

Les convertisseurs à résonateurs piézoélectriques : un tour d'horizon.

Emile BIGOT¹, François COSTA² et Ghislain DESPESSE¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Leti, F-38000 Grenoble, France ; ² University Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE
University Paris-Est Créteil, 94010, Créteil, France

RESUME - En vue de la miniaturisation des convertisseurs de puissance, la montée en fréquence semble un axe de travail intéressant. Cependant, cette montée en fréquence est aujourd'hui limitée en raison de la difficulté à obtenir des matériaux magnétiques en haute fréquence (>4MHz). Cet article propose une revue de l'état de l'art sur le remplacement des composants magnétiques par des résonateurs piézoélectriques. Trois axes illustrant le travail réalisé sont présentés : les topologies de conversion, les méthodes de régulation et les matériaux piézoélectriques pour la conversion.

Mots-clés—*Convertisseur DC/DC, résonateur, piézoélectrique, commutation douce*

1. INTRODUCTION

Les nouveaux semi-conducteurs de puissance à grand gap (SiC et GaN) permettent d'envisager des fonctionnements au-delà du mégahertz. Néanmoins, en raison des pertes fer et cuivre, la montée en fréquence des matériaux magnétiques est limitée, ce qui constitue un réel frein à la miniaturisation. Une alternative à ces composants consiste à employer des matériaux piézoélectriques qui, proche de leur résonance mécanique, possèdent un comportement inductif. On connaît alors les transformateurs piézoélectriques développés dès les années 50 et qui ont été massivement employés pour le rétroéclairage des premiers écrans plats [1]. Ces quadripôles se sont révélés très intéressants en raison d'un facteur de forme plat et d'un gain d'élévation de tension très important (jusqu'à un facteur 100). Néanmoins, leur densité de puissance s'est révélée limitée à 40W/cm³ pour des puissances inférieures à 100W [2]. Avec l'arrivée des LEDs, l'intérêt pour ces convertisseurs a fortement diminué. En 2010, un premier article [3] propose l'emploi d'un résonateur piézoélectrique pour la réalisation d'un convertisseur de puissance. On passe alors d'un quadripôle à un dipôle, le comportement souhaité est celui d'une inductance. Le modèle équivalent du résonateur piézoélectrique est alors celui de Van-Dyke (cf. Figure 1). On retrouve une branche électrique C_p en parallèle d'une branche mécanique $\{L_m; C_m; R_m\}$.

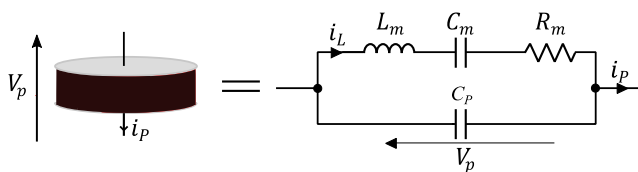


Figure 1 : modèle de Van-Dyke du résonateur piézoélectrique proche d'une résonance mécanique

Juste après la résonance de la branche mécanique f_r et avant l'antirésonance du système f_{ar} , le résonateur ainsi décrit possède une impédance similaire à celle d'une inductance (cf. Figure 2), avec une phase proche de 90° gage d'un fonctionnement à faibles pertes.

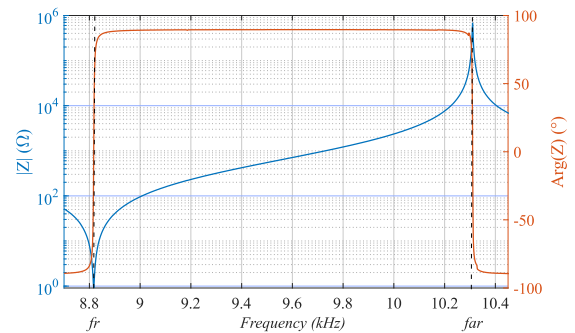


Figure 2 : mesure de l'impédance d'un résonateur piézoélectrique (25Dx2T C213) entre sa fréquence de résonance et d'antirésonance

En 2018, avec l'émergence des composants à grand gap et la difficulté de travailler haut en fréquence avec les composants magnétiques, l'intérêt pour les résonateurs piézoélectriques revient. L'étude [4] examine de nouveaux composants pour l'électronique de puissance. Elle conclut sur une densité de puissance théoriquement plus intéressante pour un fonctionnement haute fréquence. En parallèle, [5] remet au goût du jour la conversion piézoélectrique en formalisant un premier cycle de conversion en six phases adapté à ces composants. Ce cycle alterne des phases dites à tension constante et des phases dites à charge constante où la tension du résonateur évolue librement (cf. Figure 3).

