



HAL
open science

Modélisation et commande d'un Multi Active-Bridge pour l'interfaçage de sources renouvelables

Abdenmour Merrouche, Thierry Talbert, Thierry Martiré, Guillaume
Pellecuer, Jean-Jacques Huselstein, Daniel Matt

► **To cite this version:**

Abdenmour Merrouche, Thierry Talbert, Thierry Martiré, Guillaume Pellecuer, Jean-Jacques Huselstein, et al.. Modélisation et commande d'un Multi Active-Bridge pour l'interfaçage de sources renouvelables. 5ème Symposium de Génie Électrique (SGE 2023), Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance - L2EP, Jul 2023, Lille, France. hal-04157719

HAL Id: hal-04157719

<https://hal.science/hal-04157719v1>

Submitted on 10 Jul 2023

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.

Modélisation et commande d'un Multi Active-Bridge pour l'interfaçage de sources renouvelables

Abdenmour MERROUCHE^{1,2}, Thierry TALBERT¹, Thierry MARTIRÉ², Guillaume PELLECUER², Jean-Jacques HUSELSTEIN², Daniel MATT²

¹Laboratoire PROMES-CNRS, UPR 8521, Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan

²IES Institut d'Électronique, UMR 5214, Université de Montpellier, Montpellier

Contact e-mail : abdenmour.merrouche@promes.cnrs.fr

RESUME – Cet article met en avant l'intérêt de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur de stockage d'énergie dans le contexte de la consommation domestique. L'objectif est d'atteindre l'autonomie énergétique en utilisant une source photovoltaïque. Pour assurer l'autonomie énergétique d'une maison, des échanges d'énergie auront lieu entre les panneaux photovoltaïques, un électrolyseur, une pile à combustible et des batteries. L'interfaçage entre les sources d'énergie renouvelables et les charges électriques sera assuré par un Multi Active-Bridge (MAB) qui utilise un coupleur magnétique et des convertisseurs statiques polyphasés. Le déphasage de la commande des convertisseurs statiques permettra de contrôler le flux d'énergie entre les différents ports du convertisseur. Dans le cadre des tests de contrôle du flux d'énergie, un convertisseur à 3 ports utilisant des convertisseurs à 3 phases sera utilisé.

Mots-clés – 'Multi Active-Bridge', 'multi-sources', 'photovoltaïque', 'hydrogène', 'stockage', 'déphasage', 'électrolyseur', 'pile à combustible'.

1. INTRODUCTION

La transition énergétique nous contraint à nous tourner vers l'utilisation des énergies renouvelables afin de freiner le réchauffement climatique. Le stockage de l'énergie est essentiel pour garantir une disponibilité énergétique continue, étant donné que les sources d'énergie renouvelable sont intermittentes par nature. Les batteries de type lithium-ion constituent un bon moyen de stockage grâce à leur rendement qui atteint jusqu'à 90%. L'hydrogène présente des propriétés physiques intéressantes, notamment une densité d'énergie massique de 33 kWh/kg [1]. Par conséquent, il pourrait être utilisé comme vecteur de stockage d'énergie.

Avec une source d'énergie renouvelable et un électrolyseur, il est possible de produire de l'hydrogène dit "vert" en raison de son origine renouvelable. L'objectif de cette étude est de vérifier la faisabilité d'un convertisseur de puissance permettant d'interconnecter plusieurs sources d'énergie renouvelable (Figure 1) et des charges électriques. La structure choisie pour le convertisseur est un Multi Active-Bridge (MAB). Le MAB présente l'avantage de pouvoir contrôler l'échange d'énergie entre les différentes sources grâce à une commande spécifique pour chaque onduleur [2,3], et il offre une isolation galvanique entre les différentes sources d'énergie [5]. Dans un premier temps, un outil de dimensionnement a été développé pour démontrer l'intérêt de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur de stockage. Ensuite, la modélisation du circuit magnétique du

MAB et la commande du flux d'énergie du convertisseur sont présentées dans une deuxième partie.

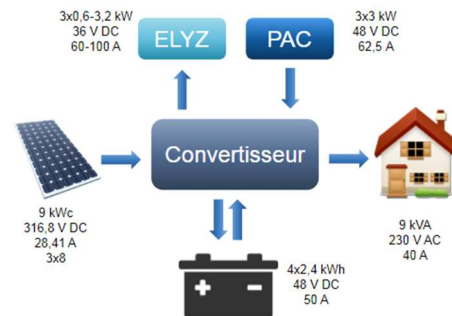


Fig. 1. Synoptique du système multi-sources.

