

Vers une nouvelle approche de conception et de fabrication en Electr. de Puissance. Et si la microélectronique était un exemple à suivre ?

Jean-Christophe CREBIER, Yves LEMBEYE, Lyubomir KERACHEV, Jérôme LOURD
Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble – CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France,

RESUME – L'électronique de puissance est aujourd'hui confrontée à une dualité forte opposant méthodes de conception et intégration technologique. L'article revient sur l'avènement de cette situation avant de poursuivre avec l'introduction de différentes approches visant ou conduisant à réconcilier technologies et méthodes de conception. Si aucun résultat nouveau n'est publié dans l'article, celui-ci nous interroge sur les fondements de nos démarches de conception et de fabrication en électronique de puissance. Un débat à suivre !

Mots-clés— Electronique de Puissance, Conception automatique, Fabrication collective,

1. INTRODUCTION : MICROELECTRONIQUE, ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ; 2 APPROCHES OPPOSEES

L'électronique de puissance connaît depuis quelques années une profonde mutation en passant de l'assemblage de composants discrets à l'intégration de ceux-ci à grands renforts de technologies [1]. Cette évolution rend significativement plus complexe le métier du concepteur d'électronique de puissance qui doit, désormais, en plus de ses compétences en électronique de puissance fondamentale (topologies, composants, lois de commande), maîtriser des volets technologiques inhérents à l'intégration matérielle et fonctionnelle des convertisseurs statiques. Depuis de nombreuses années, l'électronicien de puissance dispose de composants, de documentations techniques, de modèles et techniques de conception lui permettant de simuler puis de « router » son système à partir de données connues. Les interactions entre les composants et les contraintes ne sont pas toujours simples à prendre en compte mais le domaine d'expertise reste fini. Cet environnement de conception est soutenu par des fournisseurs de composants discrets optimisés, des technologies d'assemblage maîtrisées et bien évidemment un environnement de conception adapté. Aujourd'hui, la conception en électronique de puissance intégrée fait voler en éclats cette partition et le concepteur se retrouve confronté à une multitude, pour ne pas dire une infinité, de nouvelles possibilités, de nouveaux critères, savoirs et méthodes à intégrer dans son processus de conception. En effet, la conception et l'intégration, que celles-ci soient au niveau des composants passifs [2] ou au niveau des composants actifs [3], introduisent des techniques et disciplines nouvelles et exigeantes. Cela conduit l'expert en électronique de puissance à limiter l'introduction du processus d'intégration dans son métier ou à mobiliser davantage d'efforts pour aboutir. Se faisant, il y a une fracture croissante entre les concepteurs traditionnels et ceux étant en mesure de concevoir en intégrant, pour des raisons de contexte applicatif et/ou de masse critique. Le constat aujourd'hui se matérialise un peu plus autour d'une électronique de puissance qui se cherche entre celle, résolument intégrée et structurée autour des applications basses tensions, faibles puissances [4] et celle, résolument discrète autour des applications fortes tensions, fortes puissances [5]. La première bénéficie des environnements et moyens de conception et de fabrication de la microélectronique, alors que la seconde exploite au mieux les efforts considérables engagés pour offrir des moyens de conception adaptés au caractère hétérogène de l'électronique de puissance. Ces derniers sont généralement associés à des filières technologiques tout autant complexes et hétérogènes mais qui font légion. Entre les deux, l'électronique de puissance moyenne tension, moyenne puissance se cherche au niveau technologique et

methodologique. Entre conception unique et spécifique, optimisée et performante pour chaque cahier des charges et conception générique, à base de fonctions de conversion partiellement ou totalement intégrées, les choix ne sont pas simples. La dualité entre les approches est aujourd'hui exacerbée par l'introduction de nouveaux matériaux, de nouvelles technologies et de nouveaux composants. C'est dans ce contexte que les approches modulaires poursuivent leur chemin, à partir de différentes sensibilités et pour différentes ambitions. Parmi celles-ci, le G2Elab pousse une approche modulaire et générique qui tente de faire un trait d'union gagnant entre structures de conversion élémentaires fortement intégrées et optimisées et associations discrètes de celles-ci, le tout appuyées par des outils et méthodes de conception génériques [6].

