



HAL
open science

Intégration de la fiabilité dans la conception sous contraintes multi-physiques des convertisseurs statiques multicellulaires

Mahraz Bendali, Chérif Larouci, Toufik Azib, Claude Marchand, Gerard Coquery

► To cite this version:

Mahraz Bendali, Chérif Larouci, Toufik Azib, Claude Marchand, Gerard Coquery. Intégration de la fiabilité dans la conception sous contraintes multi-physiques des convertisseurs statiques multicellulaires. 1er Symposium de Génie Électrique (SGE 2014), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065238

HAL Id: hal-01065238

<https://hal.science/hal-01065238>

Submitted on 18 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Intégration de la fiabilité dans la conception sous contraintes multi-physiques des convertisseurs statiques multicellulaires

Mahraz BENDALI, Cherif LAROUCI, Toufik AZIB

Centre de Recherche en ingénierie de l'ESTACA (CERIE), Pôle Systèmes et Energie Embarqués pour les Transports (S2ET) 34-36, rue Victor Hugo, 92300 Levallois Perret, France

Claude MARCHAND

Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP), SUPELEC; Université Paris-Sud, 11 rue Joliot Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif sur Yvette, France

Gérard COQUERY

Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) 25 Allée des Marronniers, 78000 Versailles, France

RESUME Ce papier propose d'intégrer la fiabilité prévisionnelle dans une approche de pré-dimensionnement de convertisseurs statiques entrelacés pour des applications embarquées automobiles. Cette approche est basée sur une optimisation multi-physique permettant de formaliser le choix d'architecture. Elle intègre les contraintes de conception d'une manière progressive et considère l'aspect fiabilité des composants de puissance dès les premières phases de conception. La méthode proposée est appliquée à un convertisseur Buck entrelacé embarqué. Elle permet de pré-dimensionner ce convertisseur en déterminant notamment le nombre optimal de cellules sous contraintes : électriques, rendement, thermiques, encombrement et particulièrement la fiabilité qui se retrouve au même niveau que ces dernières pour éliminer tous les risques de faisabilité dès la phase de pré-dimensionnement.

MOTS-CLES – Optimisation, Fiabilité, Convertisseur multicellulaire, Méthodologie de conception, Défaillances.

1. Introduction

L'électronique de puissance trouve une place de plus en plus importante dans différentes applications automobiles. Certaines de ces applications font appel à des niveaux de courants élevés sous faible tension (exemple de charges de l'ordre du kW connectées au réseau de bord 14V). Pour ce type d'applications, les convertisseurs statiques entrelacés peuvent être une bonne alternative aux convertisseurs conventionnels monocellulaires. En effet des progrès ont été réalisés sur la conception de nouvelles structures de conversion, sur les méthodes de commande et leur implémentation numérique, conduisant à des structures multicellulaires performantes permettant d'assurer une plus grande disponibilité du fait de la reconfiguration, mais la multiplication des composants augmente sensiblement le taux de défaillance de ce type de convertisseurs.

En effet la sécurité est l'une des questions clés du développement futur de l'automobile. A l'opposé de l'évolution marquée des structures de conversions et des technologies des composants, la fiabilité de ces convertisseurs reste une contrainte importante qui est à considérer pour la sécurité et le fonctionnement du véhicule. Ainsi, la multiplication des convertisseurs de puissance au sein de véhicule impose la prise en compte de leurs fiabilités notamment pour des fonctions critiques où il faut assurer une continuité de service. Cependant, afin d'assurer leur intégration dans un environnement réel de fonctionnement (le véhicule dans notre cas), plusieurs contraintes doivent être prises en compte lors de la conception (électriques, thermiques, rendement, volume, coût, fiabilité, contrôle, mécanique, ...) [1], [2]. Par ailleurs, la démarche d'évaluation de la fiabilité consiste à étudier chaque élément du système (semi-conducteur, condensateur, inductances...), notamment la cellule de commutation qui constitue le cœur du convertisseur. La fiabilité du système global résulte ainsi de chacune des entités.

