# Génératrice pour éolienne à flux axial avec stator en circuits imprimés

Fabrice FRUGIER, Denis RAULIN, Didier DUCLOS, Cécile DOLLÉ, Martine GRISENTI, François VERNAY, Jacky BRESSON IUT de Perpignan, département G.I.M.
Ch. de la Passio Vella, BP 79905 - 66962 PERPIGNAN Cédex 9
E.mail : bresson@univ-perp.fr Site internet : http://gim.iut.univ-perp.fr

THEMATIQUE – Energie – Environnement –  $60^{ieme}$  section –  $63^{eme}$  section.

RESUME – L'étude de cette génératrice synchrone à aimants permanents à flux axial ou discoïde a été menée par les étudiants de l'IUT-GIM dans le cadre du concours national Gim'Eole [1]. Elle est composée d'un stator pris en sandwich entre deux rotors. Chaque rotor comporte 16 aimants au néodyme d'induction magnétique de 1,3T. Le stator, sans noyau, est constitué de 6 disques de circuit imprimé double face sur lesquels sont gravées les bobines. Ces disques sont décalés entre eux constituant ainsi un réseau hexaphasé. Cette étude fait appel à des méthodes analytiques et numériques (FEMM 2D et COMSOL 3D). Elle est complétée par une réalisation et des mesures sur banc d'essais ainsi qu'en situation réelle.

*Mots-clés* – *Génératrice, discoïde, aimants permanents, flux axial, stator circuit imprimé, hexaphasé, éolien.* 

#### 1. INTRODUCTION

La production d'énergie électrique dans l'éolien suppose l'utilisation d'une génératrice. Dans le petit éolien ou l'éolien urbain, il s'agit généralement d'alternateurs synchrones multipôles à aimants permanents à flux axial ou radial à accouplement direct (Fig.1).



Fig.1 Topologie d'alternateur à flux axial ou discoïde et à flux radial.

Ces deux topologies présentent des avantages et des inconvénients [2]. Nous privilégierons une structure de type discoïde qui minimise les puissances massique et volumique tout en présentant un bon rendement. Pour des raisons d'encombrement inhérent au concours Gim'Eole, la génératrice sera de faibles dimensions ( $\phi$ =270mm ; épaisseur=55mm) pour une éolienne à axe horizontal de 800mm de diamètre.

#### 2. CONCEPTION DE LA GÉNÉRATRICE

Elle est composée (Fig.2) d'un stator bobiné (Induit) pris en sandwich entre deux rotors magnétiques (Inducteur).



Fig.2 Vue éclatée et de côté de la génératrice ULTIMATE 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,  $\ell_{ai}$ =20,  $h_{ai}$ =10mm), d'induction magnétique de 1,3T. Positionnés sur un anneau métallique afin de renforcer le champ magnétique dans l'entrefer, ils sont ensuite collés avec de la résine époxy sur une flasque en thermoplastique de type Ertalon. Le nombre de paires de pôles p et l'angle électrique<sup>1</sup>  $\alpha$  sont de :



Fig.3 Développé de la génératrice, dimensions axiale OZ et tangentielle OY pour un entrefer de 10mm.

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

Une première approche 2D a été faite avec le logiciel gratuit FEMM (Finite Element Method Magnetics), pour peu que l'on développe une coupe de la génératrice le long du rayon moyen de la couronne d'aimants (Fig.3). Les résultats obtenus donnent un ordre de grandeur du champ magnétique entre les aimants mais ne prennent pas en compte la dimension radiale OX. Pour une analyse plus exhaustive nous avons exploité les possibilités du logiciel par éléments finis Comsol 3D (Fig.4). Ainsi, dans la direction axiale OZ passant par le milieu de deux aimants N-S opposés, la figure 5(gauche) donne l'évolution axiale du champ magnétique. Pour un entrefer total égal à  $e_{bob}+2g = 10mm$ , le flux magnétique varie suivant les deux directions axiale et radiale (-5mm<Z<+5mm et R<sub>int</sub><X<R<sub>ext</sub>).



Fig.4 Répartition du champ magnétique dans le plan radial XZ (gauche) et tangentiel XY (droite), pour un entrefer de 10mm (Comsol3D).

Dans la direction radiale OX au centre de l'aimant, on remarque l'effet de bord où le champ magnétique évolue depuis 0,35T aux extrémités à environ 0,75T au centre de l'aimant (Fig.5-droite). On prendra pour la suite des calculs la valeur moyenne  $B_{moy}=0,66T$ .

Enfin, dans la direction tangentielle OY au milieu de l'entrefer, la répartition du champ magnétique sur l'angle électrique  $\alpha$  et pour plusieurs positions radiales présente une forme quasi sinusoïdale (Fig.8-haut) de la forme :



Fig.5 Répartition axiale (gauche) et radiale (droite) du champ magnétique dans l'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.6). 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 nécessaires à la gravure de ces bobines ont une **largeur de 1,5mm** pour une épaisseur de **175**  $\mu$ m 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.6 Faces recto-verso d'une même phase et connexions de sortie.

