

Evaluation des ondulations de tension au point milieu capacitif pour les convertisseurs à deux et à trois niveaux.

Nisith BHOWMICK⁽¹⁾⁽²⁾, David FREY⁽¹⁾, Seddik BACHA⁽¹⁾, Mustapha DEBBOU⁽²⁾ et François COLET⁽²⁾.

(1) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble.

(2) Institut VEDECOM, 77 Rue des Chantiers, 78000 Versailles.

RESUME - L'arrivée des véhicules électriques est un élément clé dans la gestion du réseau électrique de demain, il peut se recharger en heures creuses et inversement soutenir le réseau en échangeant de l'énergie stockée dans les batteries en période de forte demande, il s'agit alors du concept « Vehicle-to-Grid ». Par ailleurs, ces convertisseurs peuvent également fournir des services réseaux supplémentaires tels que l'injection de puissance réactive, ou de l'équilibrage de phases. Par contre, le développement de chargeurs embarqués impose des contraintes de compacité. Dans cet article, deux structures d'électronique de puissance les plus utilisées pour les chargeurs bidirectionnels des véhicules électriques (deux niveaux et trois niveaux NPC) sont comparées en termes d'ondulations de tension au niveau du point milieu capacitif dans le cas d'échanges de courant équilibrés ou non. L'étude et les comparaisons ont été faites en utilisant les environnements Mathcad (pour la modélisation analytique) et MATLAB/Simulink (pour les simulations temporelles).

Mots-clés—Convertisseur à deux niveaux, Convertisseur à trois niveaux, indice de modulation, réseau triphasé..

1. INTRODUCTION

Les véhicules électriques vivent un tournant de leurs histoires. Voilà déjà un moment que les constructeurs présentent des modèles capables de révolutionner le monde de l'automobile.

L'arrivée massive de véhicules électriques et des infrastructures de recharge auront un impact sur la qualité du réseau électrique, d'où les réflexions sur les fonctionnalités et les structures des chargeurs associées à embarquer au sein des véhicules.

L'étude porte sur l'évaluation des oscillations de tension au point milieu capacitif, dans le cas classique de fonctionnement équilibré, mais également dans le cas d'une injection déséquilibrée de courant afin de permettre un rééquilibrage des phases du réseau. Dans ce dernier cas, le neutre doit nécessairement être connecté au point milieu du pont diviseur capacitif. Deux structures de convertisseur de puissance équipant les chargeurs sont investiguées pour deux cas de réseaux différents.

Les architectures multiniveaux, bien adaptées aux applications hautes puissances à hautes tensions [1], et qui tendent à remplacer les structures classiques à deux niveaux de

tension. Plusieurs topologies de structures multiniveaux existent, les structures multiniveaux NPC [2], les architectures à capacité flottante [3][4][5]. Ces structures ont été déjà acceptées dans différentes applications industrielles [6-9].

2. MODELISATION DES ARCHITECTURES

2.1. Structures étudiées

Les structures approchées dans cette étude sont présentées en figure.1 et 2.

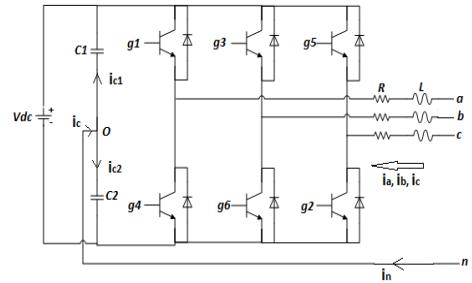


Fig. 1. Structure triphasé à neutre connecté au point milieu.

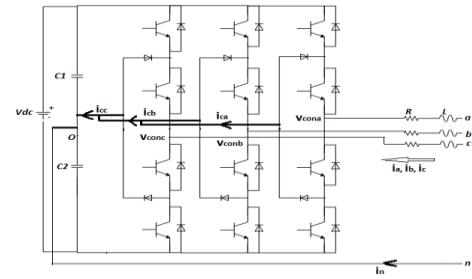


Fig. 2. Structure multiniveau avec neutre connecté.

L'objectif principal de cet article, est d'évaluer l'impact d'une injection de courant de déséquilibre sur le bus continu à point milieu capacitif pour les deux structures de convertisseurs citées ci-dessus.

