

Modèle analytique d'estimation des pertes dans une cellule de commutation MOSFET-diode Schottky SiC en vue de la conception et de l'optimisation d'un dissipateur thermique

Gnimdu DADANEMA¹, François COSTA², Jean-Luc SCHANEN³, Christian VOLLAIRE⁴, Yvan AVENAS³

¹Laboratoire SATIE, 61 Avenue du président WILSON, 94235, Cachan France,

²Université Paris-Est Créteil, SATIE-CNRS, Cachan France,

³G2ELab, 21 Avenue des Martyrs, 38031 Grenoble France,

⁴Laboratoire AMPERE, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully France

RESUME – Nous nous intéressons dans cet article à une méthodologie d'estimation des pertes dans une cellule de commutation à base de composants SiC. Après avoir présenté la méthodologie d'établissement du modèle analytique, nous présentons la méthode calorimétrique d'estimation des pertes qui permet de valider notre approche. Nous utiliserons ensuite le modèle d'estimation des pertes pour la conception du dissipateur thermique adéquat.

Mots-clés—SiC, grand gap, modèle de pertes, cellule de commutation

1. INTRODUCTION

Dans le domaine aéronautique, la réduction de la masse est un enjeu très important tant en terme de gain économique qu'au niveau de l'impact écologique des avions. Parvenir à une réduction de la masse totale d'un avion nécessite de parvenir à la réduction de la masse de différents éléments constituant les systèmes électriques et mécaniques. Il est important de garder à l'esprit que dans cet objectif de réduction de masse, chaque gain aussi minime soit-il a de l'importance au vu du résultat global final envisagé. Concernant les convertisseurs de puissance, les pistes envisagées pour leur densification et la réduction de leur masse globale s'orientent pour la plupart vers l'utilisation de composants semi-conducteurs grands gaps comme le carbure de silicium ou le nitrure de gallium. Le potentiel de fonctionnement de ses composants à des températures plus élevées comparé aux composants classiques à base de silicium permet d'envisager des dissipateurs moins volumineux par exemple. Outre ce potentiel de fonctionnement à des températures plus élevées, les composants à base de SiC et de GaN permettent un fonctionnement à des fréquences plus élevées que celle des composants au silicium. Cette montée en fréquence nécessite évidemment qu'une attention particulière soit accordée à l'estimation des pertes en commutation dans les cellules de commutation à base de composants SiC. En général, en considérant une évolution trapézoïdale des grandeurs électriques (courant et tension) aux bornes des éléments de la cellule de commutation on arrive à estimer les pertes en commutation.

Cependant une analyse plus fine de l'évolution de ces grandeurs électriques en fonction du temps peut permettre une estimation plus fine des pertes en commutation et, de fait, entraîner un dimensionnement plus optimal du dissipateur thermique. De plus, la connaissance des lois de variation des grandeurs électriques (courant drain-source et tension drain-source) va permettre de déterminer les courants de mode commun et de mode différentiel et ainsi contribuer à l'élaboration des filtres.

Pour notre travail nous avons utilisé le MOSFET SiC C2M0080120D et la diode Schottky SiC C4D20120D de la société CREE pour construire la cellule de commutation afin d'effectuer l'analyse des formes d'ondes en commutation. Nous avons élaboré des modèles électrothermiques de ces deux composants en VHDL-AMS afin de valider notre approche dans un premier temps en simulation puis ensuite expérimentalement.

2. ETUDE DES FORMES D'ONDES EN COMMUTATION

La première étape de notre approche d'estimation des pertes dans la cellule de commutation est l'étude des formes d'onde en commutation. Le schéma Fig.1 représente le schéma simulé sous le logiciel Simplorer pour une première validation de notre approche. Nous avons pris en compte les éléments parasites principaux du circuit. Pour faciliter l'analyse des formes d'onde en commutation nous utilisons le schéma Fig.2 dans lequel est approximations sur la charge et l'alimentation ont été faites. Nous faisons l'hypothèse que la charge est assimilable à une source de courant parfaite et que la tension d'alimentation ne subit aucune fluctuation.

2.1. Considérations sur le modèle du MOSFET et de la diode Schottky

Nous définissons des modèles électriques pour le MOSFET suivant les différentes phases de commutation. A l'état bloqué le MOSFET est représenté par un circuit ouvert et ses capacités structurelles. Dans la zone de saturation le MOSFET est représenté par une source de courant contrôlée en tension et ses capacités structurelles. Dans la zone linéaire, la source de

courant contrôlée en tension est remplacée par une résistance. Nous choisissons pour faciliter la mise en équation du circuit pour les différentes phases de commutation de définir des valeurs discrètes pour les capacités structurelles C_{ds} et C_{gd} fortement non linéaires. [1] Ainsi on définit des valeurs de ces capacités suivant que le MOSFET fonctionne dans la zone linéaire ou dans la zone saturée.

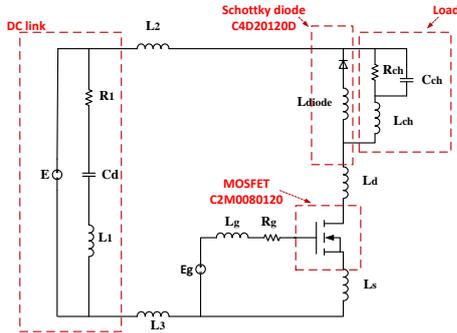


Fig.1 Schéma de la cellule de commutation simulée, modèle VHDL-AMS.

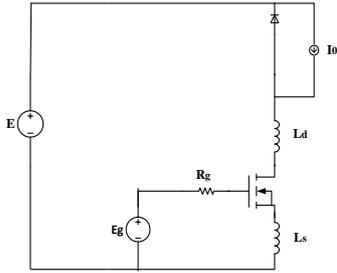


Fig.2 Schéma pour l'étude analytique des formes d'ondes en commutation.

