

التحكم بنظام ضخ مياه كهروضوئي معزول يستخدم محرك تحريضي ويتتبع نقطة الاستطاعة القصوى

د. م. ثائر أحمد ابراهيم*

م. علي جابر عيسى**

(تاريخ الإيداع 2021/ 11/ 30 . قبل للنشر في 2022/ 2/ 6)

□ ملخص □

في الوقت الحاضر، هناك صعوبة في توفير المياه في العديد من المناطق في سوريا (خاصةً في القرى والأرياف) سواءً مياه الشرب أو المياه المستخدمة للري.

يقترح هذا العمل حلاً للتحديات التي تواجه الأنظمة الكهروضوئية لضخ المياه، مثل مشكلة عدد الوحدات الكهروضوئية (الألواح) في أنظمة الطاقة المنخفضة القدرة، وتتبع نقطة الاستطاعة القصوى، فضلاً عن نظام التحكم في محرك المضخة.

يتم تتبع نقطة الاستطاعة العظمى من خلال مبدل رافع (Step-up converter) يتم التحكم به بواسطة وحدة تحكم تكاملية تناسبية (PI controller). حمل النظام هو عبارة عن محرك تحريضي أحادي الطور يتم التحكم فيه بواسطة استراتيجية التحكم (Open-loop scalar)، مضخة المياه مؤتمتة تعمل وفق شروط تضمن التشغيل السليم لها.

للتحقق من صحة عمل الحلول المقترحة تم إجراء اختبارات المحاكاة عند اختلاف شدة الإشعاع الشمسي، ومن أجل عدد متغير من الوحدات (الألواح) الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: نظام ضخ مياه كهروضوئي، محرك تحريضي أحادي الطور، تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، نظام تحكم، مبدلات الكترونية محاكاة.

* أستاذ مساعد في قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سوريا.

** طالب دراسات عليا - ماجستير - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - جامعة طرطوس - سوريا.

Control of Standalone photovoltaic water pumping system that uses an induction motor and tracks the maximum power point

Dr. Their Ahmad Ibrahim*
Ali Jaber Issa **

(Received 30 / 11/ 2021 . Accepted 6 / 2/ 2022)

□ ABSTRACT □

At this time, There is a difficulty in securing water in many areas in Syria (especially in villages and rural areas), whether drinking water or water used for irrigation.

This work proposes solutions to challenges encountered in photovoltaic water pumping systems, such as the issue in the number of photovoltaic modules in low power systems, the maximum power point tracking, as well as the pump motor control system.

The maximum power point tracking is achieved by step-up converter controlled by PI controller. The load of the system is a single-phase induction motor controlled by an open-loop scalar control strategy. The water pump is automated so that it operates under conditions that ensure its proper operation.

To validate the proposed solutions, simulation tests were carried out for different solar radiation intensities and for a variable number of PV modules (panels).

Key words: Photovoltaic Water Pumping System, Induction Motor 1 Φ , Maximum Power Point Tracking, Control system, Electronic converters, Simulation.

* Assistant Professor in Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University. Syria.

** Scientific Student – Master in Department of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University - Syria.

1 - مقدمة (Introduction):

تلعب الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الكهروضوئية (Photovoltaic) دوراً كبيراً في إنتاج الكهرباء كونها مصدراً مجانياً للطاقة النظيفة لا ينضب. تُعد أنظمة الطاقة الكهروضوئية واحدة من أكثر الطرق فعالية لحل مشكلة نقص المياه في المناطق البعيدة عن الشبكة الكهربائية لما تتمتع به من الموثوقية والأداء العالي، كما أنها تقدم بديلاً مؤثراً بيئياً واقتصادياً لمضخات المياه التقليدية التي تعمل بالوقود الأحفوري. في الحقيقة، إن استثمار الطاقة الكهروضوئية لتأمين المياه الصالحة للشرب أو للري هو حل منطقي لأنه يوجد علاقة طبيعية بين الحاجة للمياه (في الصيف) وتوافر الإشعاع الشمسي.

تُعد سوريا من المناطق التي تتمتع بمعدل سطوع شمسي عالٍ. وفقاً للأطلس الشمسي الصادر عن المركز الوطني لبحوث الطاقة فإن أقل قيمة لمتوسط الإشعاع الشمسي في سوريا هي $1200W/m^2$ ، وكما نعلم فإن شدة الإشعاع الشمسي المُجدي تساوي $1000W/m^2$ وبالتالي يكون إنتاج الطاقة الكهربائية من الشمس حلاً ناجحاً في سوريا [1]. وقد بينت دراسة الإسكوا (UN-ESCWA) أن عدد ساعات الشمس التي تنعم بها سوريا تفوق (2500) ساعة سنوياً، أي أن أشعة الشمس تكاد لا تغيب عن سوريا طيلة أيام السنة وهي من المعدلات المرتفعة بالنسبة إلى باقي مناطق العالم [2].

يتكون نظام الضخ الكهروضوئي الذي سنقوم بتصميمه من: الألواح الكهروضوئية، المُبدلات الإلكترونية وأنظمة التحكم بها، محرك إلى جانب مضخة وبعض الحساسات. سنقوم في هذا البحث بتطوير أنظمة التحكم لنظام ضخ مياه كهروضوئي (PVWPS) من أجل تشغيل مضخة قياسية أحادية الطور: التحكم بالمبدل (DC/DC) واستخراج أقصى طاقة متوفرة من الألواح الكهروضوئية والتحكم بالمحرك التحريضي (المضخة). ولتجنب الهدر في المياه والطاقة سنقوم بأتمتة عمل المضخة.

2- مشكلة البحث (Research problem):

عاملان هامين يدفعان إلى البحث في موضوع تبسيط وزيادة موثوقية وتقليل تكلفة النظام الكهروضوئي لضخ المياه، هما: التطور في تكنولوجيا الطاقة الكهروضوئية والانخفاض العالمي في تكلفتها، والحاجة إلى تأمين المياه (للري وللشرب). إن تحقيق التوافق بين الألواح الكهروضوئية والمضخة الموصولة مباشرة بها لتشكل نظام وصل مزدوج (دون الحاجة لاستخدام المدخرات) مع أتمتة عمل المضخة يُعتبر تحدياً من المفيد النجاح في تحقيقه. تتلخص مشكلة البحث في النقاط الرئيسية التالية:

- تطوير نظام التحكم الخاص بالمُبدلات الإلكترونية لزيادة مردود الأنظمة الكهروضوئية.
- الحصول على الطاقة القصوى من الألواح الكهروضوئية.
- تقليل عدد الألواح الكهروضوئية اللازمة لتغذية الحمل (المحرك) في حال تم تحسين تصميم المبدلة الإلكترونية.

- الاستغناء عن المدخرات في أنظمة ضخ المياه واستبدالها بتخزين مياه الضخ في خزان للمياه.
- إيقاف نظام الضخ عند امتلاء الخزانات لتجنب الهدر في المياه (واستهلاك المضخة) عن طريق التحكم بعملية الضخ.

3- الدراسة المرجعية (Related works):

تعددت الدراسات المرجعية التي لها صلة في مجال البحث وتتوعد الأهداف الخاصة بهذه الدراسات، لذلك سنستعرض في هذه الفقرة بعض الدراسات الحديثة ذات الصلة بموضوع البحث. وضح البحث [3] مكونات نظام الضخ الكهروضوئي (الكهربائية والإلكترونية والميكانيكية)، وسلط الضوء على مزايا الاستثمار في الطاقة الكهروضوئية في مجال ضخ المياه كالموثوقية والأداء الجيد إضافة إلى الناحية الاقتصادية. في الدراسة [4]، تم تصميم نظام ضخ مياه كهروضوئي مناسب للمناخ الصحراوي (دراسة حالة مزرعة صغيرة)، وتم بناء نموذج لوحدة محرك-مضخة بناءً على النتيجة التجريبية للعديد من المضخات الكهروضوئية للحصول على نقطة تشغيل النظام ومعدل التدفق الضخ. في البحث [5]، استُخدمت أدوات النمذجة والمحاكاة التي يوفرها برنامج MATLAB/Simulink لبناء نموذج للنظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة العامة، وتم استخدام النظام الكهروضوئي المصمم لمحاكاة العديد من السيناريوهات، حيث أظهرت نتائج المحاكاة أن النموذج المصمم موثوق ومستقر. أقتراح البحث [6] استخدام المنهج التكيفي لتقنية الملاحظة والارتباب (Adaptive P&O MPPT) التي مكنت من تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية بسرعة ويتذبذب أقل مقارنة مع الطريقة التقليدية. تم التحقق من فعالية الطريقة المقترحة بمقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج التجريبية. اقتراح البحث [7] مبدلة الكترونية رافعة "Boost" وتم تصميم دائرة المبدلة بحيث تكون خسائر التحويل منخفضة جداً وبالتالي تكون كفاءة التحويل عالية، أجريت عمليات المحاكاة على برنامج MATLAB/Simulink والتي برهنت على صحة العمل. أكد البحث [8] على أن نظام ضخ المياه بالطاقة الكهروضوئية (SPVWPS) هو بديل واعد لأنظمة الضخ التقليدية وتطبيق فعال من حيث التكلفة وخاصة في المناطق النائية البعيدة عن الشبكة في البلدان النامية، كان الهدف من هذا البحث مراجعة وتلخيص البحوث والتطورات الحديثة في نظم ضخ المياه بالطاقة الكهروضوئية. بين المقال [9] أنه قد لا يتم تعقب نقطة القدرة القصوى (MPP) لأسباب عديدة. لحل هذه المشكلة، اقترح هذا العمل، العثور على شروط وظروف لتتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) للنظام الكهروضوئي مع القالب (Inverter) في آن واحد وذلك من خلال تحليل نموذجهم الرياضي المتكامل. بناءً عليه تم اقتراح استراتيجية تحكم MPPT لبارامترات الطقس المتغيرة. تم التركيز في البحث [10] على تحليل، تصميم، وتنفيذ تحكّم رقمي بالمُبدل الرفع "Boost" باستخدام تقنية FPGA، أحد تطبيقات هذا المُبدل هو النظام الكهروضوئي حيث يكون الهدف من الـ Boost، هو تنظيم وزيادة كمية الطاقة المستخلصة من نظام الألواح الكهروضوئية لتقديمها للقالب. تم في العمل [11] دراسة استراتيجيات مختلفة لأنظمة ضخ المياه الكهروضوئية التي تعتمد على محولات التردد القياسية والتي هي جاهزة للاستخدام ومتاحة على نطاق واسع لمستويات الطاقة المختلفة، اقترح هذا العمل أسلوب جديد لتطبيقات الطاقة المنخفضة، باستخدام وحدة أو وحدتين من الألواح الشمسية، مضخة AC تعمل بالطرد المركزي مقادة بمحول تردد قياسي. تم في البحث [12] اقتراح استخدام مبدلة الإلكترونية (DC to DC Converter) لتنفيذ تقنية ملاحقة الاستطاعة الاعظمية (MPPT) في أنظمة الضخ الكهروضوئية (PVWPS) من أجل محرك تحريضي يتم التحكم به بطريقة (Scalar Control)، تم التحقق من نتائج الاختبارات عن طريق المحاكاة وأجراء الاختبارات العملية.