Les 6 fils ainsi soudés achemineront la puissance par l'axe central creux. Le stator hexaphasé est ainsi sans noyau métallique ce qui annule 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, la force électromotrice (f.é.m) induite vaut d'après la loi de Lenz-Faraday :

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

 $O\dot{u}: \phi = B.S:$  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.7 Géométrie d'une bobine avec 2 aimants N-S. Position produisant la f.é.m maximale.

Si l'on considère, en première approximation, que le champ magnétique B reste constant autour de la valeur moyenne  $B_{moy}$ , alors la valeur maximale de la f.é.m vaut :

$$d\varphi = B_{moy} dS = B_{moy} L_{ai} R_{moy} . d\theta$$

$$E_{max} = N_{sp} B_{moy} L_{ai} R_{moy} \omega = N_{sp} B_{moy} L_{ai} V_{tan g} \qquad (4)$$

$$E_{max} = N_{sp} B_{moy} L_{ai} R_{moy} 2\pi N_{trs}$$

Où : Lai : longueur du fil en interaction avec l'aimant (m) Vtang =@Rmoy: vitesse tangentielle du milieu de l'aimant (m/s) Pour une vitesse de rotation du rotor de  $N_{trs}=1$ tr/s, 20 spires sous l'aimant et 2 aimants voisins N-S actifs, la tension est double et l'on obtient  $E_{max}=0,49$ V.

On peut aussi considérer que comme le champ magnétique sous une paire de pôles N-S est quasiment sinusoïdal, alors en tournant le rotor génère un champ tournant qui va induire dans la bobine de surface S=20x40cm<sup>2</sup>, une f.é.m de même nature, ainsi (éq.2 et éq.3) :

$$e(t) = -N_{sp} \frac{d\varphi}{dt} = -N_{sp} S \frac{dB}{dt} = -N_{sp} S \frac{dB}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -N_{sp} S \omega \frac{dB}{d\theta}$$
  
or  $\frac{dB}{d\theta} = B_{moy} \frac{2\pi}{\alpha} cos\left(\frac{2\pi}{\alpha}\theta\right) donc,$  (5)  
 $e(\theta) = -N_{sp} S \omega B_{moy} \frac{2\pi}{\alpha} cos\left(\frac{2\pi}{\alpha}\theta\right)$ 

La figure 8-bas en trait plein fait apparaître cette variation sur l'angle électrique. La valeur maximale est ici de  $E_{max}=0,53V$ .

Une autre méthode, plus laborieuse, consiste à déterminer graphiquement la longueur des pistes sous chaque pôle en fonction de la position de la paire de pôle (Fig. 8bas-pointillé). Ce résultat, bien que théorique est plus proche de la réalité puisqu'il prend en compte la géométrie de la bobine et donne  $E_{max}=0,48V$ .

Enfin sur la même figure, l'exploitation du logiciel de simulation 3D fait apparaître la tension  $E_{max}=0,63V$  aux bornes de la bobine. Cette valeur est obtenue par simulation d'une bobine virtuelle qui ne représente pas tout à fait la réalité.



o ( ) / Angle electrique

Fig.8 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).

# 2.4. Evaluation du couple

L'exploitation du logiciel FEMM 2D nous informe sur la force de Laplace et par la même sur le couple appliqué sur une bobine, que l'on peut aussi déterminer analytiquement :

$$F_{bob} = I.L_{bob}.B_{moy} \rightarrow C_{bob} = F_{bob}.R_{moy}$$
  
soit  $C_{bob} = B_{moy}L_{bob}R_{moy}I = K_{bob}.I$  (6)  
et  $C_{phase} = 8.C_{bob} = 8.K_{bob}.I = K_{phase}.I$ 

Où : I : intensité du courant dans la bobine (A), Lbob : longueur de pistes sous les 2 aimants (m) Le couple C est donc proportionnel au courant électrique I, ce que l'on savait déjà. Mais dans une machine synchrone, la f.é.m est aussi proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation, ainsi :

$$C_{phase} = K_{phase} I \quad et \quad E_{phase} = K_{phase} .\omega$$
  
avec  $K_{phase} = 8.B_{moy} L_{bob} R_{moy} = 0.72 Nm/A$  (7)

On peut ainsi remonter à la tension et à la puissance en fonction de la vitesse de rotation N(tr/s). Ainsi pour N=1tr/s, la f.é.m maximale que produit une bobine est de  $E_{max}=0,57V$ . La valeur de  $K_{phase}=0,72Nm/A$  (valeur surestimée) ou **constante de couple**, caractérise bien la génératrice synchrone à flux axial.

#### 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le banc de test est constitué d'un moteur à vitesse variable entraînant les deux rotors de la génératrice (Fig.9).



Fig.9 Banc de test : moteur accouplé à la génératrice discoïde.

Les 6 tensions alternatives de phases, à la fréquence  $f_{phase}=8*Ntrs$ , sont redressées par un pont de diodes PD6 qui restitue une tension continue légèrement ondulée (Fig. 10). La mesure de la fréquence  $f_{phase}$  d'une phase nous renseigne sur la vitesse de rotation N(trs) du rotor.



