



**HAL**  
open science

## Prédiction de la dynamique d'un convertisseur DC-DC piézoélectrique

Lucas de Araujo Pereira, Adrien Morel, Mustapha Touhami, Théo Lamorelle, Ghislain Despesse, Gaël Pillonnet

► **To cite this version:**

Lucas de Araujo Pereira, Adrien Morel, Mustapha Touhami, Théo Lamorelle, Ghislain Despesse, et al.. Prédiction de la dynamique d'un convertisseur DC-DC piézoélectrique. 10th National Days on Energy Harvesting and Storage, Jun 2021, Grenoble, France. hal-03258911

**HAL Id: hal-03258911**

**<https://hal.science/hal-03258911>**

Submitted on 12 Jun 2021

**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.

# Prédiction de la dynamique d'un convertisseur DC-DC piézoélectrique

Lucas de Araujo Pereira, Adrien Morel, Mustapha Touhami, Théo Lamorelle, Ghislain Despesse, Gaël Pillonnet  
Univ. Grenoble Alpes, CEA, LETI, MINATEC, F-38000 Grenoble, France

lucas-henrique.dearaujopereira@cea.fr

**Abstract**— Nous proposons une méthode de calcul de la fréquence de fonctionnement d'un convertisseur élévateur DC-DC à base de résonateur piézoélectrique. En outre, nous présentons un modèle électromécanique équivalent du convertisseur en régime établi. Nous avons comparé les prédictions obtenues avec notre modèle avec des résultats obtenus en simulation et expérimentalement à iso-tension d'entrée/sortie et puissance transférée variable. Les comparaisons démontrent que notre méthode est capable de prédire la fréquence de fonctionnement avec une grande précision.

## I. INTRODUCTION

L'intégration des convertisseurs DC-DC de l'ordre du Watt est un sujet relativement étudié dans la littérature récente. Elle essaye de répondre aux exigences d'applications nécessitant des densités volumiques de plusieurs dizaines de Watt par cm<sup>3</sup>. La tendance générale est l'augmentation des fréquences de découpage afin de réduire l'énergie transmise par cycle et donc la taille des composants passifs. Cependant, les performances des composants magnétiques, requis dans la plupart de topologies de DC-DC, diminuent lorsque leur fréquence de commutation augmente [1]. La densité de puissance n'est donc pas une fonction linéaire de la fréquence dans de nombreux cas d'étude. Enfin, certains cas applicatifs nécessitent des facteurs de forme donnant une importance prédominante à l'épaisseur, ce qui désavantage les solutions à base d'inductance.

Afin d'éliminer l'utilisation de tous composant magnétique, une classe émergente de convertisseur DC-DC à base de résonateurs électromécaniques piézoélectriques (PR) a été proposée par [2] puis généralisée par [3]. Les résultats expérimentaux récents démontrent que ces convertisseurs permettent d'atteindre un rendement élevé (>95%) avec une densité de puissance autour de quelques dizaines de W/cm<sup>3</sup> [3, 4]. Contrairement à d'autres types de convertisseurs, l'augmentation en fréquence n'apporte pas une réduction au 1<sup>er</sup> ordre des performances [3].

À la différence des convertisseurs conventionnels, la fréquence de fonctionnement est déterminée par la dynamique du PR, les tensions d'entrée/sortie et la quantité de puissance transférée. La fréquence peut varier de plusieurs dizaines de pourcent entre la fréquence de résonance en court-circuit ( $f_s$ ) et en circuit-ouvert ( $f_r$ ) du PR [5].

Nous proposons une méthodologie permettant de déterminer la fréquence de fonctionnement d'un convertisseur DC-DC PR inspirée des travaux effectués par la communauté de la récupération d'énergie [6, 7]. Elle permet de modéliser l'impédance induite électriquement par le convertisseur, et autorise des interprétations physiques. Nous appliquons la

méthode sur une topologie donnée (cycle en 6 phases, élévateur) et démontrons expérimentalement la validité de notre modèle.

## II. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

### A. Cas d'étude

Le convertisseur PR (fig. 1) est composé de trois commutateurs et d'un PR représenté par son circuit électrique équivalent (Van Dyke [8]). Le cycle de conversion se déroule en 6-phases,  $\phi_i$ , pour permettre un équilibre des charges et des commutations douces (ZVS) [2].

Durant  $\phi_2$ , le PR reçoit de l'énergie de la source ( $v_p=V_E$ ) et la restitue à la sortie lors de la phase 6 ( $v_p=V_S$ ). Pendant  $\phi_4$  le PR est court-circuité ( $v_p=0V$ ) et l'ouverture de  $k_{cc}$  est conditionnée par la puissance en sortie souhaitée. Pendant  $\phi_1$ ,  $\phi_3$  et  $\phi_5$  tous les transistors sont ouverts. Ces phases sont nécessaires pour que le convertisseur puisse fonctionner en commutations douces.