De nombreux travaux traitent de l'évaluation de la fiabilité des convertisseurs de puissance une fois conçus [3], [4], l'originalité de notre approche est d'intégrer cette contrainte pendant les premières phases de conception. En effet, la

méthodologie de pré-dimensionnement permettant de formaliser un choix d'architecture et intégrant progressivement des contraintes multi-physiques avec différents niveaux d'exigences sur la précision des réponses apportées en terme de faisabilité de conception a été développée dans [1], [2]. Celle-ci intégrera aussi au même niveau la contrainte de fiabilité. Pour estimer cette dernière un profil de mission est défini suivant l'application cible qui permet de reproduire les contraintes de l'application réelle. Il est traduit ensuite en contraintes multi-physiques pour être intégré dans la démarche de conception.

Dans un premier temps, l'approche de conception proposée et la structure du système étudié sont présentées. Un focus est effectué par la suite sur l'aspect fiabilité en vue de l'intégrer dans la méthodologie de conception en se basant sur un profil de mission donné. Finalement, des résultats de pré-dimensionnement du convertisseur sont présentés et discutés.

2. Démarche de conception

La démarche de conception consiste à partir d'un cahier des charges de l'application cible, de traduire ces impératives en contraintes multi-physiques pour les intégrer ensuite dans le processus d'optimisation, un re-bouclage automatique est réalisé sur le choix du nombre de cellules du convertisseur entrelacé étudié (figure 1).

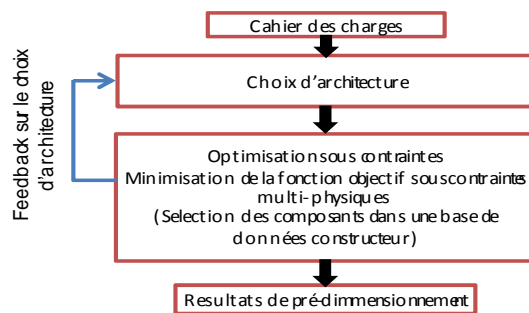


Figure 1 : Principe de la démarche de conception

Les contraintes multi-physiques sont évaluées à chaque configuration candidate [1], [2], la nouvelle contrainte de fiabilité est intégrée à la deuxième étape au même niveau que les autres contraintes, dans le but d'estimer le taux de défaillance de chacune des configurations de pré-dimensionnement proposées. En effet, l'estimation de la fiabilité est faite sur la base des composants choisis auxquels on applique un profil de mission pour calculer les contraintes subies (particulièrement les contraintes thermiques). Cette transformation du profil de mission en contraintes résultantes sur les composants alimente des modèles de fiabilité qui évaluent un taux de défaillance voire une durée de vie.

2.1 Structure étudiée

La structure considérée dans notre cas est un convertisseur Buck entrelacé constitué de cellules élémentaires identiques interconnectées en parallèle par l'intermédiaire d'inductances indépendantes. Ces cellules partagent le même condensateur de sortie et le même filtre d'entrée (figure 2).

Une modélisation analytique multi-physique de ce convertisseur a été effectuée et validée par simulation numérique à partir des données constructeurs. Les modèles élaborés sont de type électrique (ondulations en courant et en tension, valeur maximales et efficaces, ...), pertes (dans les composants actifs passifs), thermique (températures de jonction des semi-conducteurs), CEM (pour le dimensionnement du filtre d'entrée). Ces modèles seront résumés dans le papier final. Dans ce papier, nous nous focalisons plus particulièrement sur l'aspect fiabilité en vue de son intégration dans la démarche de conception.

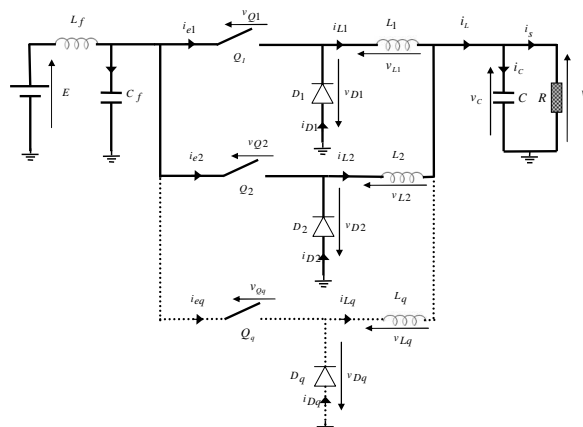


Figure 2 : Structure d'un Buck entrelacé parallèle à q cellules

2.2 Prise en compte de la contrainte de fiabilité

Pour estimer la fiabilité en l'électronique de puissance il faut générer les modèles de dégradation des composants. Dans ce cadre on peut s'appuyer sur des données issues de tests accélérés sur les composants [3], [4] ou sur des recueils de fiabilité [5], [6]. Dans ce papier et ayant comme premier objectif le développement d'une méthodologie de conception intégrant la fiabilité, nous avons opté pour une estimation à partir des recueils.

