



Les convertisseurs électromécaniques d'énergie : des systèmes mécatroniques

Bernard Multon, Jean-Yves Cognard, Hamid Ben Ahmed, Nicolas Bernard, Pierre-Emmanuel Cavarec, Olivier Gergaud, Corentin Kerzreho, Dominique Miller, Sylvie Turri

► **To cite this version:**

Bernard Multon, Jean-Yves Cognard, Hamid Ben Ahmed, Nicolas Bernard, Pierre-Emmanuel Cavarec, et al.. Les convertisseurs électromécaniques d'énergie : des systèmes mécatroniques. Mécanique and Industries / Mécanique et Industries, EDP Sciences, 2003, 4 (2003), pp.551-558. <hal-00674673>

HAL Id: hal-00674673

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674673>

Submitted on 28 Feb 2012

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.

Les convertisseurs électromécaniques d'énergie : des systèmes mécatroniques

B. MULTON⁽¹⁾, J.Y. COGNARD⁽²⁾, H. BEN AHMED⁽¹⁾, N. BERNARD⁽¹⁾, P.E. CAVAREC⁽¹⁾,
O. GERGAUD⁽¹⁾, C. KERZREHO⁽³⁾, D. MILLER⁽¹⁾, S. TURRI⁽¹⁾

⁽¹⁾Ecole Normale Supérieure de Cachan, département de Mécatronique, SATIE (UMR CNRS 8029), Campus de
Ker Lann, 35170 BRUZ, multon@bretagne.ens-cachan.fr

⁽²⁾Ecole Normale Supérieure de Cachan, département de Mécatronique, même adresse

⁽³⁾INSA de Rouen, Avenue de l'Université, BP 08, 76801 SAINT ETIENNE DU ROUVRAY Cedex

Résumé

Les actionneurs ou générateurs électriques modernes sont par essence des systèmes mécatroniques, ils sont en effet des objets fondamentalement mécaniques, ils exploitent des principes électromagnétiques pour la conversion d'énergie, de l'électronique de puissance pour son optimisation, des capteurs et de l'électronique de signal pour le contrôle. Après une synthèse du principe de conversion électromagnétique, deux exemples, issus de travaux de recherche effectués en collaboration entre électrotechniciens et mécaniciens, sont présentés. Ces dispositifs, utilisant des nouvelles structures de machines électriques, mettent en évidence l'imbrication forte de compétences nécessaires dès la conception initiale de l'objet pour en faire un produit performant et bien intégré.

Abstract

Modern electric actuators or generators are inherently mechatronic systems. They are mechanical things that exploit electromagnetic principles for energy conversion, power electronics for conversion optimization, sensors and control electronics. We present a synthesis of electromagnetic energy conversion, then we give two examples leading to of research works of electrical engineering and mechanical staffs. These examples are a flywheel energy storage accumulator and an electrical jack. Both are conceived of new electrical machines. They underscore strong interweaving necessary immediately from design step. This interweaving permits to conceive high performance, integrated and cost effective electromechanical products.

Mots-clés : Mécatronique ; Actionneurs ou générateurs électriques ; Conversion électromagnétique ; Conception

Keywords: Mechatronic; Electric actuators or generators ; Electromagnetic conversion; Design

1. Introduction

L'électricité représente une part en croissance continue de la consommation globale d'énergie et les moteurs électriques s'y taillent une part considérable. En France et plus généralement dans les pays industrialisés, les moteurs électriques consomment plus des deux tiers de l'énergie électrique industrielle. Bien que les machines électriques soient nées au 19^{ème} siècle, un effort de recherche permanent est mené pour améliorer les moteurs.

Sous le vocable « moteurs », on entend d'ailleurs plus largement les actionneurs et les générateurs, souvent les deux puisqu'ils sont, par nature, parfaitement réversibles.

De plus en plus fréquemment, notamment pour répondre à des besoins très spécifiques, les actionneurs-générateurs électriques doivent être parfaitement intégrés à la fonction globale à laquelle ils se destinent [1]. Cela nécessite une forte prise en compte des contraintes mécaniques, électroniques et automatiques, sachant que naturellement, un actionneur est déjà, en soi, un système électromagnétique, mécanique, électronique, contenant de plus en plus souvent des capteurs intégrés. Le convertisseur électromécanique d'énergie moderne est donc inévitablement un

système mécatronique dont la conception peut encore bénéficier de nombreux degrés de liberté de créativité, notamment dans les structures électromagnétiques.

Cet article, à travers quelques exemples d'actionneurs spéciaux, illustre la problématique mécatronique de la conception, de la modélisation et de l'optimisation d'un convertisseur électromécanique d'énergie moderne. Mais avant de traiter deux exemples (accumulateur inertiel d'énergie, vérin électrique polyentrefer) les grands principes de la conversion électromécanique dans les actionneurs magnétiques sont présentés rapidement.

2. Principe des convertisseurs électromécanique d'énergie

2.1. Convertisseurs électromécaniques, entraînements directs et intégration à la fonction

Hormis les dispositifs électroactifs (piézoélectriques et magnétostrictifs), les actionneurs sont habituellement classés en machines à courant continu à collecteur, machines synchrones (rotor bobiné, aimants permanents, réluctance variable), machines asynchrones et moteurs pas à pas. Mais cette classification simplifiée est tout à fait insuffisante lorsque l'on examine les solutions

modernes d'entraînements électriques, en particulier celles à alimentation électronique [2]. D'une part, aujourd'hui, toute machine qui doit convertir efficacement l'énergie, c'est-à-dire avec un rendement maximal du process global et avec une grande finesse du contrôle, est associée à un

convertisseur électronique de puissance lui-même contrôlé par un dispositif de commande recevant les informations utiles de capteurs (courants, position, vitesse...), c'est ce que montre schématiquement la figure 1.

