل المغناطيسي في الملف بسبب تشكل التيار. إذا بقي المفتاح مغلقاً سيشكل الملف أخيراً دارة قصيرة ويقدم PV تيار قصر تحت توتر صفر.

عندما نفتح المفتاح يستمر التيار بالجريان في الملف في الوقت الذي يبدأ فيه الحقل المغناطيسي بالانهيار. يجري الآن تيار الملف خلال المكثف والحمولة والديود. إن تيار الملف الذي يشحن المكثف يولد توتراً بقطبية معكوسة عبر الحمل، هذا التوتر يساعد في الحفاظ على تغذية الحمل بعد أن يغلق المفتاح ثانيةً.

إذا كانت عمليات فصل-وصل المفتاح سريعة على نحوٍ كاف فإن التوتر عبر المكثف لن يملك الفرصة ليهبط كثيراً قبل شحنه مجدداً من قبل تيار الملف خلال مدة فتح القاطع

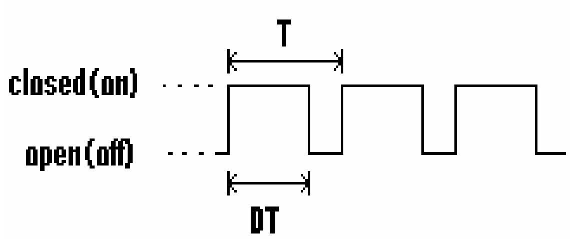
التالية، والمكثف لايغير توتره فجأة (لحظياً) وعندما تكون دورة المفتاح سريعة كفاية، والمكثف كبيراً كفاية، يكون توتر الخرج عبر المكثف والحمولة ثابتاً تقريباً.

وعليه نلخص: توتر الخرج V_O ثابت ومعاكس بالإشارة إلى توتر الدخل Vi.

أما آلية تحديد العلاقة بين توتر الدخل والخرج فتعتمد على دورة عمل الترانزستورD (duty-cycle) إذْ إن $1>D>0$.

وباعتبار أن D هي نسبة زمن الإغلاق إلى زمن الدورة T (مجموع زمن الإغلاق والفتح) فإن التغير في زمن حالة القاطع فتحاً أو إغلاقاً نسميه تعديل عرض النبضة PWM (Pulse Width Modulation) .

يبين الشكل (3) زمن الفتح والإغلاق للمفتاح:



الشكل (3) زمن الفتح والإغلاق للمفتاح

ويفرض أن مركبات الدارة مثالية أي إن الملف والديود والمكثف لا تستهلك أي طاقة خلال دورة عمل كاملة للمفتاح، تكون الاستطاعة الوسطية الداخلة إلى الدارة مساوية للاستطاعة الوسطية المقدمة من الدارة، أي إن المردود 100%، علماً أنه في الحالة العملية يكون المردود نحو95% [1] .

عندما يكون المفتاح مغلقاً من الزمن $t=0$ إلى $t=D.T$ يكون التوتر عبر الملف ثابتاً على Vi، وتكون الاستطاعة الوسطية للملف خلال دورة كاملة هي [1]:

$$p_{L,in}=\frac{1}{T}\int_0^{DT}V_i.I_L.dt=\frac{1}{T}V_i.\int_0^{DT}I_L.dt$$

إذْ: $P_{L,in}$: الاستطاعة الوسطية للملف وتقدر بالواط [W].

: T : زمن الدورة الكامل ويقدر بالثانية [S].

: V_i : توتر الدخل للدارة ويقدر بالفولت [V].

: I_L : تيار الملف ويقدر بالأمبير [A].

وبافتراض تيار الملف ثابتاً نجد:

$$p_{L,in}=\frac{1}{T}V_i.I_L.\int_0^{DT}dt=V_i.I_L.D$$

عندما يفتح المفتاح، يبدأ الحقل المغناطيسي للملف بالانهيار، معيداً الطاقة التي اكتسبها تواً. يصبح الديود ناقلاً، وهذا يعني أن التوتر عبر الملف V_L هو نفسه التوتر عبر الحمل V_o، لذلك تكون الاستطاعة الوسطية المقدمة من الملف هي:

$$p_{L,out}=\frac{1}{T}\int_{DT}^{T}V_L.I_L.dt=\frac{1}{T}\int_{DT}^{T}V_O.I_L.dt$$

لأجل التصميم الجيد يكون Vo و I_L ثابتين وعليه:

$$p_{L,out}=\frac{1}{T}V_O.I_L.(T-DT)=V_O.I_L.(1-D)$$

لأجل دور كامل تتساوى الاستطاعتان الوسطيتان الداخلة إلى الملف والخارجة منها وعليه نجد [1]:

$$\frac{V_O}{V_i}=-(\frac{D}{1-D})$$

ومن ثم يمكن رفع التوتر (مع ملاحظة تغير الإشارة) عن طريق تغيير دورة العمل D للمبدل.

إن D الطويلة تسمح زمناً أكبر للمكثف لعملية الشحن وزمناً أقل لعملية التفريغ، ومن ثم يزداد توتر الخرج مع تزايد D.

مثلاً: D=0.5 يتساوى توتر الخرج وتوتر الدخل.

D=2/3 يتضاعف توتر الخرج.

D=1/3 يكون توتر الخرج نصف توتر الدخل.

يحتاج جهاز ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى mppt طريقةً ما ليملي على المبدل دورة العمل الملائمة في أي لحظة زمنية.

4. تقنيات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى:

كما ذكرنا فإن الهدف لأي تقنية ملاحقة لنقطة الاستطاعة العظمى، هو إيجاد طريقة لجعل المبدل المذكور يعمل وفق دورة عمل ملائمة في أي لحظة زمنية بما يحقق العمل عند نقطة الاستطاعة العظمى.

ولتحقيق ذلك نميز نوعين من التقنيات:

- التقنيات التقليدية: وهي التقنيات التي تعتمد على عناصر كهربائية ودارات ومتحكمات تقليدية (كالمكثفات والمتحكمات التناسبية و....إلخ)، وهي ما سنستعرضه في هذه الدراسة.

- التقنيات المتقدمة: تعتمد على الشبكات العصبونية والمنطق العائم وغيرها من طرائق التحكم المتقدمة.

قبل استعراض التقنيات التقليدية والمقارنة بينها، لا بد من ذكر بعض الملاحظات المهمة:

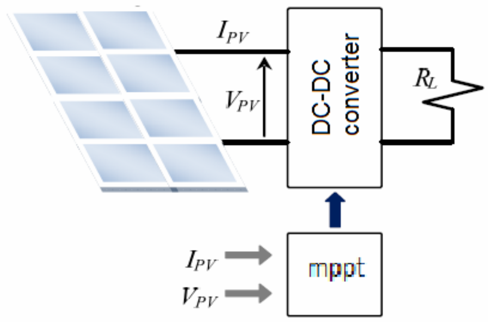
1- لن ندخل في موضوع التظليل الجزئي أي إن كامل اللواقط تتعرض للإشعاع.

2- تطبيق هذه النظم سيأخذ بالحسبان التصميم الرياضي والحسابي لكل مكون، كما هو الحال في النظام الحقيقي.

