

Modèle Système de Machine Electrique pour l'Etude des Performances sur Cycle

Mathieu Rossi*, Maxime Ployard*, Frédéric Gillon*, Pierre Caillard**, et Sid-Ali Randi**

*Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, Ecole Centrale de Lille, Villeneuve-d'Ascq, France
**RENAULT Technocentre, 78288 Guyancourt, France,

RESUME – Dans le cadre du dimensionnement de chaîne de traction pour véhicules électriques, l'intégration du cycle de fonctionnement est nécessaire afin de maximiser l'autonomie du véhicule. Le nombre d'itération sur le modèle de machine est donc élevé. L'article propose un modèle de machine analytique basé sur des cartographies de flux d'axe direct et de quadrature permettant de simuler rapidement les performances d'une machine électrique sur cycle. De par l'utilisation de cartographie, le modèle magnétique peut être d'origine diverse (Éléments finis, analytique ...). Le modèle système choisi est un modèle classique de Park résolu à partir des cartographies de flux. Ce modèle orienté comportement est inversé par optimisation afin de retrouver la commande nécessaire pour obtenir les performances souhaitées.

Mots-clés – Modèle système, Modèle inverse, Conception par optimisation, Machine synchrone, Performance sur cycle

1. INTRODUCTION

La conception des systèmes de traction ou plus généralement des systèmes à vitesse variable est une tâche complexe [1] [2]. L'objet du travail porte sur une méthode permettant d'intégrer le comportement d'une machine électrique dans un processus global de conception par optimisation de chaîne de traction incluant les performances sur cycle de fonctionnement. Dans de tels processus, le modèle sera sollicité un très grand nombre de fois. Il est donc indispensable d'avoir un modèle extrêmement rapide. Pour tenter de résoudre ce challenge, nous proposons de prédire le comportement de la machine grâce à un modèle de Park en flux. Avec un tel modèle, l'approche peut être appliquée sur une machine synchrone à aimants, une machine à rotor bobinée, une machine synchro reluctante ou encore sur une machine à doubles excitations. Elle pourrait également s'appliquer à des machines asynchrones [3]. Le modèle de Park en régime permanent permet facilement de retrouver les caractéristiques d'une machine en connaissant l'évolution des flux directs ϕ_d et de quadratures ϕ_q en fonction des courants direct I_d , de quadrature I_q et du courant d'excitation I_f . Dans un premier temps, le modèle de la machine est présenté. Ensuite, l'inversion du modèle est réalisée grâce à un algorithme d'optimisation permettant de déterminer la commande de la machine minimisant les pertes. Ce modèle systémique est utilisé afin de prédire le rendement de la chaîne de traction sur son plan couple – vitesse. Ensuite, le modèle est employé sur cycle de fonctionnement urbain afin d'évaluer les performances énergétiques de la chaîne. Enfin, une étude portant sur la génération des cartographies de flux est présentée afin de réduire le temps de calcul nécessaire à leur génération afin de limiter le temps de calcul d'une future optimisation de la chaîne de traction.

2. MODÈLE DE MACHINE - MODÈLE DE PARK EN FLUX

2.1. Modèle direct

Le modèle de Park permet de ramener une machine synchrone dans le repère du rotor (repère d,q) grâce à la transformée de Park [4]. La connaissance du nombre de paires de pôles, des flux ϕ_d et ϕ_q et des courants I_d , I_q et I_f permet de retrouver le

couple moyen de la machine (Eq. 1)

$$C_{em} = p. (\phi_d(I_d, I_q, I_f) \cdot I_q - \phi_q(I_d, I_q, I_f) \cdot I_d) \quad (1)$$

Le comportement des flux ϕ_d et ϕ_q qui dépendent à la fois des courants I_d , I_q et I_f peuvent se mettre sous la forme de cartographies. La fig. 1 présente un exemple de cartographies magnétiques pour une machine à aimants de 80 kW. Ces cartographies peuvent être obtenues par éléments finis ou par l'emploi d'un réseau de réductances par exemple [5].

L'utilisation d'un modèle de Park permet de faciliter l'étude de machines dont les modèles magnétiques sont hétérogènes. La seule connaissance des flux directs et de quadratures permet l'étude de la machine. Toutefois, le modèle de Park reste un modèle au premier harmonique. Il n'est donc pas possible d'en déduire le contenu harmonique des différentes grandeurs de la machine (ondulation de couple, harmoniques de courant, ...).

