



**HAL**  
open science

## Etude expérimentale d'un convertisseur modulaire multiniveau monophasé aux bras couplés

Bogdan Dzonlaga, Davi Rabelo, Loïc Quéval, Damien Huchet, Amir Arzandé,  
Jean-Claude Vannier

### ► To cite this version:

Bogdan Dzonlaga, Davi Rabelo, Loïc Quéval, Damien Huchet, Amir Arzandé, et al.. Etude expérimentale d'un convertisseur modulaire multiniveau monophasé aux bras couplés. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Jul 2018, Nancy, France. hal-01949440

**HAL Id: hal-01949440**

**<https://hal.science/hal-01949440>**

Submitted on 10 Dec 2018

**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.



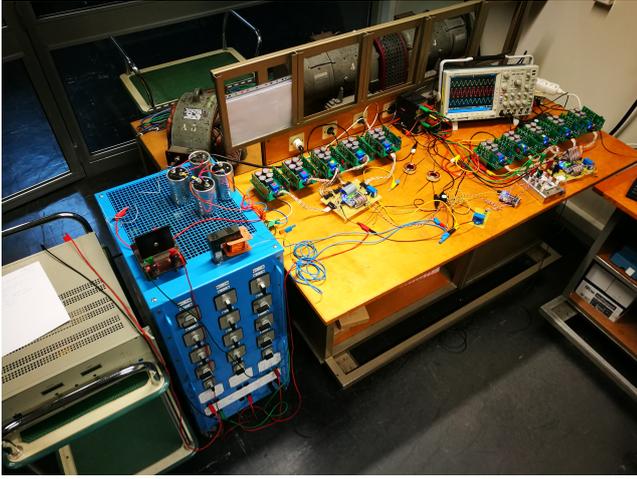


Fig. 2. Photographie du prototype MMC monophasé aux bras couplés.



Fig. 3. Photographie d'un module du prototype MMC.

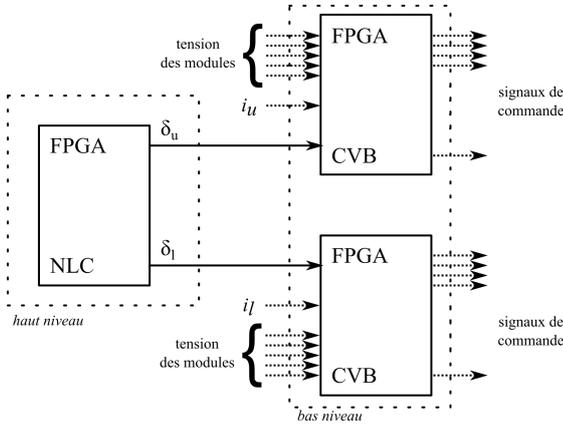


Fig. 4. Commande hiérarchique du prototype par FPGA.

Si les tensions des condensateurs du bus continu sont équilibrées,

$$\frac{V_{dc}}{2} = v_u + Ri_u + L \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_l}{dt} + v_s \quad (1)$$

$$\frac{V_{dc}}{2} = v_l + Ri_l + L \frac{di_l}{dt} + M \frac{di_u}{dt} - v_s \quad (2)$$

où  $v_u$  et  $v_l$  sont les tensions des bras,  $i_u$  et  $i_l$  sont les courants des bras et  $V_{dc}$  est la tension du côté DC.  $R$  et  $L$  sont la résistance et l'inductance propre des bobines de bras, tandis que  $M$  est la

mutuelle entre ces bobines. Le courant du côté AC  $i_s$  vaut,

$$i_s = i_u - i_l \quad (3)$$

## 2.2. Courant de circulation

Définissons le courant différentiel  $i_{diff}$ ,

$$i_{diff} = \frac{i_u + i_l}{2} \quad (4)$$

ou encore,

$$i_u = \frac{i_s}{2} + i_{diff} \quad (5)$$

$$i_l = -\frac{i_s}{2} + i_{diff} \quad (6)$$

Le courant  $i_{diff}$  est un courant de deuxième harmonique [2]. Il est constitué d'une composante DC  $i_{dc}$  et d'une composante AC appelée courant de circulation  $i_c$ ,

$$i_{diff} = i_{dc} + i_c \quad (7)$$

Ce nom provient du fait que ce courant "circule" dans les bras et le bus de condensateurs  $C_b$ , sans apparaître du côté DC ni du côté AC.