4- أهمية البحث وأهدافه (The importance of the research and its objectives):

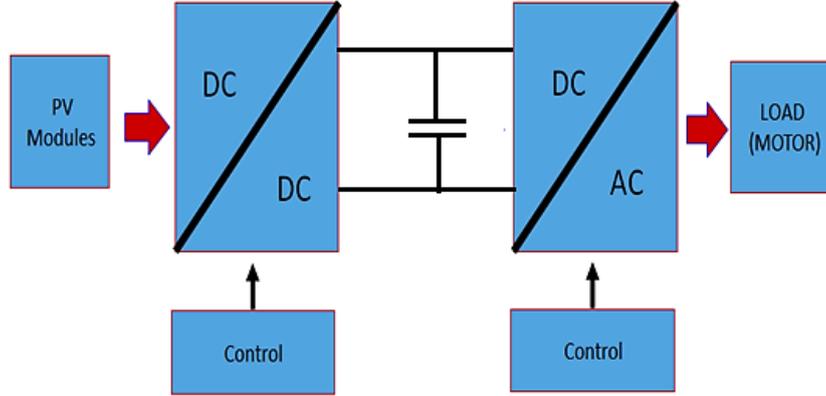
- أولاً أهمية البحث، تكمن أهمية البحث فيما يلي:
- الحصول على الطاقة العظمى من النظام من خلال اختيار الخوارزمية الأنسب لتتبع نقطة الاستطاعة القصوى.
- تصميم دائرة المُبدلات الالكترونية وأنظمة التحكم بها بحيث تكون خسائر التحويل منخفضة وتكون مناسبة لتطبيقات نظام الطاقة الكهروضوئي.
- أهمية اقتصادية، نظراً لانخفاض تكلفة النظام الكهروضوئي بالإضافة لارتفاع كلفة توليد الطاقة من المصادر الأحفورية.
- الاستغناء عن المدخرات ذات التكلفة المرتفعة والعمر المحدود، تخزين الماء بدلاً من تخزين الكهرباء في المدخرات.
- يقدم البحث تقانة الطاقة الكهروضوئية (PVWPS) كحل هام لأنظمة ضخ المياه في سوريا: لتوفير المياه في المناطق البعيدة عن الشبكة العامة، والتي يتم توفيرها في الغالب من النظم القائمة على الديزل (تكلفة مرتفعة). أو حتى في توفير المياه في مناطق الشبكة العامة لما لها من آثار إيجابية من الناحية الاقتصادية ولا سيما مع ارتفاع أسعار الكهرباء.
- ثانياً أهداف البحث، الهدف العام هو تطوير أنظمة التحكم لنظام ضخ مياه كهروضوئي (PVWPS) من أجل تشغيل مضخة قياسية أحادية الطور. ينقسم الهدف العام إلى مهام أصغر (أهداف فرعية)، هي:
- تطوير طريقة التحكم بالمُبدل (DC/DC converter) واستخراج أقصى طاقة متوفرة من الألواح (من خلال تتبع نقطة الاستطاعة العظمى).
- تصميم تقنية للتحكم بالمحرك التحريضي (المضخة) تكون صحيحة من أجل تغيير عزم الحمل (المحرك التحريضي).
- أتمتة عمل مضخة المياه بحيث تعمل وفق شروط تضمن التشغيل السليم لها.

5- طرائق البحث ومواده (Research methods and materials):

في البداية قمنا بتوصيف النظام الكهروضوئي (PVWPS) المقترح لضخ المياه والذي يتكون من عدة أنظمة فرعية، هي: مجموعة الألواح الكهروضوئية (PV) من نوع "FTS-220P"، ومبدل الكتروني رافع للجهد (DC/DC Boost)، ونظام "MPPT" لتعقب نقطة الاستطاعة الأعظمية يستخدم خوارزمية الاضطراب والمراقبة "P&O"، وقالب (أنفتر) مكون من ثلاث أذرع من الترانزستورات (IGBT) (يتم استخدام ذراع واحدة كمفتاح للمُبدل مع ديود)، ومضخة مياه غاطسة أحادية الطور، وحساسات للتيار والجهد. ثم قمنا بتصميم أنظمة التحكم لكل من المبدل الرفع والمحرك التحريضي أحادي الطور: المتحكم التكاملي التناسبي (PI) من أجل المبدل الرفع، واستراتيجية التحكم العددي ذات الحلقة المفتوحة (Open-loop scalar control) من أجل قيادة المحرك. وفي النهاية قمنا بإجراء المحاكاة لاختبار النظام المُصمم برمجياً للتأكد من صحته باستخدام برنامج MATLAB / Simulink.

6- نظام ضخ المياه الكهروضوئي (PhotoVoltaic Water Pumping System):

بشكل عام، يتكون نظام ضخ المياه الكهروضوئي "PVWPS"، الشكل (1)، من مصفوفة الألواح الكهروضوئية والمبدلات الإلكترونية (DC/AC, DC/DC)، محرك المضخة (الحمل)، وبالإضافة إلى أنظمة التحكم (Control) [13].



الشكل(1): مخطط نظام الضخ الكهروضوئي العام.

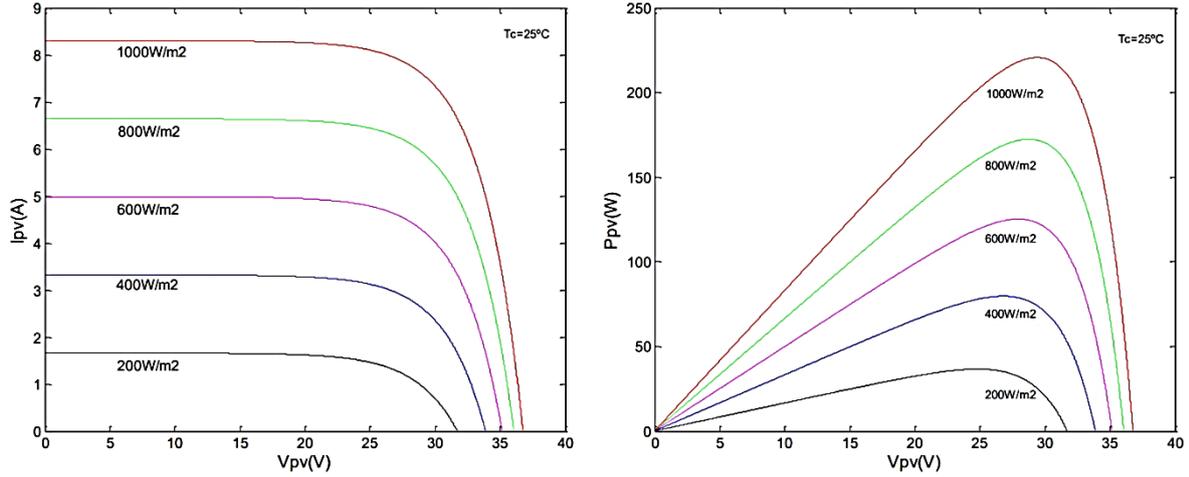
- مولد الطاقة الكهروضوئي (PV Modules): قمنا باستخدام ألواح من نوع "FTS-220P"، الجدول (1):

الجدول (1): الخصائص الكهربائية للوح من "FTS-220P".

Electrical Characteristics	Value
P_{max} (Maximum power)	220 W
V_{pm} (Maximum power voltage)	29,38 V
I_{pm} (Running at maximum power)	7,51 A
V_{oc} (Open-circuit voltage)	36,76 V
I_{sc} (Short-circuit current)	8,30 A

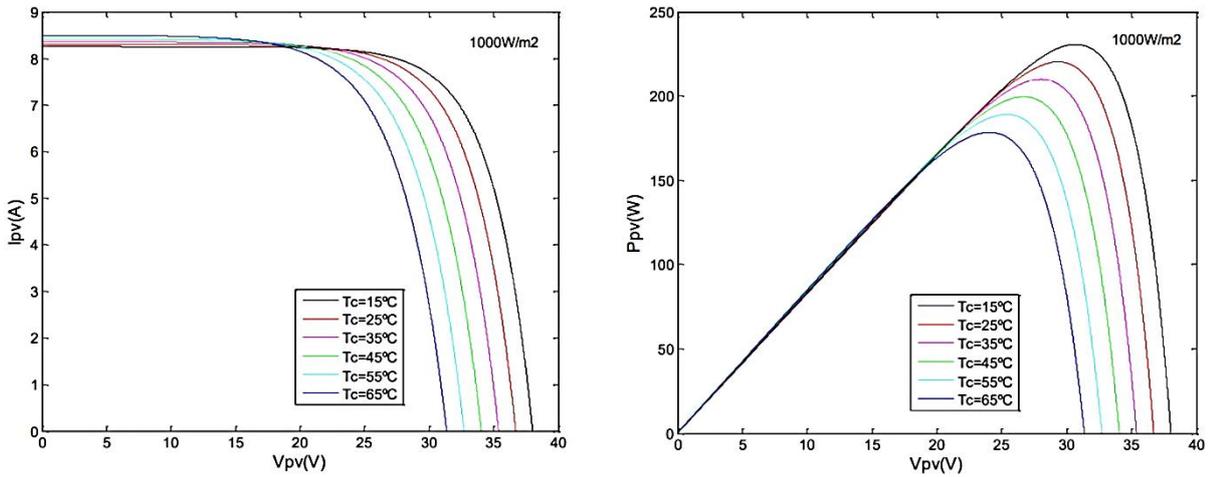
من أجل دراسة اللوح واختبار خصائصه ومعرفة تأثير كل من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، قمنا بتحليل كل من منحنيات (I-V) و (P-V) للوح والتي تعطي خصائص اللوح، وبمقارنة هذه المعلومات مع اللوحة الاسمية نجد أن اللوح يحقق المواصفات الاسمية له (V_{oc} , I_{sc} , P_{max}) وذلك عند شروط الاختبار الاسمية ($G = 1000W/m^2$, $T = 25^\circ c$)

نظراً لأن التيار يتناسب مع مستوى الإشعاع، يزداد التيار مع ارتفاع مؤشرات الإشعاع الشمسي التي تسقط على الخلية الكهروضوئية ومن ناحية أخرى، يختلف الجهد لوغاريتمياً. يظهر الشكل (2) تأثير تغير الإشعاع الشمسي على كل من منحنيات (I-V) و (P-V) للوح FTS-220P.



الشكل (2): تأثير تغير الإشعاع الشمسي على كل من منحنيات (I-V) و (P-V) للوح FTS-220P.

