

# Modélisations orientées CEM d'un convertisseur de puissance pour une optimisation multi-physique

Jad TAKI† - Florent ROBERT\* - Mohamed BENSETTI† - Philippe DESSANTE† - Daniel SADARNAC†

† GeePs | Génie électrique et électronique de Paris – Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ Paris-Sud, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06,

11 rue Joliot Curie, Plateau de Moulon F91192 Gif sur Yvette CEDEX, France.

\*Efi Automotive, Service Recherche Avancée, 77 allée Grande Combes, F01708 Miribel, France

**RESUME** – Afin d'intégrer des modèles prédictifs de Compatibilité Electromagnétique (CEM) conduite dans des optimisations multi-physiques, plusieurs approches de modélisation sont présentées dans ce papier, à travers l'exemple d'un convertisseur de puissance. L'objectif est de comparer les temps de calcul et les domaines de validité de différentes démarches, qui s'appuient chacune sur un modèle de composant de commutation. La comparaison des résultats obtenus par simulation à des mesures expérimentales de perturbations permet de discuter les compromis entre le temps de calcul de la simulation et la validité des modèles des composants.

*Mots-clés—Optimisation multi-physique, CEM, simulation temporelle, simulation fréquentielle*

## 1. CONTEXTE

La compacité, l'efficacité et la complexité des équipements automobile sont des critères de plus en plus contraints par les attentes des clients, les exigences des normes ou encore les questions environnementales. L'influence de ces contraintes atteint la conception de l'ensemble des équipements automobiles. Les concepteurs de ces éléments doivent ainsi dimensionner des systèmes multi-physiques complexes dans un temps de développement acceptable du point de vue industriel.

Dans ce contexte, une optimisation multi-physique est un outil qui répond au problème [1][2]. Un tel procédé permet de traiter simultanément différents domaines physiques, dès lors que les modèles correspondants sont connus. En effet, les algorithmes d'optimisation sont basés sur un modèle paramétré du système. Différents jeux de paramètres sont évalués en utilisant un grand nombre de simulations, jusqu'à atteindre un résultat qui peut être considéré comme optimal.

Dans ce contexte, considérer les problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM) dès la phase de conception du système devient crucial. La simulation, en se substituant au prototypage, permet de réduire le délai et le coût de conception. La prédiction des perturbations conduites peut être déterminée avec un logiciel de simulation électrique de type SPICE, comme LTspice IV. La mise en place de ces modèles prédictifs et leur insertion dans des démarches d'optimisations est le point clé d'une telle approche. Celle-ci doit assurer la conformité CEM tout en limitant la nécessité d'un filtre passif encombrant ou le risque de perturbations

internes au système. Cependant, cette démarche a un prix : le temps de calcul de ces simulations est d'autant plus grand que la gamme de fréquence validée est large.

Plusieurs études sur la modélisation des composants passifs d'un point de vue CEM ont été réalisées [3]. Dans cet article, les auteurs identifient plusieurs façons d'obtenir un modèle de convertisseur de puissance d'un point de vue CEM conduite, en utilisant une approche multi-niveaux pour représenter le composant actif. Ces possibilités sont explorées et classées selon leur temps de calcul et leur domaine de validité. Les modèles multi-niveaux d'un MOSFET de puissance sont introduits, dans les domaines temporel et fréquentiel. Un exemple de convertisseur *buck* a été traité et modélisé d'un point de vue CEM afin de prédire les perturbations conduites émises pour les différents modèles étudiés. Une validation expérimentale est menée au moyen d'un banc d'essai réalisé au sein du laboratoire et inspiré de la norme CISPR 25. L'article final comportera des explications détaillées sur la modélisation des éléments passifs, dont on ne présente ici que les grandes lignes.

## 2. MODELES MULTI-NIVEAUX DU MOSFET DE PUISSANCE

Deux méthodes de modélisation sont généralement utilisées dans la CEM conduite. La simulation temporelle (méthode indirecte) associée à une transformée de Fourier (FFT) est la première approche [4]. Elle permet de prendre en compte la non-linéarité du système, mais le temps de calcul est long, surtout vers les hautes fréquences, étant donné que la FFT nécessite un nombre de points important. La seconde approche (méthode directe), quant à elle, repose sur une simulation dans le domaine fréquentiel en linéarisant le modèle [5]. Cette approche est relativement rapide.

Dans le cas d'un convertisseur de puissance, les composants actifs, tels que les MOSFET, ne sont pas linéaires. Dans ce cas, une simulation temporelle est appropriée. Cependant, des résultats satisfaisants peuvent être obtenus dans le cas de simulation fréquentielle : tout dépend de la finesse des modèles mis en jeu.

### 2.1. Représentation dans le domaine temporel

La représentation au premier ordre du composant actif est une approche « Tout ou Rien », ce qui est équivalent à une source de courant nulle en état bloqué et une source de tension nulle en état passant. Cette représentation n'est pas

compatible avec les simulateurs comme SPICE, en raison de la discontinuité importante qu'elle implique. Cependant, un modèle proche peut être construit en utilisant une résistance variable,  $R_{DSon/off}$ , définie entre une valeur élevée et une petite valeur, telle que représentée dans la Fig. 1.a.

