



HAL
open science

Etude du rapport de multiplication optimal d'une transmission planétaire magnétique fort couple.

Luc Moreau, Abbas Debouche, Nicolas Bernard, Nicolas Bracikowski

► To cite this version:

Luc Moreau, Abbas Debouche, Nicolas Bernard, Nicolas Bracikowski. Etude du rapport de multiplication optimal d'une transmission planétaire magnétique fort couple.. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981859

HAL Id: hal-02981859

<https://hal.science/hal-02981859>

Submitted on 28 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude du rapport de multiplication optimal d'une transmission planétaire magnétique fort couple.

Luc Moreau, Abbas Debouche, Nicolas Bernard, Nicolas Bracikowski
IREENA, boulevard de l'Université, 44600 Saint-Nazaire, luc.moreau@univ-nantes.fr

RESUME – Ce papier décrit la conception d'une boîte de vitesse magnétique pour des applications fort couple. La structure électromagnétique est optimisée pour quatre rapports de vitesse, 4, 5,25, 10 et 20. Pour chacun de ses rapports, les dimensions géométriques telles que les épaisseurs de culasse et d'aimant sont optimisées via un algorithme génétique couplé à la méthode des éléments finis afin de maximiser le couple massique d'une part et le couple rapporté au coût des matières actives d'autre part. Ces optimisations sont réalisées via un algorithme de type PSO, il s'agit de dégager le meilleur rapport de multiplication de vitesse.

Mots-clés—Transmission planétaire magnétique, Optimization, Eléments finis.

1. INTRODUCTION

Les applications à basse vitesse de rotation (éoliennes, hydroliennes, ...) mettent en générale en œuvre une boîte de vitesse mécanique accouplée à un générateur électrique. Cependant, il est aussi possible d'utiliser un multiplicateur de vitesse magnétique qui permet, comparativement au système mécanique, une réduction des vibrations, la limitation des problèmes de lubrification et une protection naturelle aux surcharges de couple [1-2]. La topologie étudiée dans le présent papier, coaxiale, est celle présentée par Atallah en 2001 dans [3] (cf. fig. 1).

Le multiplicateur de vitesse magnétique, présenté fig. 1, comprend un rotor interne avec p_1 paires de pôles, un anneau central fixe avec n_2 pièces ferromagnétiques, et un rotor externe avec p_3 paires de pôles tournant dans le sens inverse du rotor interne. Ces grandeurs doivent respecter la condition suivante:

$$p_3 = |n_2 - p_1| \quad (1)$$

Le rapport de vitesse s'écrit alors :

$$G_r = \frac{-p_3}{p_1} \quad (2)$$

Des travaux d'optimisation ont été menés sur cette structure [4-8] mais pour un seul rapport de vitesse, généralement de l'ordre de 5. C'est la raison pour laquelle nous avons choisis d'optimiser via un PSO la structure électromagnétique suivant deux objectifs (couple massique et le couple rapporté au coût des matières actives) pour 4 rapports de transformation : 4, 5,25, 10 et 20. Le rapport de vitesse de 5,25 étant le plus usité, il nous servira de référence pour la suite des travaux. On

considèrera ici un cahier des charges typique d'une application éolienne ou hydrolienne : une puissance de 1MW pour une vitesse de rotation de 10 tr.min⁻¹ soit un couple d'entrée de 955kNm avec, pour tenir compte de l'implantation dans la nacelle, un diamètre extérieur de 3m.

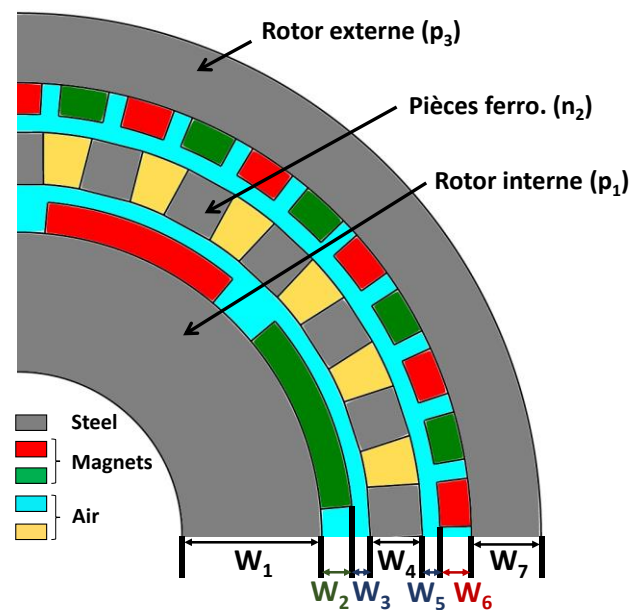


Fig. 1. Géométrie du multiplicateur de vitesse planétaire magnétique.