مع ارتفاع درجات الحرارة تنخفض قيمة الجهد لوغاريتمياً بينما تتغير قيمة التيار قليلاً، وتنخفض الطاقة القصوى المولدة. يظهر الشكل (3) تأثير تغير درجة الحرارة على كل من منحنيات (I-V) و (P-V) للوح FTS-220P.



الشكل (3): تأثير تغير درجة الحرارة على كل من منحنيات (I-V) و (P-V) للوح FTS-220P.

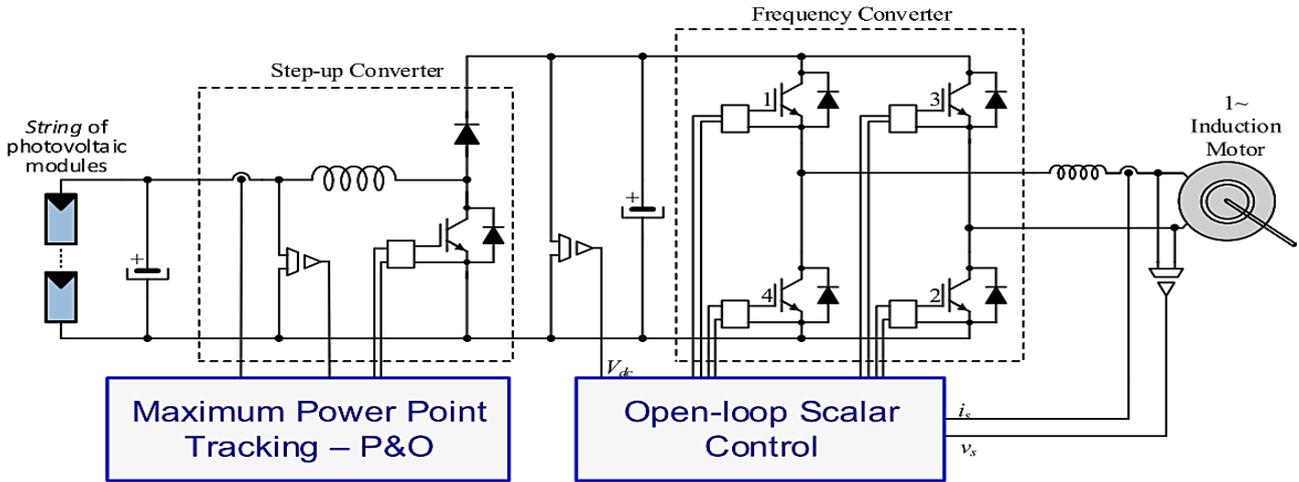
• مضخة المياه (Water Pump): يمكن تصنيف أنظمة الضخ الكهروضوئي في فئتين رئيسيتين [14]: محرك DC أو AC لكل من النوعين ميزات وعيوب حيث تقدم الأنظمة التي تعمل بمحرك DC كفاءة واستراتيجيات تحكّم بسيطة ويمكن أيضاً توصيلها مباشرة بمجموعة الألواح الكهروضوئية، في المقابل تعاني هذه الأنظمة من مشاكل صيانة محرك DC ومدى طاقة محدود. من ناحية أخرى، فإنّ أنظمة ضخ المياه بالطاقة الكهروضوئية التي تعمل بمحركات AC هي أكثر جاذبية نظراً لموثوقيتها وقوتها وتكلفتها المنخفضة [15]. انطلاقاً من ذلك سنستخدم مضخة غاطسة أحادية الطور، كونها فعّالة في حالة الأعماق البعيدة وكميات المياه التي تزيد عن 10m³/hour بالإضافة إلى إمكانية قبول الأفرتر لمصدر كهربائي احتياطي (المولد أو كهرباء الشبكة العامة).

7- نظام ضخ المياه الكهروضوئي المُقترح (Suggested photovoltaic water pumping system):

يبين الشكل (4) المخطط الصندوقي للنظام المُقترح والذي يتألف من مجموعة الألواح الكهروضوئية (PV)، ومُبدّل الكتروني رافع للجهد (DC/DC Boost)، ونظام "MPPT" لتعقب نقطة الاستطاعة الأعظمية للمصدر (الألواح)، وقالب (أنفرتير) مع تحكّم رقمي مفتوح الحلقة مكون من ثلاث أذرع من الترانزستورات (IGBT) (يتم استخدام ذراع واحدة كمفتاح للمُبدّل مع ديود)، ومضخة غاطسة أحادية الطور، وحساسات للتيار والجهد لمراحل انتقال الطاقة في النظام.

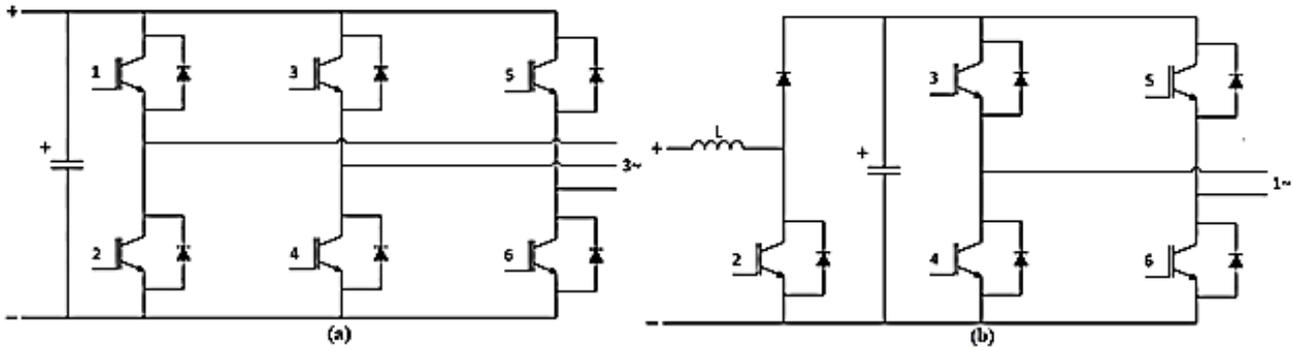
• قمنا باقتراح الطوبولوجيا (التركيب) التالية:

كما نعلم، يتكون المُبدّل الرفع (Boost converter) بشكل أساسي من ملف وديود ومفتاح الكتروني بالإضافة إلى مكثف. باستخدام أنفرتير ثلاثي الطور، قمنا بتحديد ذراع واحدة من IGBTs، وتوصيلها بملف بحيث يتم تشغيله (قدحه) بشكل منفصل بصرف النظر عن الذراعين الأخرين المتبقين. يتم ترك IGBT في الجانب العلوي في الذراع دائماً بحالة off (وضع مفتوح)، لأنه يحتوي على ديود موصول على التوازي والتضاد، ويتصرف المفتاح في هذه الحالة بشكل أساسي كديود. أما بالنسبة لل IGBT في الجانب السفلي فيستخدم كمفتاح من أجل مُبدّل الرفع عن طريق التحكّم ببوابته (بشكل مُنفرد). يتصرف المكثف الموجود في الوصلة (DC-link) مثل المكثف الموجود على خرج المُبدّل الرفع لأن لهم نفس الوظيفة: تنقية الإشارة (الفلتر). (الفترة).



الشكل (4): المخطط الصندوقي المُقترح لنظام ضخ المياه الكهروضوئي.

بالاعتماد على ما سبق، يمكننا بناء المُبدّل الرفع انطلاقاً من ذراع واحد من الأنفرتير الثلاثي الطور، بمجرد إضافة ملف للدارة والتحكم بالمفتاح الإلكتروني بشكل منفصل. من ناحية أخرى، يفقد الأنفرتير خصائصه ثلاثية الطور وسيكون قادراً على قيادة أحمال أحادية الطور فقط. يبين الشكل (5) هذا الأسلوب لبناء هذا المُبدّل (Boost converter) باستخدام ذراع أنفرتير ثلاثي الطور.



الشكل (5): طوبولوجيا الأنفرتير المقترح. (a) الأنفرتير الثلاثي الطور القياسي، (b) الشكل المُعدّل للأنفرتير ثلاثي الطور المستخدم.

يعتمد عمل المُبدّل الرفع على قيمة ثابت فترة التشغيل "D" (Duty cycle)، حيث أنّ قيمة جهد الخرج تحدد كما هو مبين في المعادلة التالية:

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

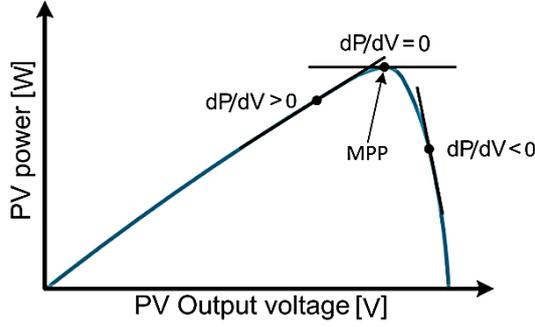
من أجل ضمان عملية التشغيل بالطاقة الأعظمية يجب أن يتضمن نظام التحكم بالمُبدّل تقنية لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT)، كما سنرى في الفقرة القادمة.

8- تصميم أنظمة التحكم (Control system design):

1-8- ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية (Maximum Power Point Tracking):

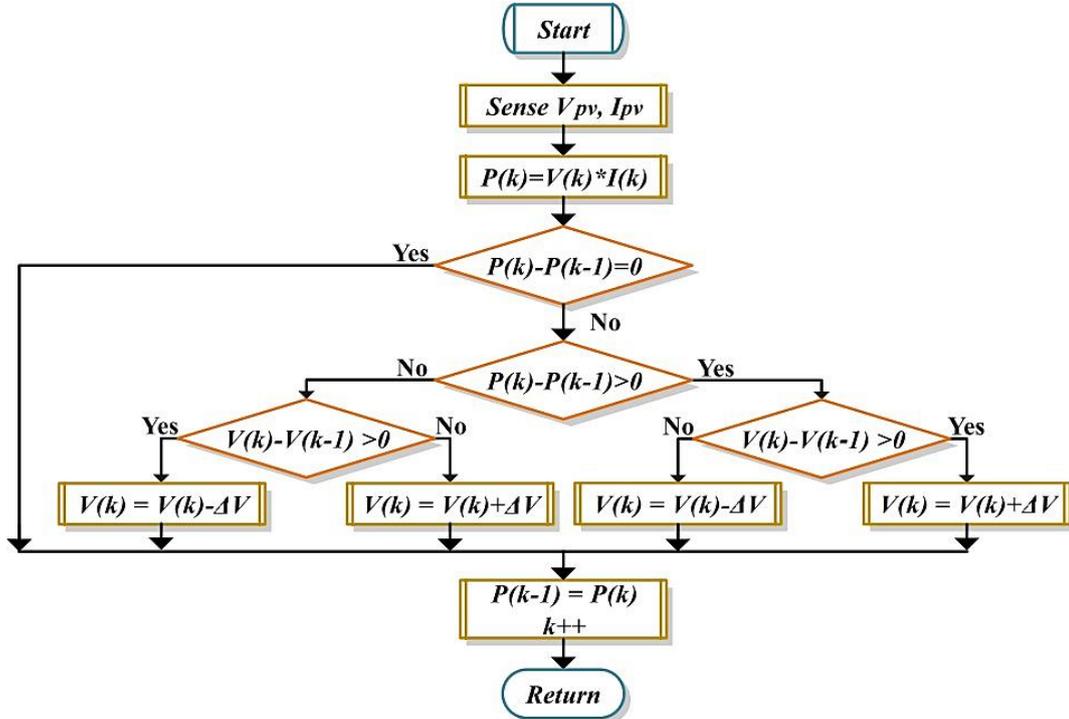
للحصول على أعظم استطاعة ممكنة من مصفوفة الألواح الكهروضوئية يجب علينا ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية، ونحتاج لقيامنا بذلك إلى خوارزمية لمتابعة نقطة الاستطاعة الأعظمية في منحنى الخصائص اللا خطي (I-V) حيث تعمل تقنية MPPT على تثبيت جهد الخرج للحصول على الاستطاعة العظمى بشكل مستقل عن التغيرات في الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة. في الواقع، هناك العديد من الطرق لـ MPPT المذكورة في المراجع ولكل منها مواصفاته وتطبيقاته ومميزاته وعيوبه [16].