2. VALIDATION DE L'HYDROGENE COMME VECTEUR DE STOCKAGE D'ENERGIE

Le système mis en place fonctionnera de la manière suivante : l'énergie électrique sera générée à partir de panneaux photovoltaïques. Ensuite, cette énergie sera stockée sous forme d'hydrogène à l'aide d'un électrolyseur. L'hydrogène sera ensuite converti en énergie électrique à l'aide d'une pile à combustible lorsque les panneaux photovoltaïques ne produisent plus d'électricité. Pour mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur de stockage d'énergie pour une consommation domestique, un outil de dimensionnement a été développé à l'aide du logiciel Octave. Les données utilisées pour cet outil ont été extraites du bilan électrique 2020 de RTE France et du logiciel Pvsyst. L'outil permet de valider une autonomie en énergie électrique pour une consommation annuelle moyenne d'un foyer de 4 personnes à Perpignan, à partir d'une installation photovoltaïque de 9 kW. Cet outil met en évidence deux faits intéressants : pendant les périodes d'hiver, l'énergie photovoltaïque n'est pas suffisante, tandis qu'en été, le potentiel de production d'énergie photovoltaïque est supérieur à la consommation d'un foyer. Selon l'outil, le surplus d'énergie peut être stocké sous forme d'hydrogène, d'environ 89 kg, ce qui équivaut à une restitution d'énergie électrique d'environ 1437 kWh par an. Cela permettrait d'atteindre une autonomie de consommation de 105% sur l'ensemble de l'année.

3. CONVERTISSEUR MULTI ACTIVE-BRIDGE

Une preuve de concept a été réalisée en combinant trois sources d'énergie à l'aide d'un convertisseur dédié. Les différentes sources de courant continu sont combinées à l'aide

d'un transformateur à 3 ports et des convertisseurs de puissance triphasés associés. Cela est réalisé en additionnant les flux magnétiques produits dans le noyau, qui agit comme un élément de couplage. Les convertisseurs sont réversibles, ce qui signifie que lorsque l'onduleur fonctionne en mode de redressement à modulation de largeur d'impulsion (MLI), il produit un courant continu qui est envoyé à la source ou à la charge à laquelle il est connecté (Figure 2).

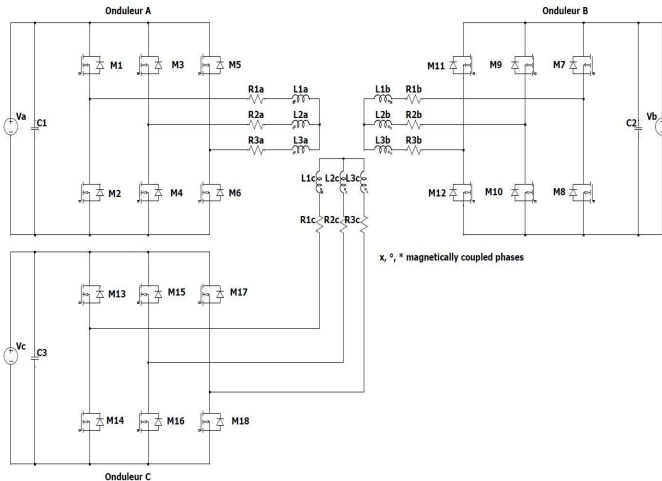


Fig. 2. Schéma du convertisseur.

Chaque système (onduleur + transformateur) peut être représenté par une impédance équivalente, et il est possible de déterminer le déphasage à appliquer à chaque onduleur afin de contrôler les échanges de puissance. Cette représentation doit prendre en compte les inductances propres et mutuelles de chaque phase et de chaque onduleur.

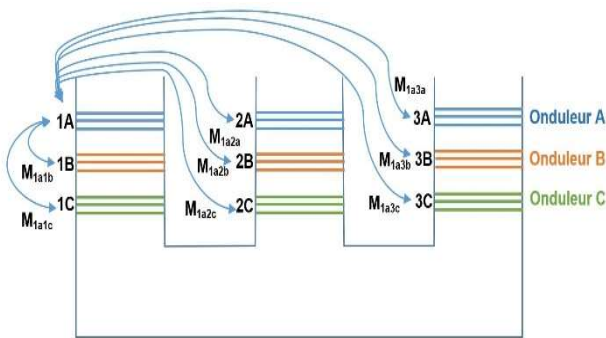


Fig. 3. Représentation de l'inductance propre et mutuelles de la phase 1 de l'onduleur A.