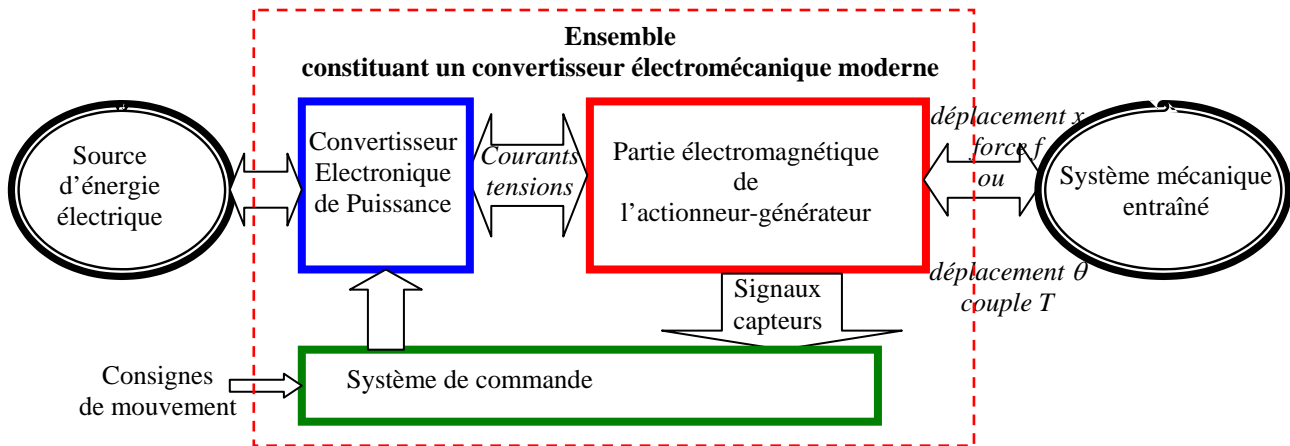


Fig. 1. Architecture générale d'un convertisseur électromécanique d'énergie

Après les années de règne des moteurs à courant continu (à collecteur mécanique) et des moteurs pas à pas dans les petites puissances, les moteurs sans balais (brushless) se sont progressivement imposés grâce aux progrès de l'électronique de puissance et des moyens de contrôle, notamment des systèmes numériques microprogrammables. La famille des actionneurs dits sans balais regroupe quasiment tous les types de machines mais l'alimentation de leur bobinages de puissance est contrôlée par un convertisseur électronique qui, dans les situations les plus exigeantes, régule finement les courants, en fonction de la position relative des parties fixes et mobiles, pour obtenir la force (actionneur linéaire) ou le couple (dispositifs tournants) souhaité par la commande pour obtenir le mouvement désiré (déplacement linéaire, angulaire ou toute autre combinaison avec les actionneurs à plusieurs degrés de liberté). La réversibilité totale permet un contrôle parfaitement symétrique avec la possibilité de freiner le système mécanique entraîné tout en renvoyant de l'énergie électrique à la source d'alimentation.

Une grande tendance, née avec les premières machines électriques mais de plus en plus marquée, consiste à toujours simplifier la chaîne de conversion mécanique qui permet d'aller de l'actionneur proprement dit jusqu'au système entraîné. On parle d'entraînement direct (« direct drive » en anglais) lorsque l'actionneur est directement couplé à la mécanique entraînée [3].

Très souvent, la charge mécanique est encore entraînée via une transmission mécanique plus ou moins complexe : réducteurs, accouplements,... La transmission a alors pour rôle d'adapter la charge au moteur, ce qui permet notamment d'utiliser des

moteurs tournants standards. La transmission mécanique permet également, dans nombre de situations, de déplacer le moteur à un endroit où l'on dispose de plus d'espace. Mais dans un nombre croissant d'applications, pour diverses raisons, on souhaite transmettre directement les efforts à la charge mécanique. Les actionneurs nécessaires sont alors conçus selon des critères particuliers, pour **s'intégrer** au mieux au système, produire des **couples élevés à basse vitesse**, travailler à des **vitesse très élevées**, offrir des **mouvements linéaires** ou encore améliorer les **performances dynamiques (grandes accélérations)**. Cette tendance à la simplification de la chaîne de transmission, aussi utilisée pour les transmissions hydrauliques [4], va dans le sens de l'amélioration de la fiabilité par la réduction du nombre de maillons de cette chaîne mais les contraintes de coût, toujours primordiales, limitent souvent la pénétration de ces techniques [5].

Quelques exemples d'entraînements directs [3] préciseront mieux les difficultés :

- moteurs linéaires en traction ferroviaires (sur roues ou sustentation magnétique),
- moteurs intégrés dans les roues (tramway, bus électrique à plancher bas, automobiles électriques...),
- générateurs entraînés par turbines à grande vitesse (aéronautique, marine, centrales stationnaires...),
- générateurs entraînés par turbines très lentes (hydrauliques, éoliennes),
- machines outils : moteurs linéaires, broches UGV,...