في هذا البحث، سنقوم بتطبيق خوارزمية الاضطراب والمراقبة "P&O" (Perturb & Observe) بسبب بساطتها فهي لا تحتاج إلى العديد من العمليات الحسابية وهي الطريقة الأكثر شيوعاً في نظم التحكم بمبدلات القدرة الالكترونية في تطبيقات الطاقة الكهروضوئية وكذلك هي لا تحتاج إلى معلومات عن خصائص الألواح الكهروضوئية لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى [17]. تقيس خوارزمية "P&O" الجهد والتيار عند خرج مصفوفة الألواح الكهروضوئية ويتم احتساب نقطة التشغيل (نقطة الطاقة الفعلية ونقطة الجهد) ويتم مراقبة اضطراب الجهد وإجراء مقارنة مع نقطة التشغيل السابقة (نقطة الطاقة السابقة ونقطة الجهد) من أجل الحصول على قيمة ميل المماس dP/dV كما يظهر في الشكل (6).

الشكل (6): قيمة ميل المماس dP/dV

فإذا كانت قيمة ميل المماس dP/dV أكبر من الصفر فإن الاضطراب سينقل نقط العمل لمصفوفة الألواح نحو الوصول إلى نقطة الاستطاعة العظمى MPP وستستمر الخوارزمية بعد ذلك في تحقيق الاضطراب في الجهد في نفس الاتجاه، ومن جهة أخرى إذا كان ميل المماس dP/dV أصغر من الصفر فإن التغير في نقطة العمل لمصفوفة الألواح ينتقل مبتعداً عن نقطة الاستطاعة العظمى MPP لذلك فإن الخوارزمية تعمل على جعل التغير بالاتجاه المعاكس.

يُظهر الشكل (7) خطوات عمل الخوارزمية كما يُظهر الجدول (2) شرح للمتغيرات الموجودة في الخوارزمية.



الشكل (7): خطوات عمل الخوارزمية "P&O".

الجدول (2): شرح المتغيرات الموجودة في خوارزمية "P&O":

المتغير	الوصف
V_{pv}	الجهد المُقاس من اللوح الكهروضوئي
I_{pv}	التيار المُقاس من اللوح الكهروضوئي
$P(k), V(k), I(k)$	الاستطاعة والجهد والتيار في اللحظة الحالية
$P(k-1), V(k-1), I(k-1)$	الاستطاعة والجهد والتيار في اللحظة السابقة
ΔV	تغير الجهد
$k++$	التغيير للخطوة التالية

8-2- التحكم بالمُبدل الرافع (Step-up Control):

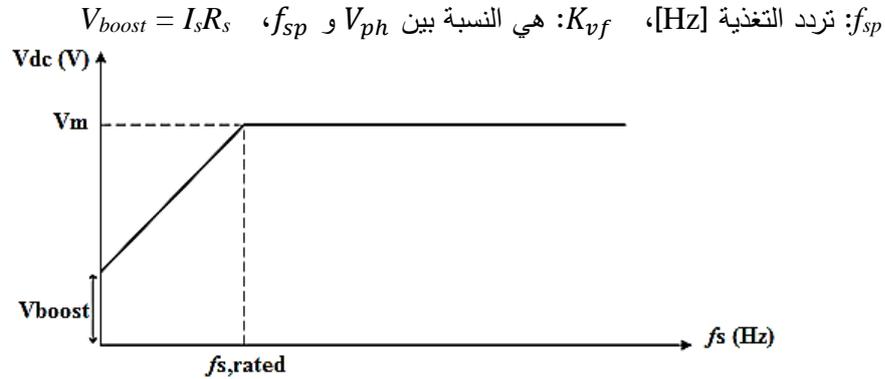
من أجل قيادة هذا المُبدل اعتمدنا على المُتحكّم التكاملي التناسبي "PI" (Proportional-Integral Control) باستخدام V_{ref} (المُعطى باستخدام خوارزمية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT) كإشارة مرجعية. متغيّر التحكم هو زمن الدورة "D" أي ثابت فترة التشغيل للمُبدل الرافع. فيما تقوم خوارزمية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية بعملية البحث عن النقطة العُظمى للاستطاعة، فإنّ المُتحكّم "PI" يفرض على النظام العمل بالقرب من نقطة الاستطاعة العُظمى (MPP). يتم ضبط كل من بارامتريّ المُتحكّم K_p و K_i وفقاً لسرعة الاستجابة للنظام وانعدام خطأ الحالة المستقرة.

8-3- التحكم بالمحرك التحريضي (Induction Motor Control):

يُعد التحكم في المحرك التحريضي (محرك المضخة) مهماً للتشغيل السليم للنظام بأكمله. حيث يجب مراعاة سلوك المحرك، باعتباره حملاً ديناميكياً، من أجل الحصول على الأداء المطلوب. يتم تحقيق التحكم "Scalar" Speed control، أو التحكم الثابت V/f للسرعة في الآلات التحريضية التي تُقاد بواسطة الأنفرتتر من خلال تغيير التردد المغذي للمحرك، ويتم تغيير الجهد من أجل توفير عزم الدوران لمحور المحرك. حيث أنّه عندما يتم تغيير تردد الثابت للحصول على التحكم في السرعة، يجب تغيير جهد دخل الثابت وفقاً لذلك للحفاظ على ثبات تدفق فجوة الهواء [15]. تعبر المعادلة (2) عن العلاقة بين الجهد المطبق والتردد بشكل عام، كما هو موضح في الشكل (8).

$$V_s = V_{boost} + k_{vf} f_{sp} \quad (2)$$

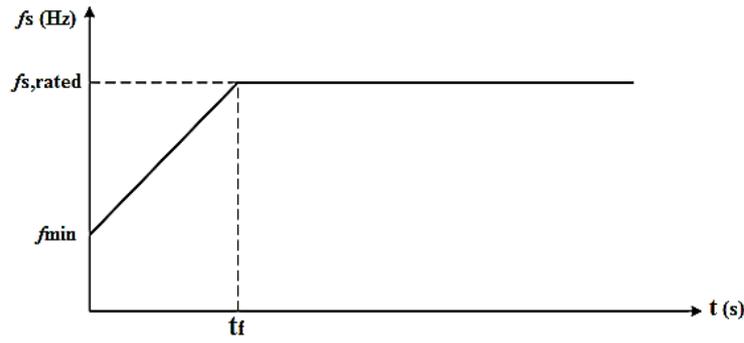
حيث:



الشكل (8): العلاقة بين الجهد والتردد.

تعتمد تقنية (Open-Loop Control) التي قمنا باستخدامها للتحكّم في المحرك التحريضي على قيمة الجهد DC على مدخل الأنفرتتر، اعتماداً على قيم الجهد V_{DC} ، يتم تحديد نطاق التردد الأقصى للنسبة V/f المطلوبة، كما هو مبين في الشكل (8).

أثناء البدء، يعمل المحرك بتردد منخفض ثم يتم زيادة قيمته بمعدّل محدد، يتم تعديل التردد (زيادة ونقصان) وفقاً لعزم دوران المحرك والقصور الذاتي للمحرك المُقاد، الشكل (9)، وهذا يجعل الآلة تبدأ بالعمل بتيار اقلاع منخفض.



الشكل (9): معدل التردد مع زيادة الزمن.

يبين الشكل (10) المخطط الصندوقي لتقنية التحكم المقترحة، ويبين الشكل (11) مخطط تقنية التحكم في برنامج "Simulink".

أمر السرعة (ω_e^*) نحصل عليه اعتماداً على الجهد DC، وفقاً للمعادلة التالية:

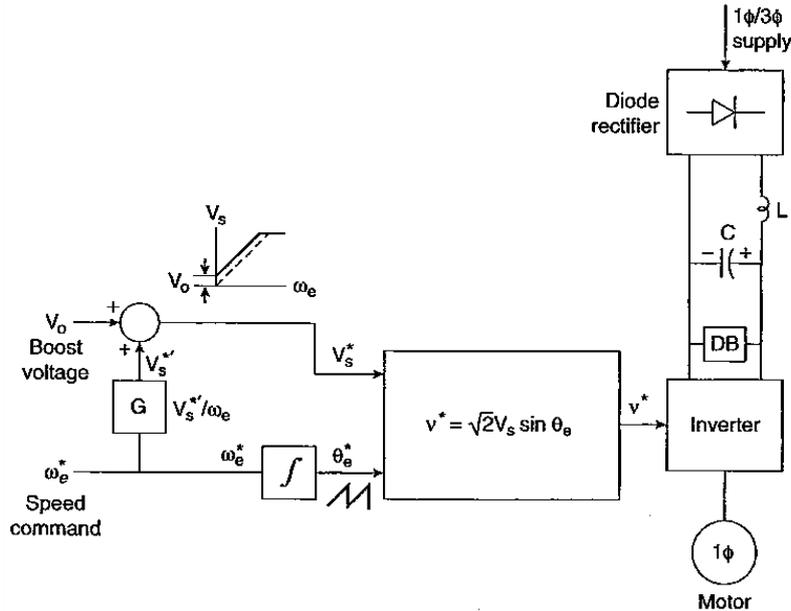
$$f_{sp} = \frac{f_{sp,rated}}{V_{m,rated} - V_{boost}} (V_s - V_{boost})$$

وبما أن أعظم قيمة لـ V_s هي V_{dc} ، إذاً:

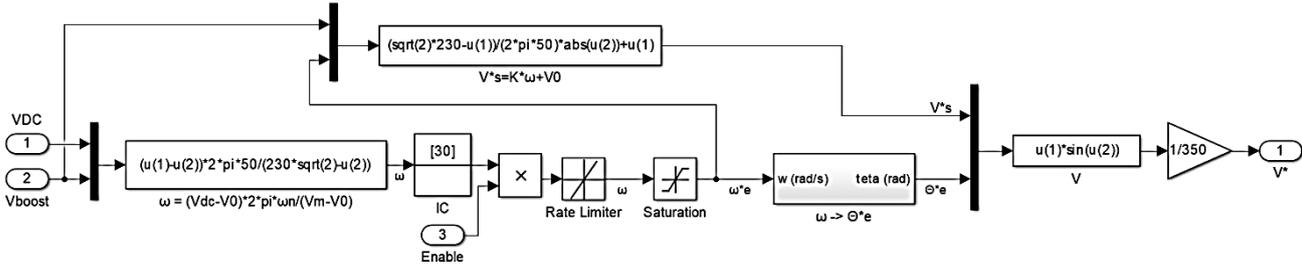
$$f_{sp} = \frac{f_{sp,rated}}{V_{m,rated} - V_{boost}} (V_s - V_{boost}) = \frac{50}{230\sqrt{2} - V_{boost}} (V_{dc} - V_{boost})$$

أو:

$$\omega_e^* = \frac{2\pi \times 50}{230\sqrt{2} - V_{boost}} (V_{dc} - V_{boost})$$



الشكل (10): المخطط الصندوقي لتقنية التحكم (Open-loop scalar).



