

Amélioration de la qualité de l'alimentation d'une station ferroviaire basée sur une structure MMC contrôlée par un contrôleur résonnant

Kévin Tournoux⁽¹⁾, Mohamed Fouad Benkhoris⁽¹⁾, Azeddine Houari⁽¹⁾, Franck Terrien⁽²⁾

(1) Nantes Université, Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique, IREENA, UR 4642, F-44600 Saint Nazaire, France

(2) General Electric Power Conversion, F-90000 Belfort, France

RESUME - Du fait de leur flexibilité, les structures de convertisseurs multiniveaux modulaires dits MMC sont actuellement au premier plan des solutions industrielles en vue de moderniser les stations ferroviaires. Afin de faire face aux exigences de qualité de l'alimentation en présence d'impacts de puissance et contenus harmoniques élevés issus des trains, l'association d'un ensemble "convertisseur-contrôle" robuste et dynamique sont indispensables. Cet article présente une solution d'architecture basée sur les convertisseurs MMC et contrôlée par des correcteurs résonants pour assurer une alimentation 25 kV-50 Hz respectant les normes en vigueur dans le ferroviaire. Les performances en statique et dynamique de la solution étudiée sont analysées sous différentes situations de charge.

Mots-clés—*Convertisseur multiniveaux, ferroviaire, qualité, harmoniques, back-to-back.*

1. INTRODUCTION

L'intérêt pour les Convertisseurs Modulaires Multiniveaux (MMC), ne cesse de croître depuis leur popularisation notamment au travers des travaux de Akagi [1], [2] et de Marquardt [3]. De plus, leur forte versatilité leur permet de trouver un panel d'utilisations des plus étendu, de la réalisation de liaisons HVDC à la gestion de la qualité du réseau.

Cette forte capacité d'adaptation peut permettre d'unifier les modes d'alimentation du réseau ferroviaire qui sont disparates avec trois grands modes d'alimentation, à savoir le 3 kV continu, le 15 kV alternatif à 16,7 Hz et le 25 kV alternatif à 50 Hz, rendant nécessaire l'utilisation de plusieurs matériels roulants ou de matériels roulants supportant les changements d'alimentation. Le but de ces travaux est d'étudier l'impact d'un convertisseur modulaire multiniveaux piloté par un contrôleur résonnant sur des charges générées à partir d'un profil de charge.

Dans cet article on étudiera en premier lieu le fonctionnement d'un convertisseur back-to-back alternatif triphasé vers alternatif monophasé à fréquence identique. Par la suite, on réalisera un onduleur MMC afin d'adapter le premier système aux contraintes de tension qui pèsent à la fois sur l'alimentation caténaire et sur les interrupteurs de puissance. Ainsi, la section 2 de cet article est dédiée à la description de la chaîne complète de conversion d'énergie. La section 3 présente la structure simplifiée ainsi que le contrôle et le fonctionnement de la conversion DC-AC. La section 4 présente l'onduleur et son fonctionnement une fois qu'il a été adapté à la structure MMC.

2. SYSTEME FERROVIAIRE

En France, en 2018, le système 25 kV – 50 Hz représentait 60% du réseau ferroviaire électrifié français. La figure 1, représente l'architecture de conversion d'énergie utilisée actuellement [4]:

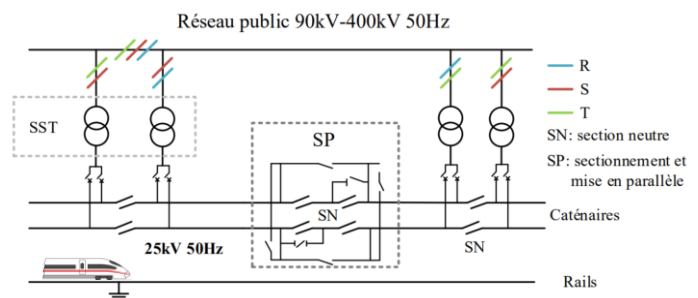


Figure 1 Schéma de connexion au réseau à fréquence identique

Comme on peut l'observer sur l'image ci-dessus, l'alimentation ferroviaire pour un système de même fréquence se fait en prélevant deux des trois phases du réseau de distribution. Ce mode de connexion nécessite d'alterner entre les phases prélevées afin de ne pas cause de déséquilibre trop important et nécessite aussi la présence de sections neutres lors d'un passage d'un couple de phases à un autre. Le but est donc d'utiliser un convertisseur MMC en remplacement des transformateurs afin de pouvoir utiliser les trois phases du réseau de distribution, éliminant ainsi les potentiels déséquilibres et les sections neutres. Le schéma de principe qui résulterait de la suppression des transformateurs est affiché sur la Figure 2.