## 2.3. Bobines couplées

Les bobines de bras sont couplées comme indiqué sur la Fig. 1. Le couplage est caractérisé par le coefficient de couplage  $k_c$  [16],

$$k_c = \frac{M}{\sqrt{LL}} \quad (8)$$

où  $L$  est l'inductance d'un bras et  $M$  est la mutuelle entre deux bobines d'une phase. Théoriquement,  $-1 < k_c < 1$ . Dans un MMC conventionnel, les bobines de bras ne sont pas couplées et ce coefficient est donc égal à zéro.

## 3. PROTOTYPE

### 3.1. Description

Un prototype monophasé 6-niveau a été conçu et construit au laboratoire GeePs. Sur la Fig. 2 correspondant au schéma électrique de la Fig. 1, on peut identifier les deux bras de convertisseur connectés en série avec les bobines de bras. Le côté DC du convertisseur est alimenté par une source de tension continu en série avec une diode et une résistance. Le côté AC du MMC est connecté à une charge résistive.

Le prototype a 5 modules par bras. Chaque module est composé d'un module IGBT à pont complet et de 4 condensateurs (Fig. 3). Les quatre IGBTs sont commandés par deux drivers (un driver pour chaque demi-pont). La tension des condensateurs est mesurée par un capteur de tension. Chaque module contient également des circuits de protection (surcharge, court-circuit et température) et de visualisation d'état du module. Les paramètres du prototype sont regroupés dans le Tableau 1. Dans cette étude, les modules sont contrôlés en configuration demi-pont uniquement.

### 3.2. Contrôle du MMC

Le prototype est contrôlé de manière hiérarchique par trois FPGAs comme illustré sur la Fig. 4. Chaque FPGA "bas niveau" contrôle un bras tandis que le FPGA "haut niveau" contrôle la phase. L'objectif est de diviser la puissance de calcul sur chaque bras, et d'avoir accès à un grand nombre d'entrées/sorties à moindre coût en vue de pouvoir augmenter le nombre de modules par la suite.

Le contrôle "bas niveau" est implémenté en VHDL sur FPGA. Les entrées sont la tension de chaque module du bras, le courant

