

Dimensionnement unifié des machines synchrones radiales et axiales à aimants permanents

Léonard COUTANT¹, Thomas HUGUET¹, François PIGACHE¹

1 : LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse France

La comparaison entre les topologies axiales et radiales des machines s'appuie sur des modèles électromagnétiques et des méthodes de dimensionnement distinctes. Pour les comparer de manière objective, il est essentiel d'établir un modèle géométrique et électromagnétique ainsi qu'un processus de dimensionnement unifié. Cet article propose un système de paramétrage et un processus commun pour les topologies axiales et radiales en introduisant un design intermédiaire : la machine conique. Les performances théoriques des différentes machines sont évaluées pour un cahier des charges commun. Les résultats montrent qu'en fonction de l'indicateur de performance choisi, la machine optimale peut être soit axiale soit radiale soit conique. .

Machines synchrones à aimants permanents, dimensionnement, flux axial, flux radial, machine conique

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement analytique à partir d'un cahier des charges est essentiel pour évaluer non seulement les dimensions, mais aussi les performances d'une machine électrique de manière plus rapide que des simulations par éléments finis. En réponse au désir d'accroître la densité de puissance et l'efficacité énergétique dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans celui de la mobilité [1, 2], plusieurs études comparent les deux principales topologies de machines actuellement disponibles [3, 4] : les machines à flux radial et les machines à flux axial, qui présentent des avantages distincts. Cependant, ces études ne prennent pas nécessairement en compte le même ensemble de paramètres ni les mêmes hypothèses, pouvant conduire à une comparaison biaisée [5, 6].

En introduisant un angle d'inclinaison dans l'entrefer, les machines coniques permettent d'aboutir à un design convergeant vers les machines classiques. Cette configuration de machine présente l'intérêt de pouvoir permettre la lévitation magnétique, en positionnant deux machines tête-bêche comme indiquées dans [7, 8]. Il est également possible de modifier mécaniquement l'entrefer pour faire fonctionner la machine en mode de défluxage, comme l'ont démontré [9, 10]. De plus, l'augmentation de la surface d'échange magnétique (l'entrefer) peut accroître le couple massique dans certaines configurations [11, 12]. Les principaux inconvénients de ces machines sont similaires à ceux des machines axiales : l'assemblage devient plus complexe, la forme des aimants est complexe et le laminage des pièces ferromagnétiques nécessaires pour réduire les pertes fer par courants de Foucault devient un enjeu à part entière.

Cet article propose une méthode de dimensionnement qui prend en compte à la fois les machines axiales et les machines radiales à l'aide d'un modèle analytique unifié de la machine conique, dans la continuité des travaux de [13]. Un processus de dimensionnement commun aux machines axiales et radiales est proposé pour répondre à un cahier des charges donné. Le choix d'une topologie de machine et de ses dimensions sera ici basé sur plusieurs critères de performances détaillés dans l'article.

2. PARAMÉTRAGE VARIABLE LE LONG DE LA LONGUEUR ACTIVE

Le design et le paramétrage des machines coniques permettent une définition géométrique continue convergeant vers les machines conventionnelles. La Figure 1 présente le paramétrage d'une machine conique générique.

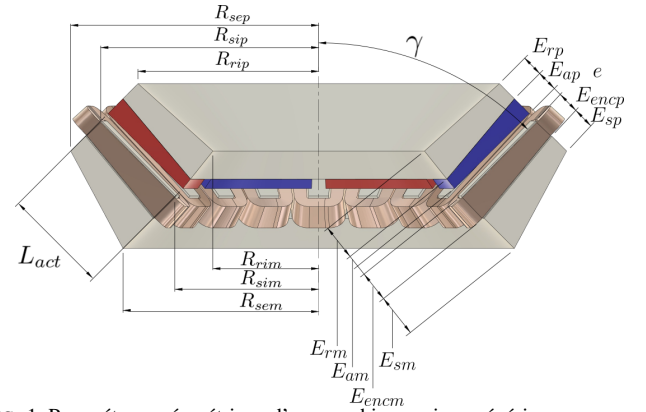


FIG. 1. Paramétrage géométrique d'une machine conique générique (illustration pour un angle d'inclinaison de 45°)

L'angle γ permet, selon sa valeur, de converger vers les machines conventionnelles :

