

Réalisation et essais d'un moteur supraconducteur incluant un accouplement magnétique

Bastien DOLISY, Smail MEZANI, Thierry LUBIN, Jean LEVEQUE
GREEN, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-lès Nancy

RESUME - Dans ce papier, nous présentons l'étude d'un moteur supraconducteur à flux axial. Ce moteur est destiné à des applications à très forte densité de couple. Il est constitué d'un bobinage induit en cuivre et d'un inducteur supraconducteur. Un accouplement magnétique est intégré à la structure pour transmettre le couple de ce moteur à la charge. Cette solution est une bonne alternative aux «Torque Tube» habituellement utilisés. Elle permet entre autre une réduction des apports de chaleur des parties chaudes vers les parties cryogéniques du moteur. Cet ensemble moteur supraconducteur – accouplement magnétique a été dimensionné, réalisés et testés au laboratoire et ce sont ces résultats expérimentaux que nous présentons.

Mots-clés—Accouplement magnétique, moteur supraconducteur, essais expérimentaux.

1. INTRODUCTION

L'amélioration des performances des machines électriques est un grand défi depuis des décennies. L'un des paramètres les plus importants pour améliorer les performances des moteurs ou des générateurs électriques est l'obtention d'un champ magnétique élevé dans l'entrefer. Les matériaux supraconducteurs sont particulièrement intéressants en raison de leurs densités de courant très élevées et de leurs capacités à supprimer les pertes par effet Joule. Nous proposons l'étude d'un moteur supraconducteur à flux axial comprenant un stator avec un bobinage en cuivre (bobinage dans l'entrefer) et un inducteur comportant des bobines supraconductrices. Ce type de machine est adapté pour les applications de fortes puissances avec de faibles vitesses de rotation. Parmi les applications possibles, on peut citer la propulsion marine ou les génératrices pour éolienne ou hydrolienne. Nous étudions également une transmission de couple sans contact pour éliminer le «Torque Tube» et minimiser l'échange de chaleur entre la partie froide et l'air ambiant [1-5]. Cette transmission est composée dans la partie froide de bobines supraconductrices partageant le même environnement cryogénique que l'inducteur du moteur et un rotor à aimants permanents dans la partie à température ambiante.

Les avantages du remplacement d'une transmission de couple mécanique par «Torque Tube» par un accouplement magnétique sont les suivants :

- meilleur rendement ;
- transmission du couple sans contact entraînant la réduction des vibrations ;
- réduction des pertes thermiques ;

- protection naturelle contre les surcharges.

2. STRUCTURE DU MOTEUR

La structure proposée comporte un moteur synchrone à flux axial ayant un inducteur supraconducteur et un induit en cuivre. La transmission du couple vers la charge se fait par un accouplement magnétique. Nous avons choisi d'étudier et de réaliser une machine triphasée de type 6-4, cette structure est relativement classique.

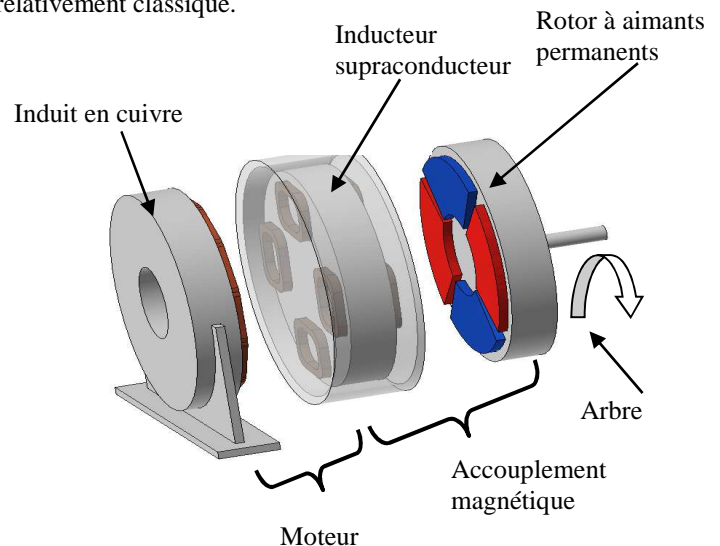


Fig. 1: Structure du moteur supraconducteur et de l'accouplement magnétique.

