

MP22: Exemples de Conversion Électrique-Mécanique.

Augustin Ernoult, Raphaël Poryles

2012-2013

Références

- [1] P. Brenders et al. "Électrotechnique, Conversion de puissance, PSI", Les Nouveaux Précis Bréal.
- [2] R. Mérat "Physique Appliquée, Term Génie Électrotechnique", éd. Nathan
(utile en particulier pour la mesure de la puissance électrique sur le moteur asynchrone)

Table des matières

1	Génératrice à courant continu	1
1.1	Présentation de la machine à Courant Continu	1
1.2	Mesure de la force électromotrice	1
1.3	Mesure de la résistance interne	2
1.4	Relation entre le couple et le courant	3
1.5	Rendement et pertes	3
2	Moteur asynchrone	4
2.1	Principe de fonctionnement	4
2.2	Mesure du couple fourni	4
2.3	Mesure du rendement	5

Rapport du jury

- 2012 "Même si l'étude d'un haut-parleur relève du thème, il existe bien d'autres exemples, et souvent d'intérêt industriel (le moteur électrique est à l'ordre du jour). Il convient d'insister sur l'aspect quantitatif de la conversion électrique-mécanique."
- 2010 "Comme pour le montage 21 (Conversion de puissance électrique-électrique), la notion de point de fonctionnement nominal est importante. D'autre part, les modèles utilisés pour d'écrire les convertisseurs sont souvent trop simplifiés. Il faut être capable d'interpréter l'écart entre le système idéal et le système réel. L'intitulé change légèrement en 2011 afin de l'harmoniser avec celui du n 21 : conversion de puissance électrique-mécanique"
- 2007 "Un effort pédagogique incluant une approche physique des phénomènes impliqués dans le fonctionnement des moteurs permet d'éviter un montage constitué d'une série de mesures sans logique apparente"
- 2005 [2005] "Les hacheurs (même sous la forme série, la plus simple) ne sont pas utilisés pour alimenter les moteurs 'à courant continu.'"

Introduction

On a vue de manière théorique que les phénomènes d'induction (de Neumann ou de Lorentz) permettent de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique et que la force de Laplace permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Le but de ce montage est d'évaluer de manière quantitative ces deux types de conversion d'énergie à travers l'étude de deux systèmes : tout d'abord une machine à courant continue génératrice puis un moteur asynchrone.

Pour cela notre objectif va être d'établir le rendement de ces conversions d'énergie en essayant d'évaluer d'où viennent les pertes, ainsi que de mettre en exergue les limites des machines présentées ici.

1 Génératrice à courant continue

Dans toute cette partie le moteur asynchrone sera considéré comme une boîte noir, ayant pour unique rôle d'entraîner l'axe du rotor de la génératrice étudiée.

1.1 Présentation de la machine à Courant Continu

Il s'agit ici de présenter succinctement le phénomène physique utilisé ici : l'induction de Lorentz, et la technologie utilisé pour fabriqué un générateur.

Le principe de la génératrice est basé sur l'induction de Lorentz, c'est à dire qu'on déplace un circuit d'un conducteur dans un champ magnétique constant.

Ici le champ magnétique constant est généré par un circuit alimenté par un courant continu dit circuit **inducteur**. Ce circuit est fixe par rapport au laboratoire et est donc sur le **stator**. Le circuit mis en mouvement est un ensemble de bobines entourées autour d'un matériau féro-magnétique qui peut tourner autour de son axe et est donc appelé **rotor**. Dans ce circuit des courants sont induits par induction de Lorents, on l'appel alors le circuit de l'**induit**.

Un ingénieux système de balais et collecteur placé en bout de l'induit permet de "redresser" le courant au court de la rotation ce qui permet de récupérer un courant continu et de générer une puissance électrique non nulle en moyenne. Le rendement s'écrira alors :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_{meca} + \mathcal{P}_d} \quad (1.1)$$

où \mathcal{P}_e est la puissance électrique générée par la génératrice, \mathcal{P}_{meca} la puissance mécanique apportée à la génératrice et \mathcal{P}_d la puissance électrique fournie au circuit inducteur.

Avant toute chose il est intéressant de caractériser la machine en explicitant les relations qu'il existe entre les grandeurs mécanique et les grandeurs électrique. Dans la suite U est la tension de l'induit et I est le courant dans l'induit.

