

Equilibrage de tension par voisinage pour le contrôle décentralisé de convertisseurs modulaires multiniveaux

Adrien CORNE, Yacine FOFANA, David FREY
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab,
38000 Grenoble, France

RESUME – L'intérêt récent pour les réseaux DC moyenne et haute tension (MVDC/HVDC) rend les systèmes de conversion de puissance indispensables pour l'interconnexion des réseaux électriques, le convertisseur modulaire multiniveaux (MMC) étant l'outil privilégié pour sa capacité à gérer les tensions élevées et la fiabilité accrue apportée par la modularité. Les contrôleurs centralisés qui équipent les MMC actuels sont néanmoins des points de défaillance unique qui limitent cette fiabilité et le caractère modulaire du MMC. Ces topologies de MMC centralisés sont de plus particulièrement coûteuses et complexes, ce qui freine le développement de cet outil et sa disponibilité. La commande décentralisée de module de MMC est basée sur la répartition du contrôle sur l'ensemble des modules, ce qui diminue la charge de calcul sur un contrôleur local et divise l'impact des défaillances de contrôle. La communication des niveaux de tension de modules pour l'équilibrage des bras se fait alors directement entre modules. Dans cet article, une stratégie de communication proche en proche par cluster de module est proposée pour permettre un équilibrage de tension purement distribué.

Mots-clés – Contrôle décentralisé, convertisseurs modulaires multiniveaux (MMC), architecture de communication, modularité

1. INTRODUCTION

La nature DC (courant continu) de la production et du stockage des énergies renouvelables a suscité ces dernières années un fort intérêt scientifique et industriel envers les réseaux électriques DC haute et moyenne tension (HVDC et MVDC) [1]. La conversion de puissance électrique dans ces réseaux nécessite cependant un recours accru aux dispositifs d'électronique de puissance, et les contraintes fortes en flexibilité et en disponibilité des réseaux DC interconnectés entre eux font des architectures de puissance modulaires des outils particulièrement intéressants. Le convertisseur modulaire multiniveaux (MMC) en est une topologie classique : c'est un onduleur de tension qui permet d'avoir autant de niveaux de tension que de modules en série par bras.

Du fait des limitations technologiques des semi-conducteurs et des contraintes imposées par les systèmes, ces convertisseurs sont composés de centaines, voire milliers de modules interconnectés. Le contrôle de ce type de structure est de fait plus complexe que pour les convertisseurs classiques, et les niveaux de tension des modules qui composent le convertisseur doivent être parfaitement équilibrés pour garantir un vieillissement uniforme de l'ensemble et limiter les défaillances [2]. Vis-à-vis de ce dernier point, un contrôleur centralisé pilotant l'ensemble des modules n'est pas satisfaisant car il constitue alors un point de défaillance unique et critique, devant gérer un flux de données très important [3]. Le contrôle décentralisé des modules grâce à des contrôleurs délocalisés permet d'alléger la quantité d'information échangée et de circonscrire l'impact des défaillances. La communication entre modules de proche en proche ("daisy chain") est une solution qui semble prometteuse, néanmoins la tolérance aux défauts de modules ou à la rupture de commu-

nication entre modules est un verrou scientifique et technologique fort qui limite sa portée [4]. En outre, la structure en "daisy chain" introduit par sa structure des délais pouvant avoir des conséquences sur le contrôle des modules d'un MMC [5]. D'autres architectures de communication ont été étudiées dans la littérature scientifique, comme la structure en étoile ou arborescente (centralisées) [6]. Des structures partiellement décentralisées ont également été proposées afin de limiter l'impact des défaillances, au détriment de la modularité du convertisseur et avec des protocoles de communication industriels [7], [8].