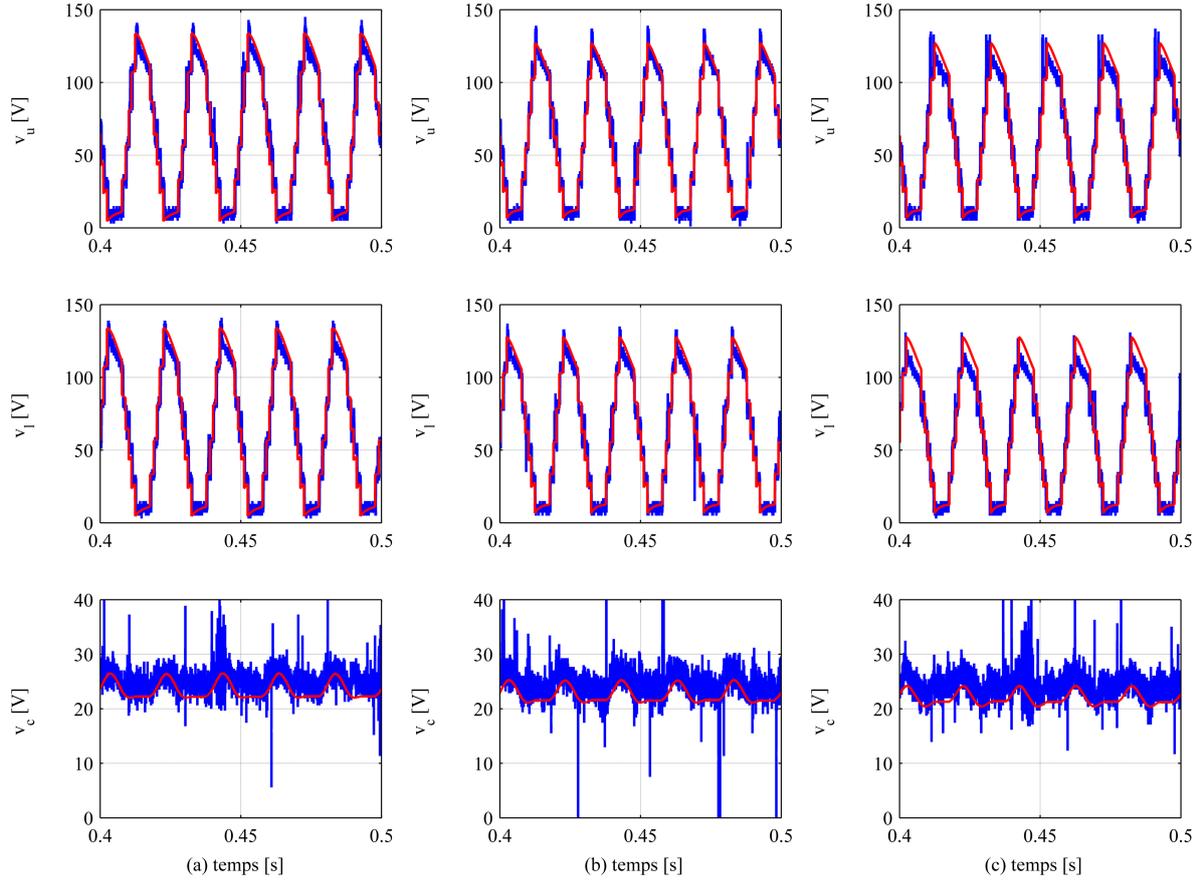


Fig. 5. Tension des modules en haut et en bas et la tension d'un condensateur d'un module pour (a)  $k_c = -0,4$ , (b)  $k_c = 0$  et (c)  $k_c = 0,4$

du bras ainsi que le nombre de modules qui doivent être insérés dans le bras. Cette dernière information provient du contrôle "haut niveau". Le rôle du contrôleur est de déterminer quel module sera inséré dans le bras afin d'équilibrer les tensions des modules. L'algorithme correspondant est appelé "Capacitor Voltage Balancing" (CVB) [2]. Les sorties du contrôle sont les commandes des drivers du bras.

Le contrôle "haut niveau" est également implémenté en VHDL sur FPGA. Dans cet article, le convertisseur est contrôlé en boucle ouverte : la tension de la charge ne dépend que de courant qui passe dans celle-ci. Le signal d'entrée est donc simplement une sinusoïde d'amplitude  $\frac{N}{2}$  ( $N=5$ ). Un algorithme de "Nearest Level Control" (NLC) [2] permet de transformer ce signal sinusoïdal en un signal en forme de marche d'escaliers, représentant le nombre de modules à insérer dans chaque bras. Les sorties du contrôle sont les signaux  $\delta_u$  et  $\delta_l$ . Ces signaux varient entre 0 et 5, de manière complémentaire ( $\delta_l = 5 - \delta_u$ ).

Soulignons qu'ici aucun algorithme de type "Circulating Current Suppression Controller" n'est utilisé. Cela permet d'étudier l'influence des bobines couplées sur le courant de circulation.

#### 4. RÉSULTATS

Dans cette section, les résultats expérimentaux en régime permanent sont présentés. On compare également les mesures (en bleu) aux résultats obtenus par simulation à l'aide d'un modèle détaillé implémenté sous Matlab/Simulink SimPowerSystems (en rouge). Les paramètres du MMC sont résumés dans le Tableau 1.

La Fig. 5 montre les tensions des bras du haut  $v_u$  et du bas  $v_l$ , ainsi que la tension d'un module  $v_c$  pour différent couplage  $k_c$ . La Fig. 6 montre le courant du côté AC  $i_s$ , le courant du côté DC  $i_{dc}$ , les courants des bras du haut  $i_u$  et du bas  $i_l$ , ainsi

Tableau 1. Paramètres du MMC

Paramètre	Symbole	Valeur
Tension dc	$V_{dc}$	150 V
Capacité du bus dc	$C_b$	4400 $\mu\text{F}$
Nombre des modules par bras	$N$	5
Fréquence de commutation	$f_{sw}$	100 kHz
Tension moyenne des condensateurs	$V_c$	30 V
Résistance de l'inducteur des bras	$R$	0,1 $\Omega$
Résistance de la charge	$R_o$	6 $\Omega$
Capacité des modules	$C$	2240 $\mu\text{F}$
Inductance des inducteurs des bras	$L$	30 mH
Coefficient de couplage	$k_c$	-0,4; 0; 0,4

que le courant de circulation  $i_c$  pour différents couplages  $k_c$ . La colonne (a) montre les résultats pour un couplage négative avec  $k_c = -0,4$ , la colonne (b) montre les résultats sans couplage ie.  $k_c = 0$ , et finalement la colonne (c) montre le résultat pour un couplage positive avec  $k_c = 0,4$ .

Les tensions  $v_u$  et  $v_l$  ont six niveaux, une amplitude légèrement inférieure à  $V_{dc}$  et une fréquence égale 50 Hz. Cela montre que les algorithmes de NLC et de CVB fonctionnent correctement. Le couplage n'a pas d'influence évidente sur ces tensions.