La structure à deux niveaux de tension permet d'obtenir à une forme d'onde de tension de sortie de valeur $\frac{V_{DC}}{2}$ or $-\frac{V_{DC}}{2}$, tandis que le convertisseur à trois niveaux offre la possibilité d'avoir une tension de sortie à trois niveaux $\frac{V_{DC}}{2}, 0, -\frac{V_{DC}}{2}$.

2.2. Représentation mathématique du réseau triphasé

Afin d'estimer l'impact d'un déséquilibre du réseau sur les ondulations de tension au niveau des structures étudiées, il est vital de modéliser le réseau triphasé d'alimentation et les ondulations de courant et de tension au niveau du bus continu.

Le réseau est considéré équilibré, et la tension entre-phase est fixée (U) à 400V.

Les expressions de la tension phase neutre sont représentées comme suit :

$$v_{sa}(t) = V_m \sin \omega t \quad (1)$$

$$v_{sb}(t) = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2)$$

$$v_{sc}(t) = V_m \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \quad (3)$$

Les puissances actives et réactives sont *respectivement* (P_1 , P_2 et P_3) et (Q_1 , Q_2 et Q_3), tandis que la puissance apparentes sont notés comme (S_1 , S_2 et S_3).

Les courants efficaces sont ainsi exprimés selon :

$$I_{x_{eff}} = \frac{S_x}{\sqrt{2}V_m} \text{ et } \varphi_x = \tan^{-1} \frac{Q_x}{P_x} \text{ où } x \in a, b, c \quad (4)$$

Les courants de phase sont écrits comme suite :

$$i_{sa}(t) = \sqrt{2}I_{a_{eff}} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (5)$$

$$i_{sb}(t) = \sqrt{2}I_{b_{eff}} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_2) \quad (6)$$

$$i_{sc}(t) = \sqrt{2}I_{c_{eff}} \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi_3) \quad (7)$$

Et

$$i_{sn} = -(i_{sa} + i_{sb} + i_{sc}) \quad (8)$$

2.3. Détermination des variations de tension et de courant au niveau du bus continu

Le calcul des ondulations de tension au niveau du bus continu passe par l'estimation du courant dans le bus capacitif.

Pour la structure classique à deux niveaux de tension en fonctionnement équilibré, le courant et la tension au point capacitif sont nuls. Dans le cas d'une injection de courant déséquilibré, ces grandeurs au point milieu sont non nulles vu que le courant au neutre n'est pas nul.

Dans le cas de la structure à trois niveaux de tension, le courant au point milieu capacitif est non seulement le courant du neutre mais aussi de la somme des courants de phase (i_{ca} , i_{cb} et i_{cc}). La modélisation des courants et de la variation de la tension dans le bus continu pour les structures étudiées sera reportée dans l'article final.

Plusieurs scénarios ont été étudiés pour un chargeur de puissance de 22 kW. Dans ce résumé, les auteurs reportent le cas où les échanges de puissance sont équilibrés ou déséquilibrés.

2.3.1. Cas d'un réseau équilibré

Le réseau est équilibré et les convertisseurs transfèrent la même puissance dans chaque phase les constituant.

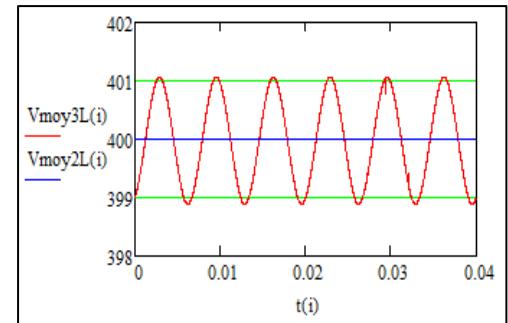


Fig. 3. Ondulations au point milieu capacitif.

La figure 3 montre que le convertisseur trois niveaux présente des ondulations de tension, celles-ci dépendent principalement des niveaux de puissance échangées.

2.3.2. Cas d'une injection déséquilibrée

Les convertisseurs étudiés permettent non seulement le transfert de puissance en régime équilibré mais aussi en régime déséquilibré.

Les puissances transférées P_1 et P_2 sont de 7,33 kW, alors une autre valeur de P_3 est imposée.