1.2 Mesure de la force électromotrice

Pour cela commençons par étudier la génératrice à vide (circuit de l'induit ouvert) afin de déterminer la force électromotrice de celle-ci en fonction de sa vitesse de rotation.

Théoriquement elle devra vérifier l'expression :

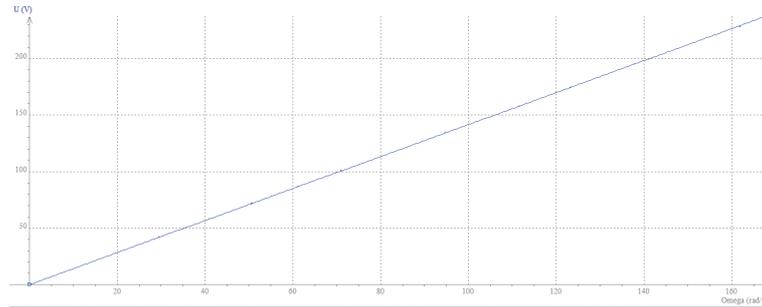
$$E_0(\Omega) = K\phi\Omega \quad (1.2)$$

où K est une constante dépendant de la géométrie du bobinage du rotor Ω est la vitesse de rotation du rotor en $rad.s^{-1}$ et ϕ est le flux magnétique à travers une spire du rotor. Cette mesure nous permet de trouver le coefficient $K\phi$ qui est caractéristique du moteur (tant que I_d et U_d restent constants, on veillera donc à garder les mêmes valeurs tout au long de cette partie).

Manipulation 1 :

On cherche donc ici à mesurer $U = E_0$ en fonction de Ω .

On commence ici par "fixer" les valeurs de I_d et U_d que l'ont mesure en permanence aux multimètres jusqu'à la fin de cette partie. On vérifie ainsi qu'il reste plus ou moins constant (ils varient un peu selon la vitesse de rotation, le courant induit etc...). En préparation on avait $I_d = 130 \pm 5mA$ et $U_d = 92,5 \pm 0,5V$: ces valeurs sont plus basses que les valeurs nominales pour permettre d'avoir une large possibilité de vitesse de rotations du rotor sans trop dépasser les valeurs nominales des grandeurs électrique dans le circuit induit (rotor).

FIGURE 1 – Force électromotrice E_0 en V , en fonction de la vitesse de rotation Ω en $rad.s^{-1}$.

On fait ensuite une série de mesure en jouant sur Ω avec l'excitation du moteur asynchrone.

On obtient en préparation $K\phi = 1,416 \pm 0,0003s.V.Wb^{-1}$.

1.3 Mesure de la résistance interne

Lors de son utilisation une génératrice n'est jamais vide, elle génère un courant qui est utilisé par les consommateurs. Pour simuler cette utilisation, on met maintenant un rhéostat de charge R_c en série avec le circuit de l'induit afin de pouvoir explorer la caractéristique de la génératrice (en modifiant R_c , on fait se balader le point de fonctionnement sur la caractéristique).

Cela nous permet aussi d'obtenir la résistance interne de l'induit r . En effet, on a :

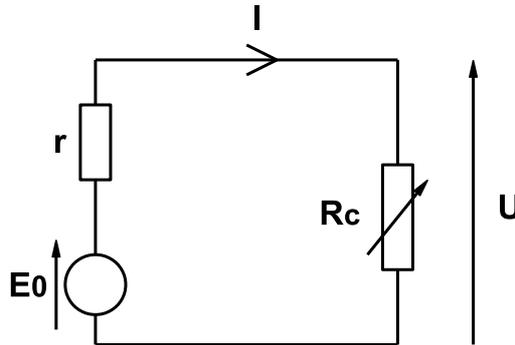


FIGURE 2 – Schema du circuit de l'induit.

$$U = R_c I = E_0 - rI \quad (1.3)$$

Manipulation 2 :