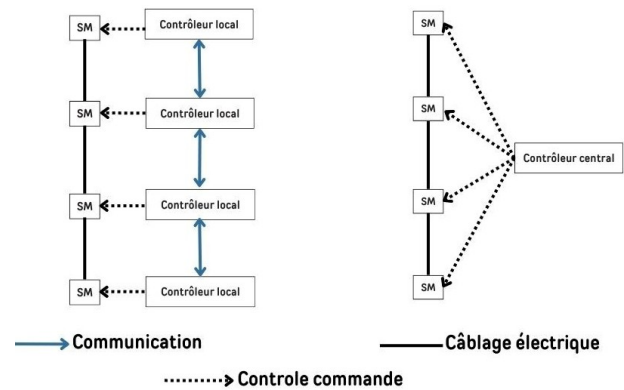


FIG. 1. Architecture de contrôle centralisé (à droite) et en daisy chain (à gauche)

Une des principales difficultés liée à la décentralisation de la commande est l'équilibrage des tensions de modules. Dans une architecture centralisée, le contrôleur reçoit les mesures de l'ensemble des tensions et effectue un tri afin de prioriser la commutation des modules dont la tension est la plus élevée, ce qui est coûteux en temps de calcul [9]. L'équilibrage des tensions de modules dans un contrôle décentralisé bouclé en "daisy chain" est généralement basé sur la propagation d'information des tensions des différents modules afin d'effectuer un tri similaire à celui de l'architecture centralisée.

Comme dit plus haut, cette propagation dans une boucle des informations de tension des modules n'est pas sans contrainte, notamment au niveau des délais qu'impose ce type de structure alors que la dynamique de contrôle de l'équilibrage des tensions de module est très forte. Dans cette étude, une méthode de communication entre modules regroupés en "clusters" de trois modules a été mise au point. Elle permet de réaliser un équilibrage local des modules de manière totalement décentralisée et en confinant l'échange d'information à l'intérieur d'un cluster, sans propager d'information à l'ensemble des modules. L'avantage de cette structure est grande en terme de quantité d'information échangée et de rapidité dans l'attribution des consignes de commutation. Elle permet également d'envisager de s'affran-

chir de communication directe entre microcontrôleurs, simplifiant la mise en oeuvre de modules open-hardware et facilitant l'aspect modulaire du convertisseur.

Une première partie de l'article sera consacré à la modélisation du MMC proposé pour l'étude. Dans un deuxième temps, le principe de la décentralisation en cluster de module sera explicité, puis des résultats de simulation seront proposés et comparés à une commande centralisée.

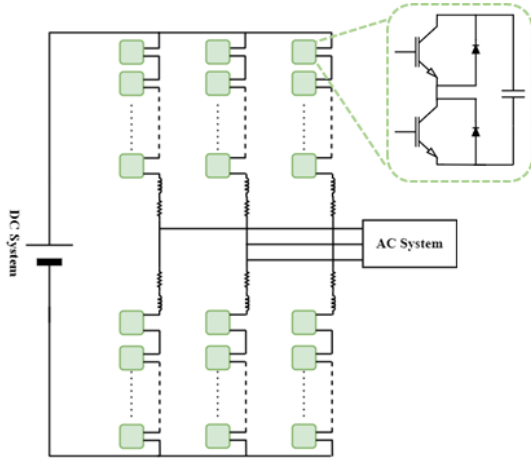


FIG. 2. Architecture de puissance du MMC étudié - modules en demi-ponts

2. MODÉLISATION DU MMC D'ÉTUDE ET PRINCIPE GÉNÉRAL DE COMMANDE

La structure du MMC utilisé comme support de l'étude est standard et présentée sur la figure 2. La modélisation mathématique de cette topologie de MMC est explicitée dans [10]. Il est composé de 8 modules, aussi appelés sous-modules (abrégiés "SM" dans la suite de cet article) en demi-ponts (2 transistors et 1 condensateur pour le stockage d'énergie) par demi bras de convertisseur. Le nombre de 8 SMs par bras est suffisant pour notre étude théorique, mais il dépend évidemment du niveau de tension à atteindre. En outre, le choix du nombre de SMs impact généralement la stratégie de modulation, un nombre élevé de module (typiquement au delà de la vingtaine de SMs) permettant de s'affranchir de PWM [11]. Dans le principe, il est à noter que tous les SMs vont de paire avec un micro-contrôleur qui lui est associé et qui permettra à la fois de communiquer les niveaux de tensions avec les modules voisins et de réaliser l'algorithme de commande pour l'équilibrage de la tension du module. Dans la très grande majorité des stratégies de commande de MMC, le contrôle se fait en 2 étapes :