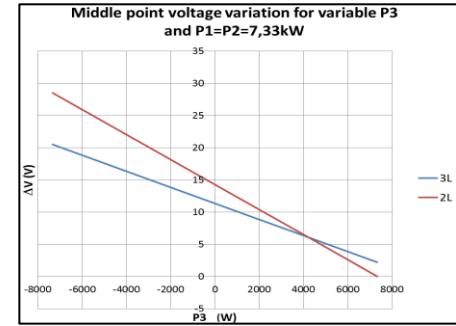


Fig. 4. Variations de tension pour un régime déséquilibré.

De la figure 4, nous constatons que pour des petits déséquilibres (<40%), le convertisseur classique à deux niveaux de tension offre moins d'ondulations que le NPC à trois niveaux, mais ce dernier offre un meilleur comportement dès que le niveau du déséquilibre devient plus important.

3. SIMULATION TEMPOREL SOUS MATLAB/SIMULINK

Afin de valider les résultats précédemment obtenus, des simulations des structures de puissance et leur contrôle associées dans, ont été faites dans MATLAB/Simulink. Le schéma de contrôle développé et appliqué sur les structures étudiées est représenté dans la figure 5.

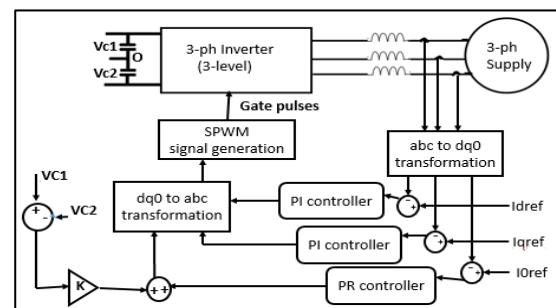


Fig. 5. Schéma de contrôle du bus continu.

Cette stratégie de contrôle est appliquée afin de contrôler la valeur moyenne du point milieu capacitif pour les deux convertisseurs étudiés.

4. VALIDATION EXPERIMENTALE

Afin de valider expérimentalement l'étude énoncée dans ce papier, un banc de test a été réalisé au laboratoire G2ELab à Grenoble (voir la figure. 6).

La partie puissance du dispositif est principalement constituée d'un convertisseur multiniveau NPC trois bras, d'une structure classique à deux niveaux et d'un bus continu à point milieu capacitif.

La partie contrôle commande quant à elle, est basé sur une carte de chez National Instrument. Le kit est composé de deux cartes connectées, l'une munie d'un processeur Power PC et ses entrées/sorties associées, ainsi qu'un FPGA Xilinx Spartan-6.

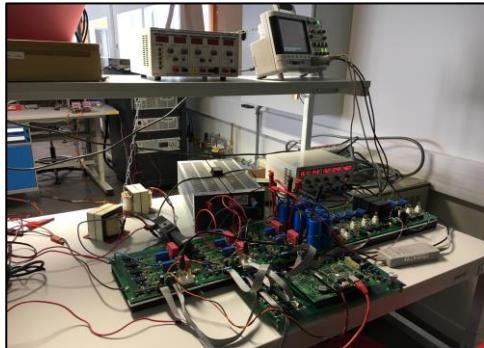


Fig. 6. Banc experimental au niveau du laboartoir G2ELab.

4.1. Structures classiques à deux niveaux de tension

La structure à deux niveau de tension a été étudiée, et ce dans plusieurs scenarios reportés ci dessous.

4.1.1 Fonctionnement sous régime équilibré

Des simulations sous MATLAB/Simulink des différentes conditions ont été menées.

Dans la figure 7, nous reportons les résultats de simulation et expérimentaux issus du banc de test dans un fonctionnement équilibré.

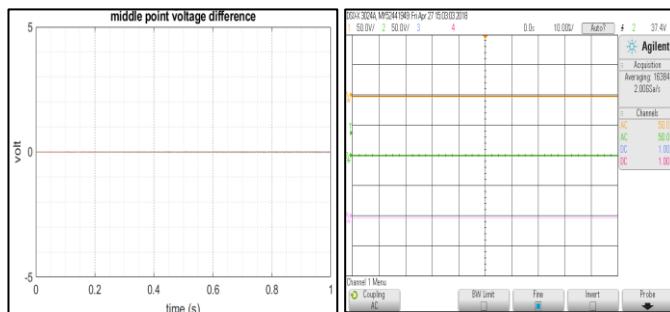


Fig. 7. Résultats des ondulations de tension : (a) : de la simulation, (b) : du banc experimental.