3- سنعتمد بالدراسة على نظم غير مرتبطة أي بأخذ اللواقط الكهرضوئية وربطها إلى مبدل dc/dc فقط دون التحويل إلى متناوب.

4- إن المقارنة النظرية والنمذجية بين التقنيات لاتغني عن إجراء تجارب عملية على هذه التقنيات للحصول على نتائج تجريبية عملية، وهو ما لن نتطرق له في دراستنا نظراً إلى صعوبة إجراء مثل هذه التجارب حالياً.

ويبين الشكل (4) توضع هذا المبدل والتقنية المستخدمة في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى mppt ضمن الحقل الكهروضوئي:



الشكل (4) توضع المبدل وتقنية الملاحقة ضمن الحقل الكهروضوئي

5- اللاقط المستخدم في الدراسة ذو استطاعة [W] 50 يتألف من 36 خلية متعددة البلورات، ومواصفاته مبينة في الملحق الأول لهذه الدراسة [5].

كما يبين الملحق الثاني للدراسة التغيرات اللاخطية لاستطاعة خرج اللاقط كتابع لدرجة الحرارة والإشعاع الشمسي [5].

5. التقنيات التقليدية لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى في اللواقط الكهروضوئية:

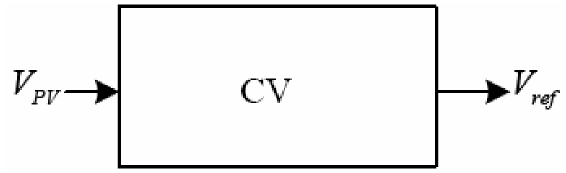
1.5 طريقة التوتر الثابت Constant Voltage (CV) [6] :

إن تقنية التوتر الثابت (CV) هي أسهل الطرائق إذْ إن نقطة عمل اللاقط الكهرضوئي تبقى قريبة من mpp من خلال تنظيم التوتر ومطابقته مع توتر ثابت مرجعي V_{ref}.

إن التوتر المرجعي يعير على أساس قيمة V_{mpp} المأخوذة من خصائص النظام (الملحق الأول الذي يبين خصائص اللاقط المستخدم للدراسة).

هذه الطريقة تفترض أن التغيرات الفردية للإشعاع ودرجة الحرارة غير مهمة، وأن القيمة المرجعية V_{ref} تعد كقيمة تقريبية لنقطة الاستطاعة العظمى، لذلك التشغيل لا يكون مطابقاً لنقطة الاستطاعة العظمى.

هذه الطريقة لا تتطلب أي دخل، لكن لا بد من قياس توتر خرج النظام V_{pv}؛ وذلك لضبط دورة العمل للمقطع dc-dc، من خلال متحكم تناسبي تكاملي PI كما في الشكل (5):



الشكل (5) مخطط صندوقي لتقنية التوتر الثابت

من المهم ملاحظة أن هذه الطريقة عملية في ظروف الإشعاع المنخفض، وبفضل هذه الخاصية تستخدم هذه التقنية بوصفها طريقة داعمة للطرائق الأخرى لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.

2.5 طريقة **نبضة تيار القصر Short current pulse method (SC):**

تصل هذه الطريقة إلى نقطة الاستطاعة العظمى mpp من خلال إعطاء تيار تشغيل I_{op} إلى مبدل استطاعة يتحكم بالتيار (current controlled power converter).

في الواقع إن تيار العمل الأمثل لاستطاعة خرج أعظمية يتناسب طرداً مع تيار القصر (I_{sc}) في مختلف ظروف الإشعاع الشمسي وفقاً للمعادلة [7]:

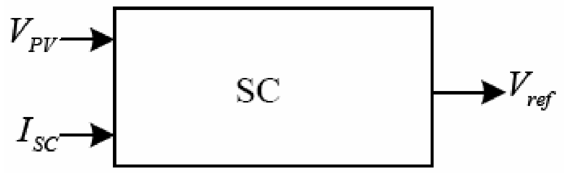
$$I_{op}=K.I_{sc}$$

إذْ: K ثابت التناسب ويعير تقريباً على 92%[7] .

من هذه المعادلة يتبين أن I_{op} يمكن تحديده مباشرة من خلال تحديد I_{sc}، إذْ إن العلاقة بين I_{op} وI_{sc} تبقى تناسبية ضمن مجال تغير درجات الحرارة (0 ºC - 60 ºC) [7].

لذلك هذه الطريقة تتطلب قياس تيار القصر باستخدام قاطع ساكن على التفرع مع النظام، وذلك لإمرار تيار قصر، ومن المهم ملاحظة أنه خلال القصر $V_{pv}= 0$ ومن ثَم النظام لا يحقن أي استطاعة.

كما في الطريقة السابقة نحتاج إلى قياس V_{pv}؛ وذلك لأجل المنظم PI بهدف ضبط V_{ref} بحيث تكون قادرة على إعطاء تيار التشغيل I_{op} المحسوب، كما في الشكل (6):



الشكل (6) مخطط صندوقي لتقنية نبضة تيار القصر

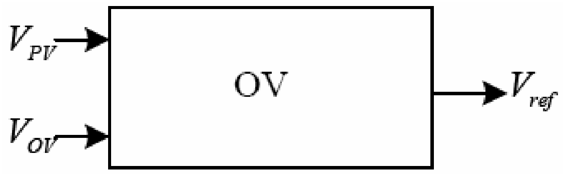
3.5 طريقة توتر الدارة المفتوحة: open voltage method (OV):

تعتمد هذه الطريقة على افتراض أن توتر نقطة الاستطاعة العظمى هو نسبة ثابتة من توتر الدارة المفتوحة، إذ إن درجة الحرارة وسويات الإشعاع الشمسي تُغير موقع نقطة الاستطاعة العظمى بحزمة تفاوت 2% [8].

بشكل عام هذه التقنية تحدد أن 76% من توتر الدارة المفتوحة V_{oc} هو التوتر المثالي(الذي عنده يمكن استحصال أكبر استطاعة ممكنة) [8].

هذه الطريقة تتطلب قياس توتر الدارة المفتوحة V_{oc}، وهذا يعني أنه من الضروري وضع قاطع ساكن على التسلسل مع النظام وعند فتح القاطع فإن $I_{pv} = 0$ ومن ثَم فإن النظام لا يحقن أي استطاعة.

تتطلب هذه الطريقة قياس V_{pv} لأجل المنظم، ويبين الشكل (7) مخططاً صندوقياً لهذه التقنية:



الشكل (7) مخطط صندوقي لتقنية توتر الدارة المفتوحة

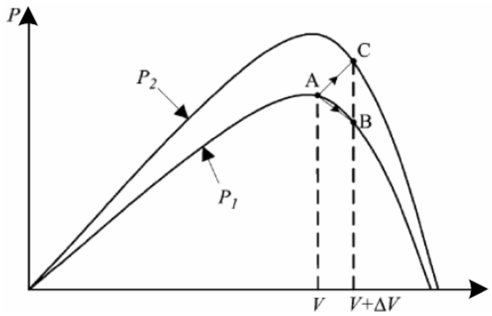
4.5 طرائق الاضطراب والمراقبة Perturb and observe methods (P&O):

تعتمد هذه الطريقة على إجراء اضطراب (زيادة أو نقصان) على قيمة توتر أو تيار خرج النظام ومقارنة استطاعة خرج النظام بعد الاضطراب باستطاعة النظام قبل الاضطراب، فعندما يتغير توتر النظام واستطاعته زيادة (أي: $dP/dV_{pv} > 0$) فإن نظام التحكم سيقوم بتحريك نقطة العمل بالاتجاه نفسه (أي يجري اضطراباً بالزيادة)، وفي حالة ($dP/dV_{pv} < 0$) فإن النظام يحرك نقطة العمل بالاتجاه المعاكس (أي يجري اضطراباً بالنقصان) [9].

