

Méthode de dimensionnement des convertisseurs modulaires PCA pour la circularité

Lucas PINTO^{a,b}, Lucas RIONDET^{a,b}, Maud RIO^b, Yves LEMBEYE^a, Jean-Christophe CREBIER^a

^aUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

^bUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

RESUME – L'électronique de puissance (EP) joue un rôle majeur et grandissant dans nos sociétés modernes. Le secteur de l'EP est cependant aujourd'hui principalement dans un modèle d'économie dit « linéaire ». La quantité de déchets électroniques augmente ainsi chaque année et parmi eux, ceux comportant de l'électronique de puissance. Une des façons envisagées pour réduire ces déchets électroniques est la circularité via la conception modulaire des convertisseurs. Cet article présente une méthodologie de dimensionnement de convertisseurs modulaires reposant sur un algorithme de dimensionnement à partir d'une topologie particulière : le *Power Converter Array*. L'approche modulaire est détaillée et l'outil développé est testé sur deux cas d'étude représentés par des convertisseurs DC-DC et AC-DC avec comme applicatif respectivement un chargeur de la batterie de service d'un véhicule électrique et un bloc d'alimentation de data center. Les résultats montrent de nombreuses configurations possibles et un travail d'analyse a été mené afin de trouver les configurations optimales.

Mots-clés— *Electronique de Puissance, Modularité, Dimensionnement, Power Converter Array, Circularité, Eco-conception*

1. INTRODUCTION

Avec l'électrification massive de nos sociétés, une quantité croissante d'énergie est utilisée sous forme d'électricité. Aujourd'hui, 70% de l'électricité consommée est convertie par un système d'électronique de puissance [1]. Ce domaine de l'électronique présente des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie des convertisseurs, de l'extraction des matières premières à leur élimination (souvent sans traitement spécifique [2]) en passant par la fabrication et l'usage.

Pour illustrer les problématiques liées à la fin de vie des produits électroniques, en 2022, 22 kg de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ont été générés par personne en France [2]. Ces déchets contiennent des matières toxiques pour l'environnement et la santé humaine telles que du plomb, du mercure ou du cadmium [3] et des réglementations limitent à présent leur usage. Malgré tout, la majeure partie des DEEE n'est pas recyclée, en particulier celle présentant les plus forts taux d'hétérogénéité matérielle [4]. Des stratégies d'éco-conception peuvent être mises en place dans un contexte d'économie circulaire afin de boucler les flux de matières et maintenir la valeur fonctionnelle des produits électroniques. Ces stratégies sont la réparation, la remise à neuf, le réemploi ou encore le recyclage des convertisseurs [5]. La modularité a été pointée comme pouvant faciliter la mise en place de ces stratégies [6]. En effet, celle-ci faciliterait entre autres la gestion des stocks, le diagnostic et les interventions à prévoir

(désassemblage/réassemblage), des étapes nécessaires à ces stratégies d'écoconception.

Plusieurs topologies modulaires ont été identifiées en électronique de puissance telles que le « *Power electronics building block* » (PEBB), le « *Multicell interleaved converter* » (MIC), le « *Modular multilevel converter* » (MMC) ou encore le « *Power converter array* » (PCA) [7]. Dans cet article, une méthodologie de dimensionnement est proposée et appliquée pour les topologies PCA. La méthodologie présentée dans cet article permet, grâce aux caractéristiques données dans le cahier des charges, de dimensionner le convertisseur en termes de nombre de cellules à utiliser, de placement dans l'espace, de configuration série/parallèle, de taille ou encore de poids pour répondre aux cahiers des charges. Un atout important de l'approche est la possibilité de générer par la suite des BOM (Bill of Material) et des caractéristiques fonctionnelles telles que les performances, mais aussi les durées de vie nominales ce qui permet d'alimenter les inventaires de cycle de vie (ICV) et de conduire rapidement des analyses de cycle de vie (ACV) en vue de mieux appréhender l'empreinte environnementale de la solution technique et de faire les bons choix en conséquence.

2. PRESENTATION DU POWER CONVERTER ARRAY

2.1 Présentation générale

Le PCA est une topologie de convertisseur développée entre autres au sein du Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab). Cette approche permet tous types de conversion DC-DC, DC-AC, AC-DC et AC-AC grâce à des *Cellules Standards de Conversion* (CSC) de différents types, associées en parallèles ou en séries. Ce type de convertisseurs est donc basé sur la modularité et la standardisation. Dans les cas d'études développés au G2Elab, les CSC reposent sur une topologie « *Dual Active Bridge* » (DAB) pour assurer l'isolation galvanique entre l'entrée et la sortie de chacune, une condition essentielle à l'approche PCA. Également, le choix du convertisseur DAB est justifié par sa capacité à atteindre un plus fort rendement et une plus forte densité de puissance [8].

