



HAL
open science

Etude de deux structures d'onduleurs Hautes Fréquences (HF) et Très Hautes Fréquences (THF) à transistor GaN

Rawad Makhoul, Xavier Maynard, Pierre Perichon, Davide Frey,
Pierre-Olivier Jeannin, Yves Lembeye

► To cite this version:

Rawad Makhoul, Xavier Maynard, Pierre Perichon, Davide Frey, Pierre-Olivier Jeannin, et al.. Etude de deux structures d'onduleurs Hautes Fréquences (HF) et Très Hautes Fréquences (THF) à transistor GaN. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981856

HAL Id: hal-02981856

<https://hal.science/hal-02981856>

Submitted on 28 Oct 2020

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.

Etude et réalisation de deux structures d'onduleurs Hautes Fréquences (HF) et Très Hautes Fréquences (VHF) à transistor GaN

Rawad Makhoul(*), Xavier Maynard(*), Pierre Perichon(*), David Frey(**), Pierre-Olivier Jeannin(**), Yves Lembeye(**)
 (*) CEA Grenoble,

(**) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

RESUME -L'appareillage électronique tend de plus en plus à la miniaturisation. L'alimentation électrique de ces appareils électroniques doit donc suivre cette même tendance. Une façon de rendre les alimentations électriques à découpage plus petites, est d'en augmenter la fréquence de fonctionnement. L'augmentation de la fréquence de découpage jusqu'à des dizaines de Mégahertz, permet également de réaliser des inductances sans fer voire de réduire la masse du convertisseur en imprimant les inductances sur le circuit imprimé (PCB). Cependant, lorsque ces alimentations à découpage opèrent à plus de 10MHz, les structures utilisées communément, mêmes les structures résonnantes, ne sont plus adaptées. L'objectif de cet article est de présenter et de comparer deux structures d'onduleurs à résonance adaptées à des fonctionnements à hautes fréquences (HF : 3MHz-30MHz) et très hautes fréquences (VHF : 30MHz-300MHz) pouvant prendre part dans un premier étage de convertisseur DC-DC isolé alimentant un appareil électronique; les onduleurs classe E et classe $\phi 2$. Cet article fait le parallèle entre l'onduleur classe E et l'onduleur classe $\phi 2$. Il montre également l'évolution de la taille des éléments magnétiques avec l'augmentation de la fréquence de découpage et les défis de la réalisation expérimentale de convertisseurs fonctionnant à 13,56MHz et à 40,68MHz (Bandes de fréquences industrielles, scientifiques et médicales).

Mots-clés— *Convertisseurs Résonnants, Très Haute Fréquence, Onduleurs HF/THF, Radiofréquences, Classe E, Classe $\phi 2$*

1. INTRODUCTION

Avec le développement des transistors GaN à commutation rapide et faible résistance de conduction ($R_{ds(on)}$), il est possible de réaliser des alimentations à découpage (SMPS pour switch mode power supplies) de taille réduite en augmentant la fréquence de commutation des transistors au sein de ces SMPS. Au-delà d'une certaine fréquence de commutation, de l'ordre de 10MHz, les topologies de convertisseurs électriques à commutation dure ou douce utilisées communément (type flyback, forward, LLC,...) ne peuvent plus être utilisées. Elles présentent soit des pertes par commutation importantes et donc un rendement faible, soit un dimensionnement HF/VHF complexe qui fait que la valeur des composants de la topologie est considérablement impactée par

la valeur des éléments parasites de ces composants, soit sont limitées par des drivers de grille flottants ne permettant pas une implémentation des temps morts en HF/VHF.

De nouvelles structures de convertisseurs sont alors nécessaires pour un fonctionnement à hautes (3MHz-30MHz) et très hautes fréquences (VHF - 30MHz-300MHz). Ces structures sont principalement résonnantes et fonctionnent nécessairement en commutation douce (ZVS pour zero voltage switching) afin de limiter leurs pertes.