La structure du moteur supraconducteur proposé est présentée figure 1. Il est composé de deux ensembles de bobines supraconductrices (inducteur et accouplement), d'un induit en cuivre et d'un rotor à aimants permanents. Les bobines supraconductrices sont montées de chaque côté d'une culasse ferromagnétique tournante plongée dans un cryostat.

3. CONCEPTION ET FABRICATION

Nous présentons dans cette partie, le dimensionnement et la réalisation d'un prototype de moteur supraconducteur équipé d'un accouplement magnétique supraconducteur. Les bobines de l'induit et de l'inducteur sont montées sur des culasses ferromagnétiques.

L'inducteur supraconducteur et le stator en cuivre sont contenus dans un cryostat (figure 2) en matériau époxy (G11). Le refroidissement de l'ensemble est réalisé par immersion dans

un bain d'azote liquide (77 K). Nous avons choisi de positionner l'axe de la machine à la verticale comme représenté sur la figure 2, ce qui permet de simplifier la réalisation du cryostat.

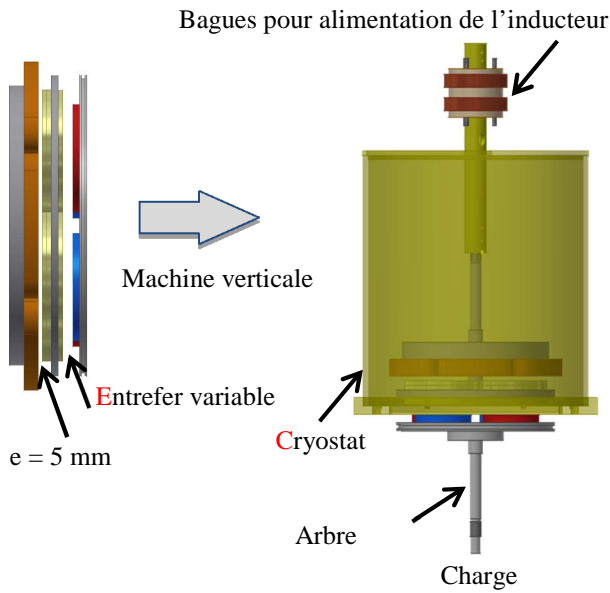


Fig.2 : Schéma synoptique du moteur.

Dans le tableau 1, nous donnons les principales caractéristiques du moteur supraconducteur.

Tableau 1. Paramètres du moteur

Paramètres	Unités	Valeur
Rayon moyen d'entrefer	mm	85
Nombre de paires de pôles		2
Vitesse nominale	rpm	500
Entrefer du moteur	mm	20
Entrefer de l'accouplement	mm	5

Nous avons réalisé deux ensembles de bobines supraconductrices. Pour l'accouplement magnétique, les bobines sont en simple couche. Pour l'inducteur du moteur, les bobines sont en double couche. Ces bobines sont visibles sur la figure 3. Elles sont réalisées en fils BSCCO dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2. Les caractéristiques des bobines sont données dans le tableau 3.

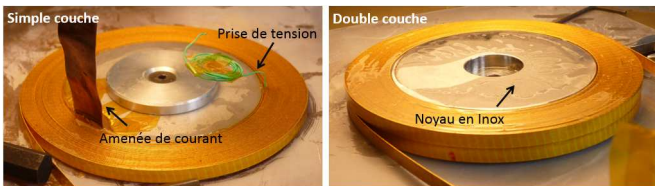


Fig.3 : Bobines supraconductrices de l'accouplement et de l'inducteur.

