

Etude de faisabilité d'un alerno-démarrreur intégré

Comparaison des solutions asynchrone et synchrone à rotor bobiné

Design of an integrated starter-generator:

Comparison of an induction machine and a wound rotor synchronous machine

Jean-Marie Biedinger*, Guy Friedrich*, Jean-Paul Vilain*, Cedric Plasse**

*Laboratoire d'Electromécanique, Université de Technologie de COMPIEGNE BP 20529 - 60205 Compiègne cedex

** Division Alternateurs VALE0 BP 150 - 94017 Créteil cedex

email: jean-marie.biedinger@utc.fr

Abstract :

This paper compares two types of electric machines in a starter-generator application: the induction machine (IM) and a wound rotor synchronous machine (WRSM). The design of the both machines uses a constrained sequential quadratic programming method. The principal aim is to find the minimal iron length of the machine in respect with specified start torque (starter function) and efficiency constraints (generator mode). The method of optimization, constraints and optimized variables are clearly described. The results show the great importance of the internal resistance of the accumulators on the machine design. After showing the various design problems, the authors propose ways of solutions to avoid an excessive solicitation of the batteries and to maintain the length of the machine in an "acceptable range".

Résumé :

Cet article présente une étude de faisabilité d'un alerno-démarrreur en versions asynchrone à cage et synchrone à rotor bobiné. La conception des machines repose sur une méthode d'optimisation sous contraintes. Les limitations sur la conception sont examinées au regard de la constitution de la batterie, de l'utilisation de la batterie et des spécifications du couple au démarrage.

I. Introduction

Dans un contexte de recherche constante de la diminution de la consommation de carburant et de l'augmentation des consommateurs électriques embarqués, les constructeurs automobiles envisagent d'assurer les fonctions de génération d'énergie et de démarrage du moteur thermique par une machine électrique unique, l'alternateur-démarrreur. Deux arguments plaident en faveur de cette démarche.

En premier lieu il s'agit d'assurer l'augmentation de la puissance électrique disponible tout en favorisant la diminution de la consommation de carburant. Pour cela il est nécessaire d'augmenter la taille de l'alternateur, mais également son rendement, lequel n'est pas sans conséquence sur les économies de carburant [1]. Or la structure traditionnelle de l'alternateur à griffe, apte à délivrer des puissances maximales de 1.5kW avec des rendements de l'ordre de 0.65, ne semble pas pouvoir répondre à une telle évolution. Le problème de la recherche d'une structure plus adéquate est donc posé.

Ensuite il s'agit de prendre en compte le fait qu'une diminution de la consommation de carburant passe obligatoirement par un allègement de la masse des organes

qui présentent un fonctionnement intermittent le long d'un cycle de roulage, et pour lesquels la notion de rendement a peu de répercussion, directement ou indirectement, sur cette consommation. La conception du démarreur relève de cette logique: il faut diminuer sa masse tout en préservant sa capacité à fournir le couple de démarrage selon les cycles imposés.

Dans cette perspective, il apparaît donc intéressant de faire cumuler les fonctions de générateur et de démarreur par une machine unique, l'alternateur-démarrreur. Cela permettrait supprimer plusieurs organes, comme le démarreur, des courroies de transmission, et voire même le volant d'inertie avec un pilotage adapté de la machine, toutes ces actions se traduisant par une possibilité d'intégration compacte de l'alternateur-démarrreur en bout d'arbre du moteur thermique.

Mais outre les spécifications techniques auxquelles devront répondre les solutions envisageables, ce seront surtout les contraintes imposées par une production de masse à faible coût qui limiteront leur faisabilité; aussi est-il nécessaire d'intégrer cette donnée lors du choix de la structure de l'alternateur-démarrreur.

Compte tenu de ces considérations, la solution du moteur asynchrone à cage aluminium apparaît comme une solution potentiellement réaliste: d'une part sa fabrication s'accommode aisément d'une production automatisée, d'autre part les possibilités actuelles de commande permettent de lui conférer toutes les caractéristiques électromécaniques requises, et ce aussi bien en moteur qu'en générateur. Parmi les autres structures envisageables figure la machine synchrone à rotor bobiné. Bien qu'il s'agisse, dans une perspective d'une production de masse, d'un type de machine a priori moins compétitif - l'alimentation de l'excitation nécessite des contacts glissants et la structure du rotor est plus complexe -, son aptitude naturelle à bien fonctionner en générateur dans le mode de défluxage sur une plage de vitesse étendue en fait toujours une solution technologique attractive [2], d'autant plus que ce mode pourra s'effectuer, au contraire de la machine asynchrone, sans la commutation MLI de l'étage de puissance, la régulation du courant de charge se faisant par le courant d'excitation.