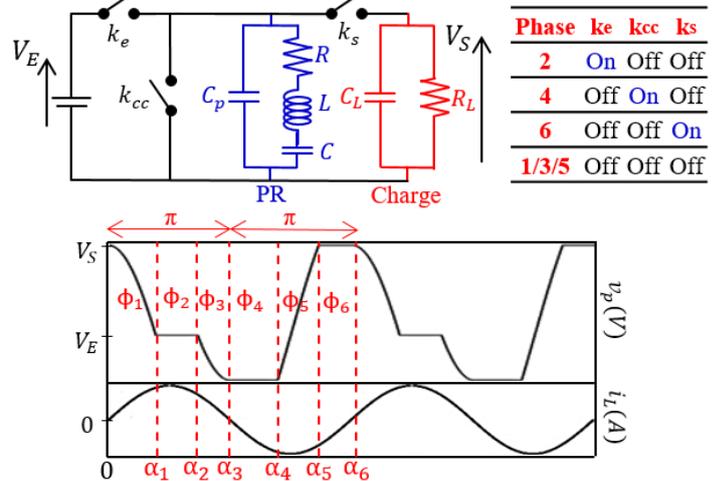


FIGURE 1. CONVERTISSEUR DC-DC ELEVATEUR A BASE DE PR ET DECOUPEGE DE SON CYCLE DE FONCTIONNEMENT EN 6 PHASES

Afin d'obtenir des cycles adiabatiques, la tension  $v_p$  doit être synchronisée au déplacement du PR par une boucle contrôlant les angles  $\alpha_i$  ( $t_i 2\pi f$ ). Il est donc nécessaire de les connaître avec précision. D'après [2], les angles  $\alpha_i$  sont calculés avec les équations :

$$\alpha_1 = \text{acos}(1 + B(V_E - V_S))$$

$$\alpha_2 = \text{acos}(BV_E - 1)$$

$$\alpha_5 = \text{acos}\left(1 - \frac{A}{I_m} - \frac{\pi R I_m}{V_S}\right)$$

$$\alpha_4 = \text{acos}\left(1 - \frac{A}{I_m} - \frac{\pi R I_m}{V_S} - BV_S\right)$$

$$\text{Où } A = 2\pi V_S / R_L \text{ et } B = 2\pi f C_p / I_m.$$

Cependant dans la littérature [2, 3], la fréquence d'opération ( $f$ ) est toujours supposée constante, égale à la  $f_s$ , ce qui induit des erreurs non négligeables sur les angles  $\alpha_i$  et l'amplitude maximale du courant  $i_L$  qui s'exprime :

$$I_m = \frac{\pi V_S^2}{R_L V_E} + f C_P V_S$$

### B. Méthode

En utilisant la méthode du 1<sup>er</sup> harmonique (facteur de qualité du PR élevé, régime établi...), le fondamental de la tension  $v_p$  a l'expression suivante, où  $a_1$  et  $b_1$  sont les premiers coefficients de la décomposition en série Fourier de  $v_p$  [6] :

$$v_p(t)|_{n=1} = a_1 \cos(2\pi f t) + b_1 \sin(2\pi f t)$$

En appliquant la loi de mailles sur le PR, on obtient l'équation suivante :

$$v_p(t) = L \frac{dq^2}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q$$

En considérant le courant  $i_L$  purement sinusoïdal, d'amplitude  $I_m$  on peut écrire :

$$i_L(t) = I_m \sin(2\pi f t) = \frac{dq}{dt} \quad q = -\frac{I_m}{2\pi f} \cos(2\pi f t)$$

En combinant les équations, on obtient :

$$L \frac{dq^2}{dt^2} + \left(R - \frac{b_1}{I_m}\right) \frac{dq}{dt} + \left(\frac{1}{C} + \frac{a_1 2\pi f}{I_m}\right) q = 0$$

$$\Leftrightarrow L \frac{dq^2}{dt^2} + 0 \frac{dq}{dt} + \left(\frac{1}{\alpha C_p} + \frac{1}{C}\right) q = 0$$

Cette équation met en évidence une capacité électrique moyenne  $\alpha C_p$  induite électriquement, d'expression  $\alpha C_p = I_m / a_1 2\pi f$ . En outre, la partie résistive devient nulle puisque l'énergie transmise à la charge/dissipée sur la résistance du PR est restituée par la source. Ce comportement moyenné sur un cycle permet de proposer un modèle équivalent du convertisseur en parallèle du modèle classique du PR (Fig. 2).

