

## **Modélisation d'une génératrice synchrone à aimants permanents et à flux axial pour des éoliennes de petites puissances**

**Mamadou SYLLA\***, Oumar CISSE, Amy MBAYE, Mohamed C. AIDARA, Mouhamadou F. NDIAYE  
et Mamadou L. NDIAYE

*Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Centre International de Formation et de Recherche en Energie Solaire (CIFRES), BP 5085, Sénégal*

---

\* Correspondance, courriel : [syllamamadou5@gmail.com](mailto:syllamamadou5@gmail.com)

### **Résumé**

Dans le domaine de la conception des machines électriques, la modélisation analytique constitue une bonne alternative. Cet article porte sur la conception et la modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents et à flux axial (MSPFA) destinée à des éoliennes de petites puissances. Pour utiliser une MSPFA pour les systèmes de production d'énergie éolienne, les caractéristiques de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent doivent être prises en compte lors de la conception. Dans cette étude, La modélisation du circuit magnétique est faite pour calculer l'induction au niveau du stator. Le flux magnétique à travers une bobine est évalué ainsi que la force électromotrice. Les simulations du modèle sous l'environnement MATLAB montre une grande influence de l'entrefer et de l'épaisseur des aimants sur la force électromotrice à vide. Elles montrent aussi que la f.é.m. à vide pour un entrefer fixe varie dans le même sens que l'épaisseur des aimants.

**Mots-clés :** *aimant permanents, modélisation de machine à aimants permanents, éolienne.*

### **Abstract**

#### **Modeling of axial flux permanent magnet generator for small wind turbine**

In the field of electrical machine design, analytical modeling is a good alternative. This article focuses on the design and modeling of an axial flux permanent magnet generator (AFPMG) for small wind turbines. To use an AFPMG for wind power systems, the characteristics of the wind turbine as a function of the wind speed must be taken into account during the design. In this study, the modeling of the magnetic circuit is made to calculate the induction at the stator. The magnetic flux through a coil is evaluated as well as the electromotive force (e.m.f.). The simulations of the model under the MATLAB environment show a great influence of the gap and the thickness of the magnets on the empty electromotive force. They also show that the e.m.f. empty for a fixed air gap varies in the same direction as the thickness of the magnets

**Keywords :** *permanent magnets, modeling of permanent magnet generator, wind turbine.*

## 1. Introduction

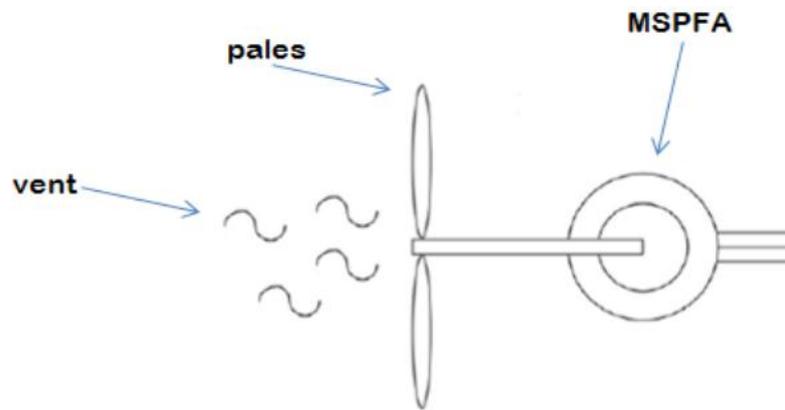
La satisfaction des besoins présent et futur en énergie de la société actuelle nécessite de trouver des solutions adaptées et de les diversifier [1]. Face à ce défi majeur, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables [1 - 4]. Dans ce contexte général, cet article est orienté sur la filière éolienne au Sénégal particulièrement aux petits éoliens (gamme jusqu'à 100kw) [1]. Dans les régions côtières du Sénégal, l'énergie éolienne complète parfaitement l'énergie solaire et permet ainsi d'améliorer la rentabilité de l'approvisionnement énergétique décentralisé [5]. Ces éoliens peuvent être utilisés dans le domaine de l'électrification rurale, pour diverses applications (pompage, traitement de l'eau, éclairage, transformation de produits agricoles, etc.). Cependant, au Sénégal, les vitesses moyennes de vent sont faibles environ 4 m/s [6]. Ainsi, il est nécessaire d'adapter les éoliens aux potentiels locaux des sites d'implantation. Plusieurs travaux de recherche sur des modèles analytiques portent sur le calcul des grandeurs électromagnétiques des machines électriques notamment l'induction magnétique, le flux et la force électromotrice [7 - 9]. La distribution du champ magnétique dans une machine à aimants permanents et à flux axial pour la conversion d'énergie éolienne est étudiée dans [10]. L'expression de la densité du flux magnétique est calculée en utilisant un modèle 2D afin de prendre en compte la contribution axiale et circonférentielle de l'induction magnétique.

