



Avis de Soutenance

Monsieur Hao BAI

Présentera ses travaux en soutenance

Soutenance prévue le **vendredi 11 octobre 2019** à 14h00
Lieu : UTBM, Rue Thierry Mieg, F-90010 Belfort Cedex, France
Salle : I102

Titre des travaux : modélisation et simulation en temps réel au niveau composant des convertisseurs d'électronique de puissance

Ecole doctorale : SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Section CNU : 63

Unité de recherche : FEMTO-ST Franche Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies

Directeur de thèse : Fei GAO

Codirecteur de thèse : Damien PAIRE ☐ HDR ☒ NON HDR

Soutenance : ☒ Publique ☐ A huis clos

Membres du jury :

<u>Nom</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Rôle</u>
M. Fei GAO	Professeur	Université Bourgogne - Franche-Comté	Directeur de thèse
M. Hubert RAZIK	Professeur	Université Claude Bernard Lyon 1	Rapporteur
M. Franck BETIN	Professeur	University of Picardie Jules Verne	Rapporteur
Mme Manuela SECHILARIU	Professeur	Université de Technologie de Compiègne	Examineur
M. Yongheng YANG	Associate Professor	Aalborg University	Examineur
M. Ka Hong LOO	Associate Professor	Hong Kong Polytechnic University	Examineur
M. Damien PAIRE	Maître de Conférences	Université Bourgogne - Franche-Comté	Co-directeur de thèse

Mots-clés : la simulation temps réel, application HiL, électronique de puissance, circuit logique programmable, transistor bipolaire à porte isolée,

Résumé de la thèse (en français) :

Pour le développement des convertisseurs d'électronique de puissance, la simulation en temps réel joue un rôle essentiel dans la validation des performances des convertisseurs et de leur contrôle avant leur réalisation. Cela permet de simuler et reproduire avec précision les formes d'ondes des courants et tensions des convertisseurs de puissance modélisés avec un pas de temps de simulation correspondant exactement au temps physique. Les circuits d'électronique de puissance sont caractérisés par le comportement non linéaire des interrupteurs. Par conséquent, les représentations des dispositifs de commutation sont cruciales dans la simulation en temps réel. Le modèle au niveau système est largement utilisé dans les simulateurs temps réel du commerce et les plates-formes expérimentales, qui modélisent les comportements des interrupteurs par deux états stationnaires distincts - passant et bloqué - et négligent tous les phénomènes transitoires. Ces dernières années, la simulation temps réel au niveau du composant est devenue populaire car elle permet de simuler les formes d'onde de commutation transitoires et de fournir des informations utiles concernant les contraintes sur les interrupteurs, les pertes, les effets parasites et les comportements électrothermiques. Néanmoins, la simulation temps réel au niveau du composant est contrainte par le pas de temps transitoire réalisable en raison des quantités de calcul accrues introduites par la non-linéarité du modèle de commutation. Afin d'intégrer le modèle au niveau du composant dans la simulation en temps réel, cette thèse porte sur l'exploration approfondie des techniques de modélisation et de simulation en temps réel au niveau composant des convertisseurs d'électronique de puissance. Les techniques de simulation en temps réel les plus récentes sont d'abord examinées de manière exhaustive, tant au niveau du système que du composant. En outre, deux approches de modélisation au niveau du composant sont proposées, à savoir le modèle haute résolution quasi-transitoire (HRQT) et le modèle transitoire linéaire par morceaux (PLT). Dans le modèle HRQT, le modèle de réseau est implémenté par une simulation au niveau système tout en générant les formes d'onde de commutation transitoires avec une résolution de 5 ns, ce qui permet de simuler le convertisseur de puissance avec des transitoires rapides jusqu'à des dizaines de nanosecondes. Compte tenu des effets des transitoires sur l'ensemble du réseau, les modèles non linéaires des IGBT et diodes sont linéarisés par morceaux dans le modèle PLT. À l'aide de techniques efficaces de découplage de circuits, le modèle du convertisseur de puissance au niveau composant peut être simulé de manière stable avec un pas de temps de simulation global de 50 ns. Les deux modèles proposés sont testés et validés via différents cas sur une plate-forme temps réel de National Instruments basée sur un FPGA, comprenant un convertisseur boost boosté entrelacé (FIBC) pour le modèle HRQT, un convertisseur DC-DC-AC pour le modèle PLT et un convertisseur modulaire à plusieurs niveaux (MMC) pour les deux. Des résultats précis sont produits par rapport aux outils de simulation hors ligne. L'efficacité et les valeurs d'application sont également vérifiées par les résultats d'essais en temps réel.

Abstract (in English):

In the development cycles of the power electronics converters, the real-time simulation plays an essential role in validating the converters' and the controllers' performances before their implementations on real systems. It can simulate and reproduce the current and voltage waveforms of the modeled power electronics converters accurately with a simulation time-step exactly corresponding to the physical time. The power electronics circuits are characterized by nonlinear switching behaviors. Therefore, the representations of switching devices are crucial in real-time simulation. The system-level model is widely used in both commercial real-time simulators and the experimentally built real-time platforms, which models the switching behaviors by two separate steady states – turn-on and turn-off, and neglects all the switching transients. In recent years, the device-level real-time simulation has become popular since it can simulate the transient switching waveforms and provide useful information with regard to the device stresses, the power losses, the parasitic effects, and electro-thermal behaviors. Nevertheless, the device-level real-time simulation is constrained by the achievable transient time-step due to the increased computational amounts introduced by the nonlinearity of the switch model. In order to integrate the device-level model in the real-time simulation, in this thesis, the device-level real-time modeling and simulation techniques of the power electronics converters are deeply explored. The state-of-art real-time simulation techniques are firstly reviewed comprehensively with regard to both system-level and device-level. Moreover, two device-level modeling approaches are proposed, including high-resolution quasi-transient model (HRQT) and the piecewise linear transient (PLT) model. In HRQT model, the network model can be implemented by system-level simulation while generating the transient switching waveforms with a 5 ns resolution, which is good at simulating the power converter with fast switching transients down to tens of nanoseconds. Considering

the effects of the transient behaviors on the entire network, the PLT model is proposed by piecewise linearizing the nonlinear IGBT and diode equivalent models. With the help of effective circuit decoupling techniques, the device-level power converter model can be simulated stably with a 50 ns global simulation time-step. The proposed two models are tested and validated via different case studies on National Instruments (NI) FPGA-based real-time platform, including floating interleaved boost converter (FIBC) for HRQT model, DC-DC-AC converter for PLT model, and modular multi-level converter (MMC) for the both. Accurate results are produced compared to offline simulation tools. The effectiveness and the application values are further verified by the results of the real-time experiments.