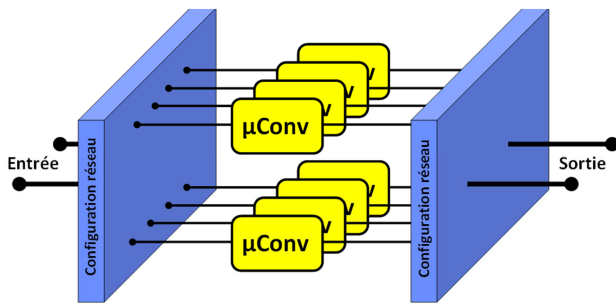
2. UN CHANGEMENT DE PARADIGME S'APPUYANT SUR LES RESEAUX DE MICROCONVERTISSEURS

L'idée de concevoir des convertisseurs de puissance par association d'un nombre plus ou moins important de briques de plus faible puissance n'est pas nouvelle. On la retrouve chez quelques fabricants d'alimentations, dans des applications de niches fortes puissance et haute tension [7] et dans de nombreux travaux de recherche [8, 9]. Tous finalement proposent des briques génériques de différentes puissances pouvant être facilement associées entre elles pour répondre à un ou plusieurs cahiers des charges. Pourtant, cette approche de conception n'est encore que cantonnée à quelques applicatifs bien précis et on trouve relativement peu de convertisseurs réalisés avec ce principe. Les raisons sont nombreuses et parmi celles-ci l'expérience a, pour l'instant, toujours montré à l'électronicien de puissance que le rendement était intimement lié aux bons choix technologiques faits lors de la conception. Pour autant, tout convertisseur d'électronique de puissance peut être réalisé sur la base d'associations de briques standards. Si ces briques sont parfaitement maîtrisées sur le plan de la fiabilité, du coût, du rendement et plus généralement des caractéristiques électriques, thermiques, électromagnétiques ... comme cela sera vraisemblable si elles sont fabriquées en masse, alors, il y a fort à parier que cette conception sera optimale sur tous les points de vue.

2.1. L'approche réseaux de microconvertisseurs

L'approche réseaux de microconvertisseurs se nourrit de cette idée et se veut une alternative à la conception classique en électronique de puissance. Par cette approche, un convertisseur devient une association dynamique d'un nombre plus ou moins important de briques de conversion élémentaires comme le présente la figure ci-dessous. C'est le choix du nombre de briques (μConv) et de leurs connexions (configuration réseau) qui permet l'adaptation des caractéristiques de la brique élémentaire au cahier des charges de la fonction à réaliser. Pour être performants, ces systèmes modulaires doivent s'appuyer sur des composants élémentaires aux caractéristiques exceptionnelles. Ceci est envisageable car la brique élémentaire est désormais le fruit d'une optimisation fonctionnelle et technologique [6, 10]. En effet elle n'a plus à répondre directement au cahier des charges de l'application finale mais à une exigence de performance et de fiabilité intrinsèque. Seule exigence spécifique à

cette application, la brique élémentaire doit être conçue en vue de sa mise en réseau.



2.1. La technologie tremplin de l'approche modulaire

L'approche modulaire conduit alors à une séparation entre le cahier des charges et les possibilités technologiques. Celles-ci peuvent alors être systématiquement valorisées dans le processus d'optimisation de la brique élémentaire et donc dans le système modulaire.

2.2. Du concept aux outils de conception et de fabrication

La notion de brique élémentaire comme élément fondateur et universel des convertisseurs réduit considérablement la variété des composants et des contraintes associées ce qui ouvre des perspectives en terme de conception automatique. De même et pour les mêmes raisons, le processus de fabrication peut être structuré de l'approvisionnement des composants et matériaux jusqu'aux technologies d'assemblage et de commande.

2.2.1. Structuration des filières de fabrication

Toute l'approche réside désormais dans la mise en place de plusieurs filières technologiques permettant de couvrir un champ applicatif le plus vaste possible. Chaque filière technologique intègre toutes les avancées nécessaires pour répondre de manière optimale à son espace applicatif [1,2,3,6,10]. Elle est structurée et optimisée pour produire en masse des briques élémentaires et les associer dans les meilleures conditions – connectique, contrôle commande, gestion thermique et électromagnétique. En concentrant l'effort de développement technologique sur ces quelques briques et leur modes d'associations, il devient possible de les rendre fiables, extrêmement recyclables et les plus performantes possibles. La concentration de l'effort de conception et de fabrication en série étant extrême, nul ne doute qu'une loi de Moore électronique de puissance pourrait en découler, permettant périodiquement d'améliorer les caractéristiques de chacune des filières. Ce faisant celles-ci seraient alors transposées aux systèmes qui, à leur tour bénéficieraient au plus vite des avancées technologiques et conceptuelles régulières. Une fois caractérisés, la filière technologique et les composants qui la constituent, il reste encore nécessaire de structurer un pant méthodologique.