Dans [11], les auteurs considèrent une machine sans encoche à aimants permanents et à flux axial. Ils supposent que la machine est composée de plusieurs machines linéaires. Ils déterminent ensuite l'expression analytique de la distribution de la densité de flux dans l'entrefer à partir des équations de Poisson et de Laplace. La performance globale de la machine est connue en faisant la somme des performances de chaque machine linéaire considérée. Dans [12], l'auteur élabore un modèle analytique permettant d'avoir une première approche et des premières estimations sur la faisabilité et les dimensions géométriques à appliquer pour la modélisation des machines électriques discoïdes à double entrefer. Ce modèle est basé sur le calcul de l'induction dans l'entrefer s'appuyant sur l'application du théorème d'Ampère, de la conservation du flux et du couple électromagnétique. Dans [13], les auteurs présentent la modélisation et la conception d'une génératrice synchrone à aimants permanents et à flux axial. Le stator de cette génératrice est inséré entre deux rotors et est constitué de 10 bobines regroupées par deux afin de former un système à cinq phases. Les bobines sont moulées dans de la résine. Dans [14], la conception d'une MSAPFA sans encoche est présentée pour l'application d'éoliennes à attaque directe. Une optimisation multi-objectifs de la machine a été faite pour diminuer le coût du matériel et d'augmenter le rendement énergétique du générateur. Un modèle de circuit magnétique est réalisé pour évaluer le flux dans toutes les parties de la machine.

Les auteurs mettent en évidence dans [15 - 18] le choix du matériau utilisé sur la construction d'un alternateur à aimants permanents. Dans [19], les auteurs abordent la conception électromagnétique et l'analyse par éléments finis d'un générateur synchrone à aimants permanents à flux axial (AFPM) pour les petites éoliennes. L'étude est menée pour trouver une topologie de générateur électrique performante et rentable pour l'application aux petits éoliens. Pour utiliser un générateur synchrone à aimant permanent pour les systèmes de production d'énergie éolienne, les caractéristiques de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent doivent être prises en compte lors de l'étape de conception et de l'évaluation des performances. En utilisant les caractéristiques d'une éolienne fournies par un fabricant, les auteurs prédisent dans [20] la performance d'une génératrice à aimants permanents et à flux axial en analysant les caractéristiques du champ électromagnétique. L'optimisation de la performance de ces machines (aérogénérateurs) passe par une bonne compréhension de l'influence des différents paramètres de la machine sur la performance. D'où la nécessité d'étudier le modèle analytique de la machine afin d'évaluer l'influence de certains paramètres sur la production. L'objectif de cet article est d'étudier l'influence de l'entrefer à partir d'un modèle analytique issu de la modélisation du circuit magnétique d'une machine synchrone à aimants permanents et à flux axial.

## 2. Méthodologie

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est représentée sur la **Figure 1**. L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie électrique par l'intermédiaire de la génératrice.



**Figure 1** : Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

La relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la génératrice est donnée dans [13] et est représentée dans **l'Équation (1)**.

$$n = \frac{60 \lambda V_0}{2 \pi R} \quad (1)$$

$$\lambda = \sqrt{80 / b} \quad (2)$$

$n$  étant la vitesse de rotation de la génératrice en tr/mn,  $\lambda$  l'accélération des pales,  $V_0$  la vitesse du vent  $R$  le rayon des pales et  $b$  le nombre de pales.