وفي الاضطراب التالي يتابع النظام بالطريقة نفسها.

إن تقنيات P&O تشترك بمشكلة هي أن توتر الخرج يضطرب في كل دورة، ولذلك عند الوصول إلى mpp فإن استطاعة الخرج تتأرجح حول القيمة العظمى وذلك نظراً إلى تغير التوتر في كل دورة، وهذا ما يسبب ضياعاً في استطاعة النظام.

تطبق الطريقة عملياً في حالة الظروف الجوية الثابتة أو المتغيرة ببطء، ولذلك فإن تقنيات P&O تخفق في حالة التغيرات السريعة، ولتوضيح ذلك بشكل أعمق نورد الشكل (8) الذي يوضح آلية عمل الطريقة:



الشكل (8) آلية عمل تقنية الاضطراب والمراقبة

فإذا بدأنا العمل من النقطة A على منحنى الاستطاعة P_1، وبفرض أن الظروف الجوية تبقى ثابتة تقريباً، فإنه عند إجراء اضطراب δV سوف تنتقل نقطة العمل من A إلى B حيث الاستطاعة عند B أصغر من الاستطاعة عند A (كما يبين منحنى الاستطاعة P_1) وهذا ما يؤدي إلى انعكاس الاضطراب في الدورة التالية بالاتجاه المعاكس.

لكن عند تغير الإشعاع الشمسي زيادة بشكل كبير، فإن ذلك يؤدي إلى انتقال منحنى الاستطاعة من P_1 إلى P_2 خلال مدة الاضطراب؛ وهذا ما يؤدي إلى انتقال نقطة الاستطاعة من A إلى C (على المنحنى P_2) بدلاً من انتقالها من A إلى B (على المنحنى P_1)، ومن ثَم فإن الاستطاعة عند النقطة C ستكون أكبر منها عند النقطة A وهذا ما يدفع النظام لإبقاء الاضطراب بالاتجاه نفسه (زيادة بدلاً من النقصان) وهذا ما يؤدي إلى ضياع نقطة الاستطاعة العظمى، ويستمر هذا الضياع باستمرار تغير الإشعاع.

هناك العديد من الطرائق المتوافرة لتقنية P&O، نذكر منها [9]:

1 .الطريقة الكلاسيكية (P&Oa) classic technique:

في هذه الطريقة نفترض أن قيمة الاضطراب تبقى ثابتة، وتُفْتَرض هذه القيمة بناء على قياسات وتجارب واختبارات عملية حقلية.

2. الطريقة المثلى: Optimized technique (P&Ob):

في هذه الطريقة نأخذ وسطي استطاعة العديد من التقطيعات ونستخدمها لتعديل قيمة الاضطراب δV.

3. طريقة مقارنة النقاط الثلاث: three points weight comparison (P&Oc):

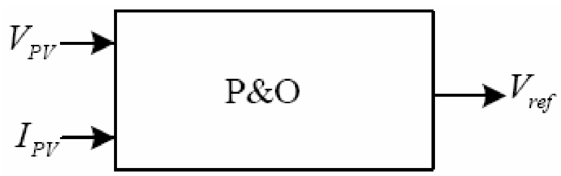
في هذه الطريقة يتحدد اتجاه الاضطراب من خلال مقارنة استطاعة النظام في ثلاث نقاط على منحنى (p-v)، إذْ إن هذه النقاط الثلاث هي:

A: نقطة العمل الحالية.

B: نقطة العمل بعد إجراء اضطراب من النقطة A يميناً يساراً.

C: نقطة العمل بعد إجراء اضطرابين بالاتجاه المعاكس من B يساراً (يميناً).

هذه الطرائق الثلاث تتطلب قياس توتر النظام وتياره، ومن ثَم فإن المخطط الصندوقي لهذه التقنية يكون كما هو موضح بالشكل (9):



الشكل (9) المخطط الصندوقي لتقنية الاضطراب والمراقبة

5.5 طرائق زيادة الناقلية Incremental conductance methods (IC):

تعتمد هذه الطريقة على إشارة القيمة الآتية [10] :

$$(I_{pv} / V_{pv}) + (dI_{pv}/ dV_{pv})$$

إذْ: (I_{pv} / V_{pv}) السماحية اللحظية، وهي تمثل ميل نقطة التشغيل؛ وهذا الميل موجب دوماً، في حين (dI_{pv} / dV_{pv}) زيادة الناقلية وهي تمثل ميل المماس على منحنى I_V فعندما نعمل عند mpp يكون الميلان متساويين ومتعاكسين أي يكون المستقيمان متعامدين فيكون:

$$\left(\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}\right)+\left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}}\right)=0$$

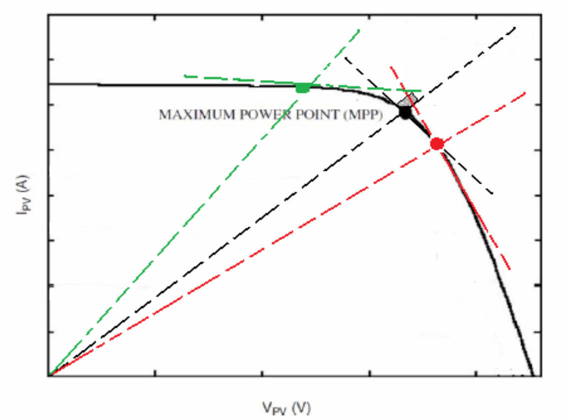
بينما عندما تقع نقطة العمل للنظام على يمين mpp يكون ميل المماس أكبر من ميل نقطة التشغيل ومن ثَم تكون المعادلة [10] :

$$\left(\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}\right)+\left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}}\right)<0$$

أما عندما تقع نقطة العمل للنظام على يسار mpp يكون ميل المماس أصغر من ميل نقطة التشغيل فتكون المعادلة[10] :

$$\left(\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}\right)+\left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}}\right)>0$$

ويبين الشكل (10) توضيحاً لهذه الطريقة:



الشكل (10) توضيح الحالات الثلاث للعمل

ومن ثَم تجري ملاحقة mpp بإجراء المقارنة، وبحسب الإشارة يتحدد الاتجاه الصحيح للاضطراب المؤدي إلى mpp، وحالما نصل إلى mpp فإن النظام سيستقر عند هذه النقطة وسيتوقف الاضطراب حتى يلاحظ تغير في I_{pv}.