2. OPTIMISATION DE LA STRUCTURE ELECTROMAGNETIQUE.

La structure électromagnétique des 4 topologies définies dans le tableau 1 est caractérisée par 7 grandeurs géométriques :

W_1 : épaisseur de culasse du rotor interne.

W_2 : épaisseur d'aimants du rotor interne.

W_3 : entrefer du rotor interne.

W_4 : épaisseur des pièces ferromagnétiques.

W_5 : entrefer du rotor externe.

W_6 : épaisseur d'aimants du rotor externe.

W_7 : épaisseur de culasse du rotor externe.

Tableau 1. Configurations étudiées.

Rapport de vitesse G_r	p_1	n_2	p_3
4	4	24	20
5.25	4	25	21
10	4	44	40
20	4	84	80

Les entrefers internes et externes (W_3 et W_5) sont fixés par des contraintes mécaniques à 6.6 mm [8]. Il reste 5 paramètres géométriques à optimiser dont une étude paramétrique linéaire permet de déterminer les bornes (tableau 2).

Tableau 2. Contraintes géométriques.

Variabes	Bornes inférieures [mm]	Bornes supérieures [mm]
W_1	80	700
W_2	50	200
W_4	70	200
W_6	40	100
W_7	100	200

La deux fonctions objectifs F_1 et F_2 suivantes sont maximisées séparément *via* un PSO mono-objectif:

$$F_1 = \frac{\Gamma}{M} \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{\Gamma}{\text{Coût}} \quad (4)$$

Avec « Γ » le couple maximum, « M » la masse des parties actives et « Coût » le coût des parties actives.

Le couple est calculé *via* le logiciel de calcul par éléments finis FEMM4.2 avec la méthode du tenseur de Maxwell. Une tôle magnétique M40050A et des aimants de type NdFeB ($B_r = 1.4T$ @20°C) sont choisis. Les coûts de ces matériaux, en particulier celui de aimants, sont fortement volatiles cependant nous choisissons les valeurs typiques suivantes [8]:

- Tôle magnétique (M40050A): 1€/kg;
- Aimants (NdFeB): 66€/kg.

Les densités de la tôle magnétiques et des aimants sont respectivement de 7800 kg/m³ et 7350 kg/m³.

Un faible nombre de particules réduit le temps de simulation mais le PSO risque de converger vers un minimum local. Un compromis est fait avec une population de 30 individus, et 30 itérations.

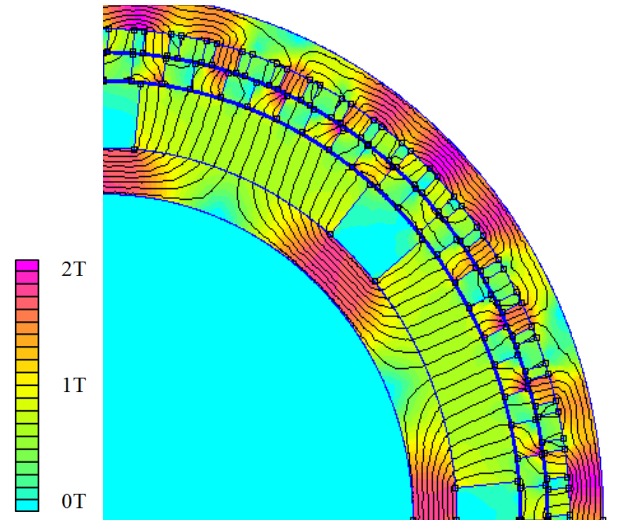
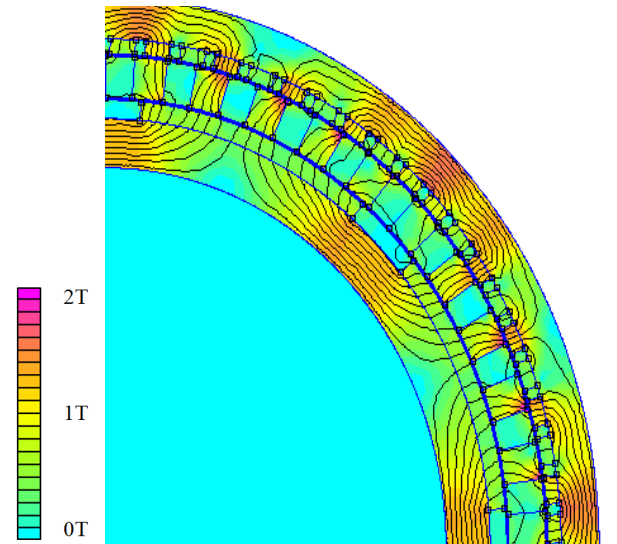
Tableau 3: Optimisation du couple massique (F_1).

