

Conception et analyse des performances d'un groupe électrogène à moteur Stirling.

Ali SARI^{1*}, François LANZETTA¹, Didier CHAMAGNE¹, Christophe ESPANET¹,
Didier MARQUET², Philippe NIKA¹

¹ Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Département ENISYS, Université de Franche-Comté
Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort

² France Telecom R&D, 38-40 rue du Général Leclerc – 92794 Issy les Moulineaux

*(auteur correspondant : ali.sari@femto-st.fr)

Résumé - Nous présentons les premiers résultats d'une étude concernant la réalisation d'un groupe électrogène de quelques dizaines de watts utilisant un moteur Stirling de type Beta. Dans une première partie nous décrivons les modèles thermique (adaptation d'un modèle thermomécanique de Schmidt-Beans) et électrique (éléments finis) ayant permis la conception du système. Dans la seconde partie, nous présentons les premiers tests de performance de l'alternateur linéaire.

Nomenclature

B	paramètre de calcul (6)	<i>Symboles grec</i>	
C	paramètre de calcul (7)	α	déphasage des pistons, <i>rad</i>
cp	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}K^{-1}$	δ	paramètre de calcul (8)
E	efficacité	γ	coefficient isentropique du gaz
e_{ind}	tension induite, V	$[\phi_m]$	vecteur des flux, Wb
F	facteur de puissance volumique, $W.m^{-3}$	θ	déphasage, <i>rad</i>
K	rapport de volume	ω	pulsation, $rad.s^{-1}$
$[L]$	matrice d'inductances, H	τ	rapport des températures source/puits
N	vitesse de rotation, $tr.min^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
m	paramètre de calcul (12)	c	côté compression
P	pression, Pa	dc	volume mort côté compression
\dot{P}	puissance, W	de	volume mort côté détente
r	constante du gaz, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	e	côté expansion
$[r]$	matrice de résistances, Ω	ind	induit
S	paramètre de calcul (11)	moy	moyen
T	température, K	min	minimal
t	temps, s	max	maximal
v	vitesse, $m.s^{-1}$	r	régénérateur
V	volume, m^3	se	volume balayé côté détente
W	travail, J	sc	volume balayé côté compression
X	rapport de volume mort	t	total

1. Introduction

La multiplication des appareils électriques portables et la diversification importante de leurs fonctionnalités entraînent un besoin en énergie transportable croissant afin de pouvoir les utiliser confortablement [1]. Cela nécessite donc une plus grande réserve d'énergie afin que la portabilité de ces outils ne s'en trouve pas diminuée par le nombre de recharges. Les trois voies existant pour résoudre ce problème sont, l'augmentation des capacités des batteries, la diminution drastique de la consommation des appareils et la réalisation d'une source d'énergie transportable. L'amélioration très lente des caractéristiques des batteries et

l'augmentation des performances et fonctionnalités des appareils rendent les deux premières solutions non satisfaisantes dans de nombreux cas (utilisateur éloigné longtemps du réseau électrique par exemple). Ainsi, une des solutions est d'utiliser une source d'énergie transportable permettant soit l'alimentation en continu soit la recharge de l'appareil sans contrainte. Il existe actuellement plusieurs technologies permettant de réaliser des sources d'énergie autonomes, mobiles et de petite puissance telles que : la thermoélectricité, la piézoélectricité, le photovoltaïque, la pile à combustible, les petits groupes électrogènes, les générateurs électriques utilisant les mouvements du corps humain [2]. La solution, à laquelle nous nous intéresserons plus particulièrement, est un groupe électrogène comprenant un moteur Stirling. Cette solution permettra, d'une part, de répondre aux exigences précédemment citées pour une application portable et, d'autre part, pourra être utilisée par notre partenaire industriel France Telecom dans des applications d'alimentation stationnaire de passerelle radio et M2M. Le moteur Stirling peut être décomposé en trois grands types de structure qui impliquent uniquement des liaisons mécaniques pour le premier, uniquement des liaisons gazeuses pour la seconde structure et des liaisons mixtes gazeuses/mécaniques pour la dernière. Les deux premières structures associées chacune à un alternateur électrique à mouvement linéaire permettent de réaliser des mini-générateurs autonomes de petite puissance qui peuvent être alimentés par une multitude de sources thermiques (brûleur à combustible liquide ou gazeux, concentrateur solaire). Cette étude a pour objectif la réalisation d'un prototype de moteur Stirling de type Beta entraînant un alternateur linéaire.

