

MEPT (Maximum Efficiency Point Tracking) pour une chaîne de traction d'un véhicule électrique

Emmanuel Hoang, Michel Lécrivain, Mohamed Gabsi
SATIE – ENS Cachan
hoang@satie.ens-cachan.fr

Résumé : Les pertes jouent un rôle primordial dans le cas des machines électriques associées à un onduleur de tension, dans le cas où elles sont utilisées dans une chaîne de traction de véhicule électrique ou hybride. En effet, il n'est pas rare de demander un couple transitoire valant plus de six fois le couple nominal, qui est parfois le couple thermique, et d'avoir des vitesses de rotation, elles aussi, six fois plus élevées que la vitesse nominale, ce qui entraîne des fonctionnements générant beaucoup de pertes. Dans le cas du fonctionnement du véhicule électrique, il n'est plus possible de parler de rendement [1]. Si la machine électrique est une machine synchrone à aimants permanents, il n'y a pas de possibilité de réglages minimisant les pertes pour un point de fonctionnement donné, car le courant dans l'axe en quadrature règle le couple et le courant dans l'axe direct sert pour le défluxage électronique. Dans le cas où la machine électrique est une machine synchrone à double excitation, le courant continu du circuit inducteur ajoute un degré de liberté. Ainsi l'ensemble des valeurs des courants permettant d'obtenir le point de fonctionnement n'est plus un point unique. Toute la problématique, maintenant, est de trouver les trois valeurs des courants minimisant les pertes totales pour un couple et une vitesse donnés, en temps réel, en prenant en compte l'impact de l'environnement thermique, dans un système complet. Après la présentation de la machine à double excitation utilisée (partie II), nous présenterons dans la partie III, une méthode permettant de trouver le triplet des valeurs des courants minimisant les pertes intrinsèques à la machine à couple et vitesse donnés. Et dans la partie IV, nous présentons la méthode pour obtenir en permanence les valeurs des courants minimisant l'ensemble des pertes de la chaîne de traction.

Mots clés : machine synchrone à double excitation, pertes sur cycle.

1 Introduction

Dans un véhicule électrique, la chaîne de traction est composée par l'association d'une batterie d'accumulateurs, d'un onduleur de tension et d'une machine électrique.

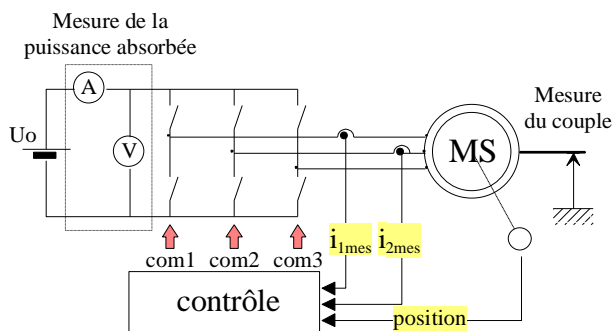


Fig. 1 : Ensemble de conversion d'énergie.

Les sollicitations (points de fonctionnement) sont très variées comme peut le montrer la figure 2 où est présenté un exemple de cycle de fonctionnement. Sur cette figure sont présentées, en fonction du temps, l'évolution de la vitesse, ici normalisée avec la vitesse moyenne et l'évolution du couple, ici normalisé par le couple efficace.

Dans notre étude, la machine électrique utilisée est une machine synchrone à commutation de flux à double excitation. Nous présenterons, dans la partie II, cette machine inventée en mai 2005 [2] et [3]. Cette machine a la particularité d'avoir deux inducteurs : un avec des aimants permanents et un avec un bobinage électrique.

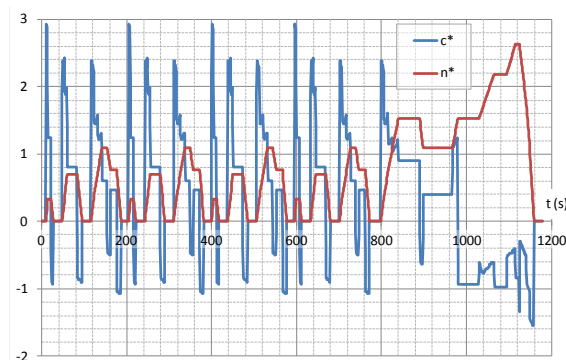


Fig. 2 : Evolutions du couple et de la vitesse pour un cycle de fonctionnement NEDC.