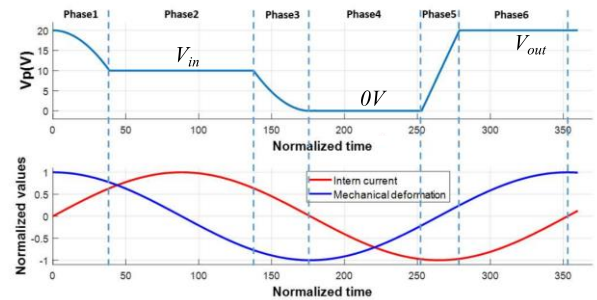


Figure 3 : cycle de conversion de [5] en six-phases

Pour assurer l'équilibre en énergie et en charge du résonateur en régime établi, il est nécessaire d'avoir au moins trois paliers de tension différents sur le cycle de conversion, ce qui impose une topologie avec au moins trois interrupteurs tel qu'illustré à la Figure 4.

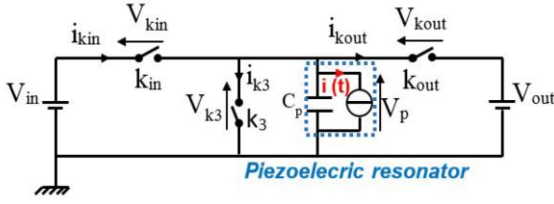


Figure 4 : topologie de conversion de [4] et paliers d'échanges $\{V_{out}, V_{in}, 0 \text{ V}\}$

Dans cet article nous proposons tout d'abord de décrire l'évolution des topologies de conversion en partant de celle vue en Figure 4. Puis dans une seconde partie, nous décrivons les différentes méthodes de contrôle développées pour opérer les cycles en six phases qui peuvent apparaître comme complexes. Enfin, une dernière partie traitera des performances des matériaux piézoélectriques pour la conversion de puissance.

2. EVOLUTION DES TOPOLOGIES DE CONVERSION

Le résonateur piézoélectrique se modélise de manière classique autour d'un mode de résonance au moyen du modèle de Van-Dyke présenté en Figure 1. De ce modèle on comprend que c'est la branche mécanique qui est en charge du transfert de puissance. De manière pratique on est alors capable d'établir un lien direct entre l'intégrale des contraintes dans le résonateur et le courant i_L pulsé par celui-ci à la fréquence de travail. Le courant dans la branche mécanique s'écrit alors de la sorte :

$$i_L(t) = I_L \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\alpha = \omega t$$

Ensuite en reprenant les contraintes d'un cycle de conversion classique, i.e. équilibré en énergie, en charge et dont le potentiel v_p aux bornes du résonateur piézoélectrique évolue de manière douce. Ce qui induit la réalisation d'un cycle de conversion qui alterne entre des phases à tension constante, qui transfère de l'énergie, et des phases à charge constante, qui laisse évoluer la tension du résonateur de manière libre tel que présenté en Figure 5.

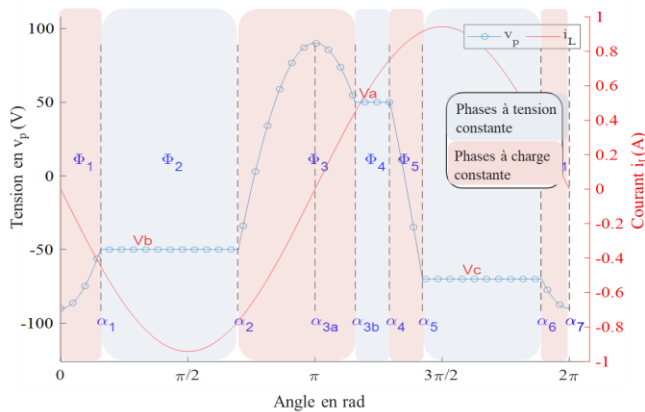


Figure 5: cycle de conversion en six phases

Lors d'un cycle de fonctionnement, une part du courant dit de circulation $I_{circulation}$ permet d'inverser la tension v_p du résonateur pour éviter une fermeture brutale de celle-ci, ce qui serait fortement générateur de pertes. Une seconde part du courant dit utile I_{utile} permet de transférer de la puissance de

