



HAL
open science

Etat de l'art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides

Koua Malick Cisse, Sami Hlioui, Yuan Cheng, M'Hamed Belhadi

► To cite this version:

Koua Malick Cisse, Sami Hlioui, Yuan Cheng, M'Hamed Belhadi. Etat de l'art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981853

HAL Id: hal-02981853

<https://hal.science/hal-02981853>

Submitted on 28 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etat de l'art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides

K. Malick Cissé^{1,3}, Sami Hlioui², Yuan Cheng³, M'Hamed Belhadi⁴
Mohamed Gabsi¹

¹SATIE, CNRS, ENS Paris-Saclay, Cachan, France

²SATIE, CNRS, CNAM, Paris-Saclay, Cachan, France

³Groupe PSA, 78140 Vélizy, France

⁴Groupe PSA, 92250 La Garenne Colombe, France

RESUME – Cet article expose un état de l'art des machines électriques équipant les récents véhicules électriques et hybrides déjà commercialisés. Les différentes topologies de ces machines seront présentées et une analyse approfondie est détaillée pour six machines particulières (Prius 2004, Camry 2007, Lexus 2008, Prius 2010, Honda Accord 2014, BMW i3 2016).

Mots-clés— *Machines électriques, Aimants permanents, Véhicules électriques, Véhicules Hybrides.*

1. INTRODUCTION

Le secteur du transport a un impact significatif sur l'environnement en termes de pollution et de production de gaz à effet de serre. La motorisation électrique apparaît donc comme l'une des solutions les plus intéressantes pour réduire les émissions et augmenter le rendement de la chaîne de traction. Les nombreux besoins et contraintes en terme de motorisation électrique conduisent alors au dimensionnement d'une machine électrique optimisée pour chaque application. En analysant les différentes solutions de motorisation électrique ou hybride déjà commercialisées, nous constatons une diversité des solutions de propulsion aussi bien en termes de technologie de machines électriques, qu'en termes de dimensionnement de ces structures.

Dans cet article, nous commencerons par présenter les différentes technologies utilisées pour ensuite focaliser notre étude sur les machines synchrones à aimants permanents qui sont les plus utilisées pour ce type d'application. Ces machines n'étant pas dimensionnées pour les mêmes cahiers des charges, une analyse basée sur des éléments technologiques et des grandeurs normalisées sera présentée.

2. TECHNOLOGIES DES MACHINES EXPLOITEES POUR LA TRACTION ELECTRIQUE ET HYBRIDE

Les principales exigences pour les machines électriques en terme de traction sont principalement : (a) une densité de couple et une densité de puissance élevées, (b) un couple constant important à basse vitesse pour le démarrage et la montée de pente (c) une large plage de vitesse à puissance constante (environ 3-4 fois la vitesse de base), (e) un rendement élevé sur une grande plage de vitesse.

Les solutions de motorisation des véhicules hybrides et électriques, actuellement commercialisées, se basent sur des machines alternatives triphasées. Alors que la majorité des véhicules exploitent des machines synchrones à aimants

permanents (Toyota Prius 2004 et 2010, BMW i3 et i8, Nissan Leaf 2012, Toyota Camry 2007, Lexus 2008, Honda Accord 2014) à cause de leurs performances volumiques et massiques élevées en couple et puissance, quelques solutions exploitent des technologies différentes. En effet, la chaîne de traction de la Tesla Motors est basée sur une machine asynchrone à cages en cuivre permettant ainsi de réduire les pertes au rotor et ainsi augmenter le couple de la machine. La ZOE de Renault se base sur la machine synchrone à rotor bobinée à pôles saillants.

Les machines asynchrones sont très peu utilisées par les constructeurs automobiles. Effectivement, seul TESLA MOTORS utilise cette technologie pour son modèle X. Ce véhicule dispose d'un moteur asynchrone de puissance maximale de 194 kW et d'un couple maximal de 310 N.m. Pour son Model 3, TESLA a fait le choix d'utiliser une machine à aimants car selon l'ingénieur en chef de la conception des moteurs Konstantinos Laskaris, la machine à aimants était celle qui minimisait leur fonction coût pour le cahier des charges du Model 3. Les machines asynchrones ne possèdent pas d'aimants au rotor, ce qui réduit leurs coûts, elles sont robustes et nécessitent très peu d'entretien. L'un des inconvénients majeurs de la machine asynchrone est sa quantité de pertes joules au rotor qui est difficile à évacuer. D'où le choix d'utiliser des rotors à cages en cuivre afin de réduire les pertes [1].

La machine synchrone à rotor bobiné ne dispose pas d'aimants au rotor, ce qui a l'avantage de réduire les coûts de la machine. Cette topologie de machine bénéficie d'un degré de liberté supplémentaire liée au courant d'excitation, lui donnant ainsi un avantage majeur pour le fonctionnement à vitesse variable, notamment à haute vitesse en contrôlant le flux magnétique créé au rotor. Cette machine est notamment utilisée par RENAULT pour la conception de sa ZOE qui dispose d'une puissance maximale de 80 kW et d'un couple maximum de 225 N.m. La présence de bobines au rotor génère des pertes supplémentaires qui font que cette machine ait un rendement inférieur aux machines ne disposant pas de bobinages au rotor [2].