Cet article fait le parallèle entre deux structures d'onduleur HF et VHF à transistor unique : la classe E et la classe $\phi 2$. Deux circuits sont dimensionnés: un onduleur classe E pour une tension d'entrée $V_{in} = 20V$, une fréquence de commutation $f_{s1} = 13,56MHz$ et une puissance de sortie $P_{out} = 20W$ environ, et un onduleur classe $\phi 2$ pour la même tension d'entrée et la même puissance de sortie ($V_{in}=20V$, $P=20W$ environ) et une fréquence de commutation $f_{s2} = 40,68MHz$. Tous deux intègrent des inductances à air.

Après avoir détaillé le fonctionnement de ces structures dans le premier paragraphe, l'article présente, dans le deuxième paragraphe, les dimensionnements d'un onduleur classe E et d'un onduleur classe $\phi 2$. Le troisième paragraphe de l'article montre, quant à lui, la réalisation expérimentale des deux structures et les défis de cette réalisation. Un quatrième paragraphe compare les deux structures et énonce leurs avantages et inconvénients respectifs, enfin un dernier paragraphe conclut l'article.

2. FONCTIONNEMENT ET DIMENSIONNEMENT

2.1. Classe E

La structure de l'onduleur classe E est présentée à la figure 1 et permet une commutation du transistor à zéro de tension [1]. L'inductance d'entrée L_{choke} est une inductance de lissage du courant. Elle impose un courant d'entrée quasi constant. Afin d'obtenir une commutation à zéro de tension (ZVS) du transistor GaN, l'ensemble $\{L_r-C_r-R_{charge}\}$ est dimensionné de manière à présenter une impédance inductive à la fréquence de

commutation. Ces conditions permettent d'obtenir les équations (1, 2 et 3) de dimensionnement de l'onduleur classe E [1].

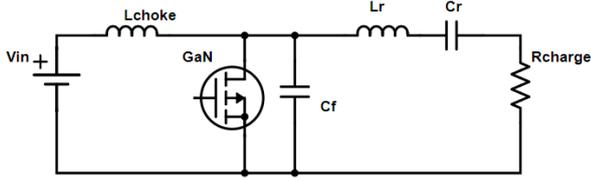


Figure 1. Onduleur Classe E

$$L_r = \frac{QR_{charge}}{2\pi f_{s1}} \quad (1)$$

$$C_F = \frac{1}{34.22R_{charge}f_{s1}} \quad (2)$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_{s1}R_{charge}(Q - 1.1525)} \quad (3)$$

Q étant le facteur de qualité du circuit $\{L_r-C_r\}$ de sortie. La valeur des composants de la classe E est obtenue en imposant la condition de commutation à zéro de tension $V_{ds} = 0$ à $t = (1-D) \cdot (1/f_{s1})$, lorsque le transistor est à l'état ouvert, D étant le rapport cyclique du transistor. La méthodologie de calcul est détaillée dans la référence [1].

Dans cette structure, le condensateur C_F peut représenter la capacité de sortie du transistor GaN, voire être renforcé par un composant externe. Toutefois, comme le montre l'équation (2), la fréquence de fonctionnement maximale est limitée par une valeur minimale de C_F qui ne peut être inférieure à la capacité C_{oss} de sortie du composant GaN. C'est ici l'inconvénient majeur de l'onduleur classe E car la fréquence de fonctionnement et en particulier le fonctionnement en ZVS sont liés à la maîtrise de la valeur de C_{oss} .

Le convertisseur a été simulé sous LTSpice en utilisant le modèle constructeur pour le composant GaN. Les résultats (I_{ds} , V_{ds}) sont présentés figure 2.

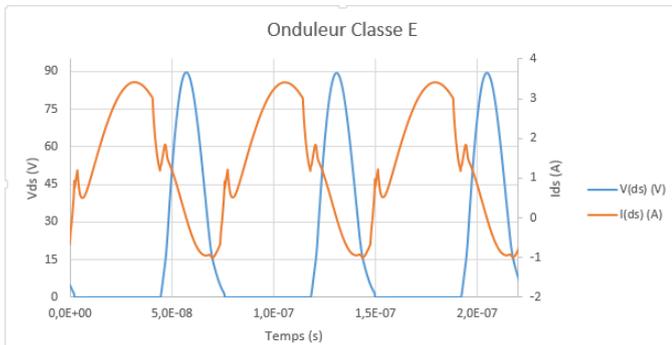


Figure 2. Onduleur Classe E sous LTSpice ($V_{in}=20V$, $P=20W$)