Lorsque les CSC sont assemblées et connectées à une carte mère et avec une carte de commande et d'entrée sortie, ils forment le convertisseur PCA. La figure 1 montre deux exemples de convertisseurs PCA. Les PCA peuvent avoir différentes configurations en fonction de leurs :

- Tensions et courants d'entrée et de sortie.
- Agencement parallèle/série à l'entrée ou en sortie,
- Nombre de lignes, de colonnes et d'étages,

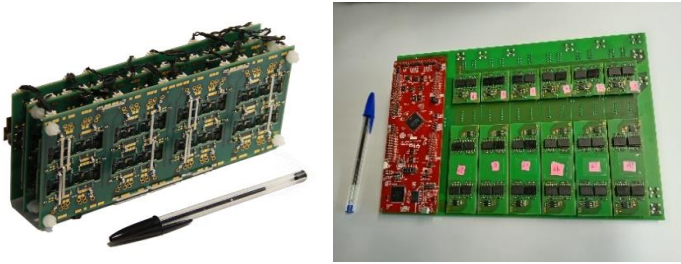


Figure 1. Réseaux de convertisseurs de puissance (PCA). A gauche : DC-DC à fort rapport de conversion, composé de 16 CSCs de type DC-DC, à droite un PCA AC-DC formé de 6 CSCs de type AC-DC (via une cascade AC-DC et DC-DC)

2.2 Degrés de liberté pour la conception

L'approche modulaire et standardisée a vocation à réduire sensiblement les degrés de liberté du concepteur. Toutefois, il existe plusieurs moyens pour maintenir des degrés de liberté au niveau de l'approche PCA pour garantir de bons compromis en termes de performances. Ces degrés de liberté doivent être pris en compte dans la méthodologie de dimensionnement et vont être explicités dans cette partie.

Le convertisseur DAB est connu pour ses performances et aussi ses faiblesses. En particulier, son optimisation est très dépendante du rapport des tensions entre l'entrée et la sortie. S'éloigner d'un rapport proche de 1 conduit à faire circuler davantage de réactif et surdimensionner les éléments de stockage. Pour pouvoir utiliser efficacement ce convertisseur, différentes stratégies peuvent être envisagées tout en maintenant un haut degré de standardisation d'un design à l'autre.

Tout d'abord, la fonction de conversion DC/DC de base de chaque cellule peut être complétée par des étages de conversion cascades en entrée et/ou en sortie pour augmenter les plages des grandeurs électriques et permettre la production des formes d'ondes adéquates. Ces étages de conversion en entrée et en sortie permettent également d'envisager le maintien de hauts rendements et fortes densités de puissance des DAB sur une large plage de puissance et de différence de tensions en entrée et en sortie. L'entrelacement de ces étages de conversion supplémentaires permet de réduire la fréquence de découpage pour réduire les besoins de filtrage tout en minimisant les pertes par commutation. L'ajout d'étages de conversion en entrée et/ou en sortie peut également permettre de moduler le nombre de CSC mises en œuvre pour optimiser les performances et envisager, dans une certaine perspective, la continuité de service avec plus de souplesse, une cellule pouvant être bypassée ou écartée du réseau. Dans le cas d'étude développé au G2Elab, des ponts complets + inductance avec des composants identiques à ceux du DAB sont utilisés. Cela permet de mettre en œuvre en entrée un étage élévateur DC/DC entrelacé avec un rapport de conversion maximal de 5 ou AC/DC à prélèvement sinusoïdal optimal. En sortie, cela forme un étage abaisseur DC/DC avec un rapport de conversion minimal de 0,2 ou DC/AC. Un bloc de stockage capacitif peut être inclus de part et d'autre du DAB pour disposer d'un « hold time » ou d'un stockage pour la conversion AC/DC et DC/AC. La figure 2 présente les divers étages de conversion/stockage qui peuvent être mis en œuvre pour répondre à la diversité des besoins.

Les CSCs peuvent intégrer un rapport de transformation entre l'entrée et la sortie (V_{out}/V_{in}) pour augmenter les rapports de tension. Cela est fort utile lorsque l'on cherche à mettre en œuvre des convertisseurs à fort rapport de transformation en

tension. Dans ce cas, il faut adapter les calibres en tension et en courant des composants présents de part et d'autre du transformateur. Dans le cas d'étude développé au G2Elab, des rapports de transformations de 0.25, 0.5, 1, 2 et 4 sont étudiés ainsi que des tensions en tension des MOSFETs de 30V, 40V et 60V. Le choix du couple fréquence de commutation / inductance du AC link apparaît aussi comme un degré de liberté. Ces deux paramètres sont liés car en augmentant le produit fréquence de commutation L_{ac} , on peut agir pour limiter l'ondulation du courant et donc la valeur du courant efficace et maintenir la commutation douce du DAB tout en augmentant le rapport des tensions d'entrée/sortie. Ce degré de liberté peut se faire en choisissant les inductances au sein d'une famille de composants présentant des caractéristiques matérielles identiques pour maintenir le taux de standardisation élevé. Evidemment, à volume et technologie constante, une augmentation de la valeur de l'inductance AC impliquera une augmentation du nombre de spires et une diminution de la section du conducteur ce qui va résulter en une augmentation des résistances dans la bobine. Un degré de liberté à utiliser en pleine conscience, tous les choix étant affaire de compromis.

