



HAL
open science

Moteur synchrone avec contrôle de la magnétisation des aimants en fonctionnement

Christophe Besson, Alain Savary, Matthieu Jaccard

► **To cite this version:**

Christophe Besson, Alain Savary, Matthieu Jaccard. Moteur synchrone avec contrôle de la magnétisation des aimants en fonctionnement. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065406

HAL Id: hal-01065406

<https://hal.science/hal-01065406v1>

Submitted on 18 Sep 2014

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.

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 de 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-clés — Machine synchrone, aimants permanents, magnétisation, efficacité énergétique, performances.

1. INTRODUCTION

Le moteur synchrone à aimants permanents (Fig.1a), 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 un contrôle du 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 (Fig.1b) 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.

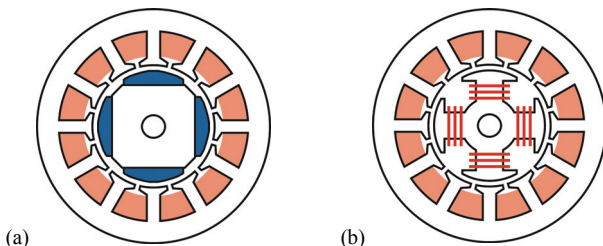


Fig.1 Machines synchrones à aimants permanents (a) et à rotor bobiné (b)

Les « memory motors » permettent de contrôler le flux d'excitation produit par les aimants à l'aide d'une brève impulsion de 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, et ce 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 pour 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. Dans ce cas, la machine comporte un enroulement d'excitation, parcouru par un courant continu, qui augmente (surfluxage) ou diminue (défluxage) le flux créé par les aimants. Dans certains cas, l'enroulement d'excitation est utilisé pour saturer une section ferromagnétique afin de modifier la circulation du flux produit par les aimants. Par rapport aux machines synchrones à aimants classiques, l'adjonction du bobinage d'excitation complique souvent la structure et donc l'industrialisation, cela augmente aussi la masse et l'encombrement. Les pertes dans l'enroulement

d'excitation contribuent à l'échauffement de la machine et diminuent le rendement.

Certaines solutions mécaniques [1] consistent à déplacer les aimants ou des pièces ferromagnétiques lors du fonctionnement. Dans certains cas, des parties du rotor sont déplacées en rotation ou axialement. Ces approches mécaniques sont généralement compliquées, encombrantes et posent parfois des problèmes d'usure et de fiabilité. Par ailleurs, ces structures ne sont généralement pas très bien adaptées pour les très hautes vitesses.

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]. Toutefois, certaines idées et certains prototypes apparaissent dans de rares articles plus anciens. Le « Roesel Generator » présenté en 1976 produit une fréquence constante en sortie, pour une certaine plage de vitesse, en agissant sur la magnétisation d'un aimant au rotor [3]. L'idée d'un moteur à aimants permanents dont le flux peut être varié, par démagnétisation des aimants, afin de réduire la tension induite à haute vitesse est proposée en 1985 dans la référence [4].

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 ([2], [5] à [13]). D'autres structures introduisent un enroulement d'excitation supplémentaire ([14] à [21]).

Certaines topologies utilisent uniquement des aimants AlNiCo ([2], [8], [9], [11] à [15], [17], [20], [21]). D'autres structures intègrent des aimants à base de terres rares, de type NdFeB ou SmCo, en plus des aimants AlNiCo ([5], [6], [7], [10], [16], [18], [19]). Il existe des variantes à rotor interne et d'autres à rotor externe ([14] à [17]). Des variantes à flux radial ou à flux axial, avec un mouvement rotatif ou linéaire, peuvent être envisagées.

Différentes propriétés particulières des « memory machines » peuvent être exploitées. Par exemple, il est possible de réaliser des machines synchrones à aimants avec un nombre de pôles variable ([8] à [11], [19]). Dans le cas des structures qui n'utilisent que des aimants AlNiCo, lors de la fabrication, le montage peut être réalisé sans avoir magnétisé les aimants, ce qui facilite grandement la manutention et les différentes opérations. En marche, il est possible de faire passer la machine du fonctionnement en moteur synchrone à aimants à celui du fonctionnement à réluctance variable, après démagnétisation des aimants.

Les caractéristiques particulières et les performances de ces nouveaux moteurs, avec contrôle de la magnétisation en fonctionnement, représentent un domaine d'étude prometteur. Ils peuvent être particulièrement intéressants, lorsque le moteur doit fonctionner dans une large plage de vitesse, pour le secteur des véhicules électriques, des machines-outils, de la robotique ou des machines à laver. Les « memory machines » ont aussi des propriétés intéressantes pour le fonctionnement en générateur. Elles peuvent trouver diverses applications dans les alternateurs automobiles ou les alternateurs d'éoliennes.

L'article a pour but de présenter le principe de fonctionnement, les propriétés et les résultats des mesures obtenus avec un prototype développé, dimensionné, simulé 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 (Fig.2), 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. Les aimants AlNiCo présentent un coefficient de température relativement faible ($-0.02 \%/^{\circ}\text{C}$) et un coût nettement inférieur à celui des aimants NdFeB. D'autres types d'aimants, avec des propriétés semblables aux AlNiCo, comme les aimants de type FeCrCo, peuvent aussi être employés. 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 20 fois plus faible que celui d'un aimant NdFeB. La nouvelle technologie employée dans les « memory motors » utilise une propriété qui était considérée, ces dernières années, comme un point faible des aimants AlNiCo.