L'onduleur classe E présente plusieurs inconvénients :

- La contrainte V_{ds} sur le GaN est supérieure à quatre fois la tension d'entrée.
- L'inductance L_{choke} présente une valeur importante (5,5 μH à 13,56MHz pour $P=20W$, $V_{in}=20V$) qui empêche son intégration sur PCB ou sa fabrication sans noyau magnétique. De plus elle impose un fonctionnement en régime transitoire assez long.

En se basant sur l'équation (2) et sur les datasheets des différents constructeurs de GaN 100V afin d'obtenir la valeur

de C_{oss} pour une tension drain-source de 80V ($\sim 4V_{in}$) et en utilisant une charge R_{charge} de 12,5 ohm il est possible de déterminer la limitation théorique de la fréquence de fonctionnement du convertisseur. Le tableau 1 présente cette limite pour deux composants du marché.

Tableau 1. Fréquence Maximale de Fonctionnement de l'Onduleur Classe E

| Composant GaN | C_{oss} à 80V (Datasheet) | Fréquence maximale de fonctionnement |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| GS61004B | 140 pF | 16,69 MHz |
| EPC2007C | 90 pF | 25,97 MHz |

Ce tableau montre bien que la structure onduleur en classe E ne va pas permettre de monter dans les plages de fréquence VHF (au-delà de 30MHz) dès lors que l'on va monter en puissance. En effet, avec les composants du commerce actuels, une montée en calibre de courant va impliquer une augmentation du C_{oss} et donc une réduction de la fréquence de fonctionnement.

2.2. Classe $\phi 2$

Ainsi, afin de s'affranchir des inconvénients introduits par la classe E et d'augmenter davantage la fréquence de commutation du transistor jusqu'aux VHF, la structure $\phi 2$ a été introduite par le MIT en 2006 [2]. La figure 3 montre le schéma de l'onduleur classe $\phi 2$.

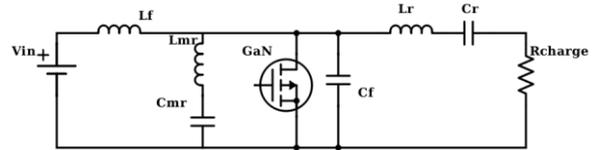


Figure 3. Onduleur Classe $\phi 2$

L'ensemble $\{L_r-C_r-R_{charge}\}$ est dimensionné de manière à obtenir une impédance inductive à la fréquence de commutation. $\{L_{mr}-C_{mr}\}$ sont dimensionnés de manière à résonner à une fréquence égale à deux fois la fréquence de commutation du transistor pour court-circuiter le second harmonique de la tension drain-source du transistor et réduire la contrainte en tension.

Les équations (4), (5) et (6) permettent de dimensionner un onduleur classe $\phi 2$, fonctionnant en ZVS.

$$L_f = \frac{1}{9(\pi f_{s2})^2 C_F} \quad (4)$$

$$C_{mr} = \frac{15}{16} C_F \quad (5)$$

$$L_{mr} = \frac{1}{15 (\pi f_{s2})^2 C_F} \quad (6)$$

Afin d'obtenir ces équations, il convient de calculer l'impédance vue entre le drain et la source du transistor, d'en extraire les pôles et les zéros, d'imposer le fait d'avoir un pôle au fondamental et au troisième harmonique de la fréquence de commutation et un zéro au second harmonique de la fréquence de commutation. Le détail du calcul peut être retrouvé dans la référence [3]. Cependant, ces équations fournissent des valeurs de composants qu'il est nécessaire d'ajuster en raison de l'influence importante sur les fréquences de résonance qu'ont les éléments parasites du circuit [4]. La structure $\phi 2$ impose donc d'accorder

précisément et minutieusement la valeur des composants pour obtenir un fonctionnement en ZVS.