Des résultats obtenus, nous constatons non seulement la concordance des résultats de simulations et expérimentaux, mais aussi l'absence d'ondulation de tension au niveau du bus continu pour la structure à deux niveau. Le courant du neutre nul dans cette architecture, induit à une ondulation de tension nulle.

Plusieurs tests se sont suivis avec différentes conditions de charge, les résultats sont reportés dans la figure 8.

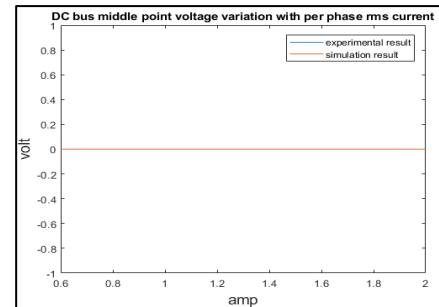


Fig. 8. Les ondulations de tension en fonction du courant dans le bus continu pour le convertisseur classique à deux niveau.

4.1.2 Fonctionnement monphasé à neutre connecté

Afin d'injecter un courant de déséquilibre au niveau du bus continu, le bus capacitif est fixé à 200 V et des tests en monophasé avec le neutre connecté ont été effectués. Les résultats obtenus sont exposés dans la figure 9.

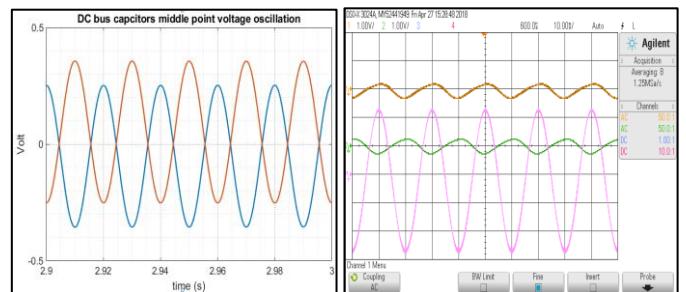


Fig. 9. Résultats obtenus : (a) de la simulation, (b) du banc experimental en fonctionnement monophasé .

Des courbes, nous observons que l'ondulation supérieure et inférieure de la tension varie entre $\pm 0.25V$ et $\pm 0.35V$, ce qui correspond parfaitement aux résultats de mesure obtenus sur le banc de test.

Afin d'étudier l'influence de la variation de l'amplitude du courant sur les ondulations de tension au niveau du bus continu, différents tests sous des conditions de charge différentes sur la phase connectée ont été faits. Les résultats sont montrés dans la figure 10.

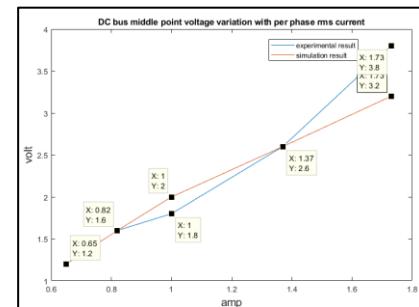


Fig. 10. Variation des ondulations des tension selon la variation du courant

Les résultats de simulation et expérimentaux obtenus, démontrent que l'augmentation du courant au niveau du bus continu implique une augmentation des ondulations de tension au niveau du point milieu capacitif.

4.1.3 Fonctionnement en régime déséquilibré :

Pour émuler le fonctionnement en réseau déséquilibré, les deux phases du convertisseur sont connectées à des charges tandis que l'autre est ouverte. Les résultats de ce scenario sont exposés dans la figure 11.

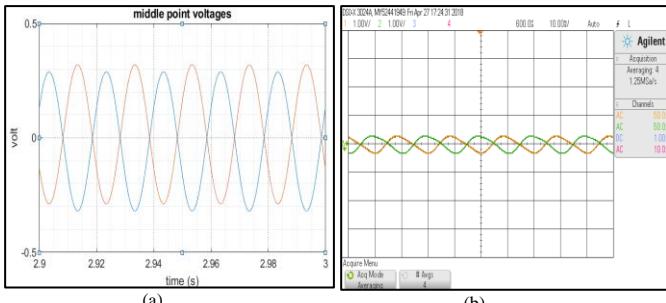


Fig. 11. Resultats de simulation (a) et experimentaux des ondulations de tension (b) en fonctionnement déséquilibré.