Ainsi, la matrice inductance du transformateur peut être déterminée de cette manière.

$$\begin{pmatrix}
 L_{1a} & M_{1a2a} & M_{1a3a} & M_{1a1b} & M_{1a2b} & M_{1a3b} & M_{1a1c} & M_{1a2c} & M_{1a3c} \\
 M_{2a1a} & L_{2a} & M_{2a3a} & M_{2a1b} & M_{2a2b} & M_{2a3b} & M_{2a1c} & M_{2a2c} & M_{2a3c} \\
 M_{3a1a} & M_{3a2a} & L_{3a} & M_{3a1b} & M_{3a2b} & M_{3a3b} & M_{3a1c} & M_{3a2c} & M_{3a3c} \\
 M_{1b1a} & M_{1b2a} & M_{1b3a} & L_{1b} & M_{1b2b} & M_{1b3b} & M_{1b1c} & M_{1b2c} & M_{1b3c} \\
 M_{2b1a} & M_{2b2a} & M_{2b3a} & M_{2b1b} & L_{2b} & M_{2b3b} & M_{2b1c} & M_{2b2c} & M_{2b3c} \\
 M_{3b1a} & M_{3b2a} & M_{3b3a} & M_{3b1b} & M_{3b2b} & L_{3b} & M_{3b1c} & M_{3b2c} & M_{3b3c} \\
 M_{1c1a} & M_{1c2a} & M_{1c3a} & M_{1c1b} & M_{1c2b} & M_{1c3b} & L_{1c} & M_{1c2c} & M_{1c3c} \\
 M_{2c1a} & M_{2c2a} & M_{2c3a} & M_{2c1b} & M_{2c2b} & M_{2c3b} & M_{2c1c} & L_{2c} & M_{2c3c} \\
 M_{3c1a} & M_{3c2a} & M_{3c3a} & M_{3c1b} & M_{3c2b} & M_{3c3b} & M_{3c1c} & M_{3c2c} & L_{3c}
 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Le transformateur a été modélisé à l'aide du logiciel de simulation par éléments finis COMSOL Multiphysics (Figure

4). Les résultats présentés dans [6] démontrent que les puissances prévues sont atteintes sans entraîner de saturation du noyau magnétique, ce qui confirme la possibilité de transférer de la puissance entre les onduleurs.

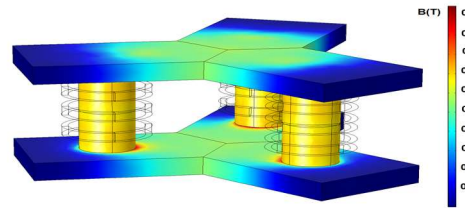


Fig. 4. Simulation électromagnétique 3D du transformateur (33V 50kHz).

Le transformateur a été fabriqué et assemblé en suivant les dimensions utilisées dans la simulation [6]. Le matériau utilisé est le 3C90.

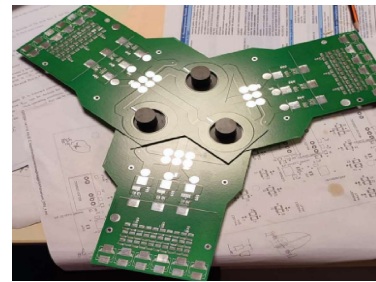
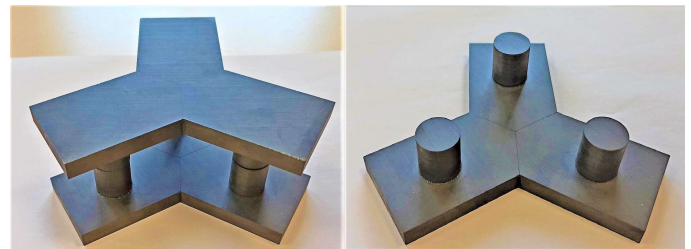


Fig. 5. Transformateur à 3 ports.

Le transformateur est composé de deux pièces superposées qui permettent de placer les cartes PCB. Les parties plates du transformateur sont collées ensemble, formant une structure en étoile à trois branches. Ensuite, les cylindres sont collés pour former les colonnes du transformateur. Le bobinage est intégré dans les PCB de chaque onduleur.

La matrice inductance a été mesurée à l'aide d'un analyseur d'impédance (HP4194a). Dans un cas idéal, la symétrie du transformateur permet d'obtenir une matrice inductance symétrique. Les 81 valeurs de la matrice inductance ont été mesurées à une fréquence de 50 kHz, qui correspond à la fréquence de commutation des onduleurs. Les valeurs de la matrice sont de l'ordre du micro Henry (μH).

$$\begin{pmatrix}
 3.32 & -0.914 & -0.967 & 3 & -1.08 & -1.1 & 2.86 & -1.1 & -1.12 \\
 -0.939 & 3.55 & -1.22 & -1.05 & 3.24 & -1.35 & -1.08 & 3.08 & -1.37 \\
 -0.998 & -1.23 & 3.76 & -1.098 & -1.36 & 3.41 & -1.1 & -1.39 & 3.28 \\
 3.02 & -1.06 & -1.1 & 3.19 & -1.1 & -1.12 & 3.03 & -1.08 & -1.13 \\
 -1.08 & 3.22 & -1.36 & -1.1 & 3.35 & -1.4 & -1.09 & 3.24 & -1.38 \\
 -1.11 & -1.36 & 3.4 & -1.1 & -1.35 & 3.52 & -1.12 & -1.35 & 3.42 \\
 2.91 & -1.08 & -1.13 & 3 & -1.12 & -1.15 & 3.22 & -1.11 & -1.14 \\
 -1.1 & 3.12 & -1.39 & -1.12 & 3.2 & -1.39 & -1.07 & 3.4 & -1.38 \\
 -1.13 & -1.39 & 3.3 & -1.15 & -1.41 & 3.39 & -1.1 & -1.35 & 3.68
 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Dans l'étude [6], il a été démontré qu'avec cette nouvelle approche, il est possible de relier l'inductance de magnétisation et les inductances de fuite du système à la matrice inductance. Dans les références [7] et [8], il est décrit que pour un

transformateur à N enroulements, il peut être représenté par un modèle équivalent en T avec N+1 inductances (Figure 6).

