

Sujet de thèse 2023 :

Performances et contraintes d'un convertisseur de puissance à composants grand-gap pour le déploiement du photovoltaïque de type résidentiel plus résilient aux contraintes critiques d'usage

Thèse financée sur contrat doctoral de l'université de Lorraine. Début du contrat au **01/10/2023**

Directeur de thèse : Alexandre De Bernardinis (Université de Lorraine / IUT de Thionville-Yutz / LMOPS EA4423)

Contact : alexandre.de-bernardinis@univ-lorraine.fr / Tél. : +33 3 7274 9778

Co-encadrant : Laurent Dupont (Université Gustave Eiffel / SATIE UMR8029)

Les établissements impliqués dans cette thèse portent dans leur stratégie scientifique la coordination d'action visant à faciliter la nécessaire transition vers des solutions énergétiques plus soutenables. En leur sein, les laboratoires LMOPS et SATIE promeuvent l'optimisation au sens large des systèmes plus soutenables comme la production d'énergie électrique photovoltaïque. Sous les niveaux de contraintes énergétiques actuels et fortement concurrentiels du déploiement des énergies vertes, les installations photovoltaïques sont de plus en plus répandues dans le secteur de l'habitat résidentiel et tertiaire (45 % de la consommation d'énergie et présentant un des principaux leviers à raison d'une économie potentielle de 30 % [1]), répondant à l'objectif d'accéder à une plus grande résilience énergétique et à proposer des habitations plus sobres et plus durables. Les cibles concernées peuvent être les bâtiments collectifs urbains, mais aussi l'habitat isolé. Les panneaux solaires sont le plus souvent connectés à l'installation qu'ils alimentent par le biais de convertisseurs électriques statiques qui jouent un rôle clé dans la conversion de puissance de l'énergie solaire incidente. De plus, ils se doivent d'être optimisés en termes de rendement énergétique, de disponibilité, et d'encombrement afin d'être plus facilement intégrables dans les systèmes photovoltaïques. Pour répondre à ces critères, une des solutions consiste à mettre en œuvre des composants électroniques de puissance dit à grand-gap, ou à large bande interdite, comme le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure de gallium (GaN) qui offrent des performances énergétiques et dynamiques accrues par rapport aux technologies plus conventionnelles issues de la filière silicium.

Les recherches développées principalement autour des verrous scientifiques associés aux grandes infrastructures, l'état de l'art [2-3] rend peu visibles les enjeux des plus petites unités de production qui ne cesseront de se multiplier. Bien que des solutions de convertisseurs en GaN se déploient au niveau international dans le domaine du renouvelable par la synthèse d'onduleurs solaires [4-7], les retours d'expérience sur la performance des convertisseurs en GaN restent marginaux. Ces composants grand gap sont sujets à reporter de nombreuses contraintes sévères notamment vis-à-vis des densités de courant et de puissance mises en jeu à l'échelle du convertisseur. De plus, la perspective de conditions climatiques de plus grandes amplitudes et plus fréquentes, les panneaux photovoltaïques seront soumis à de plus fortes contraintes atmosphériques, notamment liées à la dynamique de la couverture nuageuse, créant des transitoires d'ombrage plus rapides sur les panneaux. Ces ombrages localisés engendrent de fortes contraintes sur les convertisseurs statiques [8-9], se traduisant par des variations de courant de grandes amplitudes, pénalisant par conséquent leur fiabilité. Ces phénomènes sont d'autant plus contraignants sur les installations de plus petite taille ou d'habitat isolé. En effet, le plus souvent les convertisseurs statiques de ces installations ne bénéficient pas d'architecture de puissance redondante adossée à un entrelacement des sources de production. L'architecture technologique n'est pas adaptée dans ce cas à amortir les conséquences d'une transmission de la puissance électrique de manière réduite ou fractionnée. Aussi, la problématique qui sera développée dans cette thèse concernera l'optimisation du fonctionnement et l'amélioration de la disponibilité d'un convertisseur de puissance soumis aux évolutions des contraintes fonctionnelles de l'usage. On considérera particulièrement à la problématique de l'ombrage transitoire qui induit

Sujet de thèse 2023 : laboratoire LMOPS (UR4423) - Ecole doctorale IAEM de l'université de Lorraine

des contraintes opératives critiques pour le maintien des performances et la fiabilité du convertisseur à base de semi-conducteur à grand gap. Le composant électronique privilégié pour la synthèse du convertisseur sera en nitrure de gallium (GaN) pour ses performances dans la gamme de tension et de puissance du domaine applicatif considéré. Ces nouveaux composants encore en constante évolution représentent un champ de recherche avec des verrous technologiques qui doivent être confrontés à des contraintes d'usage. Les axes de recherche de cette thèse, révélés à partir des verrous scientifiques identifiés, concernent l'architecture associée au mode de contrôle du convertisseur en GaN de même que la qualification des contraintes opératives qui affectent les performances et la disponibilité du système par des endommagements des composants intégrés.