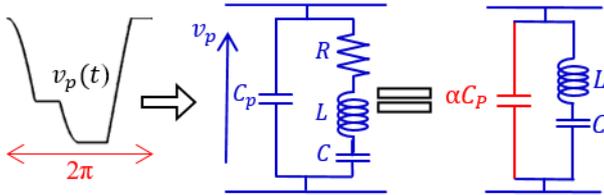


FIGURE 2. MODELE COMPORTAMENTALE DU PR LORSQUE LE CONVERTISSEUR EST EN REGIME ETABLI.

Cette modélisation, en intégrant la capacité induite, permet de calculer la fréquence de fonctionnement par l'expression suivante :

$$f = \frac{\sqrt{C + \alpha C_p}}{2\pi \sqrt{L(C + \alpha C_p)}}, \quad \forall f \in [f_s, f_r]$$

### III. VALIDATION EXPERIMENTALE

Afin de valider notre modèle, nous l'avons comparé à des résultats obtenus grâce à des simulations électriques et expérimentalement à iso-PR [2] et iso-tension d'entrée/sortie

(10V/30V). La figure 3 montre la variation de fréquence (normalisée par rapport  $f_s$ ) en fonction de la puissance.

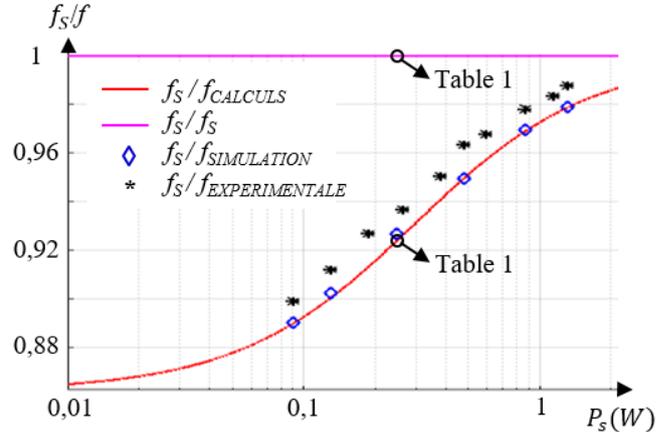


FIGURE 3. RAPPORT DE FS SUR LA FREQUENCE CALCULEE, SIMULEE ET MESUREE EXPERIMENTALE EN FONCTION DE LA PUISSANCE TRANSFEREE.

La prise en compte de la variation de fréquence est fondamentale pour maintenir les conditions de puissance transférée et de ZVS. Par exemple, la table 1 nous donne la puissance, le rendement et les différences d'un ZVS parfait ( $\Delta V(\alpha_i)=0$ ) à partir des angles  $\alpha_i$  calculés à partir des deux méthodes : fréquence fixe ( $f_s=89$ kHz) et calculée à partir de notre méthode ( $f=96,1$ kHz) pour une puissance cible de sortie ( $P_s=0,26$ W) et un ratio de tension d'entrée/sortie ( $V_e/V_s=10$ V/30V). Il est donc nécessaire de connaître la fréquence d'opération pour respecter la condition de ZVS et obtenir la puissance et la tension de sortie désirée avec un rendement  $\eta$  élevé.

TABLE 1. COMPARATIF ENTRE LES METHODES DE CALCUL

Méthode	f (kHz)	P <sub>s</sub> (W)	V <sub>s</sub> (V)	η (%)	ΔV(α <sub>1</sub> )	ΔV(α <sub>3</sub> )	ΔV(α <sub>5</sub> )
Fréq. fixe	89,0	0,508	41,1	24,6	61 V	9 V	30,1 V
Notre méthode	96,1	0,254	29,7	96,9	0,27 V	1 V	0,51 V

### IV. CONCLUSION

Grâce à la méthode analytique proposée dans ce papier, nous sommes capables de prédire la fréquence de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC piézoélectrique avec une grande précision. Ce modèle de fréquence nous permettra de concevoir un convertisseur de manière plus précise tout en pouvant prédire les régimes de fonctionnement, les dynamiques internes, tout en nous permettant de prévoir au niveau du contrôle des manières de ne pas exciter les modes supérieures du PR.

### REFERENCES (DOI)

- [1] C. R. Sullivan 10.1109/3DPEIM.2016.7570571
- [2] B. Pollet, 10.1109/TPEL.2019.2900526
- [3] J. Boles 10.1109/TPEL.2020.3004147
- [4] M. Touhami 10.1109/COMPEL49091.2020.9265767
- [5] W. D. Braun 10.1109/OJPEL.2021.3067020
- [6] A. Morel 10.1088/1361-665X/aaf0ea
- [7] J. Liang 10.1109/TMECH.2011.2160275
- [8] K. S. Van Dyke 10.1109/JRPROC.1928.221466