2. Modélisations

Le générateur Stirling (moteur de type Beta) est modélisé par une approche thermodynamique dont les résultats sont utilisés dans une modélisation électrique. Le modèle thermomécanique de Schmidt-Beans [3-5] est basé sur des relations thermodynamiques et géométriques permettant de calculer un facteur de puissance thermodynamique adimensionnel qui nous permet ensuite d'optimiser la conception. L'alternateur est conçu pour fournir une puissance électrique d'au moins 2 W pour une fréquence électrique de 20 Hz, ce qui est une contrainte importante, sachant que les dimensions et le poids diminuent à l'inverse de la fréquence électrique. La première étape du travail a été d'effectuer une préconception d'un alternateur qui réponde à ces contraintes. La deuxième étape consiste à vérifier la conception de l'alternateur en utilisant la méthode des éléments finis (EF). Après la phase de réalisation du générateur, une troisième étape consistera à élaborer un modèle d'analyse basé sur les réseaux de reluctance (RN) et valider ce modèle par les mesures [6]. L'avantage de ce modèle est de prendre en compte la saturation magnétique du matériau. La dernière étape consistera à associer les modèles analytiques du moteur Stirling et de l'alternateur en vue de co-concevoir un générateur autonome de quelques dizaines de watts dont les caractéristiques et les performances souhaitées sont rappelées dans le Tableau 1.

2.1. Modélisation thermodynamique : méthode de Schmidt-Beans

C'est une méthode d'ordre 1 (hypothèses de Schmidt : volumes isothermes, gaz idéal, pas de pertes de charge dans les organes, variations sinusoïdales des volumes, pas de fuites de gaz, régénérateur parfait) qui est encore à l'heure actuelle très employée avec quelques améliorations comme la prise en compte de l'efficacité du régénérateur (Hypothèses de Beans). Le moteur est divisé en trois volumes : le volume de détente V_e , de compression V_c et le régénérateur V_r (intégrant les échangeurs chaud et froid). Suivant l'hypothèse du gaz parfait, la pression instantanée du fluide dans la machine est :

$$P = \frac{m_t r}{\left(\frac{V_e}{T_e} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_r}{T_r} \right)} \quad (1)$$

Où m_t est la masse totale de gaz contenue dans la machine

$$V_e = \frac{V_{se}}{2} (1 + \cos \omega t + 2X_{de}) \quad (2)$$

$$V_c = \frac{V_{se}}{2} \left[K_{scse} \cos(\omega t - \alpha) - \cos \omega t + (K_{scse}^2 - 2K_{scse} \cos \omega t + 1)^{1/2} \right] \quad (3)$$

La variation instantanée de pression interne dans la machine s'exprime finalement par la relation :

$$P = \frac{P_{moy} \sqrt{1 - \delta^2}}{1 + \delta \cos(\omega t - \theta)} \quad (4)$$

On peut aussi utiliser les niveaux extrêmes de la pression, soient :

$$P_{\max} = \frac{C}{S(1-\delta)} ; P_{\min} = \frac{C}{S(1+\delta)} ; P_{moy} = P_{\max} \sqrt{\frac{1-\delta}{1+\delta}} \quad (5a,b,c)$$

avec les paramètres B, C, S et δ :

$$B = \sqrt{K_{scse}^2 + 2K_{scse}(\tau-1)\cos\alpha + (\tau-1)^2} ; C = \frac{2m_t c_p (\gamma-1)Tc}{\gamma V_{se}} \quad (6), (7)$$

$$\delta = \frac{B}{S} ; \tau = T_c/T_e ; K_{scse} = V_{sc}/V_{se} ; X_{de} = V_{de}/V_{se} \quad (8), (9), (10), (11)$$

$$S = \tau + 2\tau X_{de} + \frac{2\tau X_r(1+m)}{(1+\tau m)} + (K_{scse}^2 - 2K_{scse} \cos\alpha + 1)^{1/2} \quad (12)$$

On définit également le paramètre m caractéristique des transferts de masse de part et d'autre de chaque volume de la machine. Les masses de gaz échangées sont imposées par les variations des volumes selon le régime de fonctionnement de la machine (températures, phase, amplitudes imposées).

$$m = \frac{[K_{scse} + K_{scse} \cos(\varphi_c - \alpha) + 2X_{dc}][1 + \delta \cos(\varphi_e - \theta)]}{[1 + \delta \cos(\varphi_c - \theta)][1 + \cos\varphi_e + 2X_{de}]\tau} \quad (13)$$

avec

$$\sin\theta = \frac{K_{scse} \sin\alpha}{B} \quad \text{et} \quad \cos\theta = \frac{\tau + K_{scse} \cos\alpha}{B} \quad (13), (14)$$