Tableau 2. Paramètres du fil supraconducteur BSCCO

Paramètres	Unités	Valeur
Épaisseur du ruban	mm	0,24
Largeur du ruban	mm	4,3
Courant critique à 77 K sous Champ propre	A/mm ²	185

Tableau 3. Paramètres des bobines supraconductrices

Paramètres	Unités	Valeur
Diamètre externe	mm	100
Diamètre interne	mm	70
Épaisseur / couche	mm	5
Nombre de spires / couche	-	60
Longueur de ruban / couche	m	16

L'ensemble des bobines est assemblé sur une culasse magnétique massive. Chaque jeu de bobines, pour l'accouplement et l'inducteur étant monté de part et d'autre de la culasse comme le montre la figure 4.

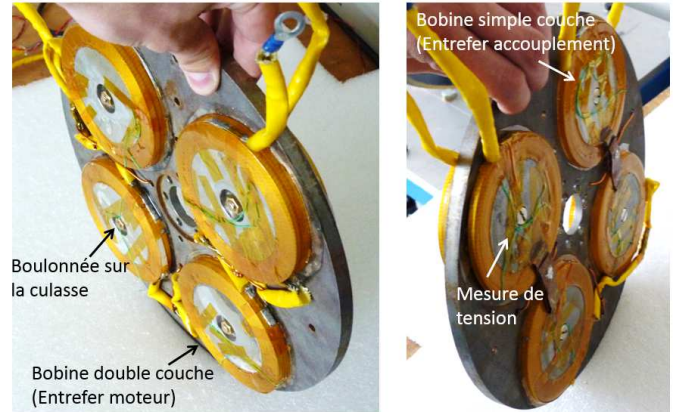


Fig.4 : Bobines supraconductrices montées sur la culasse ferromagnétique.

Le bobinage induit est beaucoup plus classique, il est réalisé en cuivre. La forme d'une bobine est représentée sur la figure 5. Le stator est constitué de deux bobines par phase, soit un ensemble de six bobines. Le stator est sans dent ferromagnétique, les bobines sont placées directement dans l'entrefer. Ce choix est fait en raison des valeurs d'induction importante créée par les bobinages supraconducteurs. Néanmoins, les bobines sont montées sur une carcasse magnétique feuilletée pour le retour du flux et pour limiter les pertes dans le fer. Ce système est représenté sur la figure 6. La culasse ferromagnétique est montée sur un support en fibre de verre qui est assemblé avec le cryostat.

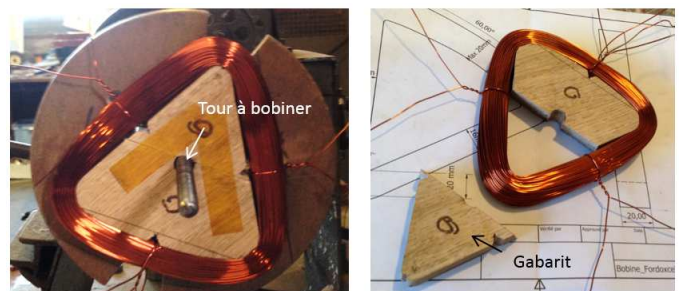


Fig. 5 : Bobine de l'induit en cuivre.

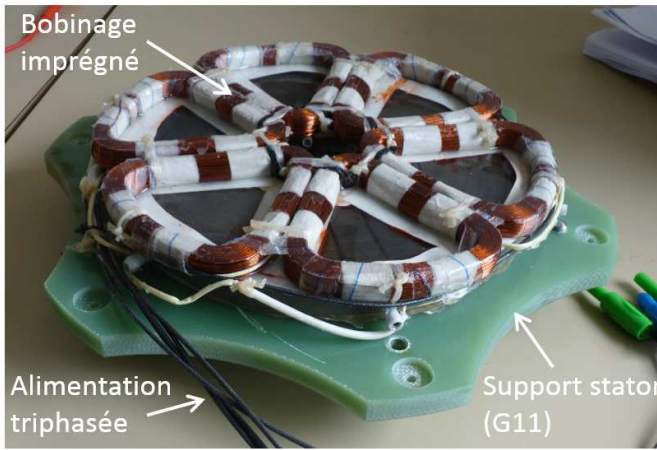


Fig.6 : Culasse statorique et bobinage statorique.