- Une machine à flux radial pour $\gamma = 0^\circ$
- Une machine à flux axial pour $\gamma = 90^\circ$

L'étude et le dimensionnement des machines coniques posent cependant un léger problème : certaines grandeurs peuvent varier le long de la longueur active. En effet, le rayon d'alésage varie le long de la longueur active. Cependant, d'autres grandeurs se doivent de rester constantes, comme par exemple le nombre de paires de pôles ou le nombre d'encoches. Le dimensionnement présenté dans cet article est basé sur l'étude et le dimensionnement de deux machines 'surfaciques' différentes (épaisseur infinitésimale). Ces deux machines sont alors une machine surfacique au niveau de son petit rayon (indice m) puis une machine au niveau de son grand rayon (indice p) représentée respectivement par leur surface en vert et en violet en Figure 2.

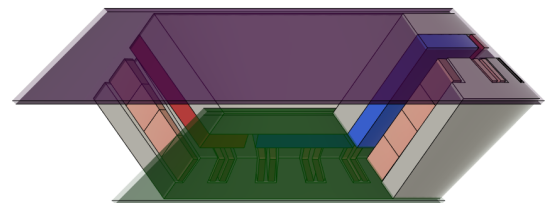


FIG. 2. Représentation des surfaces de dimensionnement des machines en fonction de leur rayon : en vert pour la machine au petit rayon et en violet pour celle au grand rayon.

La machine complète est alors obtenue en faisant évoluer de manière linéaire les grandeurs variables entre ces deux machines surfaciques. Les grandeurs constantes le long de la longueur active sont les suivantes :

- Le nombre de paires de pôles N_{pp} et d'encoches N_{enc} .
- L'épaisseur d'entrefer e .
- Le courant d'encoche ou le nombre d'ampères tours soit le produit $N_s \cdot I_s$.
- La densité surfacique de courant J_{cu} pour maintenir constant l'échauffement au sein des conducteurs.
- Ces deux derniers points imposent de maintenir la section des conducteurs constante.
- Le niveau de saturation dans les dents, dans un souci de maximisation de l'utilisation des parties ferromagnétiques.
- Le fondamental du champ magnétique normal à l'entrefer produit par le rotor au rayon d'alésage (champ utile pour la production de couple).

Le dernier point permet d'inverser l'équation du couple électromagnétique moyen produit à partir des sources statoriques et rotoriques comme explicité dans [13] tel que :

$$\langle \Gamma_{em} \rangle = \frac{B_r \cdot K_s(R_{sim})}{2} \cdot \frac{\pi}{\sin(\gamma)} \cdot R_{sip}^3 \cdot (k_{ry} - k_{ry}^3) \quad (1)$$

Avec :

- B_r : L'amplitude du fondamental de l'induction magnétique au rayon d'alésage
- $K_s(R_{sim})$: L'amplitude du fondamental de la charge linéique de courant définie au petit rayon d'alésage.
- k_{ry} : Le rapport entre les rayons d'alésage R_{sim}/R_{sip}

Les grandeurs alors variables le long de la longueur active en découlent :

- Les différentes épaisseurs présentes dans la machine or celle de l'entrefer (aimants, encoches, culasses).
- Les différents angles présents dans la machine (angle d'ouverture des aimants, des encoches, des dents).
- La charge linéique de courant, le courant d'encoche étant constant, la charge K_s est inversement proportionnelle au rayon d'alésage. Sa valeur est définie à sa valeur maximale comme une limite thermique soit au petit rayon d'alésage conformément à l'équation 1.
- Les précédents points donnent lieu à une forme de section d'encoche variable le long de la longueur active tout en maintenant sa valeur constante comme représenté en Figure 3.

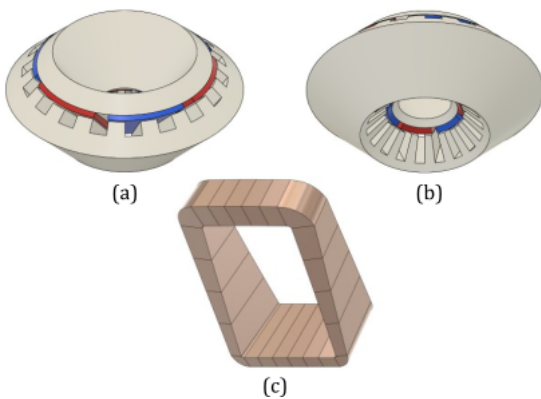


FIG. 3. Exemple de machine conique avec des formes d'encoches variables et une section constante : (a) Vue du dessus, (b) vue du dessous, (c) enveloppe des conducteurs.