L'intérêt porté à l'égard des machines à reluctance variable provient principalement de son faible coût de production et de sa simplicité de fabrication. Les principaux inconvénients de cette machine sont sa commande difficile en courant, ses fortes ondulations de couple et le bruit acoustique généré. En plus, le fonctionnement en mode générateur de cette machine fournit un courant fortement ondulé nécessitant beaucoup de moyens de filtrage disposés aux bornes de la batterie. Ce type de machine

est toujours en cours d'étude et aucune voiture commercialisée ne dispose de ce type de motorisation [3].

Les machines synchrones à aimants permanents sont les plus utilisées pour les applications automobiles. C'est le cas notamment pour Toyota avec ses Prius et BMW avec ses modèles i3 et i8. Le coût des aimants est un critère très important dans le choix de la motorisation pour les applications automobiles. D'un point de vue performances pures, la machine synchrone est celle qui dispose d'une meilleure densité massique et volumique de puissance, de couple.[4]

Pour la suite de l'étude, nous nous focaliserons sur ce dernier type de machines électriques étant son exploitation étendue pour la motorisation des véhicules hybrides et électriques.

3. LES MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS POUR LES VEHICULES ELECTIQUES/HYBRIDES

Dans cette partie, une analyse plus approfondie de six machines synchrones à aimants permanents utilisées dans des véhicules déjà commercialisées est présentée. Ces machines sont celles qui équipent la Toyota Prius 2004, 2010, la Toyota Camry, la Honda Accord, la BMW i3 et la Lexus LS600. La géométrie et les performances de chaque machine sont détaillées. Différents éléments technologiques sont également présentés

3.1. Toyota Prius 2004

La Toyota Prius 2004 est un véhicule hybride disposant d'un moteur électrique de 50kW et d'une vitesse maximale de 6000tr/min. C'est une machine synchrone à aimants en V au rotor et dispose de 48 encoches, 8 pôles et un couple max de 400 N.m. Son alimentation en tension est de 500V. Le refroidissement de la machine est à huile. La cartographie du moteur est présentée à la

Fig 1. Les zones de meilleurs rendements sont comprises entre 1750-3000 t/min et 50-150 N.m pour des valeurs de 93-94%. Sur cette cartographie, deux zones de plus faibles rendements peuvent être constatées. La première est celle à faible vitesse et à fort couple qui correspond au démarrage du véhicule et aux montées de pente. L'autre, est la zone à haute vitesse et bas couple qui correspond à un fonctionnement à haute vitesse du véhicule. Cette zone est moins sollicitée car pour un véhicule hybride, le moteur thermique assure en générale ces points de fonctionnement [5].

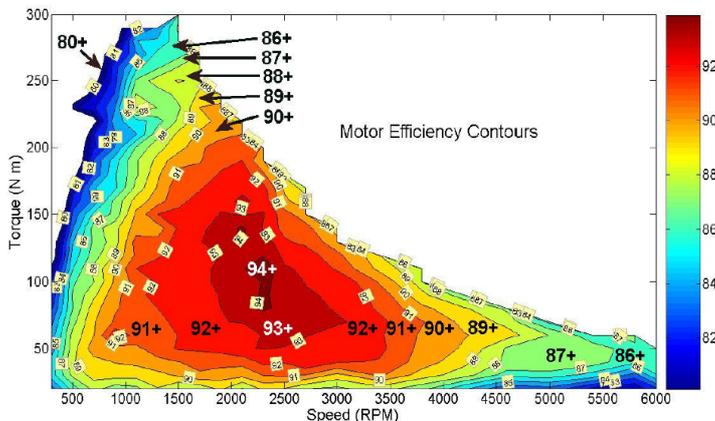


Fig 1: Cartographie du Moteur Synchrone de la Prius 2004 [5]

La Fig 2 représente l'évolution du couple mécanique de la machine en fonction de la position mécanique du rotor (angle de calage) et du courant d'alimentation de la machine. L'évolution du couple maximum en fonction du courant, nous montre que la saturation magnétique de la machine reste faible même pour un couple de 350 N.m.

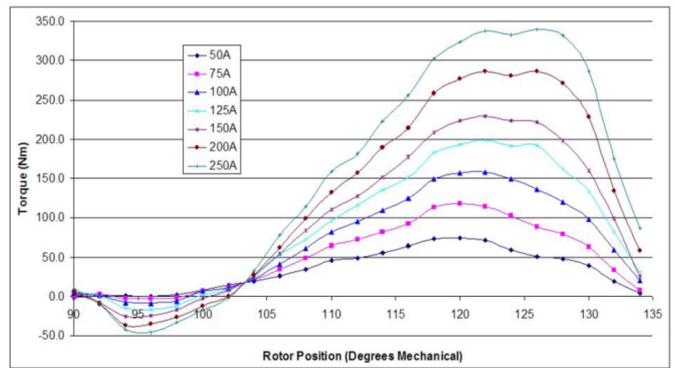


Fig 2: Couple vs Angle de contrôle vs Courant statorique

3.2. Toyota Camry 2007

La Toyota Camry est un véhicule hybride comportant un moteur électrique de 70 kW. Le passage de la Prius 2004 à la Camry a vu Toyota augmenter la vitesse maximale de son moteur électrique. En effet celui-ci est passé de 6000 tr/min à 14000 tr/min. La tension d'alimentation du bus DC est de 650V. L'augmentation de vitesse a donc permis à Toyota d'augmenter la puissance tout en réduisant le couple de la machine, passant de 400 N.m à 270 N.m, ce qui a permis un gain en volume et masse de la machine qui s'est traduit donc par une meilleure densité de puissance et puissance spécifique. Les masses du stator et du rotor de la Camry sont respectivement de 18 kg et 5,7 kg et celles de la Prius 2004 de 25,9 kg et 6,8 kg. Ces masses incluent le bobinage du stator, les tôles magnétiques et les aimants au rotor, mais pas le système de refroidissement et l'arbre du rotor de chaque machine.[6]