L'objectif de cet article est de présenter une étude de faisabilité de l'alternateur selon les deux versions, asynchrone à cage et synchrone à rotor bobiné. Cette étude devra permettre de donner des éléments de décision aux motoristes en fixant l'investissement minimal (encombrement et batterie) à prévoir en fonction des performances souhaitées - on ne passe pas aisément d'un alternateur à griffe de 1.5kW, dont le rendement atteint tout juste 0.65 à un alternateur de 3kW à 6000t/mn, rendement 0.8, avec un couple de démarrage de plus de 400Nm -.

Etant donné les nombreuses contraintes imposées à un alternateur, il apparaît intéressant de conduire cette recherche de faisabilité selon une méthode de conception par optimisation: le programme d'optimisation - ici une méthode de programmation quadratique séquentielle [3] - gère automatiquement les variables de conception au travers des performances évaluées sur la base d'un modèle d'analyse - lors de cette étude de faisabilité nous avons retenu un modèle classique de machines pour assurer la liaison entre les performances et les variables de conception [4] -. La méthode de conception utilisée présente la particularité de considérer les paramètres de commande relatifs aux différents points de fonctionnement significatifs de l'espace de travail couple-vitesse, en l'occurrence la tension et le glissement pour le moteur asynchrone, la tension, le courant d'excitation et l'angle de couple pour le moteur synchrone, comme autant de variables de conception supplémentaires à optimiser, au même titre que les paramètres géométriques dimensionnants. La première partie de l'article s'attachera à présenter le problème de la conception comme un problème d'optimisation qui cherche à réaliser la machine *la plus courte possible* compte tenu des diverses contraintes imposées.

La perspective de la fabrication à moindre coût suggère d'alimenter la machine par un onduleur de tension MLI directement connecté à la batterie, sans étage élévateur ni capacité de stockage d'énergie

intermédiaires. En contrepartie, dans cette configuration, la fonction démarrage sollicite directement la batterie, ce qui se traduit par l'appel d'un courant élevé. Cela entraîne une réduction drastique de la tension disponible aux bornes de l'onduleur, et une dégradation dans l'utilisation de la batterie. L'étude du dimensionnement devra donc être conduite en étudiant l'influence de la batterie sur le dimensionnement de la machine, d'une part au travers de sa constitution par la valeur de sa résistance interne, d'autre part en fonction de l'utilisation souhaitée par l'intermédiaire du courant maximal autorisé. Afin de ne pas dévaloriser a priori la solution asynchrone à cause d'un environnement mécanique vibratoire peu favorable à de faibles entrefers, le dimensionnement de cette version sera conduit avec deux valeurs d'entrefers, un entrefer à la valeur idéale de 0.5mm, et un entrefer à la valeur très élevée de 1mm, ce qui correspond à une valeur couramment réalisée par une solution synchrone à rotor bobiné.

La dernière partie s'attachera à souligner l'influence sur le dimensionnement de l'accroissement des besoins en couple de démarrage - en d'autres termes, est-il envisageable par exemple d'équiper de la sorte un gros moteur diesel? -.

II. Formulation mathématique du problème d'optimisation

La conception d'un alternateur fait intervenir un certain nombre de paramètres que l'on peut classer en variables discrètes et en variables continues. Si les variables discrètes sont figées, cette conception peut être formulée comme un problème général de programmation mathématique non linéaire, lequel consiste à sélectionner n variables d'optimisation (VO) continues, notées \mathbf{X} , parmi toutes les variables de conception, et à trouver les valeurs optimales $\bar{\mathbf{X}}$ qui

- minimisent la fonction objectif $f(\mathbf{X})$,
- situent la configuration à l'intérieur du domaine faisable défini par $m+2n$ contraintes, réparties en m_e contraintes d'égalité, $m-m_e$ contraintes d'inégalité, et $2n$ contraintes de bornes, et définies comme

$$\begin{aligned} * h_i(\mathbf{X}) &= 0 & i &= 1 \dots m_e, \\ * g_j(\mathbf{X}) & \leq 0 & j &= m_e+1 \dots m, \\ * X_l & \leq X_i \leq X_u & i &= 1 \dots n, \end{aligned}$$

toutes ces fonctions étant supposées dépendre de manière continûment différentiable de \mathbf{X} .