Les déphasages φ_c et φ_e maximisent les masses dans les volumes de compression et d'expansion de la machine :

$$\delta(1 + 2X_{de})\sin(\varphi_e - \theta) - \delta \sin\theta - \sin\varphi_e = 0 \quad (15)$$

$$\delta(1 + 2X_{dc})\sin(\varphi_c - \theta) - \delta \sin(\varphi_c - \alpha) - \delta \sin(\theta - \alpha) = 0$$

Finalement, la puissance mécanique \dot{P}_i et le facteur de puissance volumique F s'écrivent :

$$\dot{P}_t = \frac{NW_t}{60} = (1-\tau) \frac{N}{60} \frac{\pi P_{moy} V_{se} \delta \sin \theta}{(1+\sqrt{1-\delta^2})} ; F = \frac{\dot{P}_t}{V_t} \quad (16), (17)$$

Le facteur de puissance volumique F (figure 1) est maximal (3 W.cm^{-3}) pour un déphasage $\alpha = 90^\circ$ et un rapport de volume $K_{scse} = 1.2$. Le fluide utilisé est de l'air sous une pression de charge de 3 bar. La pression maximale est de 10.2 bar (figure 2). Nous avons considéré les températures de source et de puits égales à 1000 K et 300 K respectivement. Le moteur fonctionne à la fréquence de 20 Hz.

2.2. Modélisation électrique par éléments finis

La conversion de l'énergie est caractérisée par la loi de Faraday qui donne l'expression de la tension induite e_{ind} dans un enroulement soumis à un flux variable:

$$e_{ind} = -\frac{d\psi}{dt} \quad (18)$$

ψ est le flux total circulant à travers une bobine et e_{ind} la tension induite. L'expression de la tension délivrée par les bobinages de l'alternateur est :

$$[u(t)] = -[r][i(t)] + e_{ind} \quad (19)$$

$$[u(t)] = -[r][i(t)] + [L(x,i)] \frac{d}{dt} [i(t)] + \left(\frac{\partial}{\partial i} [L(x,i)] \frac{d}{dt} [i(t)] + \frac{\partial}{\partial x} [L(x,i)] v \right) [i(t)] + v \frac{d}{dx} [\phi_m(x)] \quad (20)$$

L'expression de la matrice $[L]$ dépend des inductances propres de chaque bobinage et de la mutuelle entre celles-ci.

Grace à ce modèle d'analyse basé sur une estimation de premier ordre de la variation du flux, il est possible de simuler le comportement électrique de l'alternateur linéaire. Les courants sont fonction du temps et des inductances. Et la matrice $[L]$ dépend de la position linéaire, des courants et de l'état de saturation des matériaux magnétiques. Ce premier modèle permet d'aider à la conception d'un premier prototype non-optimisé. Comme expliqué dans l'introduction, l'étape suivante est de coupler ce modèle avec un réseau de réluctances afin de simuler la distribution des flux magnétiques, en tenant compte de la saturation. Il sera alors possible de déterminer les inductances propres et mutuelles pour chaque structure géométrique, chaque position du translateur et chaque valeur de courant actuel (c'est-à-dire pour chaque niveau de saturation). La structure de l'alternateur est modélisée avec le logiciel d'éléments finis, flux3D[®]. Une vitesse cosinusoidale est imposée au translateur afin de se rapprocher de la vitesse imposée par le moteur Stirling. Les densités de flux dans la culasse rotorique et les dents du stator se trouvent dans les coudes de saturation des matériaux qui correspondent aux points d'utilisation optimaux des matériaux (figure 3). Les résultats obtenus par EF s'approchent des résultats expérimentaux que l'on a pu relever sur le prototype de l'alternateur (figures 4 et 5). La puissance électrique obtenue lors de simulation EF s'élève pour une fréquence de 20 Hz avec un débattement de +/- 4mm à 3,3 W tandis que les résultats expérimentaux dans les mêmes conditions donnent 2,7 W. La différence résulte des pertes fer dans le circuit magnétique (perte par hystérésis, courant de Foucault) qui ont été négligées, mais essentiellement des différences de forme des signaux. Les creux de tension caractérisant les fins de course disparaissent et des chutes de tension apparaissent au sommet

des alternances (figure 5). Ceux-ci sont les résultats du couple de denture dont l'influence sur l'accélération n'est pas prise en compte par les simulations et qui ont tendance à vouloir ramener le translateur à sa position de repos. Le système d'entraînement de l'alternateur n'étant pas régulé en vitesse, le couple de denture a tendance à créer des variations de vitesse qui induisent ces chutes de tension.