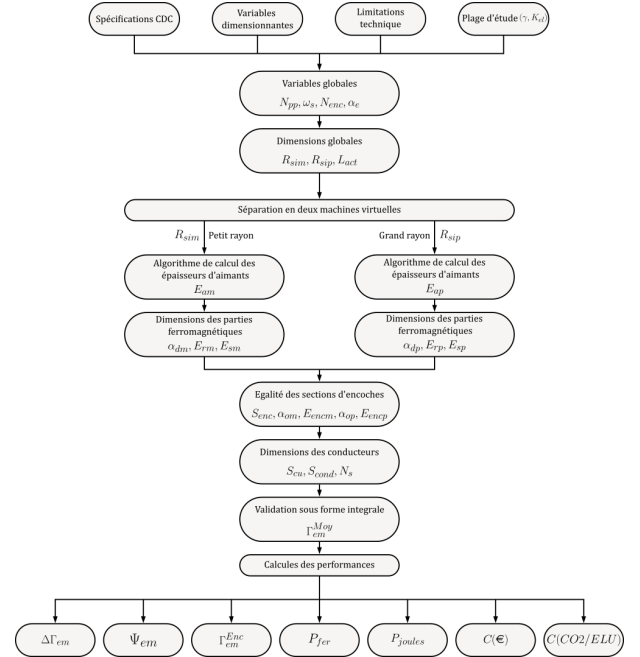


FIG. 4. Processus de dimensionnement

3. MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT

La Figure 4 présente la méthode de dimensionnement. Ce processus est exécuté pour chaque couple de paramètres (γ, K_{el}) défini sur une plage d'étude. Il permet alors d'utiliser strictement les mêmes règles de dimensionnement pour les machines radiales, axiales et coniques.

Le dimensionnement des machines coniques, radiales et axiales respecte les différentes étapes suivantes :

- Les variables et dimensions globales définissant la surface de l'entrefer, sont calculées à partir des spécifications du cahier des charges, des variables dimensionnantes (entrefer, limites thermiques, etc.), des limitations techniques, du couple de paramètre (γ, K_{el}) et de l'équation (1).
- A la suite de la séparation de la machines en deux machines virtuelles surfaciques, les épaisseurs des aimants sont calculées pour conserver une induction magnétique rotorique au rayon d'alésage constant le long de la longueur active.
- Les parties ferromagnétiques sont dimensionnées de manière à maintenir un niveau de saturation magnétique dans l'entrefer constant le long de la longueur active.
- Les encoches et les conducteurs sont définis tout en garantissant une valeur de leur section constante le long de la longueur active, afin d'homogénéiser la diffusion de chaleur au sein de ces derniers.

Ce processus de dimensionnement permet d'évaluer un ensemble de performances. Les ondulations de couple $(\Delta \Gamma_{em})$, calculées numériquement à partir de l'interaction des harmoniques des sources de courants K_s et de la distribution de l'induction rotorique. Le couple massique moyen (Ψ_{em}) est accessible ainsi que le couple volumique. Cependant, il paraît plus pertinent de considérer un couple volumique d'encombrement (Γ_{em}^{Enc}) , c'est-à-dire le rapport entre le couple et le volume du cylindre circonscrit aux designs de machines dimensionnées. Les pertes cuivre (P_{joules}) sont considérées à partir de la géométrie des conducteurs, tandis que les pertes fer (P_{fer}) , elles, sont évaluées à partir du modèle de Bertotti selon [14]. Le coût financier $(C(€))$ des matières premières ainsi qu'un coût écologique sont également calculés. Ce dernier est séparé en un coût carbone $(C(CO_2))$ équivalent pour la production de matières premières et un coût ELU (Environmental Load Units) $(C(ELU))$ qui représente le coût financier pour compenser l'impact écologique

de la production d'un kilogramme de matériaux. Les différents coûts sont présentés dans le tableau 1 à partir de [15]

TABLEAU 1. Tableau récapitulatif des différents coûts selon les matériaux [16, 15]

	Coût Financier (€/kg)	Coût carbone (kgCO2/kg)	Coût ELU (€/kg)
Fer laminé	2	5	1
Cuivre	5	3	131
Aimant	10	30-35	175-1500

Les aimants constituent le coût principal dans toutes les circonstances. Pour estimer le coût total en termes d'écologie, la valeur médiane est utilisée, avec un coût carbone de 32,5 kg CO2 par kg d'aimant et un coût monétaire de 837,5 € par kg d'aimant.