l'entrée à la sortie du convertisseur. Le courant interne I_L se divise alors de la sorte :

$$I_L = I_{circulation} + I_{utile} \quad (2)$$

$$I_{circulation} = \frac{\Delta V_{PR} C_p \omega}{2} \quad (3)$$

$$I_{utile} = K I_{out} \quad (4)$$

On introduit alors ΔV_{PR} l'excursion de tension totale réalisée par le résonateur sur un cycle de conversion et K le taux de charge où d'utilisation du résonateur qui dépend directement du nombre de palier permettant de fournir des charges à la sortie du convertisseur [6].

De manière usuelle la tenue au claquage des diélectriques employés pour les résonateurs piézoélectriques est très importante ($>1 \text{ kV/mm}$). En pratique la limite d'emploi des résonateurs se fait plus dans leur capacité à entretenir un courant I_L important en leur sein qu'à tenir une forte tension à leurs bornes. On peut donc dire que pour un I_{Lmax} donné et une fonction déterminée (abaisseur, élévateur...), la topologie de conversion est optimale du point de vue du résonateur si elle minimise au point de fonctionnement nominal son courant interne I_L .

Depuis 2018, les nombreux acteurs entrés dans le domaine ont proposé tour à tour des structures de conversion optimisant le courant dans le résonateur pour un point de fonctionnement donné. On retrouve ainsi la structure de conversion de [6] en Figure 6 qui permet d'optimiser le courant dans le résonateur en insérant un palier de transfert de puissance direct V_{in} - V_{out} permettant à la fois d'emmagasiner de l'énergie et de fournir de la puissance à la sortie. Ce fonctionnement n'est cependant permis que sur des niveaux d'abaissement tels que $V_{in} > 2V_{out}$.

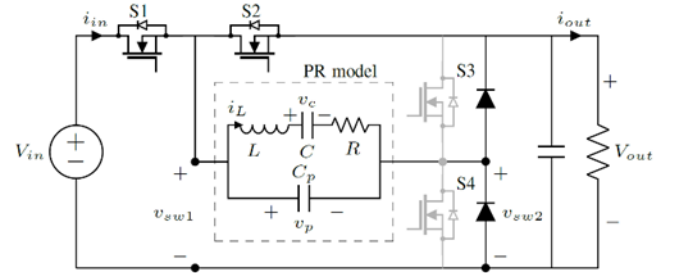


Figure 6 : topologie de conversion étudiée dans [6] et paliers d'échanges $\{V_{out}, V_{in}-V_{out}, 0 \text{ V}\}$

Afin d'optimiser le transfert de charge, [7] ajoute un bras de connexion autour du résonateur permettant la connexion au palier de tension $-V_{out}$ et donc d'optimiser le transfert de charge. Cependant, dans le cas d'un très fort abaissement de tension une part significative des charges circulantes dans la branche mécanique du résonateur sert uniquement à inverser la tension aux bornes du résonateur. Pour contrebalancer cet effet [8] propose d'adapter la topologie présentée en Figure 6 en s'inspirant des topologies *flying-capacitor* ou à capacité commuté pour obtenir la topologie de la Figure 7.

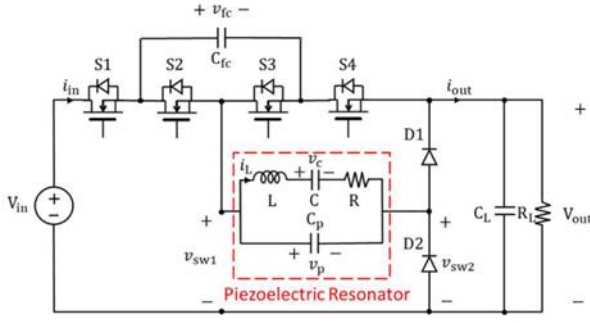


Figure 7 : topologie fortement abaisseuse présentée dans [8]

Cette topologie divise la tension d'entrée du résonateur d'un facteur deux ce qui réduit l'excursion de tension réalisée par celui-ci et donc la part de courant de circulation présent en son sein. Une autre solution apportée par [9] emploie la propriété capacitive des résonateurs piézoélectriques qui bloque les polarisations DC ce qui permet une association simple de plusieurs cellules de conversion sur des montages série/parallèle comme présenté en Figure 8.