Le courant déséquilibre introduit des ondulations de tension au niveau du point milieu capacitif. Des résultats simulations obtenu, nous observons des variations entre $\pm 0.29V$ et $\pm 0.32V$, très similaire à ceux niveau des mesures qui varient entre $\pm 0.25V$ et $\pm 0.32V$.

De même, que les tests précédents, les deux charges connectées aux deux phases du convertisseur ont été variées pour évaluer l'impact de la variation du courant sur les ondulations de tension.

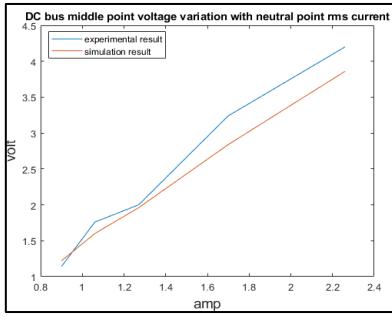


Fig. 12. Augmentation des variation en fonction de la variation du courant.

Des résultats de simulation et expérimentaux reportés dans la figure 12, nous observons l'augmentation des ondulations de la tension augmentent avec l'augmentation du courant au niveau du point milieu capacitif.

4.2. Etude de la structures multiniveaux NPC

Pour objectif de comparaison, La structure trois bras à trois niveaux de tension a été investiguée avec les scenarios que la structure classique.

4.2.1. Fonctionnement en réseau équilibré

Des tests ont été réalisés en fixant le bus continu à 200 V, et les résultats obtenus sont reportés dans la figure 13.

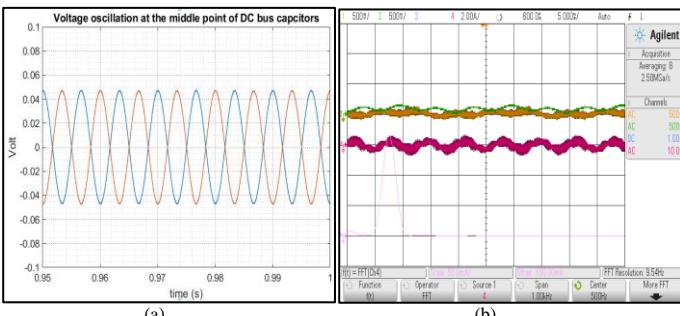


Fig. 13. Resultats de simulation (a) et experimentaux (b) de la structure NPC dans un régime de fonctionnement équilibré.

Nous observons une totale correspondance entre les ondulations de tension expérimentales et de simulations. Ces oscillations varient à $\pm 0.045V$ au niveau du point milieu capacitif dans le cas d'un fonctionnement à régime équilibré.

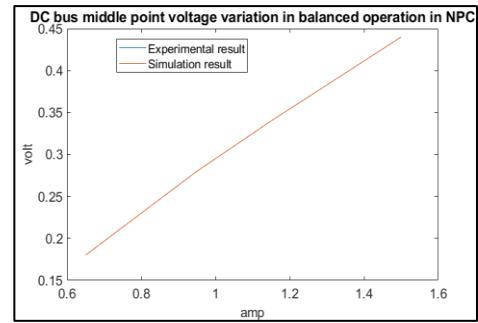


Fig. 14. Augmentation des variations en fonction de la variation du courant.

Des tests de simulation et expérimentaux ont eu lieu afin de d'étudier la sensibilité des ondulations de tension à la variation de la charge.

Des résultats de la figure 14 attestent qu'une augmentation du courant au niveau du point milieu capacitif induit une augmentation d'ondulations de tension.

4.2.2. Fonctionnement en mode monophasé à neutre connecté

Le convertisseur NPC a été investigué dans un fonctionnement monophasé.

Les résultats de simulation et expérimentaux obtenu dans ce régime de fonctionnement sont reportés dans la figure 15, correspondent à des tests avec un bus continu fixé à 200V.