- le contrôle haut niveau, qui permet de calculer le nombre de modules à insérer pour atteindre le niveau de tension requis en sortie des bras du convertisseur
- le contrôle bas niveau qui permet de réaliser l'équilibrage des tensions des SMs et donc insérer les SMs adéquats en fonction de la polarité du courant et du nombre imposé par le contrôle haut niveau

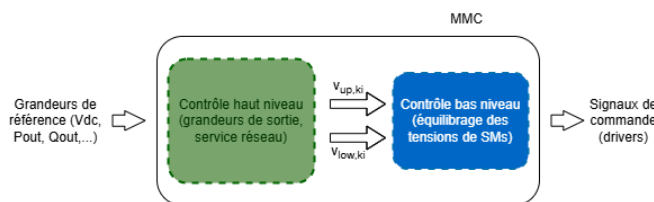


FIG. 3. Schéma de commande d'un MMC

C'est ce contrôle bas niveau axé sur l'équilibrage des ten-

sions qui nous intéresse dans cet article. Les dynamiques de commande bas niveau sont beaucoup plus fortes (typiquement la dizaine de kHz) que celles haut niveau qui dépend des dynamiques du réseau et donc généralement 50Hz, les contraintes sur la communication des données est donc grande pour l'équilibrage des tensions de modules. Il existe plusieurs stratégies d'équilibrage bien décrites dans [12], mais notre étude étant focalisée sur l'architecture de communication décentralisée, un équilibrage de tension des modules basique sera utilisé dans la suite. Le principe est le suivant : le nombre de SMs à engager N est déterminé par une PWM sur plusieurs niveaux. A noter que si N_{up} est le nombre de SM à engager dans le demi bras supérieur, N_{down} le nombre de SM à engager dans le demi bras inférieur et N_{tot} le nombre SMs insérés total sur une phase, on a toujours :

$$N_{up} + N_{down} = N_{tot} \quad (1)$$

Par simplification on considérera dans la suite N pour N_{up} , le raisonnement pouvant se faire également sur N_{down} . Les SMs sont alors triées selon leur tension, puis selon la polarité du courant dans le demi-bras, les N SMs avec la plus haute tension (ou la plus basse) sont insérés. Le principe de la commande bas niveau utilisée dans cette étude est schématisée (pour 4 niveaux pour plus de lisibilité) dans la figure 4.

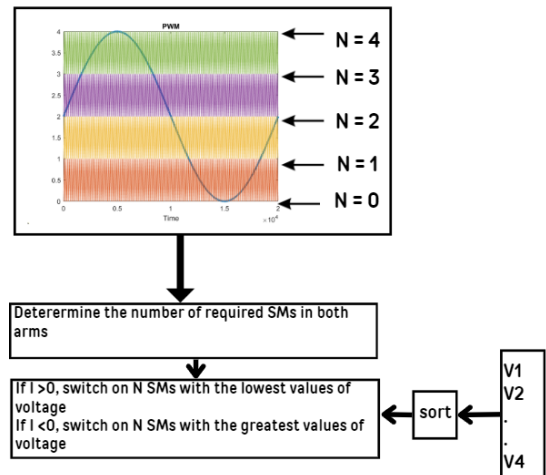


FIG. 4. Algorithme classique d'équilibrage des tensions de modules (commande bas niveau)

Le tableau 1 ci dessous résume les caractéristiques du convertisseur.

TABLEAU 1. Caractéristiques du MMC étudié en simulation

Paramètres	Valeurs
Tension d'entrée	4000V
SMs par bras	8
Capacité des SMs	5mF
Résistance interne des SMs	1mΩ
Résistance de ligne	0.1Ω
Inductance de ligne	10mH
Résistance de charge	50Ω
Inductance de charge	1mH

Ce tableau de paramètre présente les valeurs moyennes dans les SMs et dans les bras. Afin de tester la résilience de la commande décentralisée à la dispersion paramétrique des SMs, les simulations seront faites avec des écarts de paramètres aléatoires

jusqu'à $\pm 30\%$ autour de ces valeurs moyennes afin de tester la robustesse du contrôle.