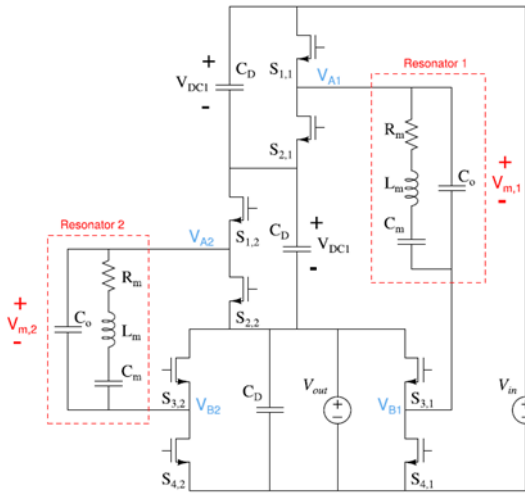


Figure 8 : topologie de conversion avec montage série parallèle des résonateurs présentés dans [9]

Enfin l'article [10] propose une topologie de conversion présentée en Figure 9 qui tire parti de l'effet capacitif des résonateurs piézoélectriques pour isoler un primaire d'un secondaire.

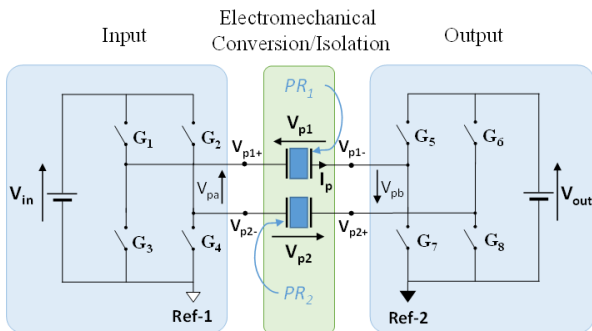


Figure 9 : topologie de conversion isolée DB-IPRC présentée dans [10]

En conclusion, dans cette partie nous avons pu observer que de nombreuses topologies de conversion ont été développées au cours de ces dernières années permettant d'optimiser le taux de courant disponible dans les résonateurs. Nous avons aussi vu qu'en employant la propriété native des résonateurs

piézoélectrique à bloquer les tensions DC, il est possible de construire des structures soit multiniveau soit isolée.

3. EVOLUTION SUR LES METHODES DE REGULATION

Une fois la topologie de conversion choisie un point important reste le contrôle des cycles de conversion appliqués aux résonateurs piézoélectriques. Nous observons dans le papier [11], Figure 10, une proposition de régulation du cycle en six phases. Cette méthode de régulation monitor le courant i_L du résonateur pour synchroniser l'ouverture de deux interrupteurs. Elle ajuste ensuite les temps de connexion aux paliers à tension constante $\{V_{in}-V_{out}, V_{out}\}$ afin de réguler la tension de sortie en modulant l'apport d'énergie au résonateur piézoélectrique.

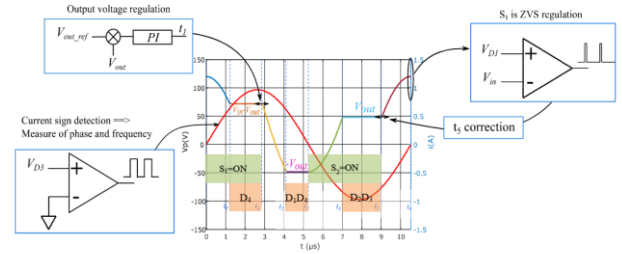


Figure 10 : boucle de régulation présentée dans[11]

Cette méthode opère le résonateur piézoélectrique sur son point de fonctionnement optimal sans nécessiter beaucoup de connaissance a priori du système. Cependant la synchronisation sur le courant i_L qui n'est pas directement accessible la rend complexe d'implémentation en haute fréquence.