الشكل (11): المخطط الصندوقي لتقنية التحكم (Open-loop scalar) في برنامج Simulink.

4-8- أتمتة عمل المضخة (Pump operation automation):

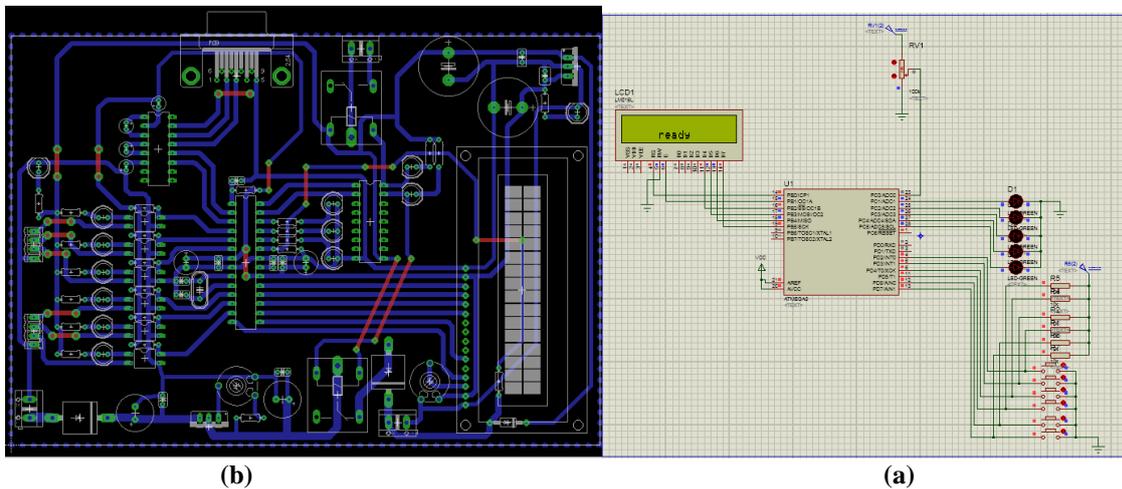
نضيف إلى نظام ضخ المياه الكهروضوئي خزاناً للمياه من أجل تخزين المياه بدلاً من تخزين الكهرباء في المدخرات، وبذلك يتم تخفيض كلفة النظام وتعقيده. يوضع خزان المياه في أغلب الأحيان في نقطة عالية من الأرض للاستفادة من الجاذبية لوصول الماء إلى التطبيقات المستخدمة في الري مثل التنقيط وغيرها.

قمنا بتصميم دائرة لأتمتة عمل المضخة، الشكل (12)، تقوم بفصل وتشغيل المضخة ضمن النظام المُصمم

وفق الشروط التالية:

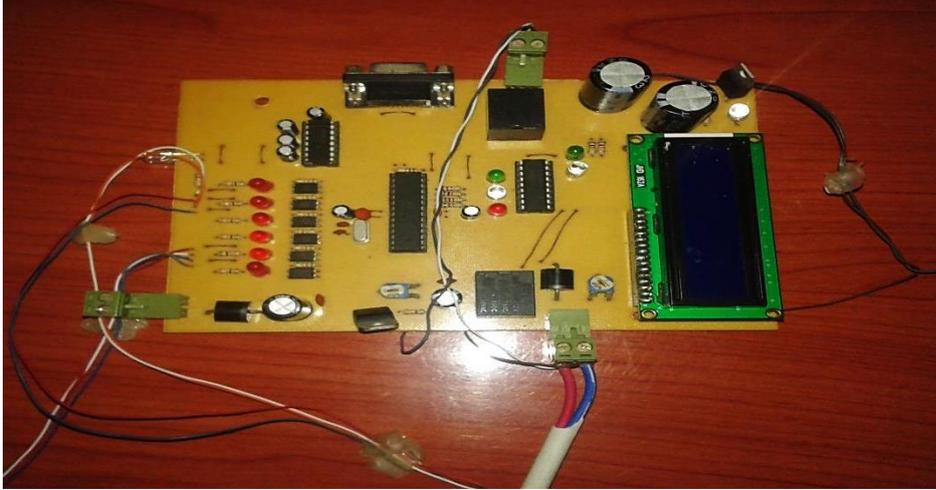
- يتم تشغيل المضخة بشكل آلي وذلك عند تحقق الشرطين: عندما ينقص مستوى المياه في الخزان إلى أدنى مستوى محدد بالإضافة إلى كون جهد خرج الألواح يتناسب مع قيمة جهد التشغيل اللازم للمضخة.
- يتم إيقاف المضخة بشكل آلي وذلك عندما يصل مستوى المياه في الخزان إلى أعلى مستوى، أو أن يكون جهد خرج الألواح لا يتناسب مع قيمة جهد التشغيل اللازم للمضخة (لا يتم اقلاع المضخة من أجل حمايتها).

يتم مراقبة كل أوضاع التشغيل ومستويات المياه وحالة عمل المضخة عن طريق شاشة إظهار.



الشكل (12): تصميم دائرة التحكم بالمضخة. (a) باستخدام برنامج "Portues". (b) باستخدام برنامج (Eagle).

يبين الشكل (13) تنفيذ الدارة العملية لأتمتة عمل المضخة.



الشكل (13) الدارة العملية لأتمتة عمل المضخة.

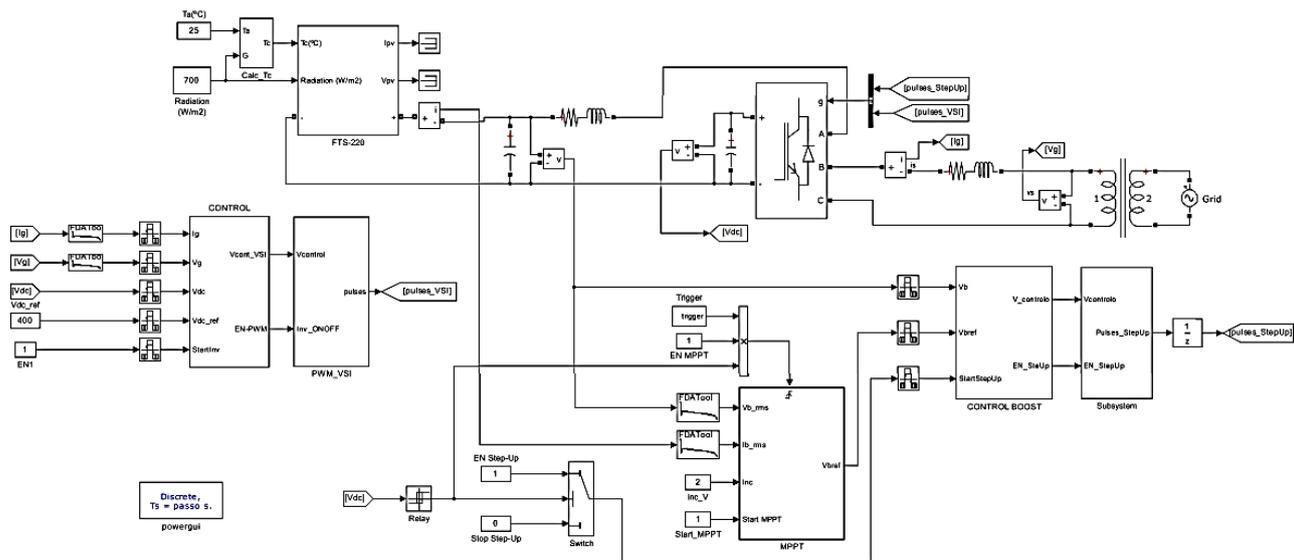
9- اختبار النظام المُصمم (Designed system test):

سنقوم باستخدام "Simulink" بإجراء اختبار المحاكاة من أجل المُبدّل الرافع مع خوارزمية (MPPT)، وإجراء اختبار المحاكاة من أجل المحرك التحريضي أحادي الطور (الذي يتم تغذيته بواسطة سلسلة ألواح كهروضوئية متصلة مباشرة بأنفرتر أحادي الطور).

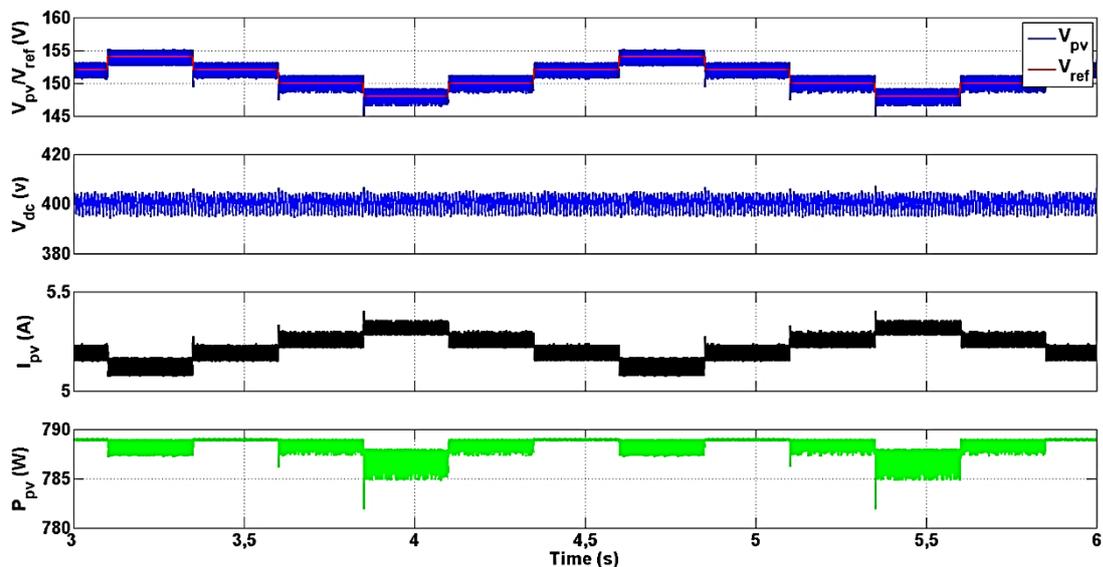
1-9- محاكاة نظام المُبدّل الرافع (Simulated System - Step-up Converter):

يبين الشكل (14) محاكاة نظام المُبدّل الرافع مع خوارزمية MPPT. يحتوي هذا النظام على ست ألواح PV من نوع "FTS-220P"، وتم إجراء عمليات المحاكاة في ظل ثلاثة ظروف من الإشعاع الشمسي، هي: 700 و 1000 و 600 W/m^2 ومن أجل درجة حرارة محيطية 25°C . في جميع عمليات المحاكاة، تم إجراء MPPT مرتين في الثانية وبزيادة الجهد 2 فولت.