D'une façon générale, dans un entraînement direct, les contraintes sur l'actionneur sont sévères (très grande densité d'effort ou, à l'opposé, très

grande vitesse conduisant à des contraintes centrifuges extrêmes...). Quasi-systématiquement, ces applications requièrent des développements spécifiques de nouvelles structures électromagnétiques fortement intégrées au système mécanique entraîné et des capteurs associés.

C'est surtout dans ces situations que l'imbrication des secteurs disciplinaires de la mécanique, de l'électromagnétisme, de l'électronique de puissance, de la thermique, de l'instrumentation, du contrôle, etc., est nécessaire pour une bonne optimisation globale, car la recherche de hautes performances et l'intégration forte conduit à des couplages (de phénomènes physiques) plus forts.

2.2. Principes de conversion électromécanique des systèmes électromagnétiques

Synthétiser les principes fondamentaux de la conversion électromécanique d'énergie des systèmes électromagnétique nécessiterait un développement plus important, mais on peut donner une description macroscopique intéressante par la méthode des travaux virtuels appliqués à un dispositif élémentaire ne comportant qu'une source de champ magnétique (bobinage). La méthode des travaux virtuels [1 ; 6],

outre la vision large qu'elle offre pour la compréhension et la conception de tous les types de machines, conduit à la représentation sous forme de cycles de conversion analogues aux cycles thermodynamiques des machines thermiques ce qui tend à unifier les domaines de la conversion d'énergie mécanique.

Considérons un système magnétique élémentaire comprenant une partie fixe (par exemple stator) et une partie mobile (rotor). Le stator comprend un bobinage réalisant l'interface avec la source d'énergie électrique (en réalité, entre les deux, un convertisseur électronique de puissance est requis) et le rotor possède un unique degré de liberté en rotation caractérisé par l'angle θ . La figure 2 montre un tel exemple de système ainsi que les caractéristiques électromagnétiques associées : flux total embrassé ϕ par le bobinage en fonction du courant i (non linéarité due à la saturation magnétique des matériaux) et de la position angulaire θ .

Relativement au schéma simplifié de conversion de la figure 3, en négligeant notamment les pertes magnétiques (courants de Foucault et hystérésis magnétique) qui sont du deuxième ordre, on peut déterminer les équations fondamentales.

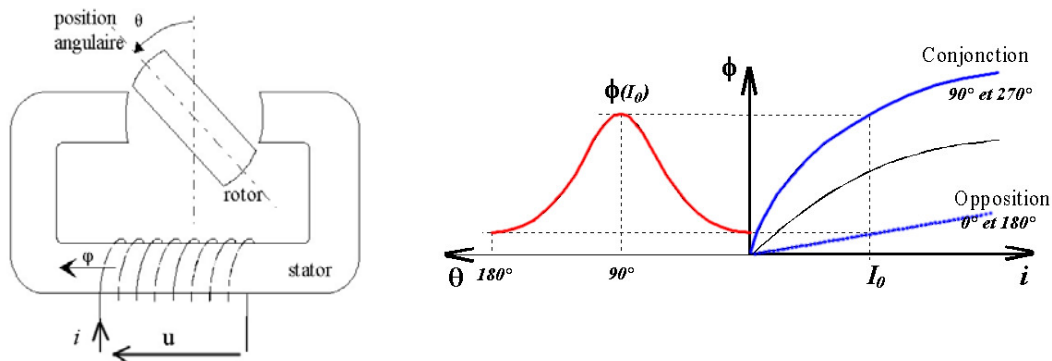


Fig. 2. Machine élémentaire (monophasée et à réluctance variable) et ses caractéristiques électromagnétiques fondamentales

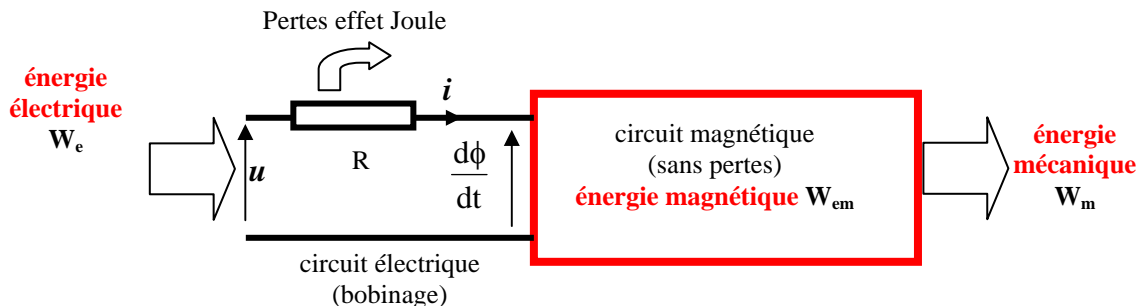


Fig. 3. Schéma de principe de conversion électromécanique d'énergie d'un dispositif élémentaire.

En application du principe des travaux virtuels, on obtient :

$$dW_e = R \cdot i^2 \cdot dt + i \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot dt = dW_J + dW_{em} + dW_m$$

où dW_e est la variation d'énergie électrique, dW_J la variation d'énergie dissipée par effet Joule, dW_{em} la variation d'énergie magnétique et dW_m la variation d'énergie mécanique.

On peut alors écrire :

$$R.i^2.dt + i.d\phi = dW_J + dW_{em} + dW_m$$

et donc identifier :

$$i.d\phi = dW_{em} + dW_m$$

pour un moteur tournant :

$$dW_m = t_{em}.d\theta$$

où t_{em} est le couple électromagnétique « instantané ».