في هذه الحالة فإن النظام سيزيد أو ينقص V_{ref} لملاحقة

نقطة mpp الجديدة، ومقدار الزيادة يحدد مدى سرعة الملاحقة.

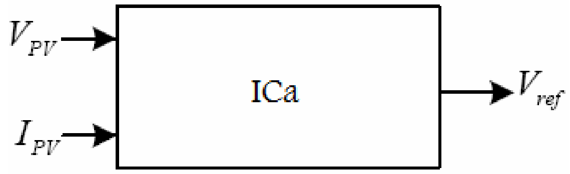
نلاحظ أنه بهذه الطريقة يمكن الوصول نظرياً إلى mpp التي عندها يمكن إيقاف الاضطراب.

تعد هذه الطريقة جيدة الأداء عند التغيرات الكبيرة في الظروف الجوية.

هناك طريقتان لهذه التقنية [10]:

1. الطريقة التقليدية: Classic IC :(ICa)

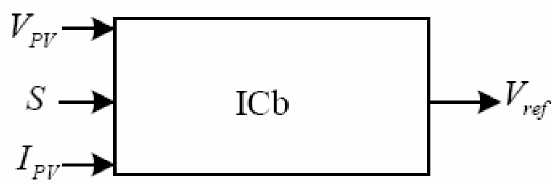
تتطلب قياس كل من V_{pv} وI_{pv} من أجل تحديد اتجاه الاضطراب، ومن ثَم فإن المخطط الصندوقي لهذه التقنية يكون كما في الشكل (11):



الشكل (11) مخطط صندوقي للطريقة الأولى لتقنية زيادة الناقلية

2. طريقة التحكم الثنائي: two models mppt control، (ICb):

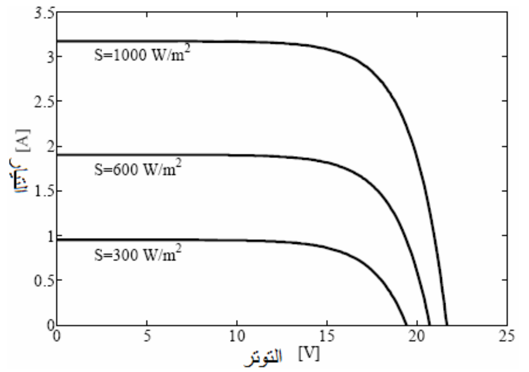
هذه الطريقة مركبة من CV وICa، إذْ في حال شدة الإشعاع أقل من 30% من الإشعاع الاسمي نستخدم طريقة CV نظراً إلى أدائها الجيد عند الإشعاع المنخفض، وفي الحالات الأخرى نستخدم ICa [10]، لذلك فإن هذه الطريقة تتطلب قياس الإشعاع الشمسي، ومن ثَم فإن المخطط الصندوقي يكون كما في الشكل (12):



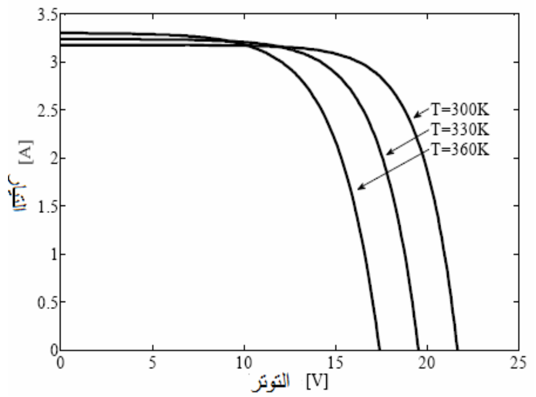
الشكل (12) مخطط صندوقي للطريقة الثانية لتقنية زيادة الناقلية

6.5 طرائق درجة الحرارة Temperature methods:

كما هو معروف فإن منحنى التيار-توتر للخلية الكهروضوئية يتغير بتغير كل من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، إذْ إن توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية يتغير بشكل رئيسي مع درجة حرارة الخلية، في حين يتناسب تيار القصر مباشرة مع مستوى الإشعاع [1] كما يوضح الشكل (13)، ويكون هذا التيار ثابتاً تقريباً مع تغيرات درجة الحرارة [1] ، كما يوضح الشكل (14).



الشكل (13) تغير منحنى التيار-توتر للخلية الكهروضوئية بتغير الإشعاع الشمسي



الشكل (14) تغير منحنى التيار-توتر للخلية الكهروضوئية بتغير درجة الحرارة

- يعطى توتر الدارة المفتوحة بالمعادلة الآتية[11]،[1]:

$$V_{OV} \cong V_{OVSTC} + \frac{dV_{OV}}{dT} \cdot (T - T_{STC})$$

إذْ: V_{OVSTC}: توتر الدارة المفتوحة في شروط الاختبار العيارية standard test conditions (STC) ويقدر بالفولت.

dV_{OV}/dT: الميل الحراري، ويقدر بالفولت لكل كلفن درجة.

T_{STC}: درجة حرارة الخلية عند شروط الاختبار العيارية.

من جهة أخرى يعطى توتر نقطة الاستطاعة العظمى V_{mpp} عند أي شروط تشغيل بالمعادلة الآتية [1]،[10] :

$$V_{mpp-module(x^{\circ}C)} = V_{mpp-module-stc} + (X - T_{stc}) * \Delta v$$

إذْ: $V_{mpp-module-stc}$: التوتر عند شروط الاختبار العيارية ويقدر بالفولت.

Δv : معامل تغير درجة الحرارة (يكون بقيمة سالبة).

X : درجة الحرارة المراد حساب التوتر عندها.

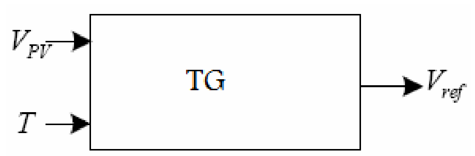
وبناء على هاتين المعادلتين، فإن هناك طريقتين في هذه التقنية:

1- الميل الحراري Temperature Gradient (TG):

تستخدم هذه الطريقة درجة الحرارة لتحديد تـوتر الـدارة المفتوحة من المعادلة:

$$V_{OV} \cong V_{OVSTC} + \frac{dV_{OV}}{dT} \cdot (T - T_{STC})$$

ومن ثم يتحدد V_{mpp} من خلال تقنية توتر الدارة المفتوحة المذكورة سابقاً؛ وذلك لتجنب ضياع الاستطاعة الناتج عن فتح الدارة للحصول على V_{OV}. وتتطلب هذه الطريقة قياس درجة الحرارة و V_{pv} من أجل منظم التناسبي التكاملي PI، ومن ثم فإن المخطط الصندوقي لهذه الطريقة يكون كما في الشكل(15):



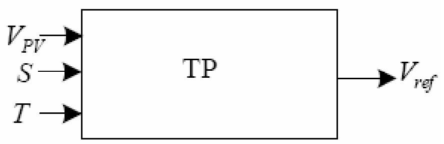
الشكل (15) المخطط الصندوقي لطريقة الميل الحراري

2- طريقة معادلة البارمترات الحرارية Temperature Parametric (TP):