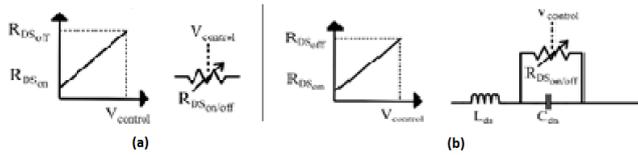


Fig. 1: a. Modèle Mosfet  $R_{DSon/off}$  - b. Modèle MOSFET  $R_{DSon/off}$ , avec des éléments parasites

Ce premier modèle peut être amélioré en ajoutant deux composants parasites : une inductance en série  $L_{ds}$  qui représente les interconnexions parasites et une capacité en parallèle  $C_{ds}$  qui représente la capacité entre le drain et la source du MOSFET, tels que représentés dans la Fig. 1.b.

La librairie de LTspice IV contient déjà des modèles de MOSFET. Ce modèle de MOSFET prend en considération par défaut les caractéristiques statiques, les interconnexions parasites, la diode de roue-libre et la non linéarité des capacités internes. Il s'agit du troisième modèle que nous considérerons.

Enfin, les fabricants de composants fournissent généralement des modèles de leurs composants. Parfois, plusieurs niveaux de représentation sont proposés, dont certains prennent en compte l'échauffement du composant. Ces modèles sont basés sur une connaissance approfondie des propriétés physiques et géométriques des composants que seuls les fabricants peuvent avoir. Le quatrième modèle évalué sera donc celui établi par le fournisseur.

### 2.2. Représentation dans le domaine fréquentiel

La représentation dans le domaine fréquentiel est l'image spectrale des perturbations du domaine temporel, obtenue par la transformée de Laplace. Les trois sources équivalentes que nous considérerons seront basées sur une forme d'onde carrée, une forme d'onde trapézoïdale et une forme d'onde trapézoïdale non régulière.

Le principe de cette représentation est de remplacer les composants non-linéaires du circuit par des modèles de sources fréquentielles équivalentes. Une simulation temporelle est nécessaire pour établir ces modèles, afin de quantifier les variations de potentiels et de courant que doivent générer ces sources.

### 3. CAS D'ETUDE : CONVERTISSEUR BUCK

Le convertisseur est décrit dans la Fig.3. L'entrée est une source de tension  $V_{in}$  de 13.5V. Un hacheur abaisseur (*buck*) est adapté à notre étude car il ne contient qu'un seul composant MOSFET. Le courant de sortie est distribué sur dix résistances en parallèles de 15Ω chacune pour que l'impédance totale de la charge en basse fréquence soit proche de celle d'une charge de type moteur. La fréquence de découpage est fixée à 200 kHz. La référence de MOSFET utilisée est le composant IPB147N03L (Infineon), comme

commutateur mais aussi comme diode de roue libre. Les valeurs des bobines et condensateurs sont respectivement 390μH et 220μF.

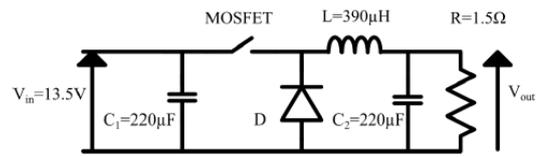


Fig. 2: Convertisseur hacheur abaisseur (*Buck*)

### 4. MESURES ET COMPARAISON DES MODELES MULTI-NIVEAUX

La Fig. 4 montre l'enveloppe du spectre de perturbations obtenues par les simulations des différents modèles de MOSFET ainsi que l'enveloppe du spectre issue des mesures.

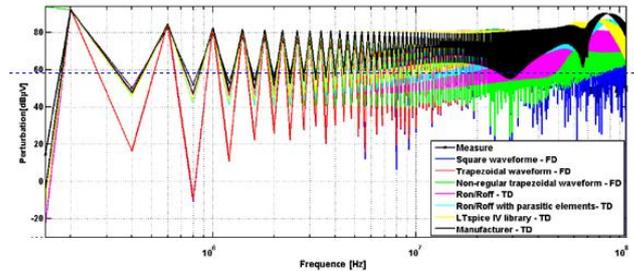


Fig. 3: Envelopes des spectres des perturbations

### 5. CONCLUSION

Ce papier introduit sept modèles de MOSFET et leur impact sur la simulation CEM en électronique de puissance. Les modèles dans le domaine fréquentiel sont rapides et donnent des résultats satisfaisants pour les perturbations conduites émises jusqu'à une dizaine de MHz. Cet écart en haute fréquence peut être expliqué par l'absence des interconnexions dans nos simulations. Une meilleure précision peut être obtenue dans le domaine temporel mais pour des temps de simulation beaucoup plus importants.

### 6. REFERENCES

- [1] M. Bendali, C. Larouci, T. Azib, et al., Design with Optimization of an Interleaved Buck Converter for Automotive Application; Effect of the EMC Constraint, 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 2014 page 1.4.02 2014..
- [2] R. Guserle, M.F. Zaeh, Application of multidisciplinary simulation and optimization of mechatronic systems in the design process, Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2005. p. 922-927.
- [3] A. Frikha, M. Bensetti, H. Boulzazen, F. Duval, Influence of PCB and Connections on the Electromagnetic Conducted Emissions for Electric or Hybrid Vehicle Application, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, N°54, May 2013.
- [4] T. Kato, Y. Otomo, K. Harada, et al. Modeling and simulation of a power electronic converter for EMC, Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the. IEEE, 2002. p. 541-546.
- [5] B. Revol. Modélisation et optimisation des performances CEM d'une association variateur de vitesse – machine asynchrone.