4. RESULTATS DES MESURES

Pour mesurer les positions relatives de l'inducteur par rapport à l'induit et à l'accouplement magnétique, deux codeurs incrémentaux (4096 points) ont été utilisés. Ils mesurent un angle avec une précision de 0,088 degré. La mesure se fait via une carte d'acquisition dSPACE®. La mesure de couple statique est obtenue au moyen d'un capteur de couple ayant une plage de mesure de 1,5 Nm à 30 Nm avec une précision garantie par le fabricant de 0,77%. Un moteur à courant continu à excitation séparée est installé sur le banc d'essai pour servir de charge mécanique. Le système est décrit sur les figures 7 et 8.

Deux types d'essais ont été effectués :

- des essais statiques ont permis de vérifier le bon fonctionnement des bobines supraconductrices en mesurant les caractéristiques électriques $U(I)$. Nous avons également mesuré le couple statique en fonction de l'angle interne pour l'accouplement magnétique et pour le moteur.
- la machine a été testée en générateur : essais à vide, en court-circuit et en charge. Ces essais nous ont permis de déterminer les paramètres du modèle équivalent de Behn-Eschenburg.

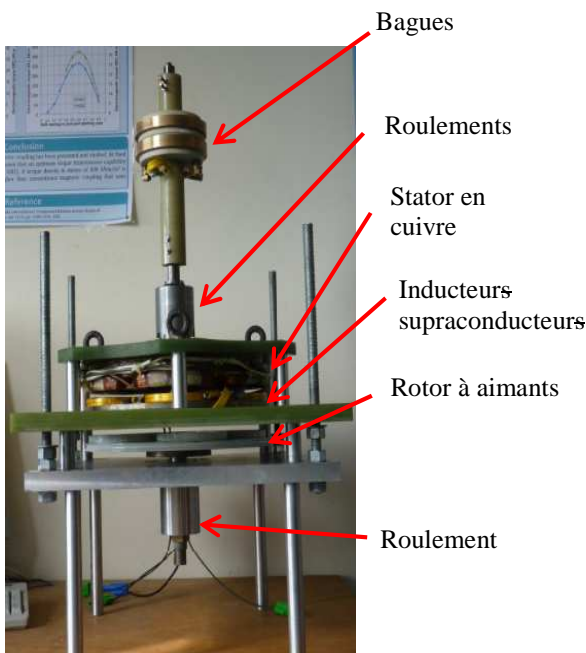


Fig. 7 : Photographie des éléments du moteur et de l'accouplement magnétique.

A partir des résultats des différents essais, nous avons validé le principe du moteur et en particulier le bon fonctionnement des bobinages supraconducteurs, aussi bien pour l'inducteur de la machine que pour la partie accouplement magnétique.

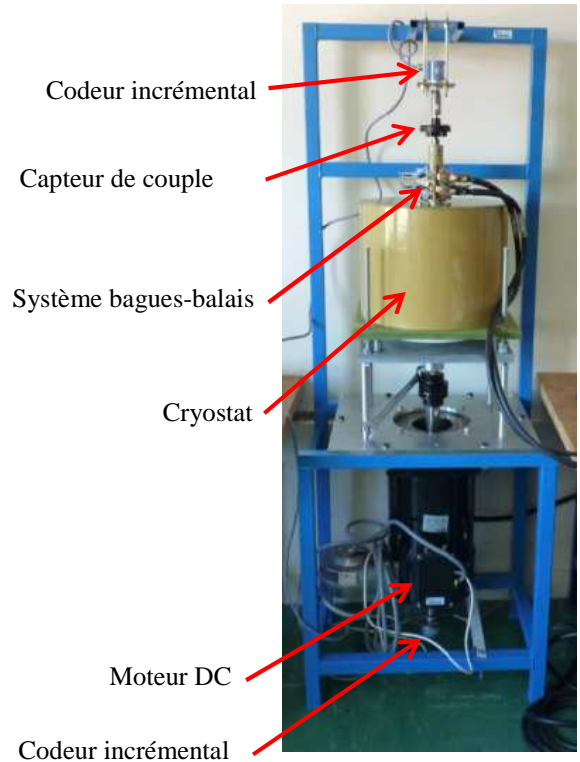


Fig. 8 : Photographie du banc de test du moteur supraconducteur.