4. APPLICATION À UN CAHIER DES CHARGES

Le processus de dimensionnement est mis à l'épreuve selon le cahier des charges présenté dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Spécifications visées pour le dimensionnement machine

Paramètres	Valeur
Couple mécanique	0.8 N.m
Vitesse de rotation	2000 tr/min
Tension d'alimentation	100 V
Courant d'alimentation	1.9 A

Les dimensionnements sont paramétrés pour respecter les limitations thermiques suivantes :

- $K_s^{th} = 40 \text{ A/mm}$: La densité surfacique de courant maximale est appliquée au petit rayon des machines.
- $J_{cu}^{th} = 5 \text{ A/mm}^2$: La densité volumique de courant dans les conducteurs.

Les variables dimensionnantes suivantes sont communes aux dimensionnements :

- Épaisseur d'entrefer : 1 mm
- Nombre de paires de pôles : 6
- Nombre d'encoches : 9
- Bobinage de type concentrique
- Induction rémanente des aimants : 1.1 T
- Induction maximale dans les parties ferromagnétiques : 1.4 T
- Perméabilité relative du matériau ferromagnétique : 670
- Coefficient de remplissage des encoches : 50 %

Afin de couvrir l'ensemble des machines conventionnelles et de forme variable, le processus de dimensionnement est répété sur la plage d'étude suivante :

$$\gamma = [0 - 90]^\circ \quad K_{el} = \frac{L_{act}}{R_{sim}} = [0.1 - 1] \quad (2)$$

Cette dernière est représentée avec quelques designs résultant du processus d'optimisation en Figure 5.

La Figure 6 montre le couple massique sur toute la plage d'étude. Les machines conventionnelles et la machine conique les plus performantes en termes de couple massique ont été mises en évidence. Les zones grisées représentent les contraintes de fabrication. En effet, la conception des pièces ferromagnétiques est difficile à réaliser pour les machines coniques avec les méthodes de fabrication conventionnelles. Les restrictions de fabrication proviennent d'une imprimante 3D conçue

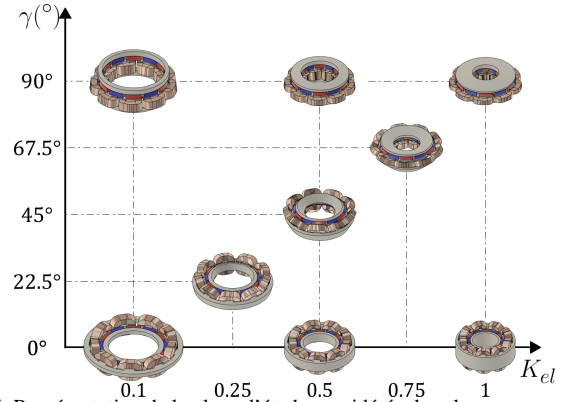


FIG. 5. Représentation de la plage d'étude considérée dans le dimensionnement, avec quelques exemples de designs (radiaux, axiaux et coniques).

pour produire des pièces en acier magnétique, ce qui limite certains designs en raison des dimensions trop grandes pour être imprimées. Il s'agit du rayon maximal présent au stator (R_{sep}) et de la hauteur droite du stator. Les parties magnétiques dimensionnées (stator et rotor) doivent en effet tenir dans un cylindre de 20 mm de hauteur et de 45 mm de rayon. Les contraintes géométriques présentées ici sont prises en compte comme des restrictions de fabrication, mais elles peuvent également être modifiées au regard des limitations d'encombrement.

