

Analyse et optimisation de machines à aimants permanents double entrefer

Edouard Bommé, Albert Foggia et Thierry Chevalier

G2ELab, UMR 5529 INPG/UJF-CNRS, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France.

E-mail: edouard.bomme@g2elab.inpg.fr

Résumé — Grâce à l'utilisation d'aimants permanents dans les machines électriques, les performances et les rendements ont pu être améliorés. De plus, de nouvelles structures ont fait leurs apparitions dans la littérature scientifique. Deux de ces machines ont attiré notre attention : la machine à flux radial double entrefer et la machine à flux axial double entrefer. L'objet de cet article est de comparer les performances de ces deux machines à l'aide d'un modèle analytique incorporé dans le logiciel Cades en vue d'une optimisation.

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

Depuis le début des années 1980, le prix des aimants permanents (en particulier le Néodyme Fer Bore) a baissé entraînant l'évolution des machines électriques. De nos jours, les machines à flux radial à aimants permanents [1] et les machines à flux axial à aimants permanents [2] sont de plus en plus fréquentes. Après avoir réalisé une recherche bibliographique exhaustive, deux machines à aimants ont attiré notre attention : la machine à flux radial double entrefer et la machine à flux axial double entrefer. Pour comparer les performances de ces machines un modèle analytique simple et une optimisation, grâce au logiciel Cades, basée sur la valeur du couple électromagnétique sont développés.

II. OPTIMISATIONS

A. Description

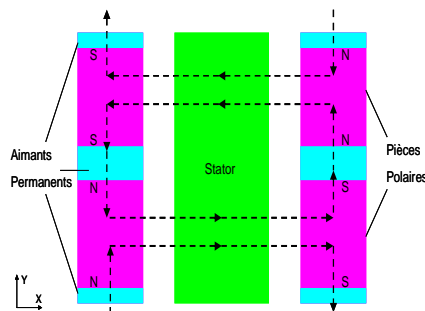


Figure.1: Direction des flux de la machine axial

Les figures 1 et 2 montrent la constitution et le trajet du flux des différentes machines. La machine à flux axial est donc composée d'un stator et de deux rotors équipés d'aimants permanents enterrés (Fig.1). De cette façon, les aimants sont utilisés en concentration de flux permettant ainsi d'augmenter le flux dans l'entrefer. De plus, les aimants en regard n'ont pas la même polarité. Ainsi, le flux ne fait que traverser la culasse du stator.

La machine à flux radial est composée d'un stator et de deux rotors (Fig.2). Le rotor inférieur est composé d'aimants enterrés et le rotor supérieur est composé

d'aimants en surface. Les rotors supérieur et inférieur doivent coïncider pour permettre au flux de traverser la culasse du stator.

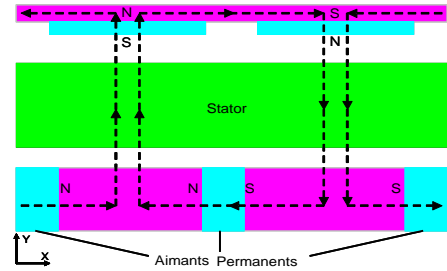


Figure.2: Direction des flux de la machine radial

B. Calcul de l'induction dans l'entrefer

Pour la machine à flux axial, en appliquant les lois de conservation du flux et théorème d'Ampère, nous aboutissons à l'expression de l'induction dans l'entrefer suivante :

$$B_e(\theta) = \frac{fmm(\theta)\mu_0 + \frac{B_0 \cdot a}{\mu_r} - \frac{\phi_f \cdot a}{2 \cdot ha \cdot La \cdot \mu_r}}{\frac{S \cdot a}{2 \cdot ha \cdot La \cdot \mu_r} + 2e} \quad (1)$$

avec $fmm(\theta)$ la force magnétomotrice, a largeur moyenne d'un aimant, ϕ_f le flux de fuite, ha hauteur des aimants, La longueur des aimants, S surface de la pièce polaire côté entrefer et e l'entrefer.

Pour la machine à flux radial, deux inductions dans l'entrefer respectivement $B_{e1}(\theta)$ et $B_{e2}(\theta)$ sont calculées indépendamment. En appliquant les lois de conservation du flux et théorème d'Ampère $B_{e1}(\theta)$ a la même expression que $B_e(\theta)$ de la machine axiale (Eqn (1)).

En revanche, en appliquant le théorème d'Ampère sur la partie supérieure de la machine, nous obtenons l'expression de l'induction dans l'entrefer suivante :

$$B_{e2}(\theta) = \frac{(fmm2(\theta) - H \cdot haim)\mu_0}{e} \quad (2)$$

Avec $fmm2(\theta)$ la force magnétomotrice du bobinage supérieur H le champ dans l'aimant et $haim$ la hauteur de l'aimant.

B. Paramètres et Contraintes

Les principaux paramètres sont géométriques pour décrire le plus finement possible les dents du stator, les

aimants permanents et les dimensions globales de la machine (longueur, rayon extérieur). Les paramètres physiques permettent de prendre en compte la qualité des tôles et des aimants permanents (perméabilité, induction rémanente de l'aimant permanent). Les autres paramètres utilisés sont la polarité, le bobinage (nombre de spires, diamètre du fil) et le courant.

