Génératrice pour éolienne à flux axial avec stator en circuits imprimés

Fabrice Frugier, Denis Raulin, Didier Duclos, Cecile Dollé, Martine Grisenti, François Vernay, Jacky Bresson

fabrice.frugier@univ-perp.fr

IUT de Perpignan, département G.I.M. Ch. de la Passio Vella, BP 79905 - 66962 PERPIGNAN Cédex 9

Thèmes – Énergie - Environnement

Résumé – L'étude de cette génératrice synchrone à aimants permanents à flux axial ou discoïde a été menée conjointement avec les étudiants de l'IUT-GIM dans le cadre du concours national Gim'Eole. Pour des raisons d'encombrement inhérent au concours, la génératrice est de faibles dimensions (φ=270mm ; épaisseur=55mm) pour une éolienne à axe horizontal de 800mm de diamètre. L'alternateur est composé d'un stator pris en sandwich entre deux rotors. Chaque rotor comporte 16 aimants permanents au néodyme d'induction magnétique de 1,3T. Le stator, sans noyau métallique, est constitué de 6 disques de circuit imprimé double face sur lesquels sont gravées les bobines. Les pistes de cuivre ont une largeur de 1,5mm, une épaisseur de 175 μm pour un courant admissible de 9,5A. Ces disques sont décalés entre eux constituant ainsi un réseau hexaphasé. Cette étude fait appel à des méthodes analytiques et numériques (COMSOL 3D). Elle est complétée par une réalisation et des mesures de puissance (350W à 12tr/s) sur banc d'essais. L'absence de noyau métallique diminue le couple de détente (Cogging torque) assurant ainsi un démarrage rapide de l'éolienne.

Mots-Clés – Génératrice discoïde, aimants permanents, flux axial, stator circuit imprimé.

1. Introduction

Dans le petit éolien ou l'éolien urbain, l'énergie électrique est produite par des alternateurs synchrones multipôles à aimants permanents à flux axial (discoïde) ou radial à accouplement direct (Fig.1).



Ces deux topologies présentent des avantages et des inconvénients [1]. Nous privilégierons une structure de type discoïde qui minimise les puissances massique et volumique tout en présentant un bon rendement.

2. Conception de la génératrice



Fig.2 Vue éclatée de la génératrice à flux axial ou discoïde.

2.1. Etude magnétique du rotor

L'utilisation de 2 rotors double le champ magnétique dans l'entrefer. Chaque rotor comporte **16 aimants alternés N-S** au néodyme (NdFeB : L_{ai}=40, ℓ_{ai} =20, h_{ai}=10mm) d'induction magnétique de 1,3T, positionnés sur un anneau métallique afin de renforcer le champ magnétique dans l'entrefer (Fig.2). Le nombre de paires de pôles p et l'angle électrique¹ α sont de :

$$p = \frac{N_{aimants}}{2} = 8 \quad ; \quad \alpha = \frac{2\pi}{p} = 45^{\circ} \tag{1}$$

L'utilisation du logiciel Comsol 3D (Fig.3) restitue l'évolution du champ magnétique dans l'entrefer dans les 3 directions ; axiale OZ, radiale OX et tangentiel OY. Dans la direction tangentielle OY, le champ magnétique présente une forme quasi sinusoïdale (Fig.6-haut) de la forme :

$$B(\theta) = B_{moy} \sin\left(\frac{2\pi}{\alpha}\theta\right)$$
(2)

avec $-\alpha/2 < \theta < \alpha/2$

Pour la suite des calculs on prendra la valeur moyenne $B_{moy}=0,66T$.



Fig.3 Répartition du champ magnétique dans le plan radial XZ (gauche) et tangentiel XY (droite), pour un entrefer de 10mm.