Le fonctionnement de l'onduleur classe $\phi 2$ en ZVS avec le modèle LTSpice des composants a été simulé pour une fréquence de fonctionnement de 40.68MHz, les résultats (I_{ds} , V_{ds}) sont présentés figure 4.

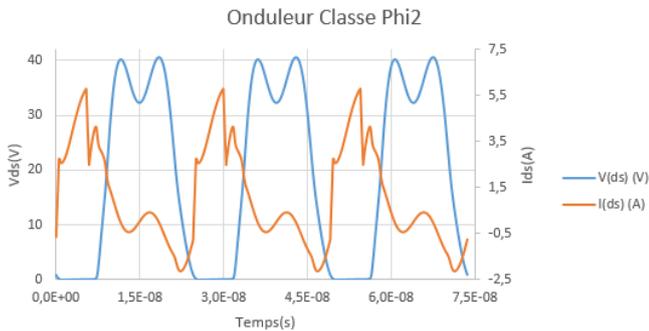


Figure 4. Onduleur Classe $\phi 2$ sous LTSpice ($V_{in}=20V$, $P=20W$)

La comparaison des résultats de simulation obtenus avec une structure en classe E et en classe $\phi 2$ montre la classe $\phi 2$ permet de réduire de façon importante (facteur 2) les contraintes en tension imposée au composant GaN. D'autre part, cette deuxième structure permet de s'affranchir de l'influence de la capacité C_{oss} sur la fréquence de fonctionnement faisant en sorte qu'il est maintenant possible de monter plus haut en fréquence. En revanche, l'accord des différents composants est bien plus complexe à obtenir et un réglage manuel des différents composants est souvent nécessaire en classe $\phi 2$ pour obtenir un fonctionnement correct de la structure.

Ainsi, selon le besoin de l'utilisateur et l'application visée, il convient de choisir une structure classe E ou bien une structure classe $\phi 2$.

3. REALISATION EXPERIMENTALE

3.1. Classe E

Afin de réaliser l'onduleur classe E fonctionnant à 13,56 MHz les composants listés dans le tableau 2 ont été utilisés.

Tableau 2. Liste des composants de l'onduleur classe E

| Composant | Valeur/Référence | Fabricant |
|--------------|------------------|-----------------|
| L_{choke} | 5,5 μH | Coilcraft |
| GaN | GS61004B | GaN Systems |
| Gate Driver | ISL 55110 | Intersil |
| C_F | Coss du GaN | - |
| C_r | 250 pF | AVX corporation |
| L_r | 735 nH | Fait à la main |
| R_{charge} | 12,5 Ohm | Pasternack |

L'onduleur classe E réalisé sur un PCB deux couches, est présenté figure 5.



Figure 5. Onduleur Classe E 13,56 MHz

La tension de sortie de l'onduleur classe E V_{out} et la tension drain-source V_{ds} sont montrées figure 6. Pour ce point de fonctionnement, un rendement de 81% a été obtenu pour une puissance d'entrée de 20W. La contrainte en tension sur le transistor GaN est de 86V, environ quatre fois la tension d'entrée. La tension de sortie V_{out} oscille entre +21V et -19V à la fréquence de 13,56 Hz.

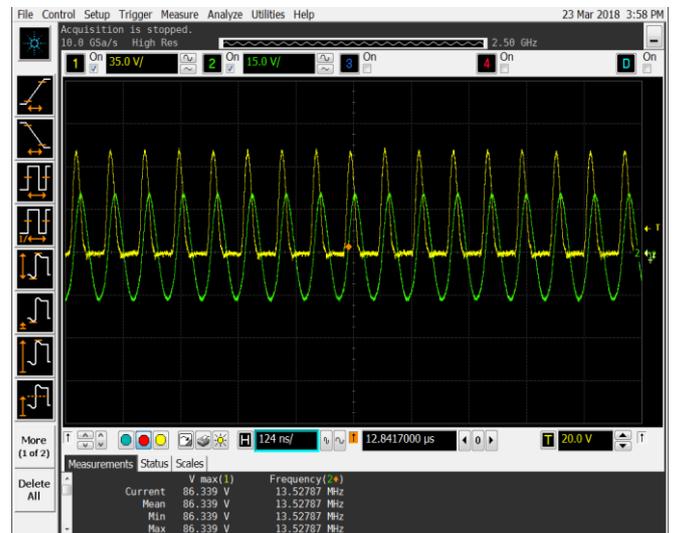


Figure 6. Classe E: V_{ds} (en jaune), V_{out} (en vert)

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus en simulation. Toutefois, il serait nécessaire d'investiguer plus profondément les sources de pertes afin de mieux maîtriser le comportement de ce convertisseur. L'exercice est ici difficile car l'insertion de toute sonde de courant modifie profondément le comportement du convertisseur.