Les contraintes de ce problème d'optimisation sont l'encombrement de la machine et de minimiser l'utilisation des aimants. L'optimisation se fait essentiellement sur la largeur des aimants et des dents

Pour que la comparaison soit la plus juste possible, le rayon extérieur, le bobinage réparti et la densité de courant sont identiques aux deux machines.

C. Fonction objectif

La fonction objectif de notre optimisation est de maximiser le couple électromagnétique de chaque machine.

Pour la machine à flux axial, l'équation du couple est déterminée en appliquant le théorème de Laplace. Nous obtenons ainsi :

$$T_{tot} = p(ext{r}^2 - \text{r}_{in}^2) \int_0^{2\pi} Be(\theta) fmm(\theta - \frac{\pi}{2}) d\theta \quad (1)$$

avec p le nombre de paires de pôles, $ext{r}$ le rayon extérieur de la machine, r_{in} le rayon intérieur de la machine, Be l'induction dans l'entrefer et fmm la force magnétomotrice.

De même pour la machine à flux radial, nous obtenons alors :

$$T_{tot} = T_1 + T_2 \quad (2)$$

Avec

$$T_1 = p \cdot r_{sin} \cdot Lfer \int_0^{2\pi} Be1(\theta) fmm1(\theta - \frac{\pi}{2}) d\theta \quad (3)$$

et

$$T_2 = p \cdot r_{sext} \cdot Lfer \int_0^{2\pi} Be2(\theta) fmm2(\theta - \frac{\pi}{2}) d\theta \quad (4)$$

avec p le nombre de paires de pôles, $Lfer$ la longueur de la machine, r_{sin} et r_{ext} les rayons respectivement intérieur et extérieur du rotor, $Be1$ et $Be2$ l'induction dans l'entrefer inférieur et supérieur, $fmm1$ et $fmm2$ la force magnétomotrice créée par le bobinage inférieur et supérieur.

D. Algorithme

L'algorithme utilisé est un algorithme déterministe de type Sequential Quadratic Programming (SQP). Ce type d'algorithme impose l'utilisation de fonctions objectifs et de contraintes continues et dérivables. Néanmoins, certaines grandeurs du modèle sont discrètes. En ce qui concerne le diamètre du fil ou le nombre de spires, ces grandeurs initialement discrètes seront considérées comme continues. Pour les autres paramètres discrets comme le nombre de pôles et le nombre d'encoches, il est plus

prudent de fixer les valeurs de ces paramètres. C'est pourquoi, les optimisations sont réalisées pour différentes combinaisons de nombre de pôles et nombres d'encoches.

E. Résultats

Pour une machine à flux axial, les premiers résultats de l'optimisation montrent que l'on peut obtenir un couple de 375 Nm avec 8 pôles et 72 encoches. L'encombrement de la machine est réduit (15 cm) (Fig.3) et l'utilisation des aimants est minimisée.

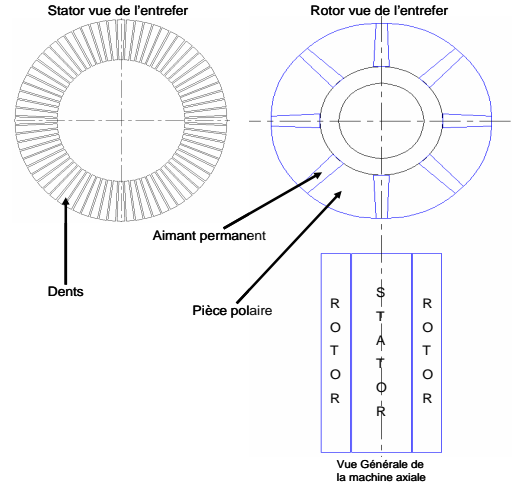


Figure 3: Allure de la machine à flux axial après optimisation

Pour une machine à flux radial, le couple obtenu est de 300 Nm pour une combinaison de 8 pôles et 48 encoches. Dans ce cas, la quantité d'aimants est minimisée et la longueur de la machine est de 20 cm (Fig.4).

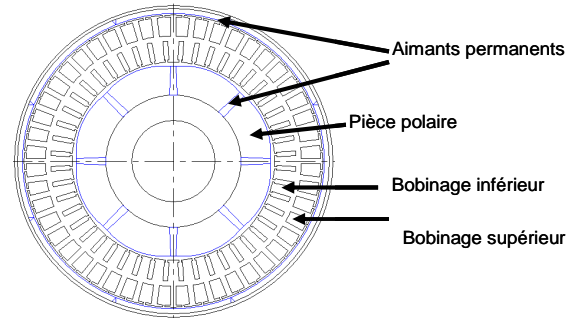


Figure 4 : Allure de la machine à flux radial après optimisation

III. CONCLUSION

Ce travail d'optimisation a permis de mettre en place deux modèles analytiques de machines innovantes à aimants permanents. Les résultats issus de cette optimisation sont encourageants et laissent entrevoir de bonnes perspectives pour ces deux machines.

REFERENCES

- [1] R.Qu, T.A. Lipo, "Sizing Equations and Power Density Evaluation of Dual-Rotor, Radial-Flux, Toroidally Wound, Permanent-Magnet Machines", dans *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.39, no 2, pp1665-1673, 2003.
- [2] M. Aydin, S Huang, T.A. Lipo, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: a review", Proc. of EPE PEMC'04, 2004.