

Avis de Soutenance

**Xin Wang**

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

« **Online health monitoring of photovoltaic panels by  
converter-based impedance spectroscopy** »

Le **Mercredi 12 Juin 2024** à 09h30

Amphithéâtre - CentraleSupélec  
2 rue Edouard Belin, 57070 Metz

Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et systèmes (LMOPS)  
Université de Lorraine & CentraleSupélec

**Directeurs de thèse** : M. Michel Aillerie & Mme. Zhixue Zheng

### **Composition du jury**

Rapporteurs:	Demba Diallo	Pr, GeePs, Université Paris-Saclay, Paris, France
	Corinne Alonso	Pr, LAAS-CNRS UPR 8001, Université Paul Sabatier, Toulouse, France
Examineurs:	Daniel Hissel	Pr, FRH2 FR CNRS, FEMTO-ST UMR CNRS, Université de Franche-Comté, Belfort, France
	Anne Migan Dubois	Pr, GeePs, Université Paris-Saclay, Paris, France
	Claude Delpha	Pr, GeePs, Université Paris-Saclay, IUT Cachan, Paris, France
Invité:	Javier Solena	Researcher, EIFER, Karlsruhe, Germany

## Abstract

To meet the world's growing energy needs and with a view to sustainable development, the use of solar energy is leading a significant increase in the installation of photovoltaic (PV) panels, enabling the production of clean and renewable electricity. However, the PV panels are susceptible to faults due to the environmental treats, human factors or prolonged operating periods. These faults can result in power losses, low efficiency, system instability, and in some cases, pose a risk of security, such as fire hazards. Health monitoring can mitigate these issues and improve the overall operating reliability and efficiency of PV panels.

Among existing health monitoring tools for PV panels, impedance spectroscopy (IS) provides a powerful, non-destructive way to acquire PV panels' internal impedance over a wide frequency range. Compared with specific workstation-based IS, converter-based IS performed as an added function of the connected power converter, provides an attractive mean to achieve online measurements. It can help reduce overall system costs and facilitate online applications, as no additional equipment is required. However, the control strategy of the power converter needs to be specifically designed. Firstly, since the injection of the perturbation signal is achieved by controlling the switching signals, the bandwidth of the converter will limit the maximum frequency of the perturbation signal. Obtaining a complete IS spectrum (with a maximum frequency up to 100 kHz) with sufficient accuracy can thus be challenging. Secondly, to ensure a quasi-maximum output power of PV panels even during IS implementation, a cooperative control scheme between maximum power point tracking (MPPT) and IS modes should be considered.

The major objectives of this research are twofold: (1) to propose a systematic design guideline for control strategies of converter-based IS implementation; (2) to establish an appropriate AC equivalent circuit model (AC-ECM) for PV panels and extract valuable health indicators for online health monitoring of PV panels.

In one aspect, a bi-level control strategy of the power converter including an upper-level and a lower-level control is proposed, as shown in the graphical abstract below. The upper-level control achieves the cooperative control of different operating modes, including MPPT, injection point tracking (IPT) and IS modes. The lower-level control includes the separate control of each mode. Particularly, for the IS mode, both open-loop control and closed-loop control have been systematically studied and compared. Under open-loop control, an analysis of the intrinsic resonance of the converter and the frequency limitation of the perturbation signal is performed. Furthermore, an adaptive configuration method for the amplitude of the AC duty cycle is proposed to eliminate the influence of the resonance and enhance the validity and the accuracy of IS measurement. Under closed-loop control, based on three commonly used compensation controllers in linear system control, two control methods, named unified control and separated control, are designed and compared. In the unified control, a single proportional-integral (PI) controller controls the DC and AC components together to meet the control objectives. Meanwhile, in the separated control, a segmented lower pass filter (LPF) with a variable cut-off frequency is designed to effectively separate the DC component of the PV panel current from the AC perturbation signal. A proportional (P) and a quasi-proportional resonant (QPR) are further applied separately to control the AC component.

In the other aspect, based on the acquired IS measurements, a simplified AC-ECM of the PV panel is proposed by considering both the internal relaxation processes of the PV panel and the frequency limitation of the converter. This AC-ECM offers a fitting approach for the incomplete spectrum obtained through converter-based IS. Additionally, four health features are extracted and defined for monitoring the health states of the PV panel under various operating conditions. Finally, an experimental platform which consists of a PV panel, a SiC module-based DC/DC converter, an output load, a real-time control system (dSPACE SCALEXIO box), and a corresponding high-precision sampling circuit has been

developed for online IS implementation in the laboratory from A to Z. An experimental study has been conducted to verify that under the proposed control strategies, reliable and accurate IS measurements can be achieved. Under various operating conditions, the effectiveness of the online IS monitoring method based on the extracted features of the PV panel is verified as well.

**Key words:** Photovoltaic (PV) panels; AC equivalent circuit model (AC-ECM); Converter-based impedance spectroscopy (IS); Control strategies; Health monitoring

## Résumé

Pour répondre aux besoins énergétiques croissants à travers le monde et dans un objectif de développement durable, l'utilisation de l'énergie solaire entraîne une augmentation significative de l'installation de panneaux photovoltaïques (PV) permettant une production d'électricité propre et renouvelable. Cependant, les panneaux PV sont susceptibles de présenter des défauts dus aux menaces environnementales, aux facteurs humains ou à des périodes de fonctionnement prolongées. Ces défauts peuvent entraîner des pertes de puissance, une faible efficacité, une instabilité du système et, dans certains cas, présenter un risque de sécurité, comme des risques d'incendie. La surveillance de l'état de santé peut atténuer ces problèmes et améliorer la fiabilité globale et l'efficacité de fonctionnement des panneaux PV.