G_r	4	5.5	10	20
W_1 [mm]	117	124	132	132
W_2 [mm]	177	199	187	179
W_4 [mm]	93	132	74	71
W_6 [mm]	99	93	63	42
W_7 [mm]	100	100	101	101
F_1 [Nm/kg]	28	30	36	35

Tableau 4: Optimisation du couple au coût (F_2).

G_r	4	5.5	10	20
W_1	151	138	134	146
W_2	60	55	50	56
W_4	181	149	112	73
W_6	40	40	40	40
W_7	115	124	115	117
F_2 [Nm/€]	1.2	1.4	1.6	1.5

Les figures 2 et 3 montrent, pour un rapport de multiplication de 10, les géométries optimisées selon le couple massique et le couple au coût respectivement. La première optimisation, pour favoriser le couple, tend naturellement vers une forte épaisseur d'aimants alors que la seconde, pour réduire le coût, tend à réduire cette épaisseur. Les niveaux de saturation, aussi bien pour les configurations des figures présentées que toutes celles optimisées, présentent des niveaux de saturation raisonnables, inférieurs à 1.8T.

Figure 2: $G_r=10$, couple massique optimisé (F_1).Figure 3: $G_r=10$, couple au coût optimisé (F_2).

L'épaisseur des pièces polaires W_4 présente une grande variabilité aussi bien pour la maximisation de F_1 (de 71 à 132mm) que F_2 (de 73 à 182mm), ce qui porte à penser que ce paramètre est peu sensible.

Quel que soit le critère d'optimisation, l'épaisseur des culasses externes et internes W_7 et W_1 sont proches de leur borne inférieure (100 mm) de façon à réduire le coût et la masse de la structure.

L'observation des tableaux 3 et 4 montre que la principale différence entre les résultats d'optimisation de F_1 et F_2 se situe au niveau de l'épaisseur des aimants internes (W_2). Lorsque le couple massique est optimisé (F_1), l'épaisseur des aimants internes W_2 tend vers des valeurs proches de la borne supérieure, 200mm, afin d'augmenter le niveau d'induction et par conséquent de couple.

Le phénomène inverse se produit pour l'optimisation du couple au coût (F_2) avec des valeurs proches de la borne inférieure de W_2 (50mm). En effet, les aimants représentent le principal poste de coût des matières actives. L'épaisseur des aimants externes (W_6) est, pour la même raison, toujours à la borne minimale pour réduire le coût d'aimants (40 mm).

Cependant, avec F_1 , cette épaisseur W_6 varie progressivement de la borne supérieure (100mm) pour $G_r=4$ à la borne inférieure (40mm) pour $G_r=20$. En effet, lorsque G_r augmente, en vertu du tableau 1, le nombre de pôle p_3 de la couronne externe augmente. Dès lors une trop grande hauteur d'aimant W_6 aboutit à de fortes fuites, défavorables à la production de couple.

Par ailleurs, nous avons mené une étude de sensibilité qui a montré que tant que le rapport du coût des aimants sur celui de la tôle est supérieur à une valeur de l'ordre de 10, les grandeurs géométriques optimisées obtenues sont très proches. Or, en pratique ce rapport de coûts est respecté, ce qui conduit à une bonne robustesse de nos résultats.