Tableau 1. Puissance Spécifique et Densité de puissance de la Camry 2007 et Prius 2004 (système de refroidissement inclus) [6]

Parameter	Camry	Prius
Motor peak specific power (without converter), kW/kg	70/-41.7 = ~1.68	50/45.0 = 1.11
Motor peak power density, kW/L	70/-14.8 = ~4.73	50/15.4 = 3.25

La géométrie générale de la Camry est proche de celle de la Prius 2004. Tout comme la Prius 2004, les aimants utilisés sont des Néodymes Fer Bore (NdFeB) et la configuration des aimants du rotor est en V, mais cette fois-ci, il existe un petit support métallique entre les aimants où il existait de l'air dans le cas de la Prius 2004. Ce qui a permis notamment à la Camry d'avoir une meilleure tenue mécanique en haute vitesse.

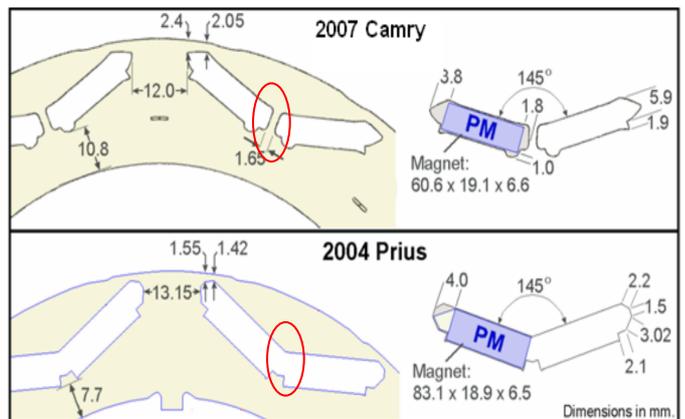


Fig 3: Rotor de la Camry 2007 et Prius 2004 [6]

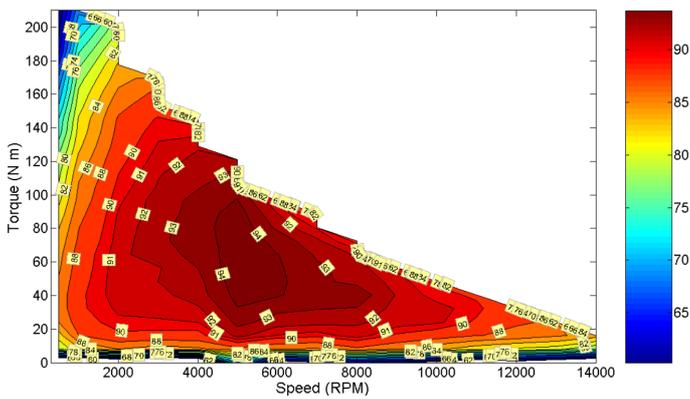


Fig 4: Cartographie du Moteur Synchrone de la Camry 2007 [6]

3.3. Lexus 2008

La Lexus 2008 est un véhicule hybride disposant d'un moteur de 110 kW. Tout comme la Camry, le moteur électrique de la Lexus est une machine synchrone à aimants permanents. Une toute première observation que l'on peut faire sur le moteur électrique de la Lexus 2008 est l'augmentation de sa longueur active et de la réduction de son diamètre par rapport à la Camry 2007. Les tôles statoriques des deux machines de la Fig 5 illustrent très bien cette différence. Le couple maximum et la vitesse maximale de la Lexus sont respectivement de 300N.m et 10300 tr/min tandis que ceux de la Camry sont de 270 N.m et de 14000 tr/min.[7]



Fig 5: Stator de la Lexus 2008 [7]

Les modifications géométriques apportées par la Lexus ont eu un impact sur la masse et le volume des différentes composantes de la machine. En effet, la masse du stator est passée de 18 kg pour la Camry à 18,75 kg pour la Lexus. La masse du rotor a augmenté en passant de 9 kg à 11,9 kg. Cette grande différence de masse au rotor provient du fait que les deux structures de rotor de la machine sont très différentes. En effet, le passage à la Lexus a vu l'ajout au rotor d'une fente supplémentaire pour y insérer un aimant dans la précédente structure en V comme le montre la Fig 6. Cet ajout a eu pour effet aussi de réduire la sailliance du moteur. Un trou a également été ajouté dans la structure du rotor afin de réduire sa masse. Nous remarquons donc une évolution certes au niveau des masse et volume de la machine mais avec une très nette évolution de la puissance de la machine qui est passée de 70 kW à 110 kW. Ce qui permet à la Lexus d'avoir une meilleure puissance spécifique et densité de puissance que celle de la Camry comme illustré sur le Tableau 2.

