

COMMANDE DE LA MACHINE SYNCHRONES A RELUCTANCE VARIABLE

NGUYEN Duc-Quan
Mél: duc-quan.nguyen@univ-nantes.fr

Résumé : Cet article présente nos travaux portant sur la commande de la machine synchrone à réluctance variable (MSRV). Après avoir modélisé la machine et identifié ses paramètres on a choisi une stratégie de commande variable donnant le maximum de couple à la machine en fonction de sa vitesse. En basse vitesse et pendant l'accélération de la machine on utilise la méthode à couple maximum par ampère (MTPA maximum torque per ampere) et lorsque la vitesse augmente on exploite la méthode à couple maximum par unité de flux (MTPW maximum torque per Weber). Les résultats de simulation de cette commande sont très satisfaisants.

Mot clés : MSRV, saillance, commande, simulation.

1 Introduction

La machine synchrone à réluctance variable (MSRV) est constituée d'un stator avec un enroulement triphasé identique à celui d'une machine classique et d'un rotor massif saillant sans excitation. Son principe de fonctionnement repose sur la dissymétrie magnétique : lorsque le champ tournant produit par le stator est en rotation dans l'entrefer, le rotor va tourner sous l'effet de la force magnétique de façon à minimiser l'énergie de l'ensemble, ce qui correspond à une réluctance minimale [6, 7].

Cette machine présente plusieurs intérêts : elle est robuste grâce à son rotor massif sans conducteur. Elle n'a pas de pertes joules au rotor et elle est moins coûteuse que les machines classiques. De nos jours, la MSRV couvre une large gamme de puissance : de 750 W à 100 kW et de vitesse de 3000 tours/min à 48000 tours/min [2].

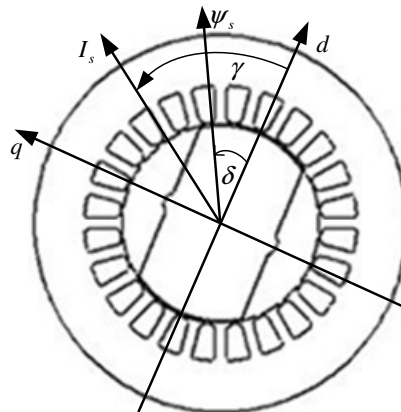


Fig 1 : Machine à réluctance variable à pans coupés

Cette machine se distingue par le rapport de saillance de son rotor L_d/L_q où L_d est l'inductance sur l'axe direct et L_q l'inductance sur l'axe en quadrature.

De l'équation du couple de cette machine à p-paires de pôles $\Gamma = \frac{3p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q$, on constate que le contrôle du couple revient à contrôler simultanément les courants i_d et i_q , donnant un degré de liberté supplémentaire par rapport à une machine synchrone classique où i_d est choisi égal à 0. Le choix de la stratégie du contrôle passera par la façon de choisir les références i_{dref} et i_{qref} [1].

Plusieurs stratégies existent et se différencient par le critère à optimiser (maximiser le couple, le rendement ou le facteur de puissance) et les performances exigées (maîtrise du couple à faible vitesse ou régimes transitoires,...).

- La commande vectorielle est utilisée pour avoir de bonnes performances de fonctionnement par exemple en gardant i_d constant et en contrôlant le couple à partir du courant en quadrature i_q . Des études sur la

réduction des ondulations de couple dues à la topologie du rotor ont donné de bons résultats en utilisant la technique d'injection de courants prédéfinis ou par l'estimation du couple résistant [2].

- La commande directe du couple DTC d'un moteur synchrone à réluctance variable est basée sur la détermination directe de la séquence de commandes appliquées aux interrupteurs d'un onduleur de tension. Cette stratégie est basée généralement sur l'utilisation de comparateurs à hystérésis dont le rôle est de contrôler les amplitudes du flux statorique et du couple électromagnétique. Cette méthode ne nécessite par la connaissance des inductances pour estimer le flux et le couple.
- D'autres commandes associant plusieurs techniques sont utilisées. Elles adaptent la méthode MTPA (Maximum Torque per Ampere) ou MTPW (Maximum Torque Per Weber). suivant les phases de fonctionnement : accélération, régime permanent, défluxage [3] .

Dans cet article, après la modélisation de la machine on présentera le principe de sa commande adaptable à son état de fonctionnement pour avoir toujours les meilleures performances, quelque soit sa vitesse.