La fiabilité du convertisseur est construite à partir de l'analyse des taux de défaillance des composants sans considérer la redondance du convertisseur. Par conséquent, on peut supposer que le convertisseur est défaillant si un des composants est défaillant. La fiabilité globale $R_{tot}(t)$ du convertisseur est déterminée comme étant le produit des fiabilités $R_i(t)$ de chaque composant [3], [6].

$$R_{tot}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad n \text{ est le nombre de composants} \quad (1)$$

Le calcul de la fiabilité est caractérisé par le taux de défaillance λ , qui est exprimé en FIT (Failures in Time) :

$$\lambda = \frac{\text{Défaillances}}{10^9 \text{ Heures}} \quad (2)$$

Avec cette hypothèse, le taux de défaillance a une valeur constante. Le taux de défaillance totale du système, constitué par les composants, est la somme de tous les taux de défaillance des composants :

$$\lambda_{tot} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3)$$

Le temps moyen jusqu'à défaillance (MTTF) est utilisé pour indiquer la fiabilité. Il est calculé facilement suivant l'équation (4) :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_{tot}} \quad (4)$$

Le modèle de durée de vie utilisé est celui décrit dans le recueil de fiabilité FIDES [7]. En effet ce modèle est considéré plus optimiste que les autres recueils. Il prend en compte la plus part des facteurs d'application et d'environnement influant sur le convertisseur (électrique, thermique, humidité, mécanique et chimique). Par ailleurs, le modèle FIDES pour calculer les taux de défaillance sera présenté et son intégration détaillée dans le papier final.

2.3 Profil de mission

Le profil de mission est une donnée fondamentale dans l'estimation de la fiabilité des convertisseurs de puissance. Il permet de déterminer les contraintes subies par les composants constituant le convertisseur [3]. Dans notre cas un profil de mission pour une application réseau de bord d'un véhicule électrique hybride a été considéré (figure 3).

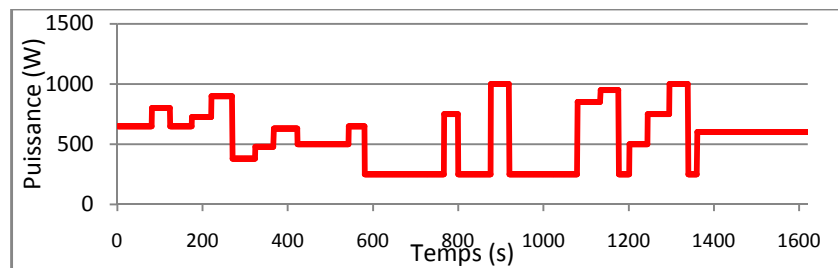


Figure 3 : Profil de mission en puissance du réseau de bord

Le profil de mission est utilisé dans ce cas pour calculer les contraintes thermiques sur les semi-conducteurs de puissance. Un comptage de cycle est effectué avec la méthode Rainflow [8] qui permet d'identifier tous les cycles de températures et de les classer selon l'amplitude, valeur moyenne, durée des cycles...etc. Ces cycles alimentent les modèles de fiabilité de chaque composant. Le passage du profil de mission en variations de température et l'extraction des cycles seront détaillés dans le papier final.

3. Résultats

Les résultats de pré-dimensionnement de la structure étudiée sont présentés en deux étapes. Dans un premier temps, la fiabilité a été évaluée pour un convertisseur optimisé sans considérer la contrainte de fiabilité. Dans un deuxième temps, la fiabilité sera intégrée dans la méthodologie de conception comme contrainte au même niveau que les autres contraintes. Cette deuxième étape vient d'être abordée. Elle sera détaillée dans le papier final.

3.1 Evaluation de la fiabilité du convertisseur optimisé :

Les contraintes considérées pour le pré-dimensionnement du convertisseur sont résumées ci-dessous :

Rendement: $\geq 80\%$, contrainte thermique: $T_j \leq 130^\circ\text{C}$ avec une température ambiante 30°C . Ondulations des tensions et courants entrées-sorties $\leq 10\%$ de la valeur moyenne, contrainte CEM : norme ISM 55011, l'objectif à minimiser est le volume global du convertisseur.