Tableau 2. Puissance spécifique et densité de puissance de la Lexus, Camry et Prius 2004(système de refroidissement inclus) [7]

Parameter	LS 600h	Camry	Prius
Motor peak SP (without converter), kW/kg	110/44.7 = 2.46	70/41.7 = 1.68	50/45.0 = 1.11
Motor peak PD, kW/L	110/16.7 = 6.59	70/14.8 = 4.73	50/15.4 = 3.25

De façon générale, réduire le diamètre extérieur du rotor permet de faire monter la machine en vitesse. En effet, en réduisant le diamètre extérieur de la machine, cela réduit la force centrifuge agissant sur les aimants de la machine, ce qui permet à la

machine d'avoir une meilleure tenue mécanique. Cependant dans le cas de la Lexus, l'ajout d'une nouvelle couche d'aimant à la structure en V nécessite de faire un compromis entre la tenue mécanique de la structure et la distance minimale de 1,45 mm correspond à la distance entre la nouvelle couche d'aimant et la périphérie du rotor (Fig 6). Aussi l'augmentation de la longueur du rotor introduit un risque plus important de flexion. C'est pour ces raisons notamment que la vitesse annoncée pour la Lexus n'est que de 10300 tr/min alors que celle de la Camry est de 14000 tr/min [7].

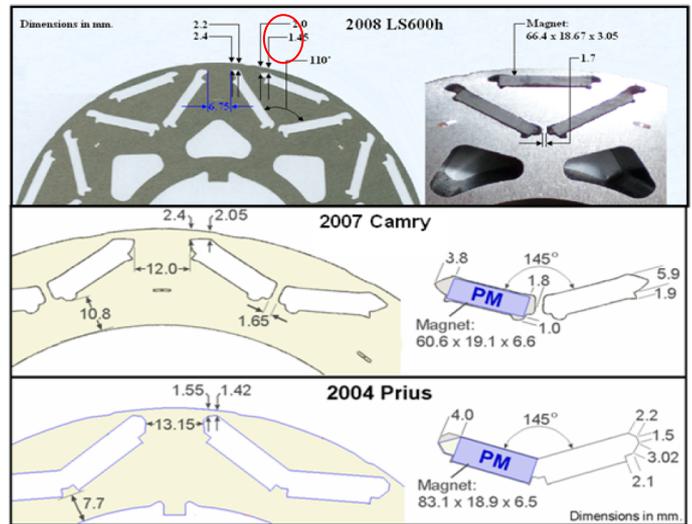


Fig 6: Rotor de la Lexus 2008, Camry 2007, Prius 2004 [7]

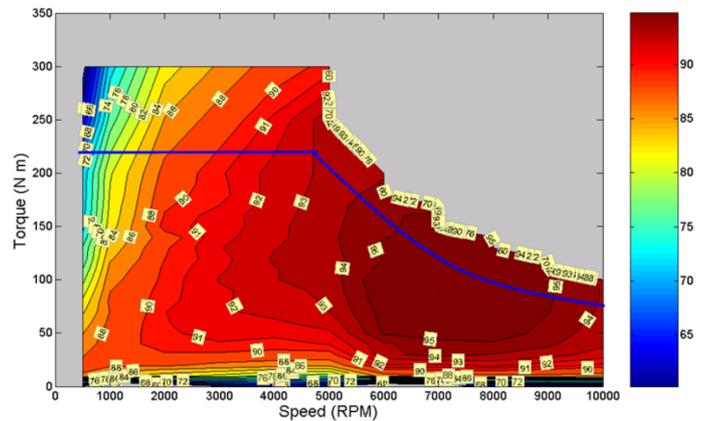


Fig 7: Cartographie du Moteur Synchrone de la Lexus 2008 [7]

3.4. Toyota Prius 2010

La Toyota Prius 2010 est une version améliorée de la Prius 2004. Un changement notable de ce moteur est la nouvelle forme du rotor de la machine. La Fig 8 nous montre des ouvertures au niveau du rotor de la machine afin de réduire sa masse. La structure du rotor est toujours en V. Le moteur de la Prius 2010 a une puissance de 60 kW, une vitesse maximale de 13500 tr/min et un couple maximum de 205 N.m. Nous remarquons qu'en comparaison avec la Prius 2004, la vitesse maximale a été multipliée par 2 et le couple maximum divisé par 2. Les nombres d'encoches au stator et de pôles restent identiques à ceux de la Prius 2004 qui sont de 48 et 8. La tension alimentation du bus continu est de 650 V [8].



Fig 8: Rotor Prius 2010 (droite), Lexus 2008 et Camry 2007 [8]

La masse du stator de la Prius 2010 est de 16 kg. Les masses de la Lexus 2008, Camry 2007 et Prius 2004 sont respectivement de 18,75 kg, 18 kg, 25,9 kg. La quantité d'aimants utilisés dans la Prius 2010 a également été réduite à 0,768 kg. Les quantités d'aimants de la Lexus 2008, Camry 2007 et Prius 2004 sont respectivement de 1,349 kg, 0,928 kg, 1,232 kg. En prenant en compte la masse et volume totale de la machine incluant son système de refroidissement, les densités de puissances et puissances spécifiques de la Prius 2010, Lexus 2008, Camry 2007 et Prius 2004 sont représentées dans le Tableau 3. Nous remarquons une légère évolution de la densité de puissance et la puissance spécifique de la Prius 2004 à la Prius 2010. Ces grandeurs restent similaires à celles de la Camry 2007. Par contre, la densité de puissance et la puissance spécifique restent inférieures à celles de la Lexus 2008. Cette différence provient particulièrement du design allongé du rotor de la Lexus 2008, de son meilleur système de refroidissement qui lui a permis notamment de monter en puissance.

