



**HAL**  
open science

## Représentation Energétique Macroscopique et diagramme PQ des convertisseurs modulaires multi-niveaux

Shabab Samimi, Francois Gruson, Philippe Delarue, Xavier Guillaud, Frédéric  
Colas

► **To cite this version:**

Shabab Samimi, Francois Gruson, Philippe Delarue, Xavier Guillaud, Frédéric Colas. Représentation Energétique Macroscopique et diagramme PQ des convertisseurs modulaires multi-niveaux. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065316

**HAL Id: hal-01065316**

**<https://hal.science/hal-01065316v1>**

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.

# Représentation Energétique Macroscopique et diagramme PQ des convertisseurs modulaires multi-niveaux

Shabab Samimi<sup>1</sup>, François Gruson<sup>2</sup>, Philippe Delarue<sup>3</sup>, Xavier Guillaud<sup>1</sup>, Frédéric Colas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> L2EP, Ecole Centrale de Lille, 59650 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>2</sup> L2EP, Arts et Métiers ParisTech, 8Bd Louis XIV, 59046 Lille, France

<sup>3</sup> L2EP, Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

**RESUME** – Le Convertisseur Modulaire Multiniveaux (MMC) est une structure d'électronique de puissance utilisée dans les applications de transport de l'électricité à très haute tension et courant continu. Cet article présentera dans un premier temps la Représentation Energétique Macroscopique (REM) du convertisseur. Cela permettra d'abord de proposer une modélisation structurée et aussi d'explicitier les degrés de liberté, ainsi que les choix réalisés pour élaborer le contrôle du convertisseur. Ces degrés de liberté et ces choix n'ont, pour l'instant, pas été clairement identifiés dans la littérature. Dans un second temps, l'article s'intéressera à l'étude des limites de fonctionnement du convertisseur au moyen du diagramme PQ. Le diagramme PQ permettra d'envisager l'introduction du convertisseur MMC au sein d'un réseau et de connaître sa plage de fonctionnement et évaluer sa participation potentielle au service système (régulation de la tension AC). Des simulations seront présentées pour différents points de fonctionnement limites extraits du diagramme PQ.

**MOTS-CLES** – Convertisseurs Multi-niveaux, MMC, convertisseurs modulaire multi-niveaux, HVDC Contrôle de convertisseur, Réseau de Transport, FACTS, Control.

## 1. Introduction

Le Convertisseur Modulaire Multiniveaux (MMC) présenté à la figure 1, est une structure d'électronique de puissance utilisée dans les applications de transport de l'électricité à très haute tension et courant continu (High Voltage Direct Current en anglais : HVDC) ou dans la variation de vitesse de moteurs électriques de moyenne tension [1-4]. Ce convertisseur est composé de trois bras eux-mêmes composés de sous modules élémentaires. Les sous modules sont constitués d'une cellule de commutation et d'un condensateur. Le MMC présente beaucoup d'avantages tels que sa modularité, l'absence de bus DC haute tension mais présente aussi quelques inconvénients comme la complexité de sa modélisation [5] et de son contrôle [6] du au grand nombre de semi-conducteurs à contrôler.