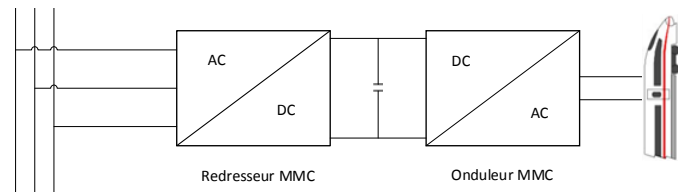


Figure 2 Schéma de principe d'une connexion au réseau avec MMC

3. MODELE SIMPLIFIE

L'onduleur est piloté à l'aide de contrôleurs proportionnels résonants (PR) [5], [6]. Sa fonction de transfert est :

$$C(s) = Kp + \frac{K_i 2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (1)$$

Où ω_0 est la fréquence autour duquel le système va fonctionner et ω_c la largeur de la bande passante du contrôleur. La figure 4 représente ainsi le schéma bloc de la régulation.

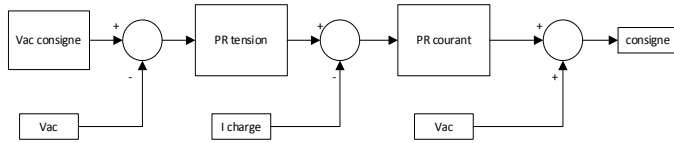


Figure 3 Commande de l'onduleur

Notre convertisseur impose alors une tension sinusoïdale créée à partir d'une boucle de courant imbriquée dans une boucle de tension, ce qui permet aussi de limiter les courants. Ce convertisseur débite alors sur une charge simulant le comportement d'un train et est alimenté par le bus continu.

3.1. Profil de charge

Le profil de la charge présenté à la figure 4a est basé sur la référence [7] il est suffisamment configurable pour obtenir des cas critiques avec par exemple la prédominance d'un certain rang d'harmoniques ou une variation brusque du niveau de charge.

3.2. Simulation et résultats

La première simulation comporte plusieurs phases. La première est une phase d'accélération progressive suivie d'une brusque coupure, correspondant à un freinage. S'en suit alors plusieurs phases d'accélération, de décélération ainsi que de régime permanent. Le courant de charge est réduit afin de correspondre à l'échelle de tension. On relève alors dans la Figure 4 l'allure du courant de charge, de la tension du bus continu ainsi que celle de sortie d'onduleur qui alimentera la caténaire.

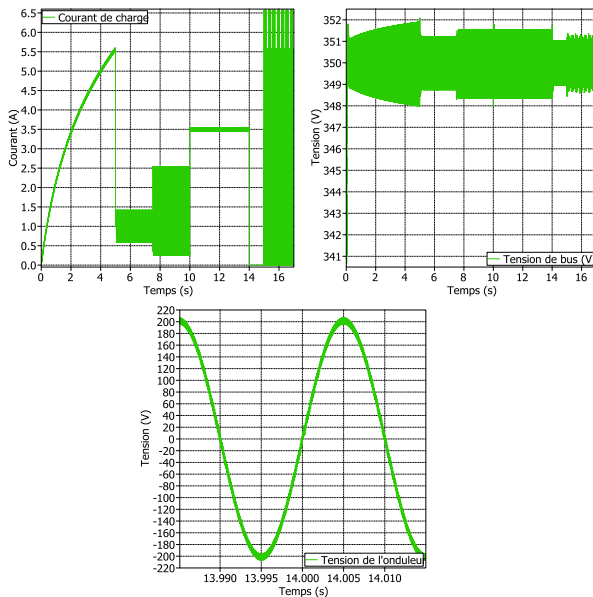


Figure 4 (a) courant de charge, (b) tension du bus continu, (c) tension aux bornes de la charge

La tension aux bornes de la charge est celle qui était imposée, de plus, on conserve une tension de bus stable avec une variation très faible de sa valeur.

4. ONDULEUR MMC

On remplace la partie située après le bus DC par un convertisseur MMC monophasé qui fonctionnera lui aussi en mode onduleur. Le contrôle du système est similaire à celui présenté dans la Section 3. Son schéma global est présenté sur la Figure 5 ci-dessous.