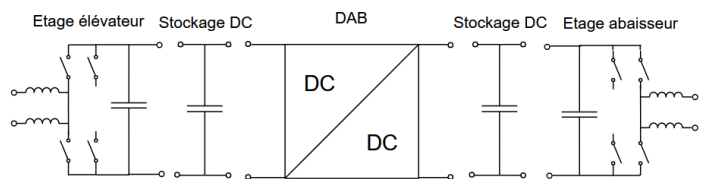


Figure 2. Différents étages de conversion à associer par CSC globale pour répondre à la diversité des besoins de conversion

Tous les degrés de liberté au niveau des composants sont faits dans un contexte de standardisation. Ainsi les transistors MOSFETs, les transformateurs, les inductances, condensateurs et autres composants formant la CSC font tous partis de séries de composants permettant de ne pas revoir le layout du PCB d'une CSC à l'autre.

Enfin, il est possible de développer des gammes de CSC en puissance pour répondre efficacement à la diversité des cas d'application. Par exemple, pour compléter le cas d'étude développé au G2Elab autour de la CSC 100W, on pourrait envisager de développer une gamme de CSC 10W et une autre à 1kW. Également plusieurs technologies de refroidissement pourraient être envisagées. Dans le cas d'étude traité ici, le refroidissement est à air en convection forcée ou naturelle. Cet aspect n'est pas approfondi davantage dans cet article. Les caractéristiques de la CSC 100W sont données dans le tableau 1. Sur la Figure 3, on peut observer une CSC AC/DC avec un étage de conversion AC/DC, suivi d'un étage de stockage d'énergie type DC bus et enfin un étage de conversion DC/DC isolé, qui correspond dans un cas à un DAB symétrisé.



Figure 3. Photo d'une CSC AC/DC intégrant plusieurs blocs standardisés. Tous les composants formant cette CSC sont issus de séries de composants disponibles sur étagère sous plusieurs valeurs, calibres, rapports de transformation

Tableau 1. Caractéristiques de la CSC DC/DC (sans cascade) 100W

Paramètre	Valeur
Tension d'entrée max	20V
Tension d'entrée min	8V
Tension de sortie max	20V
Tension de sortie min	8V
Courant de sortie max (convection forcée)	5A
Dimensions (L x l x h)	83 x 28 x 14 mm
Masse	25.1 g

2.3 Avantages et inconvénients

Le PCA est une approche fortement standardisée et modulaire qui pourrait devenir une solution d'écoconception si elle est rendue facile à mettre en œuvre des points de vue matérielle et conception. Elle présente plusieurs avantages, entres autres la facilité de prototypage, sa conception pour le réemploi ou encore sa plus grande facilité de réparation [9]. Avec un surdimensionnement du convertisseur en termes de nombre de CSC mise en oeuvre, le PCA pourrait permettre d'introduire la tolérance à la panne et ainsi d'assurer une continuité de service. Il s'agit d'une caractéristique à prendre en compte dans le dimensionnement des convertisseurs. Un autre avantage important concerne le fait que les différentes variantes des CSC peuvent être caractérisés à l'avance, ce qui permet de dimensionner chaque convertisseur en connaissance de cause. Toutes les caractéristiques sont consignées dans un « design kits » qui regroupe toutes les informations utiles, rendant le processus de conception rapide et robuste.

Cependant certains inconvénients apparaissent comme la multiplication des composants, qui peut se traduire par des coûts plus élevés et une fiabilité plus faible. Également, l'approche étant basée sur l'ensemble de briques de conversion d'une fraction plus ou moins grande de la puissance nominale, les performances peuvent en être affectées (rendement et densité de puissance plus faibles). De même, les interconnexions nécessaires à la modularité présentent une faiblesse au niveau de la fiabilité, du coût ou encore des impacts environnementaux impliqués par cette approche. Ces inconvénients ne sont pas incontournables mais nécessitent d'y investir des efforts de R&D.