Dans cette partie, nous nous proposons de présenter la conception et le modèle analytique de la MSPFA. Le cahier des charges est élaboré à partir des instruments locaux que nous disposons au laboratoire. Ces instruments ne nous permettent pas de réaliser un prototype avec un entrefer inférieur à 5mm. Cependant, nous nous sommes fixés comme objectif avec un entrefer de 5 mm d'avoir une force électromotrice à vide de 30 V à 230 tr/min. Pour se faire, un modèle magnétique simplifié est développé. Ce modèle est obtenu à partir d'une modélisation du circuit magnétique représentant la structure étudiée par un simple réseau de réluctances. Il est composé des expressions reliant les performances de la machine à ses paramètres géométriques et physiques. La **Figure 2** montre une vue intérieure radiale de la machine et la **Figure 3** illustre le parcours du flux magnétique principal dans ce type de machine. Les paramètres  $e_a$ ,  $e$ ,  $e_s$  et  $\phi$  sont respectivement l'épaisseur des aimants, de l'entrefer, du stator et le flux magnétique.

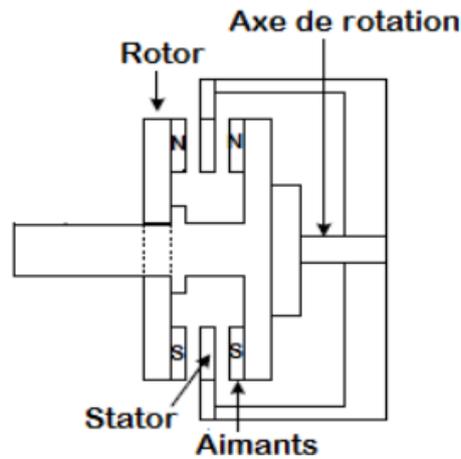


Figure 2 : Génératrice à stator interne

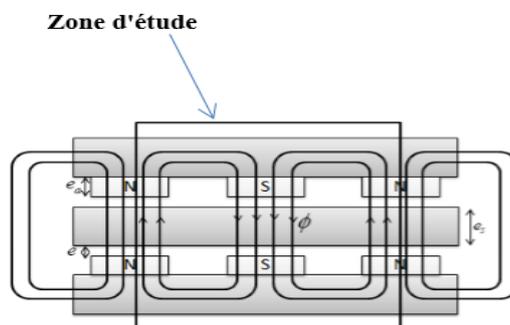


Figure 3 : Circuit magnétique

Afin de modéliser le circuit magnétique de la machine, une paire de pôle a été choisi comme indiqué dans la zone d'étude de la **Figure 3**. La **Figure 4** présente une modélisation du chemin parcouru par le flux des aimants permanents, à travers la zone d'étude, qui est représenté par une force magnétomotrice  $E_a$  avec une réluctance  $R_a$ . Le stator est représenté par une réluctance  $R_s$ , et l'entrefer par une réluctance  $R_e$ . Le flux  $\Phi$  représente le flux des aimants permanents traversant l'entrefer. Le flux de fuite entre deux aimants adjacents est négligé.

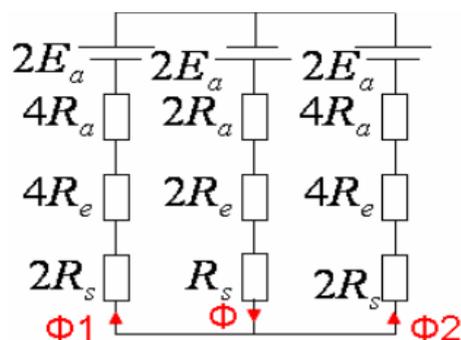


Figure 4 : Schéma équivalent du circuit magnétique

La loi des mailles et des nœuds permettent d'écrire **l'Équation (3)**:

$$\phi = \frac{2 E_a}{2 R_a + 2 R_e + R_s} \quad (3)$$

avec,

$$E_a = \frac{B_r}{\mu_a \mu_0} e_a \tag{4}$$

$$R_a = \frac{1}{\mu_a \mu_0} \cdot \frac{e_a}{S_a} \tag{5}$$

$$R_e = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{e}{S_e} \tag{6}$$

$$R_s = \frac{1}{\mu_s \mu_0} \cdot \frac{e_s}{S_s} \tag{7}$$

En remplaçant la force magnétomotrice de l'Équation (4) et les reluctances des Équations (5), (6) et (7) par leurs expressions, le flux de l'Équation (3) devient :

$$\phi = \frac{B_r \cdot S}{1 + \mu_a \left( \frac{e}{e_a} + \frac{e_s}{2e_a} \right)} \tag{8}$$