On cherche à tracer ici la courbe $U = f(I)$

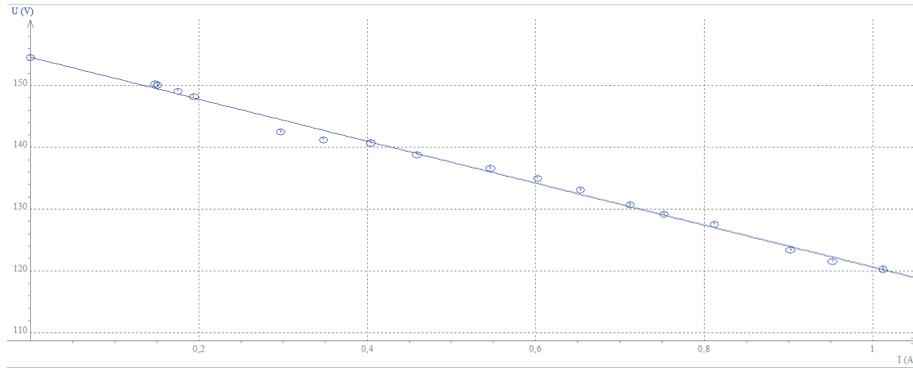
Pour cela on fixe $\Omega = cst$ et on fait varier R_c . Cela paraît simple dit comme ça mais lorsqu'on fait varier R_c on fait varier le couple résistant du moteur asynchrone et donc la vitesse du moteur, il ne faut donc pas être trop exigeant avec cette notion de vitesse "constante". En préparation on a pris $\Omega = 111,0 \pm 0,5 rad.s^{-1}$ (soit $1060 \pm 5 tr.min^{-1}$). Et le R_c conseillé sur la fiche du moteur soit $3 \times 330\Omega$.

Penser à continuer de mesurer I_d et U_d (on garde ici les mêmes valeurs que précédemment).

Penser aussi à mesurer C qui nous sera utile pour la suite. On mesure ainsi en préparation une résistance interne $r = 33,9 \pm 1,3\Omega$. On obtient une force électromotrice $E_0 = 154,6 \pm 0,8V$ alors qu'avec les coefficients de l'expérience précédente on devrait avoir pour cette vitesse de rotation plutôt $E_0 \approx 157V$, je ne sais pas trop comment expliquer cet écart...

On observe aussi parfois que l'on s'éloigne d'une relation affine pour les grands I . Cela s'explique par les phénomènes d'auto-induction qui apparaissent dans le rotor pour les courants élevés. Cet effet est parfois compensé par des *enroulements de compensations* placés sur le stator ([2]).

Maintenant que la caractéristique est tracée on peut remonter facilement à la puissance électrique générée par la génératrice.

FIGURE 3 – Tension au borne du rotor U (en V) en fonction du courant dans l'induit I (en A).

1.4 Relation entre le couple et le courant

On s'intéresse maintenant à l'influence du couple qui est exercé sur le rotor sur la puissance électrique. Pour cela on continue de travailler à vitesse constante et on observe la relation entre le couple et le courant. Ici on utilise les mesures faites précédemment pour retrouver une loi du type :

$$C = -K'\phi I - C_{frott} \quad (1.4)$$

Théoriquement le coefficient de proportionnalité devant ϕI est le même que celui trouvé pour $E_0 = K\phi I$. Mais cela s'obtient à partir de l'étude d'une génératrice parfaite où $\mathcal{P}_e = \mathcal{P}_{meca}$, ce qui n'est évidemment pas le cas ici (frottements, etc).

Manipulation 3 :

On trace la courbe $C = f(I)$ à partir des mesures faites précédemment. On en déduit la valeur de $K'\phi$; en

FIGURE 4 – Couple fourni C (en $N.m$), en fonction du courant Induit I (en A).

préparation on obtient $K'\phi = 1,48 \pm 0,01 N.m.A^{-1}.Wb^{-1}$. On remarque ici qu'on a $K' > K$, cet ordre n'était pas vraiment prévisible car il est due aux écarts à la machine parfaite du côté électrique et du côté mécanique ($K = K'$ si $\mathcal{P}_e = \mathcal{P}_{meca}$). Et on trouve un $C_{frott} = 30 \pm 8 mN.m$.

1.5 Rendement et pertes

On a maintenant tout ce qu'il faut pour tracer le rendement :

$$\eta = \frac{UI}{C\Omega + U_d I_d} = f(R_c) \quad (1.5)$$

Manipulation 4 :

Tracer $\eta = f(U/I) = f(R_c)$. A partir des mesures précédentes on obtient le rendement de la génératrice : Le rendement maximale ici est autour de 77% pour $R_c \approx 330\Omega$. Les différentes sources de dissipation de puissance sont :

- les pertes par effet Joules dans l'induit (ou pertes cuivre) évaluer à $\mathcal{P}_{Joules} = rI^2 \approx$ correspondent ici à environ 8% de l'énergie fournie au maximum de rendement.