2.4 Applications

Dans le cas d'étude développé au G2Elab, les CSC utilisées ont une puissance de 100W. Les convertisseurs sont généralement produits par associations de quelques jusqu'à un maximum de 100 CSC. Comme évoqué plus haut, les CSC développées au G2Elab sont à refroidissement à air en convection naturelle ou forcée mais une technologie à refroidissement liquide, pour des puissances supérieures pourrait être envisagée sans contre-indication. Cette perspective met en évidence le concept de filière technologique pour répondre à la diversité des domaines et cas d'application. Il ne faut pas imaginer qu'une seule CSC pourrait répondre à tous types de cahier des charges. En lieu et place, et à l'image de la micro-électronique qui répond aux divers besoins via une pluralité de nœuds technologiques, en électronique de puissance, une pluralité de filières technologiques aurait vocation à répondre à la diversité des besoins. Pour autant, chaque filière disposerait d'un haut niveau de standardisation et de modularité pour maximiser les dividendes de l'approche.

3. METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT

En faisant l'hypothèse qu'une filière technologique pour produire des PCA à partir d'une gamme de CSC est disponible et totalement décrite, il devient possible de mettre en place une méthodologie de dimensionnement qui s'appuie sur un ensemble de données et de paramètres de description de la filière et des CSC intégrant plus ou moins les degrés de liberté présentés dans la partie précédente. Pour concevoir un convertisseur, il est nécessaire de passer par plusieurs étapes qui sont les suivantes : rédaction d'un cahier des charges, réalisation d'une pré-étude du dispositif, détermination des choix technologiques, achat ou conception/fabrication des composants, réalisation du prototype et industrialisation/qualification et enfin fabrication en volume du produit final. La méthodologie proposée ici présente un cadre conceptuel qui simplifie la plupart de ces étapes. En effet, jusqu'à présent les PCA sont dimensionnés « à la main » c'est-à-dire que les concepteurs doivent trouver eux-mêmes le nombre de cellules adéquats ainsi que les différents agencements. Et seule une ou deux variantes de CSC étaient prises en compte. Dans la plupart des cas, quelques configurations étaient trouvées et comparées afin de choisir la plus pertinente. Il s'agissait d'un travail fastidieux ou les erreurs pouvaient vite arriver. Avec l'introduction des divers degrés de liberté, cette approche n'est plus possible et il devient nécessaire d'identifier puis de comparer les multiples options de conception pour choisir la configuration PCA et CSC qui permettra de répondre au mieux au cahier des charges de chaque besoin.

3.1 Vision d'ensemble de l'algorithme

Afin de trouver des dimensionnements de PCA adéquats au cahier des charges, un algorithme a été développé. Cet algorithme a vocation à identifier toutes les solutions compatibles ou proches des contraintes du cahier des charges. Si plusieurs solutions sont compatibles, l'outil qui lui est associé permet à l'utilisateur de faire des choix en fonction de certaines préférences (performances techniques et environnementales, volume, coût, redondance,...) . L'algorithme suit les grandes étapes suivantes :

1) Tout d'abord, le cahier des charges doit être saisi avec la liste actuelle des paramètres pris en compte : la plage de puissance, les plages de tensions en entrée et en sortie, la nécessité d'un stockage capacitif, la fonction de conversion souhaitée, le profil de mission, les dimensions maximales, le poids maximal du convertisseur, la technologie de refroidissement, le rendement minimal souhaité. Également, l'estimation des impacts environnementaux de la solution technique peut faire partie du cahier des charges.

2) Ensuite, l'algorithme réinitialise les configurations et le Treeview principal qui est une interface sous forme de tableau dans laquelle seront affichées les configurations de PCA possibles et qui doit permettre à l'utilisateur de mener à bien les comparaison (choix des critères de comparaison).

3) Puis, la fonction pour trouver et afficher les configurations est lancée. Il s'agit ici de la colonne vertébrale de l'algorithme. Cette fonction sera détaillée d'avantage dans la partie suivante. C'est à ce stade que sont discriminées les types de CSC et filière technologiques associées en fonction des besoins pour éviter par exemple de chercher des solutions dans des filières technologiques à refroidissement à air alors que seules des solutions à eau sont attendues.

4) Le choix de l'une des configurations présentes dans le Treeview principal permet d'ouvrir une fenêtre affichant tous les détails de la configuration choisie (caractéristiques détaillées,

BOM, et à terme vues schématique et 3D du convertisseur...). Cela est fait grâce à la base de données contenue dans le design kit qui va être utilisées pour déduire les caractéristiques du PCA à partir des éléments de base sélectionnés (typologie de la CSC, nombre de cellules, agencement,...). Les rapports de transformation et les étages abaisseurs et/ou éleveurs sont aussi pris en compte de même que les éventuelles cartes mère ou surfaces additionnelles de PCB pour accueillir et interconnecter les CSC et une carte de commande/filtrage CEM/borniers et protection d'entrée sortie.