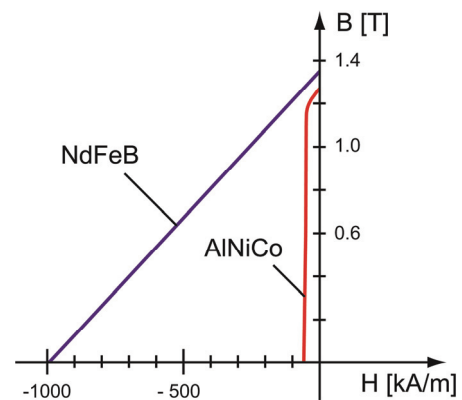
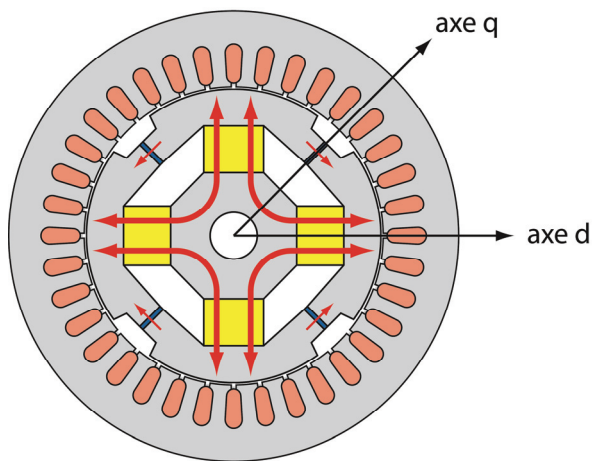
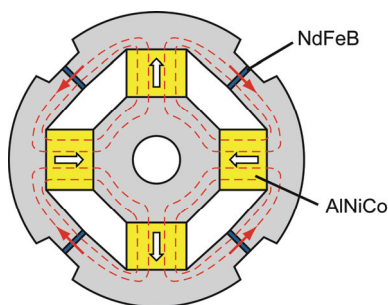


Fig.2 Caractéristiques typiques des aimants AlNiCo et NdFeB

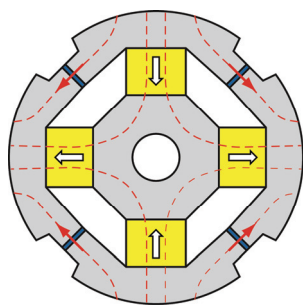
La Fig.3 présente schématiquement le rotor à 4 pôles du prototype développé dans le cadre de l'étude. Le rotor comporte 4 aimants à « magnétisation constante » en NdFeB et 4 aimants à « magnétisation variable » en AlNiCo. Les aimants de type NdFeB employés ont une caractéristique $B(H)$ linéaire, dans une large plage de température, afin qu'ils ne puissent pas être démagnétisés (Fig.2).



(a) Flux magnétisant ou démagnétisant les aimants AlNiCo (axe d)



(b) Rotor avec flux minimum généré dans le stator



(c) Rotor avec flux maximum généré dans le stator

Fig.3 Principe de fonctionnement

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 pour 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 (Fig.3a). 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).

Dans le cas de la Fig.3b, 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 Fig.3c. 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 Fig.3, il est possible de proposer un moteur avec deux modes de fonctionnement : basse vitesse et fort couple (Fig.3c) ou haute vitesse et bas couple (Fig.3b). 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.

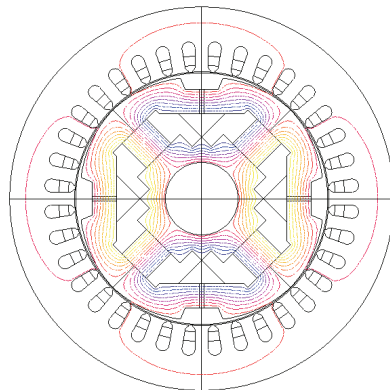
En agissant sur l'amplitude, sur la durée et sur le nombre des pulses de courant appliqués, il est possible de régler le flux d'excitation produit par les aimants rotoriques sur toute la plage, entre les deux cas de fonctionnement extrêmes de la Fig.3. Des niveaux de flux d'excitation intermédiaires peuvent alors être imposés, ce qui permet d'élargir la plage de fonctionnement dans le plan couple-vitesse et d'optimiser le rendement.

Le dimensionnement du « memory motor » doit satisfaire des spécifications particulières. 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 impulsionnel 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 complexe. La variation brutale de la courbe dans la zone de démagnétisation des AlNiCo (Fig.2), 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 qui est encore ouvert.

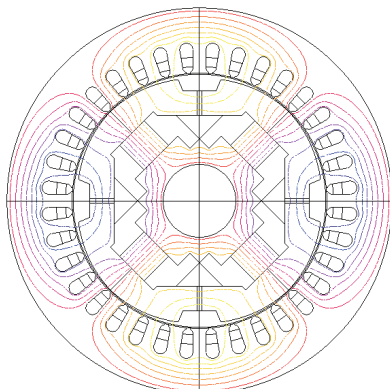
3. MODELISATION ET SIMULATIONS A ELEMENTS FINIS

Les simulations par éléments finis permettent d'illustrer les phénomènes en jeu, de dimensionner et d'optimiser la structure de manière efficace. Les droites de retour, sur la caractéristique $B(H)$ des aimants AlNiCo, n'ont pas été considérées dans la modélisation. Les simulations sont donc basées sur un modèle simplifié. Néanmoins, les mesures réalisées sur le prototype correspondent particulièrement bien aux caractéristiques simulées.

La Fig.4 présente les lignes de champ générées par les aimants, sans courant, dans les deux cas décrits précédemment à la Fig.3. La Fig.5 illustre l'amplitude du champ d'induction magnétique dans les différentes zones du moteur.