En rotation, l'énergie magnétique

$$W_{em}(\phi_o, \theta) = \int_0^{\phi_o} i(\phi, \theta).d\phi \text{ est une fonction de deux}$$

variables, donc sa différentielle s'exprime par :

$$dW_{em}(\phi, \theta) = \frac{\partial W_{em}}{\partial \phi}.d\phi + \frac{\partial W_{em}}{\partial \theta}.d\theta$$

On obtient alors :

$$i.d\phi = \frac{\partial W_{em}}{\partial \phi}.d\phi + \frac{\partial W_{em}}{\partial \theta}.d\theta + t_{em}.d\theta$$

qui donne par identification :

$$i = \frac{\partial W_{em}(\phi, \theta)}{\partial \phi} \quad \text{et} \quad t_{em} = -\frac{\partial W_{em}(\phi, \theta)}{\partial \theta}$$

Parce que ce sont plutôt les courants que le flux qui sont imposés, on préfère souvent utiliser la notion de coénergie magnétique :

$$W'_{em}(i_o, \theta) = \int_0^{i_o} \phi(i, \theta).di \text{ . Alors, on obtiendrait :}$$

$$\phi = \frac{\partial W'_{em}(i, \theta)}{\partial i} \quad \text{et} \quad t_{em} = \frac{\partial W'_{em}(i, \theta)}{\partial \theta}$$

Pour des systèmes plus complexes (plusieurs bobinages de puissance ou phases, système d'excitation à aimants ou alimenté), on conserve des expressions du même type où l'énergie magnétique est une fonction de toutes les sources.

L'équation d'alimentation électrique qui couple généralement le convertisseur statique à la partie électromagnétique est :

$$u = R.i + \frac{d\phi(i, \theta)}{dt} = R.i + \frac{\partial \phi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}$$

En régime permanent (rotation continue par exemple), on peut mettre en évidence l'existence d'un cycle énergétique de conversion, tel que le montre la figure 4. Le raisonnement qui a servi à obtenir ces formes d'onde suppose que le courant d'alimentation est injecté en parfait synchronisme avec le déplacement relatif du rotor par rapport au stator, ce que l'on appelle un autopilotage. On remarquera, dans ce cas de machine extrêmement rudimentaire, que le couple instantané est très pulsatoire. Une machine polyphasée alimentée par des courants de forme optimisées pourrait avoir un couple très constant. Très souvent, les machines sont triphasées et alimentées par des courants de forme sinusoïdale en fonction de la position angulaire. Avec d'autres formes d'onde, le cycle serait resté compris entre les deux courbes extrêmes d'opposition et de conjonction. Le cycle en moteur tourne dans le sens trigonométrique, dans ce cas de forme de courant symétrique en générateur (par

rapport au mode moteur), on aurait obtenu exactement le même cycle mais décrit dans le sens contraire.

La valeur W de l'énergie convertie dépend de l'amplitude du courant et on montre très simplement que la valeur moyenne T_{em} du couple électromagnétique est proportionnelle à W .

Si on appelle p le nombre de paires de pôles magnétiques (ici avec 2 dents, on considère que ce moteur a deux paires de pôles), c'est-à-dire le nombre de périodes par tour, on obtient la relation :

$$T_{em} = \frac{P}{2.\pi}.W$$

Le couple mécanique T_{meca} disponible sur l'arbre moteur est égal au couple électromagnétique amputés des pertes magnétiques et des pertes mécaniques internes (paliers, frottements aérodynamiques...):

$$T_{meca} = T_{em} - T_{p_mag} - T_{p_meca}$$

Côté mécanique, en supposant un système élémentaire, linéaire, où t_{meca} est la composante instantanée du couple mécanique fourni par l'actionneur, T_0 est le couple de frottement sec équivalent, μ le coefficient de frottement visqueux équivalent et J le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes, ramené sur l'arbre de rotation :

$$T_{meca}(i, \theta) = T_0 + \mu \frac{d\theta}{dt} + J \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Cette analyse, extrêmement simplifiée, montre déjà, sans avoir explicité la complexité de la charge mécanique et les non linéarités du convertisseur statique et sans considérations sur les capteurs et la commande, toute la complexité d'un tel système.

2.3. Architectures mécaniques et limites d'effort magnétique et de puissance

Si on se limite aux actionneurs tournants, de façon simplifiée, on peut distinguer quatre familles comme le montre la figure 5. Cela conduit notamment à une première classification en structures à champ axial ou discoïdes et à champ radial ou cylindriques, ces dernières étant les plus courantes.

Le nombre de paires de pôles des circuits magnétiques (p) est un paramètre très important qui conditionne notamment la fréquence d'alimentation f , en effet sa relation avec le taux de rotation Ω de l'arbre est :

$$2 \Pi f = p.\Omega$$

La figure 6 montre l'effet de l'accroissement du nombre de pôles sur les proportions d'une structure cylindrique, la machine devient alors creuse et peut avantageusement entourer directement la charge entraînée. Dans le cas des architectures axiales, augmenter p permet d'avoir des machines extra-plates.

