

Rapport de veille technologique - Technifutur Campus Francorchamps - Projet PAE

Date de création : 18/06/2020

Rédacteur : Marc NELIS

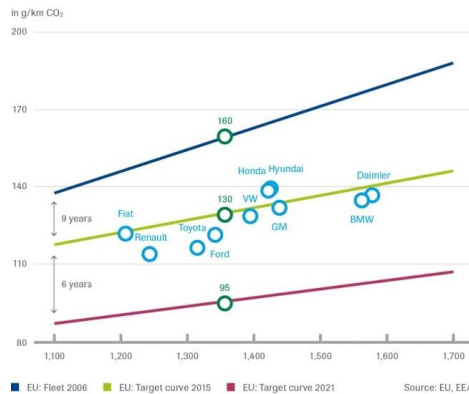
Technologie concernée

Domaine concerné : les moteurs électriques pour automobile

Lien avec secteur automobile : motorisation propre, zéro émission

Contexte

Le marché automobile est fortement influencé par les normes environnementales qui conduisent les constructeurs à développer des solutions alternatives aux motorisations EURO 6 à l'essence et au diesel. En ce qui concerne les polluants classiques HC, CO, NOx et FP, les systèmes de post-traitements sont de plus en plus coûteux. Il est d'usage de dire que l'échappement coûte le prix du moteur et le système AdBlue celui de la boîte de vitesses. Cette tendance sera encore plus marquée lors de l'introduction des futures normes EURO 7 et suivantes. En ce qui concerne le CO₂, gaz à effet de serre, la situation est encore plus complexe. La diminution des émissions est forcée par une double pénalité liée à un malus pour le consommateur et à une pénalité pour le constructeur dont la marque dépasse en moyenne une valeur fixée. L'évolution de cette limite est représentée ci-dessous [1] en fonction du poids des véhicules.



Objectifs CO2 en Europe [1]

On voit donc apparaître un changement dans la gamme des constructeurs avec la modification des hauts de gamme en hybrides rechargeables et l'introduction de véhicules électriques. Tous utilisent un onduleur et au moins un moteur électrique dans la chaîne de traction, ce qui deviendra rapidement le quotidien des techniciens de l'automobile. Cette technologie étant encore mal connue il est temps d'établir une stratégie pour enseigner les bases et suivre les dernières évolutions en termes de diminution des coûts ou amélioration du rendement.

Description

Pour comprendre le fonctionnement d'un moteur électrique il faut connaître au minimum les lois de bases en électricité et en magnétisme, à savoir:

- La loi d'Ohm [2]
- La loi des montages série et parallèle (Kirchhoff) [3]
- Le magnétisme dans une bobine [4]
- La loi de Lenz [5]
- La force de Laplace [6]

Ces lois sont cependant plus facilement explicables en utilisant des animations telles que celles proposées par [7][8].

Il est alors possible de s'intéresser aux technologies existantes en automobile à savoir :

- Le moteur électrique à courant continu ou DC
- L'onduleur pour moteur AC
- Le moteur électrique AC asynchrone ou à induction
- Le moteur électrique AC synchrone à aimants permanents
- Le moteur électrique AC synchrone à rotor bobiné
- Le moteur électrique AC synchrone à réluctance variable (sans aimant)
- Le moteur électrique AC synchrone à réluctance commutée (avec aimants)

Le moteur électrique DC est très connu, il est cependant intéressant à expliquer car il permet d'introduire la notion fondamentale de commutation, c'est-à-dire de définir quand le courant doit changer de sens pour conserver la continuité de la force qui agit sur le rotor. Cette commutation est ici mécanique via deux balais et un collecteur, elle intervient donc toujours au bon moment [9]. Cet avantage indéniable est cependant ruiné par une usure par frottement qui est inacceptable en traction automobile. Ce type de moteur est donc réservé à des voiturettes et à des accessoires.