(a) Flux minimal dans le stator



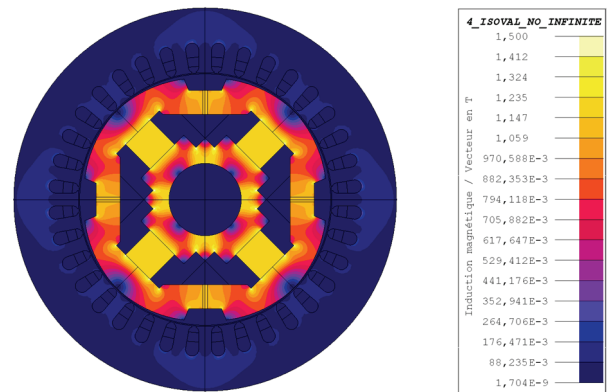
(b) Flux maximal dans le stator

Fig.4 Lignes de champ générées par les aimants (sans courant)

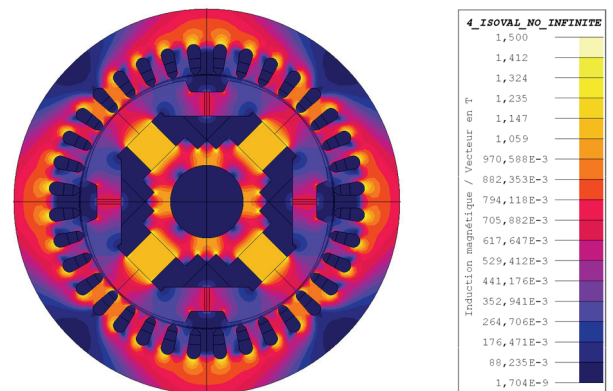
L'alimentation avec un réglage découplé des composantes de courant, dans l'axe q et dans l'axe d , permet de contrôler respectivement le couple et le niveau de magnétisation des aimants. Dans le cas de la Fig.6a et de la Fig.6b, les aimants AlNiCo et les aimants NdFeB ne sont pas magnétisés. Ils sont simplement remplacés par un matériau homogène de perméabilité correspondante à celle de l'aimant. Notons que dans la zone d'utilisation des aimants, sur la courbe $B(H)$, la perméabilité relative de AlNiCo est nettement supérieure à celle des aimants NdFeB.

La Fig.6a montre les lignes de champ créées, à un instant donné, par les trois phases statoriques, lorsque la composante directe du courant est nulle. Le courant est donc uniquement dans l'axe transversal q ($I_d = 0$ et $I_q = I$). Dans ce cas, les lignes de champ générées par le bobinage ne traversent quasiment pas les aimants AlNiCo. Le niveau de magnétisation des aimants AlNiCo n'est donc pas influencé. Pour ce cas d'alimentation, en fonctionnement normal, le couple est optimal.

Les axes d et q sont toujours en quadrature, ce qui correspond à un angle géométrique de 45° pour ce moteur, puisqu'il comporte deux paires de pôles. La Fig.6b montre les lignes de champ magnétique créées, à un instant donné, par les trois phases statoriques, lorsque le courant est dans l'axe direct d et que les aimants ne sont pas magnétisés. La composante transversale du courant est nulle ($I_d = I$ et $I_q = 0$). Dans ce cas, des lignes de champ traversent les aimants AlNiCo. Selon le signe du courant I_d , l'effet est magnétisant ou démagnétisant pour les AlNiCo. Ce cas d'alimentation est utilisé pour les pulses de magnétisation ou démagnétisation, sans produire de couple.

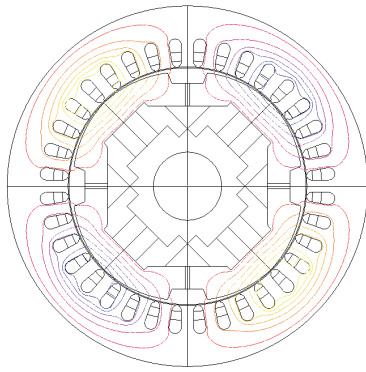


(a) Flux minimal dans le stator

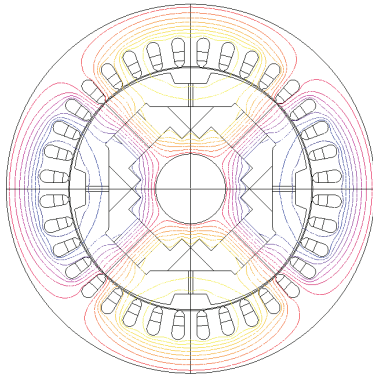


(b) Flux maximal dans le stator

Fig.5 Induction magnétique sans courant (Echelles de 0 à 1.5T)



(a) Aimants non magnétisés, $I_d = 0$ et $I_q = 1$



(b) Aimants non magnétisés, $I_d = 1$ et $I_q = 0$

Fig.6 Lignes de champ générées par les courants statoriques (aimants non magnétisés)

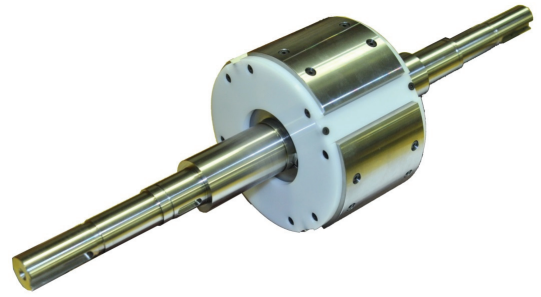


Fig.8 Rotor du prototype réalisé

Le banc d'essais utilisé pour les différentes mesures est présenté à la Fig.9. Une interface graphique a été développée avec le logiciel Labview afin de relever et visualiser les valeurs instantanées mesurées des différentes grandeurs électriques et mécaniques en jeu: courants, tensions, puissances électriques, position, vitesse, couple et puissance mécanique. Le convertisseur électronique géré par le microcontrôleur permet de générer la composante i_q pour contrôler le couple et assurer la régulation de vitesse. Le microcontrôleur permet aussi de gérer la durée, l'amplitude et le nombre d'impulsions de courant i_d pour modifier le niveau de magnétisation des aimants.