3.2. Classe $\phi 2$

Comme expliqué plus avant, le réglage de composants pour assurer un fonctionnement correct de l'onduleur classe $\phi 2$ est un exercice complexe. En partant des valeurs déterminées par les calculs, il est donc nécessaire de suivre une procédure stricte pour faire ce réglage.

Ce réglage est conduit en mesurant l'impédance Z_{ds} vue du drain du GaN à l'aide d'un analyseur de réseau (type Agilent E5061B). Pour obtenir un fonctionnement correct (fréquence désirée et fonctionnement en ZVS), celle-ci doit présenter plusieurs caractéristiques spécifiques à la classe $\phi 2$ [2]:

- La phase de l'impédance Z_{ds} à la fréquence de commutation doit être comprise entre $+30^\circ$ à $+60^\circ$

- Le module de Z_{ds} doit être faible au second harmonique de la fréquence de commutation en raison de la résonance entre C_{mr} et L_{mr}
- La phase de l'impédance Z_{ds} au troisième harmonique de la fréquence de commutation doit être capacitive (idéalement égale à -90°)
- Le module de l'impédance Z_{ds} au troisième harmonique de la fréquence de commutation doit être de 4dB à 8dB plus faible que le module de Z_{ds} au fondamental de la fréquence de commutation

La figure 7 montre une capture d'écran de l'analyseur de réseau qui met en avant les caractéristiques énoncées ci-dessus.

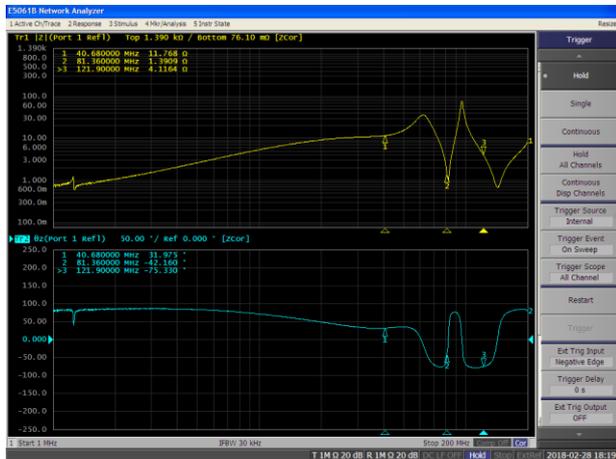


Figure 7. Caractéristiques de Z_{ds}

Les composants utilisés afin de construire l'onduleur classe $\phi 2$ fonctionnant à 40,68 MHz et satisfaisant les différentes conditions listées ci-dessus sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Liste des composants de l'onduleur classe $\phi 2$

| Composant | Valeur/Référence | Fabricant |
|--------------|-------------------|-----------------|
| L_f | 85 nH | Fait à la main |
| L_{mr} | 100 nH | Coilcraft |
| C_{mr} | 34 pF | AVX Corporation |
| GaN | GS61004B | GaN Systems |
| Gate Driver | ISL 55110 | Intersil |
| C_F | Coss du GaN+ 50pF | AVX Corporation |
| C_r | 2 nF | Murata |
| L_r | 32 nH | Fait à la main |
| R_{charge} | 12,5 Ohm | Pasternack |

L'onduleur classe $\phi 2$ réalisé sur un PCB deux couches, est présenté figure 8.

