

# Moteur synchrone avec contrôle de la magnétisation des aimants en fonctionnement

Christophe Besson, Alain Savary, Matthieu Jaccard

Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale, HEIG-VD, 1401 Yverdon-les-Bains, Suisse

**RESUME** – Les nouvelles machines synchrones avec contrôle du niveau de magnétisation des aimants, en fonctionnement, par de brèves impulsions du courant, permettent d'envisager une amélioration de l'efficacité énergétique et un élargissement de la plage de fonctionnement couple-vitesse. Les propriétés particulières de ces machines apportent des perspectives intéressantes pour différentes topologies de moteurs et de générateurs.

**MOTS-CLES** – Machine synchrone, aimants permanents, magnétisation, efficacité énergétique, performances

## 1. Introduction

Le moteur synchrone à aimants permanents, appelé aussi moteur brushless, est de plus en plus souvent utilisé dans de nombreux domaines : machine-outil, robotique, automobile, équipements informatiques, etc. Il est capable de fournir un couple volumique élevé avec un bon rendement. Le couple nominal est applicable jusqu'à la vitesse nominale, ce qui correspond à l'équilibre thermique acceptable du moteur. Le flux d'excitation, créé par les aimants, n'est pas réglable. Dans de nombreuses applications, pour dépasser la vitesse nominale, on utilise une commande par affaiblissement du champ appelée aussi défluxage. Cette méthode permet d'augmenter la vitesse de l'ordre de 1.5 à 4 fois la vitesse nominale selon les cas. En fait, avec une alimentation judicieuse en courant, on produit un flux qui s'oppose à celui des aimants. Cette opération génère des pertes par effet Joule dans le bobinage statorique et un échauffement durant l'ensemble de la phase de défluxage.

La machine synchrone à rotor bobiné permet de contrôler de manière simple le flux d'excitation et donc la tension induite ( $u_i = d\Psi/dt$ ), avec un courant rotorique réglable. Ceci génère des pertes Joule dans l'enroulement rotorique. De plus, le système de bagues et de balais, généralement utilisé, engendre des frottements et limite les performances.

Les « memory motors » permettent de contrôler le flux d'excitation produit par les aimants à l'aide d'une brève impulsion du courant. Cette impulsion, dont l'amplitude représente généralement plusieurs fois celle du courant nominal (typiquement 3 à 10 fois), permet d'inverser, de magnétiser ou démagnétiser, partiellement ou totalement, en cours de fonctionnement, les aimants permanents. Cette impulsion est si courte, de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes, que les pertes engendrées par cette opération sont négligeables par rapport aux pertes du moteur. Le flux d'excitation reste ensuite inchangé aussi longtemps qu'on ne modifie pas la magnétisation des aimants par une autre impulsion de courant, d'où la dénomination anglo-saxonne de « memory motors ».

La démagnétisation partielle ou totale des aimants, lors du fonctionnement, permet de réaliser l'affaiblissement du champ, nécessaire à l'augmentation de la vitesse, sans maintenir en permanence un courant statorique (et donc des pertes Joule) pour produire un flux s'opposant à celui des aimants. Cette propriété est bénéfique en vue d'augmenter le rendement et d'élargir la plage des vitesses de fonctionnement. De façon similaire à la machine à rotor bobiné, il est possible de modifier en fonctionnement le flux d'excitation et par conséquent la tension induite, grâce au contrôle de la magnétisation des aimants, mais sans engendrer des pertes Joule au rotor. En résumé, les nouvelles topologies de « memory machines » ont pour but de combiner les avantages de la machine synchrone à rotor bobiné (réglage du flux d'excitation) avec ceux de la machine synchrone à aimants (pas de pertes Joule au rotor pour créer le flux d'excitation).

Dans le but d'augmenter les performances, la flexibilité et d'optimiser le rendement sur la plage de fonctionnement, le réglage du flux d'excitation dans les machines synchrones à aimants fait l'objet de très nombreuses études [1]. Un grand nombre de variantes à excitation hybride ont été étudiées et développées ces dernières années. Certaines solutions mécaniques consistent à déplacer les aimants ou des pièces ferromagnétiques lors du fonctionnement. Dans le cas des

«memory motors», on agit sur le réglage du niveau de magnétisation des aimants. Cette approche est particulièrement récente. Les publications mentionnent souvent le concept proposé et publié par le Professeur Vlado Ostovic en 2001 [2]. Depuis, différentes topologies sont étudiées et diverses variantes deviennent envisageables. Certaines solutions exploitent directement l'enroulement d'induit pour contrôler le niveau de magnétisation des aimants [3]. D'autres structures introduisent un enroulement d'excitation supplémentaire [4].