3. LA COMMANDE DÉCENTRALISÉE PAR CLUSTER

La spécificité de la commande décentralisée proposée dans cet article est le concept de regroupement de SMs par voisinage ou par cluster. La figure 5 présente l'architecture de communication entre SMs. Un SM numéroté "n" est associé à un contrôleur local (CL) "n". Les informations de mesure de tension du SM "n" sont partagées avec les contrôleurs "n-1" et "n+1". Le CL "n" reçoit alors 3 valeurs de tensions : celles des SMs "n-1", "n" et "n+1".

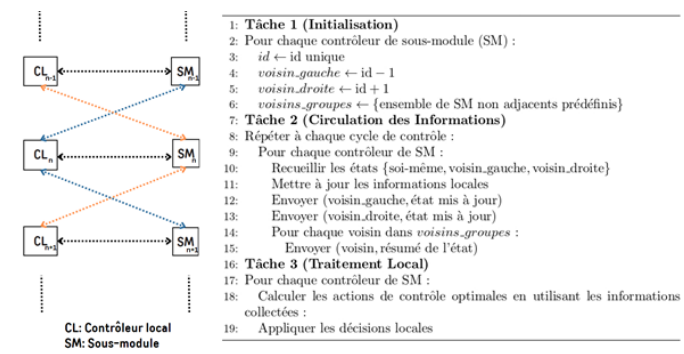


FIG. 5. Architecture de communication par voisinage

C'est sur ces 3 tensions qu'est fait le tri des tensions pour l'équilibrage. Le CL "n" renvoie ensuite les ordres de commande au 3 SMs associés en fonction du niveau de tension visé et des déséquilibres de tensions entre les 3 modules. De même, le SM "n" reçoit alors 3 ordres de commande des CL "n-1", "n" et "n+1". Dans un cas de regroupement de 3 modules voisins, il faut un ordre d'engagement de module d'au moins 2 CL pour que le module s'active. Le contrôle bas niveau décentralisé qui vient d'être détaillé est schématisé sur la figure 6.

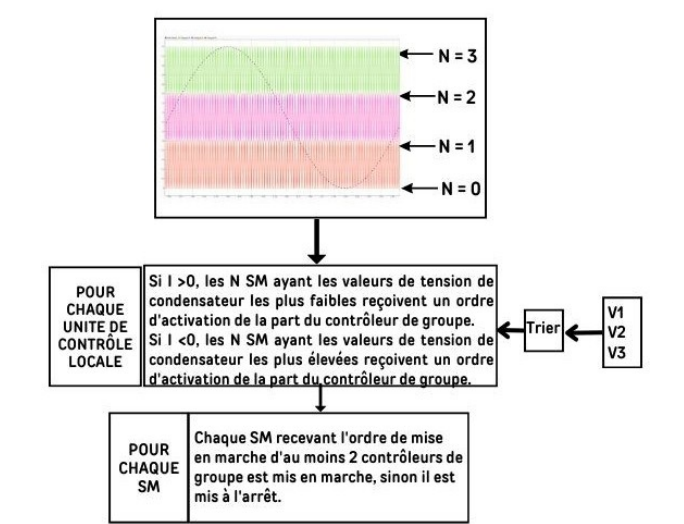


FIG. 6. Stratégie d'équilibrage décentralisée par voisinage

L'avantage de cette structure de commande bas niveau est multiple : l'équilibrage des tensions est faite de manière totalement décentralisée et il n'y a pas de contrôleur maître dans cette configuration. De plus il n'y a pas de bus de communication bouclé, les informations des modules sont partagées localement mais non propagées. On s'affranchi ainsi d'une architecture de communication coûteuse en temps de propagation des données et prompt aux défaillances, comme c'est le cas de la *daisy chain* notamment.

Il est possible d'envisager des regroupement de plus de 3 SMs, le nombre optimal en fonction du nombre de SMs sera discuté dans de futurs travaux sur cette thématique. L'impact des défaillances de SMs sur cette stratégie de commande sera également un point important de validation de la commande décentralisée par voisinage.