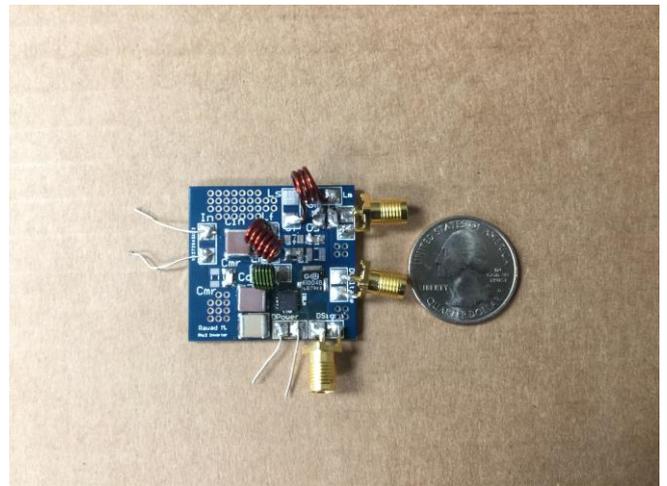


Figure 8. Onduleur Classe $\phi 2$ 40,68 MHz

L'onduleur classe $\phi 2$ requiert en pratique un ajustement de la valeur de C_F pour que les formes d'ondes mesurées correspondent aux formes d'ondes simulées. En effet, le dimensionnement de L_f , L_{mr} et C_{mr} dépend de la capacité de sortie C_{oss} du GaN qui n'est pas donnée par les fabricants de semi-conducteur aux fréquences VHF. Ainsi, pour l'obtention de la courbe V_{ds} simulée de la figure 9, un condensateur de 100 pF est mis en parallèle avec le C_{oss} du GaN. Dans la pratique, afin d'obtenir une superposition des courbes V_{ds} simulées et expérimentales, un condensateur de 50 pF a été utilisé.

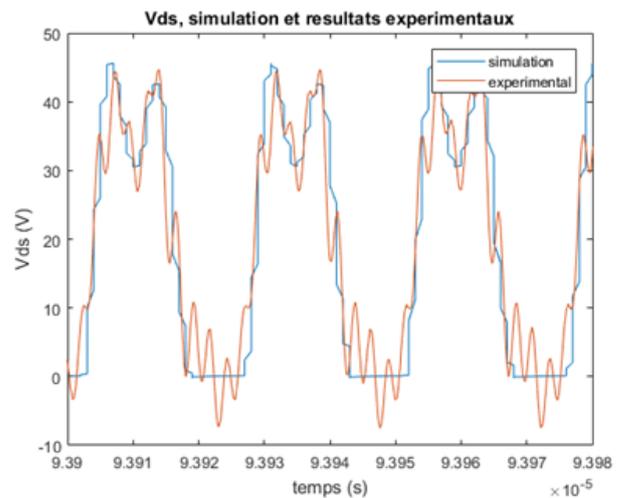


Figure 9. Classe $\phi 2$: tension V_{ds} , Simulée et Expérimentale

Les courbes expérimentales et simulées de la tension drain-source V_{ds} se superposent correctement. Néanmoins, la forme d'onde expérimentale présente des résonances parasites. Ces résonances sont dues principalement aux inductances de boucle du PCB dont les effets sont importants pour une fréquence de fonctionnement de 40,68 MHz.

La contrainte V_{ds} maximale mesurée est de 44V, soit 2,2 fois la tension d'entrée environ.

L'onduleur classe $\phi 2$ ainsi dimensionné présente un rendement de 77% pour une puissance d'entrée de 20W.

4. COMPARAISON DES DEUX TOPOLOGIES

La figure 10 montre les deux onduleurs classe E et $\phi 2$ mentionnés dans cet article.