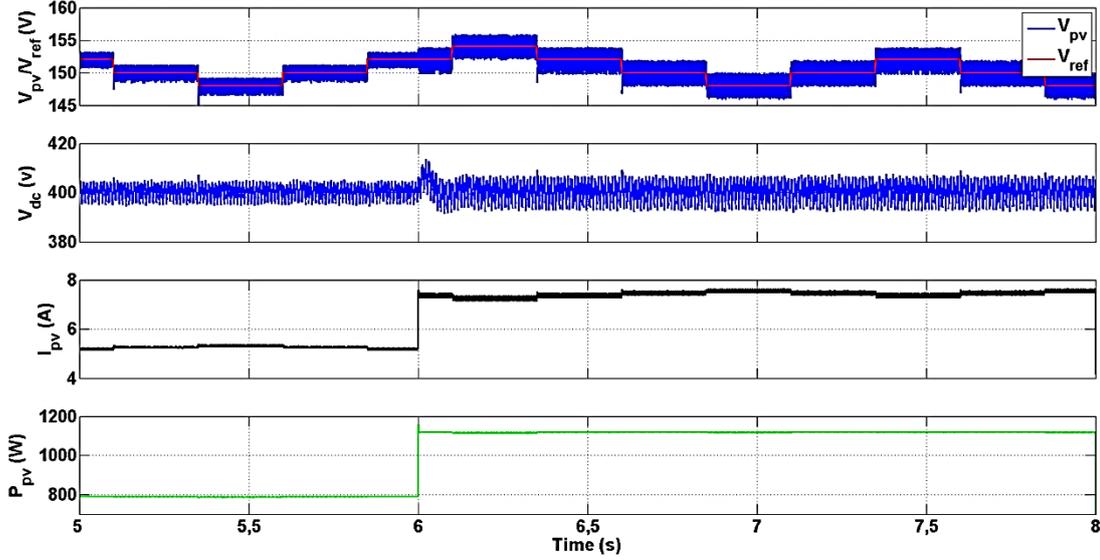
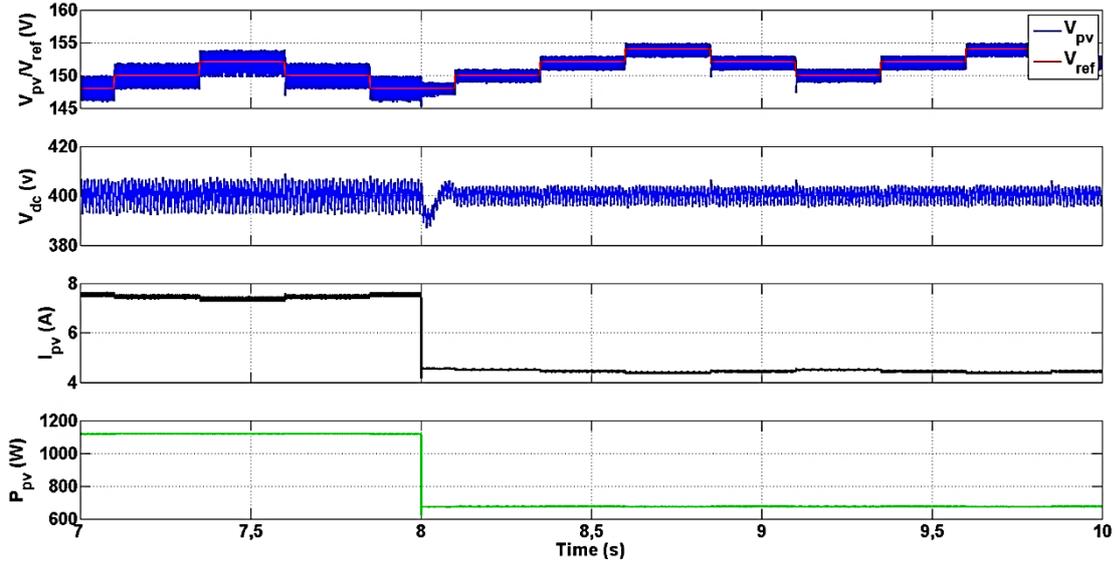
يوضح الشكل (15) نتيجة المحاكاة لعمل النظام لمدة 3 ثوانٍ عند شدة اشعاع $G=700 \text{ W/m}^2$. بينما يوضح الشكل (16) النتيجة عند ارتفاع الإشعاع الشمسي إلى 1000 W/m^2 في الثانية السادسة. كما هو متوقع، ترتفع قيمة طاقة النظام وكذلك يزداد التيار بالتناسب مع هذه الزيادة في قيمة الإشعاع. يوضح الشكل (17) انخفاضاً في مستوى الإشعاع إلى 600 W/m^2 في الثانية الثامنة وبالتالي نجد انخفاض في طاقة خرج النظام وفي تيار السلسلة الكهروضوئية بشكل متناسب.



الشكل (14): المخطط الصندوقي لمحاكاة العنبر الرفع.



الشكل (15): محاكاة عملية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية عند اشعاع $G = 700 \text{ W/m}^2$

الشكل (16): محاكاة عملية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأخرى عند زيادة الإشعاع من 700 إلى 1000 W/m²الشكل (17): محاكاة عملية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأخرى عند نقصان الإشعاع من 1000 إلى 600 W/m²

9-2- محاكاة نظام المحرك التحريضي أحادي الطور (Simulated System-Single-Phase)

(Induction Motor):

تم استخدام "Simulink" لإجراء المحاكاة، من أجل الحصول على المنحنيات المميزة للجهود والتيارات في الحالات العابرة والمستقرة بموجب استراتيجية التحكم العددية المقترحة. من المهم دراسة وتحليل تيار اقلاع المحرك، حيث أنه قد يصل إلى ثمانية أضعاف التيار الاسمي أثناء ظروف بدء تشغيل المحرك، مما يؤدي إلى إتلاف إلكترونيات التحكم ودارات القياس. تؤثر عوامل مختلفة على تيار الاقلاع (الجهد الأولي على المكثف DC-link، وعزم دوران الحمل، وتغيير التردد بالنسبة للزمن) والذي يحدد المدة التي يستغرقها المحرك للوصول إلى سرعته الاسمية (التردد المناسب). من أجل تقييم سلوك المحرك التحريضي مع نظام التحكم (scalar

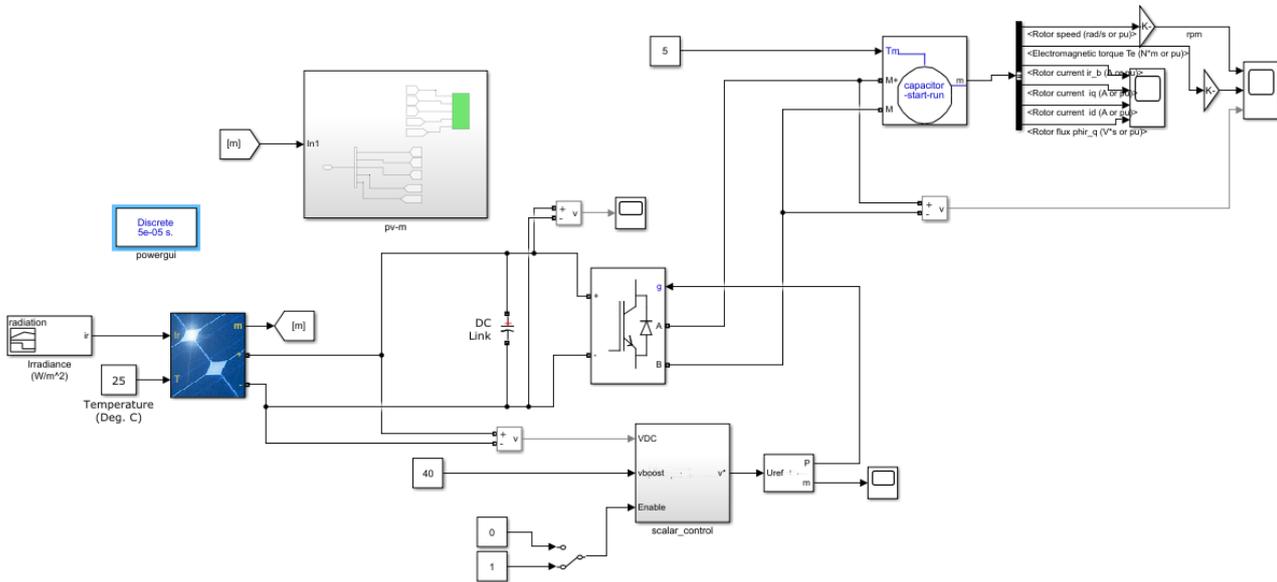
(control)، قمنا بمحاكاة النظام (فقط من أجل مولد الطاقة الكهروضوئية المتصل مباشرة بالأنفريتر)، الشكل (18). إن سبب غياب متحكم المُبدل الراجع هو عدم التوافق بين خوارزميات المحاكاة المستمرة (continuous) والمنفصلة (discrete) المستخدمة في "Simulink"، حيث أنّ محاكاة المُبدل الساكن (static converter) تعتمد على المجال المنفصل (discrete domain)، ومحاكاة المحرك تعتمد على المجال المستمر (continuous domain). قمنا بإجراء محاكاة النظام باستخدام 10 وحدات PV (PV modules)، من أجل الحصول على الحد الأدنى من الجهد المطلوب لتشغيل الأنفريتر الأحادي الطور.