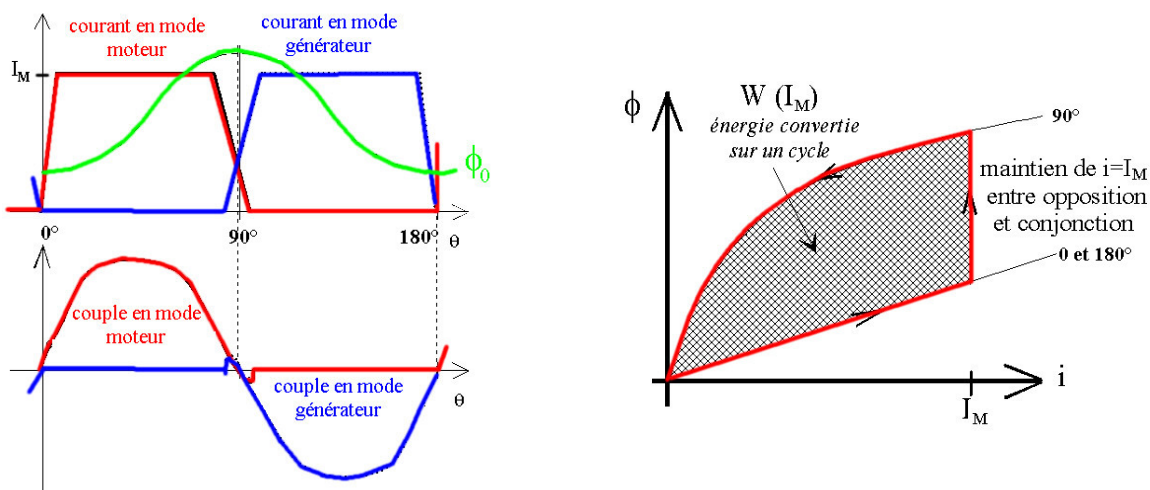


Fig. 4. Formes d'onde d'alimentation en moteur et en générateur et cycle énergétique de conversion (en moteur seulement)

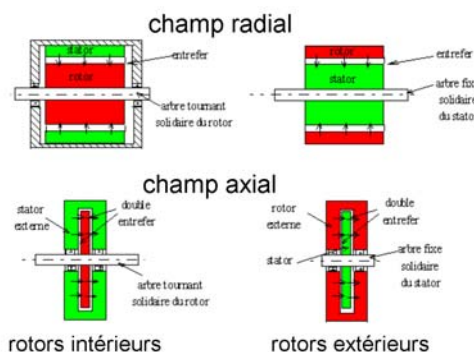


Fig. 5. Architectures d'actionneurs tournants

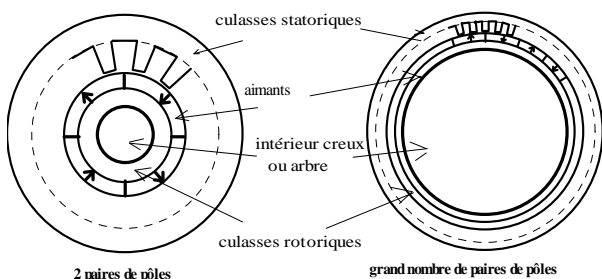


Fig. 6. Effet de l'accroissement du nombre de pôles dans une structure à champ radial.

On montre que la limite de l'effort électromagnétique d'un actionneur, qu'il soit tournant ou linéaire, est due à la pression magnétique tangentielle σ_T . Cette dernière est elle-même limitée par les échauffements et par les caractéristiques magnétiques des matériaux utilisés (ferromagnétiques et aimants éventuels). Les effets d'échelle et le mode de refroidissement influent bien sûr sur la valeur maximale de σ_T . On peut cependant retenir une plage de valeur comprise entre 0,1 et 10 N/cm² en allant des principes de conversion les moins efficaces vers les plus efficaces ainsi que vers

les plus grandes dimensions. Dans une machine tournante à structure cylindrique, si r et L sont respectivement le rayon et la longueur du cylindre rotorique, on obtient l'expression suivante du couple maximal :

$$T_{\max} = \sigma_{T \max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L$$

ce qui conduit à un couple volumique du rotor égal à $2 \cdot \sigma_{T \max}$. Et donc des valeurs comprises entre 1 et 100 N.m/m³.

Quant aux limites de puissance, elles dépendent essentiellement des capacités à se déplacer vite, donc à tourner vite pour les structures rotatives. La vitesse est limitée par les contraintes mécaniques (vitesses critiques et résistance du rotor) et par les pertes magnétiques (hautes fréquences) et aérodynamiques. Pratiquement, on peut, selon la robustesse des rotors, atteindre des vitesses comprises entre 200 et 300 m/s. On arrive ainsi à des densités de puissance de l'ordre de plusieurs kW/kg à des vitesses de rotation très élevées. Les valeurs maximales de vitesse faisables dépendent des dimensions et donc des puissances [3], à 200 m/s, on peut atteindre 300 000 tr/mn pour 1 kW et 20 000 tr/mn pour 1 MW.

3. Exemples de convertisseurs électromécaniques spéciaux

3.1. Accumulateur électromécanique d'énergie

Il s'agit, notamment pour remplacer des batteries électrochimiques au plomb dans des applications de production d'électricité photovoltaïque ou éolienne, de concevoir un accumulateur à très longue durée de vie (en particulier un grand nombre de cycles, plusieurs dizaines de milliers), facilement recyclable en fin de vie et compétitif sur le plan économique.

Nous avons étudié une structure fondée sur un

volant d'inertie en acier haute résistance (et ferromagnétique) entraîné par un moteur-générateur fortement intégré au volant. Les paliers magnétiques utilisent également une partie du volant. La figure 7 montre l'architecture générale d'un tel accumulateur.