2.2. Inversion du modèle

Il est impératif d'inverser le modèle de Park afin d'obtenir la commande nécessaire pour atteindre le point de fonctionnement désiré, c'est-à-dire un couple et une vitesse fixés (N^* et C^*). Pour cela, plusieurs méthodes sont possibles et portent généralement sur la mise en place d'une commande telle qu'une commande vectorielle. Dans cet article, on propose d'inverser le modèle en utilisant un algorithme d'optimisation qui va chercher, pour un point de fonctionnement, le triplet (I_d , I_q et I_f) minimisant un critère (P_{Joule} , P_{Fer} , $P_{Joule} + P_{Fer}$, etc ...) tout en respectant les contraintes électriques sur le bobinage statorique et l'inducteur (V_{max} , I_{max} et I_{fmax}) (Eq. 2).

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \text{Pertes}(I_d, I_q, I_f) \\ \text{Avec} \quad & I < I_{max} \\ & I_f < I_{fmax} \\ & V < V_{max} \\ & C = C^* \\ & N = N^* \end{aligned} \quad (2)$$

Il est également possible dans une approche système de chercher à optimiser la commande qui minimise les pertes globales du système. La connaissance des pertes Joule et des pertes fer est donc nécessaire à la mise en place de cette commande et permet aussi de calculer le rendement de la machine. Le problème d'optimisation à résoudre est mono-objectif, non linéaire sous contraintes. Un algorithme à base de gradient tel SQP est une solution performante pour ce type de problème. En effet, le nombre de variables d'optimisation est restreint à trois (la fréquence étant simplement déduite de la vitesse de rotation pour le cas d'une machine synchrone). De plus, l'évaluation du modèle analytique est très rapide. Ainsi un point de fonctionnement nécessite seulement quelques itérations pour converger vers une solution, soit un temps total d'exécution de 30 ms sur notre machine (Core 2 Duo T9400).

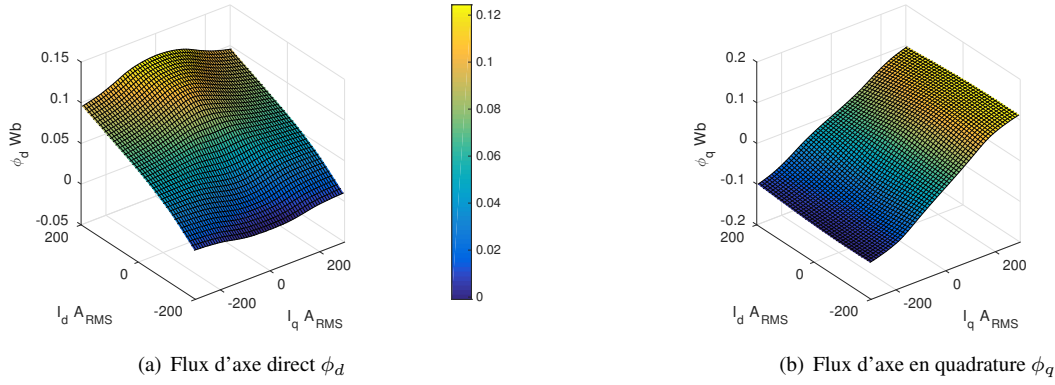


Fig. 1. Exemple de cartographies de flux d'une machine synchrone à aimant

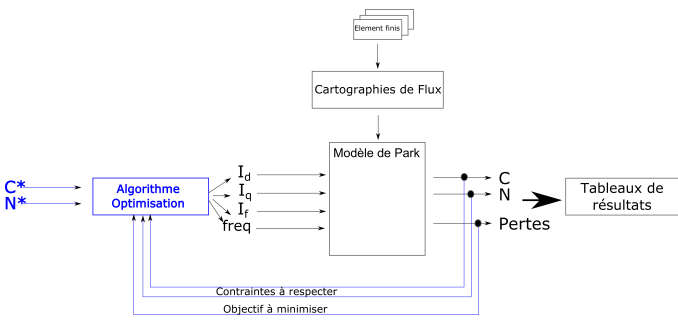
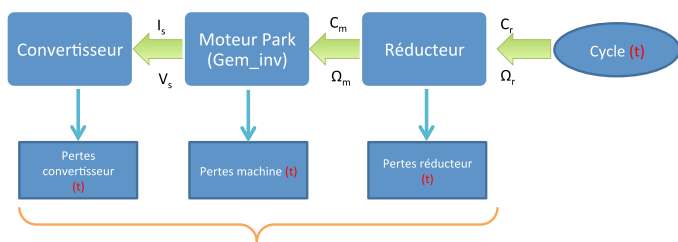


Fig. 2. Commande optimale de la machine par un algorithme d'optimisation

3. APPROCHE SYSTEMIQUE

Une approche systémique est mise en place par l'ajout d'un modèle de convertisseur électrique et d'un réducteur mécanique afin de prendre en compte leur influence sur le bilan énergétique de la chaîne de traction. La figure 3 montre le modèle de la chaîne de traction. En l'espèce, il s'agit d'un modèle de dimensionnement, par conséquent le point de fonctionnement (Couple - Vitesse) est imposé et l'on remonte la chaîne de traction pour déterminer les pertes de chaque élément. L'intégration de ces pertes permet ensuite d'estimer l'énergie consommée sur un cycle de fonctionnement.