9-2-1- بارامترات المُحاكاة (Simulation Parameters):

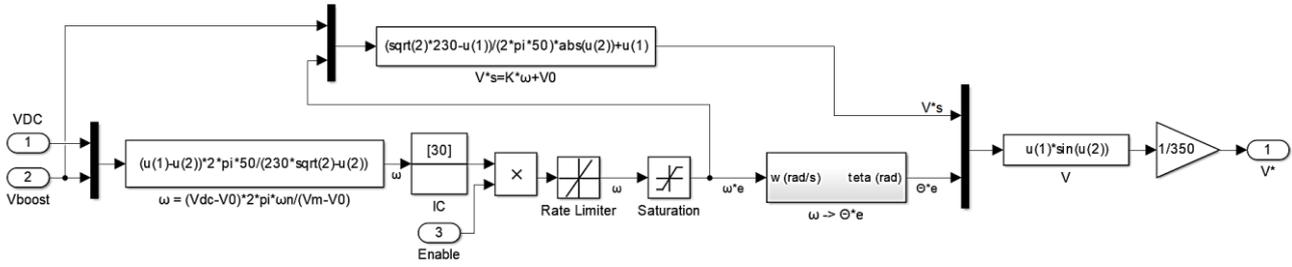
يظهر الرسم التخطيطي لنظام المُحاكاة في الشكل (18)، ويوضح الشكل (19) الرسم التخطيطي لاستراتيجية التحكم العددي ذو الحلقة المفتوحة المستخدمة. نبين في الجدول (3) البارامترات وظروف الاختبار المستخدمة في عمليات المحاكاة. ونبين في الجدول (4) بارامترات المحرك أحادي الطور، (في الملحق).

الجدول (3) بارامترات المحاكاة:

Parameter	Value
PV Modules	FTS-220P
Number of PV Modules	10
Ambient Temperature(T_a)	25°C
Radiation Level	600~1000 W/m ²
DC-link Capacitor	2 mF
DC-link Capacitor Initial Voltage	300 V
V_{boost}	40 V
Load Torque(T_L)	5 N.m
Ramp-up Time	5 s



الشكل (18): نظام المُحاكاة المُقترح.

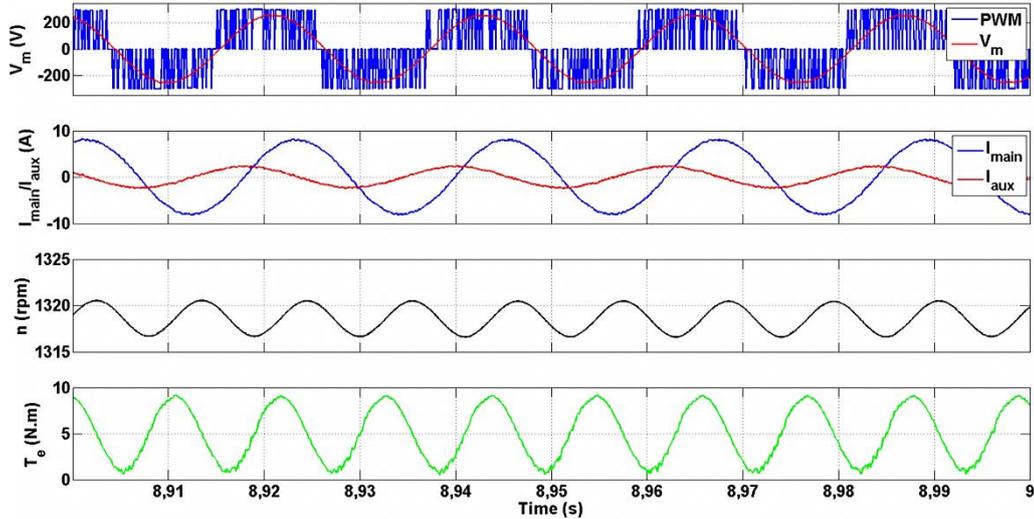


الشكل (19): المخطط الصندوقي لتقنية التحكّم ذات الدارة المفتوحة (Open-loop scalar control).

9-2-2- نتائج المحاكاة (Simulation Results):

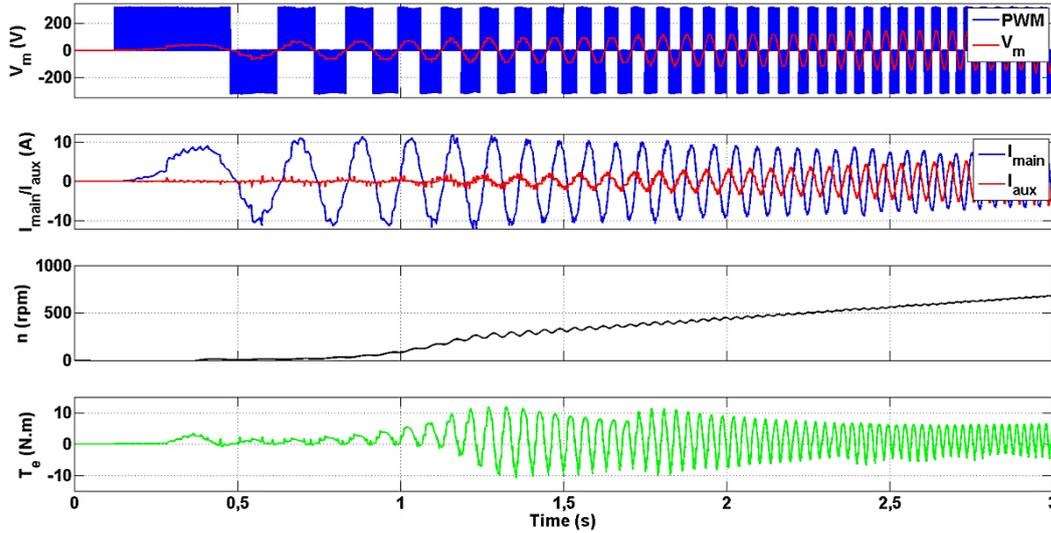
تم إجراء المحاكاة وفقاً لمعايير النظام المذكورة سابقاً، وذلك كما يلي:

- جهد المحرك "V_m" [V]: جهد خرج الأنفرتر (PWM) باللون الأزرق، وجهد المحرك باللون الأحمر.
 - تيارات المحرك "I_{main}/I_{aux}" [A]: تيار الملف الرئيسي باللون الأزرق، وتيار الملف المساعد باللون الأحمر.
 - سرعة المحرك "N" [rpm]. • عزم الدوران الكهرومغناطيسي "T_e" [Nm].
- يُظهر الشكل (20) الحالة الثابتة المستقرة للنظام من أجل 0.1 ثانية من المحاكاة عند شدة اشعاع $G=700 \text{ W/m}^2$ وعزم $T_L=5 \text{ Nm}$ ودرجة حرارة $T_a=25^\circ\text{C}$.

الشكل (20): تشغيل النظام عند اشعاع $G=700 \text{ W/m}^2$ وعزم $T_L=5 \text{ Nm}$ ودرجة حرارة $T_a=25^\circ\text{C}$.

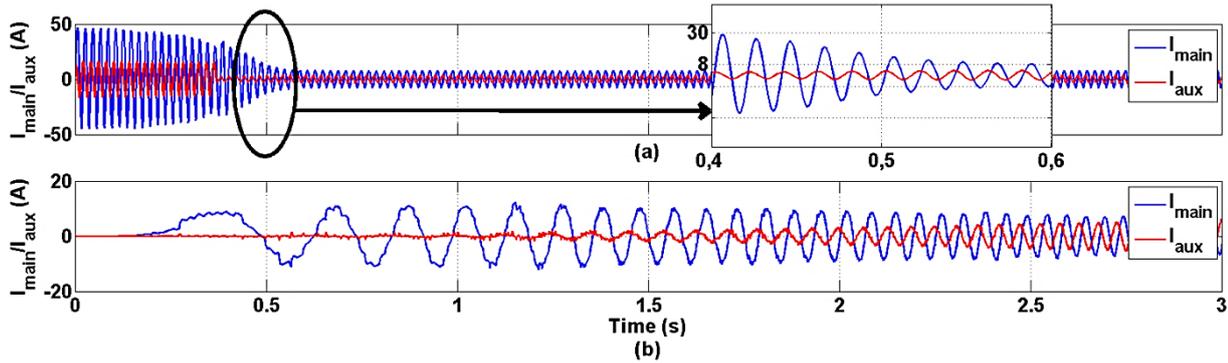
الفترة العابرة للنظام في الشكل (20) موضحة في الشكل (21)، حيث تتراوح الفترة الزمنية بين 0 و 3

ثوانٍ.



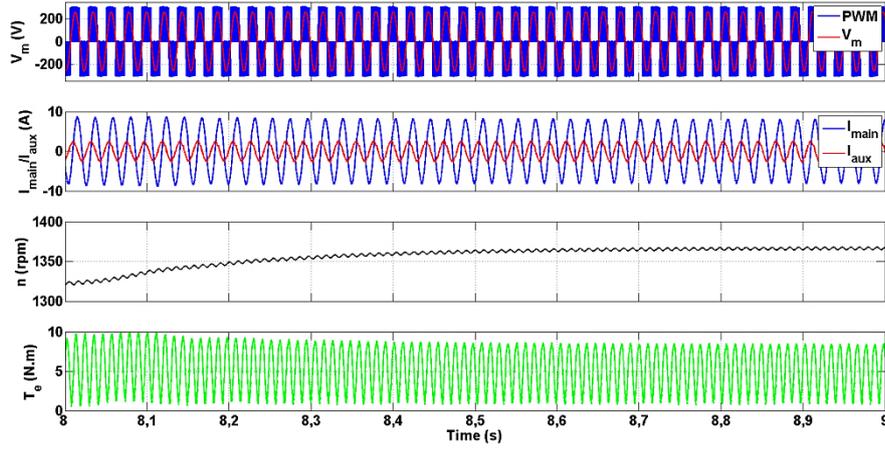
الشكل (21): تكبير للفترة العابرة الموضحة بالشكل (20).

للمقارنة، يظهر الشكل (22) الفرق بين الفترات العابرة بين التشغيل المباشر والتشغيل باستخدام تقنية التحكم المتبعة خلال 3 ثوانٍ.

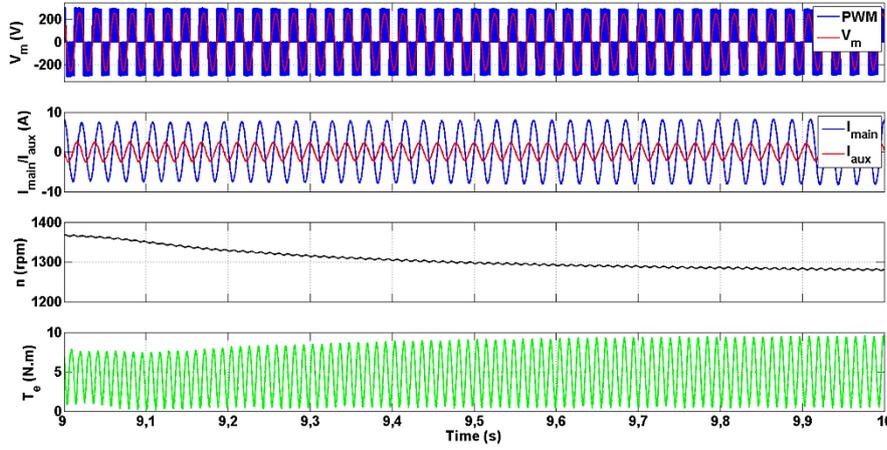


الشكل (22): مقارنة بين تيار الإقلاع. (a) إقلاع مباشر (بين 0.4 و 0.6 ثانية)، (b) scalar control

كما نلاحظ، يستغرق المحرك وقتاً أطول لبدء التشغيل ولكن باستخدام تقنية التحكم (Scalar control) فإنه قد تم التقليل من تيار الإقلاع بدرجة ملحوظة مقارنةً بالتشغيل المباشر. من أجل تقييم (التحقق) من تقنية التحكم بالمحرك، قمنا بمحاكاة التغيير في شدة الإشعاع (Radiation) وعزم الدوران (Torque). يبين الشكل (23) سلوك النظام عندما يرتفع مستوى الإشعاع من 700W/m^2 إلى 1000W/m^2 في الثانية الثامنة، وبعد ذلك يُظهر الشكل (24) انخفاض شدة الإشعاع إلى 600W/m^2 وذلك في الثانية التاسعة (وذلك عند درجة حرارة $T_a=25^\circ\text{C}$ وعزم $T_L=5\text{N.m}$).