L'article a pour but de présenter le principe de fonctionnement, les propriétés et les résultats des mesures obtenus avec un prototype développé, dimensionné et testé pour illustrer et évaluer le nouveau concept.

## 2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement consiste à utiliser des aimants de type AlNiCo dont on peut, à l'aide d'une courte impulsion de courant, en cours d'utilisation du moteur, changer le niveau de magnétisation. Il est alors possible de modifier le point de fonctionnement de l'aimant et d'adapter le flux magnétique produit.

Les aimants AlNiCo présentent une induction rémanente  $B_r$  relativement élevée, voisine de 1.25 T, ce qui est souhaitable pour obtenir un couple important. Ils ont un coude dans la caractéristique  $B(H)$  relativement haut et un faible champ coercitif  $H_c$  de l'ordre de 50 à 100 kA/m, ce qui permet de modifier le niveau de magnétisation au sein du moteur sans un pulse de courant prohibitif. Ces aimants présentent aussi un coefficient de température relativement faible (-0.02 %/°C).

La Figure 1 présente schématiquement le rotor à 4 pôles du prototype développé dans le cadre de l'étude. Le rotor comporte 4 aimants de «magnétisation constante» en NdFeB et 4 aimants de «magnétisation variable» en AlNiCo. Les aimants de type NdFeB employés ont une caractéristique  $B(H)$  linéaire, dans une large plage de température, afin qu'ils ne puissent pas être démagnétisés. Le champ coercitif  $H_c$  des aimants de type NdFeB est nettement supérieur à celui des aimants AlNiCo. En fait, le champ nécessaire pour la démagnétisation d'un aimant AlNiCo est de l'ordre de 10 à 15 fois plus faible que celui d'un aimant en NdFeB. La nouvelle technologie employée dans les «memory motors» utilise une propriété qui était considérée, ces dernières années, comme un point faible des aimants en AlNiCo.

Les aimants en NdFeB du rotor, dont la magnétisation reste inchangée au cours du fonctionnement, apportent un certain niveau de flux traversant l'entrefer. Les aimants AlNiCo, selon leur magnétisation, vont permettre d'augmenter ou de diminuer ce flux qui traverse l'entrefer. Comme dans les moteurs synchrones à aimants classiques, le contrôle du couple est réalisé par la composante transverse  $i_q$  du courant statorique. Le flux créé par  $i_q$  n'intervient pas sur la magnétisation des AlNiCo. La composante directe  $i_d$  crée un flux qui s'ajoute ou qui se retranche au flux des aimants AlNiCo. En réglant l'amplitude et le signe du courant  $i_d$ , il est possible de créer un flux magnétisant ou démagnétisant les AlNiCo (Figure 1a). Un convertisseur électronique classique peut alors être utilisé pour alimenter le moteur, il faut toutefois adapter les algorithmes de commande pour gérer de manière adéquate les pulses du courant  $i_d$  (amplitude, durée et cycles).