Contrairement à une machine synchrone à aimants permanents classique, pour obtenir un point de fonctionnement donné, il y a, dans notre cas, trois variables possibles, le courant dans l'axe en quadrature (I_q), le courant dans l'axe direct (I_d) et le courant d'excitation (I_e).

Une première difficulté est d'obtenir les valeurs des trois courants qui permettent d'obtenir le couple demandé à la vitesse souhaitée tout en minimisant les pertes. Dans la partie III, nous présenterons une méthode, pour répondre à cette problématique, prenant en compte les pertes intrinsèques à la machine électrique, à savoir les pertes cuivre et les pertes fer.

Dans le système complet, d'autres pertes apparaissent. Ce sont les pertes mécaniques et les pertes dans le convertisseur. De plus, dans un système réel, l'environnement thermique va modifier différemment les différentes sources de pertes. Nous proposons, dans cet article, une méthode permettant d'avoir en permanence les pertes totales minimales tout en assurant le point de fonctionnement en couple et en vitesse. Cette méthode est présentée dans la partie IV.

2 Machine Synchrones à commutation de flux double excitation

2.1 Présentation

Pour présenter le principe de fonctionnement de cette machine électrique, nous nous appuyons sur la description d'une cellule élémentaire comme indiqué à la Fig. 3.

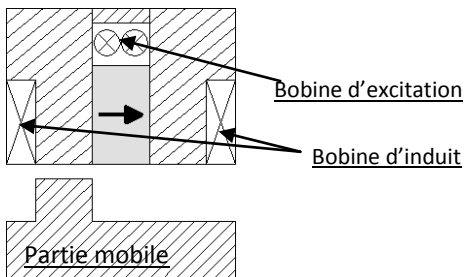


Fig.3: Présentation d'une cellule élémentaire.

Cette structure particulière utilise le principe de la commutation de flux, créé par le mouvement de la partie mobile. Elle garde l'avantage de la simplicité de réalisation du rotor, qui autorise des vitesses de rotation élevées. Il est à noter qu'une concentration de flux peut être aisément réalisée en agissant sur la forme des aimants (pièce rectangulaire grisée, sur la fig. 3, avec une flèche indiquant l'orientation de l'aimantation).

Dans ce type de machine électrique, les bobines d'induit et les bobines d'excitation sont situées sur la partie fixe. Cette particularité peut être, dans certaines applications, un avantage du point de vue électrique (simplicité de la connectique,

pas de système bague-balais) et un avantage du point de vue thermique (les pertes sont évacuées par conduction thermique).

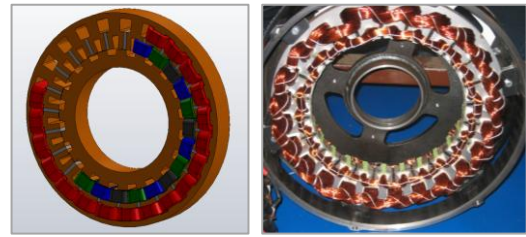
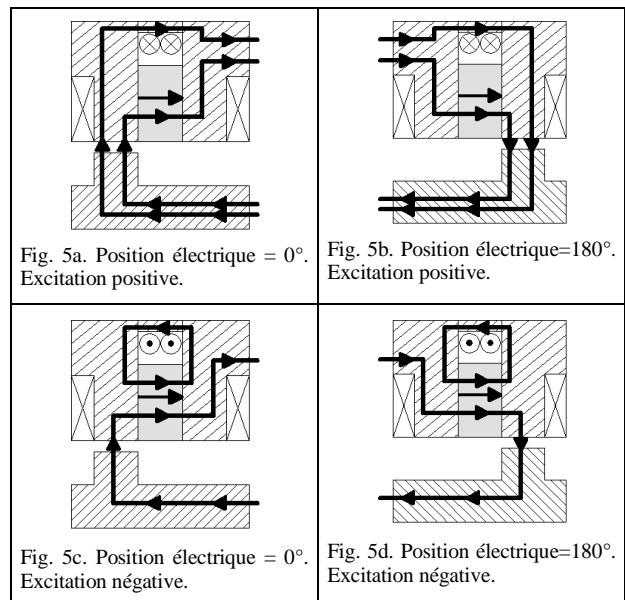


Fig.4: Présentation du prototype de mscfd 24-20.