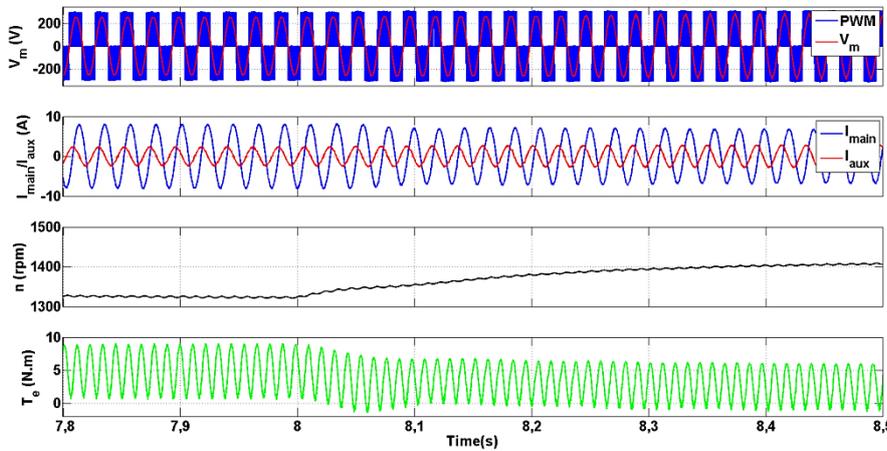


الشكل (23): محاكاة النظام مع تغيير الإشعاع (عندما يرتفع من $700\text{W}/\text{m}^2$ إلى $1000\text{W}/\text{m}^2$).



الشكل (24): محاكاة النظام مع تغيير الإشعاع (انخفاض الإشعاع إلى $600\text{W}/\text{m}^2$).

يظهر الشكل (25) محاكاة النظام عند اشعاع شمسي $700\text{W}/\text{m}^2$ وتغيير عزم الحمل من 5N.m إلى 2.5N.m في الثانية الثامنة.



الشكل (25): محاكاة النظام مع تغيير عزم الحمل.

9-3- مناقشة نتائج اختبار المحاكاة:

نلاحظ أنّ، سلوك وأداء نظام المحاكاة كان كما هو متوقع، في ظل ظروف تغيير الإشعاع وتغيير عزم الحمل. كما نلاحظ انخفاض تيارات الاقلاع حيث تم التحقق من صحة استراتيجية التحكم (scalar control) المقترحة. تختلف سرعة المحرك وفقاً لمستوى الجهد على وصلة DC (DC-link)، وفقاً للطاقة المتاحة على دخل الأنفرتري. تتمثل وظيفة مبدل الرفع (step-up converter) في استخراج أقصى طاقة متوفرة من الألواح وتزويدها للأنفرتري، وبالتالي فإنّ تقنية التحكم (Scalar control) تعتمد على مستوى الجهد على وصلة DC وتستخدم للتحكم بالمحرك التحريضي عبر استراتيجية الحلقة المفتوحة (open-loop strategy).

10- الاستنتاجات والتوصيات (Conclusions and Recommendations)**الاستنتاجات:**

بالنسبة لنظام ضخ المياه الكهروضوئي "PVWPS" الذي تم دراسته، وجدنا أنّ طريقة التحكم بالمبدل الراجع (step-up converter) مكنتنا من استخراج أقصى طاقة متوفرة من الألواح وتزويدها للأنفرتري (للقلب) حتى في حال تغيير شدة الإشعاع الشمسي، بالإضافة إلى أنّ تقنية التحكم (Scalar control) بالمحرك التحريضي أحادية الطور باستخدام استراتيجية الحلقة المفتوحة (open-loop strategy) كانت صحيحة من أجل تغيير عزم الحمل. قدمت الطريقة المقترحة لتصميم المبدل الراجع (DC/DC) حلاً مرضياً للتقليل من عدد الألواح الكهروضوئية (PV) اللازمة لتشغيل "PVWPS"، واستطاعت خوارزمية الاضطراب والمراقبة "P&O" التي تم تصميمها من ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى. أظهرت نتائج المحاكاة الأداء المتوقع للنظام من أجل عدة ظروف اختبار. أيضاً، اقترح هذا العمل استراتيجية التحكم العددي ذات الحلقة المفتوحة (open-loop scalar control strategy) للمحركات التحريضية أحادية الطور، والتي أتاحت التحكم بشكل غير مباشر في سرعة المحرك من أجل حالة بدء التشغيل بسرعة منخفضة وزيادة السرعة بشكل تصاعدي للوصول إلى القيمة المرغوبة لتجنب القيم العالية لتيار الاقلاع والحفاظ على نسبة V/f ثابتة للحفاظ على عزم دوران المحرك المرغوب، حيث أظهرت المحاكاة نتائج مرضية. طريقة التحكم هذه سهلة التنفيذ، لكن يتم فيها التحكم في السرعة بشكل غير مباشر عن طريق تغيير التردد المغذي للمحرك.

أظهرت طرق التحكم المصممة من أجل نظام الضخ الكهروضوئي "PVWPS" نتائج مرضية، حيث تمكنت من: تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، بالإضافة للحد من مشكلة تيار الاقلاع للمحرك، كما أنه تم التحكم في السرعة باستخدام جهد وتيار المحرك فقط.

يقدم نظام ضخ المياه الكهروضوئي القائم على أساس محركات التيار المتناوب موثوقية عالية ومعدل صيانة أقل مقارنة بأنظمة ضخ المياه الكهروضوئي التي تستخدم محركات التيار المستمر.

أتمتة عمل مضخة المياه وفرت إمكانية مراقبة كل أوضاع التشغيل ومستويات المياه وحالة عمل المضخة وتضبط عملها وفق شروط تضمن التشغيل السليم لها.

التوصيات:

خلال هذا العمل أعطى المُبدّل الرافع (Step-up converter) نتائج مرضية، ونقترح بالنسبة للأعمال المستقبلية القيام بدراسة لتحسين الملف في المُبدل ويكون ذلك عن طريق تغيير تردد التبديل (Switching frequency) للوصول إلى قيم أقل لحثية الملف المطلوبة، مما يؤدي إلى خفض حجم الدارة وبالتالي خفض التكلفة.

كما نقترح، زيادة التردد لتقليل تيار اقلاع المحرك التحريضي وخفض زمن البدء. وتطبيق تقنية التحكّم "open-loop scalar control" على كافة أنواع المحركات التحريضية أحادية الطور.

المراجع:

- [1] NERC، "الأطلس الشمسي"، المركز الوطني لبحوث الطاقة، وزارة الكهرباء السورية، سوريا، 2016.
- [2] Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA), *The Regional Conference on Renewable Energy in Rural Areas of the ESCWA Region*, Morocco, 2013.
- [3] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, "Solar photovoltaic water pumping system- a comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, 2016.
- [4] M.E. M. Mahmoud, and All, "Modeling and Performance of the Photovoltaic pumping system", *International Meeting on Advanced Technologies in Energy, IMAT3E'18*, 2018.
- [5] Nouredin Motan, "Photovoltaic Integration in a Grid Power System", *Master's Degree in Computing from the Faculty of Engineering and Technology at Birzeit University*, 2017.
- [6] Alivarani Mohapatra, and All, "Adaptive Perturb & Observe MPPT for PV System with Experimental Validation", *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS)*, 2019.
- [7] Anuramabhandran Ma ; R Harikumar, "A High Step-Up DC/DC Converter for PV Power System Applications", *International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*, 2018.
- [8] G. Li, Y. Jin, M. Akram, and X. Chen, "Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, ScienceDirect, vol. 79, 2017.
- [9] ShaowuLi, "A variable-weather-parameter MPPT control strategy based on MPPT constraint conditions of PV system with inverter", *Energy Conversion and Management*, Elsevier, ScienceDirect, Volume 197, 2019.
- [10] Mahnaz Behnamazad, "Digital current control of a dc-dc Boost converter", *Master Thesis, Universita degli studi di Padova, Electronic Engineering*, 2019.
- [11] Dionizio José Vargas Roman, "Photovoltaic Water Pumping Systems Based on Standard Components", *Master of Science Degree in Industrial Engineering Federal University of Technology – Paraná*, 2018.
- [12] A. P. Parikh, P. N. Tekwani, and V. Patel, "Design and implementation of solar pumping system with induction motor and submersible pump", *Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, 2017.
- [13] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, "Solar photovoltaic water pumping system a comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, 2016.
- [14] M. Miladi, and all., "Improved low cost induction motor control for stand-alone solar pumping", *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2014.
- [15] M. Naveenkumar, and all., "Design and implementation of a variable frequency drive for single-phase induction motor", *IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECONECE)*, 2015.
- [16] N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, "General review and classification of different mppt techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, 2017.

[17] A. C. Zamora, and all., "Efficiency based comparative analysis of selected classical mppt methods", IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2017.

الملحق:

الجدول (4) بارامترات المحرك أحادي الطور:

Parameter	Value
Motor Type	Single-phase Capacitor Start-Run
Voltage	220 V
Frequency	50 HZ
Power	746 W
Rated Torque	5 N.m
Pole Pairs	2
Main Winding Stator Resistance	4.02 Ω
Main Winding Stator Inductance	8.54 mH
Main Winding Rotor Resistance	2.12 Ω
Main Winding Rotor Inductance	3.12 mH
Main Winding Mutual Inductance	180 mH
Auxiliary Winding Stator Resistance	5.22 Ω
Auxiliary Winding Stator Inductance	9.54 mH
Inertia	0.0354 Kg.m ²
Friction Factor	0 Nms
Turn Ratio (aux/main)	1.18
Capacitor-Start Capacitance	150 μ F
Capacitor-Start Resistance	2 Ω
Capacitor-Run Capacitance	21.5 μ F
Capacitor-Run Resistance	18 Ω
Disconnection Speed (% synchronous speed)	75 %