Intégration → Performance Énergétique sur Cycle de la CdT
Fig. 3. Etude sur cycle d'une chaîne de traction

3.1. Onduleur de tension

La tension et le courant nécessaire pour atteindre le point de fonctionnement sont imposés à l'onduleur. Un modèle analytique prenant en compte les pertes par commutations et par conduction dans les Mosfet/IGBT est mis en place afin d'affiner le bilan énergétique de la chaîne de traction. Les travaux [6] et [7] permettent de déduire les pertes du convertisseur grâce à la connaissance de sa tension d'alimentation (considérée fixe donc sans prise en compte du déchargement des batteries), sa fréquence de découpage, la température de jonction des interrupteurs ainsi que les paramètres des interrupteurs fournis dans les datasheets. La température des Mosfet/IGBT est considérée constante dans le cycle de fonctionnement, mais un modèle thermique du convertisseur permettrait d'améliorer ce point. Des

modèles analytiques à base de réseaux thermiques équivalents sont présentés dans [8] [9].

3.2. Réducteur mécanique

La prise en compte du réducteur dans la chaîne de traction simulée permet de retrouver le point de fonctionnement du moteur en fonction de la vitesse et du couple demandés sur l'arbre de sortie. Plusieurs types de pertes coexistent dans les réducteurs. Il est nécessaire de tenir compte des pertes des dentures engendrées par les frottements des pignons, mais aussi des pertes par traînée engendrées par les roulements, le barbotage des pignons dans de l'huile ou par effets aérauliques. Ces pertes dépendent de la température et principalement de la variation de la viscosité de l'huile. Les articles [10], [1] [11] détaillent le calcul de ces pertes.

4. ÉTUDE DANS L'ESPACE COUPLE-VITESSE DE LA MACHINE

L'étude d'un point de fonctionnement étant rapide, il est envisageable de calculer les caractéristiques de la chaîne de traction dans l'espace couple - vitesse de la machine. Pour cela, des points de fonctionnement sont imposés afin de balayer cet espace à l'aide d'un plan d'expérience complet.

4.1. Limitation du nombre d'évaluations

Le découpage en cartésien de l'espace couple-vitesse engendre la simulation d'un grand nombre de points non atteignable par la machine. Il est judicieux, afin de limiter le nombre de simulations, de réduire cet espace de recherche. Pour cela, on s'attache tout d'abord à déterminer les limites de la machine en terme de vitesse et de couple. Deux optimisations sont lancées permettant de maximiser la vitesse, puis le couple de la machine (Eq.3 et Eq.4). Les bornes de l'espace couple vitesse sont ainsi déterminées et l'espace total du fonctionnement de la machine peut être quadrillé en imposant une discrétisation sur la vitesse et le couple.

$$\begin{aligned} \text{Min} & \quad -\text{Vitesse}(I_d, I_q, I_f, \text{freq}) \\ \text{Avec} & \quad I < I_{max} \\ & \quad I_f < I_{fmax} \\ & \quad V < V_{max} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} & \quad -\text{Couple}(I_d, I_q, I_f, \text{freq}) \\ \text{Avec} & \quad I < I_{max} \\ & \quad I_f < I_{fmax} \\ & \quad V < V_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

Néanmoins, dans ce nouvel espace d'étude, un certain nombre de points ne sont pas atteignables par la machine par manque

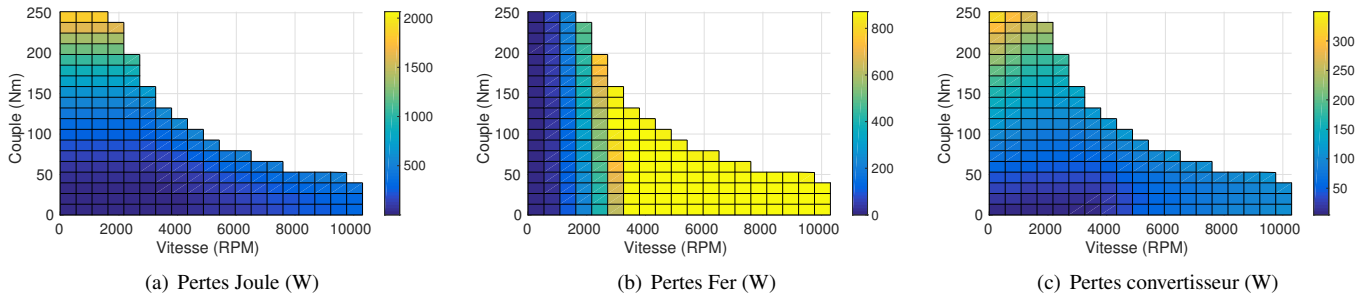


Fig. 4. Cartographies des performances de la chaîne de traction avec une commande optimisée sur les pertes Joules