L'induction au niveau du stator est donnée par l'Équation (9) :

$$B_s = \frac{B_r}{1 + \mu_a \left( \frac{e}{e_a} + \frac{e_s}{2e_a} \right)} \tag{9}$$

$B_r$  étant l'induction rémanente des aimants,  $S$  la surface totale d'une bobine se trouvant entre deux aimants face à face,  $S_a$  la surface d'un aimant,  $S_e$  la surface de l'entrefer,  $S_s$  la surface du stator,  $\mu_a$  la perméabilité relative des aimants,  $\mu_0$  la perméabilité du vide et  $\mu_s$  la perméabilité du stator.

Afin d'étudier l'évolution du flux, nous considérons un repère où l'axe des abscisses représentent l'axe de l'aimant 1 et l'axe des ordonnées la perpendiculaire. Dans ce repère, la bobine décrit un mouvement circulaire uniforme et sa position est reperée par l'angle  $\alpha$  que fait son axe avec l'axe des abscisse **Figure 5**.

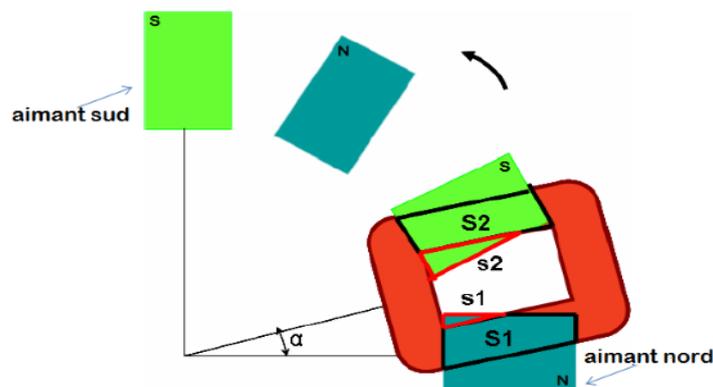


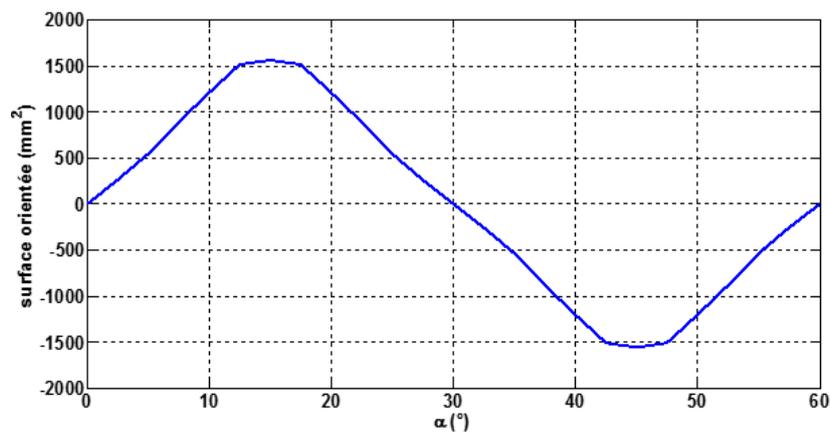
Figure 5 : Variation du flux dans une bobine

Pour déterminer le flux qui traverse une bobine en fonction de l'angle  $\alpha$ , des calculs de surface active d'une bobine ont été fait. Les équations des droites limitant chaque aimant et la bobine permettent de calculer S1 et S2 [21]. En effet, la résolution des équations adéquates permet de déterminer les coordonnées des sommets de ces surfaces. Elles sont ensuite décomposées en surfaces élémentaires. Le calcul de ces aires élémentaires (rectangle, triangle, trapèze) permet de déduire S qui est la somme de S1 et S2. Avec la méthode exposée on obtient les résultats du **Tableau 1**.