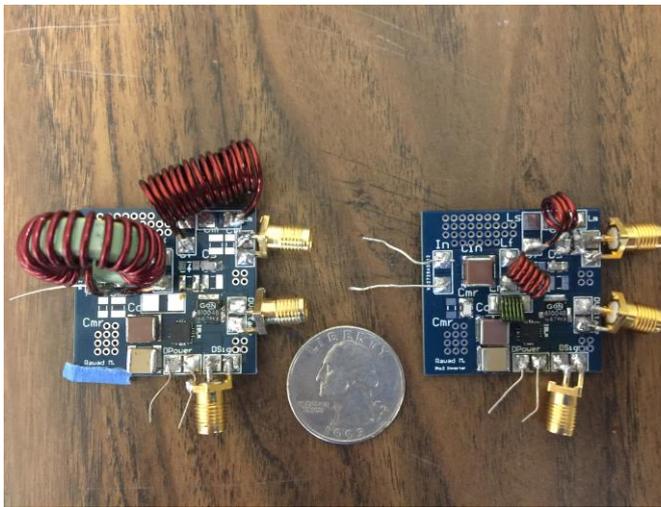


Figure 10. Classe E (à gauche), Classe $\phi 2$ (à droite)

Il en ressort que la taille des éléments magnétiques à 40,68 MHz pour la classe $\phi 2$ est plus réduite que celle des éléments magnétiques de la classe E à 13,56 MHz. Cela est dû :

- Au fait que la classe $\phi 2$, contrairement à la classe E, ne présente pas d'inductance de lissage du courant Lchoke
- A l'augmentation de la fréquence de fonctionnement que peut tolérer la classe $\phi 2$ mais pas la classe E du fait de la limite sur la valeur maximale de la fréquence de fonctionnement imposée par la valeur minimale de la capacité C_F (égale à C_{oss} du GaN GS61004B).

Les résultats simulés et expérimentaux ci-dessus permettent d'établir un tableau des principales caractéristiques des deux topologies d'onduleur.

Tableau 4. Classe E et Classe $\phi 2$: Caractéristiques Principales

| | Fonctionnement HF | Fonctionnement VHF | Dimensionnement | Transistoire | Contrainte Vds | Intégration sur PCB |
|-----------------|-------------------|--|-----------------|--------------|----------------|-------------------------|
| Classe E | Oui | Limité par la valeur de Coss du transistor | Simple | Long | $\sim 4V_{in}$ | Difficile (dû à Lchoke) |
| Classe $\phi 2$ | Oui | Oui | Complexe | court | $\sim 2V_{in}$ | Simple |

5. CONCLUSION

Cet article présente et compare deux structures d'onduleurs à commutation douce pouvant fonctionner en hautes et très hautes fréquences : la classe E et la classe $\phi 2$.

Un onduleur classe E fonctionnant à 13,56 MHz a été dimensionné avec le transistor GaN GS61004B de GaN Systems. Pour une puissance d'entrée de 20W, l'onduleur classe E dimensionné présente un rendement de 81%. Pour une fréquence de fonctionnement de 40,68 MHz, un onduleur en classe $\phi 2$ a été construit avec le même transistor GaN (GS61004B). Il fournit un rendement de 77% pour une puissance d'entrée de 20W.

Il a été également démontré que pour un fonctionnement aux fréquences HF (3MHz-30MHz), l'onduleur classe E est simple à dimensionner et offre une bonne adéquation entre la simulation et la pratique. Pour les fréquences VHF (30MHz-300 MHz), il est préférable d'opter pour un onduleur $\phi 2$ qui est plus complexe à dimensionner mais permet l'obtention d'inductances réduites pouvant être intégrées sur PCB.

Afin de compléter le convertisseur, la fonction redresseur doit maintenant être développée. A l'issue de ce travail, nous serons en mesure de comparer deux structures de convertisseurs DC/DC isolés HF ou VHF.

6. REFERENCES

- [1] N.O. Sokal, A. D. Sokal, « Class E- A new class of high efficiency tuned single-ended switching power amplifiers », IEEE Journal of solid-state circuits, vol. 10, no. 3, 1975
- [2] J.Rivas. Y. Han, O. Leitermann, A. Sagneri, D. Perreault, « A High-Frequency Resonant Inverter Topology With Low-Voltage Stress », IEEE Transactions on power electronics, vol. 23, no. 4, juillet 2008
- [3] Juan Rivas. Radio Frequency dc-dc Power Conversion. Ph.D. Thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, September 2006.
- [4] J.M. Rivas, J. Shafran, R.S. Wahby, and D.J. Perreault. New architectures for radiofrequency dc/dc power conversion. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Proceedings, pages 4074-4084, June 2004