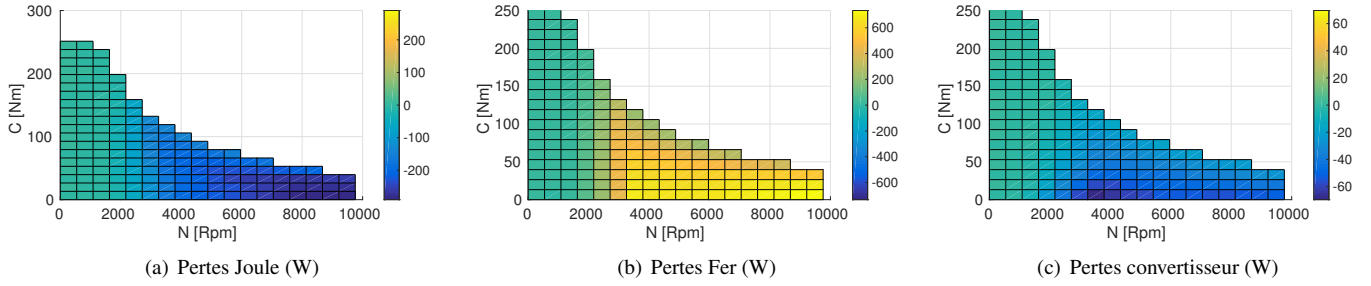


Fig. 5. Gain sur les pertes en modifiant la commande de la machine pour optimiser les pertes totales

de puissance. Le lancement d'une optimisation sur le modèle de chaîne de traction permet alors de déterminer cette limite (Eq. 5).

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & -P_{mecc}(I_d, I_q, I_f, freq) \\ \text{Avec} \quad & I < I_{max} \\ & I_f < I_{fmax} \\ & V < V_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

La connaissance de C_{max} , V_{max} et P_{max} donne alors l'enveloppe complète de la machine et permet donc de délimiter pleinement l'espace couple-vitesse de la chaîne de traction. Les points non réalisables par la machine sont tous simplement rejetés du plan d'expérience.

4.2. Résultats

La figure 4 présente des résultats obtenus d'une chaîne de traction équipée d'une machine synchrone à aimants insérés de 80 kW à partir des cartographies (Fig. 1). Les résultats sont donnés dans l'espace couple vitesse de la machine en fonctionnement moteur. Le plan complet d'étude représente 400 points. Seulement 211 points sont réellement simulés pour un temps de calcul total de 5 s. L'inversion du modèle de la machine est réalisée en minimisant les pertes Joule.

4.3. Influence de la fonction objective de la commande sur les performances

La commande de la machine est modifiée par l'intermédiaire de la fonction objective associée à l'inversion du modèle de Park. Au lieu de minimiser les pertes Joules de la machine, on s'intéresse ici à réduire les pertes totales de l'ensemble machine-convertisseur. L'optimisation cherche alors à minimiser la somme des pertes Joule, des pertes fer et des pertes du convertisseur. Le gain global sur les pertes totales est donné sur la figure 6. Le gain est important pour les hautes vitesses, là où les pertes fer sont importantes. Le détail du gain sur les pertes est représenté sur la figure 5. Il est intéressant de voir que les pertes Joule ont augmenté, mais qu'elles sont compensées largement par le gain sur les pertes fer. Les pertes du convertisseur sont quant à elles équivalentes.