Dans la suite de cette partie on s'attachera à décrire la méthodologie développée pour la machine asynchrone, étant entendu que celle relative à la machine synchrone relève d'une démarche semblable.

II.1. Les variables d'optimisation

Une définition technologiquement cohérente de la solution initiale \mathbf{X}_0 peut être obtenue selon la méthode proposée dans [5]. Elle conduit à figer correctement les variables entières comme les nombres de pôles, d'encoches et de voies d'enroulement. La définition des

variables discrètes comme le nombre de conducteurs par encoche et sa réalisation en fils de diamètre normalisé conduit à développer la procédure d'optimisation en trois étapes:

1. optimisation de la structure en traitant ces variables comme des variables continues;

2. normalisation pour fixer ces variables à des valeurs entières et/ou normalisées;

3. optimisation pour ajuster la valeur des autres VO.

Les variables candidates en tant que VO ont été regroupées dans le tableau 1; la figure 1 précise la signification géométrique de ces VO.

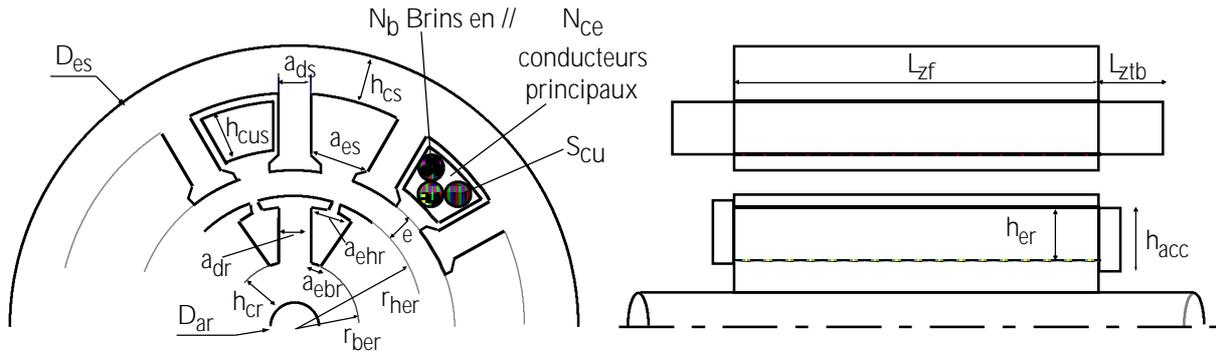


Figure 1: Définition des variables d'optimisation géométriques.

No	Variable	Signification
X1	L_{zf}	Longueur de l'empilage des tôles
X2	h_{cr}	Hauteur de la culasse du rotor
X3	R_{edber}	Rapport largeurs a_{ebr}/a_{dr}
X4	R_{rhber}	Rapport rayons r_{her}/r_{ber}
X5	R_{dcacb}	Rapport densités de courant Anneau_CC/Barre
X6	R_{haher}	Rapport hauteurs h_{acc}/h_{er}
X7	R_{edbes}	Rapport largeurs a_{es}/a_{ds}
X8	h_{cus}	Hauteur de la partie bobinée d'encoche stator
X9	h_{cs}	Hauteur de la culasse du stator
X10	S_{cu}	Section d'un conducteur principal d'encoche stator
X11	N_{ce}	Nombre de conducteurs par encoche stator
X12	U_{efph1}	Tension efficace de phase au point de fonct G1
X13	$Gliss_1$	Glissement au point de fonct G1
X14	U_{efph2}	Tension efficace de phase au point de fonct G2
X15	$Gliss_2$	Glissement au point de fonct G2
X16	$Gliss_3$	Glissement au point de fonct M1

Tableau 1: Définition des variables d'optimisation.

II.2. Les fonctions du problème d'optimisation

La fonction objectif

Parmi toutes les spécifications qui caractérisent un alterno-démarréur, celle relative à l'encombrement axial en bout de moteur thermique apparaît comme essentielle. On cherchera avant tout à minimiser la longueur active; la fonction objectif à minimiser s'écrira alors comme

$$(1) f(\mathbf{X}) = \frac{L_{zf}(\mathbf{X}) + L_{ztb}(\mathbf{X})}{L_{ref}},$$

où L_{ztb} représente la longueur des têtes de bobines - celles-ci sont assimilées à des demi-cercles avec un facteur d'écrasement de 0.5 -, et L_{ref} une longueur de référence servant à normaliser $f(\mathbf{X})$ au voisinage de l'unité. Les rendements, puissances, couple de démarrage

et diamètre extérieur apparaîtront comme des contraintes à respecter.