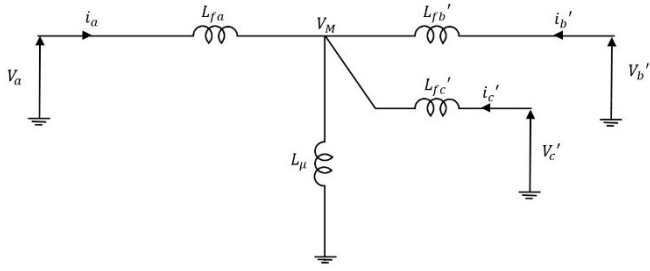


Fig. 6. Modèle T du transformateur.

Avec :

$$K_{ab} = \frac{M_{Cbc}}{K_{ac} \cdot L_{\mu}} = \frac{M_{Cbc}}{M_{Cac}} = 1.037 \quad (3)$$

$$K_{ac} = \frac{M_{Cbc}}{K_{ab} \cdot L_{\mu}} = \frac{M_{Cbc}}{M_{Cab}} = 1.007 \quad (4)$$

$$L_{\mu} = \frac{M_{Cac} \cdot M_{Cab}}{M_{Cbc}} = 3.93 \mu H \quad (5)$$

$$L_{fa} = L_{ca} - \frac{M_{Cac} \cdot M_{Cab}}{M_{Cbc}} = 0.302 \mu H \quad (6)$$

$$L'_{fb} = \frac{L_{cb} - \frac{M_{Cab} \cdot M_{Cbc}}{K_{ab}^2}}{K_{ab}} = 0.051 \mu H \quad (7)$$

$$L'_{fc} = \frac{L_{cc} - \frac{M_{Cac} \cdot M_{Cbc}}{K_{ac}^2}}{K_{ac}} = 0.335 \mu H \quad (8)$$

Si l'on considère le modèle T équivalent en étoile par phase, en prenant la phase 1 de chaque convertisseur comme référence, il est possible de calculer rapidement la puissance fournie par les trois sources d'énergie. V_M représente le potentiel médian, V_a est la tension d'entrée de l'onduleur A et elle sert de référence. V_b et V_c sont les tensions d'entrée des onduleurs B et C, déphasées respectivement par un angle φ_{ab} et φ_{ac} par rapport à V_a .

$$V_M = \frac{V_a \cdot L_{fb'} \cdot L_{fc'} + V_b' \cdot L_{fa} \cdot L_{fc'} + V_c' \cdot L_{fa} \cdot L_{fb'}}{\frac{L_{fa} \cdot L_{fb'} \cdot L_{fc'}}{L_{\mu}} + L_{fb'} \cdot L_{fc'} + L_{fa} \cdot L_{fc'} + L_{fa} \cdot L_{fb'}} \quad (9)$$

En remplaçant les tensions V_a, V_b et V_c par une tension à notation complexe (tel que $V_a = [V_m; 0^\circ]$, $V_b' = [V_m; \varphi_{ab}]$, $V_c' = [V_m; \varphi_{ac}]$) on a :

$$V_M = \frac{V_m \left(\frac{1}{L_{fa}} + \frac{\cos(\varphi_{ab}) + j \sin(\varphi_{ab})}{L_{fb'}} + \frac{\cos(\varphi_{ac}) + j \sin(\varphi_{ac})}{L_{fc'}} \right)}{\frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L_{fa}} + \frac{1}{L_{fb'}} + \frac{1}{L_{fc'}}} \quad (10)$$