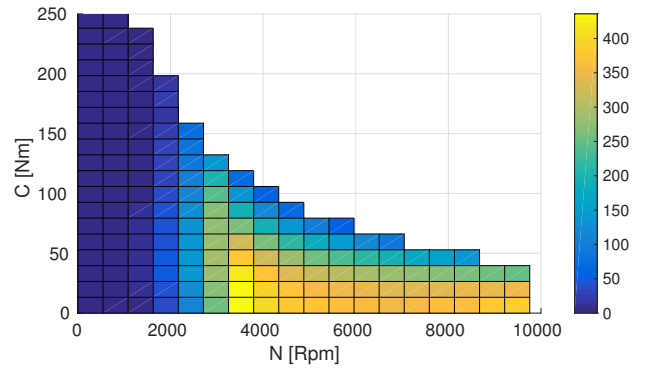


Fig. 6. Gain (W) sur les pertes en modifiant la fonction objective

5. PERFORMANCES SUR CYCLE

Au lieu d'itérer sur des points de fonctionnement dans l'espace couple - vitesse de la machine, il est possible d'imposer les points de fonctionnement d'un cycle tel qu'un parcours urbain. Ainsi, pour chaque pas de temps le point de fonctionnement est déterminé et imposé à l'entrée du modèle. Les performances de la machine au cours du temps sont obtenues. Un exemple de cycle routier (WLTC low) est présenté sur la figure 7 avec la consommation énergétique de la machine. La figure 7 montre des zones de récupération d'énergie lors des freinages. Il est possible de limiter cette capacité de récupération due à la présence d'un freinage mécanique. Dans la mesure où les sources du modèle de Park sont des cartographies magnétiques, il n'est pas nécessaire de refaire des simulations magnétiques pour étudier un cycle différent.

6. GÉNÉRATION DES CARTOGRAPHIES MAGNÉTIQUES

Le modèle de chaîne de traction étant rapide (5 secondes), il est intéressant de l'utiliser dans le cadre d'une étude d'optimisation de cette chaîne de traction afin de dimensionner au mieux une chaîne de traction en fonction de son cycle urbain. Dans le cadre d'une optimisation du dimensionnement de la machine électrique, il est important de réduire le temps de génération. Car pour chaque itération de l'optimisation, une nouvelle série de cartographies magnétiques doit être générée. Or la génération

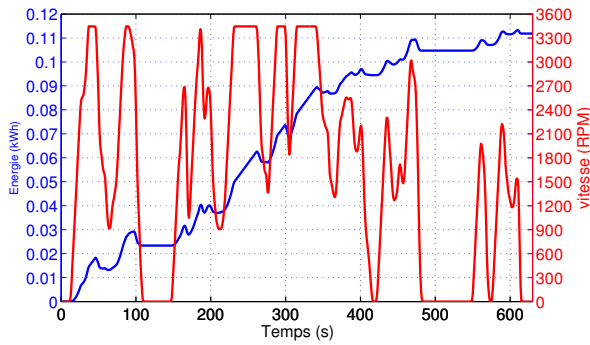


Fig. 7. Energie consommée sur un cycle WLTC low

des cartographies est couteuse en temps de calcul surtout si l'on utilise un modèle magnétique éléments finis. Il est alors nécessaire afin de conserver des cartographies donnant des résultats acceptables de bien choisir la taille des cartographies magnétiques, avec des points judicieusement placés et de minimiser le temps de calcul d'un point. La génération de la cartographie dépend de deux facteurs. Le premier est lié au temps de calcul pour une simulation magnétique permettant de retrouver pour un courant I_d, I_q, I_f les flux ϕ_d, ϕ_q . Le second est lié au nombre de points souhaité pour produire les cartographies.

La figure 8 présente l'exemple d'une démarche permettant l'obtention de ces cartographies à l'aide d'un plan d'expérience qui balaye les courants I_d, I_q et I_f d'un modèle éléments finis.

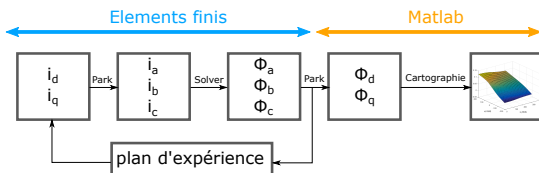


Fig. 8. Création des cartographies de flux par éléments finis

6.1. Détermination de ϕ_d et de ϕ_q

Il est intéressant de regarder comment obtenir les cartographies de flux ϕ_d et ϕ_q à partir par exemple d'un modèle magnétique éléments finis ou d'un réseau de réluctances. Ainsi, pour un point de la cartographie (courants I_d, I_q et I_f imposés), combien de pas de temps sont nécessaires pour retrouver les flux magnétiques permettant d'obtenir le bon couple moyen par l'équation (Eq. 1). L'article [12] compare le couple obtenu par le tenseur de Maxwell dans l'entrefer et le calcul du couple par l'équation (Eq. 1). Il montre ainsi que l'utilisation de l'équation (Eq. 1) est valable pour des machines synchrones à aimants enterrés ou en surfaces. La démarche proposée dans [12] permet alors de calculer les flux directs et de quadratures par un seul pas de simulation si l'on s'affranchit du couple oscillant de la machine. La méthode expérimentale présentée dans [13] peut être appliquée et reproduite grâce à des simulations magnéto-statiques permettant de trouver la position du rotor qui moyenne les variations de flux ϕ_d et ϕ_q en fonction de la position du rotor.

