



Université Lille Nord de France
Pôle de Recherche
et d'Enseignement Supérieur

Ecole doctorale régionale Sciences Pour l'Ingénieur Lille Nord-de-France - 072



Titre : Conception de convertisseurs de puissance à base de GaN pour la mobilité électrique

Design of GaN-based power converters for electric mobility

Financement prévu : Région Hauts-de-France

Cofinancement éventuel : Université de Coventry (Royaume-Uni)

Directeur de thèse : Pr. Nadir IDIR, Université de Lille, E-mail: nadir.idir@univ-lille.fr

Co-Directeur de thèse : Pr. Petar IGIC, Université de Coventry,

Co-encadrant de thèse : Dr Arnaud VIDET, Université de Lille, E-mail: arnaud.videt@univ-lille.fr

Dr Ke Li, Université de Coventry, E-mail: ke.li@coventry.ac.uk;

Dr Soroush Faramehr, Université de Coventry,

Laboratoires : - **Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille (L2EP)**

- **Centre for Advanced Low-carbon Propulsion Systems (C-ALPS), Institute for Future Transport and Cities (IFTC))**

Design of GaN-based power converters for electric mobility

Context:

The rise of electric mobility requires solutions that increase the energy efficiency and mileage of vehicles. There is potential for improvement in power electronics, which is important for converting electrical energy into an ever-increasing number of on-board functions (recharging batteries, powering motors, lighting), as illustrated in Fig. 1. For this goal, the new gallium nitride (GaN) semiconductor devices are very promising, because they allow a high energy conversion efficiency and a high operating frequency, resulting in a saving of consumption and useful space to increase the energy stored on board. However, their implementation requires a perfect understanding of the device and system parameters which can no longer be neglected in this case, such as: their dynamic resistance and parasitic inductances, even small, of the switching meshes and of the gate circuit. To make full advantage use of the outstanding electrical properties of GaN components, it is necessary to characterize them finely in order to develop reliable models in simulation. Design methods and tools will then be developed to accelerate the implementation of these components into power converters, which will eventually realize the consumption and autonomy gains expected by GaN technology and contribute to the development of clean mobility.

This thesis will be carried out jointly between the University of Lille and the Coventry University (UK). Based on previous research discoveries on novel GaN device characterisation and modelling method (see Fig. 2 as an example prototype), this PhD project will expand the collaboration to a wider area for EV-based power electronics converter. As the Coventry region has historically been an important center of the automobile industry in the United Kingdom, the development of skills around electric mobility is a strategic challenge carried by the Lille and Coventry universities. Thus, the "e-Mobility" is one of the main research axes for the laboratories of the two universities which include power electronics teams.

Goal:

The proposed research subject aims to design static converters operating at high frequency and using new GaN components for the conversion of on-board electrical energy in electric or hybrid vehicles. In order to make the best use of the excellent electrical properties of GaN transistors, it is necessary to determine their performances in terms of power losses and switching waveforms, which are sensitive to parasitic elements of the circuit. The work carried out during this thesis should include characterization and modeling of the multi-physical parameters impacting the different operating phases of the GaN transistor. The objective is to develop a reliable model to represent the behavior of the component during the various operating phases and which will be used in the design by simulation of converters operating at high frequency. The model chosen must be generic and adaptable enough to cover the various GaN transistor technologies on the market. Design rules can then be defined and integrated into a tool making it possible to quickly validate the implementation of GaN transistors in a static converter. The proposed design approach will make the best use of the electrical performance of GaN devices and make HF converters adapted to the specific constraints of integration in vehicles, with high efficiency and high power density. An EMC analysis of the disturbances generated by the converter will also be carried out in order to include the Electromagnetic Compatibility (EMC) constraints in the design process.

By facilitating the robust implementation of GaN components in on-board converters, the results of the thesis should encourage the use of this technology in electric and hybrid vehicles. The electrical performance of these new components, judiciously exploited, will have to improve the energy efficiency of these systems, helping to reduce the energy consumption of vehicles by optimizing the on-board weight, size and conversion efficiency. The power density of the power converter achieved by the high-frequency operation of GaN components and by the reduction of the dimensions of the cooling systems allows improving the electric vehicles mileage. This research work is therefore fully in line with the objectives of developing clean mobility.

