

GENERATRICE LENTE A ATTAQUE DIRECTE POUR HYDROLIENNE DETERMINATION DES INDUCTANCES EN MODE SATURE

Harkati, Nacereddine
nacereddine.harkati@univ-nantes.fr

Résumé : Le travail proposé s'insère dans le cadre d'un projet de recherche à échelle régionale « *HYDROL44* ». L'objectif de notre étude est de développer un concept de génératrice, adapté aux spécificités de l'hydrolien. Nous présentons une génératrice lente à aimants permanents pouvant être associée à une turbine hydrolienne. Cette structure possède un rotor passif, simple et robuste. Le principe de fonctionnement et un modèle à constantes localisées de cette machine sont présentés. L'utilisation de ce modèle repose sur le calcul précis des inductances en régime de saturation. Une méthode originale déterminant ces inductances est alors présentée.

Mots clés: *Génératrice lente, DSPM, Inductances, Saturation magnétique, Analyse par éléments finis*

1. Introduction

Dans le cadre de production d'énergie par hydroliennes, l'élimination du multiplicateur mécanique peut être une solution intéressante car elle permet la minimisation de la maintenance. Les systèmes à entraînements directs basés sur des machines à aimants permanents lentes peuvent ainsi être particulièrement intéressants pour ces applications [1] [2]. Plusieurs types de machines à aimants permanents peuvent alors être utilisés. Dans cet article nous nous intéressons à l'utilisation et la modélisation d'une génératrice à réluctance variable doublement saillante et à aimants permanent ('DSPM' Doubly Salient Permanent Magnet) destinée à être associée sans multiplicateur à une turbine hydrolienne.

2. Description de la machine

De nombreuses structures de machines à aimants permanents doublement saillantes ont été étudiées dans la littérature. L'analyse de la littérature [3] [4] [5] [6] [7] montre que les DSPM peuvent avoir des performances comparables aux autres types de machines tout en ayant une structure plus simple (tableau 1). En effet ce type de machine permet d'utiliser un rotor passif sans partie active ce qui élimine des causes de défauts et de maintenance. La DSPM que nous proposons d'étudier est une structure à plots dentés, avec des petites dents trapézoïdales, excitée par quatre aimants NdFeB logés dans la culasse du stator qui porte également les trois phases constituées de simples bobinages concentriques. La structure a 48 dents au stator réparties sur 12 plots (4 plots par phase). Le rotor quant à lui comporte 64 dents. L'ensemble de la machine est présentée à la figure 1. Les dimensions de la machine étudiée correspondent au cahier des charges d'un générateur hydrolien expérimental de faible puissance.

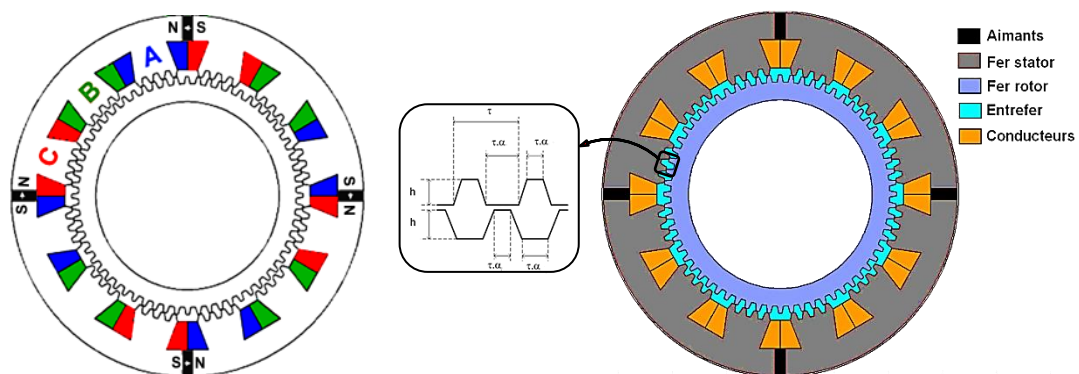


Figure.1 : DSPM à plots dentés

Machine	DSPM	MSAP rotor intérieur	MSAP rotor extérieur	MSAP bobinage fractionnaire	MSAP discoïde	MRV non excitée	MRV excitée
Couple massique [Nm/kg]	12,60	6.8	13	14.8	14	5.6	7.36