Le prototype réalisé (cf. fig.4) par notre partenaire industriel Leroy-Somer, est une machine synchrone triphasée contenant 24 cellules élémentaires. Chaque phase d'induit est constituée par la mise en série de 8 bobines concentriques. Le rotor comporte 20 dents (ici $N_r = 20$). Comme dans une machine à commutation de flux, la relation entre la fréquence de rotation mécanique, notée F , et la fréquence électrique, notée f , est donnée par la relation : $f = N_r \cdot F$.

2.2 Principe du fonctionnement de l'excitation hybride

Comme dans une machine à commutation de flux, c'est la position de la partie mobile qui impose le passage du flux dans les bobines d'induit. La bobine d'excitation, alimentée par un courant DC, permet, elle, de moduler l'amplitude de ce flux, comme indiqué aux Fig. 5a à Fig. 5d.



A la Fig. 6, nous présentons les valeurs des amplitudes des flux, en fonction de la valeur de la densité du courant continu d'excitation. Ce prototype a fait l'objet de différentes études, ainsi, nous présentons les résultats pour deux

types d'aimants permanents, $N_e F_e B$ ($B_r = 1,1$ T) et ferrite ($B_r = 0,4$ T) et en l'absence d'aimants.

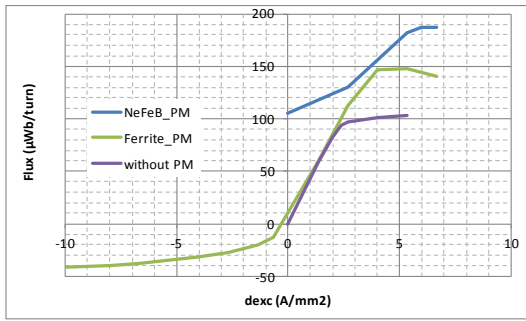


Fig.6: Amplitude des flux en fonction de la densité du courant d'excitation.

Ces valeurs numériques ne sont pas indiquées pour conclure sur la "meilleure" machine, mais pour illustrer le fait qu'au-delà de la recherche de performances, la qualité des AP permet des fonctionnalités différentes et qu'une phase d'optimisation est indispensable pour exploiter au mieux cette structure de machine associée à un certain type d'aimants.

Pour la suite de l'étude, nous utiliserons les données relatives à la machine avec des aimants permanents en ferrite.

2.3 Caractéristiques de couple

Pour illustrer l'intérêt de la double excitation, nous présentons deux caractéristiques de couple. Pour tracer ces caractéristiques, nous avons maintenu la composante du courant d'axe direct nulle. Nous pouvons voir sur la figure suivante (Fig. 7) que le circuit d'excitation permet d'obtenir des caractéristiques de couple différentes. Par exemple, pour une même valeur de couple, il y a deux couples de valeurs des courants (I_{exc} et I_q).

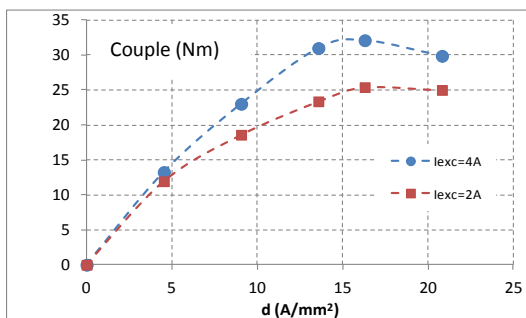


Fig.5: Valeurs expérimentales du couple en fonction de la densité de courant d'induit (axe q), pour deux valeurs du courant d'excitation.