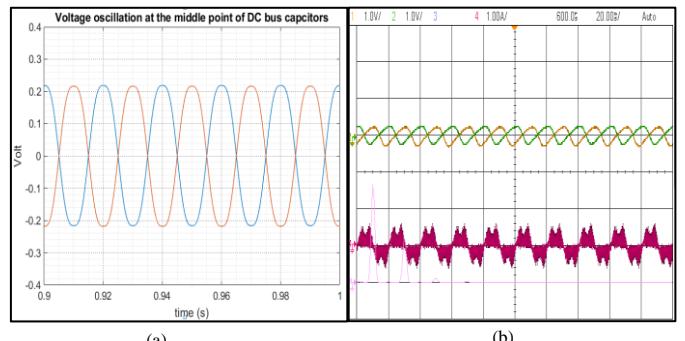


Fig. 15. Resultats de simulation (a) et experimentaux (b) du fonctionnement en mode monophasé de la structure NPC.

Les ondulations de tension aux des bus continus supérieurs et inférieurs du point milieu capacitif varient entre $\pm 0.22V$ en Matlab/Simulink, et sont exactement similaires à celles obtenues au niveau du banc de test.

Ces oscillations sont principalement dues au courant qui circule au niveau du bus capacitif, ces courants sont aux fréquences de 50 Hz et 150 Hz comme le montre la figure 15.B

Avec des conditions de charge différentes, le convertisseur NPC a été étudié dans un mode monophasé à neutre connecté. Les résultats obtenus sont reportés dans la figure 16.

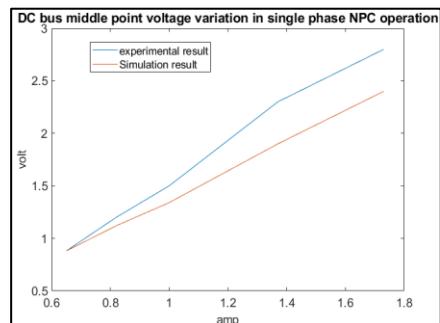


Fig. 16. Augmentation des variation en fonction de la variation du courant.

Les résultats de simulation obtenus de Matlab/Simulink, et ceux des tests expérimentaux sont presque similaires et attestent que les ondulations de tensions au niveau du bus augmentent avec l'augmentation du courant circulant au niveau de ce bus.

4.2.3. Fonctionnement en régime déséquilibré

Ce fonctionnement correspond à un mode où les deux bras du convertisseur NPC sont connectés à des charges, tandis que la troisième phase est ouverte.

Les résultats de simulation et ceux issus du banc expérimental sont représentés dans la figure 17.

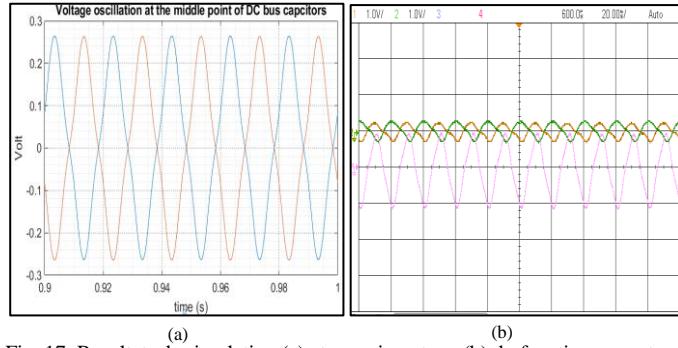


Fig. 17. Résultats de simulation (a) et expérimentaux (b) du fonctionnement du NPC dans un régime déséquilibré.

Les ondulations de tension du condensateur supérieur et inférieur du bus continu de la structure NPC varient de $\pm 0,26$ V en Matlab/Simulink, ces oscillations sont presque égales à celles obtenues à la mesure au banc d'essai qui ondulent de $\pm 0,3$ V.

Ces oscillations sont dues au courant circulant au milieu du bus DC et au point neutre de la charge.

Des tests ont été effectués sur la structure NPC avec différents conditions de charges connectés dans deux phases des bornes de convertisseur tandis que l'autre est ouverte.

Il a été observé de la figure 18, que les oscillations de tension augmentent avec l'augmentation du courant au point médian des condensateurs du bus continu. Les résultats de la simulation et expérimentaux sont assez similaires.