Et

$$i_a = \frac{V_a - V_M}{j L_{fa} \omega} \quad (11)$$

On obtient :

$$P_a = - \frac{3V_m^2 \cdot \left(\frac{\sin(\varphi_{ab})}{L'_{fb}} + \frac{\sin(\varphi_{ac})}{L'_{fc}} \right)}{2L_{fa} \cdot \omega \cdot \left(\frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L_{fa}} + \frac{1}{L'_{fb}} + \frac{1}{L'_{fc}} \right)} \quad (12)$$

$$P_b = - \frac{3V_m^2 \cdot \left(\frac{\sin(\varphi_{ab})}{L'_{fb}} + \frac{\sin(\varphi_{ac})}{L'_{fc}} - \sin(\varphi_{ab}) \cdot \left(\frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L_{fa}} + \frac{1}{L'_{fb}} + \frac{1}{L'_{fc}} \right) \right)}{2L'_{fb} \cdot \omega \cdot \left(\frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L_{fa}} + \frac{1}{L'_{fb}} + \frac{1}{L'_{fc}} \right)} \quad (13)$$

$$P_c = - \frac{3V_m^2 \cdot \left(\frac{\sin(\varphi_{ab})}{L'_{fb}} + \frac{\sin(\varphi_{ac})}{L'_{fc}} - \sin(\varphi_{ac}) \cdot \left(\frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L_{fa}} + \frac{1}{L'_{fb}} + \frac{1}{L'_{fc}} \right) \right)}{2L'_{fc} \cdot \omega \cdot \left(\frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L_{fa}} + \frac{1}{L'_{fb}} + \frac{1}{L'_{fc}} \right)} \quad (14)$$

La convention utilisée pour le calcul des puissances est telle que lorsque la puissance est négative, la source absorbe de la puissance, et lorsqu'elle est positive, elle fournit de la puissance. Ainsi, en ajustant le déphasage des commandes des onduleurs, il est possible de gérer le transfert de puissance.

4. SIMULATION DU MODELE DU CONVERTISSEUR

À partir de la matrice inductance on exprime les coefficients de couplage magnétique.

$$k_{xy} = \frac{M_{xy}}{\sqrt{L_x L_y}} \quad (15)$$

Avec le logiciel de simulation Spice, il est possible de modéliser le transformateur en couplant les inductances. L'objectif est de comparer les résultats de simulation entre le convertisseur complet et le modèle T du convertisseur (Figure 7). La simulation du convertisseur complet prend en compte le couplage magnétique des bobines, tandis que la simulation du modèle T du convertisseur ne considère que les inductances de fuite et l'inductance magnétisante. Avec $V_e = 33V$, $\varphi_{ab} = 5^\circ$ et $\varphi_{ac} = 2^\circ$.

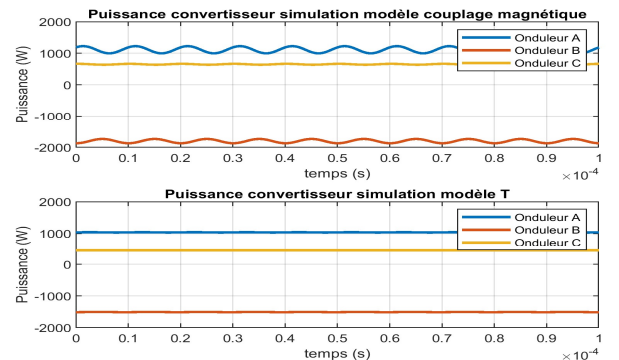


Fig. 7. Comparaison puissances des 3 onduleurs pour $\varphi_{ab}=5^\circ$ et $\varphi_{ac}=2^\circ$ (33V 50kHz).

Pour le calcul des inductances de fuite du modèle T, on suppose généralement que les inductances propres et les inductances mutuelles sont égales pour les trois onduleurs d'une même phase [6]. Cependant, la matrice (1) montre que ce n'est pas le cas, ce qui explique la différence entre les puissances des deux simulations.

À partir des équations (12), (13), (14), $V_e = 33V$ $\varphi_{ab} = 5^\circ$ et $\varphi_{ac} = 2^\circ$ on trouve :

$$P_a = -1033.16 W$$

$$P_b = 1511.70 W$$

$$P_c = -443.06 W$$

La convention utilisée pour ce calcul est que lorsque la puissance est négative, la source absorbe la puissance, et lorsqu'elle est positive, elle fournit de la puissance. Les résultats théoriques et de simulation Spice sont équivalents, ce qui permet de valider les équations théoriques et le modèle T (modèle avec inductances de fuites et inductance magnétisante).

Il est ainsi possible de déterminer un mapping de puissance pour les 3 onduleurs en fonction de φ_{ab} et φ_{ac} .