Tableau 3. Puissance spécifique et densité de puissance de la Prius 2010, Lexus, Camry et Prius 2004 (système de refroidissement inclus) [8]

Parameter	2010 Prius	LS 600h	Camry	2004 Prius
Motor peak SP (without converter), kW/kg	60/36.7 = 1.6	110/44.7 = 2.46	70/41.7 = 1.68	50/45.0 = 1.11
Motor peak PD, kW/L	60/12.5 = 4.8	110/16.7 = 6.59	70/14.8 = 4.73	50/15.4 = 3.25

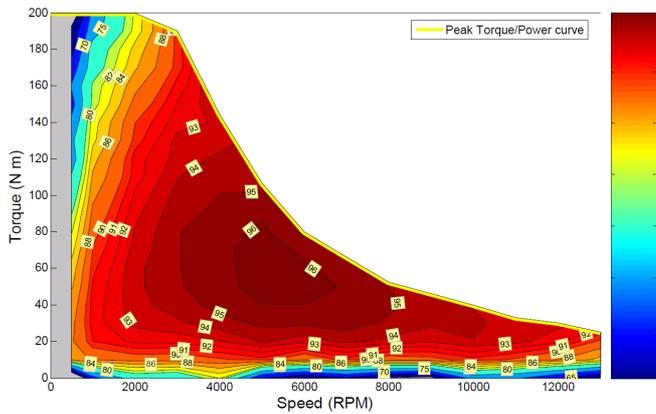


Fig 9: Cartographie du Moteur Synchrone de la Prius 2010 [8]

3.5. Honda Accord 2014

La Honda Accord 2014 est un véhicule hybride et dispose comme la Prius 2010 d'un moteur synchrone à aimants permanents. La puissance maximale et le couple maximal de cette machine sont respectivement de 124 kW et 307 N.m. La vitesse maximale de la machine est de 12000 tr/min. Le couple maximum est atteint pour un courant de 425 A. La tension d'alimentation du bus continu est de 700V. Le stator comporte 48 encoches et le rotor 8 pôles. Les masses (sans le système de refroidissement) respectives du stator et du rotor sont de 20,8 kg et 11,8 kg qui sont largement supérieures à celles de la Prius 2010 qui sont 16 kg pour le stator et 6,7 kg pour le rotor. Cet écart important de masse de la machine provient

principalement de la montée en puissance de la machine. En effet, la puissance de la Prius 2010 de 60 kW a été doublée avec la Honda en passant à 124 kW. Il a donc fallu pour réaliser cette performance modifier les dimensions géométriques de la machine, donc une modification de la masse de la machine. La structure des aimants en V est la même que celle de la Prius 2010. La forme géométrique des trous au rotor a été modifiée afin de gagner en masse. Ce rotor contient également une fente ovale comme indiqué sur la Fig 10 afin de réduire les contraintes mécaniques au niveau du rotor.[9] [10]

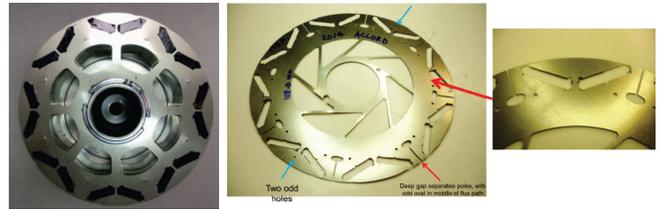


Fig 10: Rotor Prius 2010, Honda Accord 2014 [10]

Le moteur est capable de fonctionner pendant 1 heure à 50 kW sans que la température des bobines ne dépasse les 135°C. Cette bonne tenue en température est également due à son système de refroidissement particulier comme représenté par la Fig 11. Il y'a des trous qui envoient des sprays d'huile sur les enroulements statoriques de la machine.

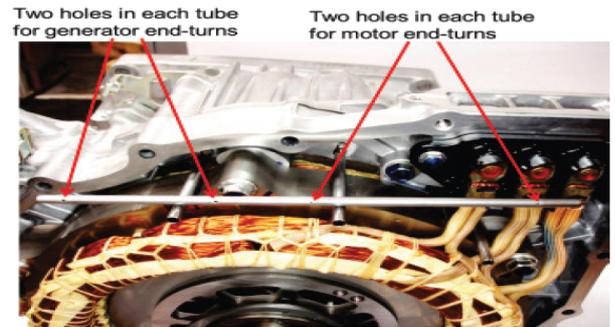


Fig 11: Système de refroidissement de la Honda Accord 2014 [10]

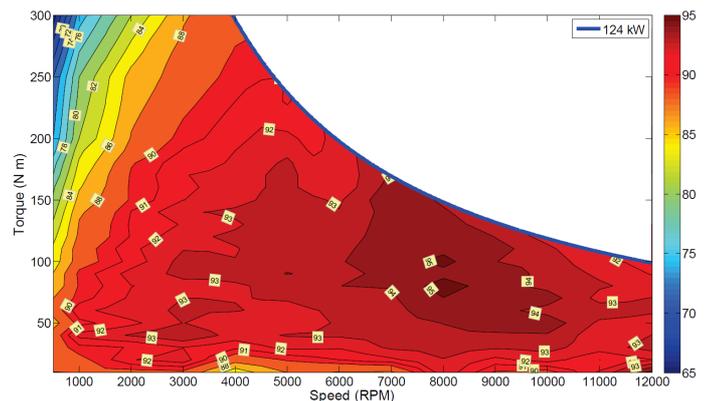


Fig 12: Cartographie du Moteur Synchrone de la Honda Accord 2014 [10]

3.6. BMW i3

La BMW i3 est un véhicule purement électrique contrairement aux véhicules précédents qui sont hybrides. La machine électrique équipant la BMW i3 est la même qu'utilise le véhicule hybride BMW 225ex. Le moteur de la BMW a une puissance de 125 kW et un couple maximal de 250 N.m. Ce moteur a un système de refroidissement particulier qui est directement posé sur le stator comme le montre la Fig 13. La vitesse de la machine est de 11500 tr/min.

