Etude et optimisation des capteurs solaires photovoltaïques thermiques hybrides et de leur intégration dans des systèmes énergétiques de petite taille destinés aux prosommateurs.

Résumé de thèse

Dans le contexte énergétique actuel, le développement des technologies d'énergies renouvelables est crucial. L'énergie solaire fait partie des sources d'énergie les plus abondantes et les plus prometteuses, avec un fort potentiel pour le développement durable. Les deux technologies classiques de conversion de l'énergie solaire en énergie utile sont les capteurs photovoltaïques et les capteurs solaires thermiques. Pour améliorer la compétitivité du marché et augmenter le taux de conversion de l'énergie solaire en énergie utile, des panneaux de cogénération photovoltaïque-thermique (PVT) ont été développés. Il s'agit d'équipements hybrides qui intègrent les deux technologies conventionnelles (panneaux solaires et thermiques), produisant simultanément de l'électricité et de la chaleur dans un équipement de micro-cogénération. Les systèmes PVT sont particulièrement avantageux dans les endroits où l'espace est limité, comme les zones urbaines, car ils augmentent le taux de conversion de l'énergie solaire par mètre carré. De plus, la conversion de l'énergie thermique entraîne le refroidissement du système, ce qui présente l'avantage supplémentaire d'augmenter l'efficacité des cellules photovoltaïques, car elles sont affectées par la surchauffe.

Cette thèse de doctorat est une étude approfondie des capteurs solaires photovoltaïques thermiques hybrides PVT. L'objectif global est d'acquérir une compréhension approfondie et d'effectuer une analyse complète et systématique des systèmes de micro-cogénération PVT afin d'améliorer leur efficacité et d'évaluer les meilleures possibilités de les intégrer dans le mix énergétique des petits consommateurs. A partir de données météorologiques et de paramètres de fonctionnement, différentes méthodes de prédiction de l'efficacité et de la performance des systèmes solaires photovoltaïques thermiques hybrides PVT sont présentées et la fiabilité des systèmes hybrides PVT est évaluée.

La nouveauté de cette étude réside dans les multiples méthodes d'analyse qui examinent les systèmes hybrides PVT d'une manière globale, dans de multiples situations : un panneau unique modélisé numériquement en régime permanent et en régime dynamique, une simulation transitoire d'un système de panneaux PVT avec des courbes de demande de consommateurs réels (prosommateur domestique, école, jardin d'enfants, hôtel), un système de panneaux PVT intégré dans le système de chauffage urbain local. En outre, l'analyse est effectuée sous plusieurs angles, en examinant leur efficacité thermique, électrique et globale et la façon dont elle est influencée par divers paramètres, tant économiques que technologiques. Ce projet étudie les capteurs solaires photovoltaïques thermiques hybrides PVT plats à base de liquide et propose des méthodologies fiables pour modéliser leur comportement.

Dans la première partie, une analyse bibliographique a permis de recueillir et de synthétiser des informations sur les principes de fonctionnement des panneaux PVT, leurs applications, leurs forces et leurs faiblesses. Elle a également mis en évidence les dernières recherches sur le sujet et a identifié les domaines qui nécessitent un examen plus approfondi : un modèle numérique explicite qui peut être facilement adapté à n'importe quelle configuration de panneau et régime de fonctionnement ; une analyse paramétrique de l'ensemble du système PVT, et pas seulement du panneau autonome, l'impact de la demande du consommateur sur l'efficacité du système PVT et du panneau, des données expérimentales réelles sur les performances du système PVT. Ces domaines ont été abordés dans la suite de cette recherche.