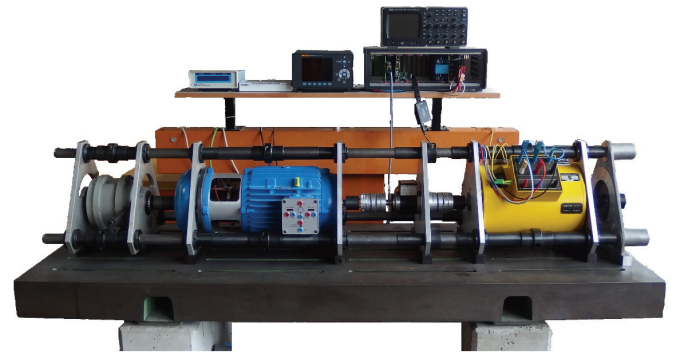


Fig.9 Banc d'essais

4. MESURES DU PROTOTYPE

4.1. Prototype

Le prototype comporte 4 petits aimants en NdFeB placés entre des pièces ferromagnétiques massives. Les aimants AlNiCo, de volume plus important, sont logés à l'intérieur avec un système de cales en laiton (Fig. 7). Cette approche particulière pour le montage du rotor a été retenue en raison de sa grande flexibilité. Elle permet de changer facilement les aimants AlNiCo et d'envisager des matières et/ou des dimensions différentes, ce qui est particulièrement appréciable pour l'étude du nouveau concept. La Fig. 8 présente le rotor développé avant son introduction dans la machine.

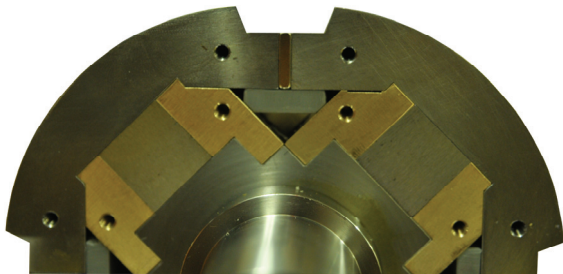


Fig.7 Rotor du prototype réalisé – Vue de face

4.2. Tension induite de mouvement

La variation du flux totalisé Ψ_a dans la phase, créée par la rotation des aimants, engendre une tension induite u_{im} proportionnelle à la vitesse Ω , appelée tension induite de mouvement.

La tension induite de mouvement peut s'écrire comme suit :

$$u_{im} = \frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{d\Psi_a}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\Psi_a}{d\alpha} \cdot \Omega \quad (1)$$

Comme la valeur efficace U_{im} de la tension induite de mouvement est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω , en pratique, on définit la constante de tension induite K_u telle que :

$$U_{im} = K_u \cdot \Omega \quad (2)$$

La valeur efficace $^1U_{im}$ du fondamental de la tension induite de mouvement peut aussi s'écrire de la manière suivante :

$$^1U_{im} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot ^1k_w \cdot N \cdot ^1\hat{\Phi}_a \quad (3)$$

où f est la fréquence telle que :

$$f = p \cdot n \quad (4)$$

avec

p : nombre de paires de pôles

n : vitesse de rotation en [tr/s] et Ω la vitesse en [rad/s]

1k_w : facteur de bobinage

N : nombre total de spires en série par phase

$^1\hat{\Phi}_a$: flux crête par pôle du fondamental de l'onde d'induction créé par les aimants.

Avec les relations précédentes, la constante de tension induite peut s'écrire :

$$K_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot ^1k_w \cdot p \cdot N \cdot ^1\hat{\Phi}_a \quad (5)$$

Selon la relation (3), la tension induite de mouvement à vitesse constante est directement l'image du flux produit par les aimants dans la phase et donc l'image du niveau de magnétisation. La relation (5) montre que le contrôle de la magnétisation des aimants, par les impulsions de courant, permet de régler la grandeur fondamentale K_u du moteur qui reste ensuite constante hors impulsions.

La Fig. 10 présente la tension induite mesurée lors d'un essai en génératrice à vide, à vitesse constante, dans le cas à flux maximal et dans le cas à flux minimal généré dans le stator selon la Fig.3. On peut voir une bonne correspondance entre les courbes simulées et celles mesurées. L'amplitude la plus faible de la tension induite ne tend pas exactement vers zéro. En pratique, il est souhaitable de garder un minimum de flux généré par les aimants dans le stator afin de créer le couple.

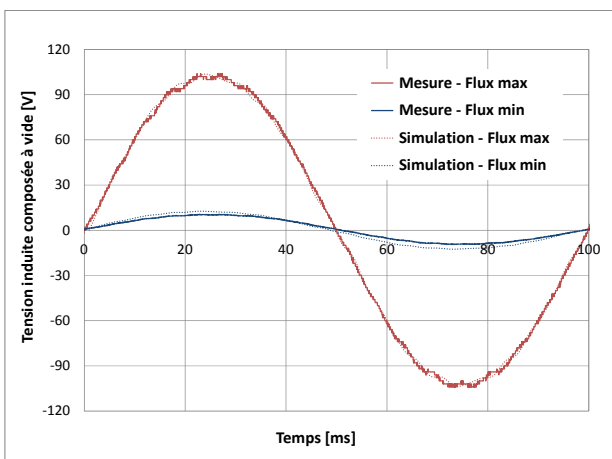


Fig.10 Tension induite de mouvement à 300 tr/min, mesures et simulations

La Fig.11 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 la constante de tension induite dans un facteur proche de 10.

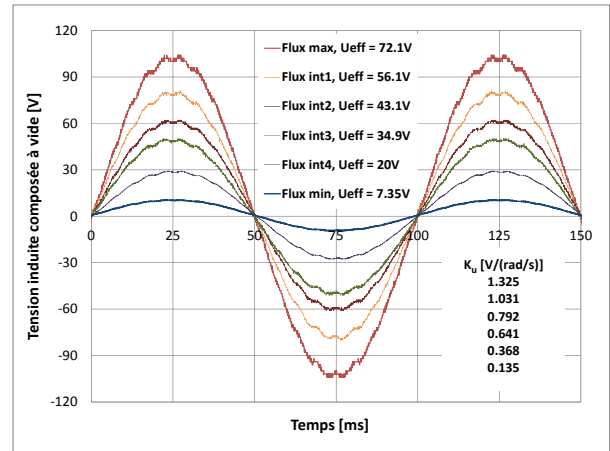


Fig.11 Tension induite de mouvement mesurée à 300 tr/min pour différents niveaux de magnétisation