Les fonctions contraintes

L'orientation de la solution optimale vers une configuration technologiquement correcte dépend de la cohérence des contraintes. Celles-ci doivent pouvoir concerner la géométrie et les spécifications de fonctionnement. Elles sont regroupées dans le tableau 2. Les contraintes géométriques imposent de réaliser la machine dans un volume correspondant à un disque de diamètre interne $D_{ar} = 170\text{mm}$, de diamètre externe $D_{es} = 334\text{mm}$, et de longueur de fer L_{zf} la plus courte possible, inférieure si possible à 53mm. Compte tenu des

vibrations mécaniques, l'entrefer ne devrait pas descendre en dessous de 0.5 mm.

Les contraintes fonctionnelles concernent:

- la fonction démarreur, caractérisée par le point (M1) défini comme:

(M1) : vitesse $\omega_M = 250\text{t/mn}$;

couple utile $C_u(M1) = 450\text{Nm}$;

- la fonction alternateur, sur une plage de vitesse limitée par les deux points (G1) et (G2):

(G1) : vitesse $\omega_{G1} = 850\text{t/mn}$;

puissance fournie $P(G1) = 3000\text{ W}$;

rendement $\eta(G1) = 0.8$;

(G2) : vitesse $\omega_{G2} = 2000\text{t/mn}$;

puissance fournie $P(G2) = 5000\text{ W}$;

rendement $\eta(G2) = 0.8$.

La machine est alimentée par un onduleur MLI directement connecté à la batterie. La batterie envisagée possède une tension à vide $E_b = 36\text{V}$, et une résistance interne $R_b = 0.020\ \Omega$. Le convertisseur de puissance sera matérialisé par une chute de tension $\Delta V = 2\text{V}$.

	Equations	Définition
$g_{g1}(\mathbf{X})$	$1 - D_{es} / D_{max} \quad 0$	Borne Sup du diamètre extérieur du stator D_{es}
$g_{g2}(\mathbf{X})$	$(f_r - f_{rMin}) (f_{rMax} - f_r) \quad 0$	Bornes facteur f_r de remplissage d'encoche
$g_{f1}(\mathbf{X},1)$	$\eta(G1) \varepsilon \eta_{Min1}$	Borne Inf du rendement $\eta(G1)$
$g_{f2}(\mathbf{X},1)$	$P(G1) \varepsilon P_{Min1}$	Borne Inf de la puissance (G1)
$g_{f3}(\mathbf{X},1)$	$J_s(G1) \quad J_{sMax1}$	Borne Sup densité de courant stator (G1)
$g_{f4}(\mathbf{X},1)$	$J_r(G1) \quad J_{rMax1}$	Borne Sup de la densité de courant rotor (G1)
$g_{f5}(\mathbf{X},2)$	$\eta(G2) \varepsilon \eta_{Min2}$	Borne Inf du rendement $\eta(G2)$
$g_{f6}(\mathbf{X},2)$	$P(G2) \varepsilon P_{Min2}$	Borne Inf de la puissance (G2)
$g_{f7}(\mathbf{X},2)$	$J_s(G2) \quad J_{sMax2}$	Borne Sup densité de courant stator (G2)
$g_{f8}(\mathbf{X},2)$	$J_r(G2) \quad J_{rMax2}$	Borne Sup de la densité de courant rotor (G2)
$g_{f9}(\mathbf{X},3)$	$(B_{ds} - B_{dsMin}) (B_{dsMax} - B_{ds}) \quad 0$	Bornes induction dents stator au point (M1)
$g_{f10}(\mathbf{X},3)$	$(B_{cs} - B_{csMin}) (B_{csMax} - B_{cs}) \quad 0$	Bornes induction culasse stator au point (M1)
$g_{f11}(\mathbf{X},3)$	$(B_{dr} - B_{drMin}) (B_{drMax} - B_{dr}) \quad 0$	Bornes induction dents rotor au point (M1)
$g_{f12}(\mathbf{X},3)$	$(B_{cr} - B_{crMin}) (B_{crMax} - B_{cr}) \quad 0$	Bornes induction culasse rotor au point (M1)
$g_{f13}(\mathbf{X},3)$	$C_u(M1) \varepsilon C_{Min3}$	Borne Inf du couple utile (M1)
$g_{f14}(\mathbf{X},3)$	$J_s(M1) \quad J_{sMax3}$	Borne Sup densité de courant stator (M1)
$g_{f15}(\mathbf{X},3)$	$J_r(M1) \quad J_{rMax3}$	Borne Sup densité de courant rotor (M1)
$g_{f16}(\mathbf{X},3)$	$I_{dc}(M1) \quad I_{dcMax3}$	Borne Sup du courant batterie (M1)
$g_{bi}(\mathbf{X})$	$X_i(i) \quad X(i) \quad X_u(i)$	Contraintes de bornes sur les VO; $i = 1 \dots n$