4.1. Mesure du couple statique côté machine et côté accouplement

La figure 8 décrit la méthode de mesure du couple statique. Le couple est imposé sur l'inducteur supraconducteur par l'intermédiaire d'un bras de levier et est mesuré par un capteur placé entre le bras de levier et l'inducteur. L'angle interne est directement obtenu par le codeur incrémental.

La mesure du couple statique de l'accouplement nécessite le blocage du rotor à aimants permanents.

Les mesures des couples statiques du moteur et de l'accouplement sont indépendantes. Pour le couple statique du moteur, les trois phases du stator sont alimentées par des courants continus : $I_1 = 7,5 A$, $I_2 = -3,5 A$ et $I_3 = -3,5 A$.

L'initialisation de l'angle interne ($\varphi = 0^\circ$) mesuré par le codeur incrémental est faite dans la position à vide. L'inducteur trouve naturellement cette position lorsqu'il est alimenté et qu'il ne subit aucune contrainte mécanique. Les mesures ont été réalisées pour deux valeurs différentes du courant d'excitation : $I_e = 25A$ et $I_e = 45A$. Les résultats sont donnés sur les figures 10 et 11.

On constate une concordance correcte entre les mesures expérimentales et les simulations numériques (logiciel éléments finis 3D). L'erreur n'excède pas 15 %.

Les écarts sont principalement dus à des imprécisions lors des prises de mesures. L'incertitude la plus élevée se trouve au niveau de la mesure de l'angle interne. Les capteurs de couple possèdent des défauts d'ajustements qui sont à l'origine de jeux mécaniques.

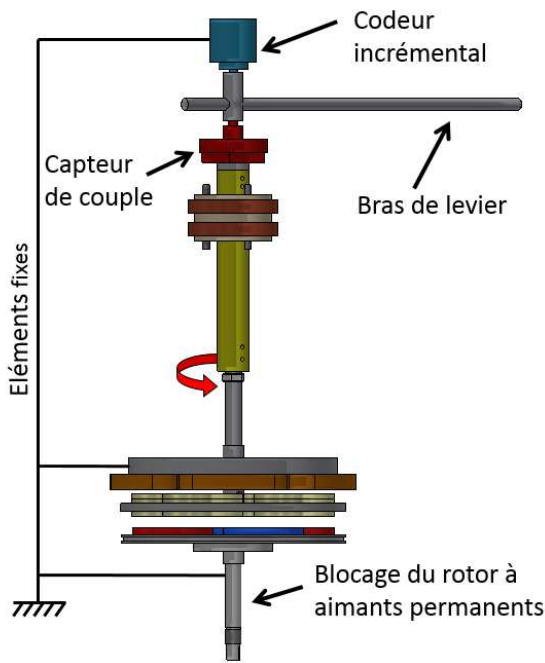


Fig. 9 : Mesure du couple statique par la méthode du bras de levier.

Nous constatons que le couple statique maximal de l'accouplement magnétique est le double de celui du moteur supraconducteur. Ceci permettra lors de futurs essais de supporter des à-coups de couple lors de l'étude des régimes transitoires (accélération).