3 Commande minimisant les pertes

3.1 Tables pour la modélisation

Pour la suite de notre étude, il est nécessaire de déterminer trois fonctions:

- Couple (I_d, I_q, I_{exc})
- Pertes cuivre (I_d, I_q, I_{exc})
- Pertes fer (I_d, I_q, I_{exc}) à $N=1$ tr/min

Pour la fonction "Couple (I_d, I_q, I_{exc})", nous utilisons un logiciel de calcul par éléments finis 2D [4], et les courants sont remplacés par leur densité de courant ($I_d \Rightarrow \delta_d; I_q \Rightarrow \delta_q; I_{exc} \Rightarrow \delta_{exc}$).

De plus, nous normalisons les densités de courant: δ_{exc} avec la densité de courant d'excitation qui donne la valeur du flux à vide maximale (voir Fig. 6), notée δ_{e_max} . Quant à la normalisation de δ_d et δ_q , nous utilisons la densité de courant de court-circuit maximale (déterminée avec δ_{e_max}).

A.N. : $\delta_{e_max} = 4$ A/mm²; $\delta_{cc} = 4,6$ A/mm².

Au final :

- $I_d \Rightarrow \delta_d \Rightarrow x_d$
- $I_q \Rightarrow \delta_q \Rightarrow x_q$
- $I_{exc} \Rightarrow \delta_{exc} \Rightarrow x_e$

Cette fonction "couple" est présentée, partiellement aux figures 7 et 8.

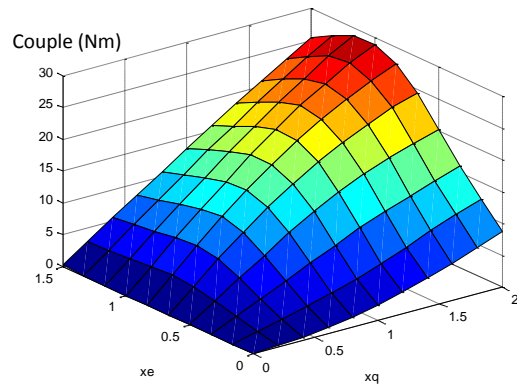


Fig.7: Valeurs du couple moyen en fonction de x_q et de x_e à $x_d=0$.

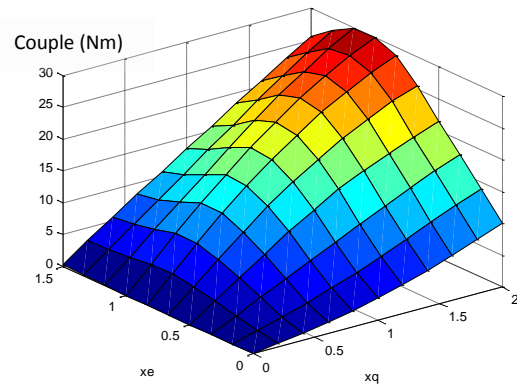


Fig.8: Valeurs du couple moyen en fonction de x_q et de x_e à $x_d=0,8$.

Peu d'éléments synthétiques et concrets peuvent être extraits de ces différentes figures, si ce n'est qu'en plus de la complexité liée au nombre de paramètres de commande (x_e , x_q et x_d), un effet de saturation magnétique rend ces fonctions particulièrement difficiles à appréhender.

Pour le couple, nous pouvons observer qu'il est essentiellement dépendant de x_q et de x_e et que x_d a peu d'influence. Par exemple, la valeur maximale pour $x_d=0$ (Fig. 7) est de 28 Nm et est de 30 Nm pour $x_d=0,8$ (Fig. 8).

Nous appliquons les mêmes transformations pour les deux autres fonctions exprimant les pertes.

Pour la fonction "Pertes cuivre(x_d , x_q , x_e)", nous devons connaître les caractéristiques mécaniques des bobinages et particulièrement celles concernant les têtes de bobines. Par exemple, dans notre cas les pertes dans ces dernières sont trois fois plus importantes que celles dans la partie utile de la machine (voir la photo à la fig. 4).