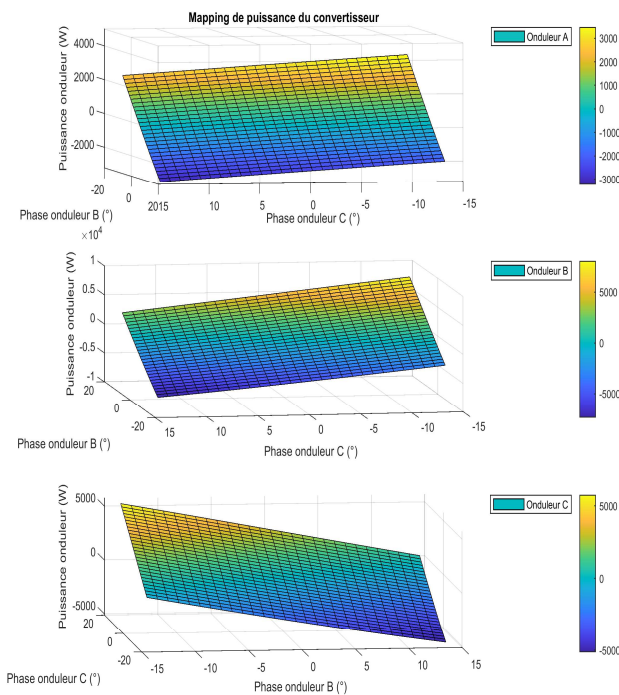


Fig. 8. Mapping de puissance des 3 onduleurs.

La Figure 8 présente le mapping de puissance théorique du convertisseur, avec la tension d'entrée $V_e = 10V$ et la fréquence à 50kHz.

5. TEST EXPERIMENTAL DU CONVERTISSEUR

Le convertisseur a été mis en place pour les premiers essais (Figure 9). Une carte FPGA Altera assure la commande des transistors. Les onduleurs génèrent une tension en créneaux avec une commande décalée.

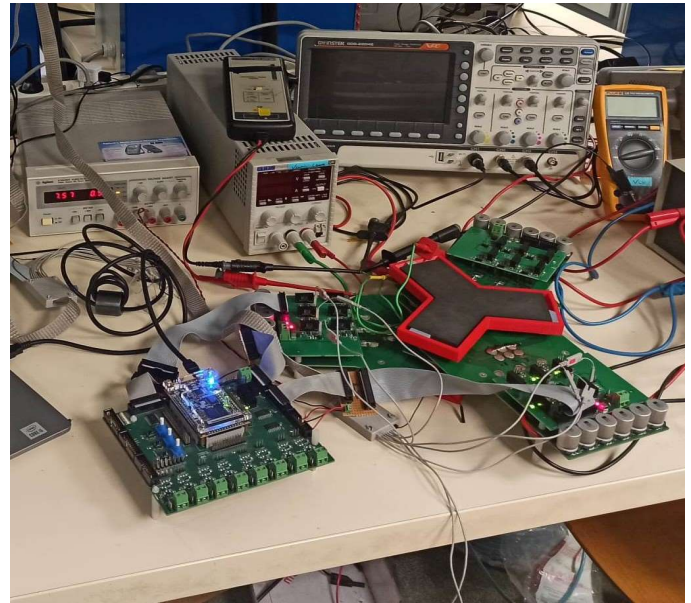


Fig. 9. Photo essais du convertisseur.

On souhaite comparer la simulation par éléments finis du transformateur avec les résultats expérimentaux. Contrairement à la simulation, la tension de sortie des 3 onduleurs n'est pas sinusoïdale, elle est en créneaux. Un essai avec une tension $V_e = 10V$ à une fréquence de 50kHz, et on mesure l'induction magnétique dans chaque jambe du transformateur.

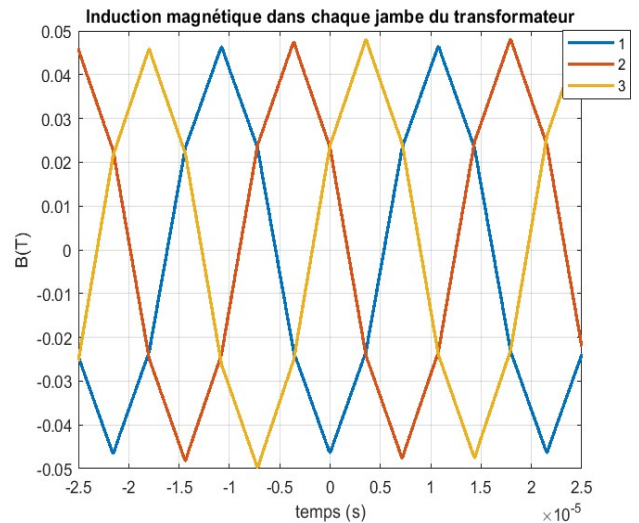


Fig. 10. Induction magnétique au niveau des colonnes du transformateur.

La Figure 10 présente l'induction magnétique mesurée dans les colonnes du transformateur. Pour la simulation dans Comsol, une tension sinusoïdale est appliquée aux bornes des bobines, avec une amplitude égale à celle de la tension fondamentale utilisée dans la partie expérimentale. L'induction magnétique maximale est de 52 mT. L'induction magnétique expérimentale est de 49 mT. On peut conclure que les résultats ont un ordre de grandeur similaire.

Pour comparer les résultats de la simulation aux résultats expérimentaux, une tension d'entrée de 15 V est appliquée à chaque onduleur, avec une fréquence de découpage de 50 kHz.