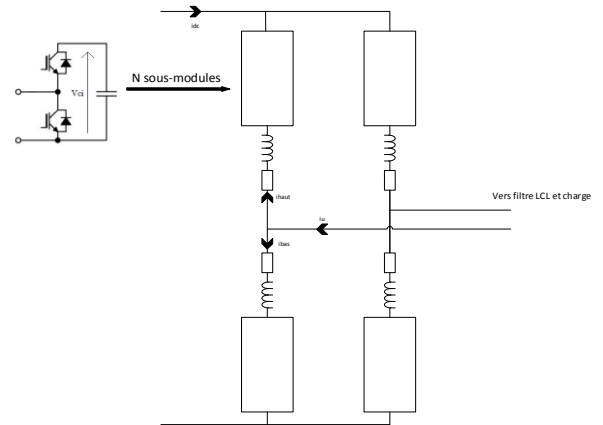


Figure 5 Schéma du convertisseur MMC en fonctionnement onduleur

Le niveau de tension souhaité en sortie de convertisseur est de 25 kV RMS, chaque bloc du convertisseur est alors composé de 28 sous-modules fonctionnant à une tension moyenne de 2500 volts. Cette tension moyenne est régulée par un algorithme d'équilibrage qui permet de choisir quelle capacité mettre en série dans le convertisseur afin de respecter la consigne de tension ainsi que la dynamique de charge ou de décharge de la capacité. On impose de la même façon une charge sinusoïdale aux bornes du convertisseur, charge qui se veut représentative du courant soutiré par le train lorsqu'il est en fonctionnement, elle est similaire à la charge de la Figure 4-a mais avec une plage de courant variant de 257 à 20 ampères.

4.1. Simulations et résultats

Les figures 6 et 7 présentent les résultats obtenus en régime permanent. On s'intéresse tout d'abord à la tension de sortie qui est appliquée au caténaire, ainsi qu'à la valeur de l'écart avec la consigne qui est purement sinusoïdale.

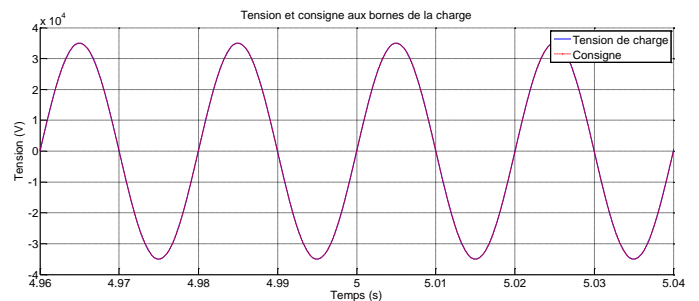


Figure 6 Tension caténaire et consigne

La tension caténaire suit bien la tension de consigne, même lors de forts à-coups ou de régimes statiques harmoniques avec un écart maximal à la consigne de 173 volts, soit 0,49%. On vérifie aussi que les capacités des sous-modules restent bien groupées autour de leur tension de référence de 2500 volts, afin de s'assurer qu'il n'y a pas de risque immédiat de détérioration des composants. On trace alors les enveloppes correspondant à la valeur minimale et à la valeur maximale instantanée de toutes les capacités. Ces gabarits sont définis comme étant les tensions maximales et minimales que prennent les tensions des 28 capacités. La tension d'une capacité illustre la dynamique de toutes les tensions.

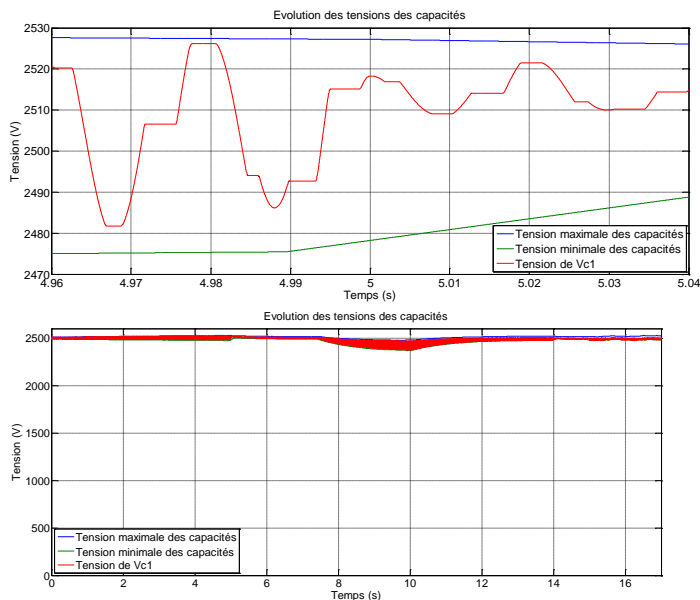


Figure 7 Tensions des capacités

D'après les figures 7 et 8, on vérifie bien que le système est stable et répond correctement aux exigences de l'application, notamment en ce qui concerne un niveau de tension stable et une bonne absorption des harmoniques. La figure 8 montre que la tension Vc1 aux bornes d'un module reste dans le gabarit représenté par Vcmax et Vcmin avec une déviation maximale de 5%.