**Tableau 1 : Valeurs de la surface active d'une bobine**

$\alpha$ (°)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
S (mm <sup>2</sup> )	0	260	544	885	1208	1513	1556

L'induction magnétique étant constante, le flux est proportionnel à la surface S. La connaissance de S permet de déduire le flux. La **Figure 5** représente la variation de la surface S en fonction de  $\alpha$ .



**Figure 6 : Variation de la surface S**

Le flux et la surface S ont les mêmes formes d'ondes et la décomposition en série de Fourier donne **l'Équation (10)**:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \sum_{k=1}^n [A_k \cos(kp \omega t) + B_k \sin(kp \omega t)] \quad (10)$$

Le flux étant impaire, sa valeur moyenne et les coefficients  $A_k$  sont nuls. Il admet aussi une symétrie par rapport au milieu d'alternance ce qui implique que sa décomposition en série de Fourier ne comprendra que les termes en sinus de rang impair. En définitive le flux se met sous la forme :

$$\Phi(t) = B_s \sum_{k=0}^5 [B_{2k+1} \sin((2k+1)p \omega t)] \quad (11)$$

ou,

$$\Phi(\alpha) = B_s \sum_{k=0}^5 [B_{2k+1} \sin((2k+1)p \alpha)] \quad (12)$$

avec,  $\alpha = \omega t$

$$\frac{\Phi(\alpha)}{B_s} = \sum_{k=0}^5 [B_{2k+1} \sin((2k+1)p\alpha)] \tag{13}$$

Sachant que :

$$\Phi(\alpha) = B_s S(\alpha) \tag{14}$$

$$S(\alpha) = \sum_{k=0}^5 [B_{2k+1} \sin((2k+1)p\alpha)] \tag{15}$$

Pour différentes valeurs de  $\alpha$ , un système d'équation linéaire est obtenu : **Équation (16)**.

$$AX = B \tag{16}$$

avec,

$$A = \begin{bmatrix} \sin(\frac{\pi}{12}) & \sin(\frac{\pi}{4}) & \sin(\frac{5\pi}{12}) & \sin(\frac{7\pi}{12}) & \sin(\frac{3\pi}{4}) & \sin(\frac{11\pi}{12}) \\ \sin(\frac{\pi}{6}) & \sin(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{5\pi}{6}) & \sin(\frac{7\pi}{6}) & \sin(\frac{3\pi}{2}) & \sin(\frac{11\pi}{6}) \\ \sin(\frac{\pi}{4}) & \sin(\frac{3\pi}{4}) & \sin(\frac{5\pi}{4}) & \sin(\frac{7\pi}{4}) & \sin(\frac{9\pi}{4}) & \sin(\frac{11\pi}{4}) \\ \sin(\frac{\pi}{3}) & \sin(\pi) & \sin(\frac{5\pi}{3}) & \sin(\frac{7\pi}{3}) & \sin(3\pi) & \sin(\frac{11\pi}{3}) \\ \sin(\frac{5\pi}{12}) & \sin(\frac{5\pi}{4}) & \sin(\frac{25\pi}{12}) & \sin(\frac{35\pi}{12}) & \sin(\frac{15\pi}{4}) & \sin(\frac{55\pi}{12}) \\ \sin(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{3\pi}{2}) & \sin(\frac{5\pi}{2}) & \sin(\frac{7\pi}{2}) & \sin(\frac{9\pi}{2}) & \sin(\frac{11\pi}{2}) \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$B = \left[ s\left(\frac{\pi}{72}\right) \quad s\left(\frac{\pi}{36}\right) \quad s\left(\frac{\pi}{24}\right) \quad s\left(\frac{\pi}{18}\right) \quad s\left(\frac{5\pi}{72}\right) \quad s\left(\frac{\pi}{12}\right) \right]^T \tag{18}$$

$$X = [B_1 \quad B_3 \quad B_5 \quad B_7 \quad B_9 \quad B_{11}] \tag{19}$$

Après résolution de **l'Équation (16)**, l'expression du flux devient :

$$\Phi(\alpha) = B_s \left[ 1417.7 \sin(6\alpha) - 163.9 \sin(18\alpha) + 6.9 \sin(30\alpha) \right. \\ \left. + 4.6 \sin(42\alpha) - 8.6 \sin(54\alpha) + 19.3 \sin(66\alpha) \right] \tag{20}$$