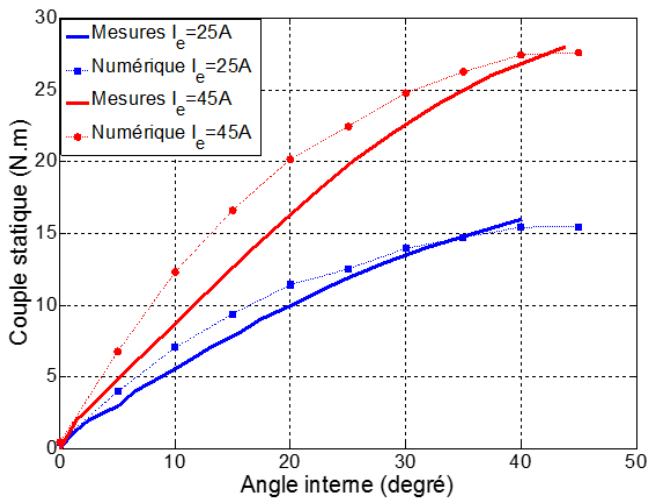


Fig. 10 : Couple statique de l'accouplement magnétique.

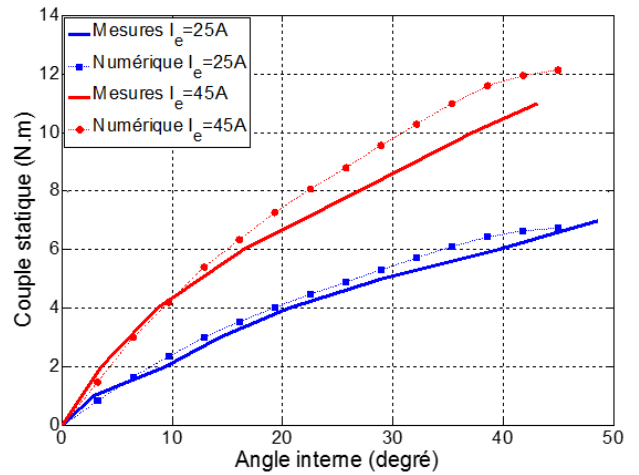


Fig. 11 : Couple statique du moteur à inducteur supraconducteur.

4.2. Essai à vide

Lors de cet essai, aucune charge n'est connectée aux bornes de l'induit. La valeur efficace de la force électromotrice E (f.e.m.) est alors directement mesurable par un voltmètre entre phase et neutre.

La figure 12 présente la mesure temporelle $e(t)$ de la f.e.m. aux bornes d'une phase du stator à 500 tr/min avec un courant d'excitation $I_e = 50A$.

Le calcul numérique de la $f.e.m$ est obtenu en dérivant le flux magnétique vu par une bobine statorique en fonction de la position du rotor. Les résultats de la simulation (qui ne font pas l'objet de cet article) et de l'expérimentation sont relativement proches.

La figure 13 présente la décomposition spectrale de la force électromotrice. La f.e.m présente un fondamental dont la valeur efficace vaut $31,5V$, l'harmonique de rang 3 vaut $4V$ et l'harmonique 5 vaut $1,5V$. Les autres harmoniques sont négligeables. Le taux de distorsion harmonique est de $13,5\%$. L'harmonique de rang 3 n'est pas problématique pour une machine triphasée couplée en étoile.

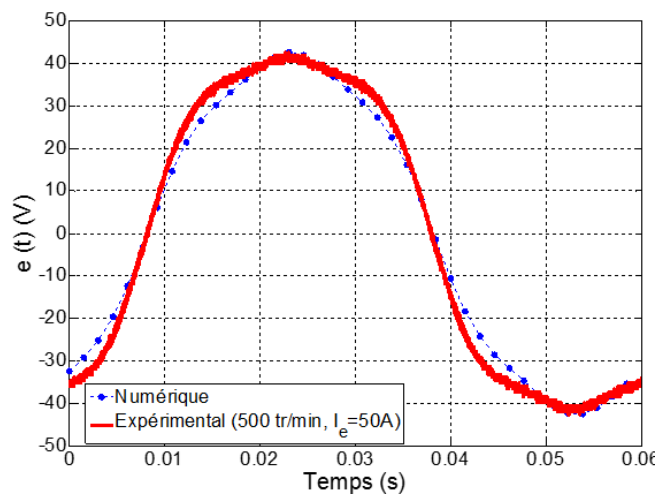


Fig. 12 : Force électromotrice induite par phase.