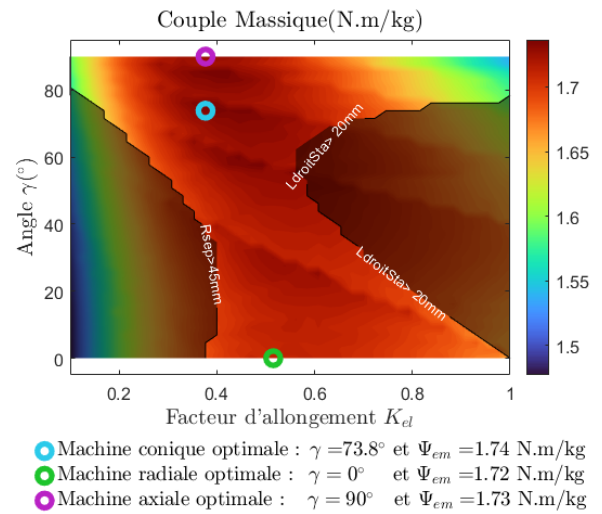


FIG. 6. Couple massique Ψ_{em} des machines issues du dimensionnement, les optimums des machines conventionnelles et coniques ainsi que les limitations de fabrications

Les résultats du dimensionnement montrent que pour ce cahier des charges, il existe une machine conique qui possède un meilleur couple massique par rapport à la meilleure machine radiale (1,7%) et axiale (2%). La différence de performance entre cette machine conique et les meilleures machines conventionnelles reste néanmoins faible pour ce cahier des charges. Les résultats relèvent également que le couple massique optimal est atteignable à 2% près, quel que soit l'angle d'inclinaison de la machine. Par conséquent, on ne peut pas s'appuyer uniquement sur le couple massique pour sélectionner un design.

Afin de sélectionner un design selon plusieurs critères de performances, un indicateur de performance η est introduit pour chaque design sur la plage (γ, K_{el}) tel que :

$$\eta = \sum_i \frac{k_i}{\max(P_i)} ((-1)^{\alpha_i} P_i + \alpha_i (1 + \min(P_i))) \quad (3)$$

Avec :

- P_i : La performance rentrant dans le calcul de l'indicateur.
- k_i : Le coefficient de pondération de la performance dans l'indicateur.
- α_i : Un coefficient valant 0 si la performance est à maximiser et 1 si elle est à minimiser.

Le premier indicateur de performance est élaboré pour prendre en compte à la fois le couple massique, qui doit être maximisé, ainsi que les pertes cuivre et fer, qu'il convient de minimiser. Le couple massique est pondéré par un coefficient de 2, tandis qu'un coefficient unitaire est appliqué aux pertes. Cet indicateur est représenté sur la plage d'étude tout en conservant les contraintes géométriques de fabrication (zones grises) sur la Figure 7.

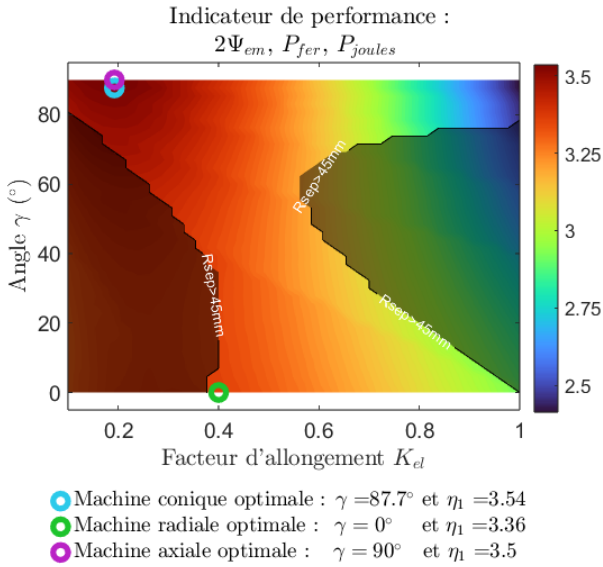


FIG. 7. Indicateur de performance η_1 (considérant les pertes et le couple massique) des machines issues du dimensionnement, les optimum des machines conventionnelles et coniques ainsi que les limitations de fabrications

L'indicateur de performance montre que, lorsqu'on prend en compte les pertes, le choix d'une machine optimale diffère de celui basé uniquement sur le couple massique. En effet, la machine optimale est une machine conique avec un angle d'inclinaison de 87.7° , valeur proche de la machine axiale optimale dont le coefficient d'allongement est de 0.2. La variation de performance reste faible, avec une différence relative de 0,6 % sur l'indicateur de performance. Cependant, cet indicateur écarte légèrement plus la machine radiale optimale, dont l'indicateur de performance est inférieur de 5 % à celui de la machine conique optimale.