بالاعتماد على المعادلة:

$$V_{mpp-module(x^{\circ}C)} = V_{mpp-module-stc} + (X - T_{stc}) * \Delta v$$

يحسب التوتر V_{mpp}؛ وذلك عن طريق قياس درجة الحرارة وشدة الإشعاع، فضلاً عن قياس V_{pv} من أجل المتحكم التناسبي التكامليPI، ومن ثَم يكون المخطط الصندوقي لهذه الطريقة كما في الشكل (16):



الشكل (16) المخطط الصندوقي لطريقة البارامترات الحرارية

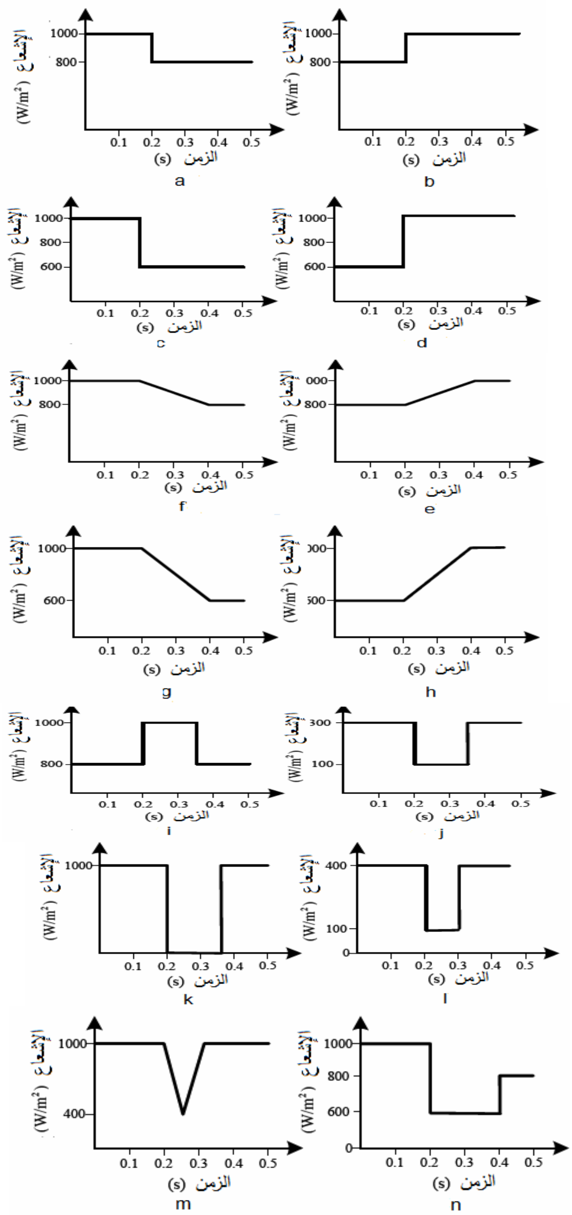
6. النمذجة Simulation:

كما ذكرنا فإننا سنقوم ببناء نموذج باستخدام بيئة Matlab لإجراء عملية نمذجة اللاقط الكهروضوئي وكل من التقنيات السابقة العشر (التقنيات الرئيسة والفرعية)، ومقارنة الخرج الذي نحصل عليه بهدف تحديد التقنية الفُضلى ومقارنة التقنيات فيما بينها.

اعتُمد في نمذجة اللاقط الكهروضوئي على النموذج الجاهز للخلية الشمسية في برنامج Matlab مكتبة (Simscape-simelectronic-sources)، حيث أُدخلت المعطيات إلى النموذج بالاعتماد على الجدول المبين في الملحق الأول للدراسة.

أما بالنسبة إلى تغيرات الإشعاع الشمسي، فمن المعروف أن هذه التغيرات تكون غير خطية وغير معروفة وغير متوقعة خلال النهار، لذلك قمنا بافتراض أن الإشعاع الشمسي يتغير

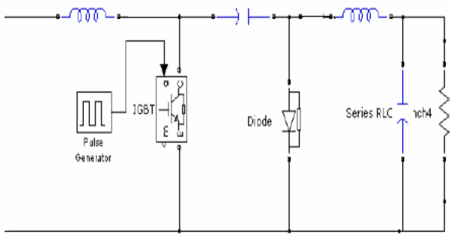
بشكل عشوائي خلال اليوم وفقاً للأشكال الآتية: (-(17a)-(17b)-(17c)-(17d)(17e)-(17f)-(17g)-(17h)-(17i)-(17j)-(17k)-(17l)-(17m)-(17n))، التي تمثل أغلب أشكال تغير الإشعاع خلال اليوم:



الأشكال (17) أشكال التغيرات المفترضة للإشعاع الشمسي

حيث أُدخلَتْ هذه الأشكال إلى النموذج المبني في برنامج Matlab باستخدام الصندوق look up table الموجود ضمن البرنامج ضمن مكتبة Simulink.

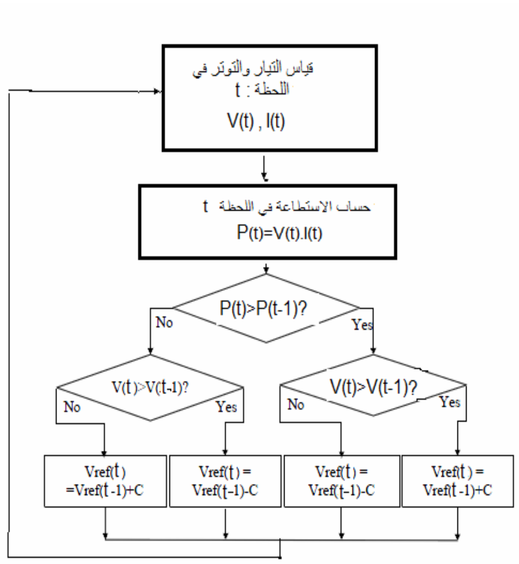
بالنسبة إلى المحول dc-dc أجريت نمذجته بالاعتماد على دارته المبينة سابقاً في الشكل(2)، ويوضح الشكل(18) نمذجة المحول المذكور:



الشكل(18) مخطط نمذجة المحول dc-dc

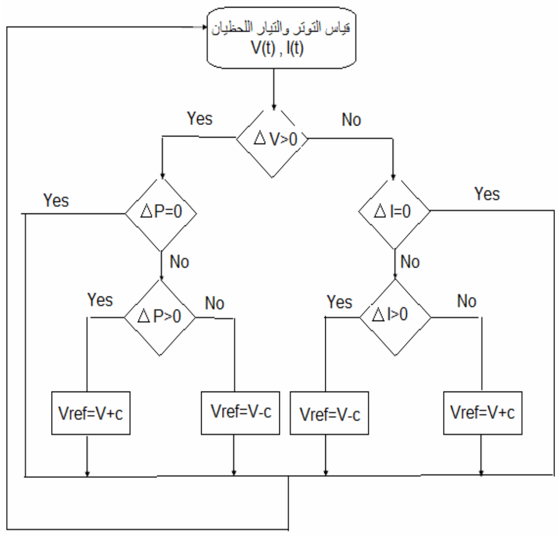
وبالنسبة إلى نمذجة كل تقنية من التقنيات السابقة، فسنوضح فيما يأتي خوارزمية عمل أهم تقنيتين من التقنيات السابقة وهما تقنية الاضطراب والمراقبة، وتقنية زيادة الناقلية، وسنقوم بتفصيل خوارزمية عمل كل من التقنيات السابقة جميعاً في بحث لاحق.