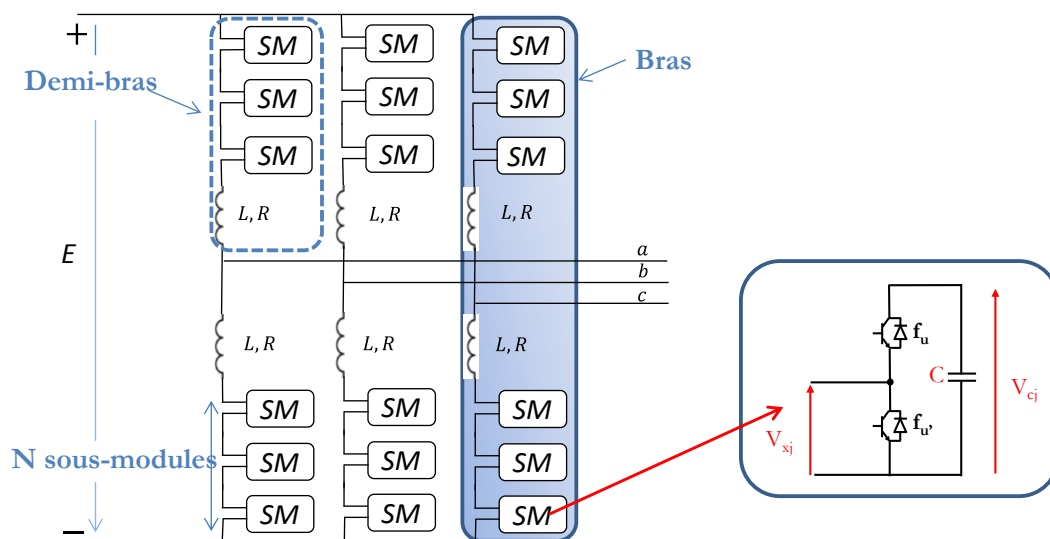


Figure 1 : Schéma électrique du MMC

Il existe plusieurs méthodes de contrôle du MMC dans la littérature. Certaines sont simples mais engendrent des courants pollués dans le réseau AC et de fortes ondulations de tensions dans les capacités [7]. D'autres, comme la méthode CCSC (Circulating Current Suppression Controller), [7-9] sont plus complexes et permettent de réduire ces ondulations. Ces types de contrôle ont été élaborés pour les conditions normales d'utilisation du convertisseur mais il est difficile de prédire la stabilité du système [9] dans des conditions dégradées (réseau alternatif déséquilibré par exemple). Dans ce papier on propose un contrôle basé sur l'inversion du modèle du convertisseur. Pour cela l'outil REM (Représentation Energétique Macroscopique) est utilisé. Cette représentation présente plusieurs avantages comme la mise en évidence des chaînes de d'action et de réaction permettant d'architecturer la commande par une simple inversion du modèle. Elle met aussi en avant les degrés de liberté dans la commande.

Cet article présentera dans un premier temps la REM du convertisseur ce qui permettra d'explicitier les degrés de liberté, ainsi que les choix réalisés pour construire le contrôle du convertisseur. Ces degrés de liberté et ces choix n'ont, pour l'instant, pas été clairement identifiés dans la littérature. Dans un second temps, l'article s'intéressera à l'étude des limites de fonctionnement du convertisseur à l'aide du diagramme PQ ceci en vue de l'introduction du convertisseur MMC dans son contexte réseau et de connaître la plage de fonctionnement pour sa participation potentielle au service système (régulation de la tension AC).

## 2. Modélisation et contrôle du MMC

Au vu du grand nombre de sous module par demi bras et en effectuant l'hypothèse que les tensions de chacun des sous module sont équilibrées, il est possible de simplifier le schéma électrique du MMC comme le montre la figure 2. En Effet, ces hypothèses permettent d'assimiler chacun des demi-bras à une source de tension commandable mis en série avec une inductance [5].