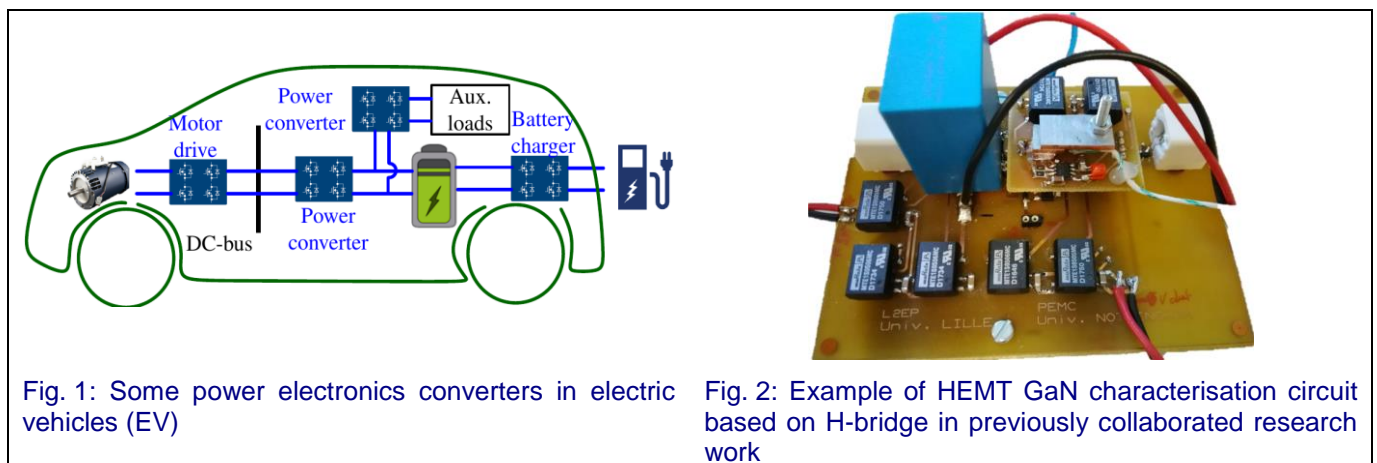


Fig. 1: Some power electronics converters in electric vehicles (EV)

Fig. 2: Example of HEMT GaN characterisation circuit based on H-bridge in previously collaborated research work

Candidate profile:

- A minimum of English language proficiency (IELTS overall minimum score of 7.0 with a minimum of 6.5 in each component) (For further details see: <https://www.coventry.ac.uk/research/research-students/making-an-application/>)
- Having fundamental knowledge of power semiconductor devices and power electronics converters

Conception de convertisseurs de puissance à base de GaN pour la mobilité électrique

Contexte :

L'essor de la mobilité électrique requiert des solutions augmentant l'efficacité énergétique et l'autonomie des véhicules. Un potentiel d'amélioration se trouve dans l'électronique de puissance, en charge de la conversion d'énergie électrique dans un nombre toujours plus grand de fonctions embarquées (recharge des batteries, alimentation des moteurs, éclairage), comme illustré en figure 1. À cet effet, les nouveaux composants semiconducteurs en nitrure de gallium (GaN) sont très prometteurs, car ils permettent un haut rendement énergétique de conversion et une grande fréquence de fonctionnement, se traduisant par un gain de consommation et d'espace utile pour augmenter la quantité d'énergie stockée à bord. Néanmoins, leur mise en œuvre fiable nécessite une parfaite maîtrise des phénomènes physiques en jeu dans ces composants et qui ne peuvent plus être négligés tels que leur résistance dynamique et les inductances parasites, même petites, des mailles de commutation. Pour exploiter au mieux les remarquables propriétés électriques des composants GaN, il est nécessaire de caractériser finement leur comportement selon les cas d'usage, et de développer de nouveaux modèles reproduisant fidèlement leurs performances par simulation. Des méthodes et outils de conception seront alors élaborés pour faciliter la mise en œuvre robuste de ces composants et ainsi bénéficier des gains de consommation et d'autonomie escomptés par la technologie GaN, participant par là même au développement de la mobilité propre.

Cette thèse s'effectuera en cotutelle entre l'Université de Lille et l'Université de Coventry (UK). La région de Coventry étant historiquement un centre important de l'industrie automobile au Royaume Uni, le développement de compétences autour de la mobilité électrique est un enjeu stratégique porté par l'université. Ainsi, le thème "e-Mobility" est l'un des axes de recherche de l'Institute for Future Transport and Cities (IFTC) de l'université de Coventry qui comprend une équipe de recherche dédiée à l'électronique de puissance.