Le moteur-générateur, dont le rôle est d'accélérer le volant pour emmagasiner de l'énergie et de le freiner pour la restituer, a été conçu pour répondre précisément à cette application [7]. Il est à architecture axiale, les parties tournantes sont massives, l'une fait partie intégrante du volant et ses bobinages d'excitation et d'induit sont fixes. La figure 8a montre le prototype du volant d'inertie et du rotor magnétique réalisés (il est sur roulements à billes et à pression atmosphérique). La figure 8b montre le bobinage du moteur-générateur avant mise

en place du volant et du rotor. Le principe du moteur-générateur est donné figure 8c [8].

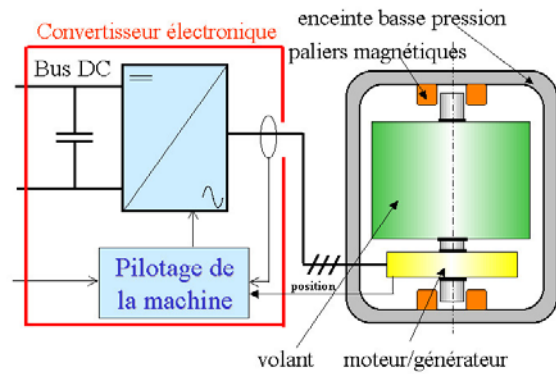


Fig. 7. Schéma des constituants accumulateur électromécanique à volant d'inertie cylindrique massif

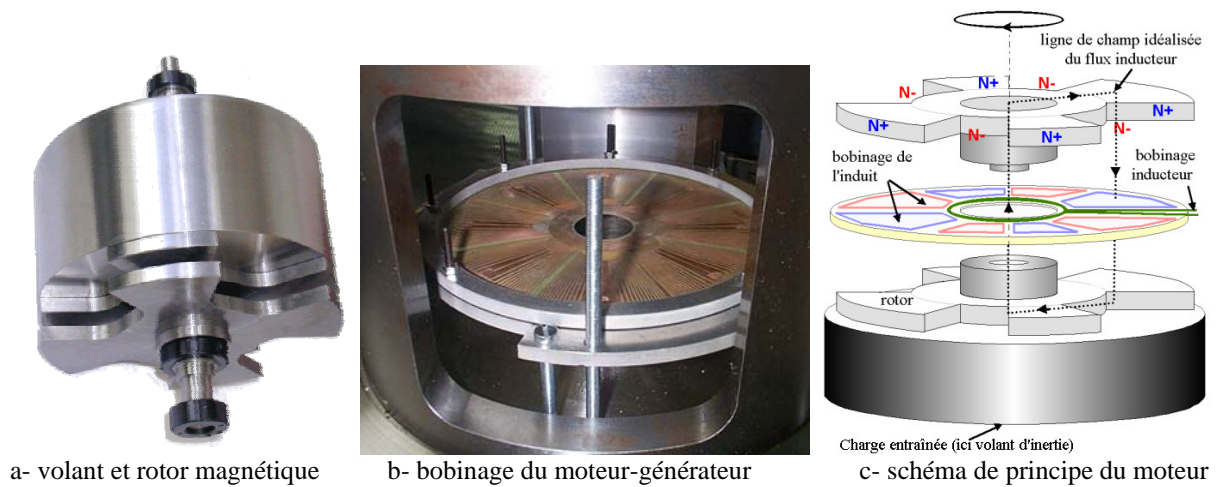
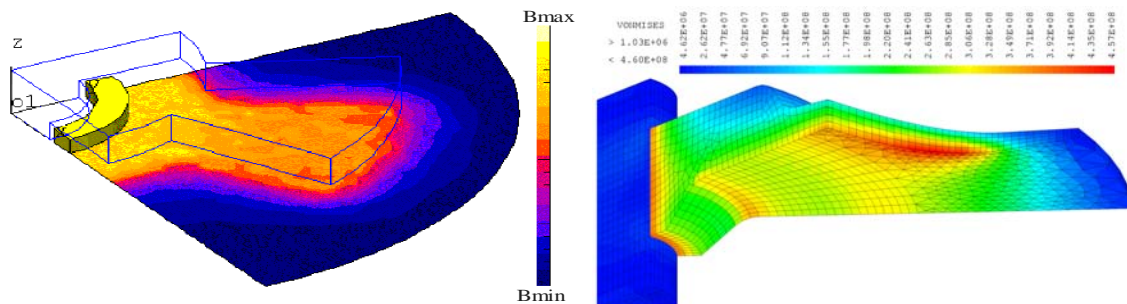


Figure 8. Volant d'inertie cylindrique massif et moteur-générateur



Modélisation magnétique 3D (Flux3D) pour le calcul du flux inducteur

Modélisation mécanique 3D (CASTEM 2000) pour le calcul des contraintes associées à la rotation

Fig. 9. Modélisations pour l'optimisation de la forme du circuit magnétique du rotor.

La partie, dont la conception a nécessité une prise en compte simultanée des aspects magnétiques et mécaniques, est le rotor du moteur-générateur. Des modélisations spécifiques ont été menées pour optimiser cet ensemble, comme le montre la figure 9.

Une étude quasi-systématique des performances technico-économiques des différents matériaux potentiellement utilisables dans le volant, a été menée et a conduit au choix d'un acier maragin pour des raisons d'avantages d'encombrement, de coût et

de recyclage. Le dimensionnement du volant a été optimisé en fatigue [9].

Les aspects contrôle sont également très importants [8], ils ont permis de concevoir une commande d'autopilotage avec un capteur de position élémentaire (une seule impulsion par tour), grâce au fait que le volant est très bien caractérisé mécaniquement et que les variations de vitesse sont celles demandées par la consigne. La consommation d'énergie d'un tel dispositif doit impérativement être très faible, c'est pourquoi les paramètres de

commande doivent être optimisés pour maximiser le rendement.