2.2.2. L'outil de conception

La philosophie de cet outil reprend celle couramment utilisée en microélectronique : pour chaque filière technologique, un design kit (DK) intègre, sous la forme de bibliothèques, les composants et fonctions, leurs caractéristiques et les contraintes associées. Celui-ci est intégré dans le « flow » de conception s'appuyant sur des outils et des méthodes spécifiques. Le concepteur en électronique de puissance intégrée est désormais face à un environnement bornant le champ des possibles mais dont les caractéristiques sont parfaitement optimisées et maîtrisées. Il peut concevoir son système tout en étant affranchi de tous les aspects technologiques.

2.3. Benchmark de l'approche

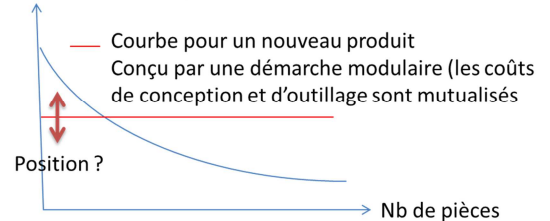
Au premier chef, cette démarche structurée ouvre la voie de la conception automatique ou tout au moins assistée en électronique de puissance. Elle se substitue à une partie du travail d'expert à conduire pour chaque applicatif. Grâce à la description exhaustive faite des quelques composants utilisables et de leurs interactions, elle permet, en outre, un prototypage virtuel réaliste, rapide et efficace. En autres dividendes, elle repose sur une filière d'approvisionnement et de fabrication moins vaste et moins versatile ce qui permet d'optimiser

les contours tels que les coûts, fiabilité ou encore recyclabilité, certifications...

Cependant, cette approche repose sur la mise en œuvre d'un nombre beaucoup plus important de composants et d'éléments de connectique ce qui peut avoir pour conséquences :

- des pertes supplémentaires,
- des densités de puissance non optimales
- un niveau de fiabilité et de cout à approfondir.

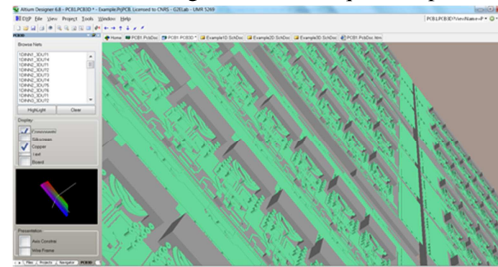
Coût moyen — Courbe pour un nouveau produit



L'article final sera sensiblement orienté sur cette partie benchmarking à grands renforts d'illustrations pour mettre en avant les points positifs et négatifs de l'approche.

3. ILLUSTRATION DE LA DEMARCHE

Un outil a été développé au G2ELab. Il prend la forme d'une toolbox implantée dans le logiciel de CAO Altium Designer et permet de réaliser une conception presque entièrement automatique de convertisseurs DC/DC. Cet outil s'appuie, comme évoqué, sur un Design Kit qui alimente l'outil de conception et de routage ainsi que l'ensemble des éléments nécessaires au contrôle commande, depuis la chaîne d'acquisition jusqu'au firmware du microcontrôleur. Le concepteur dispose alors de tous les éléments nécessaires à la fabrication de son produit : Layout, liste des composants, contrainte de mise en œuvre, fichier de programmation dans des formats directement interprétables par le fabricant (fichiers gerber). De plus il dispose de la netlist lui permettant de simuler et de valider le comportement de son convertisseur. La figure ci-dessous présente une vue 3D d'un PCB généré automatiquement pour un cahier des charges donné.



L'ensemble méthodologique sera présenté dans l'article final.

Seul l'exemple de la conversion DC/DC est présenté ici, mais cette démarche est entièrement transposable à la conversion DC/AC qui sera présentée dans l'article final.

Ces travaux bénéficient d'un soutien ANR (détails version finale)

4. REFERENCES

- [1] Fraunhofer, "Electronic packaging & system integration"
- [2] Margeron et al, "Current Sharing Between Parallel Turns of a Planar Transformer", IEEE, 2010
- [3] Vladimirova et al, "Drift region integrated microchannels for direct cooling of power electronic devices: advantages and limitations", IEEE, 2011
- [4] Burton et al, "FIVR fully integrated voltage regulators", IEEE, 2014
- [5] Florica et al, "New multilevel, flying capacitor inverters with coupled inductor", IEEE, 2012
- [6] Kerachev et al, "design and implementation of highly integrated dual active bridge micro converter", IEEE, 2015
- [7] Serbia et al, "modular multilevel converters for HVDC power stations", IEEE, 2014
- [8] Forest et al, "An isolated multicell intercell transformer converter", IEEE, 2012
- [9] Cobos et al, "Practical characterization of input-parallel-connected converters with a common input filter", IEEE, 2012
- [10] Phung et al, "Network of integrated cells for active balancing system", IEEE 2016