2 Modélisation

Les équations de la machine synchrone à réluctance variable avec l'hypothèse d'une répartition sinusoïdale des enroulements (approximation au premier harmonique d'espace) sont les suivantes:

$$[V_{abc}] = R_s \cdot [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{abc}]$$

$$\text{avec } [\Psi_{abc}] = [L] \cdot [I_{abc}] \text{ et } [L] = \begin{bmatrix} L_a(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba}(\theta) & L_b(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_c(\theta) \end{bmatrix}$$

où R_s désigne la résistance stator, L_x l'inductance propre de la phase x et M_{xy} une mutuelle définies par :

$$\begin{cases} L_a(\theta) = L_0 + L_2 \cdot \cos(2\theta) \\ L_b(\theta) = L_0 + L_2 \cdot \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_c(\theta) = L_0 + L_2 \cdot \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \begin{cases} M_{bc}(\theta) = M_0 + M_2 \cdot \cos(2\theta) \\ M_{ac}(\theta) = M_0 + M_2 \cdot \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{ab}(\theta) = M_0 + M_2 \cdot \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{avec } \frac{M_0}{L_0} = -\frac{1}{2} \text{ et } \frac{M_2}{L_2} = 1$$

Si on projette toutes les grandeurs dans un repère d-q lié au rotor (Fig. 1) à l'aide de la transformation orthonormée de Park on arrive aux équations suivantes :

$$[V_{dqh}] = R_s [I_{dqh}] + \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_h \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} [I_{dqh}] + p\Omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [I_{dqh}] \quad \text{avec } \begin{cases} L_d = \frac{3}{2}(L_0 + L_2) \\ L_q = \frac{3}{2}(L_0 - L_2) \end{cases}$$

$$\Gamma = \frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_d i_q$$

3 Principes de commande en couple [3]

La commande vectorielle utilisée dans cet article utilise la commande à maximum de couple par ampère (MTPA) à vitesse basse (pendant la période d'accélération) et la commande par défluxage (MTPW) à hautes vitesses. On aura une limitation du courant et de la tension à cause de la variation de la vitesse. Afin d'assurer un couple maximum on cherchera les valeurs optimales à donner aux courants i_{dref} et i_{qref} , en fonction de la vitesse de la machine. En effet, il faut respecter la limitation des courants tout en tenant compte de la saturation en tension :

$$\|is\| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq i_{max} \quad \text{et} \quad \|U_s\| \sim \|\Psi_s\| |\omega| = |\omega| \cdot \sqrt{(L_d \cdot i_d)^2 + (L_q \cdot i_q)^2} \leq U_{max}$$

A basse vitesse (par exemple, $\omega_m = \omega_1$ sur la figure 2), l'aire exploitable (I+II) est suffisante pour assurer un fonctionnement satisfaisant avec un courant $\|is\|$ maximum. On utilise alors la méthode appelée « méthode à maximum de couple par ampère » (MPTA). Par contre à grande vitesse ($\omega_m = \omega_2$ sur la figure 2), l'aire (I) est plus restreinte d'où un couple moins important (Fig.2). Dans ce cas on cherchera à imposer un flux maximum

possible : $\|\Psi_s\|^2 |\omega|^2 \approx \|U_s\|^2 \rightarrow \|\Psi_s\|^2 \leq \frac{\|U_s\|^2}{|\omega|^2}$. Cette méthode est appelé méthode à maximum de couple par unité de flux (MTPW).

- Stratégie MTPA : les équations des courants et du couple assurant cette commande sont les suivantes

$$\begin{aligned} i_d &= \|i_s\| \cos(\gamma) \\ i_q &= \|i_s\| \sin(\gamma) \end{aligned} \rightarrow \Gamma = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q = \frac{3}{4} p (L_d - L_q) \|i_s\|^2 \sin(2\gamma)$$

On aura un couple maximum par ampère pour $\gamma = 45^\circ$, d'où les références des courants :

$$i_{dref} = \sqrt{\frac{2\Gamma_{ref}}{3p(L_d - L_q)}} \quad ; \quad i_{qref} = i_{dref} \cdot \text{sign}(\Gamma_{ref})$$

- Stratégie MTPW : dans le cas de cette stratégie est définie par les équations suivantes

$$\begin{aligned} \Psi_d &= \|\Psi_s\| \cos(\delta) \\ \Psi_q &= \|\Psi_s\| \sin(\delta) \end{aligned} \rightarrow \Gamma = \frac{3p(L_d - L_q)}{2 L_d \cdot L_q} \Psi_d \Psi_q = \frac{3p(L_d - L_q)}{4 L_d \cdot L_q} \|\Psi_s\|^2 \sin(2\delta)$$