Tableau 4. Caractéristiques des moteurs électriques étudiés

Design features	2016 BMW i3	2014 Honda Accord (motor)	2010 Prius	2008 Lexus LS 600h	Toyota Camry 2007	2004 Prius
Motor peak power rating (kW)	125	124	60	165	105	50
Motor peak torque rating (N.m)	250	307	207	300	270	400
Base speed (rpm)	4000	4000	2000	5000	2000	1500
Rotational speed rating (rpm)	11400	12000	13500	10230	14000	6000
Number of rotor poles	12	8	8	8	8	8
Bi-direc dc-dc conv output voltage max (Vdc)	360	700	650	650	650	500
Number of stator slots	72	48	48	48	48	48
Stator OD (mm)	242	291,3	264	200	264	269
Stator ID(mm)	180	196,6	161,9	130,86	161,9	161,9
Stator stack length (mm)	132	61,7	50,8	135,4	60,7	84
Rotor OD (mm)	178,6	195,02	160,4	129,1	160,5	160,5
Motor active mass volumique(kg/L)	5,7	7,9	8,0	7,2	8,1	7,6
Motor active volume (L)	6,1	4,1	2,8	4,3	3,3	4,8
Motor active mass (kg)	34,4	32,6	22,4	30,7	27,0	36,1
active Power density (kW/L)	20,6	30,2	21,6	38,8	31,6	10,5
active Power specific (kW/kg)	3,6	3,8	2,7	5,4	3,9	1,4
Magnet per Kilowatt (grams/Kw)	15,5	10,0	12,8	8,2	8,8	24,6
Active Torque density (N.m/L)	41,2	74,7	74,5	70,5	81,3	83,83
Active Torque specific (N.m/kg)	7,3	9,4	9,6	9,8	10	11

série et chaque pôle est connecté en parallèle avec les autres. Le nombre de spires par phase est de 9 et la tension d'alimentation de la machine est de 360V contrairement aux machines présentées dans les parties précédentes dont la tension moyenne est de 650 V. Mais pour cette machine, les bobines d'une même phase sont mis en parallèles [11].

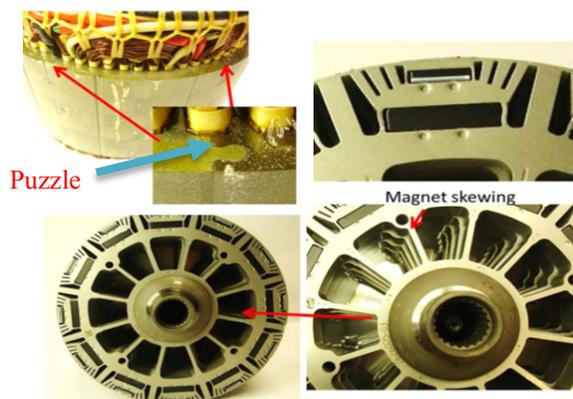


Fig 14: Rotor de la BMW i3 [11]

L'assemblage du stator est réalisé en puzzle comme le montre la Fig 14, ce qui permet de réduire les coûts de fabrication de la machine. La masse totale du rotor incluant l'arbre, les aimants et les tôles magnétiques est de 14 kg. Le moteur est de type aimants permanents avec 2 couches d'aimants parallèles entre elles. Le rotor est formé de gros et petits trous parallèles entre elles. Les gros trous permettant d'améliorer le couple réductant et de réduire le court-circuit des aimants permanents au niveau du rotor. Les petits trous permettent quant à eux de réduire les pertes fer de la machine dans les zones à hautes vitesses de fonctionnement [12]. Le rotor est vrillé au niveau des aimants disposés en 6 niveaux long de la longueur du rotor « magnet skewing ». Cette particularité permet notamment de réduire les ondulations de couple [11].

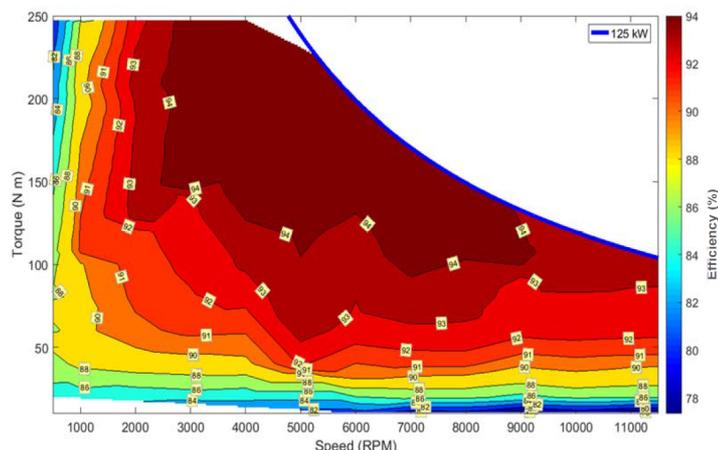


Fig 15: Cartographie du Moteur Synchrone de la BMW i3 2016 [11]