Tableau.1 : Tableau comparatif de différentes machines 10kW, 50 t/mn

3. Modèle de la machine

Afin de pouvoir évaluer les performances des structures dimensionnées, il est nécessaire de développer un modèle à constantes localisées qui permet de déterminer les performances de la machine à partir de la connaissance de ses dimensions et de son alimentation. Une première équation lie les grandeurs électriques aux flux traversant les bobinages. On ainsi peut écrire pour chaque phase :

$$v = \frac{d\Psi}{dt} + R i \quad (1)$$

Le flux magnétique totalisé par phase Ψ est composé du flux des aimants seuls Ψ_{PM} et du flux de réaction d'induit Ψ_{RI} :

$$\Psi = \Psi_{PM} + \Psi_{RI} \quad (2)$$

Le couple électromagnétique par phase peut alors être évalué par :

$$\Gamma = \int_0^i \Psi di = \frac{Z_r}{2} (i)^t \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} \right) (i) + Z_r (i)^t \left(\frac{\partial \Psi_{PM}}{\partial \theta} \right) + \Gamma_D \quad (3)$$

$$\Gamma = \Gamma_L + \Gamma_{PM} + \Gamma_D \quad (4)$$

où Z_r est le nombre de dents au rotor

\mathcal{L} la matrice inductance du stator

θ l'angle électrique

Γ_L le couple de réductance

Γ_{PM} le couple hybride

Γ_D le couple de détente

Dans notre cas le couple de détente peut être négligé [6]. Le couple de la machine ne comporte alors que deux composantes : un couple hybride Γ_{PM} dû à l'action des aimants sur les courants (couple du même type que sur une génératrice à aimants classique) et un couple Γ_L lié à la réductance variable. Dans l'application que nous souhaitons développer, nous désirons que le couple principal soit le couple hybride. Dans ce cas le pilotage et le fonctionnement de la machine s'apparente à celui d'une machine à aimants permanents plus classique qui peut être alimentée par des courants sinusoïdaux ou rectangulaires. Le couple réductant apparaît alors comme une perturbation.

4. Principe de fonctionnement

Pour illustrer ce principe de fonctionnement, des formes d'onde théoriques sont présentées à la figure 2 pour une alimentation en courants rectangulaires contrôlés en fonction de la position par un onduleur MLI. Un couple non nul est obtenu par application d'un courant positif lorsque le flux des aimants Ψ_{PM} augmente et un courant négatif lorsque le flux Ψ_{PM} décroît.

Dans cette approche simplifiée, les variations de l'inductance et du flux des aimants sont supposées linéaires et dépendent seulement de la position comme le montre la figure 2. En fonctionnement réel, ces variations dépendent aussi de plusieurs phénomènes, notamment de la saturation magnétique. On constate ainsi à la lecture des équations (1) à (3) que la connaissance des flux liées aux aimants et des inductances de la machine en régime saturé est fondamentale pour l'estimation des performances de la machines que ce soit pour le calcul du couple ou pour l'adaptation de la machine au convertisseur. C'est pourquoi la suite de l'article se consacre au calcul des inductances lorsque le circuit magnétique de la machine est saturé.

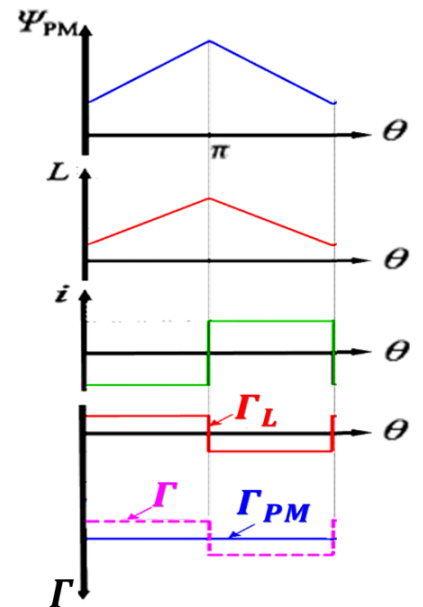


Figure.2: Principe de fonctionnement

5. Calcul des inductances en mode saturé

La détermination des inductances par calcul du champ, permet de connaître précisément l'importance des effets de saturation. Une analyse numérique 2D par éléments finis a été mise en œuvre afin d'étudier les variations des inductances et voir l'effet de la géométrie de la machine (la saillance) et l'effet des excitations (courants / aimants) sur ces variations. Nous présentons deux méthodes de calcul des inductances utilisées dans la littérature, ainsi qu'une méthode originale.