La tension  $v_c$  a une valeur moyenne légèrement inférieure à  $V_{dc}/5$ , une amplitude de quelques volts et une fréquence de 50 Hz. L'amplitude décroît légèrement quand  $k_c$  augment (sur-

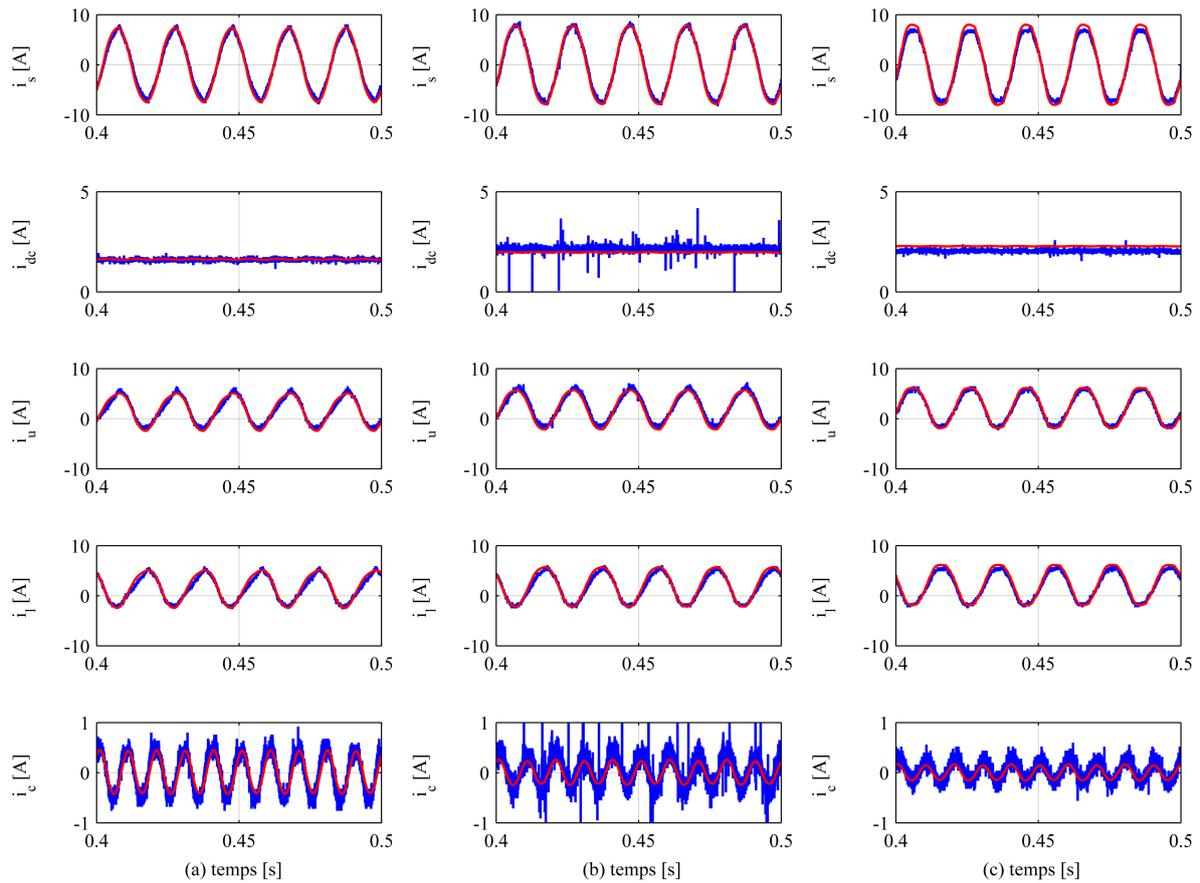


Fig. 6. Courant de la charge, courant coté dc, courants de bras et courant de circulation pour (a)  $k_c = -0,4$ , (b)  $k_c = 0$  et (c)  $k_c = 0,4$

tout visible pour les résultats de simulation). Cela indique que la variation d'énergie stockée dans les condensateurs diminue avec  $k_c$ .

Les courants  $i_s$ ,  $i_u$  et  $i_l$  sont quasi-sinusoidaux et de fréquence 50 Hz. Rappelons que le convertisseur fonctionne en boucle ouverte,  $i_s$  n'est donc pas contrôlé. Il dépend uniquement de la tension des bras et de la valeur de la charge. L'allure sinusoidale montre que les bobines de bras jouent correctement leur rôle de lissage. Le couplage n'a pas d'influence évidente sur ce courant.

Le courant  $i_{dc}$  a une valeur moyenne qui augmente lorsque  $k_c$  augmente. La tension du côté DC est fixée par la source, cela indique que la puissance DC augmente lorsque  $k_c$  augmente. Cela est dû au fait que la puissance du convertisseur n'est pas contrôlée. Elle dépend donc uniquement de l'impédance équivalente du convertisseur. Cette impédance change avec le couplage : elle diminue avec  $k_c$ , vu de point de vue du courant DC.