4. COMPARAISON DES MOTEURS ELECTRIQUES

Dans cette partie nous nous proposons de faire une étude comparative des différents moteurs présentés précédemment. Nous comparerons notamment la puissance spécifique, la quantité d'aimants utilisés par kilowatt. La masse totale de la machine utilisée pour le calcul de la puissance spécifique comprend la masse de son système de refroidissement. La puissance spécifique est calculée avec la puissance maximale fournie par chaque constructeur associé à son propre système de refroidissement. La Fig 16 représente la puissance spécifique pour les différentes machines synchrones à aimants permanents étudiées. La machine de la BMW i3 a la meilleure puissance

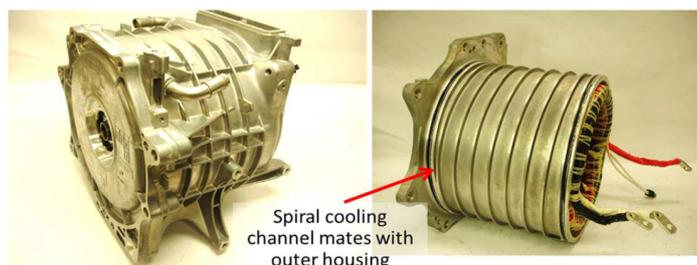


Fig 13: Système de refroidissement de la BMW i3

Le stator dispose de 72 encoches et de 12 pôles au rotor. Le nombre d'encoches par phase et par pôle est de 2. Le bobinage de la machine est un bobinage concentrique série/parallèle. En effet, les 2 encoches par pôle et par phase sont connectées en

spécifique avec 3 kW/kg suivie par la Lexus et la Honda avec respectivement une puissance spécifique de 2,5 kW/kg et 2,2 kW/kg.

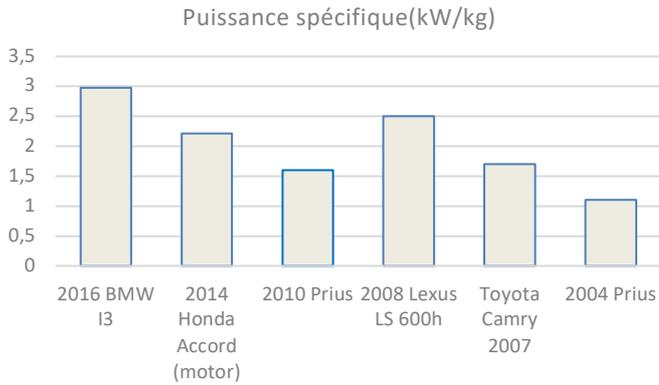


Fig 16: Comparaison des puissances spécifiques

Quant à la quantité d’aimants utilisée par kilowatt (Fig 17), nous remarquons que la Prius 2004 et la Nissan Leaf 2012 sont celles qui utilisent le plus d’aimants par kilowatt, environ 2 fois, voire 3 fois plus que la quantité d’aimants utilisés par les autres machines. La grande quantité d’aimants par kilowatt utilisés dans la Prius 2004 peut s’expliquer par l’amélioration des performances énergétiques des aimants permanents NdFeB mais également par le cahier des charges de l’application. En effet, le moteur électrique de la Prius 2004 doit développer le plus grand couple 400Nm et sa zone de défluxage est la plus réduite des 6 machines comparées dans cette étude. Ceci implique alors une augmentation de la quantité d’aimant pour pouvoir atteindre les performances requises à faibles pertes.

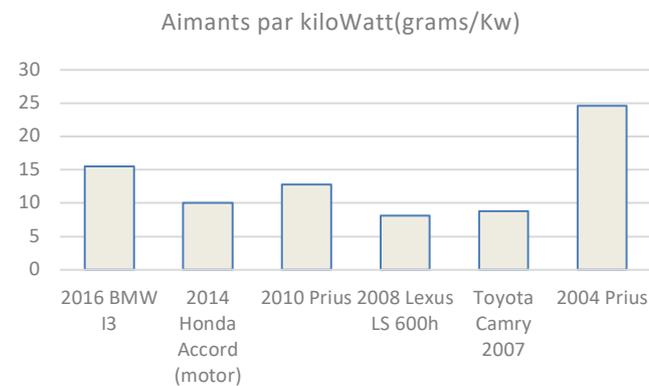


Fig 17: Comparaison des quantités d’aimants utilisés par kilowatt

Afin d’avoir plus d’éléments de comparaison pour les moteurs électriques utilisés, nous avons représenté un graphe en radar de ces différentes machines (Fig 18). Les paramètres qui y sont présentés ont été normalisés. Tout d’abord nous pouvons constater qu’aucune des machines ici étudiées ne permet de dominer (être égale à 1) les autres machines sur l’ensemble des critères présentés. Nous pouvons également remarquer que la Prius 2004 a le couple spécifique le plus important, ce qui peut justifier la quantité importante d’aimants permanents qui y est utilisée. Un exemple de critères les plus dimensionnant d’une machine électrique pour une application automobile en ordres de priorité décroissante est : le coût de la machine, le rendement, la masse et la plage de fonctionnement du moteur [13]. Cet exemple de critères de dimensionnement peut être amené à

évoluer en fonction du cahier des charges proposées et de la gamme de véhicules visée.