3.2. Vérin électrique polyentrefrer

Les vérins électriques, pour avoir des performances en densité d'effort, sont constitués d'un moteur tournant associé à un système mécanique de transformation de mouvement [10]. Quant aux actionneurs linéaires directs, ils ont d'excellentes performances dynamiques mais une densité d'effort encore loin de pouvoir rivaliser avec celle de systèmes pneumatiques et hydrauliques, actuellement, les meilleurs actionneurs linéaires ont une densité d'effort d'environ 300 N/dm^3 . C'est pour tenter d'obtenir un actionneur linéaire à densité très améliorée que nous travaillons dans une voie encore très peu explorée, celle des actionneurs polyentrefres à bobinages globaux. Compte tenu du fait que c'est la pression tangentielle qui est limitée, on peut, dans un volume actif donné, fractionner la zone d'interface (entrefer) entre les parties fixes et mobiles. La figure 10 présente une architecture originale multitiges [11]. Compte tenu du grand nombre de pièces et des précisions exigées, la structure mécanique est complexe (conception, hyperstaticité, fabrication). Les tiges cylindriques

permettent d'obtenir de meilleurs centrages et des guidages plus précis. Elles sont composées d'un empilement de rondelles alternativement ferromagnétiques et amagnétiques (acier et inox amagnétique) sur un axe amagnétique. Le stator comprend également un empilage de parties ferromagnétiques et d'aimants permanents entourés de bobinages solénoïdaux. Pour des raisons de faisabilité, nous avons limité à 8 le nombre de tiges du prototype réalisé, cela permet d'atteindre un effort volumique de 1000 N/dm^3 , soit déjà 3 fois mieux que les actionneurs actuels. L'un des objectifs, pour accroître encore les performances, serait de réaliser un fractionnement beaucoup plus important, donc avec un nombre de tiges beaucoup plus élevé mais cela conduirait à des difficultés mécaniques importantes. C'est pourquoi, bien que la prise en compte de ces difficultés ait déjà été prise en compte lors de la conception de ce prototype, il est nécessaire de réaliser une étude avec prise en compte beaucoup plus fine des aspects mécatroniques. Les guidages mécaniques représentent ici un des points clés, en effet, les tiges sont également soumises à des efforts magnétiques parasites (composantes normales) qui se traduisent par des pertes mécaniques qui peuvent rapidement être significatives.

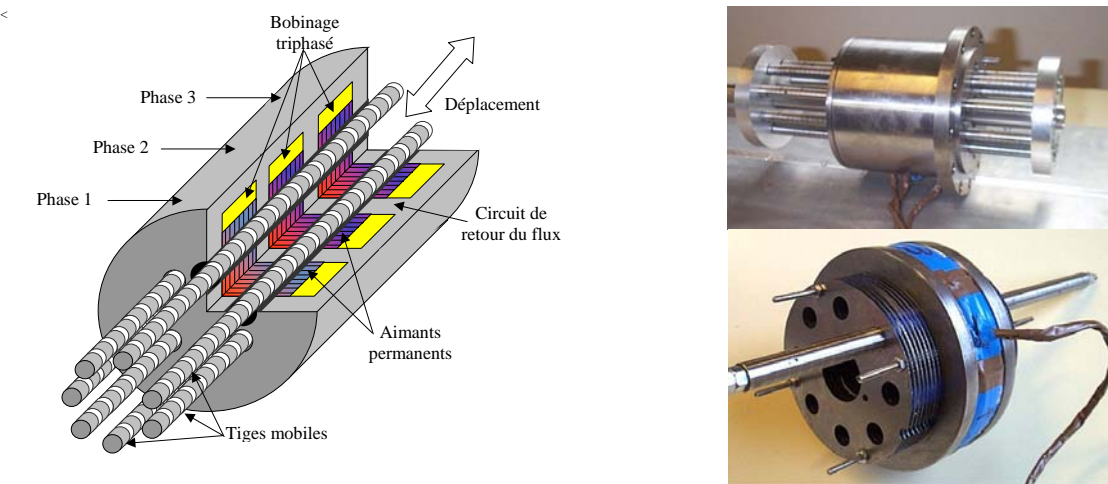


Schéma de principe

Photographies

Fig. 10. Architecture multi-tiges d'un actionneur linéaire polyentrefres

<p>Structure d'un des trois capteurs (une des tiges de l'actionneur traverse son circuit magnétique)</p>	<p>Résultat de calcul de champ par éléments finis dans la position d'inductance maximale</p>	<p>Photographie des éléments composant le capteur</p>

Fig. 11. Capteur de position pour l'autopilotage de l'actionneur

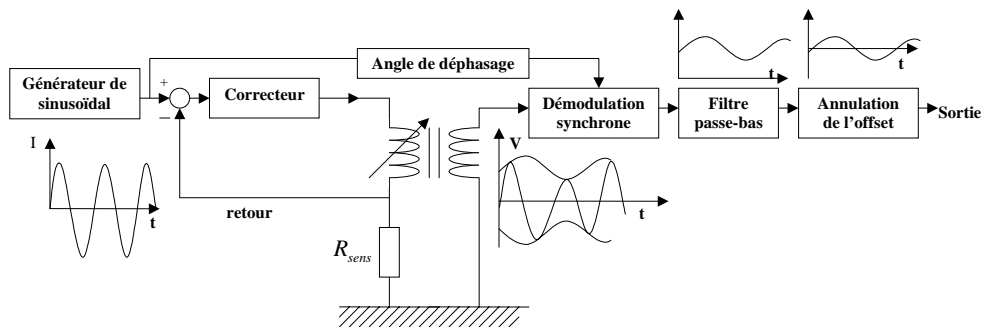


Fig. 12. Principe de l'électronique de conditionnement et de démodulation pour un seul capteur.