4. RÉSULTATS DE SIMULATION ET COMPARAISON AVEC LA COMMANDE CENTRALISÉE

La stratégie de contrôle développée et présentée précédemment a été testée en simulation avec Matlab/Simulink. La stratégie utilisée est bien décentralisée. Par la présence de multiples contrôleurs de groupes, chacun gérant plusieurs SMs, illustre une structure où les décisions ne sont pas prises par un seul contrôleur central, mais réparties parmi plusieurs entités. Les unités de contrôle locales fournissent des ordres aux SMs, mais ces ordres nécessitent une double validation pour insérer un SM. Cela démontre un modèle où la coordination et la validation mutuelle renforcent la fiabilité des décisions. Comme l'illustre la figure 7, cette stratégie permet bien d'obtenir une tension stable et équilibrée entre les SMs. Sur cette figure, on peut voir les niveaux de tension de 4 SMs (sur les 8, pour plus de lisibilité). Afin de rendre compte dans la simulation de la dispersion paramétrique possible des SMs, des erreurs aléatoires allant jusqu'à $\pm 30\%$ de la valeur théorique de la capacité de SM. On remarque sur ce graphique que les tensions sont bien équilibrées et fluctuent autour d'une valeur moyenne de 500V (4000V du bus DC divisé par 8 modules). L'ondulation de tension autour de cette valeur moyenne ne dépasse pas les 8% dans cette configuration.

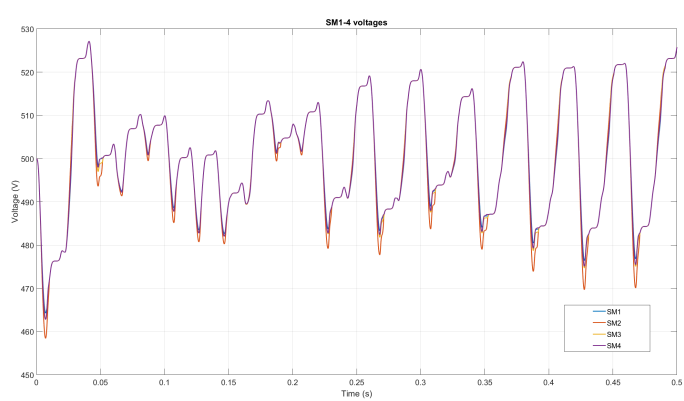


FIG. 7. Niveaux de tension de 4 SMs en contrôle décentralisé et régime déséquilibré

Sur l'ensemble des simulations réalisées avec des valeurs de capacités de SMs différentes, l'ondulation maximale atteinte est de 10%. Cette valeur est à mettre en lien avec l'ondulation de tension de SMs dans le cas d'une commande centralisée traditionnelle (même algorithme de commande haut niveau et commande bas niveau basée sur un tri classique sur l'ensemble des tensions). Les tensions de SMs dans cette configuration centralisée est visible figure 8.

L'ondulation de tension de SM en centralisé n'excède pas les 2%. Il n'est pas étonnant que la configuration décentralisée proposée présente une ondulation de tension de SMs plus élevée. En effet, l'information n'étant pas propagée, ce sont les SMs optimaux localement parmi 3 qui sont insérés et non les SMs optimaux sur l'ensemble du demi bras de MMC. Malgré cela, l'ondulation reste acceptable en fonction de l'application.

Afin de caractériser au mieux l'impact de cette augmentation d'ondulation de tension, une analyse spectrale des signaux de tensions des SM1 en centralisé et en décentralisé est présentée sur la figure 9. On remarque notamment sur cette figure que les harmoniques à 50Hz et 100Hz sont doublées, et qu'une harmonique à 25Hz est présente en décentralisée alors qu'elle ne l'est

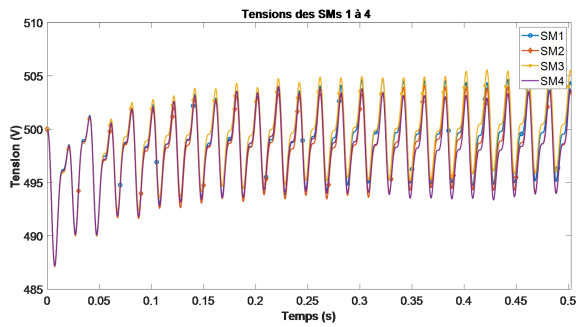


FIG. 8. Niveaux de tension de 4 SMs en contrôle centralisé traditionnel et capacités déséquilibrées

pas en centralisé.