Le taux de distorsion harmonique par rapport au fondamental est défini dans **l'Équation (21)**

$$THD = \frac{V_h}{V_f} \cdot 100 \tag{21}$$

avec,  $V_h$  et  $V_f$  les valeurs efficaces de l'harmonique de rang  $h$  et du fondamental.

Les résultats obtenus sont représentés dans le **Tableau 2**.

**Tableau 2 : Taux de distorsion des harmoniques**

Rang harmonique		3	5	7	9	11
THD en %	flux	11.6	0.5	0.3	0.6	1.4
	Norme CEI 61000-2-2	5	6	5	1.5	3.5

En négligeant les harmoniques de rang supérieur à 3 car faible par rapport à la norme CEI 61000-2-2, l'expression du flux d'une spire devient :

$$\Phi(\alpha) = \Phi_m \sin(p\alpha) - \Phi_{3m} \sin(3p\alpha) \quad (22)$$

La force électromotrice (f.é.m.)  $e(\alpha)$  est donnée par **les Équations (23) et (24)** :

$$e(\alpha) = -\frac{d\Phi(\alpha)}{dt} \quad (23)$$

La f.é.m. d'une phase est donné par :

$$e_p(\alpha) = -N_s N_b p \omega \Phi_m \cos(p\alpha) + 3N_s N_b p \omega \Phi_{3m} \cos(3p\alpha) \quad (24)$$

avec,  $N_s$  et  $N_b$ , le nombre de spire d'une bobine et le nombre de bobine d'une phase respectivement.