Une seconde méthode proposée dans [12] opère le convertisseur sur un point de fonctionnement bien connu un certain laps de temps. La régulation se fait au moyen d'un simple montage à hystérésis qui allume ou éteint le convertisseur comme présenté en Figure 11.

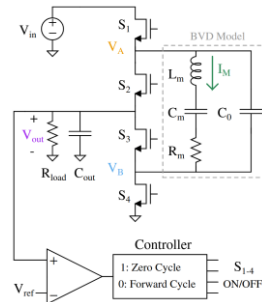


Figure 11 : boucle de régulation proposée dans [12]

Cette solution de régulation est simple de mise en œuvre ce qui permet de construire un schéma de régulation en très haute fréquence. Cependant, par construction, une ondulation de tension résiduelle est présente à la sortie. De même, le résonateur n'est pas nécessairement employé sur son point de fonctionnement optimal.

Enfin une dernière solution présentée dans [13], construit un nouveau cycle de conversion symétrique en huit phases, présenté en Figure 12, qui, par construction, équilibre le bilan d'énergie du résonateur par demi période de résonance mécanique. Ce faisant, seuls deux variables demeurent nécessaires au pilotage du cycle : un temps mort t_d et la fréquence du cycle de conversion f_{cycle} . En apposant un modèle mathématique au système, le temps mort est estimable en fonction du point de fonctionnement du dit système $\{V_{in}, V_{out}, I_{out}\}$, de même pour la

fréquence de conversion f_{cycle} . Finalement, une seule boucle de régulation en charge de piloter la tension de sortie est nécessaire.

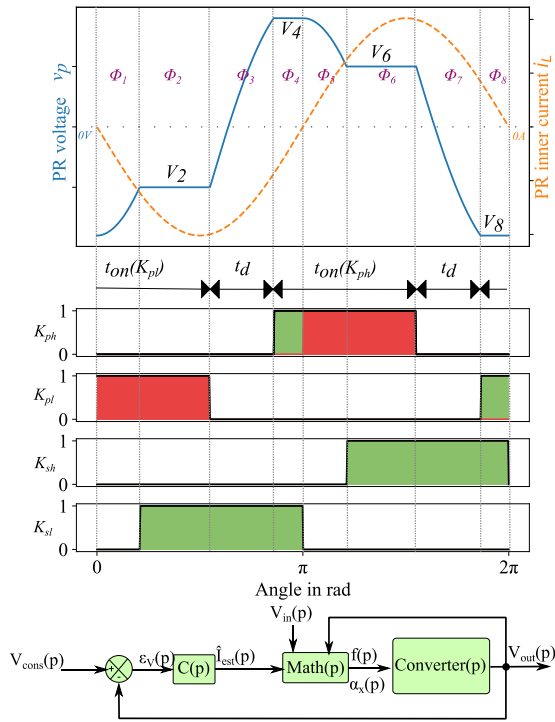


Figure 12 : monoboucle de régulation et nouveau cycle de conversion naturellement équilibré en énergie tel que présenté dans [13]

Ce nouveau cycle de conversion en huit phases peut s'appliquer sur de nombreuses topologies de conversion de la littérature.

Cette partie retrace l'histoire sur les méthodes de régulation spécifiquement développées pour le contrôle des convertisseurs de puissance employant des résonateurs piézoélectriques. La première solution proposée dans [11] mesure rigoureusement les variables du résonateur, *i. e.* le courant et la tension à ses bornes, pour contrôler le pilotage des interrupteurs de puissance. La seconde méthode [12], opère le résonateur sur un point connu en avance de phase et l'applique un certain laps de temps. Enfin, la dernière méthode [13] propose l'emploi d'un cycle de conversion à nombre de phases augmenté en vu de simplifier le pilotage, simplifiant la mise en œuvre de ces composants en haute fréquence.