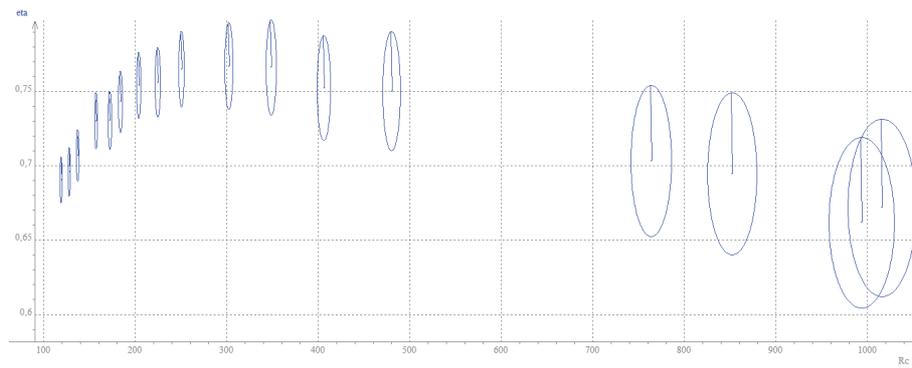


FIGURE 5 – Rendement η de la génératrice en fonction de la résistance de charge $U/I = R_c$ (en Ω).

- les pertes par frottements $\mathcal{P}_{frott} = C_{frott}\Omega$ correspondent ici à environ 4% de l'énergie fournie au maximum de rendement.
- les pertes par hystérésis (l'hystérésis du noyau de fer doux du rotor est possible à tracer pour appuyer cette hypothèse...)
- les pertes fer, etc

Conclure sur des exemples d'utilisations de ces moteurs et leur limitations. La principale limitation est la grande usure des balais qui subissent beaucoup de frottements. C'est pour ça que aujourd'hui, environ 95% des générateurs sont des alternateurs (machine synchrone).

2 Moteur asynchrone

Dans toute cette partie la machine à courant continu sera considérée comme une boîte noire, ayant pour unique rôle de pouvoir appliquer un couple résistif sur le rotor du moteur.

2.1 Principe de fonctionnement

Expliciter rapidement les principes physiques mis en jeu dans les moteurs synchrone (force de Laplace) et asynchrone (+ courant et moment magnétique induits), et les moyens technologiques utilisés.

Le principe des machines alternative en générale est de créer un champ magnétique tournant par rapport au laboratoire qui entraîne alors le rotor assimilable à un moment magnétique.

Pour créer un champ magnétique tournant, on utilise des spires dans l'axe du rotor (le grand axe parallèles à l'axe de rotation contrairement à l'illustration avec les 3 bobines), qui sont alimentées par des courants sinusoïdaux (ou au moins périodique) déphasés entre eux (ici on utilisera des signaux triphasé). On obtient alors un champ tournant avec un nombre entier de paires de pôles (au minimum une paire de pôle pour 3 bobines décalés de $2\pi/3rad$, alimentées par un courant triphasé).

Pour le rotor, on peut soit utilisé un aimant permanent, le rotor tourne alors à la même vitesse de le champ : on parle de moteur synchrone (réversible, par induction de Neumann). Ici, la solution utilisé est une "cage d'écureuil" : un ensemble de spire placé autour de l'axe du rotor reliée entre elles afin de faire un circuit fermé. Lorsque le champ magnétique tourne, il induit des courants dans le circuits par induction de Neumann. Les courants ainsi crée subissent alors une force de Laplace de la part du champ magnétique tournant, ce qui exerce alors un couple sur le rotor qui se met en rotation. Si le rotor atteint la vitesse de rotation du champ il n'y alors plus d'induction de Neumann, plus de courant induit, plus de force de Laplace et donc plus de couple. La vitesse de rotation du rotor est, en régime stationnaire, toujours au moins légèrement inférieur à la vitesse de rotation du champ, on parle alors de moteur asynchrone (non réversible).

