

Etude et tests d'un moteur supraconducteur pour l'aéronautique

Alexandre COLLE^{1,2}, Thierry LUBIN¹, Sabrina AYAT², Olivier GOSSELIN², Jean LEVEQUE¹

(1) GREEN, Université de Lorraine (2) SAFRAN TECH, Magny-les-Hameaux

RESUME - La volonté d'électrification des transports entraine l'étude d'avions plus électriques. Ce développement nécessite des machines électriques plus compactes avec une forte densité de puissance. Dans cet article nous présentons la conception et les tests d'une machine supraconductrice à flux axial. Cette machine est partiellement supraconductrice car seul l'inducteur est supraconducteur. Ce prototype constitue une première étape vers une conception de machines de plusieurs MW.

Mots-clés—Machines supraconductrices, flux axial, essais.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de l'électrification du transport aérien, un des buts consiste à remplacer tous les systèmes pneumatiques, hydrauliques et mécaniques par des appareils électriques. Les besoins en électricité continueront donc d'augmenter pour la prochaine génération d'avions. Dans la littérature, des recherches ont été réalisées concernant les machines supraconductrices en aéronautique [1-3]. Un de nos objectifs est de voir si cette technologie de rupture peut atteindre une puissance massive suffisante pour des applications en aéronautique.

Cet article présente la conception et les premiers essais d'une machine électrique partiellement supraconductrice (SC). La topologie de la machine étudiée est décrite sur la figure 1. Les études d'optimisation ont abouti à une machine à flux axial. Les supraconducteurs sont présents exclusivement à l'inducteur. Un solénoïde supraconducteur, crée un champ magnétique dans la direction axiale. Des pastilles supraconductrices, agissant comme des écrans magnétiques, permettent une modulation du champ magnétique. Deux induits sont placés de part et d'autre de l'inducteur.

La première partie de l'article décrit la conception de la machine supraconductrice et les différents choix techniques effectués. Dans une deuxième partie, le banc d'essai de la machine SC est présenté ainsi que les tests.

2. CONCEPTION DE LA MACHINE SUPRACONDUCTRICE

La modulation de flux vue par les enroulements statoriques est obtenue à l'aide des pastilles supraconductrices. Le stator est classique, en cuivre, sans encoche ferromagnétique. Il dispose d'une culasse de retour de flux de faible épaisseur. Les éléments de la machine sont les suivants :

- Une bobine HTS construite avec la première génération de ruban HTS (Sumitomo ~~nouveau~~ type H DI-

BSSCO®). Dans cet élément circule un courant continu qui produit un champ magnétique axial.

- Cinq pastilles HTS sont utilisées pour moduler la densité de flux magnétique. Le comportement diamagnétique des pastilles est utilisé pour dévier les lignes de flux obtenues avec la bobine HTS. Le matériau choisi pour les écrans est le YBCO. Le rayon des pastilles est de 40 mm pour une épaisseur de 10 mm.
- Pour l'armature, un enroulement concentrique à double couche est choisi. L'ensemble est constitué de deux induits de 12 bobines chacun, réalisé en fil de Litz car le bobinage est directement dans l'entrefer et soumis aux variations du champ magnétique.

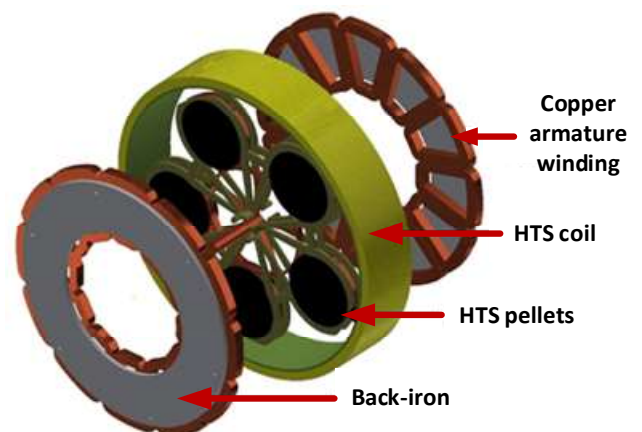


Fig. 1. Vue éclatée de la machine et de ses composants actifs.

Les paramètres de conception du moteur supraconducteur sont résumés dans le tableau I. Le refroidissement est assuré par une circulation d'hélium sous une pression de 18 bars avec une température de fonctionnement de 30K, la puissance extractible est de 80W. La figure 1 montre les composants actifs, tandis que les figures 2 et 3 représentent respectivement le moteur HTS assemblé et le rotor avec les pastilles supraconductrices.

3. ESSAIS EXPERIMENTAUX

Pour les premiers essais, un seul bobinage d'induit a été mis en place. Cette opération permet d'approcher une sonde à effet Hall à proximité des pastilles et ainsi de mesurer la modulation du champ magnétique axial.

Tableau 1. Paramètres du moteurs.