4. MATERIAUX ET PERFORMANCES

Un des attraits pour la conversion piézoélectrique réside dans les gains potentiels sur les performances des convertisseurs de puissance en terme de rendement et de densité volumique de puissance [4]. En effet, les matériaux piézoélectriques ne sont pas soumis aux mêmes typologies de pertes que les matériaux magnétiques classiques (*i. e.* pertes fer et pertes cuivre). Par ailleurs de par leur important facteur de qualité mécanique Q_m et leur bon coefficient de couplage piézoélectrique k_{eff} , ces matériaux exhibent un facteur de qualité électrique Q_{elec} élevé (>30) qui présage d'un faible taux de pertes leur de leur emploi dans un convertisseur de puissance.

Jusqu'à présent, les recherches s'orientent vers l'emploi de matériaux ferroélectriques qui présentent un important couplage électromécanique. Deux matériaux ressortent alors, soit les titano-zirconates de plomb durs (PZT), soit le Lithium de Niobate (LNO). Les PZTs possèdent des permittivités

diélectriques importantes (~ 1000), ce qui permet pour une amplitude de tension appliquée à leur borne (soit un cycle de conversion) d'entretenir un courant interne I_L important pour des fréquences inférieures au mégahertz. On peut donc les employer sur des modes de résonance géométriques premiers, par exemple le mode radial d'un disque [10], [14]. Pour ce qui est du matériau LNO, sa permittivité dépend de l'orientation cristalline choisie (Y-163, Y36, X...), elle se situe cependant autour de 40. Ainsi pour établir un courant important étant donné une amplitude de tension appliquée aux bornes de celui-ci, il est nécessaire de l'employer à des fréquences élevées ($>3\text{MHz}$) [15]. Le résonateur est alors opéré sur un mode de résonance supérieur, par exemple du cisaillement ou de l'élongation en épaisseur. Outre les plages de fréquences de fonctionnement différente, ces matériaux diffèrent de par leurs procédés de fabrication. Les poudres de PZTs sont mises en forme après une étape d'agglomération par frittage, une structure polycristalline est ainsi obtenue, tandis que le LNO est issu du procédé de croissance de Czochralski, il en résulte un monocristal. Au travers de la Figure 13 nous avons caractérisé en puissance une série d'échantillons de PZT disponibles dans le commerce pour un fonctionnement en très faible impédance proche de leur fréquence de résonance sur un mode d'extension radial. Nous avons alors pu déterminer que pour l'ensemble des matériaux du commerce une non linéarité significative sur les pertes dans les matériaux émerge pour un courant interne I_L de 0.4 A d'amplitude.

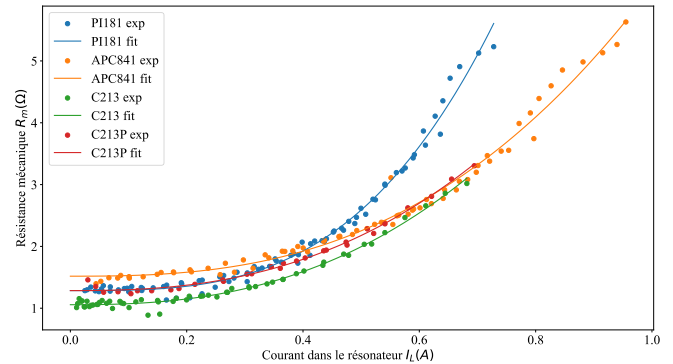


Figure 13 : caractérisation de résonateurs piézoélectriques en PZT en mode radial autour de 100 kHz

Dans [16], une densité de puissance de 1 kW/cm^3 est obtenue sur un résonateur PZT APC841 de 4.75 mm de diamètre et 0.67 mm d'épaisseur. Le mode employé est aussi un mode radial qui se situe à 493 kHz. La densité de puissance obtenue est alors supérieure à celle des disques fonctionnant sur un mode radial à 100 kHz, la montée en fréquence est donc bénéfique. Néanmoins contrairement aux inductances magnétiques, pour monter en fréquence en conservant un même mode de résonance mécanique les dimensions matérielles du résonateur piézoélectrique sont réduites. Ainsi malgré un fort refroidissement et une excellente densité de puissance, [16] ne convertit que 12 W sous une tension de sortie de 150 V.