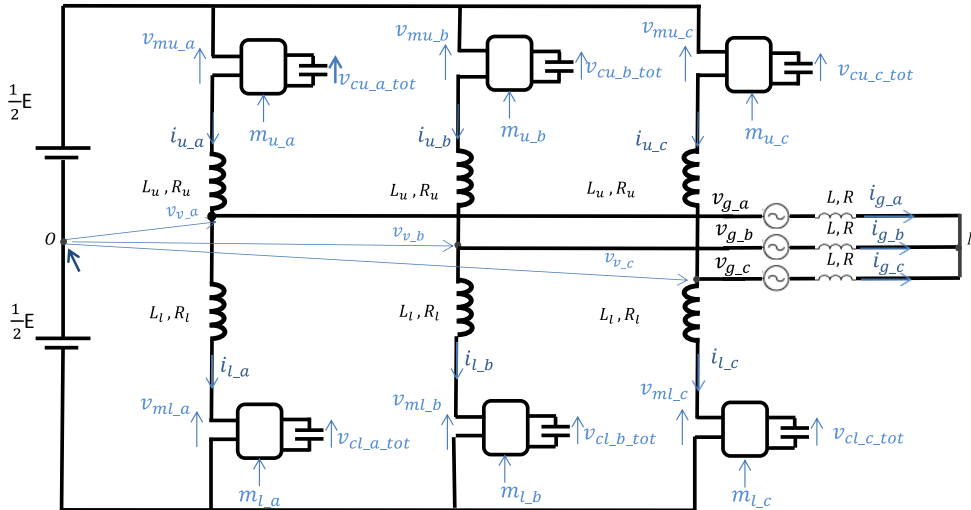


Figure 2 : Schéma simplifié du MMC

De ce schéma électrique simplifié, il est possible de déterminer une mise en équation d'état présentée par les équations (1) et (2) et d'en déduire la Représentation Energétique Macroscopique (REM) du convertisseur MMC présentée dans la partie supérieure de la figure 3.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\vec{i}_g}{dt} \\ \frac{d\vec{i}_{diff}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R' + 2R}{L' + 2L} & 0 \\ 0 & -\frac{R'}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_g \\ \vec{i}_{diff} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{L' + 2L} (\vec{v}_v - \vec{v}_g) \\ \frac{1}{L} (\vec{v}_{diff} - \frac{E}{2}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \vec{i}_{diff} = \frac{\vec{i}_u + \vec{i}_l}{2} \\ \vec{v}_{diff} = \frac{\vec{v}_{mu} + \vec{v}_{ml}}{2} \\ \vec{v}_v = \frac{\vec{v}_{ml} - \vec{v}_{mu}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Les flèches en bleu sur la figure 3 présentent une possibilité pour réaliser les chaînes d'action. Ces flèches passent par toutes les grandeurs d'états du système représentées par les sorties des éléments d'accumulations (rectangles rouge et orange barrés dans la REM).

Par inversion systématique des éléments constituant la REM, il est possible de déterminer la Structure Maximale de Commande (SMC) du convertisseur comme le montre la figure 3. Au vue des chaînes d'actions choisies, le contrôle propose ici de réguler les tensions des condensateurs équivalents via la régulation des courants différentiels  $i_{diff}$ . Ainsi

la puissance du réseau AC est directement régulée. Cette solution est classique dans le contrôle commande du MMC. La REM du convertisseur MMC montre qu'il est possible de réaliser une commande duale permettant de réguler directement la puissance du réseau DC et de réguler les tensions des condensateurs équivalents via les courants alternatifs.

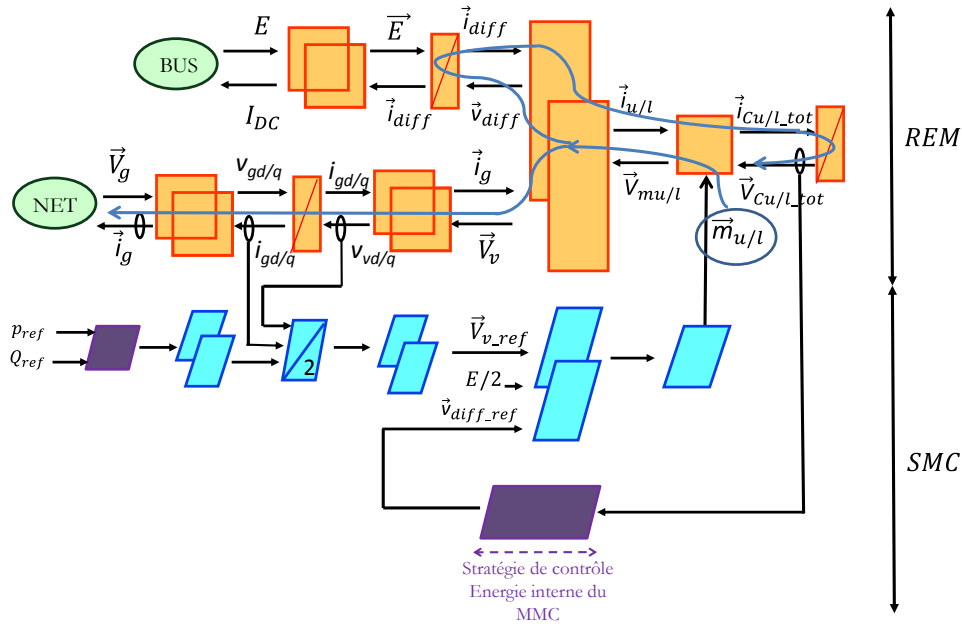


Figure 3 : Représentation Énergétique Macroscopique (REM) et Structure Maximale de Commande (SMC) di MMC.

