

# Dimensionnement des éléments passifs d'un convertisseur cascadié en vue de l'intégration d'organes de stockage au réseau

Alexis MAHE<sup>1,2</sup>, Jean Christophe OLIVIER<sup>1</sup>, Azeddine HOUARI<sup>1</sup>, Mohamed MACHMOUM<sup>1</sup>, Jérôme DENIAUD<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantiques - IREENA Saint-Nazaire, France

<sup>2</sup>SGTE Power - Le Mans, France

[alexis.mahe@univ-nantes.fr](mailto:alexis.mahe@univ-nantes.fr)

**RESUME** – Nous présentons dans ce papier une méthode de dimensionnement des éléments passifs d'un convertisseur multi-niveaux de topologie ponts complets cascadiés. Ce convertisseur est assemblé en étoile et intègre des batteries de stockage chimique. La topologie présente une bonne tolérance aux défauts et permet une montée en tension plus facile. Les éléments passifs du convertisseur, tels que les inductances de ligne et les condensateurs de bus DC sont quantifiés de manière générique en fonction du nombre d'éléments de bus DC.

Ces modèles de dimensionnement, couplés à une fonction objectif, permettent de mettre en place un algorithme de dimensionnement optimal du convertisseur multi-niveau, permettant de choisir le nombre de niveaux en optimisant un rapport coût/volume/performance moins restrictive comparée à une approche classique.

**Mots-clés** – Convertisseurs multi-niveau, stockage stationnaire, modularité, convertisseur relié au réseau, smart grid

## 1. INTRODUCTION

Les sources d'énergie électrique renouvelable vouées à se développer à moyen terme sont le photovoltaïque et l'éolien. Or, il se trouve que ces modes de production sont par nature décentralisés, puisque leur implantation est intimement liée à la disponibilité de la ressource. S'ajoute à cela la nature intermittente de la ressource qui rend difficile toute prédiction de la production à moyen terme. Le déploiement de nouvelles infrastructures de réseaux électriques doit donc intégrer en amont cette nature intermittente des énergies renouvelables, par une gestion intelligente de l'énergie et par l'intégration de nouveaux systèmes de stockages. Ainsi, l'énergie électrique produite pourra être stockée en période de faible consommation ou de surproduction, et pourra être réinjectée sur le réseau à la demande.

La structure modulaire associée à des solutions de stockage a déjà été évoquée au travers du concept de *flying-batteries*, pour le prototypage rapide de pilotage de moteurs [1]. Plus récemment, cette structure a été évoquée comme une solution de stockage reliée au réseau [2], la problématique d'interconnexion modules-batteries a été en partie traitée par [3], pour des applications de PET (*Power Electronics Transformer*), ou de charge rapide de véhicule électrique.

L'étude en cours contribue à la mise en œuvre d'une solution générique et extensible de convertisseur multi-niveaux, permettant l'interconnexion directe à des réseaux moyenne tension, tout en offrant un contrôle du flux d'énergie de chaque batterie. La montée en tension du convertisseur et l'interconnexion directe au réseau permet de supprimer le transformateur abaisseur, coûteux et volumineux. De plus, cette structure propose plusieurs méthodes de tolérances aux défauts d'interrupteurs[4]. Les applications visées sont le lissage de puissance (écrêtage, déplacement de pics de consommation) et l'alimentation sans interruption (*UPS*).

Ce travail propose une méthodologie de dimensionnement des éléments passifs du convertisseur (inductances de connexion au réseau et les condensateurs de bus), en fonction du nombre de niveaux de celui-ci, mais aussi de la technique de modulation retenue, en particulier les modulations types porteuses déphasées, en opposition à la modulation en porteuses décalées traitée ici [5].

Ces éléments passifs font partie des variables d'optimisation coût/volume/performance du convertisseur : dans le cas de l'inductance de filtrage par exemple, le modèle présenté permet de fixer non seulement la valeur de self, mais aussi les dimensions et volumes des différents matériaux (et donc le coût, mais aussi le rendement *via* l'estimation des pertes cuivres et des pertes fer par l'équation de Steinmetz).