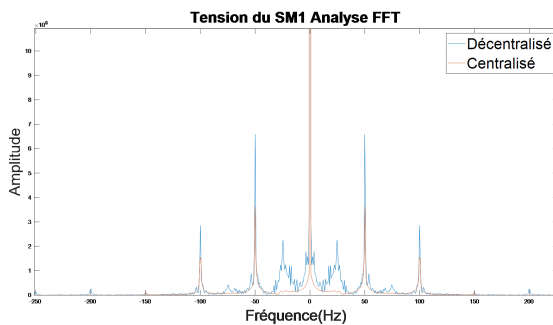


FIG. 9. Comparaison de la transformée de Fourier de la tension d'un module en centralisé et décentralisé

Les tensions de SMs avec la commande décentralisée proposée contiennent donc plus d'harmoniques que dans une architecture centralisée classique. L'impact de ces harmoniques supplémentaires est montrée sur la figure 10. Sur cette figure, on peut voir la tension et le courant dans la charge en sortie d'une phase de MMC avec le contrôle bas niveau décentralisé introduit dans cet article. On remarque que la tension de sortie du MMC est bien sinusoïdale, avec des ondulations notables en plus haute fréquence. C'est notamment le 10kHz de la PWM de la commande bas niveau qui est visible sur ces ondulations.

Une analyse sur ces harmoniques montrent un THD sur la tension de 9.2%. Il existe peu de normes sur le MVDC pour le moment, mais la norme IEEE.1709-2028 recommande de ne pas excéder 5% d'ondulation sur les réseaux de navires [13].

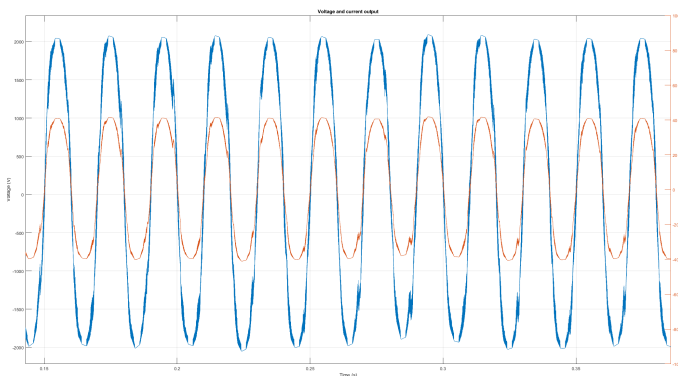


FIG. 10. Comparaison de la transformée de Fourier de la tension d'un module en centralisé et décentralisé

La commande d'équilibrage des tensions décentralisée par voisinage est donc dans son état actuel très encourageante du

point de vue des performances. L'équilibrage global ne se faisant que par le biais d'information et de prises de décision localisées, une ondulation de tension sur les SMs et sur les tensions de phase plus élevée que pour un contrôle centralisé est constaté mais elle reste faible. L'apport en revanche de cette commande décentralisée sur la simplicité de mise en oeuvre et la rapidité de la communication par rapport aux stratégies centralisées classiques est très forte, l'information ne se propageant pas à travers l'ensemble des SMs mais restant localisée dans un voisinage de SMs.

5. CONTRIBUTION À LA SCIENCE OUVERTE

Cette étude constitue un travail préliminaire à un projet plus global de contrôle décentralisé de MMC intégralement open-source et open-hardware. Les travaux présentés dans cet article ont vocation à évoluer et à être testés sur un MMC développé sur des modules développés par OwnTech. Un GitHub est ouvert sur ces travaux et sera enrichi et modifié tout au long du projet. Il est disponible via le lien suivant : https://github.com/AdriCor38/MMC_dec.