4.3. Contrôle du flux d'excitation

La Fig.12 montre le cycle de réglage du flux créé par les aimants dans le stator, à l'image de la tension induite de mouvement. Il s'agit de l'amplitude du pulse de courant à appliquer dans l'axe direct pour modifier le niveau de magnétisation des aimants AlNiCo. Pour cette mesure, l'impulsion de courant dans l'axe d a été appliquée à l'arrêt pendant une durée suffisante, de l'ordre d'une seconde, afin que le courant soit bien établi. La tension induite a ensuite été mesurée lors d'un essai en génératrice à vide à 300 tr/min. La courbe bleue, avec les marqueurs triangulaires, montre l'amplitude de l'impulsion de courant à appliquer pour réduire le flux d'excitation en partant du cas à flux maximum (Fig.3c). La courbe rouge, avec les marqueurs en losange, montre l'amplitude du pulse de courant à appliquer pour augmenter le flux d'excitation en partant du cas à flux minimum (Fig.3b). La courbe verte présente un cycle partiel.

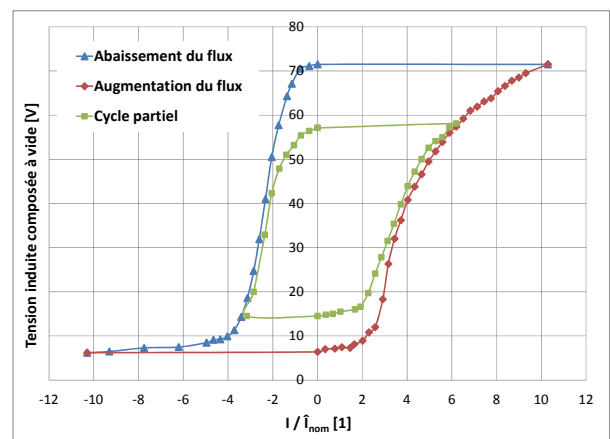


Fig.12 Abaissement et augmentation du flux, cycle complet et cycle partiel. Tension induite de mouvement mesurée à 300 tr/min

En agissant sur le dimensionnement de la machine, et particulièrement sur le type et sur les dimensions des aimants AlNiCo, il est possible de modifier la caractéristique de la Fig.12 et donc l'amplitude des pulses de courant nécessaires.

4.4. Régimes transitoires

La Fig.13 montre un exemple de régime transitoire relevé sur les courants, lors d'une démagnétisation partielle, en fonctionnement à 200 tr/min avec couple de charge constant. Dans cet exemple, une impulsion de courant a été appliquée dans l'axe direct pendant 200 ms afin d'abaisser le flux d'excitation généré par les aimants dans le stator. L'amplitude de l'impulsion de courant représente ici environ 4 fois celle du courant nominal. Avant l'impulsion, la valeur efficace mesurée du courant est 0.6A pour produire le couple. Après l'impulsion, la régulation de vitesse augmente le courant pour maintenir le couple demandé afin d'assurer une vitesse constante. Le courant se stabilise à environ 2A de manière durable. Cet essai montre que le flux d'excitation a été réduit et qu'il est maintenu en dehors des impulsions.

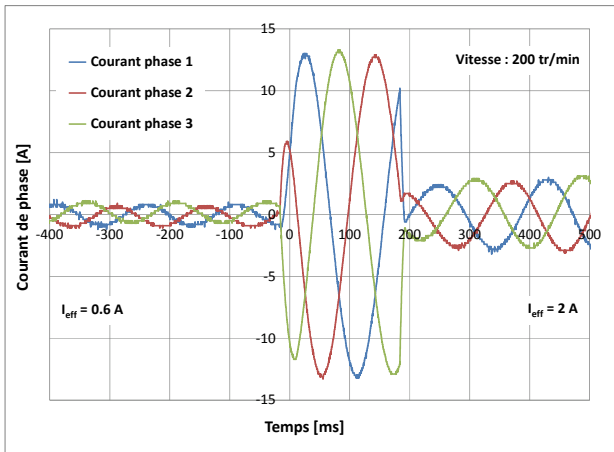


Fig.13 Régime transitoire des courants de phase mesuré lors d'une impulsion de courant abaissant le flux d'excitation

La Fig.14 présente un régime transitoire des courants mesuré lors d'une magnétisation partielle en fonctionnement à 200 tr/min. Une impulsion de courant, représentant environ 5 fois le courant nominal, a été appliquée dans l'axe d durant 100 ms pour augmenter le flux d'excitation créé par les aimants dans le stator. Avant l'impulsion, un courant de 2.3A est mesuré. Après l'impulsion, la régulation de vitesse diminue le courant pour fournir le couple demandé. Lorsque le régime est stabilisé, le courant mesuré vaut ici environ 1.1A de manière durable. Le flux d'excitation a donc été augmenté.

Il est possible d'appliquer plusieurs impulsions successives d'amplitude réduite. La durée des impulsions de courant nécessaire, dans l'axe d, pour régler le niveau de magnétisation est dépendante du temps d'établissement du courant et donc de la constante de temps électrique du moteur.

L'alimentation électronique doit être sélectionnée de manière à produire les impulsions de courant nécessaires. Ces impulsions doivent être établies de manière rapide. Dans de

nombreuses applications, par exemple dans le secteur de la robotique, les profils de mouvement imposent de fortes accélérations. Dans ce cas, le couple impulsionnel nécessite des pointes de courant transitoire typiquement de l'ordre de 3 à 8 fois le courant nominal, qui sont appliquées dans l'axe q, pour générer le couple. L'alimentation électronique est alors sélectionnée sur la base de ces valeurs impulsionnelles de courant et non pas uniquement par rapport au courant nominal du moteur applicable en régime permanent. Dans ces applications, les pulses de courant nécessaires dans l'axe d, afin de régler le niveau de magnétisation, ne conduisent donc pas à un surdimensionnement préjudiciable et trop onéreux de l'alimentation électronique.

