

Etude et optimisation CEM d'un module à transistors HEMT GaN

Xiaoshan LIU, Bertrand REVOL, Cyrille GAUTIER, François COSTA
SATIE, ENS Cachan, CNRS, 61 av. du Président Wilson, 94230, France

RESUME – Dans cet article, une structure de type PCB SMI (substrat métallique isolé) est proposée pour un module de moyenne puissance utilisant des GaN HEMTs de 650V 30A. Les éléments parasites inductifs et capacitifs sont modélisés par des impédances localisées et leurs impacts sur les performances CEM sont étudiés par la simulation dans le domaine temporel suivi par une analyse FFT. La capacité au point milieu a été éliminée. Les capacités parasites du SMI et des capacités CMS discrètes ont été utilisées comme des filtres intégrés de mode commun (CM) et de mode différentiel (DM). Les impédances de bus DC ont été équilibrées pour éviter les effets de transfert des modes (DM à CM ou inverse).

Mots-clés—GaN, module, CEM.

1. METHODOLOGIE

Le processus de modélisation en compatibilité électromagnétique (CEM) consiste à représenter -1- la source de perturbation et -2- son chemin de propagation. Dans cette étude, la première est modélisée par un modèle comportemental et robuste du transistor HEMT GaN et la seconde par des impédances localisées. Les valeurs de ces impédances sont obtenues par des mesures (analyseur d'impédance) ou par calcul numérique (Ansys q3d®). Un module de type SMI est modélisé et analysé par simulation dans cet article.

2. CIRCUIT DE SIMULATION

Le modèle du transistor GaN est obtenu à partir de ses caractéristiques statiques et dynamiques (Fig. 1). Les trois capacités intrinsèques sont modélisées par des tables de valeurs. La source de courant interne est modélisée par une équation de forme *tanh*. Un bras d'onduleur est mis en œuvre en mode buck (400V, 20A, 200 kHz, $\alpha=0.5$) et tous les composants passifs sont modélisés dans une gamme de fréquence pertinente (Fig. 2) ; leurs valeurs sont données raisonnablement par des mesures ou par des calculs.

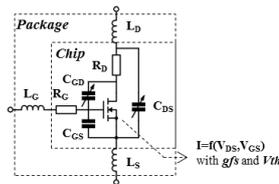


Fig.1 Modèle du GaN HEMT

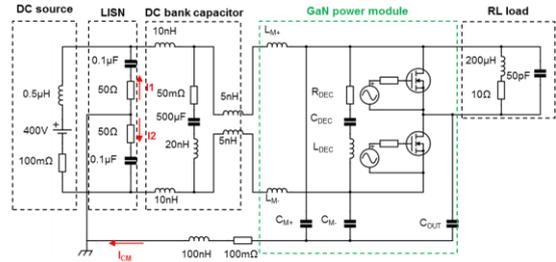


Fig.2 Circuit de simulation d'un bras d'onduleur en mode buck

Les éléments parasites principaux du module de type SMI (substrat métallique isolé) sont illustrés à la Fig. 3. Ce circuit est simulé dans le domaine temporel suivi par une analyse FFT pour obtenir les spectres de perturbations en mode différentiel $((I_1 - I_2)/2)$ et en mode commun (I_{CM}) .

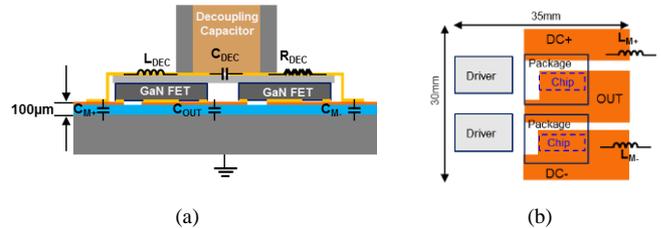


Fig.3 Vue de coupe (a) et de dessus (b) du module IMS

3. ANALYSE CEM

Une première simulation est réalisée sans capacité de découplage de proximité C_{DEC} . Les trois capacités de mode commun C_{M+} , C_{M-} et C_{OUT} sont estimées à 40 pF au vu des surfaces de cuivre et de l'épaisseur du prepreg thermique (100μm) utilisés. En règle générale, C_{OUT} doit être minimisée systématiquement pour réduire les perturbations CM en basse fréquence [1].

Par simulation, C_{M+} et C_{M-} sont augmentées de 40 pF (capacité parasite du SMI) progressivement à 1 nF (possibilité d'utiliser des capacités discrètes CMS [2]). D'après les résultats présentés à la Fig. 4, C_{M+} et C_{M-} de grandes valeurs agissent comme un filtre de mode commun – elles recyclent la perturbation CM à haute fréquence due à C_{OUT} [3]. Cependant, l'augmentation des valeurs de C_{M+} et C_{M-} décale la résonance de DM vers les basses fréquences et accroît son amplitude.

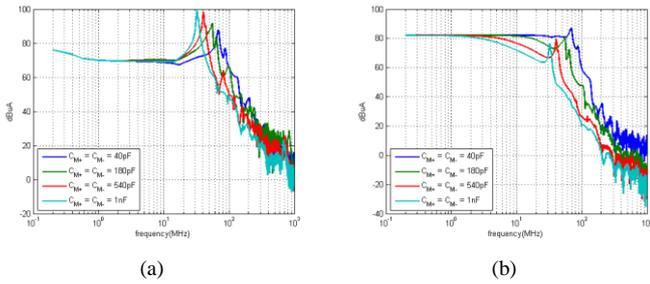


Fig.4 Enveloppe du spectre de perturbation DM (a) et CM (b) en variant C_{M+} et C_{M-} . ($C_{OUT}=40pF$, $L_{M+}=L_{M-}=5nH$, sans C_{DEC})

Il est important de noter que l'ensemble des éléments parasites L_M et C_M du bus DC (DC+ et DC-) doivent être équilibrés [4]. Dans le cas contraire le courant CM peut être augmenté de l'ordre de 10 dB à cause du transfert de modes (de DM à CM) associé aux fortes variations de courant dans la boucle de commutation (Fig. 5).