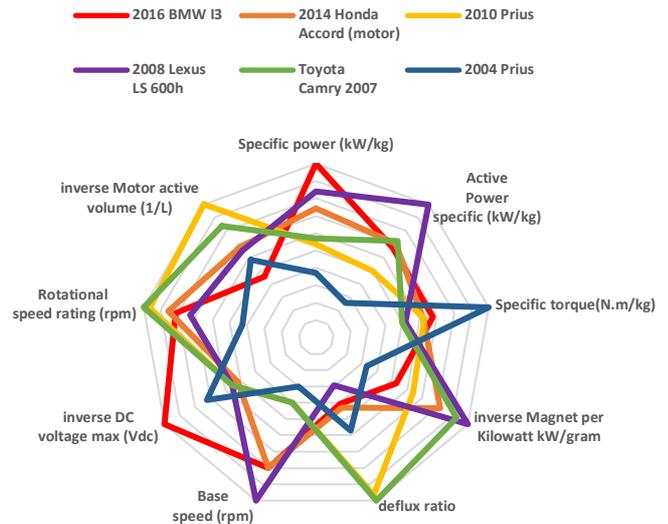


Fig 18: Radar de comparaison des moteurs électriques

La puissance spécifique active est définie comme étant la puissance maximale de la machine divisée par la masse des parties actives de la machine (tôles magnétiques, aimants permanents et bobines de la machine). Nous définissons de façon analogue le couple spécifique actif comme étant le couple maximal divisé par la masse active de la machine. Les grandeurs spécifiques actives ne prennent donc pas en compte le carter et le système de refroidissement de la machine. La Lexus 2008, la Camry 2007 et la Honda Accord 2014 ont des valeurs similaires en terme de couple spécifique actif.

En comparant les puissances spécifiques actives (Tableau 4), nous remarquons que la Honda Accord 2014, la BMW i3 et la Toyota Camry 2007 se valent. La Lexus 2008 est celle qui est la meilleure en terme de puissance spécifique active avec une augmentation de 40%. Cette haute valeur de puissance spécifique active peut s’expliquer par le fait que la Lexus est celle qui dispose de la vitesse de base la plus grande (Tableau 4), et aussi au fait que les valeurs des couples spécifiques actifs de ces machines soient similaires. Par contre, la comparaison en terme de puissance spécifique en prenant en compte la masse totale de la machine (donc le système de refroidissement) place la BMW i3 2016 au premier rang. Le système de refroidissement a donc une importance capitale sur les performances de la machine. En effet, la température des différents éléments du moteur influe directement sur la génération de couple, le contrôle et rendement du moteur. La diversité du cahier des charges des véhicules présentés dans cet article complexifie l’analyse des moteurs électriques étudiés. Un dimensionnement de ces différentes topologies de machines basé sur le même cahier des charges permettra une meilleure analyse et compréhension sur le choix d’une topologie ou d’une autre.

5. CONCLUSIONS

Cet article a présenté un état de l’art des différentes machines électriques exploitées et commercialisées pour des véhicules électriques ou hybrides. En premier lieu, nous avons présenté différentes topologies de machines pour différents modèles de voitures VE/HEV déjà commercialisées. De cette première analyse, nous avons constaté que la machine synchrone à

aimants permanents est la structure la plus exploitée malgré une fluctuation importante des prix des aimants permanents. Cependant, ses performances massiques et volumiques aussi bien en couple qu'en puissance ont poussé un nombre important des constructeurs automobiles à adopter cette solution. En second lieu, une analyse comparative des performances de 6 machines électriques à aimants permanents a été présentée. Différents critères normalisés ont été choisis. En comparant les puissances spécifiques et puissances spécifiques actives de ces différentes machines, nous avons pu voir l'importance qu'a le système de refroidissement sur les performances et le dimensionnement de ces machines.

6. REFERENCES

- [1] F. Chai, Y. Li, P. Liang, and Y. Pei, "Calculation of the Maximum Mechanical Stress on the Rotor of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 6, pp. 3420–3432, 2016.
- [2] L. Vido, "Etude d'actionneurs électriques à double excitation destinées au transport. Dimensionnement de structures synchrones," Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2004.
- [3] J. De Santiago *et al.*, "Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 475–484, 2012.
- [4] D. Prieto, "Modélisation et optimisation des machines synchro-réductantes à aimants permanents et de leur électronique," CentreSupélec, 2015.
- [5] M. Cheng and P. Han, "A Dual-Stator Brushless Doubly-Fed Induction Motor for EV / HEV Applications," 2014.
- [6] T. a. Burrell *et al.*, *Evaluation of the 2007 Toyota Camry hybrid synergy drive system*, no. April. 2008.
- [7] V. Technologies, *Evaluation of the 2008 Lexus Ls 600H Hybrid Synergy Drive System 2008 Lexus Ls 600H Hybrid Synergy*, no. January. 2009.
- [8] T. Burrell, S. Campbell, C. Coomer, C. Ayers, A. Wereszczak, and J. Cunningham, *Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system*, no. March. 2011.
- [9] B. Ozpineci and P. Manager, *Electrical and Electronics Systems Research Division Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program*, no. November. 2014.
- [10] B. Ozpineci and P. Manager, *Electrical and Electronics Systems Research Division Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program*, no. November. 2015.
- [11] M. Olszewski, *Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Machinery Program*, no. October. 2016.
- [12] G. S. Joeg Merwerth, Jens Halbedel, "Brevet BMW i3," N° US2012/0267977 A1, 2013.
- [13] S. G. Mustafa Karamuk, Mehmet Emin Çepni, "Electric Vehicle Powertrain Development –Conceptual Design and Implementation," 2013.