3. Réalisation du générateur Stirling

L'alternateur linéaire se compose de deux éléments principaux : un stator et une partie mobile que l'on appellera translateur. Le stator se compose de la coque extérieure de la machine qui héberge les enroulements et la culasse magnétique. Cet alternateur linéaire utilise comme inducteur des aimants permanents en terre rare montés en surface et séparés par des entretoises amagnétiques. La culasse rotorique est réalisée par un axe magnétique jouant également le rôle d'axe de transmission mécanique. Les aimants permanents génèrent un flux magnétique quasi-sinusoïdal dans les enroulements statoriques. Le flux circule à travers le stator, qui est laminé dans le sens axial afin de limiter les courants de Foucault. Par conséquent, le concept est axisymétrique dans le sens du mouvement. L'alternateur linéaire fonctionne selon les mêmes principes physiques que les alternateurs conventionnels rotatifs sauf qu'il y a des effets de fin de course et de ce fait la vitesse ne peut pas être constante. Cette étude a également conduit à la réalisation d'un prototype de moteur Stirling de type Beta afin d'entraîner l'alternateur linéaire. Des études ont été menées afin d'améliorer les échanges thermique, de minimiser la masse du système, de minimiser les fuites du gaz de travail, de limiter les frottements tout en préservant la capacité de compression et d'assurer la tenue en pression des cylindres. Des simulations sous Solidworks® ont permis de valider la structure pour une pression de gaz de 10 bar. Les résultats ont conduit à l'utilisation des matériaux légers (polymère, aluminium), un matériau à haute tenue en température (Inconel 718), des isolants thermiques (céramique, acier alliage nickel-chrome). Les caractéristiques propres des matériaux combinés à une architecture adaptée permettront d'obtenir les performances souhaitées. Le moteur Stirling en phase d'assemblage est visible sur la figure 6.

4. Conclusion

Dans l'optique de réaliser un groupe électrogène, un alternateur linéaire fonctionnant à faible fréquence et un moteur Stirling ont été conçus (modèle de Schmidt-Beans pour le moteur et éléments finis pour l'alternateur). Afin d'améliorer les performances du groupe électrogène, des modèles analytiques plus précis sont en développement. Afin de valider ces modèles, un prototype d'alternateur a été réalisé et un prototype de moteur Stirling est en phase d'assemblage. Les principaux problèmes rencontrés concernent, les effets dus aux fins de course et au couple de denture au niveau de l'alternateur, les faibles fréquences de fonctionnement du moteur Stirling (20 Hz), le confinement hermétique du gaz de travail dans le moteur en raison des pièces mobiles, le comportement du régénérateur qui est difficile à modéliser. A moyen terme, un travail d'optimisation et d'intégration de l'ensemble nous permettra d'améliorer les performances du groupe électrogène mis au point afin d'améliorer le ratio puissance/masse.

Références

- [1] A. Robion, D. Sadarnac, F. Lanzetta, D. Marquet, T. Rivera, Breakthrough in energy generation for mobile or portable devices, *INTELEC 2007*, Rome, Italie, 30 Septembre – 4 Octobre 2007.
- [2] J. Gary Wood, N. Lane, Development of the Sunpower 35 We Free-Piston Stirling convertor, *AIP Conf. Proc.* 746, (2005), 682-687.

- [3] G. Schmidt, Theorie der Lehman Schen Calorischen Maschine, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 15, 1, (1871).
- [4] E.W. Beans, A Mathematical Model for the Stirling Engine Cycle, *J. Engn. Power*, 101, (1981), 505-510.
- [5] P. Nika, F. Lanzetta. Evaluation pratique des performances d'une machine Stirling de taille réduite fonctionnant en cycle frigorifique, *J. Phys. III.*, 7, (1997), 1571-1591.
- [6] H. C. Roters, *Electromagnetic Devices*, New-York, Wiley, 1941.