Il est envisagé de construire un indicateur de performance plus global en utilisant l'ensemble des performances provenant du dimensionnement, tel que détaillé en bas de la Figure 4. La Figure 8 illustre cet indicateur sur la plage d'étude, avec une valeur unitaire pour les coefficients de pondération de performance (k_i) dans l'équation (3).

Les régions d'intérêt ont évolué des machines axiales ou coniques proches des axiales pour l'indicateur η_1 vers des machines radiales ou coniques proches des radiales pour cet indicateur global. La machine qui répond le mieux à cet indicateur global est une machine radiale avec un coefficient d'allongement de 0.4. Cette machine dépasse légèrement la meilleure machine conique (de 1,7 %) et devient plus avantageuse que la machine axiale optimale, avec une amélioration de l'indicateur de 7,9 %.

Le tableau 3 présente un résumé des diverses machines coniques, radiales et axiales qui sont optimales d'après les critères de sélection mentionnés précédemment.

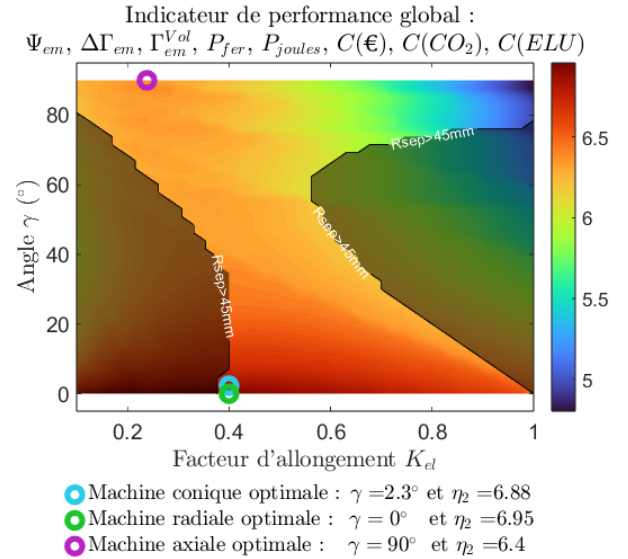


FIG. 8. Indicateur de performance η_2 global des machines issues du dimensionnement, les optimum des machines conventionnelles et coniques ainsi que les limitations de fabrications

TABLEAU 3. Comparaison des machines Radiale, Axiale et Conique selon différents critères. Les meilleures valeurs sont surlignées.

Critère		Conique	Radiale	Axiale
Ψ_{em}	Valeur [Nm/Kg]	1.74	1.72	1.73
	γ	73.8°	0°	90°
	K_{el}	0.4	0.5	0.4
η_1	Valeur	3.54	3.36	3.5
	γ	87.7°	0°	90°
	K_{el}	0.19	0.4	0.19
η_2	Valeur	6.88	6.95	6.4
	γ	2.3°	0°	90°
	K_{el}	0.4	0.4	0.24

La construction de l'indicateur de performance semble impacter directement la conception optimale, tant au niveau de la sélection des performances à inclure que de leur pondération. C'est au concepteur, en fonction de l'application, des contraintes du système et du contexte de fabrication, de déterminer l'importance relative des performances à maximiser ou à minimiser. En raison du processus de dimensionnement et de la méthode d'analyse communément appliquée aux topologies radiales, axiales et coniques, le choix d'une conception parmi ces options est effectué de manière équitable.