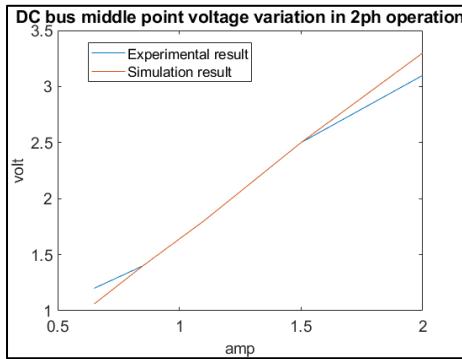


Fig. 18. Augmentation des variation en fonction de la variation du courant.

5. COMPARAISON ENTRE DES LES DEUX STRUCTURES PROPOSEES

Les ondulations de tension au niveau du bus capacitif ont un effet direct non seulement sur le dimensionnement des condensateurs équipant la structure, mais aussi à la stabilité de fonctionnement des architectures d'électronique de puissance.

Afin de choisir la structure de convertisseur la plus adaptée à un régime de fonctionnement donné, une comparaison des ondulations de tension des structures proposées dans ce papier a

été effectuée, et ce sous différents régimes de fonctionnement déjà décrit.

5.1. Comparaison dans le régime équilibré

Une étude comparative expérimentale a été menée afin de valider la sensibilité avec la variation de courant pour les deux structures de convertisseurs étudiés dans cet article.

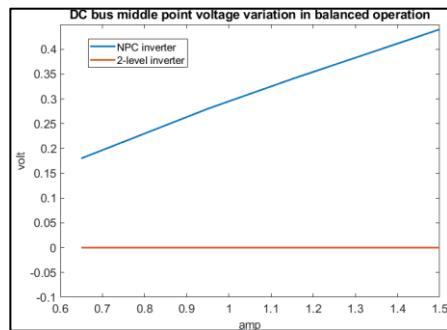


Fig. 19. Augmentation des variation en fonction de la variation du courant.

Les résultats montrés dans la figure 19 correspondant à l'évaluation des ondulations de tension en fonction du courant au niveau du point milieu capacitif. Ceux-ci ont été comparés avec les résultats de simulations obtenus pour la structure à deux niveaux (figure.8) et pour le NPC (figure 14). Nous notons une totale similarité entre les deux types de résultats obtenus.

Dans les conditions de charge équilibrée, les ondulations de tension pour l'onduleur de tension à deux niveaux sont nulles et c'en différentes conditions de charge, ceci est dû à l'absence du courant au niveau du point milieu capacitif.

Pour la structure NPC, les ondulations de tension au niveau de ce point milieu existent en raison de la présence du courant 150 Hz qui circule dans cet endroit. Ces oscillations augmentent avec l'augmentation du courant au point milieu.

5.2. Etude en fonctionnement monophasé

Les deux structures ont été évaluées en termes d'ondulations de tension expérimentalement, et ce dans un fonctionnement monophasé.

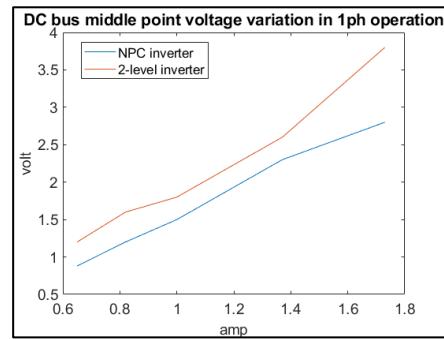


Fig. 20. Augmentation des variation en fonction de la variation du courant.

Les résultats montrés dans la figure 19 correspondant à l'évaluation des ondulations de tension en fonction du courant au niveau du point milieu capacitif. Ceux-ci ont été comparés avec les résultats de simulations obtenus pour la structure à deux niveaux (figure.10) et pour le NPC (figure 16).

Dans les conditions de charge équilibrée, les ondulations de tension pour l'onduleur de tension à deux niveaux sont nulles et c'en différentes conditions de charge, ceci est dû à l'absence du courant au niveau du point milieu capacitif.

Pour la structure NPC, les ondulations de tension au niveau de ce point milieu existent en raison de la présence du courant 150 Hz qui circule dans cet endroit. Ces oscillations augmentent avec l'augmentation du courant au point milieu.