Afin d'éviter les balais, il convient d'alimenter le moteur électrique directement en courant alternatif. Comme il serait trop compliqué et coûteux de générer un signal sinusoïdal au départ d'une batterie de traction, on va lui préférer l'usage d'un pont onduleur. Celui-ci est composé de transistors de puissance utilisés en mode saturé, soit ouvert soit fermé [10]. La représentation schématique du pont onduleur est visible ci-dessous. Son rôle est très important puisqu'il génère une tension alternative envoyée au moteur qui absorbe un courant quasiment sinusoïdal. Cette imperfection du courant peut fortement dégrader le rendement du moteur [11], c'est la raison pour laquelle la commande à 120°, avec 1/3 de période non contrôlée, est aujourd'hui remplacée par une commande PWM plus précise.

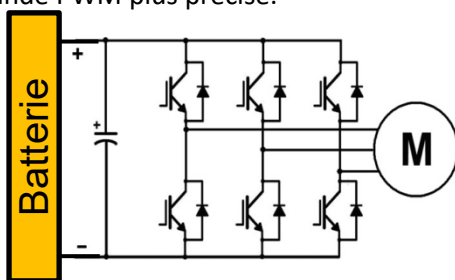
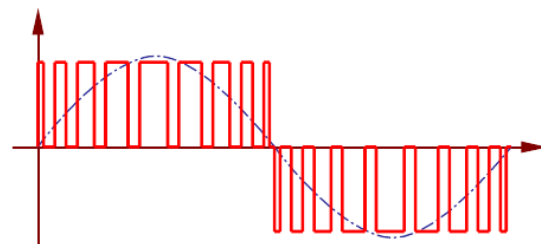


Schéma d'un pont onduleur



Tension issue d'une commande PWM



Onduleur d'une Toyota Prius (pile)

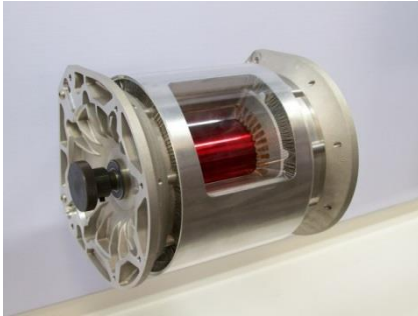


Onduleur d'une Toyota Prius (face)

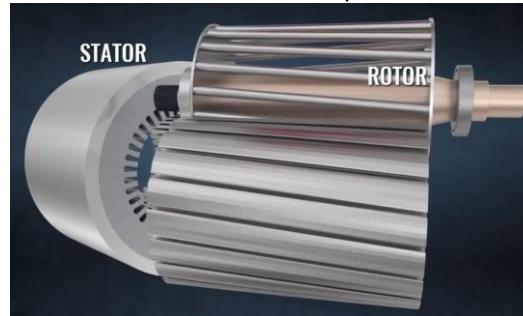
Une fois que nous sommes capables de générer un signal de tension pseudo sinusoïdal, celui-ci sera envoyé au stator d'une machine électrique AC afin d'alimenter successivement des bobines décalées dans l'espace et ainsi générer un champ magnétique tournant. Reste alors à insérer un rotor à l'intérieur du stator. Cette pièce tournante va suivre le champ magnétique et transmettre un couple mécanique via l'arbre de sortie. Voyons maintenant l'évolution des technologies appliquées

à l'automobile.

Le moteur asynchrone appelé aussi à cage d'écureuil ou encore à induction a été utilisé au début par le constructeur TESLA qui a donné une bonne image au véhicule électrique avec son modèle roadster. Il a ensuite construit la berline modèle S utilisant la même technologie de moteur asynchrone associé à un onduleur réversible [12]. Ce moteur fonctionne suivant le principe du rotor conducteur avec glissement, il tourne plus lentement que le champ magnétique du stator et ce déplacement relatif induit un courant électrique dont l'effet, par la loi de Lenz, est de s'opposer au glissement qui lui a donné naissance, ce qui génère une force et donc un couple.