Tableau 2: Contraintes utilisées pour la conception de l'alternateur-démarreur asynchrone.

Les contraintes portant sur la géométrie sont notées comme $g_g(\mathbf{X})$. Les contraintes fonctionnelles, repérées comme $g_f(\mathbf{X};\mathbf{k})$, caractérisent la capacité de l'entraînement à respecter les spécifications du point de fonctionnement $n^{\circ}k$ (le point $k=1$ est relatif au démarrage (M1), le point $k=2$ au fonctionnement générateur (G1), le point $k=3$ au fonctionnement générateur (G2)).

A ces contraintes, il convient d'ajouter les contraintes de bornes sur les variables d'optimisation, lesquelles permettent de maîtriser l'étendue de la zone d'exploration autour de la solution initiale \mathbf{X}_0 ; elles sont repérées comme g_b dans le tableau 2.

Notons que la définition de la contrainte g_{f13} sur le couple de démarrage a mis à profit le fait que la valeur requise constituait toujours un élément dimensionnant,

au moins dans le cadre du cahier des charges concerné, ce qui a permis de traiter cette spécification comme une contrainte inégalité plutôt que comme une contrainte égalité, ce dernier type de contrainte étant toujours plus contraignant. La même remarque s'applique pour respecter la valeur maximale autorisée sur le diamètre extérieur D_{es}

II.3. Le modèle d'analyse

Le modèle d'analyse utilisé doit déterminer les états magnétique, électrique, et thermique en vue d'évaluer les fonctions contraintes $g_i(\mathbf{X}; \mathbf{k})$. En théorie ces trois états sont couplés [6], mais dans la perspective de l'étude de faisabilité qui nous intéresse ici, nous avons choisi une approche simplifiée qui, dans le cas de la machine asynchrone, consiste à découpler ces états comme suit:

- Pour une tension d'alimentation sinusoïdale entre phase U_s donnée, l'état magnétique de la machine est parfaitement calculable dès lors que le glissement et les températures sont imposés (pour la machine synchrone, le glissement sera remplacé par le courant d'excitation et l'angle de couple). La détermination des paramètres du schéma équivalent repose sur les formules classiques de la construction électrique [4].

- L'état électrique est déterminé selon une procédure simplifiée, adaptée aux différents points de fonctionnement. Pour les points (G1) et (G2), toute valeur de U_s sera supposée réalisable entre les deux valeurs 0 et $V_{dc}/\sqrt{2}$ grâce au pilotage adéquat de l'onduleur MLI (le choix de cette valeur maximale permet de conserver une marge de réglage MLI). Pour le point moteur (M1), où toute la tension disponible est nécessaire, U_s sera calculée itérativement sur la base de la conservation de la puissance (Fig. 2):

$$(2) I_{dc} (V_{dc} - \Delta V) = \sqrt{3} U_s I_s \cos\phi_s.$$

- L'état thermique étant délicat à estimer à cause d'un environnement mal connu, il sera pris en compte indirectement en limitant la densité de courant admissible en fonction des recommandations du constructeur ($10A/mm^2$ en générateur, $50 A/mm^2$ en moteur).