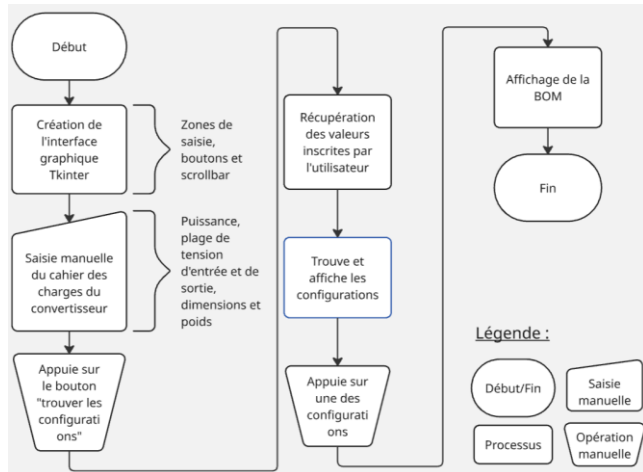


Figure 4. Algorithme de l'algorithme de dimensionnement

3.2. Détails sur la fonction trouver et afficher les configurations

La fonction *trouver et afficher les configurations* est la fonction principale de l'algorithme. Elle est elle-même découpée en plusieurs étapes et sous-fonctions qui vont être détaillées par la suite. On nomme ici « étape » un enchainement de lignes de code compris dans la fonction *trouver et afficher les configurations* et « sous-fonction » une fonction distincte qui est appelée dans la fonction *trouver et afficher les configurations*. Cette fonction recherche toutes les configurations possibles pour répondre à un cahier des charges et filtre ensuite ces configurations.

3.2.1. Obtention des agencements (lignes, colonnes, étages et liaison parallèle ou série)

Cette étape consiste tout d'abord en un enchainement de boucles *for* couplé avec des conditions, *if*. Pour tous les nombres compris entre le nombre minimum de CSC et le nombre maximum de CSC (noté n), on cherche à obtenir i , j et k qui sont respectivement les nombres de lignes, colonnes et étages de la configuration (matérielle et électrique).

Ensuite, trois autres boucles *for* sont imbriquées et des labels [SP, SS, PS, PP] sont utilisés. Ces labels correspondent aux liaisons en entrée puis en sortie qui peuvent être parallèle (P) ou série (S). Comme on le verra plus tard, ces agencements vont avoir une influence sur les tensions et les courants d'entrée et de sortie des CSC du PCA. Ici i , j et k vont être associés à toutes les possibilités de labels ou bien au label [0] s'ils ont une valeur de 1. En effet s'il n'y a qu'une ligne, une colonne ou un étage, il n'y a pas d'agencement en série ou parallèle possible entre plusieurs cellules.

3.2.2. Détermination de la tension des MOSFETs et du rapport de transformation

Pour cette étape deux boucles *for* sont imbriquées pour tester toutes les possibilités en termes de rapport de transformation et

de tension maximale des MOSFETs de part et d'autre du transformateur de la CSC. Par défaut (cas d'étude G2Elab) les rapports de transformation sont : 0.25, 0.5, 1, 2 et 4. Les tensions maximales des MOSFETs sont 30V, 40V et 60V. Un coefficient de sécurité de 0.7 (modifiable) est appliqué pour que la tension en entrée ou sortie du DAB soit toujours sensiblement inférieure à la tension maximale des MOSFETs.

3.2.3. Obtention de la tension d'entrée des cellules pour la plage la plus haute et la plus faible

Pour cette étape on va simplement récupérer la tension d'entrée minimale du convertisseur à dimensionner et la diviser par i s'il a un label correspondant à [SS] ou [SP] puis par j et k s'ils comportent aussi ces labels. En effet, comme le montre le tableau 2, lorsque les CSC sont mises en série, la tension se répartie (se divise) sur les CSC mises en série. De même pour le courant.

Le même raisonnement est appliqué avec les tensions et courant max.

Tableau 2. Impact de la tension et du courant par rapport à l'agencement

Agence ment	$V_{in_PCA}/$ V_{in_CSC}	$I_{in_PCA}/$ I_{in_CSC}	$V_{out_PCA}/$ V_{out_CSC}	$I_{out_PCA}/$ I_{out_CSC}
PS	1	N	N	1
SP	N	1	1	N
PP	1	N	1	N
SS	N	1	N	1

3.2.4. Stockage de la configuration

La configuration est ensuite stockée dans une base de données nommée *Configuration*. Celle-ci comporte les nombres de lignes, de colonnes et d'étages, les agencements, les tensions d'entrée et de sorties max et min des CSC, les dimensions ainsi que le nombre de cellules. On précise que toutes les CSC partagent en entrée et en sortie le même point de fonctionnement (courant, tension d'entrée, tension de sortie et puissance de sortie).