Afin de parvenir à monter en puissance et en fréquence il est alors proposé de travailler sur des modes de résonance indépendants des surfaces d'électrodes. Ainsi les résonateurs LNO qui en raison de leur faible permittivité doivent être employés en haute fréquence sont dès leurs premiers emplois mis en résonance sur des modes d'épaisseur pour des fréquences supérieures à 3 MHz [17]. Néanmoins, s'agissant de plaques opérant sur des modes de résonance mécanique, une pluralité de déformés et donc de mode de résonance existent en leur sein.

Ces modes et leurs harmoniques perturbent alors la bande inductive de travail en rabaisant localement la phase de l'impédance ce qui dégrade fortement les performances de ces résonateurs tel que le montre la Figure 14 de [17].

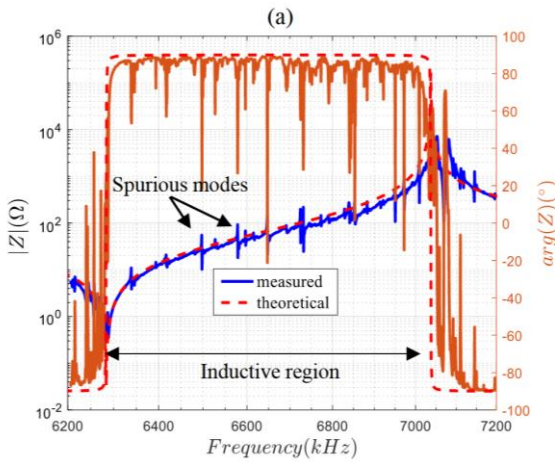


Figure 14 : impédance caractéristique d'un résonateur LNO sans précaution sur les modes de résonances inférieures [17]

Néanmoins, avec un design adéquat, l'université de Stanford et l'université de Texas développe dans [15] un résonateur LNO exempt de modes de résonance parasites. Le design est présenté en Figure 15.

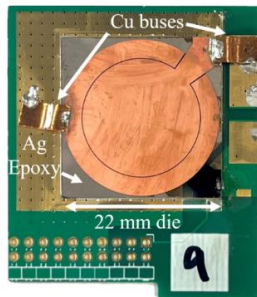


Figure 15 : résonateur en LNO dimensionner pour annuler les modes de résonance parasites [15]

L'université de Stanford et l'université de Texas parviennent alors en refroidissant ces résonateurs à transférer la puissance de 1 kW sur un seul résonateur avec un rendement de conversion à la puissance maximum de 97.5 %. La densité de puissance sur le composant inductif seul est alors de 5.7 kW/cm³. Ainsi contrairement aux résonateurs PZT fonctionnant en mode radial dont la puissance transférable était réduite lors d'un fonctionnement en haute densité, les composant LNO fonctionnant sur un mode épaisseur parviennent à transmettre une quantité de puissance phénoménale tout en maintenant un taux de pertes relativement faible.

5. CONCLUSIONS

Dans le cadre cette revue rapide des convertisseurs intégrant des résonateurs piézoélectriques, nous avons divisé notre étude sur ces convertisseurs en trois axes : l'agencement des interrupteurs de puissance pour la mise en œuvre du convertisseur de puissance, la régulation des convertisseurs de puissance intégrant des résonateurs piézoélectriques et la problématique même des résonateurs piézoélectriques que l'on utilise autour d'un mode de résonance mécanique ce qui implique une physique et donc un dimensionnement qui diffère fortement des composants magnétiques classiques.

En termes de perspectives, nous avons compris que les fonctionnements de ces matériaux sur des modes « basses fréquence » (autour de 100 kHz) ont montré leurs limites ce qui implique, si l'on cherche à densifier le composant passif tout en maintenant une puissance transférée importante, l'emploi d'un du résonateur sur un mode de travail d'épaisseur afin d'obtenir une fréquence de travail au-delà du mégahertz. Bien entendu, l'ensemble les problématiques de modes parasites et de pilotage associée sont alors accentuées. En conclusion ce nouveau composant de l'électronique de puissance ouvre un nouveau pan de recherche d'intérêt pour cette branche du génie électrique avec notamment des obstacles sur leur mise en œuvre et des caractérisations plus fines qui restent à réaliser.