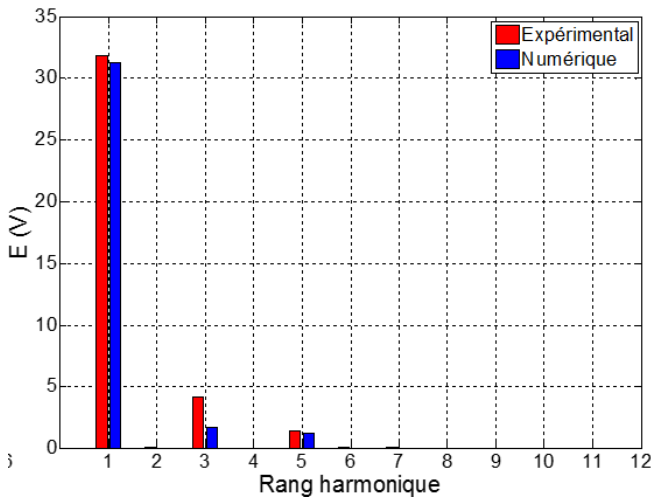


Fig. 13: Analyse harmonique de la force électromotrice par phase.

Nous avons réalisé les essais à vide et en court-circuit pour une vitesse $N = 250 \text{ tr/mn}$ en faisant varier le courant d'excitation I_e . Les résultats sont présentés sur les figures 14 et 15.

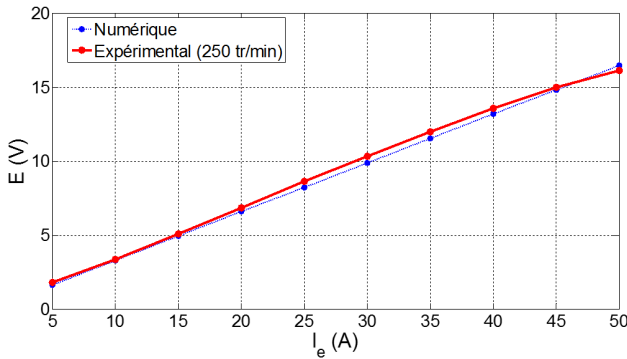


Fig.14 :Caractéristique à vide $E(I_e)$ en fonctionnement génératrice.

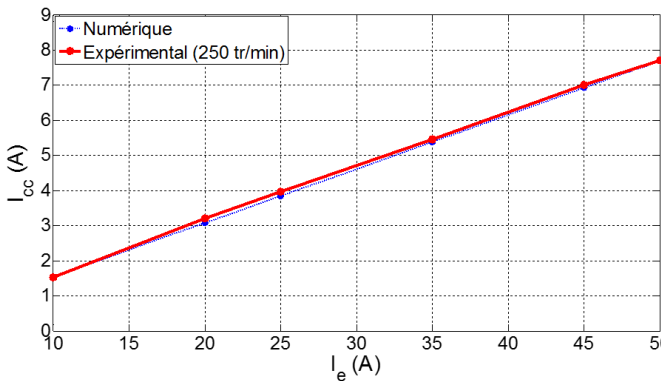


Fig.15 :Caractéristique en court-circuit $I_{cc}(I_e)$.

La caractéristique $E(I_e)$ ne montre pas de saturation, ceci est dû à l'absence de dents ferromagnétiques et au bon dimensionnement des culasses de retour du flux. Contrairement à une machine classique, les deux caractéristiques, à vide et en court-circuit sont donc linéaires. A partir de ces caractéristiques, il est possible de calculer la réactance synchrone X_s de la machine correspondant au modèle de Behn-Eschenburg. Nous obtenons $X_s = 1,98 \Omega$.

4.3. Essai en charge

Une caisse de charge résistive équilibrée est connectée aux bornes du stator. A courant d'excitation et vitesse constants, nous augmentons la puissance dissipée dans la charge, pour visualiser la chute de tension.

La figure 16 présente les caractéristiques de la tension simple en fonction de la puissance dissipée dans la charge pour les vitesses de 250 tr/min et 500 tr/min et un courant d'excitation $I_e = 50 \text{ A}$.