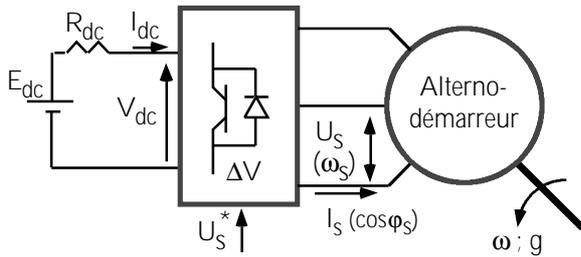


Figure 2 : Schéma de principe de l'alimentation de l'alternateur

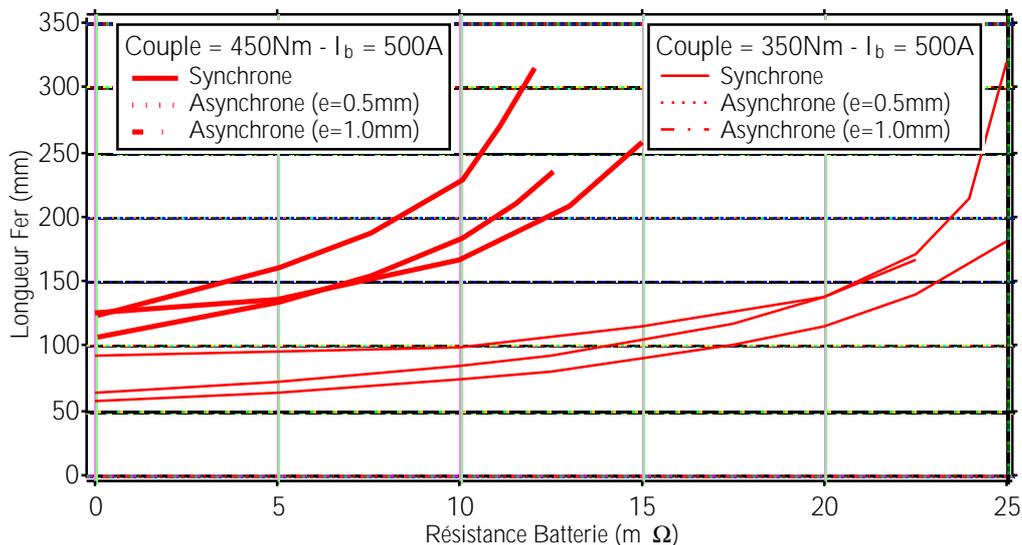


Figure 3 : Evolution de la longueur de fer avec la résistance de la batterie.

III. Résultats

Dans la suite de l'exposé, tous les résultats présentés sont conformes aux contraintes définies dans le tableau 2.

III.1. Limitations de conception liées à la constitution de la batterie

La figure 3 reporte l'évolution de la longueur minimale de fer statorique en fonction de la valeur de la résistance interne R_b de la batterie. Elle confirme le rôle crucial joué par la batterie. Elle montre également que l'effet d'un grand entrefer pour la machine asynchrone, s'il est très défavorable aux forts couples, n'en reste pas moins acceptable pour de plus faibles valeurs. Quant à la machine synchrone, si elle confirme sa supériorité aux forts couples, elle ne se montre pas franchement supérieure pour des couples plus faibles.

III.2. Limitations de conception liées à l'utilisation de la batterie

La figure 4 reporte l'évolution de la longueur de fer en fonction du courant admissible dans la batterie, pour un couple de 350Nm et une résistance R_b de 20mΩ. Elle indique encore la nécessité d'un compromis entre l'encombrement et le niveau d'exploitation de la batterie autorisés.

III.3. Limitations de conception liées au couple de démarrage

La figure 5 reporte l'évolution de la longueur de fer en fonction du couple de démarrage demandé, pour un courant batterie maximal de 500A et une résistance R_b de 20mΩ. Elle illustre bien la forte dépendance entre ces données.

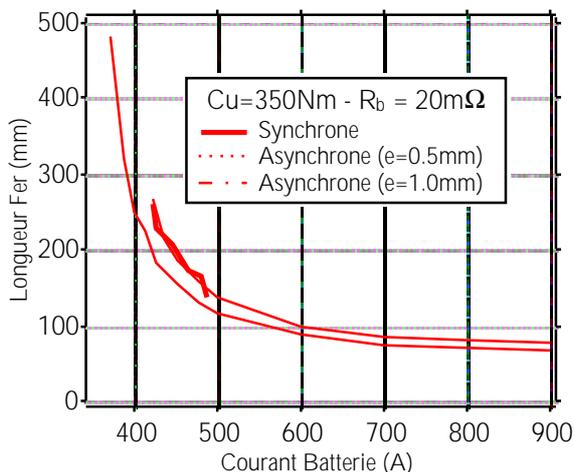


Figure 4 : Evolution de la longueur de fer avec le courant maximal de batterie.