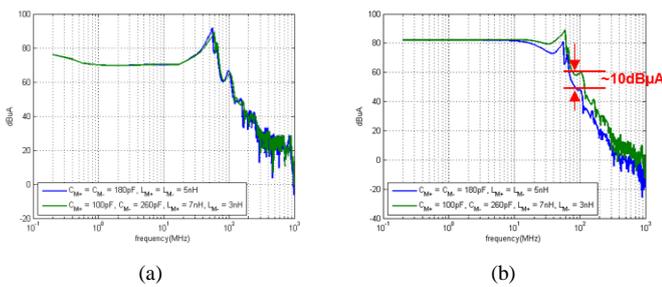


Fig.5 Enveloppe du spectre de perturbation DM (a) et CM (b) avec des impédances de bus DC équilibrés ou non ($C_{OUT}=40pF$, sans C_{DEC})

Lorsque L_{M+} , L_{M-} , C_{M+} , C_{M-} and C_{OUT} sont déterminées, il est alors nécessaire de déterminer la capacité de découplage locale C_{DEC} de bonne valeur. Plusieurs capacités CMS de différentes valeurs croissantes en parallèle permettent une bonne atténuation DM dans une large bande passante (Fig. 6).

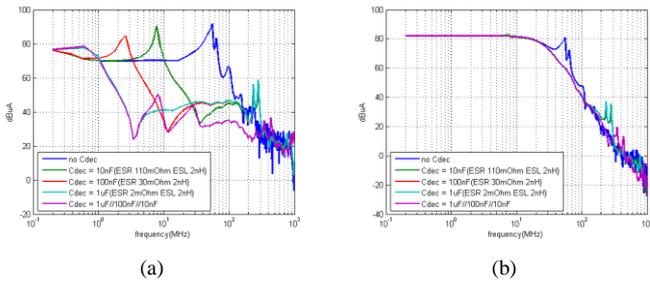


Fig.6 Enveloppe du spectre de perturbation DM (a) et CM (b) avec différents arrangements des capacités de découplage ($C_{OUT}=40pF$, $C_{M+}=C_{M-}=180pF$, $L_{M+}=L_{M-}=5nH$)

4. OPTIMISATION DU MODULE

Une structure PCB à deux couches combinée avec un substrat aluminium par une couche de prepreg thermique très fine est proposée (Fig. 7). Le cuivre de la deuxième couche du PCB est gravé pour d'une part minimiser la surface OUT (de 110 mm^2 à 50 mm^2 , donc de 40 pF à 18 pF) et d'autre part équilibrer et maximiser les surfaces DC+ et DC- (de 100 mm^2 à 500 mm^2 , donc de 40 pF à 180 pF). De plus, le substrat aluminium sous le cuivre de la zone OUT est gravé de $100 \mu\text{m}$ supplémentaire pour encore réduire C_{OUT} (de 18 pF à 9 pF). Si ce module est en configuration d'onduleur complet (3 bras), C_{M+} et C_{M-} peuvent être triplés (540 pF). Les capacités de découplage pré-dimensionnées sont montées juste au-dessus des deux GaN HEMTs. Ce prototype est en cours de fabrication. Les mesures expérimentales seront présentées dans l'article final et comparées avec les simulations. L'aspect thermique sera discuté également.

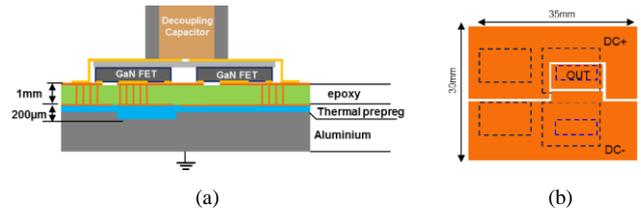


Fig.7 Vue en coupe (a) et de dessus de la deuxième couche du PCB (b) du prototype proposé

5. CONCLUSIONS

Les impacts des éléments parasites principaux dans un module à GaN à la perturbation CEM conduite ont été étudiés par la modélisation et la simulation. Les résultats ont été utilisés pour optimiser un module de puissance moyenne à GaN de type PCB SMI en utilisant des GaN HEMT de 650V 30A.

6. REFERENCES

- [1] Huang, Xudong, "Frequency Domain Conductive Electromagnetic Interference Modeling and Prediction with Parasitics Extraction for Inverters," PhD thesis of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004
- [2] Robutel, R.; Martin, C.; Buttay, C.; Morel, H.; Mattavelli, P.; Boroyevich, D.; Meuret, R., "Design and Implementation of Integrated Common Mode Capacitors for SiC-JFET Inverters," in Power Electronics, IEEE Transactions on, vol.29, no.7, pp.3625-3636, July 2014.
- [3] Schanen, Jean-Luc; Roudet, James, "Built-in EMC for integrated power electronics systems," in Integrated Power Systems (CIPS), 2008 5th International Conference on, vol., no., pp.1-10, 11-13 March 2008.
- [4] Hoene, Eckart; Ostmann, Andreas; Marczok, Christoph, "Packaging Very Fast Switching Semiconductors," in Integrated Power Systems (CIPS), 2014 8th International Conference on, vol., no., pp.1-7, 25-27 Feb. 2014.