Aucun déphasage n'est appliqué, c'est-à-dire que $\varphi_{ab} = 0^\circ$ et $\varphi_{ac} = 0^\circ$. Les tensions aux bornes des bobines sont mesurées.

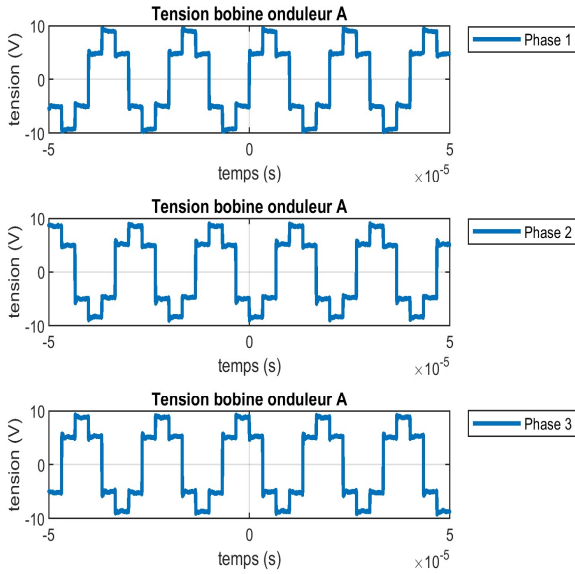


Fig. 11. Tensions phase 1, 2 et 3 onduleur A

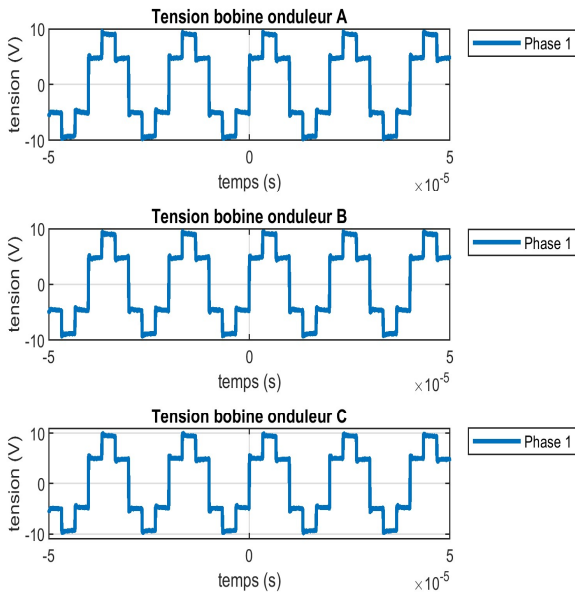


Fig. 12. Tensions phase 1 des onduleurs A, B et C.

Les tensions mesurées aux bornes des bobines de l'onduleur A sont présentées dans la Figure 11. Quant à la Figure 12, elle présente les tensions mesurées aux bornes des bobines de la phase 1 des onduleurs A, B et C. comme la commande des onduleurs est décalée, alors V_{max} :

$$V_{max} = \frac{2}{3} * V_e \quad (16)$$

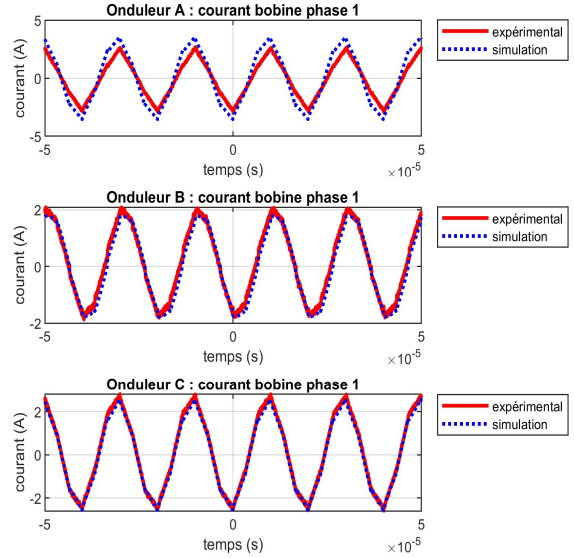


Fig. 13. Courant de la phase 1 au niveau des bobines des 3 onduleurs.

La figure 13 présente la comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations du courant de la phase 1 au niveau des bobines des 3 onduleurs. Les formes d'ondes sont similaires entre les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation. Cependant, on observe une différence au niveau des amplitudes de courant. Cela est dû au fait qu'il est difficile de maîtriser la valeur des inductances de fuite lors de la construction du transformateur, ce qui engendre une différence entre les résultats théoriques et expérimentaux. Pour limiter ce problème une inductance série de valeur supérieur aux inductances de fuites peut être ajoutée. Cette différence d'amplitude est d'autant plus prononcée lorsque l'on applique un déphasage entre les 3 onduleurs.