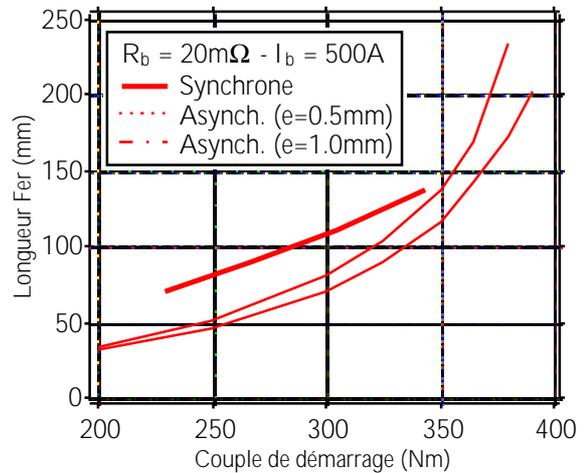


Figure 5: Evolution de la longueur de fer avec le couple de démarrage.

IV. Conclusion

Cette étude de faisabilité a permis d'attirer l'attention sur deux points essentiels.

1. Le principe de fonctionnement de la machine, qu'elle soit synchrone ou asynchrone, n'influe pas de manière sensible sur ses dimensions optimales. Aussi la machine asynchrone, de par sa simplicité, sa robustesse et son absence de contacts, semble plus adaptée aux fonctions d'alternateur que la machine synchrone, si toutefois l'on accepte un fonctionnement en mode MLI dans les phases "générateur". L'étude a par ailleurs permis de montrer que, dans le cadre du cahier des charges imposé, un entrefer important - 1mm pour une machine asynchrone de cette taille constitue habituellement un très grand entrefer - n'était en définitif qu'assez peu pénalisant en termes de dimensions.

2. Pour les deux types de structure, la résistance interne de la batterie joue un rôle primordial lors du dimensionnement, la chute de tension qu'elle engendre réduisant de manière drastique la tension effectivement disponible aux bornes des bobinages. Et ce phénomène se produit dans des proportions telles qu'il devient impossible de répondre au cahier des charges pour des résistances internes de batterie supérieures à 15mΩ, ce qui semble exclure les batteries classiques au plomb.

Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour gérer l'inconvénient de la chute de tension interne de la batterie. La première piste passe par l'introduction simultané d'un étage élévateur intermédiaire entre la batterie et l'onduleur, ce qui permettrait de dimensionner la machine sous des tensions plus favorables, et de capacités ayant un stockage d'énergie suffisant pour délester de manière significative la batterie lors du démarrage. La deuxième piste repose sur la constatation que la longueur des têtes de bobines représente, pour ce type de machine galette, une fraction prédominante de la longueur d'une spire par rapport à la partie active de fer (un rapport de l'ordre de l'unité pour un diamètre de 200mm à l'alésage et cinq paires de pôles); des calculs,

non reportés ici, montrent qu'une machine asynchrone, qui serait dimensionnée en négligeant la résistance et la réactance de fuite des têtes de bobines, aurait une longueur active de fer diminuée de près des deux tiers. Cet état est en fait commun à tout type de machine à champ d'entrefer radial. En ce sens, des structures à aimantation axiale pourraient constituer une piste intéressante à explorer.

V. Bibliographie

- [1] K. Bolenz - W. Schleuter, "Design Modifications of Alternator, starter, and battery to reduce fuel consumption", Int. Conf. on Transport electronics, SAE Convergence 94, pp 355-362, 1994
- [2] G. Friedrich, "Comparative study between two AC brushless machines in automotive applications: the induction machine and the wound rotor synchronous machine", 15th International Electric Vehicle Symposium, Brussels, 1998
- [3] P.E. Gill - W. Murray - M.H. Wright, "Practical optimization", Academic Press, 1981
- [4] M. Liwschitz, "Calcul des machines électriques - Tomes 1 et 2", Editions SPES Lausanne - 1967
- [5] M. Nurdin - M. Poloujadoff - A. Faure, "Synthesis of squirrel cage motors : a key to optimization", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 6, No 2, pp 327-335, 1992.
- [6] J.M Biedinger - J.P Vilain, "Dimensionnement optimal des actionneurs électriques alimentés à fréquence variable sous faible tension. I. Analyse du problème couplé magnétique, thermique, électrique". European Physical Journal Applied Physics, 3, pp 101-108, 1998.