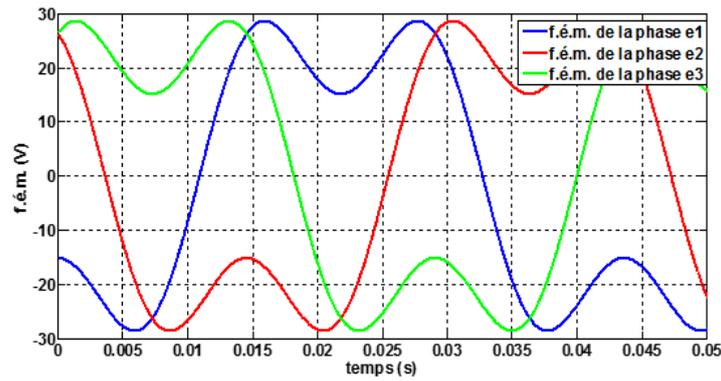
### 3. Résultats et discussion

Le **Tableau 3** donne les paramètres utilisés lors de la simulation

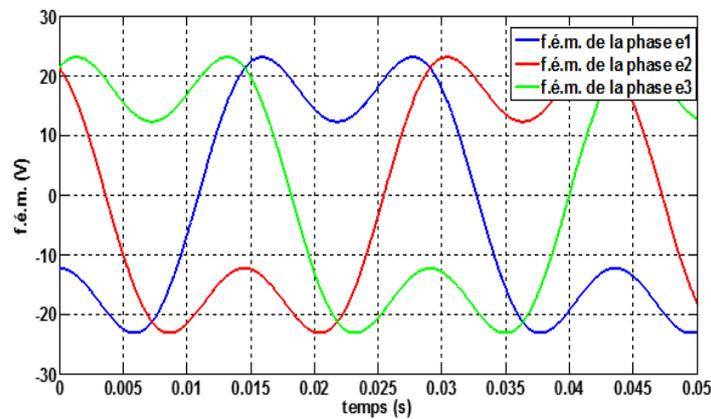
**Tableau 3 : Paramètre de simulation**

$B_R$	1.1 Tesla
$p$	6
$\mu_0$	$4.\pi.10^{-7}$ H/m
$N_s$	55
$N_b$	3

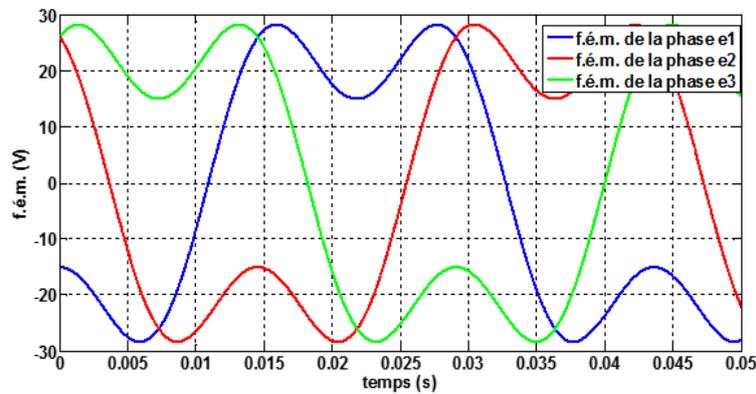
Les f.é.m. à vide pour les trois phases sont représentées sur la **Figure 6, 7 et 8** pour une vitesse constante de 230 tr/min. Les résultats montrent qu'une augmentation de l'entrefer entraîne une diminution de la f.é.m. à vide. En effet une diminution de 5mm à 1mm de l'entrefer entraîne une augmentation de la f.é.m. de 23.14 V à 28.58 V pour une épaisseur des aimants fixés à 10 mm. Tandis qu'une augmentation de l'épaisseur des aimants de 10 mm à 15 mm entraîne une augmentation de la f.é.m. de 23.14 V à 28.38 V pour un entrefer fixe.



**Figure 7 :** *f.é.m. à vide* ( $ea = 10 \text{ mm}$  ;  $e = 1 \text{ mm}$  ;  $e = 28.58 \text{ V}$ )



**Figure 8 :** *f.é.m. à vide* ( $ea = 10 \text{ mm}$  ;  $e = 5 \text{ mm}$  ;  $e = 23.14\text{V}$ )



**Figure 9 :** *f.é.m. à vide* ( $ea = 15 \text{ mm}$  ;  $e = 5 \text{ mm}$  ;  $e = 28.38 \text{ V}$ )

#### 4. Conclusion et perspectives

Cet article présente la modélisation d'une génératrice à aimants permanents et à flux axial. La génératrice est destinée à la transformation de l'énergie mécanique des pales d'une éolienne en énergie électrique. Après la modélisation du circuit magnétique de la machine, une étude sur l'évolution du flux en fonction du mouvement de la bobine a été faite. Le modèle analytique proposé permet de faire la simulation de la génératrice à aimants permanents et à flux axial fonctionnant à des vitesses de vents faibles. Les simulations ont permis d'évaluer la force électromotrice en fonction de l'entrefer et de l'épaisseur des aimants. La

validation du modèle sera faite par la réalisation d'un prototype entièrement fabriqué au laboratoire (CIFRES). Ce modèle contribuera à l'optimisation (au sens de l'optimisation non linéaire sous contraintes) en réponse à la recherche de certaines dimensions optimales (comme la valeur optimale de l'entrefer, des aimants, des pales, des matériaux utilisés etc.)