Un système photovoltaïque thermique (PVT) hybride est un module dans lequel la couche photovoltaïque (PV) ne produit pas seulement de l'électricité mais sert également d'absorbeur thermique. De cette façon, la chaleur et l'électricité sont produites simultanément. Les performances d'un système thermique photovoltaïque hybride dépendent de multiples paramètres : conditions climatiques, propriétés thermo-physiques, géométriques et électriques. La deuxième partie a proposé un modèle numérique explicite amélioré d'un collecteur PVT basé sur les équations du bilan thermique du système. Le modèle permet d'établir les températures du capteur à tout moment, en fonction des données externes : température ambiante, irradiation solaire et vitesse du vent. Le modèle a été validé par rapport à un prototype expérimental de la littérature, et un comportement typique d'un panneau PVT a été illustré pour l'étude de cas de Strasbourg en France. Les analyses paramétriques de l'OFAT réalisées dans cette étude ont montré dans la plupart des cas un compromis entre les performances électriques et thermiques du système PVT. En termes de vitesse du vent et d'isolation, il a été observé que les avantages thermiques d'un vent faible et d'une isolation élevée compensent la diminution de l'efficacité électrique. Pour une conception optimale, l'épaisseur de l'isolation doit être maximisée et la vitesse du vent minimisée, ce qui peut être obtenu par un placement stratégique des panneaux dans des zones protégées du vent. Le facteur de remplissage s'est avéré optimal lorsqu'il est maximisé, car les avantages électriques sont plus importants que les avantages thermiques. La largeur des canaux de l'échangeur de chaleur doit également être maximisée dans la mesure où cela est technologiquement possible pour obtenir les meilleures performances.

Une analyse transitoire d'un système PVT connecté à un consommateur réel a montré que la moitié de la demande annuelle d'énergie électrique et thermique pouvait être satisfaite par un système PVT simple et peu coûteux soutenu par des solutions de secours (respectivement un banc de batteries et un chauffage auxiliaire). Dans l'ensemble, il semble que le PVT à petite échelle soit une solution prometteuse pour une exploitation maximale de l'énergie solaire, en particulier dans les secteurs résidentiels et urbains. Une sensibilisation du public et des projets de démonstration fournissant la

preuve du concept sont nécessaires pour introduire cette technologie sur le marché grand public.

Dans tous les systèmes de cogénération, un équilibre doit être atteint entre la chaleur et l'électricité produites. Il est donc important d'établir l'interconnexion et la relation entre les deux. Cette recherche étudie l'impact de la variation d'un certain nombre de paramètres thermiques sur la production électrique d'un capteur PVT. Une analyse OFAT est effectuée pour les paramètres suivants : débit de sortie du réservoir, taille du réservoir, température principale de l'eau froide et courbe de demande du consommateur. L'analyse est effectuée sur une simulation transitoire d'un système PVT modélisé dans TRNSYS. L'impact le plus important sur le rendement électrique (d'environ 6,8 %) est causé par la variation du débit de sortie vers le consommateur. La taille du réservoir a un impact de 4,7 %. De plus, il a été observé que le pic d'efficacité électrique se produit en même temps que le pic de demande du consommateur, donc faire correspondre la courbe de demande avec la courbe de production est également un aspect important. Un autre aspect étudié dans cette partie est la variation instantanée de la puissance thermique et électrique du système en fonction de la température d'entrée du PVT. Cette analyse paramétrique du système PVT a montré un certain nombre de faits intéressants. Tout d'abord, plus la température de l'eau froide du réseau est basse, meilleur est le rendement électrique de la cellule. De même, plus le réservoir de stockage d'eau est grand, meilleur est le rendement électrique de la cellule, mais il y a une perte de qualité de l'énergie thermique. Plus la demande en eau des consommateurs est élevée, meilleur est le rendement électrique des cellules, car celles-ci sont refroidies plus rapidement. Lorsqu'il y a un pic dans la demande d'eau chaude du consommateur, l'efficacité électrique de la cellule atteint également un pic. Ces conclusions sont utiles pour concevoir des systèmes d'énergie renouvelable à petite échelle à haut rendement et pour fournir une performance maximale pour un consommateur donné.

L'introduction de l'énergie solaire décentralisée à petite échelle est un élément essentiel du bouquet énergétique du futur. La production sur place de chaleur et d'électricité renouvelables est bénéfique pour de multiples raisons : moins de pollution, moins de pertes thermiques/électriques dues au transport, fiabilité accrue du système. Un système solaire hybride, comprenant des panneaux solaires thermiques (ST), des panneaux photovoltaïques (PV) et des panneaux photovoltaïques-thermiques (PVT), a été mis en place dans une école maternelle de Bucarest, en Roumanie. Le système est décrit en détail, avec tous les composants techniques et les auxiliaires. Ce système a été analysé en termes de puissance instantanée, de températures instantanées en différents points du système et de production d'énergie quotidienne et mensuelle. Les résultats confirment la pertinence d'un système PVT hybride pour couvrir les besoins énergétiques des petits consommateurs d'énergie.