## 2. DESCRIPTION DU SYSTÈME

La topologie retenue dans cette étude est le convertisseur cascadié à ponts complets, assemblé en étoile. chaque module est interfacé avec une batterie par l'intermédiaire d'un bras de pont fonctionnant en Buck-Boost réversible.

La figure 1 montre l'assemblage en cascade de modules bipolaires, assemblé en simple étoile et relié au réseau (5.5kV, 50Hz) par l'intermédiaire d'inductances série.

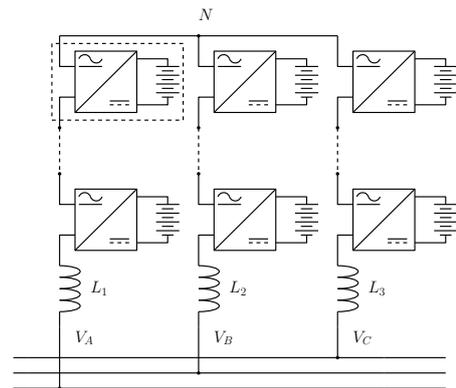


Fig. 1. Topologie convertisseur cascadié en étoile étudiée

Les particularités spécifiques à cette topologie sont :

- Un courant continu et uniforme par branche.
- L'absence de bus DC commun : les capacités sont distribuées dans chacun des modules.
- Un comportement prévisible en cas de défaillance.
- Une extensibilité facile à un nombre de niveaux supérieurs.

La figure 2 présente un synoptique du sous-module envisagé ; cette structure peut être réalisée à l'aide d'un onduleur triphasé à IGBT, existant en monolithique de manière standard dans l'industrie.

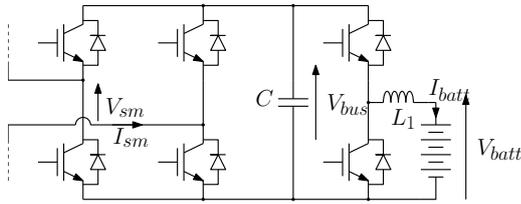


Fig. 2. Synoptique du module envisagé

Pour définir la valeur  $m$  correspondant au nombre de modules, une première approche se base sur la tension de ligne du réseau auquel est connecté le convertisseur. L'équation (1) permet d'obtenir la valeur minimale du bus DC à laquelle il conviendra d'ajouter une marge afin d'assurer la commandabilité de l'ensemble [6].

$$V_{bus_{total}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{LLeff} \quad (1)$$

L'équation (2) décrit un concept de base des convertisseurs multiniveaux : la contrainte en tension est divisée en  $N-1$  bus de valeur égale. Dans le cas de sous modules bipolaires comme ici, le nombre de modules est obtenu par (3), en arrondissant  $m$  à l'entier supérieur.

$$V_{niveau} = \frac{V_{bus_{total}}}{N-1} \quad (2)$$

$$m = 3 \frac{1}{2} * (N-1) \quad (3)$$

### 3. DIMENSIONNEMENT DES ÉLÉMENTS PASSIFS

A partir de l'équation (4), appliquée au cas le plus défavorable ( $\alpha = 0.5$ ), et réadaptée pour les formes d'ondes de convertisseur multi-niveau la valeur de l'inductance de filtrage peut être calculée via l'équation (5) : [7]

$$\Delta I = \frac{V_{bus}}{L \cdot f_{sw}} \cdot \alpha(1-\alpha) \quad (4)$$

$$L = \frac{V_{niveau}}{\Delta I \cdot f_{app}} \cdot \frac{1}{4} \quad (5)$$

Avec :

- $V_{niveau}$  La différence de potentiel entre 2 niveaux de tension ;
- $\Delta I$  l'ondulation de courant (crête-crête, en Ampère) ;
- $f_{app}$  la fréquence de commutation apparente côté alternatif.