3.2.5. Calcul du courant et de la tension maximum du convertisseur

Le tableau 2 est utilisé pour cette étape qui consiste à calculer le courant maximal d'entrée et de sortie du convertisseur pour chacune des configurations. En effet, certaines configurations peuvent aboutir à un surdimensionnement du PCA par rapport au cahier des charges. Ainsi, le courant maximal de sortie est multiplié lorsque l'on rencontre des agencements de type [SP] et [PP] et le courant maximal d'entrée est multiplié lorsque l'on rencontre des agencements de type [PS] et [PP]. Les courants max au niveau des CSC sont calculés en fonction des choix technologiques (cf partie précédente), par exemple le type et les performances de refroidissement, ou encore les calibres en tension choisis, qui à série de composants donnée, ont un impact sur les résistances internes des composants.

Le même raisonnement est appliqué pour la tension maximale d'entrée et de sortie du convertisseur.

3.2.6. Configuration de l'étage éleveur et/ou abaisseur

Cette étape va définir si un étage éleveur et/ou abaisseur est nécessaire dans notre configuration et va fixer la tension en entrée et sortie du DAB. De base il est considéré qu'il n'y a aucun de ces étages. Si la tension en entrée de cellule minimal ou maximal est inférieure à la tension minimale requise par une cellule ou bien que la tension minimale définie par le cahier des

charges multiplié par le courant d'entrée minimal de la configuration est inférieur à la puissance du convertisseur défini par le cahier des charges, alors un étage élévateur est ajouté. En fonction de l'agencement cela impactera le courant maximal et minimal en entrée du convertisseur.

Pour qu'un étage abaisseur soit ajouté il faut que la tension maximale et minimale en sortie de DAB soit supérieure respectivement à celle maximale en sortie de configuration et minimale en sortie de configuration. De la même manière que pour l'étage élévateur, le courant maximal et minimal en sortie de la configuration sera impacté.

3.2.7. Filtrage

L'étape de filtrage consiste à ne garder que les configurations respectant le cahier des charges. Une sous-fonction n'affichant qu'une seule fois une configuration si 2 ou plus configurations identiques sont identifiées est tout d'abord appelée. Ensuite la tension d'entrée maximale de la configuration doit être supérieure ou égale à celle du cahier des charges. Il en va de même pour la tension de sortie maximale. Il faut aussi que le courant d'entrée maximal multiplié par la tension d'entrée minimale soit supérieur ou égal à la puissance maximale du cahier des charges. De même pour le courant de sortie maximal et la tension de sortie minimale.

Un rapport maximal entre la tension de l'élévateur et celle de l'entrée du DAB est appliqué ainsi qu'un rapport minimal entre la tension de sortie du DAB et celle de sortie de l'abaisseur (ce rapport pourrait être modifié en fonction des caractéristiques des briques de conversion). La tension d'entrée maximum du DAB doit être inférieure à celle maximale de la CSC et la tension maximale de sortie du DAB doit aussi être inférieure à la tension maximale de sortie de la CSC.

De même, on filtre les configurations utilisant un MOSFET surdimensionné. Ainsi, pour une tension d'entrée et de sortie de DAB maximale de 24V on obtiendra seulement les configurations utilisant un MOSFET de 40V et non celles utilisant un MOSFET de 60V.

Les dimensions en termes de hauteur, largeur et longueur (hxlxl) sont aussi filtrées pour rentrer dans le cahier des charges.

3.2.8. Affichage de la nouvelle configuration sur le Treeview

La dernière étape consiste à ajouter une ligne au Treeview pour y afficher la nouvelle configuration. Ceci est fait grâce à la fonction `.insert` dans le Treeview des résultats.

4. CAS D'ETUDE

4.1. Convertisseur pour véhicule électrique

Dans le cadre du projet européen « *European Ecosystem for GreeN Electronic* » (EECONE), un partenariat entre l'entreprise Schaeffler et Grenoble-INP est en cours dans le but de dimensionner et réaliser l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) comparative d'un convertisseur DC-DC modulaire avec un convertisseur de référence pour une application automobile en fonction des opportunités de circularité. La topologie PCA a été choisie et la méthodologie décrite plus tôt a été testée. Les caractéristiques du convertisseur de référence sont données dans le tableau 3. Les dimensions n'ayant pas disponibles, nous avons supposé qu'elles étaient maximales de 400 x 400 x 100 mm et la masse de 4kg.