6.2. Influence de la dimension des cartographies magnétiques

La figure 1 présente des cartographies contenant 2665 points. Grâce à la symétrie des cartographies, seuls 666 points ont été simulés soit un total de 10h de calcul par éléments finis. Le temps de génération des cartographies est dans ce cas présent largement supérieur au temps de simulation de la chaîne de traction sur un cycle. Ainsi, lors de la mise en place d'une optimisation sur la géométrie de la machine, nécessitant à chaque itération de régénérer les cartographies de flux, le temps nécessaire pour obtenir une optimisation dépendra principalement du temps de génération des cartographies magnétiques. Afin de réduire ce temps, il est possible de modifier directement le mo-

dèle pour qu'il soit plus rapide, en modifiant par exemple les paramètres de ce dernier (maillage, etc.) ou d'utiliser des modèles plus rapides comme des modèles de réseau de réluctances [14]. La seconde solution consiste à choisir une taille de cartographies magnétiques adaptée à la précision recherchée. En effet, il existe un compromis entre le nombre de points des cartographies de flux et la précision du modèle de machine. Une étude de sensibilité a été menée afin de caractériser l'influence de la taille des cartographies de flux sur la précision des pertes Joule. En considérant les cartographies de la Fig. 1 comme référence, des cartographies simplifiées ont été générées, contenant respectivement 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 144, 196, 256, 400, 625, 1225 éléments (Fig. 9). La figure 4(a) donne les pertes Joule de la machine déterminées avec les cartographies magnétiques de référence. La cartographie de pertes Joule a été recalculée pour chaque cartographie de flux simplifiée et l'erreur maximale calculée est représentée sur le graphique (fig. 10 sachant que les pertes Joule maximales de cette machine sont de 2065 W.

La figure 10 montre que l'erreur sur le calcul des pertes Joule est inversement proportionnelle au nombre de points des cartographies. Or, le temps de calcul des cartographies est proportionnel à ce nombre de points. La cartographie à 4 points représente finalement un modèle linéaire, comparable à un modèle analytique utilisant les inductances L_d et L_q constantes et montre que ce type de modèle n'est pas approprié pour le calcul des pertes dans la machine. Par contre, on constatera qu'une cartographie de 100 points est largement suffisante et entraîne une erreur de 30 W tout au plus. En considérant une symétrie sur l'axe I_d et I_q la cartographie peut être obtenue avec 25 points seulement. À noter que sur une machine fortement saturée, la cartographie nécessitera plus de points pour garantir une même précision.

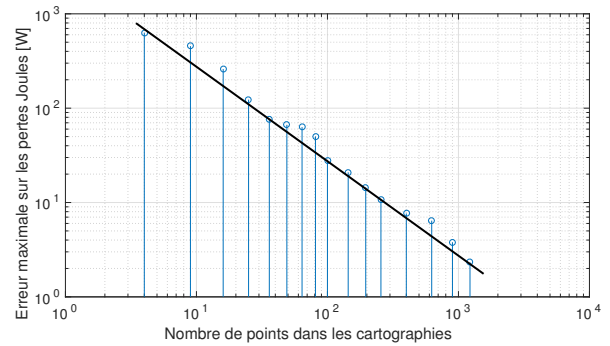


Fig. 10. Influence du nombre de points des cartographies magnétiques sur le calcul des pertes Joule

6.3. Placement des points dans les cartographies magnétiques

Les cartographies sont générées en explorant l'espace I_d, I_q, I_f de la machine. Il n'est pas utile de travailler sur un plan complet cartésien. La figure 11 montre par exemple la position des points de fonctionnement de la machine pour son étude sur les axes Couple-Vitesse en moteur et en générateur. La cartographie a été générée pour des courants I_d, I_q compris entre -300 et 300 Arms. On constate que les points de fonctionnement se retrouvent dans un espace restreint et que des zones limites apparaissent [15],[16]. Ainsi un grand nombre de points simulés magnétiquement sont inutiles pour l'étude de la chaîne de traction.