Objectifs :

Le sujet de recherche proposé vise à concevoir des convertisseurs statiques fonctionnant à haute fréquence et employant de nouveaux composants GaN pour la conversion d'énergie électrique à bord des véhicules électriques ou hybrides. Afin d'exploiter au mieux les excellentes propriétés électriques des transistors HEMT GaN, il convient de maîtriser leurs contreparties qui introduisent des aléas sur les performances attendues en termes de pertes de puissance et de formes d'ondes de commutation, sensibles aux éléments parasites du circuit. Les travaux menés durant cette thèse devront permettre une caractérisation et une modélisation fine des phénomènes physiques impactant les différentes phases de fonctionnement du transistor en fonction des paramètres externes. L'objectif est d'élaborer un modèle reproduisant fidèlement le comportement du composant durant les différents modes de fonctionnement et qui sera utilisé pour la conception des convertisseurs opérant en haute fréquence. Le modèle choisi devra être suffisamment générique et adaptable pour couvrir les différentes technologies de transistor GaN sur le marché. Des règles de conception pourront alors être définies et intégrées au sein d'un outil permettant de faciliter la mise en œuvre des transistors GaN dans une cellule de commutation de convertisseur statique. La démarche de conception proposée permettra ainsi d'exploiter au mieux les performances électriques des composants GaN et de réaliser des convertisseurs HF adaptés aux contraintes spécifiques d'intégration dans les véhicules, avec un haut rendement et une forte densité de puissance. Une analyse CEM des perturbations générées par le convertisseur sera également menée afin d'inclure la contrainte CEM normative dans la démarche de conception.

En facilitant la mise en œuvre robuste des composants GaN dans les convertisseurs embarqués, les résultats issus de la thèse devraient favoriser l'emploi de cette technologie dans les véhicules électriques et hybrides. Les performances électriques de ces nouveaux composants, judicieusement exploitées, devront améliorer l'efficacité énergétique de ces systèmes, contribuant à réduire la consommation d'énergie des véhicules en optimisant la



masse embarquée, l'encombrement et le rendement de conversion. La densité de puissance atteinte par le fonctionnement à haute fréquence des composants GaN et par l'allègement des contraintes de refroidissement permettra d'améliorer l'autonomie des véhicules électriques. Ces travaux de recherche s'inscrivent donc pleinement dans les objectifs de développement de la mobilité propre.

Références :

- [1] LI Ke, VIDET Arnaud, IDIR Nadir: "Multi-Probe Measurement Method for Voltage-Dependent Capacitances of Power Semiconductor Devices in High Voltage", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, N°. 11, pages. 5414-5422, 11/2013
- [2] LI Ke, EVANS Paul, JOHNSON Mark: "Characterisation and modeling of Gallium Nitride power semiconductor devices dynamic on-state resistance", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, N°. 6, pages. 5262-5273, 06/2018
- [3] VIENOT Stéphane, HOFFMANN Hans, VIDET Arnaud, DUQUESNE Thierry, IDIR Nadir: "Modeling and experimental analysis of a single leg towards the design of an integrated GaN converter", Twenty-fifth Symposium on Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits (EPNC), 06/2018
- [4] LI Ke, VIDET Arnaud, IDIR Nadir, EVANS Paul, JOHNSON Mark: "Experimental Investigation of GaN Transistor Current Collapse on Power Converter Efficiency for Electrical Vehicles", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 10/2019
- [5] PACE Loris, DEFRANCE Nicolas, VIDET Arnaud, IDIR Nadir, DEJAEGER Jean-Claude: "Extraction of Packaged GaN Power Transistors Parasitics Using S-Parameters", IEEE Transactions on Electron Devices, pages. 1-6, 04/2019
- [6] LI Ke, VIDET Arnaud, IDIR Nadir, EVANS Paul, JOHNSON Mark: "Accurate Measurement of Dynamic ON-state Resistances of GaN Devices under Reverse and Forward Conduction in High Frequency Power Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, à paraître
- [7] LI Ke, VIDET Arnaud, IDIR Nadir, EVANS Paul, JOHNSON Mark: "Modelling GaN-HEMT Dynamic ON-state Resistance in High Frequency Power Converter", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), 03/2020
- [8] VIDET Arnaud, LI Ke, IDIR Nadir, EVANS Paul, JOHNSON Mark: "Analysis of GaN Converter Circuit Stability Influenced by Current Collapse Effect", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), 03/2020