Tableau 3. Caractéristiques du convertisseur DC-DC du cas d'étude Schaeffler

Paramètre	Valeur
-----------	--------

Tension d'entrée DC	360-850 V
Tension de sortie DC	9-16 V
Puissance de sortie max	3.6k W
Technique de refroidissement	Liquide

La CSC 100W a été retenue pour cette application car c'est la plus aboutie notamment en termes de performances et de CEM. Elle comprend les caractéristiques présentées dans le tableau 1. La limite de l'exercice consiste au fait que ces CSC sont refroidies à l'air et non à l'eau. Les CSC refroidies à l'eau n'existant pas encore, le choix s'est reporté par défaut sur le type de CSC présenté plus haut.

A l'aide de l'algorithme, en recherchant les différentes solutions de configurations pour ce cas d'étude, on trouve que 1024 configurations correspondent au cahier des charges. Toutes les configurations ont au moins un lien série/parallèle car cela permet d'abaisser la tension de sortie.

La configuration présentée dans le tableau 4 a été choisie pour des raisons de compacité, d'utilisation d'un minimum de CSC et avec une tolérance à la panne de 6 (6 CSC pourraient être écartées du PCA tout en maintenant les caractéristiques nominales de conversion).

Tableau 4. Configuration de PCA choisie dans le cas DC-DC

Paramètre	Valeur
Nombre de CSCs	42
Agencement : nombre de lignes, colonnes, étages ; parallèle ou série	2 SP, 7 SP, 3 SP
Dimensions (L x l x h)	228 x 196 x 42 mm
Volume	1.88 l
Masse	1449 g
Tension d'entrée mini par CSC	8.6 V
Tension d'entrée maxi par CSC	20.2 V
Etage élévateur/abaisseur	Avec / Avec
Rapport de transformation	1

Après ce travail de dimensionnement, la BOM du PCA a été réalisée à la main (intégration dans le code est en cours). Pour la plupart des composants, une fiche technique a été trouvée. L'objectif est maintenant, grâce à la BOM, de faire une Analyse du Cycle de Vie (ACV) comparative entre le convertisseur de référence et le PCA sélectionné en jouant sur des scénarii pour chaque option de circularité envisageable et voir le bilan environnemental de l'approche PCA sur tout le cycle de vie du produit global dans lequel le convertisseur de référence est mis en œuvre (hors du cadre de cet article).

4.2. Bloc d'alimentation de data center

Un deuxième cas d'étude est réalisé en partenariat avec l'entreprise RISE, toujours dans le cadre du projet Européen EECONE sur un convertisseur permettant l'alimentation d'un serveur de data center. Il s'agit d'un convertisseur AC-DC fortement abaisseur.

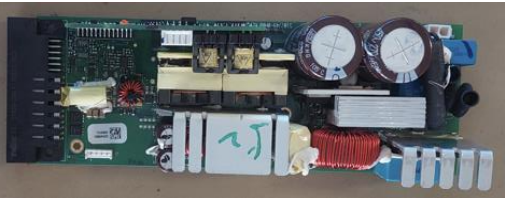


Figure 5. Photo d'une alimentation de serveur de calcul

Aujourd'hui pour un serveur de data center, il y a une redondance dans les alimentations. Cela signifie que l'on a deux blocs d'alimentation identiques pour un serveur. Cela se fait pour des aspects de continuité de service. Grâce à la topologie PCA et à la perspective de continuité de service offerte par l'architecture modulaire, on peut créer la redondance à un plus petit niveau que celui du bloc d'alimentation : au niveau des CSC. Cela permettrait d'avoir un bloc d'alimentation comprenant plus de cellules que nécessaire mais d'avoir tout de même une réduction globale en termes de hardware. Ces aspects tolérance à la panne et choix de surdimensionnement ne sont pas traités avec plus de détail dans cet article. Les caractéristiques du convertisseur de référence sont données dans le tableau 5.

Tableau 5. Caractéristiques du convertisseur AC/DC du cas d'étude RISE

Paramètre	Valeur
Tension d'entrée	230 V AC
Tension de sortie	12 V DC
Puissance de sortie	750W
Dimensions (L x l x h)	150 x 140 x 86 mm
Technique de refroidissement	Air forcé
Masse maximale	2kg

Pour cette application nous avons besoin d'une conversion AC-DC. Pour cela nous cascadeons deux étages de conversion dans la CSC, couplée à un stockage capacitif (voir figure 3). Les dimensions et le poids de la CSC AC-DC et de sa capacité sont donnés par le tableau 6.

Tableau 6. Dimensions et poids de l'étage de conversion AC-DC + stockage capacitif à l'échelle d'une CSC du cas d'étude G2Elab

Paramètre	Valeur
Dimensions : L x l x h	54 x 28 x 25 mm
Masse	11g

Lors du dimensionnement avec l'algorithme, 38 configurations possibles ont été trouvées, les dimensions du convertisseur restreignant énormément le nombre de possibilités. Notre choix se porte sur une configuration comportant 10 CSC. Il s'agit de la configuration présentée dans le tableau 7. La raison principale ayant motivé ce choix est le nombre restreint de CSC et l'acceptation d'une défaillance. En effet, un cas avec 9 cellules est aussi envisageable.