Un autre scénario de simulation consiste à simuler le régime permanent mais fortement harmonisé puisque les relevés indiquent un THD sur le courant oscillant autour des 10%, ce qui s'explique par la présence de nombreuses sources de courant produisant des harmoniques de rangs différents dans les locomotives. Ainsi, on impose un courant de 130 ampères RMS mais présentant une distortion harmonique de 17%, là où l'essai précédent avait un spectre harmonique peu étendu.

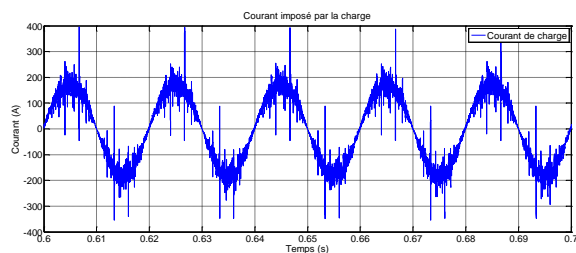


Figure 8 Courant imposé par la charge

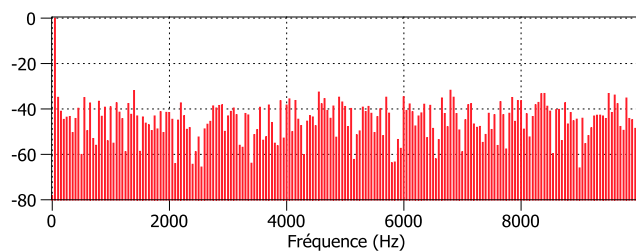


Figure 9 Spectre harmonique du courant de charge

D'après les figures 8 et 9, le courant de charge est bien sinusoïdal et fortement harmonisé. Le but du convertisseur est alors de maintenir une qualité de tension équivalente à celle obtenue précédemment. De la même façon que lors de l'essai

précédent, on s'intéresse à la tension caténaire qui est la plus forte contrainte du point de vue système.

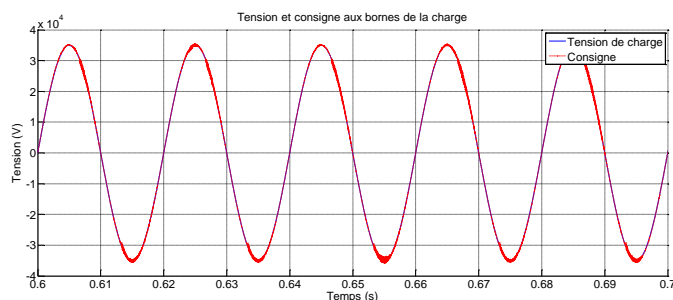


Figure 10 Tension caténaire et consigne

On constate de prime abord que la tension de la caténaire est plus sensible aux fortes composantes harmoniques puisque l'écart maximal entre la consigne et la tension caténaire est de 5,2%. Cependant, la valeur RMS de la tension, qui est imposée par l'exploitant, ne descend jamais en dessous de 24.7 kV, ce qui, par rapport à la consigne, constitue un écart de 1% et qui n'atteint jamais les limites imposées par la norme [8].

On s'assure aussi que les tensions des capacités reste bien dans les gabarits tels qu'ils l'ont été définis précédemment dans le document. Ainsi, sur la figure 11 on visualise la tension Vc1 aux bornes d'un module ainsi que Vcmax et Vcmin.