Type	Valeur
Puissance nominale	50 kW
Vitesse nominale	5000 tr/mn
Nombre de paires de poles	5
Tension nominale	400 V
Courant nominal	72 A
Masse totale	52 kg
Température de fonctionnement	30 K
Courant dans la bobine supraconductrice	230 A
Diamètre extérieur	400 mm
Longueur totale	200 mm



Fig. 2. Moteur supraconducteur de 50 kW et son système de refroidissement

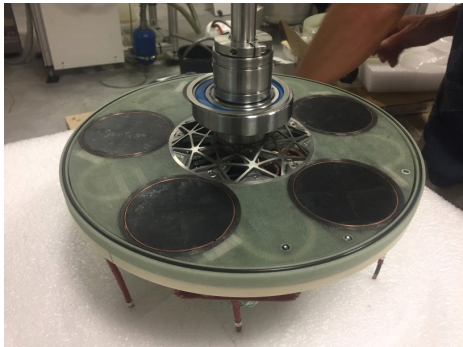


Fig. 3. Rotor du moteur 50 kW avec les 5 pastilles supraconductrices

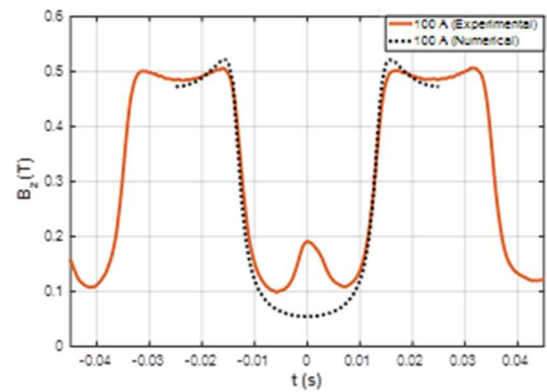
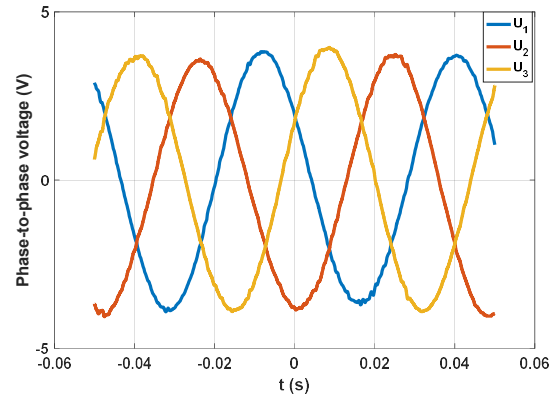
Le refroidissement de la bobine supraconductrice prend environ 4 heures pour atteindre une température de 33 K.

a) Essai à vide

La modulation du champ magnétique est montrée sur la figure 4. Nous pouvons constater un fonctionnement imparfait, qui est dû soit à un défaut de refroidissement, soit à un défaut dans les pastilles supraconductrices.

La figure 5 montre les tensions entre phases lorsque la bobine supraconductrice est alimentée avec un courant I de 120 A (la moitié de la valeur critique) et que la machine tourne à une vitesse N de 250 tr / min. (1/20 de la vitesse nominale). On peut remarquer la forme sinusoïdale de ces tensions. Comme la culasse de retour de flux est rapidement saturée, nous pouvons faire des extrapolations linéaires pour estimer les performances au nominal. En Multipliant par 20 (vitesse nominale de 5000 tr /

min), puis par 2 (courant critique de la bobine HTC) et finalement par 2 (les 2 enroulements d'induit de chaque côté en série), on obtient une tension maximale comprise entre 296 V et 316 V, au lieu des 565 V (entre deux phases) initialement prévues. Pour des raisons de construction, la longueur de l'entrefer et le nombre de tours pour l'enroulement d'induit ont été légèrement modifiés par rapport à la conception et la température des pastilles plus élevée que prévue, ce qui peut expliquer cette différence.

Fig. 4. Champ axial dans l'entrefer pour $I = 120$ AFig. 5. Tensions composées aux bornes du stator pour $I = 120$ A et $N = 250$ tr/min

4. CONCLUSIONS

Un prototype de moteur supraconducteur de 50 kW pour l'aéronautique a été conçu, fabriqué et les premiers essais sont un succès. Dans la suite des travaux il est prévu des essais en charge et un nouveau design pour une machine de 500 kW.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par la DGA, programme ASTRID 2014.

6. REFERENCES

- [1] C. A. Luongo *et al.*, « Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors », *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, n° 3, p. 1055-1068, 2009.
- [2] P. J. Masson, G. V. Brown, D. S. Soban, et C. A. Luongo, « HTS machines as enabling technology for all-electric airborne vehicles », *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, n° 8, p. 748, 2007.
- [3] J. L. Felder, « Turboelectric Distributed Propulsion in a Hybrid Wing Body Aircraft », in 20th International Society for Airbreathing Engines, Gothenburg, Sweden, 2011.
- [4] T. Trollier, J. Tanchon, Y. Icart, et A. Ravex, « High capacity 30 K remote helium cooling loop », *AIP Conference Proceedings*, vol. 1573, n° 1, p. 1461-1466, 2014.