Le travail de thèse sera réparti de manière équilibrée entre les laboratoires LMOPS et SATIE, avec des périodes équivalentes de 18 mois pour le doctorant sur chacun des deux sites universitaires. Il s'articulera en deux volets associant les problématiques d'architecture adossées à une commande rapprochée et la bonne compréhension des principaux modes d'endommagement affectant la fiabilité et la disponibilité du convertisseur soumis aux contraintes d'usage. Au LMOPS, le doctorant travaillera prioritairement sur le développement de l'architecture électronique du convertisseur en GaN et de son intégration fonctionnelle dans le système photovoltaïque pour les conditions thermiques associées. Des études par simulation numérique seront menées afin de définir les niveaux de contraintes reportés au convertisseur en regard de l'environnement fonctionnel. De ces études, un prototype de convertisseur en GaN sera proposé par les laboratoires. Ce dernier permettra de consolider le modèle numérique de l'architecture et la stratégie de contrôle/commande les plus adaptés aux contraintes dynamiques d'ombrage. Au SATIE, les activités porteront sur l'identification de méthodes d'extraction des performances et du niveau d'endommagement d'une technologie d'intégration de puissance de référence. Ces résultats permettront d'élaborer des outils permettant de révéler la criticité des contraintes électrothermiques reportées aux composants électroniques sous les conditions critiques représentatives de l'usage. Les résultats viendront évaluer les bénéfices qu'apportent un modèle de contrôle et une architecture adaptée aux conditions étudiées. Les indicateurs identifiés préalablement seront exploités pour rendre compte de l'évolution de mécanismes d'endommagement et pourront être utilisés pour adapter les stratégies de contrôle du convertisseur. Enfin des tests de couplage du convertisseur à un système photovoltaïque composé de panneaux solaires en toiture extérieure, seront réalisés au LMOPS afin de valider, à l'échelle réelle, la solution de convertisseur développée entre les deux laboratoires et de valider les conditions de sa tenue aux contraintes d'usage.

Répartition indicative des travaux par labo – les durées de temps par labo pourront être adaptées :

Planning / Semestre	S1 01/10/23	S2	S3	S4	S5	S6 30/09/26
LMOPS		◇	◇			◇
SATIE				◇	◇	◇

LMOPS : Identification des conditions fonctionnelles spécifiques aux contraintes d'ombrage :

Définition d'architecture de convertisseur et de lois de commande plus résilientes sous contraintes d'ombrage.

Traduction des contraintes applicatives en contraintes fonctionnelles.

Évaluation sur plateforme échelle réelle et comparativement à un référentiel.

SATIE : Le résultat des études conduites au LMOPS sera utilisé par le SATIE pour les tâches ci-après :

Évaluation des contraintes électrothermiques induites à l'échelle des composants actifs.

Principaux modes d'endommagement ou dégradation de performances révélés par un vieillissement accéléré sous des conditions électrothermiques représentatives de l'usage.

Plan prévisionnel des activités réparties entre les deux laboratoires d'accueil LMOPS et SATIE :

État de l'art - Définition d'un cas d'étude référentiel

Convertisseur habitat isolé, petite infrastructure

Définition du convertisseur élévateur de tension (boost GaN)

Puissance – Tension Bus - Fréquence en fonction du dimensionnement des sources PV

Identification des contraintes d'ombrage et leviers d'optimisation

Simulation architecture PV

Quantification numérique des contraintes d'ombrage en contraintes fonctionnelles sur le convertisseur et définitions de propositions permettant d'atténuer les contraintes reportées au convertisseur (architecture et lois de commande).

Proposition d'une synthèse du système permettant de traduire les contraintes fonctionnelles et particulièrement celles électrothermiques.

Transcription des contraintes applicatives induites par les conditions d'ombrage

Identification des contraintes d'origine électrothermique locales, pour des composants actifs GaN pré-intégrés et généralement configurés en parallèle, à travers la caractérisation des performances sous les conditions fonctionnelles représentatives.

Identification d'indicateurs adaptés aux conditions d'usage pour la surveillance des conditions électrothermiques et des niveaux de contraintes dans le but de renseigner un outil d'adaptation du contrôle-commande.

Évaluation des propositions d'amélioration sur démonstrateurs à l'échelle réelle

Évaluation de la représentativité de l'étude numérique

Évaluation comparative de la stratégie adaptée à l'ombrage.

Références Bibliographiques :

- [1] Negawatt, "Sobriété : propositions chiffrées de Negawatt", Rapport 09/2022, <https://www.negawatt.org>.
- [2] J.P. Sawicki, P. Petit, A. Zégaoui, M. Aillie, and J.P. Charles, "High efficiency Step-Up HVDC converter for photovoltaic generator", Energy Procedia, Vol. 18, 2012, 1593 – 1600.
- [3] J.P. Sawicki, P. Petit, Z. Zheng, F. Mauffay, and M. Aillie, " Simulations of solar optimizers in parallel coupling ", AIP Conference Proceedings 2123, 020082 (2019);
- [4] Andrew Stillwell; Robert C. N. Pilawa-Podgurski, " Design Optimization of a 1500 V GaN-Based Solar Inverter Using Flying Capacitor Multi-Level Converter Stages ", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019.
- [5] A. Gupta; S. K. Mazumder, " GaN-FET based grid-connected solar microinverter: Some design insights ", IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), Albuquerque, NM, USA, 2017.
- [6] Tanya Gachovska et al., « Characterization of GaN Switches for Solar Invertors », ECS Transaction, vol. 64, 2014.
- [7] Comparison of GaN and Si-based photovoltaic power conversion circuits using various maximum power point tracking algorithms, Roshan L. Kini; Andrew J. Sellers; Michael R. Hontz; Md Rafiul Kabir; Raghav Khanna, 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA ;
- [8] M. Dbeiss, Y. Avenas, H. Zara, L. Dupont, " In-situ condition monitoring system to study the ageing of power semi-conductor devices in photovoltaic inverters ", CIPS 2018, Mar 2018, Stuttgart, Germany. (hal-01753108).
- [9] M. Dbeiss, Y. Avenas, H. Zara, L. Dupont, F. Al Shakarchi, "A Method for Accelerated Aging Tests of Power Modules for Photovoltaic Inverters Considering the Inverter Mission Profiles", IEEE Transactions on Power Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, 34 (12), pp.12226-12234. 10.1109/TPEL.2019.2907218, hal-03230523.
-