Fig.10 Hexaphasé en Etoile relié au redresseur PD6

D'autre part, la tension redressée moyenne  $Ue_{moy}$  et son taux d'ondulation  $\Delta Ue$  sont donnés par [3] :

$$Ue_{moy} = \frac{2q}{\pi} E_{max} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)$$
  
et  $\Delta Ue = \frac{Ue_{max} - Ue_{min}}{2Ue_{moy}} = \frac{\pi}{2q} \cdot \frac{1 - \cos(\pi/q)}{\sin(\pi/q)}$  (8)  
avec  $q = 6$  nb de phases

$$Ue_{moy} = \frac{6}{\pi} E_{max}$$
 et  $\Delta Ue = 0,07$ 

Dans l'intervalle de commutation T/q, deux diodes D et D' de branches différentes mettent en relation deux phases avec la charge (Fig.11a). Ce schéma peut être remplacé par un générateur continu en série avec sa résistance interne (2.Rphase), son inductance (2. $\ell$ phase) et la chute de tension des deux diodes (~ 1V) simulée par 2.Rdiode (Fig.11b).



Fig.11 Schéma équivalent électrique : alternatif à vide (a) et continu chargé (b)

Nous avons estimé la résistance ohmique d'une phase de 8 bobines de 24 spires. Chaque bobine est le résultat d'environ L=3330mm de piste de cuivre enroulée, soit :

$$R_{bobine} = \rho \frac{L}{S} = 0.24 \,\Omega \quad soit \quad R_{phase} = 1.9 \,\Omega \tag{9}$$

La mesure entre 2 phases, avec un ohmmètre, a donné Rint= $2.R_{phase}=4,4\Omega$ , proche de  $2x1,9=3,8\Omega$ . Aux fréquences où l'on travaille, on peut négliger l'impédance de l'inductance devant la valeur de la résistance.

## 3.1. Essais à vide et en charge

Sur les oscillogrammes de l'essai à vide on peut remarquer, en accord avec la théorie, la forme sinusoïdale des tensions de phases (Fig.12a). De plus, on note une légère différence d'amplitude due à la position des 6 phases dans l'entrefer qui ne perçoivent pas le même champ magnétique.

Dans l'essai en charge, on visualise bien l'ondulation de la tension continue dont la fréquence est q=6 fois celle de la tension de phase (Fig.12b).



Fig.12 Oscillogramme de 3 tensions de phase sur 6 et de la tension redressée continue Ue : à vide (a), en charge Re=5,5  $\Omega$  (b).

Pour plusieurs vitesses de rotation et diverses résistances de charge ( $R=\infty \rightarrow 5,5\Omega$ ), la tension de sortie et la puissance aux bornes de la charge sont mesurées (Fig.13 et 14).

La mesure à vide de la tension de sortie suit quasiment la courbe théorique (Fig.13).



Fig.13 Tension de sortie Ue en fonction de la vitesse de rotation N(tr/s), à vide et pour plusieurs résistances de charge (entrefer 10mm).

Sur la figure 14, les mesures de puissance sur charge sont comparées à la puissance théorique optimale. Cette dernière est calculée en prenant la résistance de charge égale à la résistance interne estimée, ainsi :



Fig.14 Puissance de sortie Pe en fonction de la vitesse de rotation N(tr/s) pour plusieurs résistances de charge (entrefer 10mm).

De plus, l'exploitation des essais en charge a permis de déterminer le coefficient  $K_{phase}$ =0,67Nm/A qui est à rapprocher de la valeur théorique de  $K_{phase}$ =0,72Nm/A.

#### 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour les besoins du concours national GimEole, les étudiants du département GIM ont réalisé une génératrice synchrone à aimants permanents à flux axial de faibles dimensions. 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) et donc d'entrefer entre les deux couronnes d'aimants augmentant d'autant le champ magnétique.

L'utilisation du logiciel gratuit FEMM 2D puis de COMSOL 3D nous a permis, moyennant quelques approximations, de modéliser la génératrice, notamment de déterminer sa constante de couple. Les mesures effectuées sur banc de test sont proches de la théorie. Nous produisons plus de 360W à 12 tr/s avec un couple de démarrage quasiment nul.

#### 5. References

- [1] A. ALVARO, R. CASTAN, E. DURAND, Y. HADJ HASSEN, H. LEHOUCQ, T. MARRASSE, J. MISMAQUE, C. PELAT, S. RUIZ, T. ROSA, Etudiants de l'IUT de Perpignan au Concours National Gim'Eole « Les éoliennes urbaines », Saint-Nazaire 19-21 Mars 2020 (annulé Covid-19).
- [2] 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.
- [3] G. SEGUIER, « Les montages redresseurs Etude générale », Dunod 218 pages,1970.
- [4] D. MEEKER. «Finite Element Method Magnetics (FEMM) », Version 4.2 User's Manual, p160, January 30, 2018.