Le courant de circulation  $i_c$  a une valeur moyenne nulle et une fréquence de 100 Hz. Son amplitude décroît lorsque  $k_c$  augmente. En particulier, l'amplitude vaut 0,5 A pour un couplage négatif, 0,3 A en l'absence de couplage, et 0,1 A pour un couplage positif. Cette observation est en accord avec la tendance prévue par [15] pour le cas triphasé, confirmant ainsi les travaux théoriques.

## 5. CONCLUSION

Cet article contribue à valider expérimentalement les travaux théoriques menés sur les convertisseurs modulaire multiniveau aux bras couplés. Le prototype monophasé 6-niveau du laboratoire GeePs construit pour cette étude est décrit en détail. Les résultats expérimentaux pour 3 couplages différents (négatif, nul et positif) sont comparés avec les résultats de simulation. L'effet du couplage sur différentes grandeurs et en particulier sur le

courant de circulation est examiné en détail. Un couplage positive permet de réduire l'amplitude du courant de circulation sans modifier le contrôle ni affecter le fonctionnement du convertisseur. Ces résultats obtenus en boucle ouverte seront confirmés par la suite en boucle fermée.

## 6. RÉFÉRENCES

- [1] A. Lesnicar, R. Marquardt, "An innovative modular multi-level converter topology for a wide power range," *IEEE Power Tech Conference*, Bologna, Italy, June 2003.
- [2] D. Jovčić, K. Ahmed, *High voltage direct current transmission : converters, systems and DC grids*, Wiley, 2015.
- [3] D. Van Hertem, O. G.-Bellmunt, J. Liang, *HVDC Grids : For Offshore and Supergrid of the Future*, Wiley, 2016.
- [4] N. Stanković, M. J. Carrizosa, A. Arzandé, P. Egrot, J. C. Vannier, "An HVDC experimental platform with MMC and two-level VSC in the back-to-back configuration," *IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 436-441, Santa Clara, CA, USA, 2016.
- [5] H. Saad, K. Jacobs, W. Lin, D. Jovcic, "Modelling of MMC including half-bridge and Full-bridge submodules for EMT study," *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, pp. 1-7, Genoa, 2016.
- [6] G. P. Adam, B. W. Williams, "Half- and Full-Bridge Modular Multilevel Converter Models for Simulations of Full-Scale HVDC Links and Multiterminal DC Grids," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 1089-1108, Dec. 2014.
- [7] P. Ladoux, N. Serbia, P. Marino, L. Rubino, "Comparative study of variant topologies for MMC," *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Ischia, Italy, 2014, pp. 659-664.
- [8] X. Li, W. Liu, Q. Song, H. Rao, S. Xu, "An enhanced MMC topology with DC fault ride-through capability," *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, Dallas, TX, USA, 2013, pp. 6182-6188.

- [9] P. S. Prasanna, M. Sreedhar, L. S. Kumar, "A review on circulating current suppression control, capacitor voltage balancing and fault analysis of modular multilevel converters," *Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, Visakhapatnam, India, 2015.
- [10] Q. Tu, Z. Xu, J. Zhang, "Circulating current suppressing controller in modular multilevel converter," *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, USA, pp. 3198-3202.
- [11] Q. Tu, Z. Xu, H. Huang, J. Zhang, "Parameter design principle of the arm inductor in modular multilevel converter based HVDC," *International Conference on Power System Technology*, Hangzhou, Zhejiang Province, China, 2010.
- [12] X. Shi, Z. Wang, L. M. Tolbert, F. Wang, "Modular multilevel converters with integrated arm inductors for high quality current waveforms," *IEEE ECCE Asia Downunder*, pp. 636-642, Melbourne, Australia, 2013.
- [13] J. Kucka, D. Karwatzki, L. Baruschka, A. Mertens, "Modular multilevel converter with magnetically coupled branch inductors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 6767-6777, 2017.
- [14] Y. Yuan, B. Zhu, "A control strategy based on of modular multi-level converters with coupled inductances," *International Conference on Power System Technology*, Chengdu, China, 2014, pp. 2056-2062.
- [15] B. Džonlaga, D. R. Joca, L. Quéval, J. C. Vannier, "Transient analysis of a modular multilevel converter with coupled arm inductors," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, San Antonio, TX, USA, 2018, pp. 1662-1667.
- [16] R. W. Erickson, D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, Springer Science & Business Media, 2007.