يوضح الشكل(19) الخوارزمية العامة لعمل تقنية الاضطراب والمراقبة.



الشكل(19) خوارزمية عمل تقنية الاضطراب والمراقبة

كما يبين الشكل(20) الخوارزمية العامة لعمل تقنية زيادة الناقلية:



الشكل(20) خوارزمية عمل تقنية زيادة الناقلية

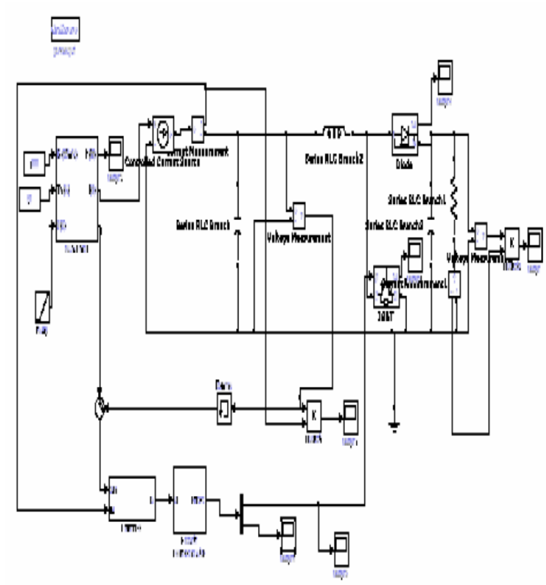
إذْ تمثل c في كلا المخططين مقدار الاضطراب الذي يجريه البرنامج.

وباعتبار أنه من غير الممكن إدراج مخططات النمذجة للتقنيات السابقة جميعها ضمن هذا البحث، فسنبين مخططات نمذجة التقنيتين الأهم (الاضطراب والمراقبة وزيادة الناقلية)، وسنكتفي بذكر طاقة الخرج التي حصلنا عليها بالنسبة إلى التقنيات الأخرى، وسنقارنها ببعضها بعضاً لتحديد التقنية الفُضلى، على أن نوضح في بحث لاحق مخططات النمذجة لباقي التقنيات.

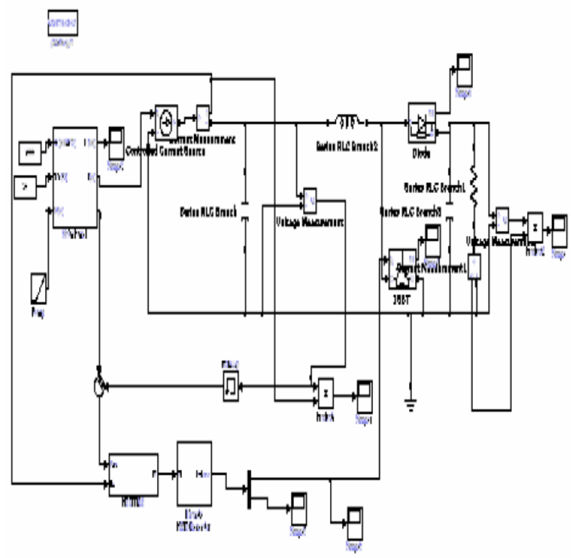
يبين الشكلان (21) و (22) مخططي النمذجة للتقنيتين المذكورتين ضمن برنامج Matlab.

وللحصول على نتائج أقرب ما تكون للتطبيق العملي، افترضنا نظاماً كهروضوئياً كاملاً مكوناً من ثلاث سلاسل، في كل سلسلة 31 لاقطاً من النوع المبين في الملحق الأول للدراسة، ومن ثَم تكون الاستطاعة الكلية النظرية[4650 W]، علماً أن هذا النظام هو أحد الأنظمة المصممة في الشركة السورية الأوكرانية لإنتاج اللواقط الكهروضوئية وتوزيعها (سولاريك).

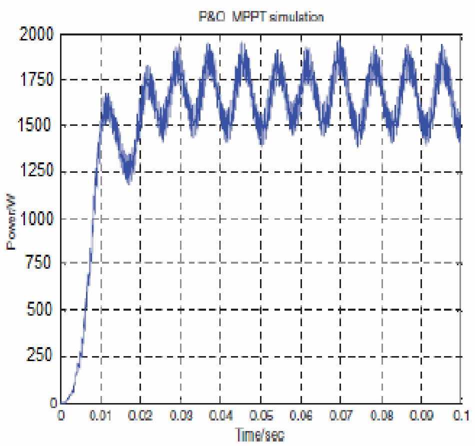
ونبين في الشكلين (23) و(24) نتائج النمذجة لكل من تقنيتي الاضطراب والمراقبة وزيادة الناقلية، ولشكل واحد من أشكال تغير الإشعاع الشمسي.



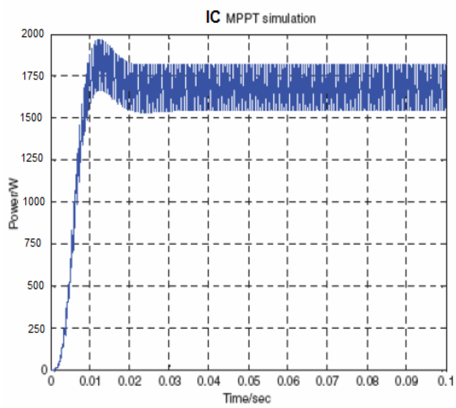
الشكل (21) نمذجة تقنية الاضطراب والمراقبة ضمن بيئة Matlab



الشكل (22) نمذجة تقنية زيادة الناقلية ضمن بيئة Matlab



الشكل (23) نتائج النمذجة لتقنية الاضطراب والمراقبة



الشكل (24) نتائج النمذجة لتقنية زيادة الناقلية

بعد بناء نموذج كل تقنية، حسبت الطاقة المولدة من قبل النظام خلال فاصل زمني [sec] 0.1 لكل تقنية من تقنيات mppt ولكل دخل من الأشكال (17)، وحسبت الطاقة المولدة من النظام (الاستطاعة × الزمن)، ويبين الجدول (1) النتائج التي تم الحصول عليها، حيث وضع خط تحت أصغر قيمة للطاقة المحصلة، وأُشير إلى قيم الطاقة العظمى في كل حالة من الحالات بخط عريض في الجدول.

وفي السطر الأخير من الجدول (1) رتبت التقنيات بالاعتماد على مجموع الطاقة المنتجة عند مختلف ظروف الإشعاع الشمسي، وهذا الترتيب نوعي إذا تختلف الطاقة باختلاف ظروف الإشعاع الشمسي.