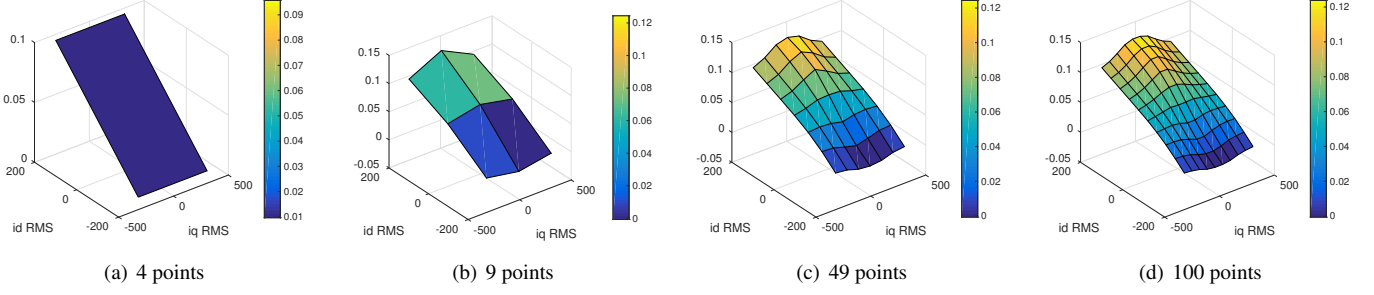


Fig. 9. Influence du nombre de points sur la cartographie magnétique ϕ_d

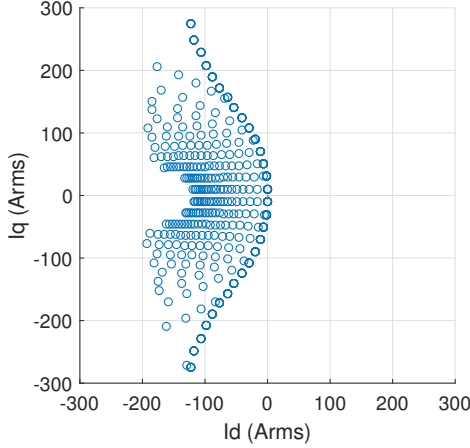


Fig. 11. Emplacement des points de fonctionnement de la machine sur les axes I_d, I_q

En effet, la machine est limitée par deux contraintes physiques qui sont respectivement la tension max V_{max} et le courant max I_{max} admissible par la machine. Ces contraintes, dans l'espace (I_d, I_q) se décrivent par les équations (Eq. 6) et (Eq. 7).

$$I_d^2 + I_q^2 = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max}. \quad (6)$$

$$V_d^2 + V_q^2 = \sqrt{\frac{3}{2}} V_{max} \quad (7)$$

l'équation (Eq. 7) peut se réécrire en fonction des courants I_d et I_q et permet de retrouver l'équation d'une ellipse en considérant que les inductances L_d et L_q sont constantes (Eq. 8).

$$\left(\frac{I_d + \frac{\phi_m}{L_d}}{\frac{1}{\omega \cdot L_d}} \right)^2 + \left(\frac{I_q}{\frac{1}{\omega \cdot L_q}} \right)^2 = \sqrt{\frac{3}{2}} V_{max} \quad (8)$$

De même, la courbe représentant le couple max à courant constant donné dans [15] et [5] permet de retrouver la dernière asymptote qui prend la forme d'une parabole (Eq :9).

$$I_d = \frac{\phi_m}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\left(\frac{\phi_m}{2(L_q - L_d)} \right)^2 + I_q^2} \quad (9)$$

La figure (12) reprend ainsi la figure (11) en y ajoutant les limites obtenues par les équations (Eq. 6 et Eq. 9)

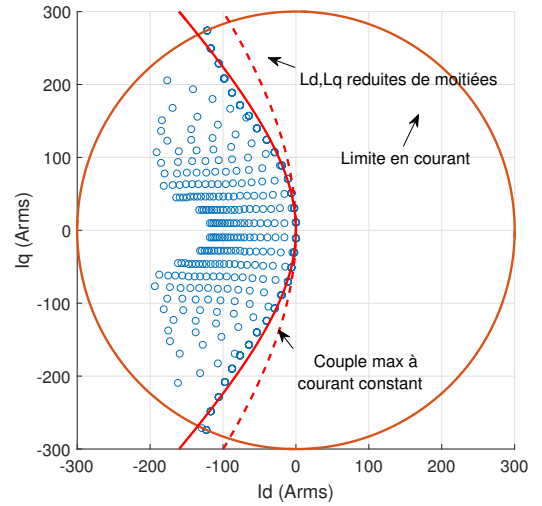


Fig. 12. Reduction de l'espace de recherche dans l'espace (I_d, I_q)

Une estimation peu précise des inductances L_d, L_q et du flux de l'aimant ϕ_m suffit alors à mieux choisir les points utiles de la machine. En effet, une sous évaluation d'un facteur 2 des inductances L_d, L_q n'agrandit que faiblement l'espace de recherche. Ainsi par l'intermédiaire de 3 simulations magnétiques, il est envisageable d'obtenir une estimation des 3 paramètres et d'en déduire un espace de recherche adapté pour la génération des cartographies magnétiques.