Parmi les outils de surveillance de l'état de santé existants pour les panneaux PV, la spectroscopie d'impédance (IS) offre un moyen puissant et non destructif d'acquérir l'impédance interne des panneaux PV sur une large plage de fréquences. Comparé à l'IS basée sur des postes de travail spécifiques, l'IS basée sur le convertisseur, réalisée en tant que fonction supplémentaire du convertisseur de puissance connecté, constitue un moyen attractif d'obtenir des mesures en ligne. Cela peut aider à réduire les coûts globaux du système et à faciliter les applications en ligne, car aucun équipement supplémentaire n'est nécessaire. Cependant, la stratégie de contrôle du convertisseur doit être spécifiquement conçue. Tout d'abord, étant donné que l'injection du signal de perturbation est réalisée en contrôlant les signaux de commutation, la largeur de bande du convertisseur limitera la fréquence maximale du signal de perturbation. Obtenir un spectre IS complet (avec une fréquence maximale allant jusqu'à 100 kHz) avec une précision suffisante peut donc être un défi. Deuxièmement, pour garantir une puissance de sortie quasi maximale des panneaux PV même pendant la mise en œuvre de l'IS, un schéma de contrôle coopératif entre le suivi du point de puissance maximale (MPPT) et le mode IS doit être envisagé.

Les principaux objectifs de cette recherche sont doubles : (1) proposer un guide de conception systématique pour les stratégies de contrôle de la mise en œuvre de l'IS basée sur le convertisseur ; (2) établir un modèle de circuit équivalent en courant alternatif (AC-ECM) approprié pour les panneaux PV et extraire des indicateurs de l'état de santé pour la surveillance en ligne des panneaux PV.

Dans un aspect, une stratégie de contrôle à deux niveaux du convertisseur de puissance comprenant un contrôle de niveau supérieur et un contrôle de niveau inférieur est proposée, comme illustré dans le résumé graphique ci-dessous. Le contrôle de niveau supérieur réalise le contrôle coopératif des différents modes de fonctionnement, notamment les modes MPPT, de suivi du point d'injection (IPT) et IS. Le contrôle de niveau inférieur comprend le contrôle séparé de chaque mode. En particulier, pour le mode IS, les contrôles en boucle ouverte et en boucle fermée ont été étudiés et comparés systématiquement. Sous le contrôle en boucle ouverte, une analyse de la résonance intrinsèque du convertisseur et de la limitation de fréquence du signal de perturbation est effectuée. De plus, une méthode de configuration adaptative pour l'amplitude du rapport cyclique en courant alternatif est proposée pour éliminer l'influence de la résonance et améliorer la validité et la précision de la mesure IS. Sous le contrôle en boucle fermée, basé sur trois contrôleurs de compensation couramment utilisés en contrôle linéaire de systèmes, deux méthodes de contrôle, appelées contrôle unifié et contrôle séparer, sont conçues et comparées. Dans le contrôle unifié, un seul contrôleur proportionnel-intégral (PI) régule les composantes CC et CA ensemble pour atteindre les objectifs de contrôle. Dans le contrôle séparé, un filtre passe-bas segmenté (LPF) avec une fréquence de coupure variable est conçu pour séparer efficacement la composante CC du courant PV des signaux de perturbation CA. Un contrôleur proportionnel (P) et un contrôleur quasi-proportionnel résonant (QPR) sont ensuite appliqués séparément pour contrôler la composante CA.

Dans l'autre aspect, basée sur les mesures IS acquises, un AC-ECM simplifié du panneau PV est proposé en tenant compte à la fois des processus de relaxation internes du panneau PV et de la limitation de fréquence du convertisseur. Cet AC-ECM offre une approche d'ajustement pour le spectre incomplet

obtenu par le biais de l'IS basée sur le convertisseur. De plus, quatre caractéristiques de l'état de santé sont extraites et définies pour surveiller les états de santé du panneau PV dans diverses conditions de fonctionnement. Enfin, une plateforme expérimentale composée d'un panneau PV, d'un convertisseur CC/CC basé sur un module SiC, une charge, d'un système de contrôle en temps réel (boîtier dSPACE SCALEXIO), et d'un circuit d'échantillonnage de haute précision correspondant a été développée pour la mise en œuvre en ligne de l'IS en laboratoire de A à Z. Une étude expérimentale a été menée pour vérifier que sous les stratégies de contrôle proposées, des mesures IS fiables et précises peuvent être obtenues. Dans diverses conditions de fonctionnement, l'efficacité de la méthode de surveillance IS en ligne basée sur les caractéristiques extraites du panneau PV est également vérifiée.

**Mots clés :** Panneaux photovoltaïques (PV) ; Modèle de circuit équivalent en courant alternatif (AC-ECM) ; Spectroscopie d'impédance (IS) basée sur le convertisseur ; Stratégies de contrôle ; Surveillance de l'état de santé.