الجدول (1) نتائج النمذجة لكل تقنية من التقنيات ولكل دخل من الإشعاع الشمسي

شكل الاشعاع الشمسي	الطاقة النظرية [J]	CV [J]	SC [J]	OV [J]	P&Oa [J]	P&Ob [J]	P&Oc [J]	ICa [J]	ICb [J]	TG [J]	TP [J]
(a)	1711	1359	1539	1627	1695	1707	1490	**1708**	**1708**	1562	1681
(b)	1785	1410	1687	1700	1774	1781	1558	**1782**	**1782**	1643	1761
(c)	1481	1192	1337	1403	1465	1476	1301	**1478**	**1478**	1311	1424
(d)	1633	1290	1492	1552	1625	**1628**	1416	**1628**	**1628**	1476	1589
(e)	1785	1403	1659	1699	1769	1780	1543	**1782**	**1782**	1643	1762
(f)	1711	1363	1636	1630	1692	1697	1508	**1709**	**1709**	1563	1683
(g)	1633	1298	1351	1552	1617	1627	1432	**1630**	**1630**	1477	1593
(h)	1482	1204	1397	1409	1441	1431	1311	**1479**	**1479**	1314	1429
(i)	1674	1339	1562	1595	1664	1671	1480	**1672**	**1672**	1522	1642
(j)	457	386.2	398.4	401.1	445.2	**446.3**	437.5	411.6	**446.3**	354.8	354.8
(k)	1354	1036	1247	1245	1332	**1343**	1153	1250	1333	1259	1338
(l)	540	459	427	479	524	**525**	515	469	503	397	444
(m)	1819	1410	1589	1730	1801	**1812**	1567	1808	1810	1681	1795
(n)	1558	1248	1388	1478	1542	1553	1370	**1555**	**1555**	1395	1510
المجموع	20623	16397	18709	19500	20386	20477	18081	20361	20515	18597	20005
نسبة مئوية	100	79.51	90.72	94.56	98.85	99.29	87.68	98.73	99.48	90.18	97.01
الترتيب حسب الأفضل		10	7	6	3	2	9	4	1	8	5

7.المقارنة الاقتصادية بين التقنيات التقليدية:

حتى نكمل تحليلنا التقني لا بد من مناقشة تكاليف هذه التقنيات، إذ إن مقارنة التكاليف تعتمد على معرفة التقنية المستخدمة للتحكم ضمن جهاز mppt، إذْ إن لكل تقنية حساسات ومكونات إضافية (مكونات الاستطاعة، ومكونات الكترونية، والدارات...).

للقيام بمقارنة كاملة بين هذه التقنيات يجب إجراء مقارنة حسابية مع الأخذ بالحسبان انتشار هذه التقنيات حالياً، كما يجب الأخذ بالحسبان الأمور الآتية [12]:

- عملياً، تعتمد بعض تقنيات mppt على الدارات التمثيلية (SC أو OV أو CV)، في حين تعتمد تقنيات أخرى على الدارات الرقمية التي تتطلب متحكمات صغرية (P&O وICs والتقنيات الحرارية)، ويجب الأخذ بالحسبان أن التقنيات التمثيلية أرخص من الرقمية التي تتطلب متحكمات وبرامج غالية.
- عدد الحساسات المطلوبة للتطبيق العملي.
- عادة، من الأسهل والأوثق قياس الجهد بدلاً من قياس التيار، كما أن حساسات التيار أغلى وأضخم، - إن حساسات الإشعاع ودرجات الحرارة غالية جداً وغير شائعة الاستخدام.

بناء على هذه الاعتبارات يمكن أن نضع تصوراً للتكلفة الاقتصادية لهذه التقنيات بشكل تقريبي، كما هو موضح في الجدول (2) [12]:

الجدول (2) المقارنة الاقتصادية

الكـــلفة

التقييم الكلي	متحكم صغري	الحساسات	متطلبات ومعدات مختلفة	التقنية
L	A/L	L	A	CV
M	A/L	M	H	SC
L/M	A/L	L/M	H	OV
L/M	L	M	A	P&Oa
L/M	L	M	A	P&Ob
M	M	M	A	P&Oc
M	M	M	A	ICa
H	M/H	H	A	ICb
M/H	M	M/H	A	TG
H	M/H	H	A	TP

A مهمل القيمة L منخفض القيمة M متوسط القيمة H مرتفع القيمة

8. مناقشة النتائج:

1ـ من البيانات الموجودة في الجدول (1) نجد أن تقنية P&O وتقنية IC هما الفضليان مقارنة بالتقنيات الأخرى، ويتماثلان من حيث الأداء والطاقة المنتجة، وهذا ما يبرر الانتشار الواسع لهما في التطبيقات التجارية.

2ـ إن طريقة ICb: تقدم أعظم طاقة لأحد عشر من أربعة عشر دخلاً.

3ـ عند ظروف الإشعاع المنخفض نلاحظ أن ICb أكثر فاعلية من ICa .

4ـ إن أداء تقنية P&Oc تختلف عن التقنيتين الأخريين لتقنية P&O، إذْ إن الطاقة المولدة عند استخدامها أخفض من الطاقة المولدة عند استخدام تقنيات P&O الأخرى، وذلك بسبب الحاجة إلى دورة اضطراب أخرى، مما يسبب بطئاً مقارنة بالتقنيات الأخرى، ومن ثَم مردوداً أخفض.

5. تقنيات OV وSC تتطلب قاطعاً ستاتيكياً إضافياً، لذلك هي تقدم طاقة أقل مقارنة بتقنيات P&O وIC بسبب فصل

الاستطاعة عن طريق المبدل الالكتروني.

فضلاً عن ذلك، إن تقنيات OV وSC لا تتبع الفواصل الزمنية اللحظية؛ وذلك لأن خطوة تغير الإشعاع تظهر خلال عمليتي فصل متعاقبتين للقاطع، وهذه التقنيات لا تستطيع قياس mpp حتى تُقَاس السوية الجديدة للإشعاع الشمسي، ويضاف إلى ذلك أن اختيار مدة التقطيع حرج جداً، فإذا كانت هذه المدة قصيرة جداً فإن إنتاج الطاقة سوف ينخفض بسبب زيادة عدد مرات فصل القاطع الساكن، أما إذا كانت هذه المدة طويلة جداً فإن mpp لا يمكن تحديدها بشكل دقيق عند تغيرات إشعاع كبيرة، كما أن مردود هذه التقنيات (OV وSC) يمكن تحسينه من خلال إضافة القاطع التسلسلي (قاطع الفتح) أو القاطع التفرعي (قاطع القصر) إلى بضعة لواقط من حقل PV بدلاً من كامل النظام، لكن هذا الحل له مساوئ إذا كانت اللواقط المختارة مظللة، كما أن إضافة هذه القواطع يزيد الضياعات ويخفض الأداء.

6. إن بعض تقنيات mppt يعتمد على الاضطراب في حين تعتمد التقنيات الحرارية على قياس قيمة التوتر المرجعي V_{ref} وتحديده، فتقنية TP تقدم طاقة أقل بمقدار ضئيل جداً من الطاقة التي تقدمها تقنيات P&O وIC، لكن ليس لها المردود نفسه بسبب أن المعادلة التي تحسب V_{OC} كقيمة قريبة نوعاً ما إلى القيمة المثالية (أي الخطأ الناتج عن حسابات Voc، وهذه الأخطاء غير موجودة في تقنية TP) يجب أن يضاف إلى الخطأ الناتج عن حساب التوتر المرجعي V_{ref}.