Pour la fonction "Pertes fer(x_d , x_q , x_e) à 1 tr/min", nous décomposons la machine en de petites zones, dans lesquelles nous déterminons avec le logiciel de calculs par éléments finis 2D [4], deux grandeurs : " ΔB " et " F_2 ".

" ΔB " est l'excursion de la densité de flux (induction). Cette grandeur comporte une composante radiale (ΔB_r) et une composante azimutale (ΔB_θ).

" F_2 " est la valeur efficace de la dérivée de la densité de flux.

$$F_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{db(\theta)}{d\theta} \right)^2 d\theta$$

Cette grandeur comporte une composante radiale (F_{2r}) et une composante azimutale ($F_{2\theta}$).

Nous avons présenté une étude similaire dans [5], dans laquelle ces deux grandeurs sont déterminées dans les éléments du maillage.

Ensuite, ΔB et F_2 sont moyennées et pondérées en fonction du volume de chaque zone. La nouvelle grandeur ΔB_{moy} va permettre de déterminer les pertes fer proportionnelles à la vitesse (classiquement nommées pertes par hystérésis) et la nouvelle grandeur F_{2moy} , va permettre de déterminer les pertes proportionnelles au carré de la vitesse de rotation (classiquement nommées pertes par courants de Foucault). Cette fonction "pertes

fer" est présentée, partiellement, figures 9, 10 et 11, pour une vitesse de 3000 tr/min.

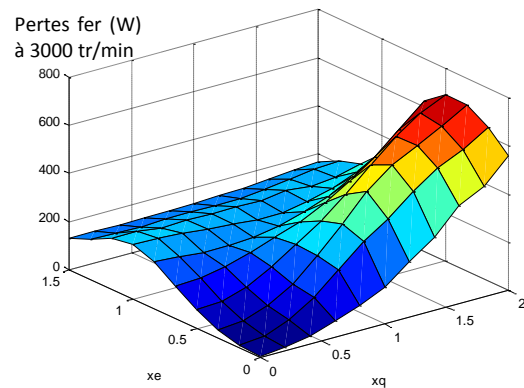


Fig.9: Valeurs des pertes fer en fonction de x_q et de x_e à $x_d=0$.

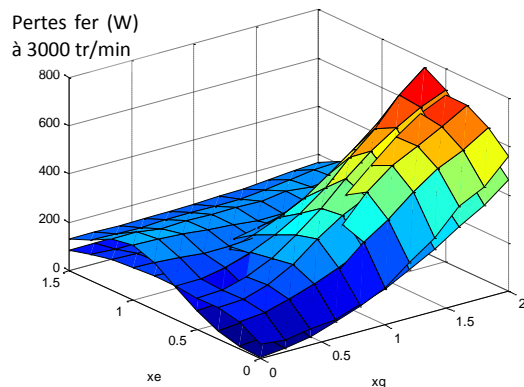


Fig.10: Valeurs des pertes fer en fonction de x_q et de x_e à $x_d=0$ et à $x_d=0,8$.

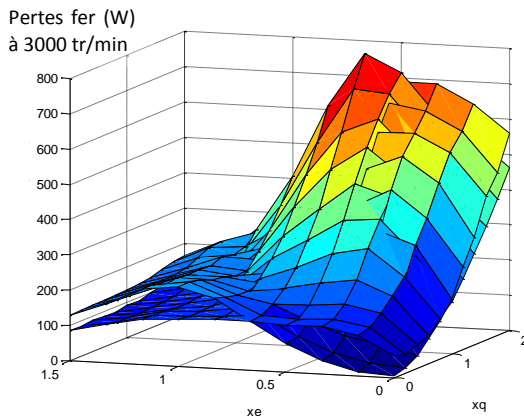


Fig.11: Valeurs des pertes fer en fonction de x_q et de x_e à $x_d=0$ et à $x_d=0,8$, avec un autre point de vue.

Pour les pertes fer, les interprétations sont encore plus difficiles. On peut cependant noter qu'en fonction de x_e , elles commencent par augmenter pour ensuite diminuer et que les lieux de changement de pentes se déplacent en fonction de x_d .