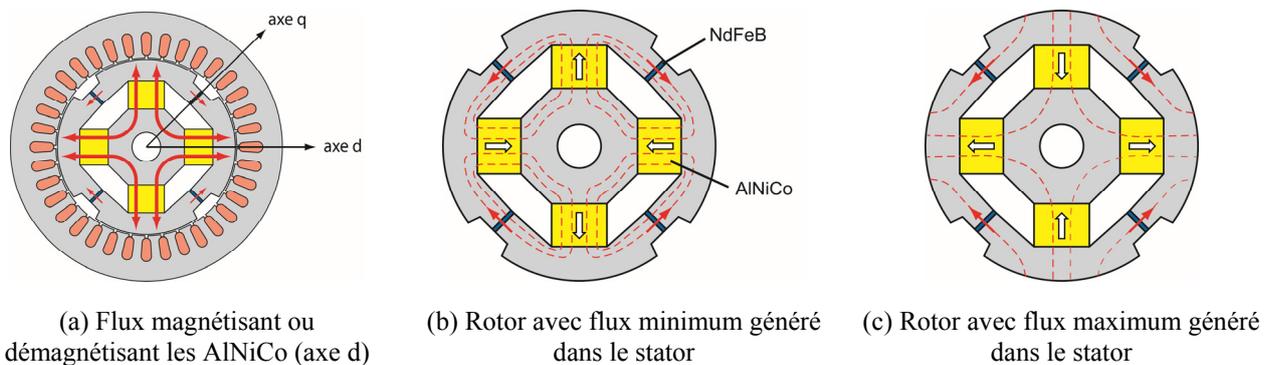


Figure 1: Principe de fonctionnement du prototype

Dans le cas de la Figure 1b, les aimants AlNiCo créent un champ magnétique qui circule au rotor dans le même sens que les aimants NdFeB. Le champ de tous les aimants circule essentiellement dans le rotor. Il traverse relativement peu l'entrefer. Dans ce cas, le flux créé par les aimants dans les bobines statoriques est minimal. La constante de tension induite est alors faible. Le moteur se prête bien pour travailler à haute vitesse et faible couple.

En appliquant des impulsions dans l'axe direct du courant statorique, il est possible d'inverser la polarisation des aimants AlNiCo. Dans ce cas, au rotor, les aimants AlNiCo s'opposent aux aimants NdFeB selon la Figure 1c. Le flux des aimants AlNiCo et celui des aimants NdFeB traversent l'entrefer. Le flux créé par les aimants dans les bobines statoriques est maximal. La constante de couple est alors élevée. Le moteur se prête bien pour travailler à basse vitesse et fort couple.

Selon le principe décrit à la Figure 1, il est possible de proposer un moteur avec deux modes de fonctionnement : basse vitesse et fort couple (Figure 1a) ou haute vitesse et bas couple (Figure 1b). Dans le cas d'une machine-outil, par exemple,

on peut imaginer que le moteur soit utilisé pour une opération de fraisage (petite vitesse et fort couple). Il suffit ensuite de stopper le moteur durant un court instant afin d'appliquer les pulses de courant pour inverser la polarisation des AlNiCo. Le même moteur pourra alors ensuite tourner à grande vitesse, à faible couple, pour une opération de perçage. Dans ce cas, le niveau de magnétisation ne doit pas être réglé. Il suffit d'appliquer une ou des impulsions de courant d'amplitude suffisante pour inverser la polarisation des AlNiCo. Notons que les pulses de courant, pour passer d'un mode de fonctionnement à l'autre peuvent aussi être appliqués lorsque le moteur tourne. Dans ce cas, afin d'éviter des régimes transitoires néfastes, il peut être préférable de démagnétiser ou magnétiser progressivement les aimants.

En agissant sur l'amplitude, sur la durée et sur le nombre de pulses de courant appliqué, il est possible de régler le flux d'excitation produit par les aimants rotoriques sur toute la plage, entre les deux cas de fonctionnement extrêmes de la Figure 1. Des niveaux de flux d'excitation intermédiaires peuvent alors être imposés.

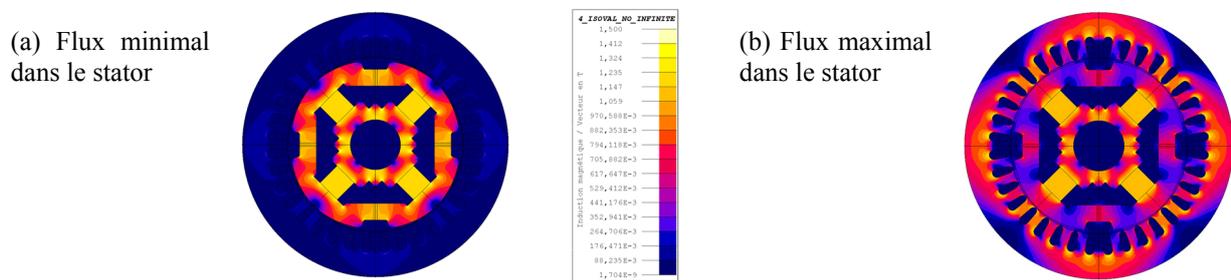
En cas de défaillance du convertisseur électronique, lorsqu'on réalise le défluxage d'un moteur synchrone à aimants conventionnel, pour les hautes vitesses, le moteur génère une surtension dommageable. Ce risque disparaît avec le « memory motor » car le flux d'excitation des aimants a été préalablement réduit afin d'augmenter la vitesse.