5.1 Méthode 1 [6] [8]: Les aimants sont remplacés par des matériaux passifs ayant la perméabilité de l'aimant. On alimente les bobines et on calcule les inductances à partir des flux et des courants suivant la relation:

$$L_i(\theta) = \frac{\psi_i(\theta)}{I_i(\theta)} \quad (5)$$

Cette méthode ne tient pas compte de l'augmentation du niveau de saturation liée à la présence des aimants lors du fonctionnement de la machine.

5.2 Méthode 2 [3] [4] [5]: On retranche le flux créé par les aimants seuls, du flux total sous excitation à la fois des aimants et des courants.

$$L_i(\theta) = \frac{\psi_i(\theta) - \psi_{PM_i}(\theta)}{I_i} \quad (6)$$

Il est à noter que cette méthode pose un problème de rigueur au niveau des phénomènes physiques. En effet cette méthode additionne des flux en régime de saturation alors que seules les forces magnéto-motrices peuvent être additionnées de manière rigoureuse

5.3 Méthode 3 (figure 3) : Nous proposons une méthode originale qui consiste à remplacer les aimants par une fmm équivalente placée en parallèle avec les bobines statoriques. On quantifie d'abord le flux dû aux aimants seuls (ψ_{PM_i}) qui traverse la phase i pour toutes les positions sur une période électrique (a). Il s'agit ensuite de trouver les courants i_{PM_i} conduisant au même flux ψ_{PM_i} (b) en utilisant les réseaux $\psi_i(I_i, \theta)$ (calculés en absence des aimants). Puis, on ajoute ces courants (associés aux positions du rotor) au courant (I_i) pour lequel on souhaite calculer les inductances (c). En fin, pour chaque position du rotor, on calcule le flux ψ_i dans la phase i en variant le courant $I'_i(\theta) = I_i(\theta) + i_{PM_i}(\theta)$ (d). L'inductance se détermine alors par :

$$L_i(\theta) = \frac{\psi_i(\theta)}{I_i(\theta) + i_{PM_i}(\theta)} \quad (7)$$

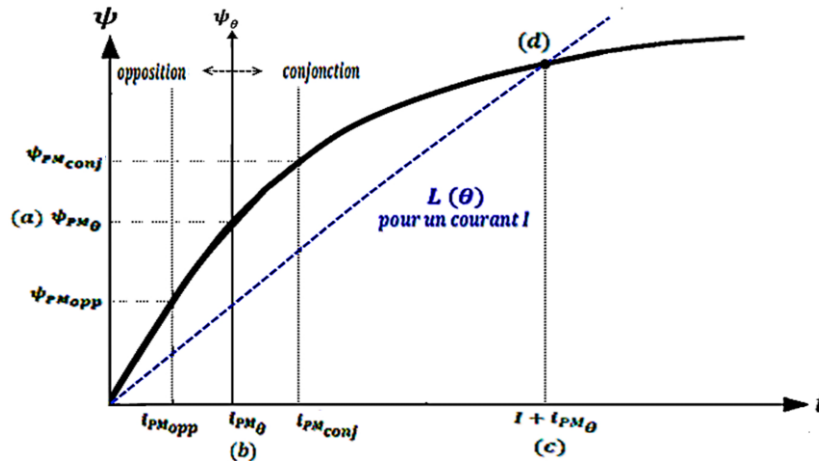


Figure.3: Calcul d'inductance en remplaçant le flux dû aux aimants seuls par un flux équivalent créé par les bobines

La figure 4 présente les inductances calculées par les trois méthodes. En régime linéaire, elles conduisent au même résultat. En régime saturé ($I=10A$, $I=40A$ et $I=100A$), la méthode proposée conduit, comme attendu, à une inductance pratiquement indépendante de la position. Nous observons toutefois que lorsque la saturation augmente, la méthode 2 conduit à une diminution inattendue de l'inductance en position de conjonction (180°)