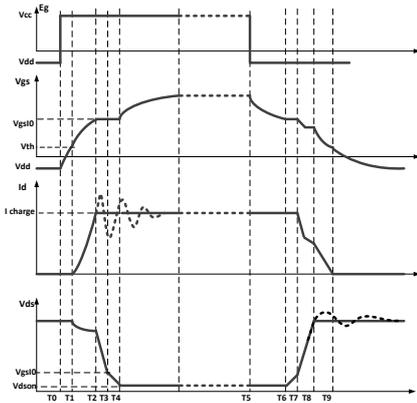


Fig.3 Formes d'ondes en commutation.

2.2. Evaluation des énergies dissipées pour différentes phase de commutation

La mise en équation du circuit d'étude pour différentes phases de commutation permet d'obtenir les lois de variation des grandeurs électriques (courant et tension) principales. Ensuite par une intégration du produit courant-tension du MOSFET on arrive à estimer l'énergie dissipée sur les phases de commutation. Pour les phases transitoires pour lesquelles la mise en équation est moins facile, nous estimons les pertes par une analyse d'échange d'énergie entre les différents éléments parasites du circuit. [2] Ainsi pour l'amorçage nous obtenons les résultats principaux suivant :

- De t_1 à t_2 croissance du courant du MOSFET

$$i_d = g_m (V_{cc} - V_{th}) \left(1 + \frac{r_2}{r_1 - r_2} e^{r_1(t-t_1)} + \frac{r_1}{r_2 - r_1} e^{r_2(t-t_1)} \right)$$

$$v_{ds} = E - (L_s + L_d) \frac{di_d}{dt}$$

$$E_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} (i_d \cdot v_{ds}) dt$$

- De t_2 à t_4 décroissance de la tension

$$E_{2-4} = W_{source} - W_{parasite} - W_{charge}$$

$$E_{2-4} = EI_0(t'_4 - t_2) - E(C_{diode} \cdot E) - \frac{1}{2} E^2 C_{diode}$$

$$+ \frac{1}{2} E_1^2 C_{oss} - I_0 E(t'_4 - t_2) + I_0 \int_{t_2}^{t_4} v_{ds} + I_0 \cdot v_{dson}(t'_4 - t_4)$$

$$= \frac{1}{2} E^2 C_{diode} + \frac{1}{2} E_1^2 C_{oss} + I_0 \frac{1}{2} \left((t_3 - t_2)(V_{gs(i=I_0)} - E_1) + (t_4 - t_3)(V_{dson} - V_{gs(i=I_0)}) \right)$$

$$+ I_0 \cdot v_{dson}(t'_4 - t_4)$$

La même approche est utilisée pour la phase de blocage du MOSFET.

2.3. Resultats comparatifs

Afin de valider notre modèle analytique d'estimation de pertes nous le comparons dans un premier temps avec les résultats de la simulation de notre circuit test pour différents points de fonctionnement et pour différentes valeurs de résistance de grille. Le tableau 1 montre quelques résultats obtenus.

Tableau 1. Resultats de comparaison entre le modèle analytique et les resultats de simulation numérique

Tension-courant	Resistance de grille (Ω)	Modèle analytique (W)	simulation (W)	Ecart relatifs (%)
300V-3A	15	6.1	5.41	10.9
	5	8.3	10.40	11.9
300V-5A	15	16.6	14.67	11
	5	18	20.1	8.2
500V-3A	15	12	11.74	2.5
	5	14.1	12.57	8.85
500V-5A	15	17	13.68	12.9
	5	20.3	16.32	11.6
1000V-3A	15	30.3	37.13	13.9
	5	37.5	41.35	9.2
1000V-5A	15	40.2	41.24	2.5
	5	41.2	50.29	13.05

3. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Pour la validation expérimentale de notre modèle, une approche calorimétrique [3] a été envisagée. Le MOSFET est fixé sur une colonne d'aluminium dont les côtés sont thermiquement isolés par de la vermiculite. Le dispositif est présenté Fig.4.



Fig.4 dispositif d'estimation des pertes par calorimétrie

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Notre objectif final étant la conception par optimisation, un modèle d'estimation de pertes fiable et simple est nécessaire. Le modèle présenté dans cet papier de par sa relative simplicité d'intégration dans un algorithme d'optimisation (modèle analytique) annonce d'intéressantes perspectives pour l'optimisation d'un dissipateur dans un premier temps et in fine

d'une structure de conversion globalement optimisée selon des critères qui peuvent être diverses : CEM, rendement, cycle de fonctionnement, etc... Ce modèle a été confronté à des résultats de simulation dans sa première phase, mais des résultats expérimentaux permettront de s'assurer de sa robustesse. La généralisation de l'approche au cas d'un bras d'onduleur sera présentée ainsi que le modèle du dissipateur associé.

5. REFERENCES

- [1] B.J. Baliga, "Fundamentals of Power Semiconductor Devices", Springer, 2008. L. Li, A. Kedous-Lebouc, A. Foggia, J.C. Mipo, « Influence of magnetic materials on claw pole machines behavior », IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 2, pp. 574-577, 2010.
- [2] J. Wang, "Characterization and Experimental Assessment of Effects of Parasitic Elements on the MOSFET Switching Performance", 2013).
- [3] K. Loudière, A. Bréard, C. Voltaire, and F. Costa, "Wide Band measurements in time domain with current and voltage probes for power losses evaluation and EMC measurements on Power Converters," IEEE International Symposium on EMC, pp. 1266-1271, 2015