7. PRISE EN COMPTE DES EFFETS HARMONIQUES

Le modèle de la machine est un modèle au premier harmonique. Il permet de retrouver le couple moyen de la machine en fonction des courants imposés à cette dernière. Néanmoins, il n'est pas possible de déterminer directement les effets en dehors du fondamentale. Ainsi l'emploi de ce modèle permet de retrouver l'induction fondamentale dans la machine, mais pas ses harmoniques. Or ces harmoniques génèrent de nombreuses pertes fer. Le problème se pose également si le couple oscillant est une donnée importante, car impossible à déterminer avec le modèle de Park. Afin d'intégrer ces effets harmoniques, il est possible d'introduire de nouvelles cartographies générées par le modèle magnétique donnant par exemple les pertes fer en fonction des courants et de la fréquence associée. Il en résulte des cartographies à plus de 3 dimensions, mais cela n'est pas un problème pour réaliser des interpolations dessus. Ainsi par l'introduction de ces nouvelles cartographies, la plus grande limitation du modèle de la machine peut être levée en contrepartie d'une complexification du nombre de cartographies nécessaires et qui devront être générées.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le développement d'un modèle de chaîne de traction (convertisseur / machine / réducteur) a été développé en utilisant

un modèle de Park pour la machine. Ce dernier permet à l'aide de cartographies magnétiques de retrouver les performances de la machine avec des temps de calcul très faibles autorisant par la suite une optimisation de cette chaîne vis-à-vis d'un cycle de fonctionnement. Par l'utilisation importante des cartographies de flux, la génération de ces cartographies a été détaillée afin de limiter leur temps de génération, grâce à un choix judicieux de la discrétisation de ces cartographies et par la position des points simulés. Le modèle de Park en flux permet de surcroît d'intégrer un grand nombre de types de machine aussi bien synchrone qu'asynchrone grâce à la généralité de ce modèle. L'inversion du modèle par un algorithme d'optimisation permet de trouver des commandes limitant les pertes totales de la chaîne de traction. L'approche systémique pourrait cependant être améliorée par l'ajout d'un modèle de batterie et le côté multi physique par l'ajout d'un modèle thermique sur les différents composants de la chaîne de traction. Par ailleurs, il serait intéressant de caractériser expérimentalement le gain sur les pertes en implémentant les commandes obtenues par optimisation.

9. RÉFÉRENCES

- [1] P. Caillard, F. Gillon, M. Hecquet, S.-A. Randi, and N. Janiaud, "An optimization methodology to pre design an electric vehicle powertrain," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE*, Oct 2014, pp. 1–6.
- [2] B. Sarrazin, "Optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique," Ph.D. dissertation, Université de Grenoble, 2012.
- [3] Y. Zhao and T. A. Lipo, "Space vector pwm control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 31, no. 5, pp. 1100–1109, 1995.
- [4] Y. Amara, L. Vido, M. Gabsi, E. Hoang, A. Hamid Ben Ahmed, and M. Lecrivain, "Hybrid excitation synchronous machines : Energy-efficient solution for vehicles propulsion," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 5, pp. 2137–2149, Jun 2009.
- [5] L. Chedot, G. Friedrich, J.-M. Biedinger, and P. Macret, "Integrated starter generator : The need for an optimal design and control approach. application to a permanent magnet machine," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 2, pp. 551–559, 2007.
- [6] D. Jauregui and B. Wang, "Power loss calculation with common source inductance consideration for synchronous buck converters," 2011.
- [7] D. Graovac, M. Purschel, and A. Kiep, "Mosfet power losses calculation using the data-sheet parameters," *Infineon application note*, vol. 1, 2006.
- [8] T. Kojima, Y. Yamada, Y. Nishibe, and K. Torii, "Novel rc compact thermal model of hv inverter module for electro-thermal coupling simulation," in *Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*, April 2007, pp. 1025–1029.
- [9] Z. Zhou, P. Holland, and P. Iqic, "Compact thermal model of a three-phase igt inverter power module," in *Microelectronics, 2008. MIEL 2008. 26th International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 167–170.
- [10] B.-R. Höhn, K. Michaelis, and M. Hinterstoifer, "Optimization of gearbox efficiency," *Goriva i maziva*, vol. 48, no. 4, p. 462, 2009.
- [11] P. Heingartner and D. Mba, "Determining power losses in helical gear mesh : Case study," in *ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2003, pp. 965–970.
- [12] N. Bianchi, L. Alberti, M. Popescu, and T. Miller, "Mmf harmonics effect on the embedded fe-analytical computation of pm motors," in *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*. IEEE, 2007, pp. 1544–1551.
- [13] V. Bobek, "Pmsm electrical parameters measurement, nxp application note an4680," 2013.
- [14] N. Bracikowski, M. Hecquet, P. Brochet, and S. V. Shirinskii, "Multiphysics modeling of a permanent magnet synchronous machine by using lumped models," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 6, pp. 2426–2437, 2012.
- [15] B. Multon, J. Lucidarme, and L. Prévond, "Analyse des possibilités de fonctionnement en régime des désexcitation des moteurs à aimants permanents," *Journal de physique III*, vol. 5, no. 5, pp. 623–640, 1995.
- [16] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasaka, and K. Taniguchi, "Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, no. 5, pp. 866–871, Sep 1990.