On aura un couple maximum par Weber pour $\gamma = 45^\circ$, d'où les références des courants :

$$i_{dref} = \sqrt{\frac{2L_q\Gamma_{ref}}{3pL_d(L_d - L_q)}} \quad ; \quad i_{qref} = \frac{L_q}{L_d} \cdot i_{dref} \cdot \text{sign}(\Gamma_{ref})$$

Le schéma de commande utilisé est donné par le synoptique de la figure 3. Les boucles de courant utilisent un correcteur PI.

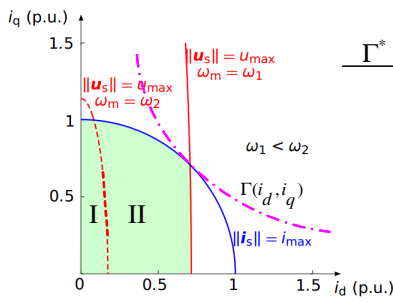


Fig. 2 Lieux de fonctionnement de la MSRV

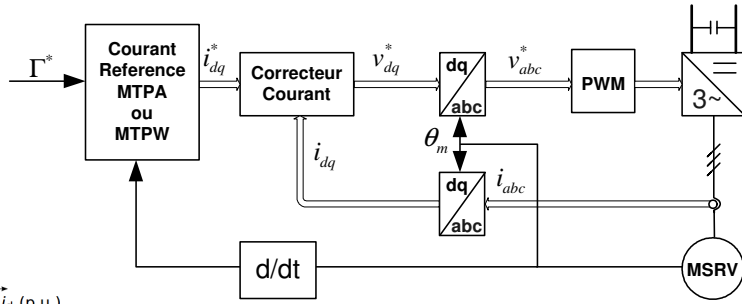


Fig. 3 Schéma de commande de la MSRV

4 Simulations

Dans les simulations présentées par les figures 4 à 6, nous avons utilisé les 2 stratégies pour le contrôle du couple avec le schéma de la figure 5. Les paramètres de la MSRV valent : $L_d = 0.0059$ H; $L_q = 0.0023$ H; $R_s = 0.039$ Ω ; $p = 1$, $f = 0.002$ N.m.s/rad et $J = 0.0052$ kg.m².