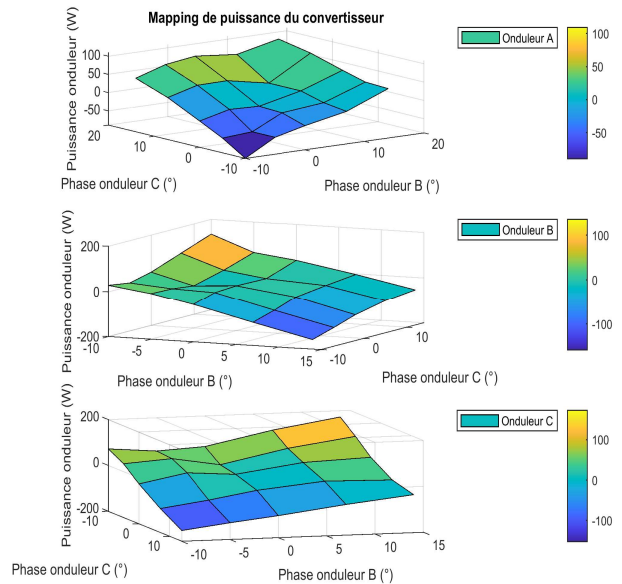


Fig. 14. Mapping de puissance des 3 onduleurs.

Avec une tension d'entrée $V_e = 15V$ et une fréquence à 50kHz, La Figure 14 présente le transfert de puissance entre les onduleurs en fonction du déphasage (φ_{ab} et φ_{ac}) des onduleurs B et C. Le transfert de puissance est déséquilibré entre les onduleurs lorsque 2 onduleurs fournissent ou absorbent de la puissance. Par exemple, l'onduleur A fournit 95W, l'onduleur B fournit 43.2W et l'onduleur C absorbe 103.7W pour un déphasage φ_{ab} de 0° et un déphasage φ_{ac} de 14° . Ce déséquilibre est dû à l'asymétrie entre les inductances de fuite L_{fa} , L_{fb} et L_{fc} , ce qui fait qu'un onduleur peut fournir ou absorber plus de puissance qu'un autre, même s'ils sont en phase.

6. CONCLUSIONS

Cet article présente le dimensionnement et la réalisation d'un système permettant d'interconnecter plusieurs sources d'énergie. Le transformateur a été modélisé à l'aide d'un logiciel de simulation par éléments finis. À partir de la matrice d'inductance, l'inductance magnétisante et les inductances de fuite du système ont été déterminées, ce qui permet d'exprimer les puissances des trois onduleurs en fonction du déphasage. Un prototype de convertisseur de type Multi Active Bridge (MAB) à trois phases a été dimensionné et réalisé pour valider le concept. Dans sa version finale, le système permettra d'interconnecter cinq sources d'énergie. Les mesures expérimentales ont montré des différences par rapport aux résultats des simulations. Cela est dû à la difficulté de maîtrise des valeurs des inductances de fuite lors de la construction du transformateur, ce qui engendre des différences entre les résultats théoriques et expérimentaux.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le programme français "Investissements d'avenir" géré par l'Agence Nationale de la

recherche (ANR) dans le cadre du contrat ANR-10-LABX-22-01 (Labex SOLSTICE).

8. REFERENCES

- [1] WILDGRUBER, Otto. Hydrogen as energy source : an introduction. *Energy & Environment*, 2006, vol. 17, no 2, p. 275-279.
- [2] FALCONES, Sixifo, AYYANAR, Rajapandian, et MAO, Xiaolin. A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage. *IEEE Transactions on Power electronics*, 2012, vol. 28, no 5, p. 2192-2203.
- [3] CHEN, Yenan, WANG, Ping, LI, Haoran, et al. Power flow control in multi-active-bridge converters: Theories and applications. In : 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2019. p. 1500-1507.
- [4] GALESHI, Soleiman, FREY, David, et LEMBEYE, Yves. Efficient and scalable power control in multi-port active-bridge converters. In : 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe). IEEE, 2020. p. P. 1-P. 9.
- [5] YANG, Jiajun, BUTICCHI, Giampaolo, GU, Chunyang, et al. A generalized input impedance model of multiple active bridge converter. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* PP(99).
- [6] G. Pellecuer, T. Martire, M. Petit and B. Loyer, "On-Board Power Management in a Marine Autonomous Surface Vehicle (ASV): Multi-Port Transformer Design," PCIM Europe 2022; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2022, pp. 1-9, doi: 10.30420/565822275.
- [7] C. Sun, N. H. Kutkut, D. W. Novotny, et D. M. Divan, « General equivalent circuit of a multiwinding co-axial winding transformer », in IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, 1995, vol. 3, p. 2507-2514 vol.3. doi: 10.1109/IAS.1995.530622.
- [8] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte and M. A. M. Hendrix, "A Soft-Switched Three-Port Bidirectional Converter for Fuel Cell and Supercapacitor Applications," 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005, pp. 2487-2493,doi: 10.1109/PESC.2005.15819