Enfin, l'aperçu économique du marché des systèmes hybrides PVT et des subventions disponibles a révélé qu'il y a un manque de normalisation au niveau européen, et un manque de clarté concernant la

classification des capteurs PVT dans les technologies de l'énergie solaire. En termes d'évaluation économique, les subventions sont un paramètre important pour établir les bénéfices de l'investissement. Trois scénarios ont été étudiés, avec une subvention élevée, moyenne et sans subvention, et les résultats ont montré une période de retour de l'investissement entre 7 et 15 ans, ce qui est comparable aux technologies solaires traditionnelles.

Publications et communications

1. Madalina Barbu, George Darie, Monica Siroux, Analysis of a Residential Photovoltaic-Thermal (PVT) System in Two Similar Climate Conditions, Energies 2019 12(19) Impact Factor: 2.702, SSN 1996-1073
2. Madalina Barbu, George Darie, Monica Siroux, A parametric study of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) system and the impact of thermal energy cogeneration on the electrical efficiency' Conditions' - Energies. 2020; 13(24) Impact Factor: 2.702.
3. Madalina Barbu, Monica Siroux George Darie, Numerical model and parametric analysis of a liquid based hybrid photovoltaic thermal (PVT) collector, Energy Reports, Accepted for publication with minor revisions, Impact Factor : 3.595
4. Madalina Barbu, Roxana Patrascu, George Darie, Diana Tutica, A technical-economical analysis of the implementation of hybrid solar energy systems in small energy prosumer applications Quality - Access to Success 2019, 20(169), 134-138. – RIS, Impact Factor 0.580, SSN-L 2668-4861.
5. Victor-Eduard Cenușă, Mihaela Norișor, Florin-Niculae Alexe, Mădălina Barbu, Marian Gioantă,Optimizing the non-reheat steam cycle of concentrated solar power plants with molten salt'- Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Vol. 64, 3, pp. 281– 286, Bucarest, 2019 – RIS, Impact Factor 0,760, ISSN: 0035-4066.
6. Victor-Eduard Cenușă, Mihaela Norișor, Florin-Niculae Alexe, Mădălina Barbu Assessment of the quota of recuperative cooling of the compressed gas at turbocharged Reciprocating Internal Combustion Engines, TEM Journal 2019 8(1), 3-11 – RIS, Impact Factor 0.51, ISSN: 2217-8309.
7. Madalina Barbu, Eduard Minciuc, Diana Tutica, Dorian Corneliu Frusescu, A case study of the integration of thermal panels in the district heating of Bucharest, Romania -accepted to be presented at the 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM) 2021, Bucharest, Romania.
8. Madalina Barbu, Monica Siroux, George Darie - A hybrid solar powered domestic hot water system for a kindergarten in Bucharest accepted to be presented at the 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM) 2021, Bucharest, Romania.
9. Madalina Barbu, Monica Siroux, George Darie ,A review of photovoltaic-thermal (PVT) systems and their application to the Romanian and France market- accepted to be presented at COFRET 2021 - Colloque Francophone en Energie, Environnement, Economie et Thermodynamique Bucharest, Romania.
10. Victor-Eduard Cenusa, Florin-Niculae Alexe, Mihaela Norisor, Madalina Barbu, Analysing the Heat and Exergy Transfer in Steam Generators of Nuclear Power Plants with Pressurized Light Water Reactors' - Cenusa Victor-Eduard, Florin-Niculae Alexe, Mihaela Norisor, Madalina Barbu – Conference Proceedings: 2019 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM) Timisoara, Romania.
11. Victor-Eduard Cenusa , Florin-Niculae Alexe, Mihaela Norisor, Madalina Barbu, Roxana Patrascu, George Darie Assessment of reciprocating engines performances starting from manufacturers' data'- - Conference Proceedings: 2019 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM) Timisoara, Romania.

12. Madalina Barbu, Monica Siroux , George Darie, Dynamic modelling and sensibility analysis of a hybrid photovoltaic-thermal (PVT) system 7th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 10 June 2019, Madrid, Spain
13. Madalina Barbu, George Darie A technical analysis and comparison of tubular and lattice towers for wind turbines' presented at 7th Conference of the Sustainable Solutions for Energy and Environment (EENVIRO 2020 Bucharest, Romania.
14. Madalina Barbu, George Darie, Cogeneration in solar energy systems: Hybrid Photovoltaic Thermal (PV/T) Panels' 14th WEC CENTRAL & EASTERN EUROPE REGIONAL ENERGY FORUM - FOREN 2018, Costinesti, Romania.