2.2. Etude du stator

Le stator de cette génératrice comporte **6 phases** constituées chacune d'un circuit imprimé (CI) double face de 240mm de diamètre et 0,9mm d'épaisseur (Fig.4). Chaque phase est le résultat de la **mise en série de 8 bobines**. Pour chaque phase, l'une des extrémités (**Phase**) est dirigée vers le centre du CI quant à l'autre (**Neutre**) elle est reliée à la piste annulaire (les 6 pistes annulaires sont électriquement reliées entre elles assurant un **branchement en étoile**). Chaque bobine est constituée de 12 spires imprimées sur chacune des 2 faces du CI. Soit un total de **24 spires par bobine**. Les pistes de cuivre ont une **largeur de 1,5mm**, une épaisseur de **175 µm** pour un courant admissible de 9,5A. Une découpe en forme de « **trou de serrure** » au centre du CI permet de récupérer les 6 phases après **décalage de 7,5**° des 6 CI entre eux.



Fig.4 Faces recto-verso d'une même phase et connexions de sortie.

Le stator hexaphasé ainsi sans noyau métallique minimise les ondulations du couple de détente (Cogging torque). Cela assure un démarrage rapide de l'éolienne.

2.3. Calcul de la f.é.m induite

Pour une bobine de N spires baignant dans un champ magnétique perpendiculaire (Fig.5), la force électromotrice (f.é.m) induite e(t) vaut d'après la loi de Lenz-Faraday :

¹ L'angle électrique est l'angle mécanique d'un pôle. 360° électriques correspondent à 360° mécaniques divisés par le nombre de paires de pôles

$$e(t) = -N_{sp} \frac{d\varphi}{dt} = -N_{sp} \frac{d\varphi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -N_{sp} \frac{d\varphi}{d\theta} \omega \qquad (3)$$

- Où : φ = B.S : flux magnétique traversant les spires (Wb)
 Nsp : nombre de spires dans une bobine
 B : champ magnétique (T)
 - S : surface embrassée par le flux magnétique (m^2)
 - $\omega = 2\pi \text{Ntrs}$: vitesse angulaire (rd/s)

Ntrs= vitesse de rotation du rotor de la génératrice (tr/s)



Fig.5 Géométrie d'une bobine avec 2 aimants N-S. Position produisant la f.é.m maximale.

Le résultat obtenu présente une forme sinusoïdale de valeur maximale qui évolue entre 0,5V et 0,63V suivant la méthode utilisée (Fig.6-bas).





Fig.6 Champ magnétique tangentiel au centre de l'entrefer de 10mm pour plusieurs distances radiales (haut) et tension délivrée par une bobine pour Ntrs=1tr/s par dérivation de champ magnétique, par la détermination géométrique des pistes sous les aimants et par simulation 3D (bas).

3. Résultats expérimentaux - Essais à vide et en charge

Le banc de test est constitué d'un moteur à vitesse variable entraînant les deux rotors de la génératrice.

La mesure à vide de la tension de sortie suit quasiment la courbe théorique (Fig.7). Pour plusieurs vitesses de rotation et diverses résistances de charge $(5,5\Omega \rightarrow 22\Omega)$, la tension de sortie et la puissance aux bornes de la charge sont mesurées pour un entrefer de 10mm (Fig.7 et 8).



Fig.7 Tension de sortie en fonction de la vitesse de rotation N(tr/s), à vide et pour plusieurs résistances de charge.



Fig.8 Puissance de sortie en fonction de la vitesse de rotation N(tr/s) pour plusieurs résistances de charge.

4. Conclusion et perspectives

L'originalité de cette réalisation réside dans le stator formé de 6 disques de circuit imprimé double face sur lesquels sont gravées les bobines sans noyau métallique. Cette technique permet d'obtenir une faible épaisseur de stator (environ 6mm). L'utilisation du logiciel COMSOL 3D nous a permis, moyennant quelques approximations, de modéliser la génératrice Les mesures effectuées sur banc de test sont proches de la théorie. Nous produisons plus de 350W à 12 tr/s avec un couple de démarrage quasiment nul.

5. Références

[1] R. Mignot, D. Chamagne, F. Dubas, C. Espanet. Modélisation magnétique de moteurs à aimants permanents à flux radial et flux axial de puissance inférieure à 15kW pour la traction automobile urbaine et extra-urbaine. Spécifications et comparatifs, Symposium de Génie Electrique (SGE'14)-ENS CACHAN, France, 8-10- Juillet 2014.