Comme tous les autres actionneurs, celui-ci nécessite un autopilotage. Les capteurs de position relative de l'ensemble des tiges par rapport au stator ont été intégrés à la structure, à la fois structurellement et technologiquement, ce qui permet, outre un gain d'encombrement, un fonctionnement dans les ambiances autorisées par les matériaux de l'actionneur [12]. La figure 11 montre la structure électromagnétique d'un des 3 capteurs nécessaires à l'autopilotage des 3 phases et la figure 12 donne un schéma se principe de l'électronique qui permet d'en extraire un signal de position. Cet exemple, sans pourtant avoir considéré l'alimentation électronique et le contrôle des courants, montre bien l'imbrication de compétences nécessaire à la conception d'un tel actionneur.

4. Conclusion

L'imbrication de la mécanique, de l'électrotechnique, de l'électronique et de l'automatique est de plus en plus souvent nécessaires pour réaliser des fonctions performantes et optimales sur les plans techniques et économiques. Les actionneurs ou générateurs électriques modernes sont hautement concernés par cette imbrication, cela leur permet d'être beaucoup mieux intégrés à la fonction globale à laquelle ils doivent contribuer. Les compétences mises en jeu lors de la conception puis de l'optimisation de ces objets nécessitent d'étroites collaborations entre mécaniciens et électrotechniciens. Cet article avait notamment pour objet de faire comprendre à des lecteurs plutôt mécaniciens les principes ainsi que le formalisme d'une vision globale de la conversion électromécanique d'énergie afin de les inciter à développer des collaborations avec les milieux électrotechniciens.

Références

- [1] M. Jufer « Électromécanique », Vol. 9 des « Traités d'Electricité », Presse polytechnique et universitaires Romandes, 1995.
- [2] P.E. Cavarec, H. Ben Ahmed, B. Multon, « Actionneurs électromagnétiques : Classification topologique et performances comparées », Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3412, à paraître 2003.
- [3] B. Multon, J. Bonal, « Les entraînements électromécaniques directs : diversité, contraintes et solutions », Revue REE n°10, 1999, pp.67-80.
- [4] M. Martin, « Transmissions hydrostatiques et organes de transmissions », Techniques de l'Ingénieur, B5 610, BM 6030, 1999.
- [5] J. Bonal, « Entraînements à vitesse variable » Tome 1 rappels d'électrotechnique de mécanique », les procédés de variation de vitesse, Lavoisier Tech. Doc, 1997.
- [6] B. Nogarede « Machines tournantes : conversion électromécanique de l'énergie », Techniques de l'Ingénieur, traités de Génie Electrique D3410, 2000.
- [7] H. Ben Ahmed, B. Multon, J. Delamare, C. Kerzrého, J.Y. Cognard, N. Bernard, « Moteur/générateur discoïde à réluctance excitée et à bobinage dans l'entrefer », Brevet Français N°99 15494 (déposant CNRS), 1999.
- [8] N. Bernard, H. Ben Ahmed, B. Multon, « Commande en boucle ouverte de position d'un moteur synchrone pour accumulateur électromécanique d'énergie », Revue Internat. De Génie Electrique, Vol. 5, n°1, pp. 9-22, 2002.
- [9] C. Kerzreho., J.Y.Cognard, «Design process and optimisation of an integrated electromechanical battery », Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Eds. P. Chenmail - G. Cognet - C. Fortin - C. Mascle - J. Pegna, Kluwer publishers, 2002.
- [10] H. Ben Ahmed, L. Prévond, B. Multon, B. Salamand, J. Lucidarme, « Special Synchronous Linear Actuators. Structures and Performances. », Electromotion Revue, 5, pp. 93-101, 1998.
- [11] H. Ben Ahmed, B. Multon, P.E. Cavarec, M. Antunes-Menoita, « Actionneur ou générateur linéaire à tiges », Brevet Français N°02 08194 (déposant CNRS), 2002.
- [12] P.E. Cavarec, H. Ben Ahmed, B. Multon, « Integrated reluctance position sensor for the self commutation of a hybrid linear electric actuator », European Power Electronics Conferences, CDR0M, 2001.

Nom du document : AUM_mécatronique2002_final.doc
Répertoire : C:\Documents and Settings\multon\Mes
documents\Archives_Articles_1992-2011\artic2002\AUM_INSA_sept02
Modèle : C:\Documents and Settings\multon\Application
Data\Microsoft\Modèles\Normal.dot
Titre : Les convertisseurs électromécaniques d'énergie : des systèmes
mécatroniques
Sujet :
Auteur : bm
Mots clés :
Commentaires :
Date de création : 04/11/2002 7:39
N° de révision : 12
Dernier enregistr. le : 26/02/2012 8:21
Dernier enregistrement par : Bernard Multon
Temps total d'édition : 251 Minutes
Dernière impression sur : 26/02/2012 8:21
Tel qu'à la dernière impression
Nombre de pages : 8
Nombre de mots : 4 224 (approx.)
Nombre de caractères : 23 233 (approx.)