3.2 Détermination des paramètres minimisant les pertes

Les trois paramètres de commande sont les courants d'induit (I_q et I_d) et le courant d'excitation (I_{exc}). Le principe de la méthode de

détermination des paramètres de commande minimisant les pertes est de balayer les tables de couple et de pertes afin de trouver le triplet des valeurs des courants permettant d'obtenir le couple de consigne à la vitesse de rotation désirée tout en minimisant les pertes.

Afin de fixer les idées, nous avons déterminé les valeurs des paramètres de commande minimisant les pertes pour six points de fonctionnement particuliers :

C (Nm)	N (tr/min)	x_d	x_q	x_e	P_{cu_ind} (W)	P_{cu_exc} (W)	P_{f_hyst} (W)	P_{f_cf} (W)
10	0	0	0,9	0,4	51	42	0	0
10	1000	0	0,9	0,4	51	42	14	27
10	2000	0,2	0,6	0,7	25	107	18	64
5	4000	0,2	0,4	0,5	12	60	20	150
2	10000	0,2	0,2	0,3	5	27	16	360
0	10000	0	0	0,1	0	1	2	42

Table 1: Bilan des pertes pour six points de fonctionnement particuliers.

4 Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)

4.1 Principe

Dans la partie précédente, nous avons proposé une méthode pour déterminer les paramètres de commande minimisant les pertes intrinsèques à la machine électrique pour tout point de fonctionnement.

Dans une chaîne de traction électrique, d'autres pertes interviennent, comme les pertes dans l'onduleur et les pertes mécaniques. De plus, les conditions de fonctionnement, principalement la thermique, modifient les valeurs des pertes. Dans cette partie, nous proposons de chercher le point de fonctionnement, autour du point théorique, minimisant l'ensemble des pertes. D'autres auteurs [6], [7], [8] et [9] ont proposé ce principe de commande optimisant le rendement pour des applications différentes.

4.2 Mise en œuvre

Afin de mettre en œuvre directement le principe théorique, nous avons installé la machine électrique commandée (située à droite sur la photo ci-dessous) dans un banc expérimental. La charge mécanique est, ici, réalisée à l'aide d'une machine à courant continu à aimants permanents (à gauche sur la photo) alimentée en boucle ouverte par un hacheur bidirectionnel en courant. La vitesse de rotation est réglée avec la valeur du rapport cyclique du signal de commande du hacheur. Un couple-mètre est

installé entre les deux machines. Il ne sert que pour vérifier les calculs.

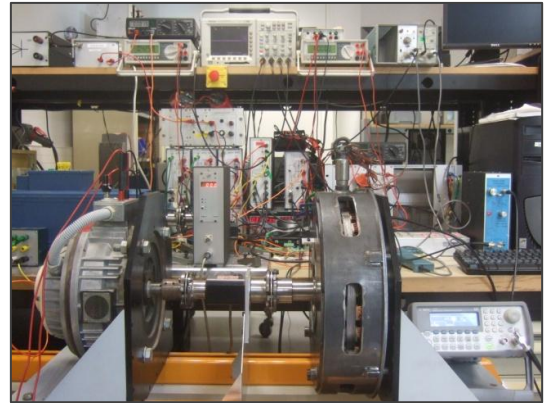


Fig. 12: Photo du banc expérimental.

Le principe de la commande MEPT est de modifier, avec un échelon et de façon très légère le point de fonctionnement et de mesurer l'effet de cet échelon sur la variation des pertes de l'ensemble de la chaîne de traction et sur la variation de couple. La variation autour du point de fonctionnement se fait pour chacun des trois courants à tour de rôles.

Pour mesurer la variation des pertes, nous mesurons la variation du courant continu absorbé par l'onduleur (i_{DC}). Nous faisons l'hypothèse que la variation des pertes est plus importante que la variation de puissance utile. Sur les figures 13, 14 et 15, sont présentées les variations du courant du bus DC pour chacune des trois variations de courants. Sur les trois figures, nous avons :

- Ch1 : l'échelon de commande
- Ch2 : le courant d'excitation
- Ch3 : le courant d'induit (2A/div)
- Ch4 : le courant du bus DC

Seul Ch3 a son zéro au milieu de l'écran, pour les autres, le zéro est placé à une division du bas de l'écran.