### Références

- [1] - A. MIRECKI, " Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse unique, Institut National Polytechnique, Toulouse, (2005) 252 p.
- [2] - E. MBOUMBOUE, D. NJOMO, M.L. NDIAYE, P. A. NDIAYE, M.F. NDIAYE, A. K. TOSSA, On the application applicability of several conventional regression models for the estimation of solar global radiation component in Cameroon and Senegal sub-Saharan tropical regions, *J. Renew. Sustain. Energy*, Vol. 8, N° 2 (2016) 1 - 12
- [3] - J. NOAILLY, R. SMEETS, Directing technical change from fossil-fuel to renewable energy innovation : An application using firm-level patent data, *J. Environ. Econ. Manag.*, Vol. 72, (2015) 15 - 37
- [4] - F. MANZANO-AGUGLIARO, A. ALCAYDE, F. G. MONTOYA, A. ZAPATA-SIERRA, C. GIL, Scientific production of renewable energies worldwide : An overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 18, (2013) 134 - 143
- [5] - Agence Sénégalaise d'Électrification Rurale, Le solaire photovoltaïque pour la fourniture d'électricité en milieu rural : les réalisations de l'ASER, Dossier énergie renouvelable pour l'électrification rurale, Vol. 14, (2009) 40 - 46
- [6] - M. F. NDIAYE, A. K. MBODJI, O. CISSE, E. MBOUMBOUE, M. L. NDIAYE, P. A. NDIAYE, Prévention à court terme du potentiel éolien par la méthode de prédiction linéaire : application au site de Gandon au Sénégal, Vol. 12, N°3 (2016) 118 - 125
- [7] - J. QUDSIA, I. JUNAID, B. I. KWON, Analytical analysis of the magnetic field and no-load voltage for the double sided axial flux permanent magnet synchronous generator, in *Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, (2010) 1 - 1
- [8] - T. F. CHAN, L. L. LAI, S. XIE, Field computation for an axial flux permanent magnet synchronous generator, *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 24, N°1 (2009) 1 - 11
- [9] - S. Y. SUNG, J. H. JEONG, Y. S. PARK, J. Y. CHOI, S. M. JANG, Improved analytical modeling of axial flux machine with a double sided permanent magnet rotor and slotless stator based on an analytical method, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 48, N°11 (2012) 2945 - 2948
- [10] - International Association of Journals & Conferences, Joint International Conference on Engineering and Related Technologies, International Society of Agile Manufacturing, Joint International Conference on Engineering and Related Technologies, 4th IAJC/ISAM conference proceedings. [S.l.]: IAJC, (2014)
- [11] - A. PARVIAINEN, M. NIEMELA, J. PYRHONEN, Modeling of axial flux permanent magnet machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 40, N°5 (2004) 1333 - 1340
- [12] - E. BOMME, Modélisation et optimisation des machines électriques discoïdes à double entrefer, Thèse unique, Institut polytechnique, Grenoble, (2010) 165 p.
- [13] - P. WANNAKARN, T. TANMANEEPRASERT, N. RUGTHAICHAROENCHEEP, S. NEDPHOGRAW, Design and construction of axial flux permanent magnet generator for wind turbine generated DC voltage at rated power 1500W, in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, (2011) 763 - 766
- [14] - A. DAGHIGH, H. JAVADI, H. TORKAMAN, Design Optimization of Direct-Coupled Ironless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Wind Generator With Low Cost and High Annual Energy Yield, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 52, N°9 (2016) 1 - 11

- [15] - S. O. ANI, H. POLINDER, J. A. FERREIRA, Low cost axial flux PM generator for small wind turbines, in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), (2012) 2350 - 2357
- [16] - A. SHEA, D. C. LUDOIS, Reduction of permanent magnets in small-scale wind turbines, in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), (2013) 5105 - 5111
- [17] - A. PANTEA, A. YAZIDI, F. BETIN, G.A. CAPOLINO, V. LANFRANCHI, Six-phase Axial Flux Permanent Magnet generator model : Simulation and experimental validation, in Industrial Electronics (ISIE), (2016) 192 - 197
- [18] - H. LOUIE, Experiences in the construction of open source low technology off-grid wind turbines, in Power and Energy Society General Meeting, (2011) 1 - 7
- [19] - A. A. POP, M. M. Radulescu, H. BALAN, M. CHIRCA, V.ZAHARIA, Electromagnetic design and finite-element analysis of an axial-flux permanent-magnet machine, in Applied and Theoretical Electricity (ICATE), (2014) 1 - 4
- [20] - Y. S. PARK, S. M. JANG, J. H. CHOI, J. Y. CHOI, D. J. YOU, Characteristic Analysis on Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Considering Wind Turbine Characteristics According to Wind Speed for small-Scale Power Application, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.48, N°11 (2012) 2937 - 2940
- [21] - O. CISSE, Modélisation d'une génératrice discoïde : application à des modèles de eolsenegal, Mémoire de master, Université Cheikh Anta Diop-Ecole Supérieure Polytechnique, Dakar, (2009) 82 p.