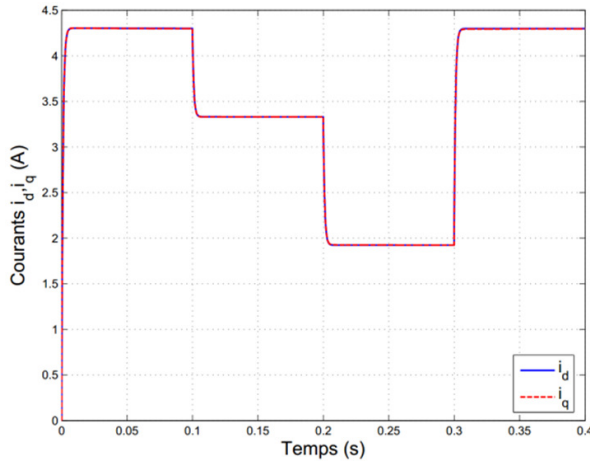


Fig. 4 Courants i_d et i_q avec la méthode MTPA

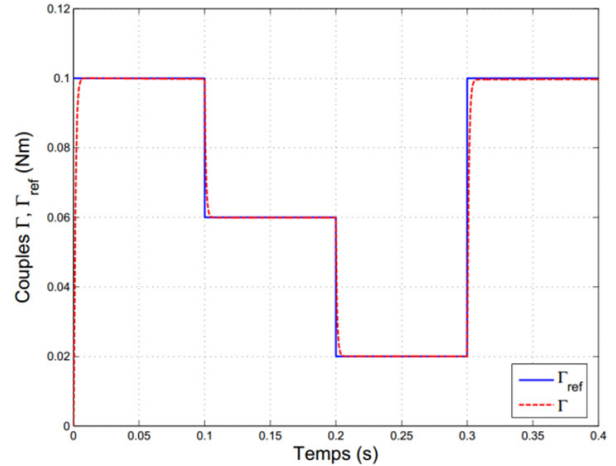


Fig. 5 Allure du couple avec la méthode MTPA

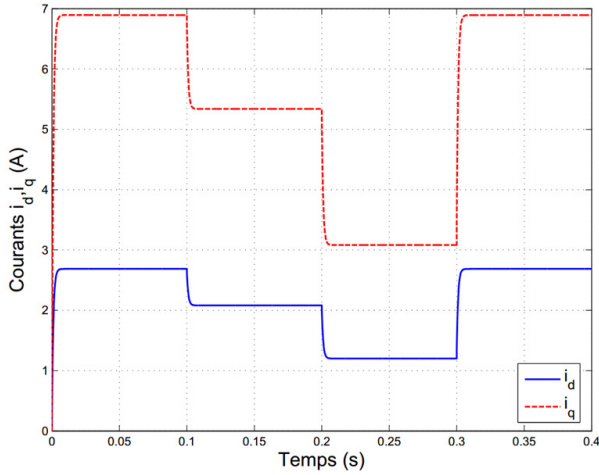


Fig. 6 Courants i_d et i_q avec la méthode MTPW

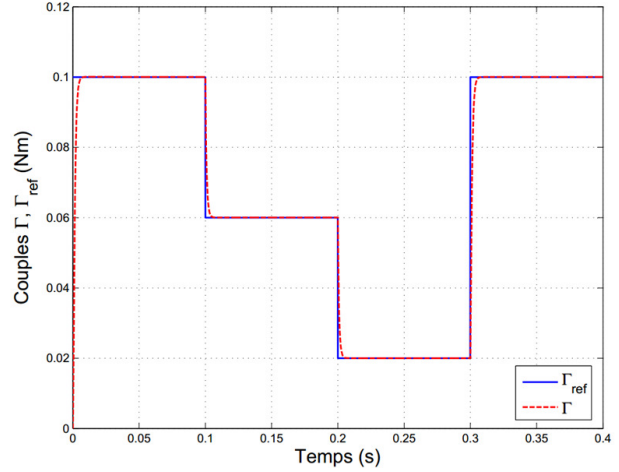


Fig. 7 Contrôle du couple par la méthode MTPW

On constate que le couple électromagnétique suit bien la référence avec les 2 stratégies (fig.5 et fig. 7). Les figures 4 et 6 donnent l'allure des courants i_d et i_q . Avec la méthode MTPA, on vérifie que $i_d = i_q$ et dans la méthode MTPW on a $i_q = \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d$ car la méthode impose $\Psi_d = \Psi_q$.

5 Conclusions

Les travaux entrepris dans cet article font partie d'une étude globale de la machine synchrone à réluctance variable qui sera utilisée dans des applications à grandes vitesses, sans capteur de position. Les résultats de simulation obtenus pour le contrôle du couple sont très satisfaisants. La prochaine étape de cette étude porte sur la mise en œuvre d'un banc expérimental et l'implantation en temps réel de la commande. Il s'agira ensuite de réaliser une estimation de la position du rotor pour pouvoir se passer du capteur mécanique.

Références

- [1] R.E. Betz, R. Lagerquist, M. Jovanovic, T.J.E. Miller, and R.H. Middleton. "Control of synchronous reluctance machines". IEEE Transactions in Industry Applications, Vol. 29, No. 6 :1110–1122, 1993.
- [2] M.O.Hamiti "Réduction des ondulations de couple d'une machine synchrone à réluctance variable" ; Thèse Université Henri Poincaré, Nancy-I 15 juin 2009.
- [3] Y.Inoue, S.Morimoto, M.Sanada 'A Novel Control scheme for Maximum Power Operationj of synchronous reluctance Motors Including Maximum Torque Per Flux Control' Electrical Machines and Systems. ICEMS 2009.
- [4] M.Hinkkanen "Control of synchronous reluctance machines";Aalto university, School of Electrical Engineering.
- [5] M.I.LAMGHARI-JAMAL "Modélisation magnéto-thermique et optimisation de machines rapides : Application `a la machine synchrone à réluctance variable" ; Thèse de DOCTORAT de l'Université de Nantes, IREENA, 25/10/2006.
- [6] F.Meibody Tabar. "Etude d'une machine synchrone à réluctance variable pour des applications à grande vitesse" ; Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1986.
- [7] G.Grellet, G.Clerc "Actionneurs électriques "Editions Eyrolles, 1977.
- [8] T.Raminosoa Optimisation des performances des machines synchro-reluctantes par réseaux de perméances", Thèse INP Lorraine, 01/10/2006.