Pour mesurer la variation de couple, nous utilisons la table Couple(I_d , I_q , I_{exc}) présentée à la partie précédente. Les calculs de couple réalisés à l'aide de logiciel de calculs par EF-2D donnent d'excellents résultats, de plus nous ne cherchons que les variations. Les trois variations permettent d'estimer la valeur du courant du bus DC et du couple avec les formulations aux dérivées partielles suivantes :

$$i_{DC} = i_{DC0} + \frac{\partial i_{DC}}{\partial I_{exc}} dI_{exc} + \frac{\partial i_{DC}}{\partial I_q} dI_q + \frac{\partial i_{DC}}{\partial I_d} dI_d$$

$$C = C_0 + \frac{\partial C}{\partial I_{exc}} dI_{exc} + \frac{\partial C}{\partial I_q} dI_q + \frac{\partial C}{\partial I_d} dI_d$$

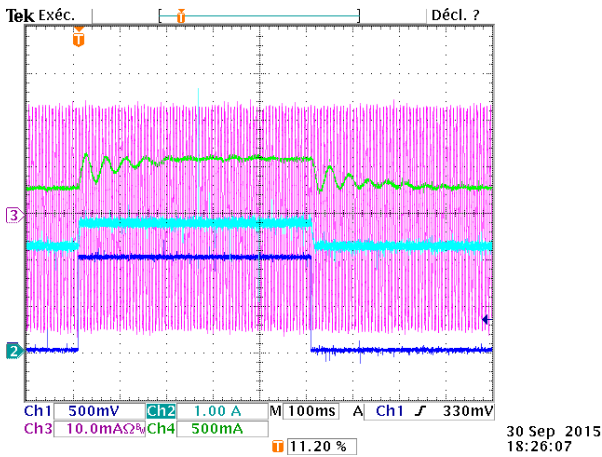


Fig.13: Influence sur le courant du bus DC (Ch4) d'un échelon sur le courant d'excitation.

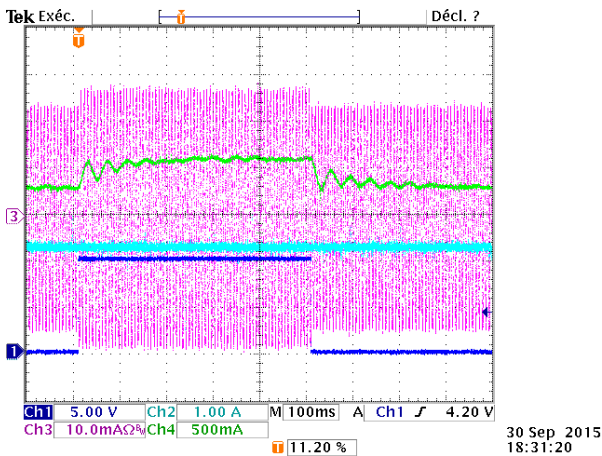


Fig.14: Influence sur le courant du bus DC (Ch4) d'un échelon sur le courant d'induit d'axe q.

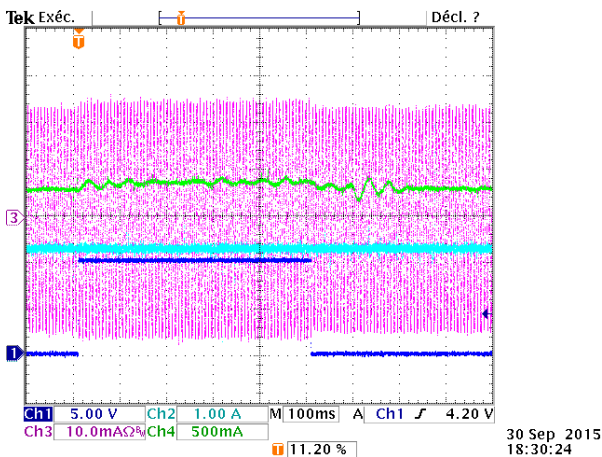


Fig.15: Influence sur le courant du bus DC (Ch4) d'un échelon sur le courant d'induit d'axe d.