Les résultats numériques sont obtenus en utilisant la réactance synchrone et la $f.e.m$ calculée par éléments finis.

On constate que la tension aux bornes de la machine chute rapidement. Ceci est dû à la chute de tension dans l'impédance interne de la machine qui est importante comparée à la faible valeur de la force électromotrice induite pour les vitesses de rotation considérées ici.

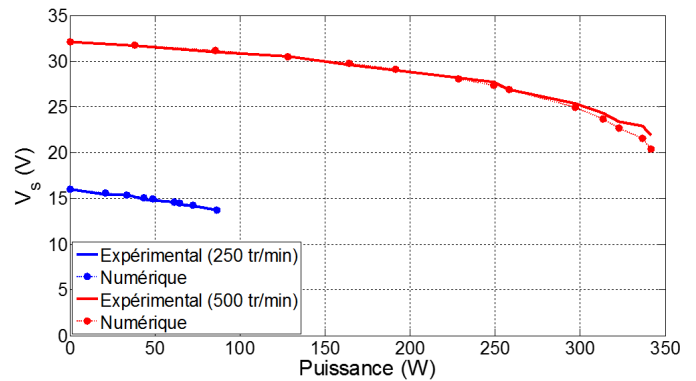


Fig.16 : Caractéristique $V_s(P)$ de la génératrice en charge.

5. CONCLUSIONS

Nous avons conçu et réalisé un prototype de moteur supraconducteur à flux axial incluant un accouplement magnétique comportant une partie supraconductrice. Ce prototype est le premier au niveau du laboratoire GREEN à posséder un inducteur supraconducteur tournant, et le premier sur le plan international, à se passer des torques tubes en utilisant une transmission magnétique supraconductrice du couple.

Nous avons dimensionné le prototype à partir d'un cahier des charges imposant un diamètre maximal de 30 cm , une vitesse de 500 tr/min et un refroidissement à l'azote liquide.

La fabrication des bobinages de l'inducteur et du stator, ainsi que l'assemblage mécanique ont été entièrement réalisés au sein du laboratoire. L'instrumentation a été choisie et adaptée pour simplifier l'acquisition des mesures expérimentales.

La première mise en fonctionnement du prototype s'est faite de manière progressive. Nous avons dans un premier temps vérifié le bon fonctionnement des bobines supraconductrices en relevant leurs caractéristiques électriques. Ensuite, nous avons réalisé des mesures de couple statique pour certifier de la tenue mécanique de l'ensemble. Puis pour finir, nous avons identifié les paramètres du modèle équivalent de la machine à travers les essais à vide et en court-circuit et validé le principe de la conversion électromécanique par un essai en charge.

6. REFERENCES

[1] LUBIN, Thierry, MEZANI, Smail, et REZZOUG, Abderrezak. Simple analytical expressions for the force and

torque of axial magnetic couplings. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2012, vol. 27, no 2, p. 536-546.

[2] LUBIN, Thierry, MEZANI, Smail, et REZZOUG, Abderrezak. Experimental and Theoretical Analyses of Axial Magnetic Coupling Under Steady-State and Transient Operations. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2014, vol. 61, no 8, p. 4356-4365.

[3] WU, W., LOVATT, H. C., et DUNLOP, J. B. Analysis and design optimisation of magnetic couplings using 3D finite element modelling. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1997, vol. 33, no 5, p. 4083-4094.

[4] YAO, Yeong-Der, CHIOU, Gwo-Ji, HUANG, Der-Ray, *et al.* Theoretical computations for the torque of magnetic coupling. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1995, vol. 31, no 3, p. 1881-1884.

[5] YONNET, J.-P., HEMMERLIN, S., RULLIERE, E., *et al.* Analytical calculation of permanent magnet couplings. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1993, vol. 29, no 6, p. 2932-2934.

7. REMERCIEMENTS

La thèse de Bastien Dolisy a été financée grâce au soutien de la DGA.