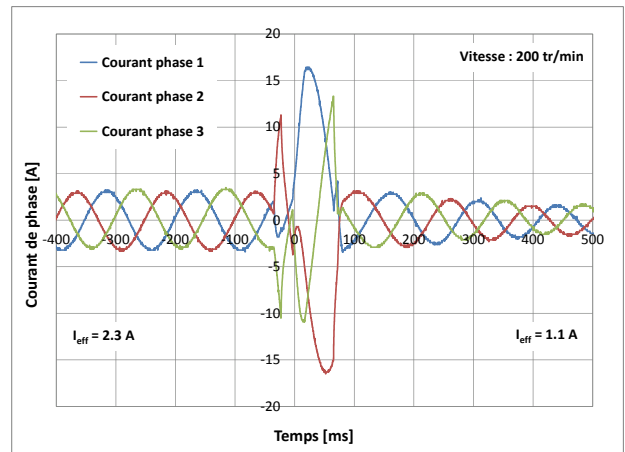


Fig.14 Régime transitoire des courants de phase mesuré lors d'une impulsion de courant augmentant le flux d'excitation

4.5. Couple

Le graphique de la Fig.15 montre la caractéristique du couple en fonction du courant pour différents niveaux du flux d'excitation. Hors saturation magnétique, le couple T est proportionnel au courant I, ce qui permet de définir la constante de couple K_T telle que :

$$T = K_T \cdot I \tag{6}$$

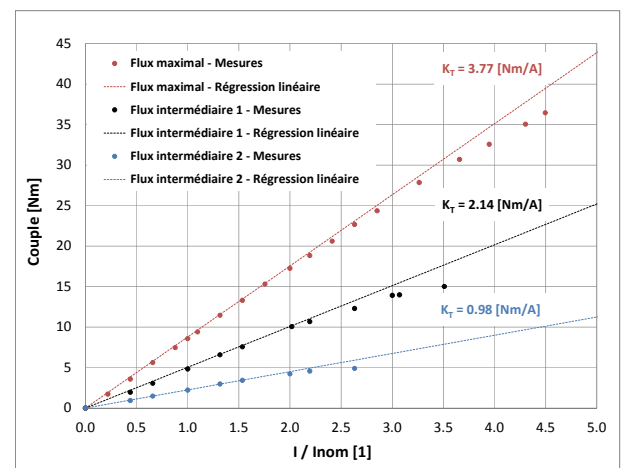


Fig.15 Couple mesuré en fonction du courant pour différents niveaux de magnétisation

Le contrôle du niveau de magnétisation des aimants permet de régler la constante de couple K_T qui est directement liée à la constante de tension induite K_u . Pour le prototype réalisé, 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. Il est donc possible d'appliquer un couple impulsif élevé pendant les phases d'accélération ou de décélération sans perturber le niveau de magnétisation des aimants AlNiCo.

4.6. Comportement à flux maximum

Pour les faibles vitesses de fonctionnement, il est judicieux de magnétiser les aimants de manière à produire le flux d'excitation maximum (Fig.3c), ce qui permet de réduire le courant nécessaire pour produire le couple. La Fig.16 présente la caractéristique couple-vitesse mesurée pour différentes tensions d'alimentation au niveau du bus DC de l'onduleur. La Fig.17 présente les rendements mesurés correspondants. Tous les points de fonctionnement sont relevés à courant nominal. Le courant est appliqué entièrement dans l'axe q. Il s'agit d'une commande à couple optimal sans affaiblissement du champ.

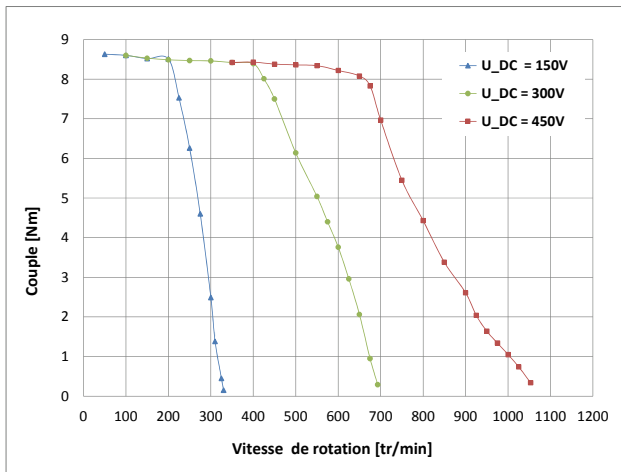
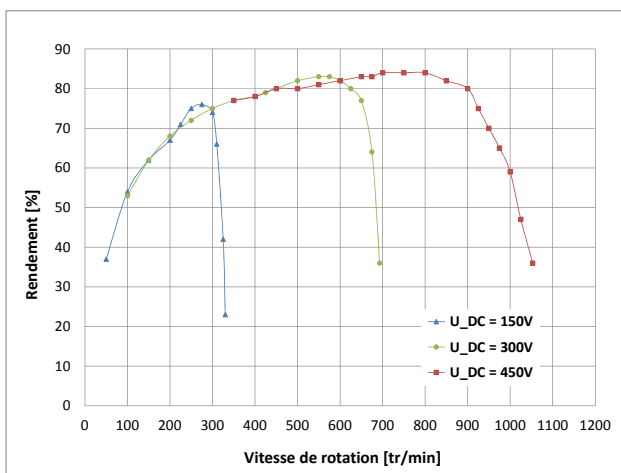


Fig.16 Caractéristiques "couple-vitesse" mesurées à flux maximum pour différentes tensions d'alimentation



Le contrôle du niveau de magnétisation des aimants, avec des impulsions de courant, est bénéfique pour augmenter la vitesse. Hors impulsions du courant dans l'axe d, tout le courant est disponible dans l'axe q pour générer le couple, ce qui permet de garder un rendement satisfaisant sur une large plage de vitesse.