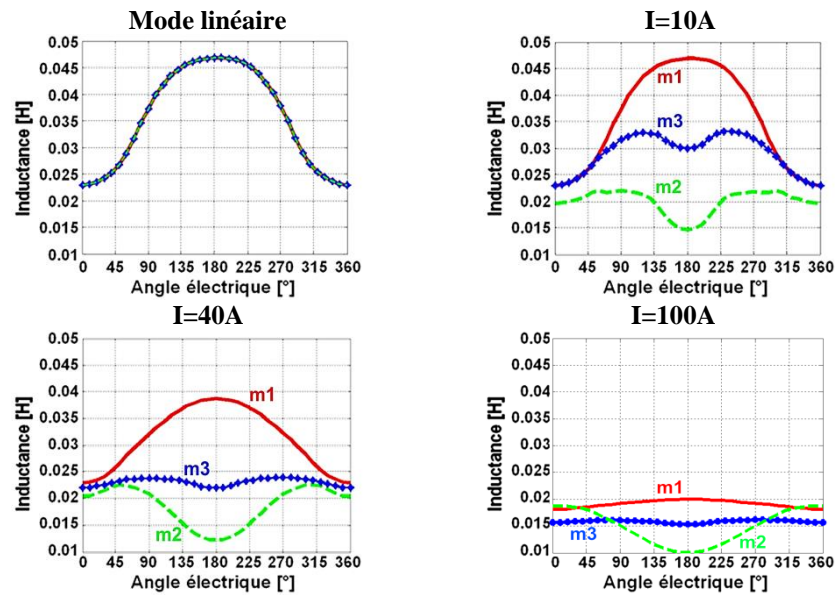


Figure.4: Calcul de l'inductance propre de la phase A par les 4 méthodes

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une structure de génératrice simple à rotor passif avec des performances a priori comparable aux autres types de machines en termes de couple massique. Un modèle de cette machine et son principe de fonctionnement sont brièvement présentés. Une méthode originale de calcul des inductances en régime de saturation est aussi présentée. Nos travaux s'orienteront vers le calcul du couple à partir des différentes méthodes de calcul des inductances. Un banc expérimental de 2kW comportant la machine d'étude est en cours de réalisation ; il permettra de valider notre méthode en complément de calculs numériques directs du couple.

Références

- [1] M. Dubois; "Optimized permanent magnet generator topologies for direct drive wind turbines", Ph.D. dissertation, Delfi University of Technology, Delfi, The Netherlands, 2004.
- [2] Z. Ivanovski; "Direct - Drive Wind Turbines", International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 2, Issue 10, Oct-2011.
- [3] L. Yuefeng; L. Feng; T.A. Lipo; "A novel permanent magnet motor with doubly salient structure", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.31, no.5, pp.1069-1078, Sep/Oct 1995.
- [4] M. Cheng; K.T. Chau; C.C. Chan; "Design and analysis of a new doubly salient permanent magnet motor", *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.37, no.4, pp.3012-3020, Jul 2001.
- [5] F. Ying; K.T. Chau; M. Cheng; "A new three-phase doubly salient permanent magnet machine for wind power generation", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.42, no.1, pp. 53-60, 2006.
- [6] R. Saou ; " Modélisation et optimisation de machines lentes à aimants permanents : Machines à double saillance et à inversion de flux ", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Novembre 2008.
- [7] M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaïm, J. Azzouzi, G. Barakat, N.Takorabet, Ch. Chillet, D. Matt, S. Taïbi, A. Tounzi, Ch.Espanet, A. Miraoui, H. S. Zire, " Comparaison de structures électromagnétiques pour une application en générateur à faible vitesse et fort couple " *Revue Internationale de Génie Electrique(RIGE)*, Vol. 8, n°2, pp. 287-330, Mai 2005.
- [8] L. Moreau ; " Modélisation, conception et commande de génératrices à réluctance variable basse vitesse ", Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Décembre 2005.
- [9] A. Rezzoug ; M.E. Zaïm; "Machines électriques non conventionnelles ", Ed.Hermes Science-Lavoisier, 261pages, 2011. ISBN 978-2-7462-2574-9.