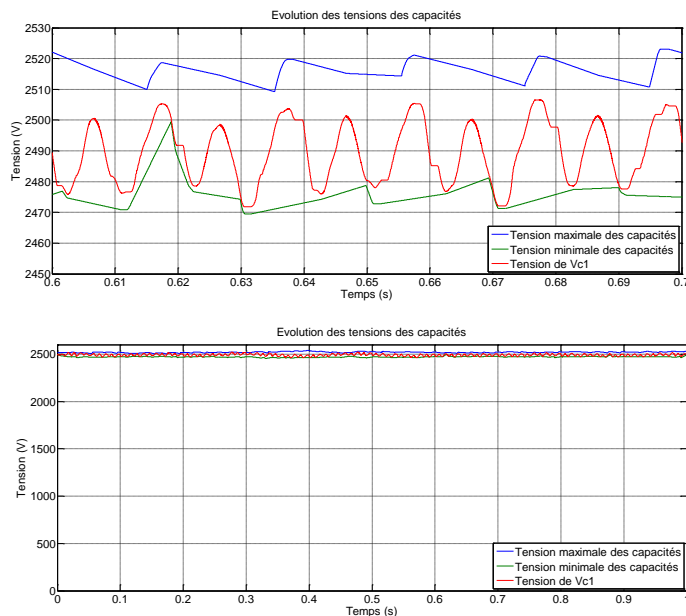


Figure 11 Tensions des capacités

Les tensions restent bien dans le gabarit, présentant une déviation maximale de seulement 1,6%, prouvant que la régulation et l'équilibrage côté onduleur fonctionne correctement.

Au cours de la simulation, on enregistre la valeur du courant de bus. Ces données sont ensuite utilisées en tant que charge dans un redresseur triphasé MMC dont la structure n'est pas détaillée ici. Le but étant de vérifier l'impact sur le réseau, on joue le second scénario, là où le courant est le plus fortement harmonisé mais pendant ce qu'on considère comme étant le régime établi. Les courants obtenus pour un convertisseur MMC avec 28 sous-modules par bras sont alors détaillés dans la figure 12.

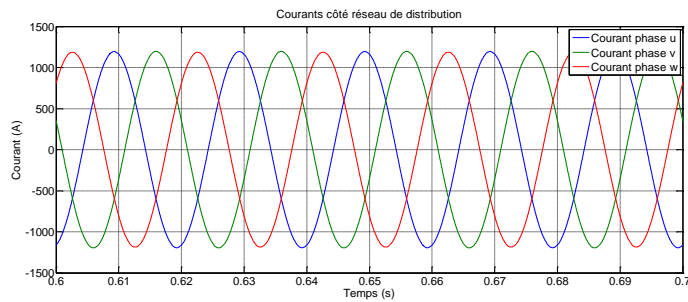


Figure 12 Courants côté réseau de distribution

Les mesures de THD indiquent un taux de distortion harmonique inférieur à 1%, ce qui valide pour le moment l'utilisation d'un contrôleur PR côté onduleur et plus généralement l'utilisation d'une structure MMC back-to-back. Cependant, il est important de noter que le contrôle doit être amélioré afin de diminuer les courants, puisqu'ils sont nettement supérieurs au courant de charge.

5. CONCLUSIONS

Le contrôle d'un convertisseur back-to-back permet de bien répondre aux différentes stimulations d'une charge fortement polluée. De même, il a été montré que l'onduleur MMC piloté par un contrôleur résonant permet de répondre correctement à la sollicitation d'un réseau pollué par de nombreux harmoniques. Il conviendra alors par la suite de s'intéresser au côté redresseur afin de vérifier l'impact sur les courants réseau afin de valider complètement le fonctionnement du système complet, notamment en cas de forte variation de charge. La

réalisation d'un montage complètement back-to-back peut aussi permettre la validation des échanges d'énergie entre les deux composants, notamment lors des phases de freinage et de récupération.

6. REFERENCES

- [1] H. Akagi, « Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC) », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, n° 11, p. 3119- 3130, nov. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2143431.
- [2] H. Akagi, « Multilevel Converters: Fundamental Circuits and Systems », *Proc. IEEE*, vol. 105, n° 11, p. 2048- 2065, nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2682105.
- [3] M. Glinka et R. Marquardt, « A new AC/AC-multilevel converter family applied to a single-phase converter », in *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003.*, Singapore: IEEE, 2003, p. 16- 23. doi: 10.1109/PEDS.2003.1282669.
- [4] A. Verdicchio, « Nouvelle électrification en courant continu moyenne tension pour réseau ferroviaire », 2019.
- [5] H. Cha, T.-K. Vu, et J.-E. Kim, « Design and control of Proportional-Resonant controller based Photovoltaic power conditioning system », in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, sept. 2009, p. 2198- 2205. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316374.
- [6] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, et P. C. Loh, « Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters », *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 153, n° 5, p. 750- 762, sept. 2006, doi: 10.1049/ip-epa:20060008.
- [7] Y. Seferi, S. M. Blair, C. Mester, et B. G. Stewart, « Power Quality Measurement and Active Harmonic Power in 25 kV 50 Hz AC Railway Systems », *Energies*, vol. 13, n° 21, Art. n° 21, janv. 2020, doi: 10.3390/en13215698.
- [8] AFNOR, « NF EN 50163 - Applications ferroviaires, tensions d'alimentation des réseaux de traction ». 2005.