La Fig.20 montre une comparaison de la caractéristique couple-vitesse pour trois types de fonctionnement. Tous les points de mesure sont relevés à courant statorique nominal.

- Cas 1 : le rotor est magnétisé préalablement de manière à produire un flux d'excitation maximum, selon la Fig.3c. Le moteur est alimenté en maintenant les courants en phase avec les tensions induites de mouvement ($i_d = 0, i_q = I$). Il s'agit de la commande à couple optimal.
- Cas 2 : le rotor est également magnétisé préalablement de manière à produire un flux d'excitation maximum, selon la Fig.3c. Pour les hautes vitesses, un défluxage standard est appliqué. Une partie du courant est alors générée dans l'axe direct, afin de produire un flux en sens opposé à celui des aimants, pour élargir la plage de vitesse. L'amplitude du courant appliqué dans l'axe d, inférieure à environ 50% du courant nominal, ne modifie pas la magnétisation des aimants AlNiCo. La zone de défluxage impose la présence d'un courant en permanence dans l'axe direct.
- Dans le cas 3, pour les basses vitesses seulement, le rotor est magnétisé de manière à produire un flux d'excitation maximum. Afin d'augmenter la vitesse, le niveau de magnétisation des aimants est modifié par de courtes impulsions de courant dans le but de réduire le flux d'excitation. Hors impulsion, les courants sont en phase avec les tensions induites de mouvement ($i_d = 0$ et $i_q = I$). La courbe correspond à l'enveloppe externe relevée sur le graphique de la Fig.18.

La Fig.20 montre que le contrôle du niveau de magnétisation des aimants permet d'atteindre une vitesse supérieure à celle obtenue avec la méthode de défluxage standard appliquée à ce rotor. La vitesse maximale est augmentée ici d'environ 20%. De plus, dans toute la zone avec affaiblissement du flux, il est possible d'obtenir un couple supérieur. Ceci est dû au fait qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer une composante de courant i_d en permanence durant le défluxage et que la totalité du courant, hors pulses, peut être appliquée dans l'axe q.

La Fig.21 présente les rendements mesurés correspondants aux points de fonctionnement de la Fig.20. Le contrôle de la magnétisation des aimants permet d'élargir la plage couple-vitesse disponible et conduit à de meilleurs rendements dans la zone à haute vitesse. Pour des raisons pratiques, les essais ont été réalisés à une puissance relativement limitée, ce qui justifie les niveaux de rendement mesurés qui atteignent une valeur maximale voisine de 84%.

Les mesures réalisées avec le prototype montrent que pour le fonctionnement avec un défluxage standard, le rendement chute en-dessous de 50% au-delà de 1550 tr/min. Avec le contrôle de la magnétisation des aimants, le rendement reste supérieur à 50% jusqu'à environ 1950 tr/min.

La Fig.22 et la Fig.23 présentent des mesures similaires effectuées avec une tension d'alimentation réduite et limitée à $U_{DC} = 150$ V. L'intérêt du contrôle de la magnétisation est significatif. La vitesse maximale est environ triplée par rapport au cas sans défluxage. Elle est augmentée d'environ 75% par rapport au cas d'un défluxage standard appliqué à ce prototype. Pour les hautes vitesses, le rendement est amélioré de manière appréciable.

Au niveau de la fiabilité, on peut noter que dans le cas d'un moteur synchrone à aimants traditionnel, en cas de défaillance du convertisseur à haute vitesse, lors du défluxage, le moteur génère une surtension potentiellement dommageable car le flux des aimants n'est pas réduit. Ce risque disparaît avec le « memory motor » puisque le flux généré par les aimants dans le stator est préalablement abaissé pour augmenter la vitesse.

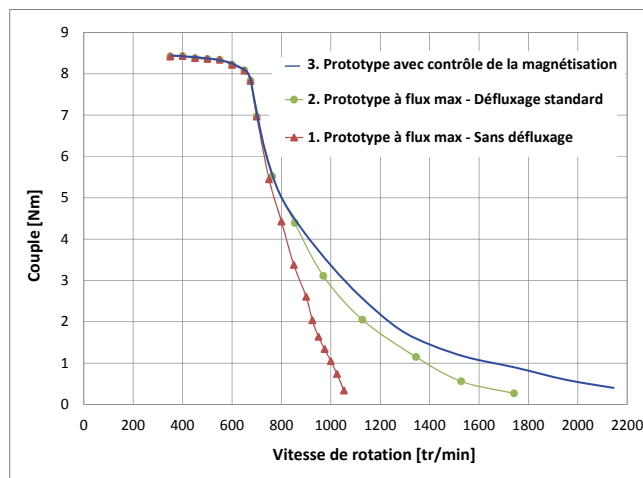


Fig.20 Comparaison des graphiques "couple-vitesse" dans le cas d'un défluxage standard et dans le cas d'un contrôle de la magnétisation des aimants AlNiCo ($U_{DC} = 450$ V)

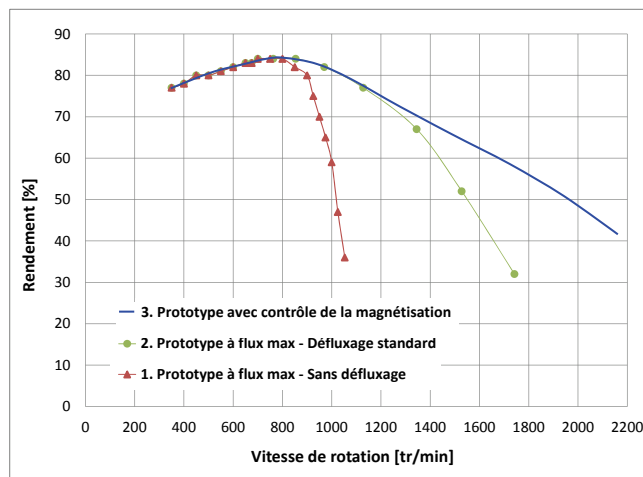


Fig.21 Rendement pour les points de fonctionnement mesurés dans le cas d'un défluxage standard et dans le cas d'une modification de la magnétisation des aimants AlNiCo ($U_{DC} = 450$ V)