Si l'on considère la modulation à porteuses entrelacée, qui permet d'augmenter la fréquence apparente [5], la fréquence de commutation vue par le filtre de sortie est donnée par (6) :

$$f_{app} = 2m * f_{dec} \quad (6)$$

En se basant sur la méthode de dimensionnement utilisée dans [7] [8], les dimensions mécaniques de l'inductance sont déterminées à partir d'une longueur caractéristique unique  $a$  (figure 3) par la relation (7) :

$$a = \left( \frac{2}{3} \frac{L I_{rated}^2}{B_{max} J_{max} k_w} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

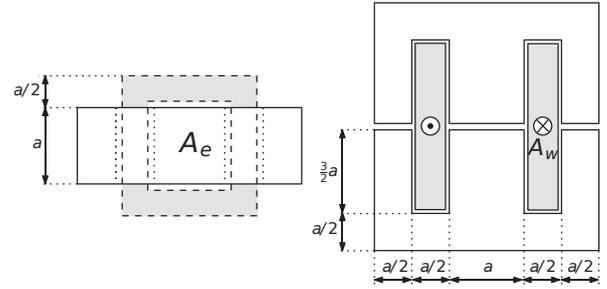


Fig. 3. Géométrie de l'inductance de lissage considérée, basée sur la longueur caractéristique  $a$  [7]

à partir de (1), (3), (5), et (7) on déduit (8) :

$$a = \left( \frac{1}{8} \frac{I_{rated}^2 V_{bus_{total}}}{B_{max} J_{max} k_w \Delta I f_{sw}} \right)^{\frac{1}{4}} m^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Cette équation permet de mettre en évidence l'influence du nombre de modules sur le dimensionnement de l'inductance de sortie. La dimension de  $a$  est le mètre linéaire, le volume total de l'inductance est proportionnel à  $a^3$  :  $V_L \propto m^{-\frac{3}{2}}$

### 4. CONCLUSION

Cette étude doit permettre de dimensionner les éléments passifs d'un convertisseur cascadié intégrant des systèmes de stockage, de manière généralisée aux nombres de niveaux. Dans la version finale de l'article seront dimensionnées les condensateurs de bus, en fonction là encore du nombre de modules interconnectés mais aussi en fonction de la technique de modulation retenue (en particulier les modulations types porteuses déphasées, en opposition à la modulation en porteuses décalées traitée ici), qui a une forte influence sur le dimensionnement.

### 5. RÉFÉRENCES

- [1] H. Ertl, J. W. Kolar, and F. C. Zach, "Analysis of a multilevel multi-cell switch-mode power amplifier employing the "flying-battery" concept," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 816-823, 2002.
- [2] L. Maharjan, *Study of a battery energy storage system based on a multi-level cascade PWM converter with star configuration*. PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, 2010.
- [3] M. Vasiladiotis, *Modular multilevel converters with integrated batteries energy storage*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2014.
- [4] P. Lezana, J. Pou, T. a. Meynard, J. Rodriguez, S. Ceballos, and F. Richardeau, "Survey on fault operation on multilevel inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2207-2218, 2010.
- [5] T. a. Meynard, M. Nahrstaedt, and R. Jakob, "Evolution des structures de conversion," *3E.I.*, 2004.
- [6] F. Labrique, G. Séguier, and R. Bausière, *Les convertisseurs de l'électronique de puissance : la conversion continu-alternatif. Volume 4. Les convertisseurs de l'électronique de puissance*, Tec et doc, 1995.
- [7] S. Trieste, S. Hmam, J.-C. Olivier, S. Bourguet, and L. Loron, "Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain : Application on the first quick charge plug-in ferry," *Applied Energy*, vol. 153, pp. 3-14, 2015.
- [8] N. M. Tore M. Undeland, Jon Lode, Robert Nilssen, William P. Robbins, "A Single-Pass Design Method For High-Frequency Inductors," *IEEE Industry Applications Magazine*, no. October, 1996.