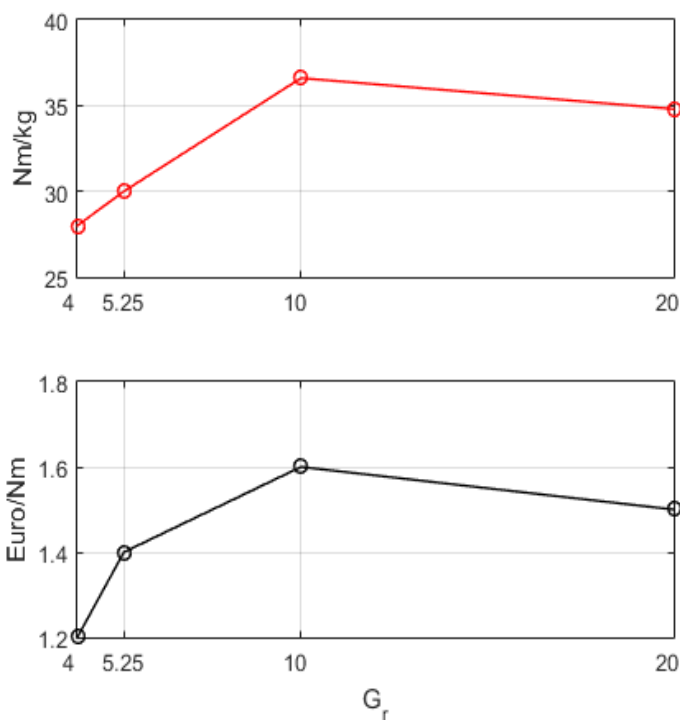


Figure 4: Couple massique F_1 et couple au coût F_2 optimisés en fonction du rapport de vitesse G_r .

La figure 4 présente les couples massiques et couple au coût optimisés pour les rapports de multiplication considérés. Un optimum se dégage pour le rapport de multiplication de 10 et ce pour les deux fonctions objectives. En effet le couple massique et le coût au couple avec $G_r=10$ sont de 36.6Nm/kg et 1.6€/Nm contre 30Nm/kg et 1.4€/Nm pour $G_r=5.25$, rapport de transformation usuellement utilisé, soit un gain de 22% et 14%.

3. CONCLUSIONS

Quatre multiplicateurs de vitesse planétaires magnétiques ($G_r=4, 5.25, 10, 20$) sont étudiés. Une optimisation des paramètres géométriques de chacune des structures a permis de montrer que le rapport de multiplication $G_r=10$ est le plus pertinent au regard du couple massique et du coût au couple. Une perspective à ce travail pourrait être de prolonger l'optimisation à l'ensemble multiplicateur magnétique génératrice puis à la comparaison avec l'ensemble multiplicateur mécanique générateur, solution aujourd'hui exploitée dans l'éolien et l'hydrolien.

4. REFERENCES

- [1] E. Gouda, S. Mezani, L. Baghli, and A. Rezzoug, "Comparative Study between Mechanical and Magnetic Planetary Gears", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 47, No. 2, February 2011.
- [2] K. Ikuita, S. Makita and S. Arimoto, "Non-Contact Magnetic Gear for Micro Transmission Mechanism", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 3, pp. 125-130, September 1991.
- [3] K. Atallah and D. Howe, "A Novel High-Performance Magnetic Gear, IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 37, No. 4, pp. 2844-2846, July 2001.
- [4] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a high-performance magnetic gear", IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 41, No. 3, pp. 764-770, May/Jun. 2005
- [5] T. Lubin, S. Mezani, A. Rezzoug, "Analytical computation of magnetic field distribution in a magnetic gear", IEEE Trans. on magnetics, Vol. 46,
- [6] M. Desvaux, R. Le Goff Latimier, B. Multon, H. Ben Ahmed and S. Sire, "Design and Optimization of Magnetic Gears with Arrangement and Mechanical Constraints for Wind Turbine Applications", EVER, Monaco, April 2016
- [7] E. Gouda, "Transmission Planétaire Magnétique : Etude, Optimisation et Réalisation", PhD Thesis, Nancy, June 2011.
- [8] V. Banchieri, L. Moreau, N. Bracikowski, "Optimization of Mechanical and Magnetic Gears for Tidal Electric Generation Plant", ElectriMACS, Toulouse, France, sep. 2017.