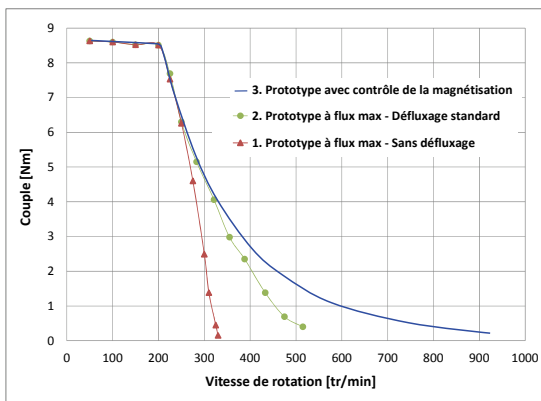


Fig.22 Comparaison des graphiques "couple-vitesse" dans le cas d'un défluxage standard et dans le cas d'un contrôle de la magnétisation des aimants AlNiCo ($U_{DC} = 150$ V)

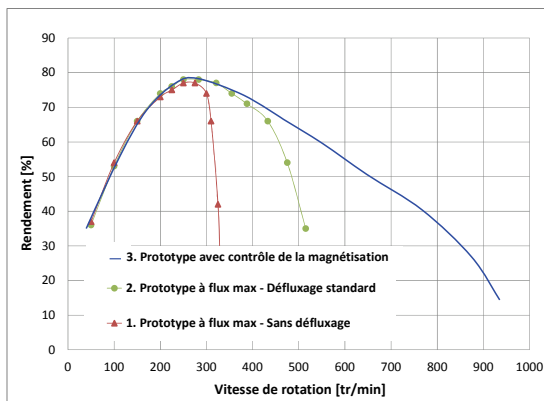


Fig.23 Rendement pour les points de fonctionnement mesurés dans le cas d'un défluxage standard et dans le cas d'une modification de la magnétisation des aimants AlNiCo ($U_{DC} = 150$ V)

5. CONCLUSIONS

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.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet, soutenu par le Réseau de Compétences lié aux Techniques Énergétiques 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).

7. REFERENCES

- [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, Vol.1, No.1, 2012.
- [2] V. Ostovic, « Memory Motors, A New Class of Controllable Flux PM Machines for a True Wide Speed Operation », Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE.
- [3] L. R. Herman, « The Roesel Generator – Constant Frequency with Variable Speed », IEEE PES Winter Meeting paper Nr. A 76 035-6, 1976.
- [4] A. Weschta, « Schwächung des Erregerfeldes bei einer dauer-magneterregten Synchronmaschine », ETZ Archiv, Band 7, Heft 3, 1985, pp. 79 – 84.
- [5] 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, ICEMS 2009.
- [6] C. Yiguang, P. Wei; W. Ying, T. Renyuan, W. Jing, « Interior Composite-Rotor Controllable-Flux PMSM-Memory Motor », Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2005.
- [7] S. Maekawa, K. Yuki, M. Matsushita, I. Nitta, Y. Hasegawa, T. Shiga, T. Hosoi, K. Nagai, H. Kubota, « Study of the magnetization method suitable for fractional-slot concentrated-winding variable magnetomotive force memory motor », Transactions On Power Electronics, IEEE 2013.
- [8] V. Ostovic, « Pole-Changing Permanent Magnet Machines », IEEE, Transactions On Industry Applications, Vol.38, No. 6, 2002.
- [9] K. Sakai, H. Hashimoto, « Permanent Magnet Motors to Change Poles and Machine Constants », ICEMS 2012.
- [10] K. Sakai, N. Yuzawa, « Effects of Pole Changing in a Permanent Magnet Motor », European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013.
- [11] T. Niizuma, K. Sakai, « Electronic Motors Capable of Pole-Changing and Variable Machine Constants », International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2012.
- [12] H. Liu, H. Lin, S. Fang, and Z. Q. Zhu, « Permanent magnet demagnetization Physics of a Variable Flux Memory Motor », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, no. 10, pp. 4736-4739, Oct. 2009.
- [13] H. Liu, H. Lin, Z. Q. Zhu, M. Huang, and P. Jin, « Permanent Magnet Remagnetizing Physics of a Variable Flux Memory Motor », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, no. 6, pp. 1679-1682, June 2010.
- [14] C.Yu, K.T. Chau, X. Liu, J.Z. Jiang, « A flux-mnemonic permanent magnet brushless motor for electric vehicles », Journal Of Applied Physics 103, January 2008.
- [15] C.Yu, K.T. Chau, J.Z. Jiang, « A Permanent-magnet Flux-mnemonic Integrated-starter-generator for Hybrid Electric Vehicles », IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, September 2008.
- [16] C.Yu, K.T. Chau, J.Z. Jiang, « A flux-mnemonic permanent magnet brushless machine for wind power generation », Journal of applied Physics 105, 2009.
- [17] F. Li, K.T. Chau, C. Liu, « Design of Dual Magnet Memory Machines », International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, 2011.
- [18] K. Sakai, H. Hashimoto, S. Kuramochi, « Principle and Basic Characteristics of Hybrid Variable-Magnetic-Force Motors », Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2011.
- [19] K. Sakai, N. Yuzawa, « Realizing High Efficiency using Pole-Changing Hybrid Permanent Magnet Motors », International European Electric Machines & Drives Conference, IEMDC, 2013.
- [20] H. Yang, H. Lin, J. Dong, J. Yan, Y. Huang, S. Fang, « Electromagnetic Analysis of a Novel Switched-Flux Memory Machine Employing a Parallelogram Hysteresis Model », 19th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG, 2013.
- [21] H. Yang, H. Lin, J. Dong, J. Yan, Y. Huang, S. Fang, « Analysis of a Novel Switched-Flux Memory Motor Employing Time-Divisional Magnetization Strategy », IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, No.2, February 2014.