Illustrations du fonctionnement avec les bobines et la cage d'écureuil ?

2.2 Mesure du couple fourni

La première partie de notre étude consiste à tracer la caractéristique du moteur c'est à dire à tracer le couple moteur C en $N.m$ en fonction de la vitesse de rotation du rotor Ω en $rad.s^{-1}$.

Manipulation 5 :

Ici on a décidé d'utiliser directement le générateur triphasé alimenté par EDF (qui sera de toute manière

obligatoirement utilisé pour la mesure du rendement) avec laquelle il est possible de faire varier l'amplitude, ce qui a été pour nous plus utile que de faire varier la fréquence.

Ici on fait varier Ω en faisant varier le couple résistif, c'est à dire en jouant sur la charge électrique de la machine à courant continu (R_c). Si l'amplitude du signal d'excitation du moteur est trop forte, il n'y a quasiment pas de variation de vitesse, d'où l'utilisation de l'alimentation EDF avec laquelle on peut choisir une amplitude adéquat (en préparation on a prix environ 20% de l'amplitude fourni par EDF).

On peut ainsi faire avec Synchronie une acquisition très rapide de $C = f(\Omega)$ en acquérant les signaux de sortie du tachymètre et du couple-mètre avec la carte d'acquisition.

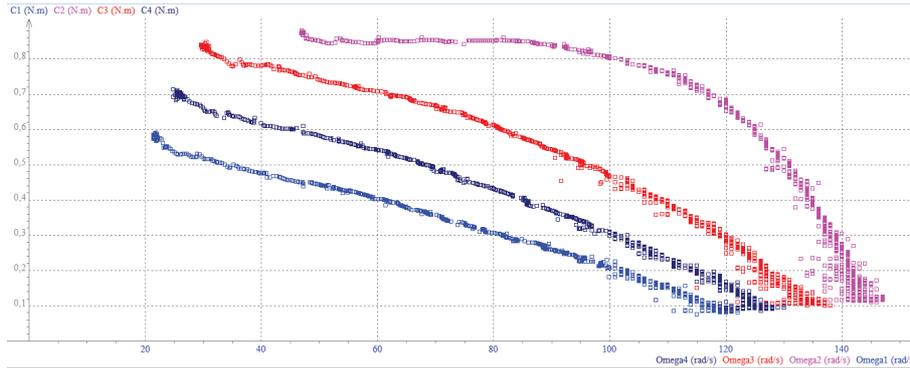


FIGURE 6 – Caractéristiques mécanique du moteur asynchrone : C le couple moteur (en $N.m$) en fonction de la vitesse de rotation Ω (en $rad.s^{-1}$).

On voit alors apparaitre une certaine partie de la caractéristique du moteur qui correspond à la partie stable. Grâce à cette acquisition rapide on peut aussi mettre en évidence l'intérêt des résistances ajoutées en série sur le rotor lors du démarrage. En effet, il apparait sur ces courbes que ces résistances permettent d'abaisser la courbe caractéristique et notamment de faire que le couple moteur maximale corresponde à des vitesses plus faible, ce qui aide au démarrage ([2]).

On peut aussi essayer d'évaluer la pulsation de synchronisation et de remonter au nombre de pôles grâce à la formule $\Omega_s = \omega/p$ ou ω est la pulsation du signal électrique d'entrée, Ω_s est la pulsation de synchronisation qui correspond à la vitesse de rotation du champ magnétique et p est le nombre de paire de pôle. En préparation on trouve $p = \Omega_s/\omega \approx 2$.

2.3 Mesure du rendement

On va maintenant s'intéresser à mesurer le rendement du moteur asynchrone soit :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{meca}}{\mathcal{P}_{elec}} \quad (2.1)$$

La puissance mécanique est assez facilement mesurable puisque $\mathcal{P}_{meca} = C\Omega$. Par contre la puissance électrique est ici plus difficilement mesurable, en effet on utilise une source de courant alternatif triphasé, et de plus le déphasage entre le courant et la tension dépendent de la vitesse et du couple du moteur.

Il existe heureusement un montage à 2 Wattmètres permettant de faire cette mesure ([2]) on aura alors : $\mathcal{P}_{elec} = \mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2$ où les \mathcal{P}_i sont les puissances affichées par les 2 Wattmètres.