Tableau 7. Configuration de PCA choisie dans le cas AC-DC

Paramètre	Valeur
Nombre de CSCs	10
Agencement : nombre de lignes, colonnes, étages ; parallèle ou série	1 0, 2 SP, 5 SP
Dimensions (L x l x h)	114 x 56 x 70mm
Volume	0.45 l
Masse	298g
Tension d'entrée mini par CSC	9V
Tension d'entrée maxi par CSC	34.5V
Etage élévateur/abaisseur	Avec / Sans
Rapport de transformation	0,25

La base de données servant à établir la BOM dans ce cas est en cours de création. Elle est terminée pour un convertisseur DC-DC mais reste à être finalisée dans le cas d'un convertisseur AC-DC. La BOM d'un convertisseur classique est aussi en cours de

création. Une ACV comparative entre une conception modulaire et une conception classique va être menée dans la suite du partenariat.

5. CONCLUSIONS

Cet article présente une méthodologie de dimensionnement modulaire basée sur un algorithme d'optimisation appliqué à la topologie « *Power converter array* » (PCA). Il s'inscrit dans une démarche de modularité des systèmes électronique pour la circularité. L'intérêt de la modularité en EP se retrouve moins présente aujourd'hui dans les performances techniques potentielles (rendement, densité de puissance) que dans les leviers qu'elle offre pour la circularité et le maintien de la valeur résiduelle des systèmes/composants. Il est par conséquent crucial d'étudier les topologies de systèmes du point de vue technique et environnemental afin d'en dégager des perspectives industrielles pour la soutenabilité.

L'algorithme ainsi que les degrés de liberté de la technologie PCA prise en compte ont été étudiés plus en profondeur. De même, deux cas d'études ont été analysés. Il s'agit d'un convertisseur DC-DC et d'un convertisseur AC-DC, le premier étant utilisé dans un véhicule électrique et le second pour alimenter un data center. A travers ces cas d'étude, l'utilisation de l'outil couplé avec une analyse critique des configurations obtenues a permis de trouver rapidement des configurations possibles et de choisir la plus optimisée.

Outre le fait de pouvoir générer rapidement des BOM de différentes configurations de PCA, l'algorithme a comme ambition d'aider à la prise de décision des concepteurs en électronique de puissance en produisant des ACV à partir de ces BOM. Les ACV vont pouvoir outiller les concepteurs à qui revient le choix final de la conception. L'outil est disponible sur le lien suivant dans le fichier « Code » : <https://gitlab.com/ep4661939/dimensionnement-modulaire>. Il sera l'objet d'améliorations.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le projet EECONE, qui a reçu un financement du Chips Joint Undertaking dans le cadre de la convention de subvention 101112065 et de BPI France.

7. REFERENCES

- [1] Think Smartgrids « Manifeste sur l'électronique de puissance », 2024
- [2] C. P. Baldé et al., « THE GLOBAL E WASTE MONITOR 2024 », 2024.
- [3] N. Gp, « Review on E-Waste Management and Recycling », *OAJWX*, vol. 1, n° 2, 2018, doi: [10.23880/oajwx-16000109](https://doi.org/10.23880/oajwx-16000109).
- [4] R. Horta Arduin et al., « Novel indicators to better monitor the collection and recovery of (critical) raw materials in WEEE: Focus on screens », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 157, p. 104772, juin 2020, doi: [10.1016/j.resconrec.2020.104772](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104772).
- [5] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, et A. Hanemaaijer, « Circular Economy: Measuring innovation in the product chain » 2017
- [6] B. Baudais, H. B. Ahmed, G. Jodin, et N. Degrenne, « Environmental Impact of Modular Power Electronics Systems Considering Diagnostic-Driven Unit Replacement. », 2024.
- [7] T. T. Romano, T. Alix, Y. Lembeye, N. Perry, et J.-C. Crebier, « Towards circular power electronics in the perspective of modularity », *Procedia CIRP*, vol. 116, p. 588-593, 2023, doi: [10.1016/j.procir.2023.02.099](https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.099).
- [8] Boubakr Rahmani. Economie circulaire en électronique de puissance : opportunité de la conception Multi-cellulaire. Energie électrique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALT106. tel-04051634
- [9] Glauber de Freitas Lima. Prediction and Optimization of Electromagnetic Behavior of Multi-cell Converters. Electric power. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. English. NNT : 2023GRALT032. tel-04194908