5.3. Comparaison en fonctionnement déséquilibré

Les deux structures ont été évaluées en termes d'ondulations de tension expérimentalement, et ce dans un fonctionnement monophasé.

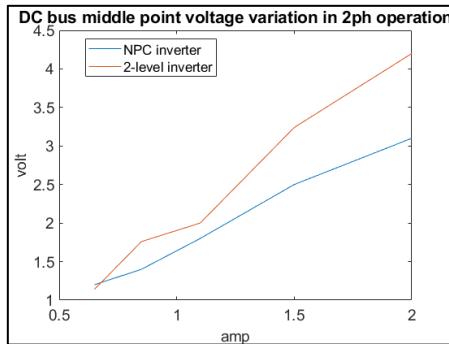


Fig. 21. Augmentation des variation en fonction de la variation du courant.

Les résultats reportés dans la figure 21 correspondent à l'évaluation des ondulations de tension en fonction du courant au niveau du point milieu capacitif. Ceux-ci ont été comparés avec les résultats de simulations obtenus pour la structure à deux niveaux (figure 12) et pour le NPC (figure 18). Ces résultats ont été analysés et des conclusions ont été tirées.

Pour la structure NPC, les ondulations de tension au niveau de ce point milieu existent en raison de la présence du courant 150 Hz qui circule dans cet endroit. Ces oscillations augmentent avec l'augmentation du courant au point milieu.

En effet, la structure à deux niveaux de tension est très bien adaptée dans le fonctionnement équilibré et pour des déséquilibres légers. Une fois que le déséquilibre devient important, la structure NPC à trois niveaux offre un meilleur comportement vis-à-vis des ondulations de tension.

6. CONCLUSIONS

Dans ce papier, une étude comparative en termes d'ondulations de tension au niveau du bus capacitif, pour une structure de convertisseur classique à deux niveaux et à trois niveaux NPC a été proposée, et ce dans des régimes de fonctionnement différents.

Des études de simulation sous Matlab/Simulink pour les deux architectures proposées ont été réalisées, ces résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus au niveau du banc expérimental réalisé au laboratoire G2ELab. Une concordance de résultats a été observée entre ceux de la simulation et ceux issus de l'expérimentation.

L'architecture classique offre par sa structure un meilleur comportement dans le cas de réseau équilibré vu que le NPC génère naturellement un courant au point milieu capacitif, ce qui exige un dimensionnement adapté de bus continu. La structure multiniveaux NPC quant à elle, se trouve très bien adaptée dans le cas de déséquilibre de réseau électrique.

7. REFERENCES

- [1] R.H.Baker and L.H. Bannister, 'Electric Power Converter,' U.S Patent 3 867 643, Feb, 1975.
- [2] Ebrahim Babaei, Mohammad Farhadi Kangarlu, Farshid Najaty Mazgar, "Symmetric and asymmetric multilevel inverter topologies with reduced switching devices", Electric Power System Research, Vol. 86 ,pp122-130, 2012.
- [3] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, "Multilevel inverters for large automotive drives," All Electric Combat Vehicle Second International conference, pp. 209-214, June 8-12, 1997, Dearborn, Michigan.
- [4] O. Husev et al., "Comparison of Impedance-Source Networks for Two and Multilevel Buck-Boost Inverter Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 11, pp. 7564-7579, Nov. 2016.
- [5] A. Salem, E.M. Ahmed, M. Orabi and M. Ahmed, "Study and analysis of new three-phase modular multilevel inverter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 12, pp 7804-7813, Dec. 2016.
- [6] Rahim, N.A., Selvaraj, J., 'Multistring five-level inverter with novel PWM control scheme for PV application', IEEE Trans. Ind. Electron., 2010,57, (6), pp. 2111-2123.
- [7] P. Enjeti and R. Jakkli, "Optimal power control strategies for neutral point clamped (NPC) inverter topology," Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting., San Diego, CA, USA, 1989, pp. 924-930 vol.1.
- [8] J. Rodriguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls and applications," IEEE Transactions of Industrial Electronics, vol.49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [9] O. Husev, C. Roncero-Clemente, E. Romero-Cadaval, D. Vinnikov, and S. Stepenko, "Single phase three-level neutral-point-clamped quasi-Z-source inverter," in IET Power Electronics, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2015.