Les valeurs des variations de courants sont calculées pour maintenir la valeur du couple initial (C_0), tout en minimisant le courant du bus DC (i_{DC}).

$$I_{exc} = I_{exc0} + dI_{exc_opt}$$

$$I_q = I_{q0} + dI_{q_opt}$$

$$I_d = I_{d0} + dI_{d_opt}$$

4.3 Exemple

Point de fonctionnement initial

$$I_{exc} = 1,9 \text{ A} ; I_q = 3,65 \text{ A} ; I_d = 0,36 \text{ A}$$

$$\Rightarrow U_{DC} = 300 \text{ V} ; I_{DC} = 2,42 \text{ A}$$

$$\Rightarrow C_0_{mesuré} = 6 \text{ Nm} ; N = 580 \text{ tr/min} ;$$

Point de fonctionnement optimisé

$$I_{exc} = 2,2 \text{ A} ; I_q = 3,0 \text{ A} ; I_d = 0,7 \text{ A}$$

$$\Rightarrow U_{DC} = 300 \text{ V} ; I_{DC} = 2,31 \text{ A (soit -5\%)}$$

$$\Rightarrow C_0_{mesuré} = 6 \text{ Nm} ; N = 580 \text{ tr/min}$$

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthode permettant d'obtenir le meilleur rendement pour chaque point de fonctionnement d'une chaîne de traction électrique dans une application véhicule électrique ou hybride et ceci en temps réel.

Cette méthode est réalisable, car nous utilisons une machine synchrone à double excitation. Ainsi les paramètres de commande sont au nombre de trois (I_{exc} , I_d et I_q).

Nous avons pu la mettre en œuvre expérimentalement sur un prototype de machine synchrone à commutation de flux à double excitation 24-20 disponible au laboratoire.

De nombreuses actions sont envisagées. La première est d'améliorer l'algorithme permettant d'obtenir le point de fonctionnement optimal ainsi que la qualité des mesures. La seconde serait d'implanter cet algorithme dans un circuit électronique programmable de type FPGA, afin d'avoir un mode de contrôle "hardware in the loop".

6 Références

- [1] Sullivan KÜTTLER, UTC Compiègne. "Dimensionnement optimal de machines synchrones pour des applications de véhicules hybrides", Thèse soutenue le 24 mai 2013.
- [2] Flux-switching dual excitation electrical machine. E. Hoang, M. Lecrivain, M. Gabsi. US Patent 7,868,506. <http://www.google.com/patents/US7868506>
- [3] E. Hoang, M. Lecrivain, M. Gabsi. "A new structure of a switching flux synchronous poly-phased machine with hybrid excitation". EPE-2007 Conference, Aalborg, September 2007. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00532995/document>
- [4] Finite Element Method Magnetics. <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [5] E. Hoang, M. Lecrivain, S. Hlioui, M. Gabsi. "Hybrid excitation synchronous permanent magnets synchronous machines optimally designed for hybrid and full electrical vehicle". IEEE ECCE-2011. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00626615/document>
- [6] A. Borghetti, M. Di Silvestro, G. Naldi, M. Paolone, M. Alberti. "Maximum Efficiency Point Tracking for Adjustable-Speed Small Hydro Power Plant". 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008.

- [7] Lu, Jun, and Zahedi, Ahmad. "Maximum efficiency point tracking control for fuel cell power systems". POWERCON 2010 International Conference on Power System Technology, 24-28 October 2010, Hangzhou, China.
- [8] Abu-Qahouq, J.A. ; Hong Mao ; Al-Atrash, H.J. ; Batarseh, I. "Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT) Method and Digital Dead Time Control Implementation". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 21 , Issue 5, pp 1273-1281, 6 september 2006.
- [9] S. Lemofouet, A. Rufer. "Hybrid Energy Storage Systems based on Compressed Air and Supercapacitors with Maximum Efficiency Point Tracking". Conference EPE 2005 – Dresden.