### 3. Diagramme PQ du MMC

Ce convertisseur a comme finalité d'être l'interface entre un réseau HVDC et un autre HVAC. Il est intéressant de se pencher sur l'étude des limites de fonctionnement du convertisseur grâce à son diagramme PQ et ainsi de connaître la plage de fonctionnement du convertisseur pour son aide potentielle au service système (régulation de la tension AC). A partir du schéma électrique simplifié de la figure 2, il est possible de déterminer le diagramme PQ du MMC via l'équation d'un cercle présentée équation (3) et (4) sous la condition d'un système équilibré.

$$\left( P + \frac{3Vg^2 * R_X^2}{R_X^2 + (\omega L_X)^2} \right)^2 + \left( Q + \frac{3Vg^2 * (\omega L_X)^2}{R_X^2 + (\omega L_X)^2} \right) = S^2 = \frac{9V_m^2 Vg^2}{R_X^2 + (\omega L_X)^2} \quad (3)$$

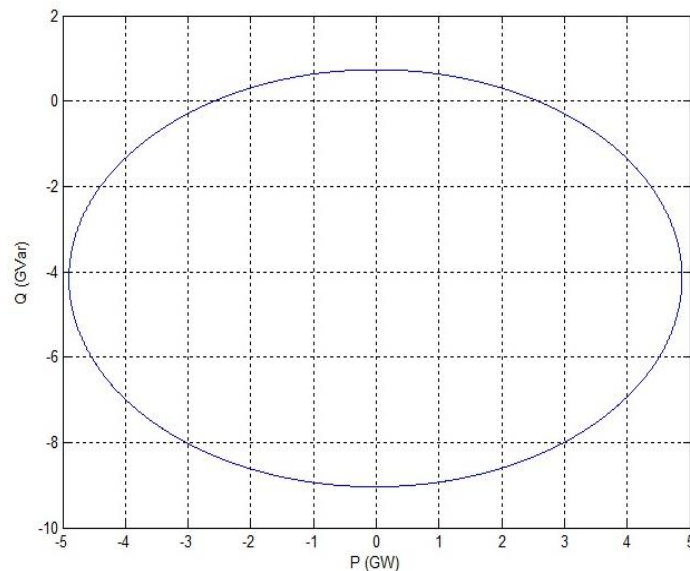
$$\text{Avec} \begin{cases} R_U = R_L = R' \text{ et } R_X = R + \frac{R'}{2} \\ L_U = L_L = L' \text{ et } L_X = L + \frac{L'}{2} \\ V_m = \frac{V_{C_{tot}} - \frac{E}{2}}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (4)$$

De ces équations, il est possible de constater que le diagramme PQ du MMC dépend essentiellement des tensions  $V_{C_{tot}}$  mais aussi des tensions des réseau DC et AC.

La figure 4 présente les limites de fonctionnement PQ du MMC avec les paramètres synthétisés dans le tableau 1

Tableau 1. Paramètres MMC pour cette l'étude

L	60 mH	C/N	25 $\mu$ F
R	60 m $\Omega$	E	640 kV
L'	50 mH	$\omega$	314 rad.s <sup>-1</sup>
R'	50 m $\Omega$	Vg	192 kV



**Figure 4 : Diagramme PQ du MMC.**

## 4. Conclusion

L'article final détaillera l'intégralité de la construction de la REM du MMC et de son contrôle tout en mettant en évidence les degrés de liberté. Le raisonnement permettant d'aboutir à l'expression du diagramme PQ sera présenté intégralement. Des simulations seront présentées pour différents points de fonctionnement limites extraits du diagramme PQ.

## 5. Références

- [1] R. Marquardt and A. Lesnicar, "A new modular voltage source inverter topology," presented at the Rec. Eur. Conf. Power Electr. Appl. [CDROM], Toulouse, France, 2003.
- [2] M. Hagiwara, K. Nishimura, and H. Akagi, "A medium-voltage motor drive with a modular multilevel PWM inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 7, pp. 1786–1799, Jul. 2010.
- [3] Glinka. M. and Marquardt R.: A new AC/AC multilevel converter family, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52 no 3, June 2005
- [4] H. Akagi, "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)," presented at the Rec. IPECSapporo, Japan, 2010
- [5] Cherix N., Vasiladiotis M., Rufer A.: Functional Modeling and Energetic Macroscopic Representation of Modular Multilevel Converters, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia
- [6] Saad. H., Dennetiere. S, Mahseredjian. J, Nguéfeu. S. : Detailed and Averaged Models for a 401-Level MMC–HVDC System, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27 no 3, July 2012, pp. 1501-1508
- [7] A. Antonopoulos, L. Angquist, and H. P. Nee, "On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter," in Conf. Rec. EPE [CD-ROM] Barcelona, 2009, pp. 1–10.
- [8] Zheng Xu and Jing Zhang : Circulating current suppressing controller in modular multilevel converter, IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov. 2010, pp. 3198 – 3202
- [9] Hagiwara M. and Akagi H.: "Control and Experiment of PWM Modular Multilevel Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24 no 7, pp. 1737-1746, July 2009