Notons que le dimensionnement du moteur doit être réalisé avec soin. Il faut pouvoir varier le niveau de magnétisation des AlNiCo, relativement aisément, avec des pulses de courant d'amplitude acceptable. Par contre, hors pulses, le niveau de magnétisation des aimants AlNiCo doit être maintenu pour un niveau de courant suffisant (typiquement 4 à 5 fois le courant nominal), afin de produire un couple impulsif intéressant pour les phases d'accélération.

Compte tenu de la caractéristique B(H) non-linéaire des aimants AlNiCo et des effets de saturation magnétique, le dimensionnement du moteur est un challenge. La variation brutale de la courbe dans la zone de démagnétisation des AlNiCo, en dessous du coude, complique le réglage. La stratégie de commande avec le contrôle du niveau de magnétisation, afin d'optimiser les performances, est un vaste sujet d'étude.

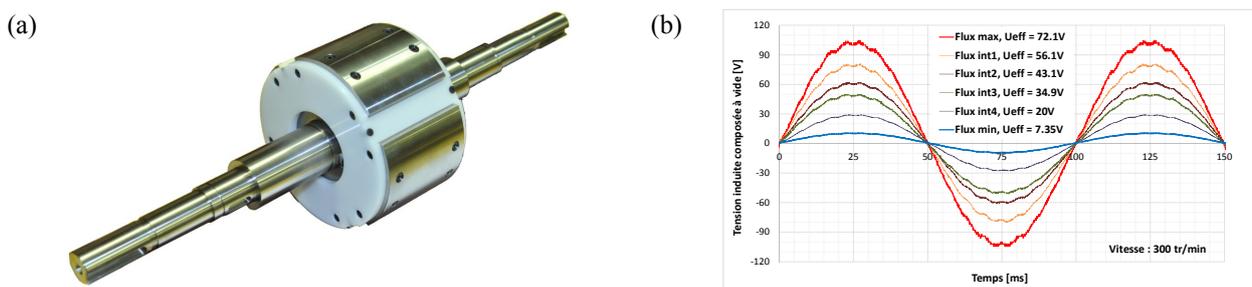
### 3. Modélisation et simulation par éléments finis

Les simulations par éléments finis permettent d'illustrer les phénomènes en jeu (Figure 2), de dimensionner et d'optimiser la structure de manière efficace. Cependant, les droites de retour des aimants AlNiCo ne sont pas considérées. Les simulations sont donc basées sur un modèle simplifié qui limite certains résultats. Toutefois, les simulations des tensions induites de mouvement, de la caractéristiques de magnétisation et du couple sont très proches des mesures réalisées.



### 4. Mesures du prototype

La Figure 3a présente le rotor développé avant son introduction dans la machine. La Figure 3b montre les mesures de tensions induites, générées par le flux des aimants, lors d'un essai en génératrice à vide, pour différents niveaux de magnétisation. Le prototype permet de contrôler le coefficient de tension induite dans un facteur proche de 10. Comme prévu lors du dimensionnement, la tension induite la plus faible ne tend pas exactement vers zéro. En effet, il est souhaitable de garder un minimum de flux généré par les aimants dans le stator afin de créer le couple.



La Figure 4 présente des caractéristiques mesurées qui seront détaillées et complétées dans la version finale de l'article. La Figure 4a montre le cycle de réglage du flux créé par les aimants dans le stator, à l'image de la tension induite, avec un cycle partiel. Il s'agit de l'amplitude du pulse de courant à appliquer dans l'axe direct pour modifier le niveau de magnétisation des AlNiCo. La Figure 4b illustre un exemple de régime transitoire des courants, relevé lors d'une démagnétisation partielle en fonctionnement à 200 tr/min. Après l'impulsion, la régulation de vitesse augmente le courant pour maintenir le couple demandé. La Figure 4c présente la caractéristique couple-vitesse mesurée, à courant nominal ( $i_d=0, i_q=1$ ), pour une tension de bus  $U_{DC} = 450V$ . La vitesse maximale est ici doublée par l'inversion de polarisation des AlNiCo. Le rendement est présenté à la Figure 4d. En dehors des impulsions dans l'axe d, un courant dans l'axe q voisin de 5 fois le courant nominal permet de créer un couple sans modifier le niveau de magnétisation des aimants AlNiCo. Des pulses de courants dans l'axe d, de 3 à 10 fois le courant nominal, permettent de régler le niveau de magnétisation.