6. REFERENCES

- [1] F. COSTA and D. VASIC, 'Transformateurs piézoélectriques en électronique de puissance', *Techniques de l'ingénieur Conversion de l'énergie électrique*, vol. base documentaire: TIP301WEB., no. ref. article : d3015. Editions T.I., 2024. doi: 10.51257/a-v2-d3015.
- [2] A. Vazquez Carazo, 'Piezoelectric Transformers: An Historical Review', *Actuators*, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2016, doi: 10.3390/act5020012.
- [3] G.-S. Seo, J.-W. Shin, and B. Cho, 'A magnetic component-less series resonant converter using a piezoelectric transducer for low profile application', Jul. 2010, pp. 2810–2814. doi: 10.1109/IPEC.2010.5543773.
- [4] P. A. Kyaw, A. L. F. Stein, and C. R. Sullivan, 'Fundamental Examination of Multiple Potential Passive Component Technologies for Future Power Electronics', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10708–10722, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2776609.
- [5] B. Pollet, F. Costa, and G. Despesse, 'A new inductorless DC-DC piezoelectric flyback converter', in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Feb. 2018, pp. 585–590. doi: 10.1109/ICIT.2018.8352243.
- [6] J. D. Boles, J. J. Piel, and D. J. Perreault, 'Enumeration and Analysis of DC-DC Converter Implementations Based on Piezoelectric Resonators', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 129–145, Jan. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3004147.
- [7] M. TOUHAMI, G. DESPESE, and F. COSTA, 'A New Topology of DC-DC Converter Based On Piezoelectric Resonator', in *2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Nov. 2020, pp. 1–7. doi: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265767.
- [8] Q. Li, Y. Hou, and K. K. Afridi, 'Merged Switched-Capacitor Piezoelectric-Resonator Based DC-DC Converter with High Voltage Conversion Ratio', *2023 IEEE 24th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1–8, Jun. 2023, doi: 10.1109/COMPEL52896.2023.10221132.
- [9] W. D. Braun et al., 'A Stacked Piezoelectric Converter Using a Segmented IDT Lithium Niobate Resonator', *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 5, pp. 286–294, 2024, doi: 10.1109/OJPEL.2024.3365029.
- [10] V. Breton, E. Bigot, G. Despesse, and F. Costa, 'A New Isolated Topology of DC-DC Converter Based on Piezoelectric Resonators', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 10012–10025, Aug. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3276478.
- [11] M. Touhami, G. Despesse, F. Costa, and B. Pollet, 'Implementation of Control Strategy for Step-down DC-DC Converter Based on Piezoelectric Resonator', in *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, Sep. 2020, pp. 1–9. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215910.
- [12] E. A. Stolt, W. D. Braun, and J. M. Rivas-Davila, 'Forward-Zero Cycle Closed-Loop Control of Piezoelectric Resonator DC-DC Converters', in *2022 IEEE 23rd Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Jun. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/COMPEL53829.2022.9829965.
- [13] E. Bigot, G. Despesse, V. Breton, and F. Costa, 'A new closed-loop regulation method dedicated to piezoelectric resonators based isolated DC-DC converter', in *13th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2024)*, Jun. 2024, pp. 146–153. doi: 10.1049/icp.2024.2150.
- [14] J. D. Boles, J. E. Bonavia, P. L. Acosta, Y. Ramadass, J. Lang, and D. J. Perreault, 'Evaluating Piezoelectric Materials and Vibration Modes for Power Conversion', *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1–1, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3114350.
- [15] E. Stolt, W. Braun, K. Nguyen, V. Chulukhadze, R. Lu, and J. Rivas-Davila, 'A Spurious-Free Piezoelectric Resonator Based 3.2 kW DC-DC Converter for EV On-Board Chargers', *IEEE Transactions on Power*

- Electronics*, vol. 39, no. 2, pp. 2478–2488, Feb. 2024, doi: 10.1109/TPEL.2023.3334211.
- [16] J. D. Boles, J. E. Bonavia, J. H. Lang, and D. J. Perreault, ‘A Piezoelectric-Resonator-Based DC–DC Converter Demonstrating 1 kW/cm Resonator Power Density’, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 3, pp. 2811–2815, Mar. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3217773.
- [17] M. Touhami *et al.*, ‘Piezoelectric Materials for the DC-DC Converters Based on Piezoelectric Resonators’, in *2021 IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics (COMPEL)*, Nov. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/COMPEL52922.2021.9645999.