En outre, l'architecture même de ce type de commande décentralisée a pour but de s'affranchir d'un contrôle centralisé coûteux et complexe pour le remplacer par des modules multi-usages avec contrôleurs locaux intégrés, plus simples à prendre en main et plus conviviaux dans l'installation et la maintenance.

6. CONCLUSIONS

Une nouvelle stratégie de contrôle décentralisé de MMC sans communication entre microcontrôleurs a été proposée. Elle permet de s'affranchir d'un contrôleur central et d'un bus de communication bouclé, tout deux des points de défaillance unique et critique. Cette commande repose sur le regroupement en clusters de SMs voisins, permettant un équilibrage local des tensions sans propagation d'information. La simplification de la commande, le gain en modularité et l'ouverture vers un convertisseur open-hardware est néanmoins pondéré par une ondulation de tension accrue au niveau des modules. Cette étude ouvre vers de nouvelles problématiques intéressantes, notamment la gestion des défaillances ainsi que la difficulté amenée par la commande des grandeurs externes du convertisseurs, sujets en cours d'étude actuellement à la suite de ces travaux préliminaires.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Coffey, Sophie, Victor Timmers, Rui Li, Guanglu Wu, and Agustí Egea-Àlvarez. 2021. "Review of MVDC Applications, Technologies, and Future Prospects" *Energies* 14, no. 24 : 8294. <https://doi.org/10.3390/en14248294>
- [2] R. Picas et al., "Submodule power losses balancing algorithms for the modular multilevel converter," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, Italy* : IEEE, Oct. 2016, pp. 5064–5069. doi : 10.1109/IECON.2016.7793381.
- [3] Barros, Luis A. M., António P. Martins, and José Gabriel Pinto. 2022. "A Comprehensive Review on Modular Multilevel Converters, Submodule Topologies, and Modulation Techniques" *Energies* 15, no. 3 : 1078
- [4] M. Vivert et al., "Decentralized Control for Balancing the Cell Voltages of a High Conversion Ratio Flying Capacitor Multilevel Converter," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 635–646, July 2022
- [5] Y. Koyama and T. Isobe, "Current Control of Modular Multilevel Converters Using a Daisy-Chained Distributed Control System with Communication Path Redundancy," in *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal* : IEEE, Oct. 2019, pp. 6108–6113. doi : 10.1109/IECON.2019.8926654.
- [6] C. Burgos-Mellado, J. Pereda, A. Mora, R. Cardenas-Dobson and T. Dragicevic, "Distributed Control for Modular Multilevel Cascaded Converters : Toward a Fully Modular Topology," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 18, no. 1, pp. 32–45, March 2024
- [7] L. Mathe, P. D. Burlacu and R. Teodorescu, "Control of a Modular Multilevel Converter With Reduced Internal Data Exchange," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 248–257, Feb. 2017

- [8] M. Yang, X. Pei, M. Zhang, and Y. Zhang, "A Dual-Ring Control Structure for Enhancing the Fault-Tolerance Ability Under Communication Interruption in MMC," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 10, pp. 10101–10113, Oct. 2023, doi : 10.1109/TIE.2022.3217643.
- [9] M. A. Perez, S. Ceballos, G. Konstantinou, J. Pou and R. P. Aguilera, "Modular Multilevel Converters : Recent Achievements and Challenges," in *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 2, pp. 224-239, 2021
- [10] E. N. Abildgaard and M. Molinas, "Modelling and Control of the Modular Multilevel Converter (MMC)," *Energy Procedia*, vol. 20, pp. 227–236, 2012, doi : 10.1016/j.egypro.2012.03.023.
- [11] A. Zama, S. A. Mansour, D. Frey, A. Benchaib, S. Bacha, and B. Luscan, "A comparative assessment of different balancing control algorithms for modular multilevel converter (MMC)," in 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany : IEEE, Sep. 2016, pp. 1–10. doi : 10.1109/EPE.2016.7695315.
- [12] M. A. Zama, "Modelling and control of modular multilevel converters dedicated to HVDC Grids. PhD thesis 2017"
- [13] 1709-2018 - IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships. S.I. : IEEE, 2018.