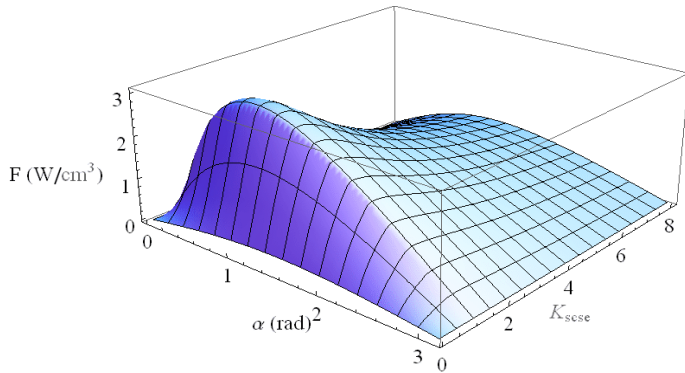


Figure 1 : Facteur de puissance d'un moteur Stirling en fonction du ratio des volumes de travail et du déphasage des pistons.

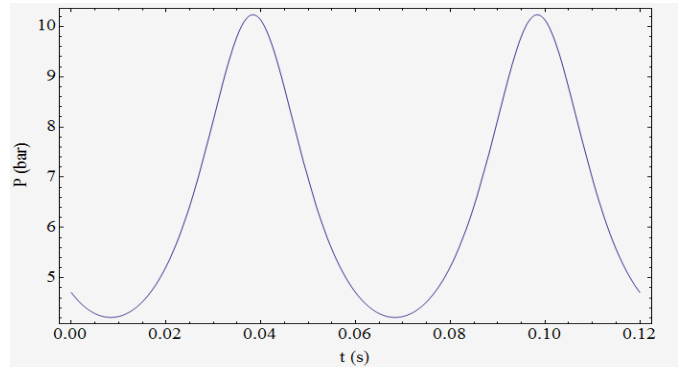


Figure 2 : Evolution de la pression instantanée au sein du moteur

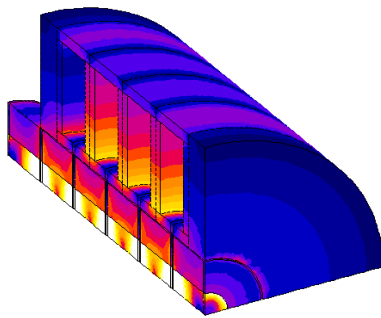


Figure 3 : Vue de l'alternateur représentant l'induction (0 T (bleu foncée) à 2 T (blanc)).

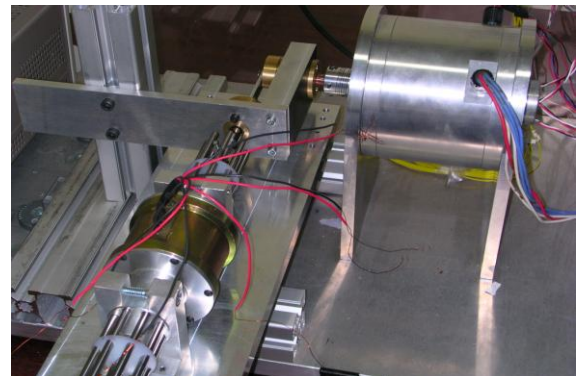


Figure 4 : Génératrice linéaire et système d'entraînement.

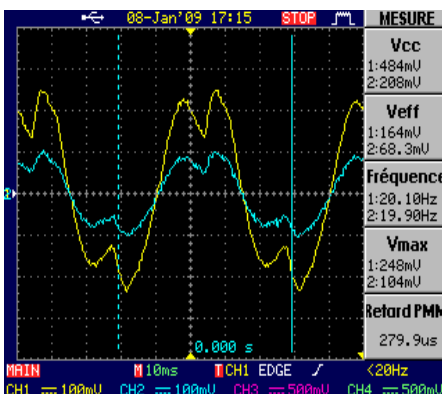


Figure 5 : Mesures de la tension et courant délivré en charge par une bobine de l'alternateur.

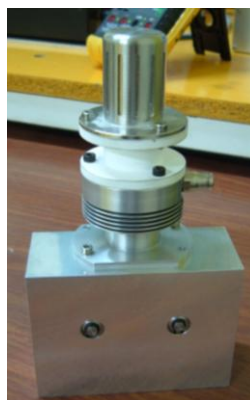


Figure 6 : Moteur Stirling type Beta.

Gaz de travail	Azote
Puissance électrique Envisagée	2 - 15 W
Pression	1 MPa
Source chaude	300 – 750 °C max
Puits froid	40 - 70 °C max
Efficacité thermique	15 – 25 %
Aimant permanent	NeFeB (Br: 1.4T, μ_r :1.0446)
Fréquence	≥ 20 Hz
Circuit magnétique	FEV270-35A et XC38

Tableau 1 : Caractéristiques du groupe électrogène.