7. تقنية CV هي الأسوأ بين التقنيات الأخرى، إذ في المجال العملي لا تلاحق هذه الطريقة mpp، بل تقوم بضبط الجهد المرجعي إلى قيمة جهد مثالي عند شروط الاختبار العيارية أو أي قيمة مثْلى أخرى وتبقيها ثابتة ضمن أي ظروف تشغيل.

8. بعد الأخذ بالحسبان نتائج الجدول (1)، وأسس التقييم الاقتصادي المذكورة في الجدول(2)، وجدنا أن تقنيات P&O وIC هي الفُضلى، كما أنها لا تتطلب قواطع ساكنة إضافية كما في تقنيات SC وOV؛ لذلك فإن تكلفتها ليست مرتفعة، وأن تقنيتي $P\&O_b$ و IC_a هما التقنيتان الفضليان بين التقنيات المدروسة.

9. مع أن تقنية IC_b لها أعظم مردود لكن هذه التقنية ذات تكلفة عالية بسبب استخدام حساسات أكثر من تقنية IC_a [20] (الجدول (2)).

10. إن هذه النتائج التي حصلنا عليها هي نتائج دقيقة إلى حد كبير، إلا أن ذلك لا يعوض عن إجراء اختبارات عملية لهذه التقنيات لتحديد الفُضلى بينها، إذْ إن الدراسة -كما رأينا- اعتمدت على الأسس النظرية لكل طريقة، فضلاً عن نمذجة كل طريقة ومقارنة نتائج هذه النمذجة، إلا أن ذلك لا يكتمل إلا بإجراء اختبارات عملية حقيقية على نظام كهروضوئي عملي، هذا الأمر يحتاج إلى تنفيذ عملي لهذه التقنيات الذي يمكن أن ينفذ في بحوث لاحقة، لأن القياسات العملية الحقلية تؤكد نتائج الدراسة النظرية والدراسة باستخدام برنامج Matlab ومن ثَم تساعد بشكل أكبر على تحديد الطريقة المثلى و الفُضلى.

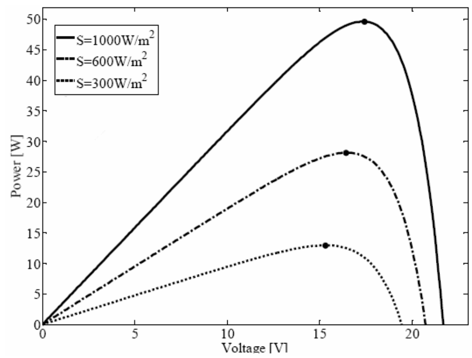
الملحق الأول [3]

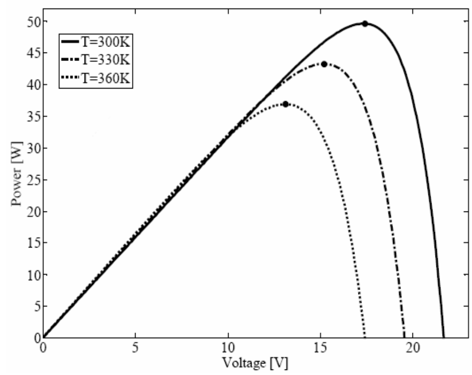
خصائص اللاقط المستخدم في الدراسة

Symbol	Quantity	Value
P_{MPP}	Maximum Power	50 W
V_{MPP}	Voltage at P_{MPP}	17.3 V
I_{MPP}	Voltage at I_{MPP}	2.89 A
I_{SC}	Short-Circuit Current	3.17 A
V_{OV}	Open-Circuit Voltage	21.8 V
T_{SC}	Temperature coefficient of I_{SC}	(0.065±0.015)%/°C
T_{OC}	Temperature coefficient of V_{OC}	-(80±10) mV/°C

الملحق الثاني [3]

منحنيات تغير خرج اللاقط بتغير درجة الحرارة والإشعاع الشمسي





مسرد المصطلحات

المصطلح	معناه
Solar energy	الطاقة الشمسية
Primary energy	الطاقة الأولية
Grid connected PV systems	أنظمة كهروضوئية مرتبطة بالشبكة
Stand-alone PV systems	أنظمة كهروضوئية مستقلة عن الشبكة
Maximum power point	نقطة الاستطاعة العظمى
PV array	حقل اللواقط الكهروضوئية
Maximum power point tracking (mppt)	ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى
Panel tracking	ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى بتحريك اللواقط
(Pulse Width Modulation)	تعديل عرض النبضة
Constant Voltage method	تقنية التوتر الثابت
current controlled power converter	مبدل استطاعة يتحكم بالتيار
Short current pulse method	تقنية نبضة تيار القصر
open voltage method	تقنية توتر الدارة المفتوحة
Perturb and observe method	تقنية الاضطراب والمراقبة
Incremental conductance method	تقنية زيادة الناقلية
standard test conditions	شروط الاختبار المعيارية

المراجع*

1) حمزة، ع. (2009)،"هندسة النظم الشمسية الكهروضوئية-تحليل وتصميم"، منشورات جامعة دمشق. 520
2) قرارات وتشريعات صادرة عن مجلس الوزراء في سورية ووزارة الكهرباء في سورية ودراسات صادرة عن المركز الوطني لبحوث الطاقة.
3) كتيبات ودراسات من الشركة السورية الأوكرانية لإنتاج وتسويق اللواقط الكهروضوئية.
4) ورقوزق، هـ. (2006)، "إلكترونيات القدرة الكهربائية 2"،منشورات جامعة دمشق. 285.
5) J.Schaefer, Review of Photovoltaic Power Plant Performance and Economics, IEEE Trans. Energy Convers., vol. EC-5,pp. 232-238, June, 1990.
6) G.J.Yu, Y.S.Jung, J.Y.Choi, I.Choy, J.H.Song and G.S.Kim, A Novel Two-Mode MPPT Control Algorithm Based on Comparative Study of Existing Algorithms, Proc. Photovoltaic Specialists Conference, 2002, pp. 1531-1534.
7) T.Noguchi, S.Togashi and R.Nakamoto, Short-Current Pulse-Based Maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System, *IEEE Trans. Ind. Electron*., vol.49, no.1, pp. 217-223, 2002.
8) D.P.Hohm and M.E.Ropp, Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms Using an Experimental, Programmable, Maximum Power Point Tracking Test Bed, *Proc. Photovoltaic Specialist Conference*, 2000, pp. 1699-1702.
9) O. Wasynczuk, Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 102, no. 9, pp. 3031–3037, Sep. 1983
10) N.Femia, D.Granozio, G.Petrone, G.Spaguuolo, M.Vitelli, Optimized One-Cycle Control in Photovoltaic Grid Connected Applications, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 2, no 3, July 2006.
11) M.Park and I.K. Yu, A Study on Optimal Voltage for MPPT Obtained by Surface Temperature of Solar Cell, *Proc. IECON*, 2004, pp. 2040-2045.
12) T. Esram, and P.L. Chapman, Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, IEEE Trans. Energy Conv., vol.22, no.2, June, 2007, pp.439-44

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2013/4/4