5. CONCLUSION

L'élaboration d'un modèle unifié des machines synchrones à aimants permanents, incluant les machines à entrefer conique, est détaillée de même que le processus de dimensionnement associé. Ce dernier présente certaines grandeurs constantes tout au long de la longueur active, tandis que d'autres varient. Le processus de dimensionnement est appliqué à un cahier des charges adapté à la fabrication d'un prototype. Les résultats des dimensionnements illustrés sur une certaine plage d'analyse ont montré une équivalence entre différentes machines en termes de couple massique, dans cette configuration (cahiers des charges, limites thermiques, variables dimensionnantes). Pour traiter cette équivalence, deux indicateurs de performance ont

été élaborés : le premier se concentre uniquement sur le couple massique et les pertes, tandis que le second prend en compte l'ensemble des performances résultant des dimensionnements. La sélection d'un design dépend de la construction de ces indicateurs, lesquels mettent en évidence certains designs optimaux de machines.

La méthode de dimensionnement, notamment la sélection des paramètres fixes et variables sur la longueur active, peut être modifiée. Par exemple, pour faciliter la fabrication, il peut être avantageux de maintenir une épaisseur d'aimant constante, ou bien, pour assurer une répartition homogène de la charge mécanique sur l'arbre, une méthode de dimensionnement garantissant un couple constant le long de l'entrefer serait intéressante. Cette méthode permet de comparer les machines conventionnelles en conservant un jeu de paramètres commun.

À noter cependant que cette méthode ne prend pas en compte les difficultés de fabrication propres à chaque architecture et qu'elle doit donc s'accompagner d'une analyse complémentaire.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Expleo group pour sa participation et son intérêt porté à l'étude présentée.

7. RÉFÉRENCES

- [1] H. El Hadraoui, M. Zegrari, A. Chebak, O. Laayati, and N. Guennouni, "A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 13, p. 65, Apr. 2022. Number : 4 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [2] A. Ghayth and M. Şimşir, "Recent trends and challenges of electric motor technologies," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*, vol. 1, pp. 21–28, 06 2023.
- [3] J. de Santiago, H. Bernhoff, B. Ekegård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, "Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles : A Review," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, pp. 475–484, Feb. 2012.
- [4] B. Mecrow and A. Jack, "Efficiency trends in electric machines and drives," *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4336–4341, 12 2008.
- [5] A. Parviainen, M. Niemela, J. Pyrhonen, and J. Mantere, "Performance comparison between low-speed axial-flux and radial-flux permanent-magnet machines including mechanical constraints," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, pp. 1695–1702, May 2005.
- [6] M. Lehr, K. Reis, and A. Binder, "Comparison of axial flux and radial flux machines for the use in wheel hub drives," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 132, pp. 25–32, 02 2014.
- [7] P. Kascak, R. Jansen, and T. Dever, "Conical bearingless motor generators," Tech. Rep. LEW-17638-1/39-1/40-1, Mar. 2008.
- [8] G. Munteanu, A. Binder, and S. Dewenter, "Five-axis magnetic suspension with two conical air gap bearingless PM synchronous half-motors," in *Automation and Motion International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives*, pp. 1246–1251, June 2012.
- [9] S. Roggia, F. Cupertino, C. Gerada, and M. Galea, "Axial Position Estimation of Conical Shaped Motors for Aerospace Traction Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 5405–5414, Nov. 2017.
- [10] J. Wang, S. Huang, C. Guo, and Y. Feng, "Magnetic field and operating performance analysis of conical-rotor permanent magnet synchronous motor," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, pp. 181–187, Mar. 2018.
- [11] M. Hosek, J. Krishnasamy, S. Sah, and T. Bashaw, "Spray formed hybrid field electric motor," p. V003T01A034, American Society of Mechanical Engineers, Aug. 2016.
- [12] U. Demir and M. C. Akuner, "Design and analysis of radialaxial induction motor," *Electrical Engineering*, vol. 100, Dec. 2018.
- [13] L. Coutant, T. Huguet, and F. Pigache, "First order modeling and performance evaluation of a conical permanent magnet synchronous machine," *IET Conference Proceedings*, vol. 2023, pp. 34–40, Oct. 2023. Publisher : The Institution of Engineering and Technology.

- [14] A. Giraud, *Caractérisation des matériaux magnétiques et modélisation des pertes fer dans le stator des machines électriques fonctionnant à haute fréquence*. These de doctorat, Toulouse, INPT, Dec. 2017.
- [15] S. Nategh, A. Boglietti, and M. Jahirul I., "A Comprehensive Study on Different Motor Topologies Used in Passenger Car EV Segment," in *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1–6, Sept. 2024.
- [16] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, Feb. 2009.