La figure 4 montre les variations du volume optimal en fonction de la puissance maximale considérée :

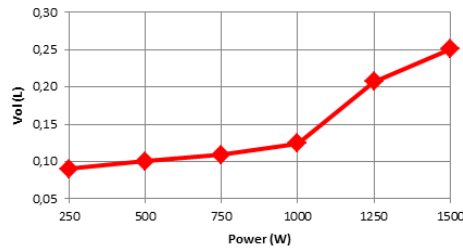


Figure 4 : Volume optimal en fonction de la puissance

La fiabilité a été évaluée pour différents niveaux de puissance. Le tableau ci-dessous résume ces résultats par composant ainsi que pour le convertisseur complet.

Tableau 1. Résultats d'évaluation de la fiabilité

Puissance (kW)	Taux de défaillance (FIT)			Durée de vie convertisseur	
	MOSFETs	Diodes	Convertisseurs	MTTF (En heures)	En années
0,75	1257,80	838,35	8384,80	119260	13,61
1	146,98	124,11	1084,4	922200	105,27
1,25	45,89	47,50	373,53	2677100	305,61
1,50	26,08	26,05	156,39	6394400	729,96

Les résultats montrent l'impact du dimensionnement sur la durée de vie. En effet, comme la puissance maximale du profil de mission est de 1kW ; la durée de vie se retrouve fortement réduite pour le convertisseur sous-dimensionné, et inversement, une meilleure durée de vie pour le convertisseur surdimensionné. Seulement, le volume associé à ce dernier cas est élevé qui peut être pénalisant pour l'application. L'intégration cette contrainte dans la démarche d'optimisation permettra ainsi de trouver un compromis entre le dimensionnement optimal et la durée de vie associée.

3.1 Intégration de la fiabilité dans la méthodologie de pré-dimensionnement par optimisation:

Les résultats de pré-dimensionnement par optimisation en considérant la fiabilité comme contrainte seront présentés dans le papier final.

4. Conclusion

Une approche de conception par optimisation de convertisseurs DC-DC entrelacés a été proposée dans ce papier. Pour ce faire, un convertisseur abaisseur multicellulaire a été utilisé comme support d'étude. La contrainte de fiabilité a été considérée en deux manières : d'abord une estimation pour un convertisseur déjà pré-dimensionné puis une intégration dans la méthodologie de conception par optimisation en considérant la fiabilité au même niveau que les autres contraintes. L'objectif est de déterminer l'impact de la fiabilité sur la conception lorsqu'elle est prise en compte dès la phase de pré-dimensionnement. La problématique est aujourd'hui bien posée, le papier final comportera les résultats liés à cette intégration.

5. Références

- [1] K. Ejjabraoui, C. Larouci, P. Lefranc, C. Marchand, « Presizing Methodology of DC-DC Converters Using Optimization Under Multiphysic Constraints: Application to a Buck Converter », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, n° 7, p. 2781 -2790, juill. 2012.
- [2] M. Bendali, L. Cherif, A. Toufik, M. Claude, C. Gerard, « Design Methodology with Optimization of an Interleaved Buck Converter for Automotive Application », in IEEE EUROCON 2013, Zagreb, Croatia, 2013.
- [3] M. Ciappa, « Lifetime prediction on the base of mission profiles », Microelectron. Reliab., vol. 45, n° 9-11, p. 1293-1298, sept. 2005.
- [4] P. Solomalala, J. Saiz, et Al, « Virtual reliability assessment of integrated power switches based on multi-domain simulation approach », Microelectron. Reliab., vol. 47, n° 9-11, p. 1343-1348, sept. 2007.
- [5] J. J. Marin, R. W. Pollard, « Experience report on the FIDES reliability prediction method », in Reliability and Maintainability Symposium, 2005, p. 8 - 13.
- [6] D. Hirschmann, D. Tissen, S. Schroder, R. W. De Doncker, « Reliability Prediction for Inverters in Hybrid Electrical Vehicles », IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, n° 6, p. 2511 -2517, nov. 2007.
- [7] M. Held et K. Fritz, « Comparison and evaluation of newest failure rate prediction models: FIDES and RIAC 217Plus », Microelectron. Reliab., vol. 49, n° 9-11, p. 967-971, sept. 2009.
- [8] A. Niesłony, « Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components », Mech. Syst. Signal Process., vol. 23, n° 8, p. 2712-2721, nov. 2009.