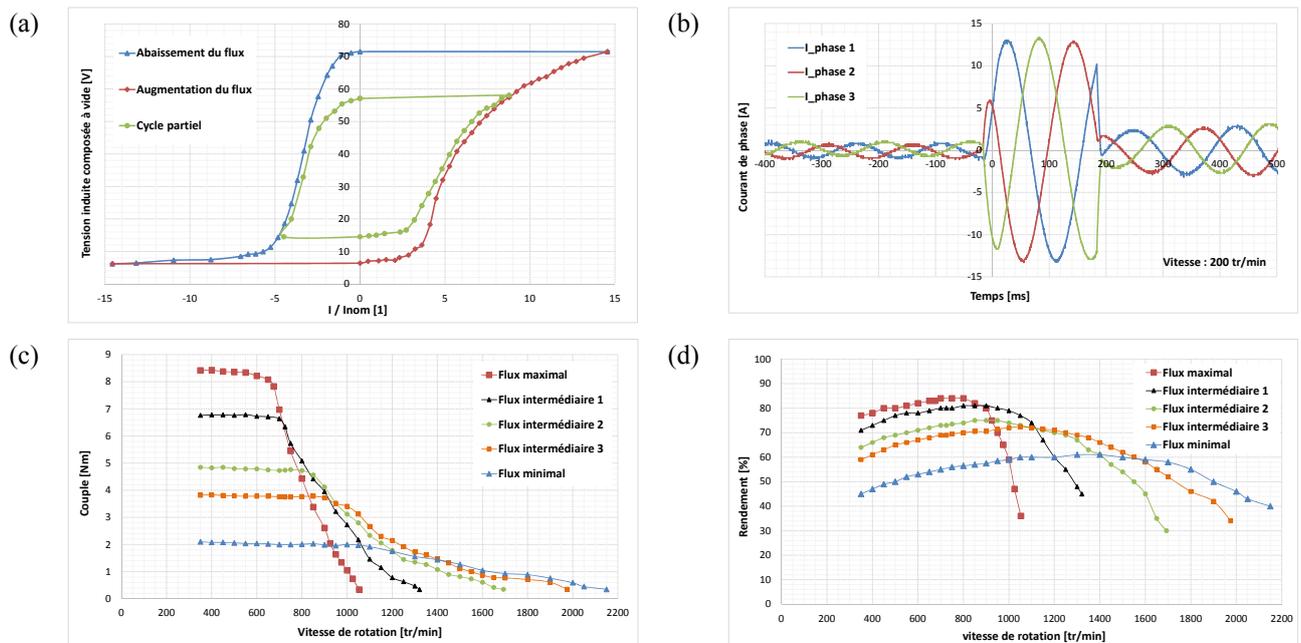


Figure 4: Caractéristiques mesurées sur le prototype

## 5. Conclusion

Le prototype développé et les différents essais réalisés montrent l'intérêt de cette nouvelle technologie qui consiste à contrôler le niveau de magnétisation des aimants en fonctionnement. La structure proposée, avec un stator conventionnel, est relativement facile à industrialiser. Elle n'utilise que des matériaux disponibles sur le marché. De plus, une alimentation électronique standard avec contrôle vectoriel peut être employée. Les stratégies de commandes peuvent être adaptées et optimisées afin d'exploiter au mieux le potentiel de ce concept et prendre en compte la caractéristique non-linéaire de la magnétisation. Les propriétés particulières de ces machines avec contrôle de la magnétisation des aimants en fonctionnement apportent des perspectives intéressantes pour différentes topologies de moteurs et de générateurs.

Ce projet, soutenu par le Réseau de Compétences lié aux Techniques Énergétiques (RCSO-TE) de la Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO), a été réalisé à l'Institut d'Énergie et Systèmes Électriques (IESE) de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD).

## 6. Références

- [1] R.L. Owen, Z.Q. Zhu, J.B. Wang, D. A. Stone and I. Urquhart, « Review of Variable-flux Permanent Magnet Machines », Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, 2012.
- [2] V. Ostovic, « Memory Motors, A New Class of Controllable Flux PM Machines for a True Wide Speed Operation », Industry Applications Society Annual Meeting, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE.
- [3] K. Sakai, k. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, k. Yasui, « Principle of the Variable-Magnetic-Force Memory Motor », International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009.
- [4] C. Yu, K.T. Chau, « Design, Analysis and Control of DC-Excited Memory Motors », IEEE Transactions On Energy Conversion, June 2010.