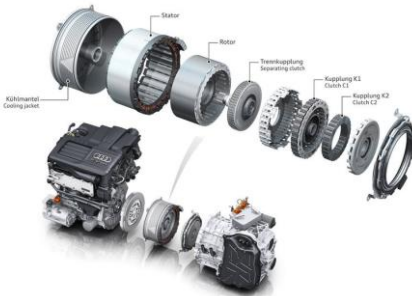


Moteur asynchrone TESLA S



constitution du rotor [12]

A peu près en même temps que TESLA, de grands constructeurs développent une voiture électrique utilisant un moteur synchrone, l'intérêt étant un meilleur rendement et une réversibilité de la machine électrique appelée dès lors MG pour moteur-générateur. Dans ce cas, le rotor est magnétique, accroché au champ tournant. Le rotor peut être constitué d'aimants permanents (ex. Nissan Leaf) ou de bobines alimentées en DC (ex. Renault Zoé). Il est indispensable d'équiper le moteur d'un résolveur ou de capteurs Hall afin de commander l'onduleur en boucle fermée et ainsi éviter le décrochage du rotor [13]. Les deux types de technologies offrent leur avantage, les rotors à aimant permanents sont très compacts et faciles à intégrer dans une boîte de vitesses d'un véhicule hybride. Les rotors bobinés évitent l'emploi de néodyme.

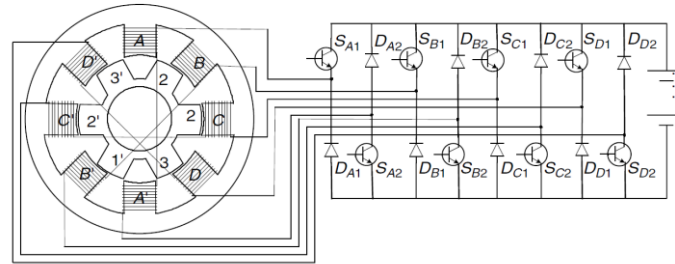


Moteur synchrone intégré (VAG)



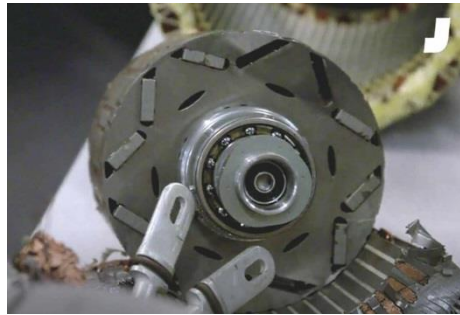
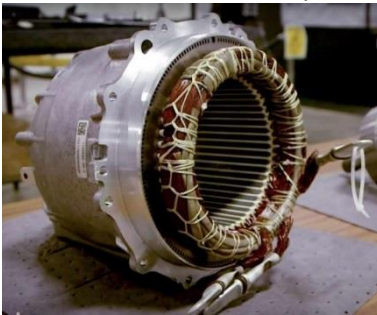
Rotor bobiné de Renault Zoé

Vient ensuite la question du coût de production associé à un bon rendement. Il faut idéalement réduire la quantité de terre rare utilisée et diminuer les pertes internes. C'est ainsi qu'est apparue en automobile la technologie du moteur à réluctance variable ou SRM. Cette technologie issue du moteur pas à pas est basée sur le principe de l'énergie minimum. Le rotor s'oriente pour faciliter le passage du champ magnétique dans un circuit fermé. Le moteur ne contient pas d'aimant, il est constitué d'un matériau ferromagnétique [14][15]. L'onduleur est dans ce cas plus simple et robuste [15].



Principe du moteur à réluctance variable et schéma d'onduleur [15]

Il est finalement possible comme TESLA vient de le démontrer avec le modèle 3 de construire un moteur électrique qui utilise à la fois le synchronisme à aimants permanents et la réluctance variable [16]. Le rendement est supérieur et la force de traction accrue.



Stator et rotor du moteur de la TESLA modèle 3 [16]

Sources d'information

- [1] <https://www.eea.europa.eu/>
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_d%27Ohm
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Lois_de_Kirchhoff
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Bobine_%28%C3%A9lectricit%C3%A9%29
- [5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lenz-Faraday
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Laplace
- [7] <https://www.walter-fendt.de/html5/phfr/>
- [8] <http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/induction/induction.htm>
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=q4yZDYWMzJo>
- [10] <https://www.youtube.com/watch?v=qPKjopJa4uU>
- [11] <https://www.auto-innovations.com/site/brevetech/onduleur.html>
- [12] <https://www.youtube.com/watch?v=3SAxXUIre28>
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=cJ87LSHgBfo>
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=LXJUYumwh-k>
- [15] Modern Electric, hybrid and FC vehicles, Mehrdad Ehsani
- [16] <https://www.auto-innovations.com/site/dossier5/tesla3model.html>