Manipulation 6 :

Il est important ici d'utiliser le triphasé d'EDF sinon les Wattmètres ne mesures pas de bonnes valeurs car l'autre générateur fait des créneaux et non des sinusoïdes.

On fait ensuite une série de mesure en gardant la même intensité de l'alimentation du stator (la fréquence étant fixé à 50Hz par le réseau EDF), et pour différentes charges (en jouant sur la machine à courant continu et son rhéostat de charge R_c).

Je vous conseil de commencer par les plus grandes charges et de vérifier que le moteur ne "sature" pas (son couple sature en particulier) sinon le rendement va tendre vers 0 verticalement lorsqu'on le trace en fonction du couple, ce qu'on fait ici (on voit la saturation à droite du graphique). On observe en préparation un rendement maximale de 60% ce qui est bien mais pas top. On peut alors discuter les causes possible de pertes mais elles sont ici difficile à évaluer : pertes cuivre dans le stator, (ça on pourrait l'évaluer), pertes Joules dans le Rotor qui sont impossible à évaluer, pertes fer, pertes d'hystérésis, etc.

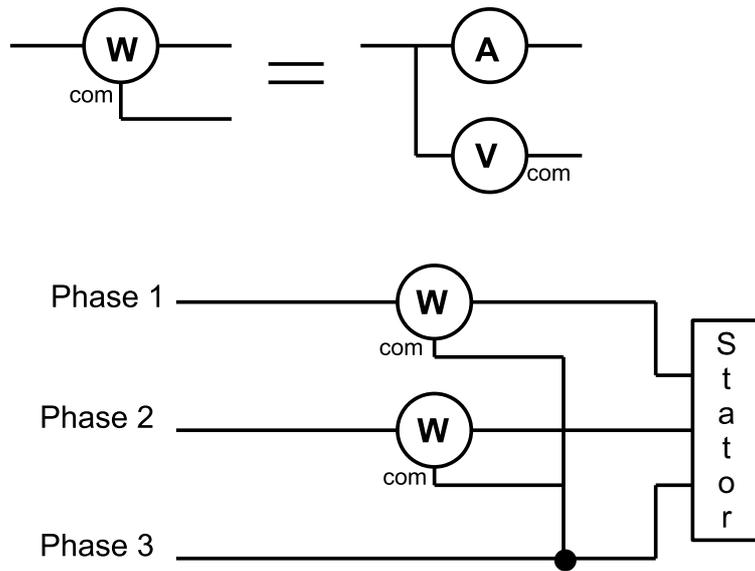
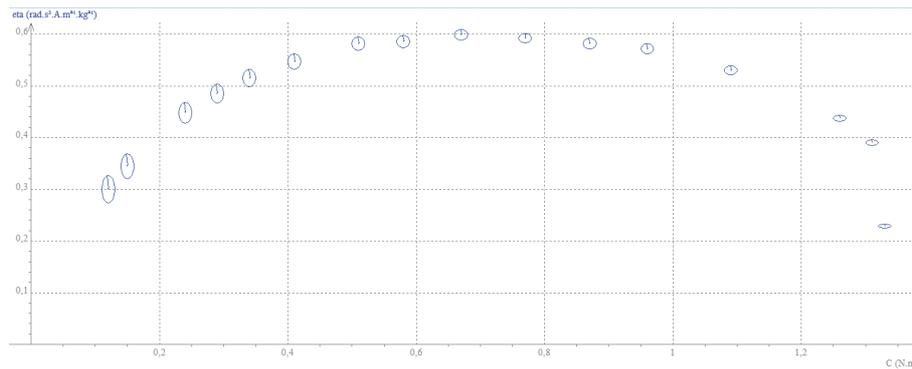


FIGURE 7 – Schéma du montage à 2 Wattmètres.

FIGURE 8 – Rendement η du moteur asynchrone en fonction du couple de charge C (en $N.m$).

On conclut par la grande utilisation de ce type de moteur, qui comme on l'a vu peut démarrer "tout seul" grâce à l'ajout judicieux de résistances sur le circuit du rotor. De plus on sait maintenant contrôler ces moteurs en vitesses grâce aux onduleurs. Et pour finir, le rotor n'ayant pas de contact électrique avec "l'extérieur" ces moteurs demandent peu d'entretien.

Conclusion

Les moteurs c'est super!